



HAL
open science

Amélioration des prévisions d'ensemble des débits sur la France de SAFRAN-ISBA-MODCOU

Guillaume Thirel

► **To cite this version:**

Guillaume Thirel. Amélioration des prévisions d'ensemble des débits sur la France de SAFRAN-ISBA-MODCOU. Hydrologie. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2009. Français. NNT: . tel-00460645

HAL Id: tel-00460645

<https://theses.hal.science/tel-00460645>

Submitted on 1 Mar 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THESE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *l'Université Toulouse III - Paul Sabatier*
Discipline ou spécialité : *Météorologie et Hydrologie*

Présentée et soutenue par *Guillaume Thirel*
Le 23 Novembre 2009

Titre : *Amélioration des prévisions d'ensemble des débits
sur la France de SAFRAN-ISBA-MODCOU*

JURY

Président du jury : *Serge Chauzy (Professeur émérite, Laboratoire d'Aérodynamique)*
Rapporteur : *Vincent Fortin (Professeur associé, Environnement Canada)*
Rapporteur : *Vazken Andréassian (Ingénieur en Chef, CEMAGREF)*
Examineur : *Olivier Thual (Professeur, INPT/CERFACS)*
Examineur : *Pierre Ribstein (Professeur, Université Pierre et Marie Curie)*
Directeur de thèse : *Eric Martin (Ingénieur en Chef, CNRM/Météo-France)*

Ecole doctorale : *Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace*
Unité de recherche : *CNRM/GAME Météo-France/CNRS*
Directeur(s) de Thèse : *Eric Martin*

Remerciements

Mes remerciements vont tout d'abord à Eric Martin, mon directeur de thèse pendant ces trois années. Merci à toi d'avoir rendu ces trois années agréables et scientifiquement intéressantes, et merci pour ta grande disponibilité.

Merci aussi à Joël Noilhan, qui a initié l'idée de réaliser des prévisions d'ensemble de débits avec la chaîne SIM, ainsi que de tester une assimilation de débits observés. Je remercie aussi Eric Brun et Philippe Bougeault, les deux directeurs successifs du CNRM.

Merci aux membres du jury d'avoir accepté d'en faire partie, à savoir le président du jury, Serge Chauzy du Laboratoire d'Aérodynamique, les deux rapporteurs Vincent Fortin (Environnement Canada) et Vazken Andréassian (CEMAGREF), ainsi que les deux examinateurs, Olivier Thual (CERFACS) et Pierre Ribstein (Université Pierre et Marie Curie).

Comment ne pas remercier aussi Fabienne Regimbeau, dont j'ai utilisé et continué les travaux de thèse. Merci à toi de m'avoir "enseigné" les prévisions d'ensemble de débits, ainsi que l'utilisation de SIM. Merci aussi pour les nombreuses conversations, à base de football, de chats et de Gabrielle ! Bonne continuation à toi ainsi qu'à Matthieu et Gabrielle.

Merci aussi aux "assimilateurs" qui m'ont aidé à mettre en place le système d'assimilation des débits. Merci donc à Jean-François Mahfouf (CNRM), Sophie Ricci et Sébastien Massart (CERFACS), d'avoir suivi régulièrement et orienté mon travail, corrigé mes erreurs, et répondu à mes nombreuses questions de débutant en assimilation durant ces trois années. Sans vous, on n'aurait pas pu réaliser tout ça.

L'utilisation du coupleur PALM du CERFACS a permis de réaliser de nombreuses expériences, et a donc apporté aussi beaucoup à la qualité de ce travail. Merci donc à Thierry Morel et Anthony Thévenin pour le débogage relatif à mon utilisation de PALM, et pour l'assistance au passage de l'application sur le supercalculateur NEC de Météo-France.

Merci à Sylvie Donier, que j'ai embêtée régulièrement pour divers problèmes techniques ou informatiques et qui a toujours su les résoudre, ainsi que pour sa bonne humeur. Merci à Florence Habets pour son expertise hydrologique sur le modèle MODCOU, et pour reprendre le flambeau de l'assimilation dans SIM. Merci Maria-Helena Ramos pour notre coopération SIM-GR ainsi que les discussions plus ou moins philosophiques que nous avons pu avoir. Merci à Clément Albergel, pour les discussions sur l'assimilation de données et pour m'avoir aidé à déménager. Merci à Régine Darros pour son aide au niveau administratif, et à Laurent Jacquin et Daniel Olcèse en ce qui concerne l'Ecole Doctorale.

Enfin, je remercie toute l'équipe actuelle ou passée du couloir, Jean-Christophe, Pierre,

Stéphanie, Arnel, Christoph, Stevie, Dominique, Patrick, Aude, Grégoire, Jean-Louis, Vincent... ainsi qu'à l'équipe s'occupant de SIM de l'autre côté de la passerelle, Jean-Michel, Laurent, Jean-Philippe, Martine, Michèle, et j'en oublie sûrement...

Résumé

Si l'utilisation des prévisions d'ensemble en météorologie est maintenant bien développée, leur utilisation en hydrologie est en revanche assez récente. Depuis une dizaine d'années, des projets ont été lancés afin de mettre en place des prévisions probabilistes de débits pour pallier les déficiences inhérentes aux prévisions déterministes. On peut par exemple citer le projet international HEPEX, ainsi que le système européen d'alerte des crues EFAS. A Météo-France, le modèle hydro-météorologique SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM), qui est distribué sur la France, a servi de base à une prévision d'ensemble hydrologique utilisant l'EPS du CEPMMT (échéance 10 jours).

L'objectif de cette thèse était d'améliorer les performances de ce système de prévisions d'ensemble de débits.

Pour cela, la première étape a été d'utiliser la Prévision d'Ensemble ARPEGE (PEARP) de Météo-France (en remplacement de l'EPS du CEPMMT) afin de quantifier son impact à courte échéance. Une étude statistique comparative des forçages météorologiques désagrégés ainsi que des prévisions de débits a été réalisée. Si le forçage PEARP est globalement de meilleure qualité que celui de l'EPS du CEPMMT, les prévisions de débits donnent des résultats plus nuancés. Cependant, on note une amélioration sur les forts débits et les plus petits bassins en utilisant la PEARP.

La seconde étape de cette thèse a été d'améliorer les états initiaux des prévisions d'ensemble de débits, c'est-à-dire d'améliorer la chaîne SIM-analyse qui initialise le système ensembliste. Pour cela, une assimilation des débits a été implémentée sur un peu moins de 200 des 900 stations de SIM. Elle a pour but d'améliorer les simulations de débits en ajustant l'humidité du sol. On a utilisé pour cela le coupleur dynamique de codes de calcul PALM (développé par le CERFACS), ainsi que la méthode du Best Linear Unbiased Estimator (BLUE). Plusieurs configurations ont été testées et ont montré une amélioration nette des prévisions de débits, notamment pour les débits les plus forts.

Enfin, la dernière étape a été de quantifier l'impact de cette assimilation de débits sur les deux systèmes de prévisions d'ensemble des débits précédemment cités. On a pour cela choisi la configuration d'assimilation qui donnait le meilleur résultat global sur la chaîne SIM-analyse. On a notamment montré une amélioration significative des scores probabilistes, même pour des seuils élevés (Q98, Q99).

Les améliorations apportées aux prévisions d'ensemble SIM sont particulièrement importantes dans le cadre de leur utilisation en opérationnel par le Service Central D'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI).

Table des matières

1	Introduction	11
2	Le modèle SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU)	17
2.1	Revue de différents modèles hydro-météorologiques	18
2.1.1	DHSVM	18
2.1.2	VIC	19
2.1.3	MESH	19
2.1.4	LISFLOOD	19
2.2	Le système d'analyse météorologique SAFRAN	20
2.3	Le schéma de surface ISBA	22
2.3.1	Présentation	22
2.3.2	Les paramètres d'ISBA	24
2.3.3	Les variables pronostiques d'ISBA	25
2.4	Le modèle hydrogéologique MODCOU	34
2.4.1	Définition de la structure hydrologique	34
2.4.2	Calcul du bilan hydrique	35
2.4.3	Les transferts conjoints superficiels et souterrains	35
2.5	Le couplage SAFRAN-ISBA-MODCOU	39
2.6	La chaîne SIM France	41
2.6.1	Construction de la chaîne SIM France	41
2.6.2	Validation de la chaîne SIM France	43
2.6.3	La chaîne SIM France opérationnelle	46
3	Les prévisions d'ensemble hydrologiques	49
3.1	Présentation générale des prévisions d'ensemble en météorologie et hydrologie, ainsi que des méthodes de vérification	51
3.1.1	La prévision d'ensemble météorologique	51
3.1.2	Application des prévisions d'ensemble à l'hydrologie	54
3.1.3	Outils de vérification des prévisions d'ensemble	58
3.2	La chaîne de prévisions d'ensemble des débits de Météo-France	66
3.2.1	Prévisions d'ensemble hydrologiques à Météo-France	66
3.2.2	La désagrégation spatiale des prévisions d'ensemble météorologiques de l'EPS du CEPMMT	68
3.2.3	Optimisation du temps de traitement et de calcul et du volume des entrées et sorties	69

3.2.4	Les performances de la chaîne de prévisions d'ensemble des débits SIM à moyen terme (chaîne CEPMMT)	69
3.3	Conclusion	72
4	Amélioration des prévisions d'ensemble de débits à courte échéance grâce à la Prévision d'Ensemble ARPEGE (PEARP)	75
4.1	Fonctionnement de la chaîne de prévisions d'ensemble des débits basée sur la PEARP de Météo-France	76
4.2	Désagrégation des prévisions météorologiques PEARP	78
4.3	Etude comparative des chaînes SIM-CEPMMT et SIM-PEARP	78
4.3.1	Résumé de l'article	78
4.3.2	Article paru dans le Journal of HydroMeteorology	80
4.4	Comparaison des prévisions d'ensemble de débits issues des modèles GR (CEMAGREF) et SIM, forcés par la PEARP	97
4.4.1	Le modèle GR3P du CEMAGREF	98
4.4.2	Les bassins versants étudiés	99
4.4.3	Résultats de la comparaison statistique	100
4.4.4	Conclusion	102
4.5	Conclusion	103
5	Un système d'assimilation des débits dans SIM	105
5.1	L'assimilation de données	106
5.1.1	La méthode du Best Linear Unbiased Estimator (BLUE)	107
5.1.2	Le filtre de Kalman étendu (EKF)	109
5.1.3	Le filtre de Kalman d'ensemble (EnKF)	109
5.1.4	Le filtre particulaire	110
5.1.5	Assimilation variationnelle	110
5.2	Etat de l'art de l'assimilation en hydrologie	111
5.3	Méthodologie appliquée pour SIM	112
5.3.1	Stations de mesure assimilées	112
5.3.2	Méthodologie du système d'assimilation des débits dans SIM avec le BLUE	113
5.3.3	Méthodologie de l'estimation de la Jacobienne \mathbf{H}	126
5.3.4	L'algorithme	130
5.4	Implémentation dans PALM	131
5.4.1	Le logiciel PALM	132
5.4.2	Description de l'application dans PALM de l'assimilation des débits dans SIM	133
5.5	Conclusion	135
6	Apport de l'assimilation dans SIM analyse	137
6.1	Résumé de l'article	138
6.2	Article soumis a Hydrology and Earth System Sciences	139
6.3	Conclusion	177

7	Apport de l'assimilation dans les prévisions d'ensemble hydrologiques	179
7.1	Impact de l'assimilation des débits sur des simulations quotidiennes à 10 jours de SIM	181
7.2	Impact de l'assimilation des débits pour les prévisions d'ensemble à 10 jours SIM-CEPMMT	183
7.2.1	Exemples de tracés de débits	184
7.2.2	Dispersion de l'ensemble et RMSE	185
7.2.3	Brier Skill Score et Ranked Probability Skill Score	186
7.2.4	Décomposition du score de Brier	189
7.2.5	Diagrammes de rang	192
7.2.6	Diagrammes de fiabilité	194
7.2.7	Taux de succès, fausses alarmes, bonnes prévisions, non prévisions et courbes de ROC	195
7.2.8	Scores par taille de bassin	201
7.2.9	Scores par saison	202
7.2.10	Conclusion	203
7.3	Impact de l'assimilation des débits pour les prévisions d'ensemble à courte échéance	204
7.3.1	Exemples de tracés de débits	205
7.3.2	Dispersion de l'ensemble et RMSE	206
7.3.3	Brier Skill Score et Ranked Probability Skill Score	207
7.3.4	Décomposition du score de Brier	209
7.3.5	Diagrammes de rang	212
7.3.6	Diagrammes de fiabilité	212
7.3.7	Taux de succès, fausses alarmes, bonnes prévisions, non prévisions et courbes de ROC	214
7.3.8	Scores par taille de bassin	220
7.3.9	Scores par saison	222
7.3.10	Conclusion	223
7.4	Conclusion	224
8	Conclusions et perspectives	229
A	Annexe A : Short and medium-range hydrological ensemble forecasts over France <i>(Thirel et al. (2010c), Atmospheric Science Letters)</i>	235

Chapitre 1

Introduction

Les enjeux humains et économiques des inondations deviennent de plus en plus importants.

En effet, la population mondiale ne cesse de s'accroître. Ainsi, de nombreux logements et entreprises ou industries sont installés dans les zones proches des cours d'eau, voire dans des zones inondables. On estime par exemple qu'environ 40% des 150 millions d'habitants du Bangladesh vit en zone inondable. En France aussi les dégâts et catastrophes liés aux inondations sont nombreux. Par exemple, la crue de la Seine en 1910 représente le plus important débordement de ce fleuve, sur la majeure partie de sa vallée. La crue de la Seine a duré 10 jours, et sa décrue 35 jours, et fut provoquée par des importantes précipitations liquides et solides. Des milliers de logements furent touchés. Plus récemment, dans le Sud-Est de la France, la crue de l'Ouvèze du 22 septembre 1992 reste tristement célèbre. 37 personnes furent tuées du fait d'une crue rapide provoquée par des cumuls de pluie intenses. Des valeurs de 300 *mm* en moins de 4H furent par exemple relevées à proximité du village de Vaison-la-Romaine (moyenne mensuelle : 80 *mm*). Au niveau du pont romain, l'eau atteindra 17 *m*, soit 15 *m* de plus que la hauteur normale de la rivière.

Cette anthropisation des zones dites à risques (un tiers des communes françaises sont situées en zone à risque) rend très importante la supervision des phénomènes pouvant provoquer les inondations, ainsi que l'organisation des secours. En effet, quand un bassin de plusieurs milliers de vies est concerné, les délais sont souvent très courts pour intervenir. De plus, le coût financier des dégâts occasionnés est très souvent important (250 millions d'euros par an en France, http://www.eaufrance.fr/spip.php?rubrique187&id_article=709). Il est donc préférable, à la fois du point de vue économique et humain, de prendre les mesures en amont, plutôt que d'avoir à réparer les dégâts.

C'est pourquoi, depuis les prévisions météorologiques, en passant par les modèles hydrologiques et par l'organisme gérant la coordination des alertes, et en allant jusqu'aux experts locaux et autorités locales (préfecture, gendarmerie, pompiers), il est nécessaire que la chaîne menant à l'alerte des individus et des biens menacés soit en tout point efficace.

Malgré les progrès de ces dernières années, les prévisions météorologiques ainsi que les modèles hydrologiques ont toujours des faiblesses qui rendent leur utilisation ou interprétation parfois délicate. En effet, la nature chaotique de l'évolution de l'atmosphère fait qu'une prévision peut dériver de l'évolution réelle de la situation. De plus, il est difficile d'estimer les états

initiaux des modèles atmosphériques précisément (observations manquantes ou entachées d'erreurs). C'est pourquoi une vision ensembliste de la prévision météorologique s'est imposée ces dernières années. Ainsi, une estimation probabiliste de l'incertitude des prévisions peut être donnée, et donc permettre d'améliorer les prévisions et leur utilisation.

En ce qui concerne les prévisions hydrologiques, la limitation de leur qualité vient de la difficulté de paramétrer correctement ces modèles, de bien prendre en compte la topographie, ou de disposer d'états initiaux adéquats. De plus, les erreurs commises sur les prévisions météorologiques, et plus spécialement celles commises sur les précipitations, se répercutent directement sur les prévisions hydrologiques. Par exemple, la mauvaise localisation d'un événement de pluie peut changer le bassin versant dans lequel cette eau s'écoulera. Il est donc là aussi important d'avoir une indication sur la fiabilité et sur l'incertitude des prévisions produites. C'est pourquoi la voie ensembliste se développe de plus en plus dans le domaine de l'hydrologie.

Un autre point d'amélioration possible des prévisions de débits concerne les états initiaux. En effet, il est commun dans la communauté météorologique d'utiliser des méthodes d'assimilation afin de coller au plus près aux observations diverses tout en tenant compte des erreurs liées aux mesures des observations. Cependant, ces méthodes ne sont que peu utilisées dans le cadre de l'hydrologie à l'heure actuelle, et les études sont encore rares pour le moment.

Sur le plan international, le programme HEPEX (The Hydrologic Ensemble Prediction Experiment) est un projet international visant à rassembler les communautés météorologique et hydrologique, afin d'établir un projet de recherche sur le thème des prévisions hydrologiques ensemblistes. Ses thèmes principaux se situent au niveau de l'utilisation des prévisions d'ensemble météorologiques, de l'amélioration des prévisions d'ensemble hydrologiques, en particulier en ce qui concerne son incertitude, et de la manière d'utiliser ces prévisions d'ensemble hydrologiques pour l'utilisateur final. Ces trois thèmes décrivent la quasi-totalité de la chaîne d'alerte des crues telle qu'elle a été décrite plus haut. Dans ce cadre, diverses expériences sont menées sur des bassins et zones variés dans plusieurs pays.

En Europe, le projet EFAS (European Flood Alert System) de l'Union Européenne vise à mettre à disposition de l'ensemble des pays européens membres, des prévisions ensemblistes de débits homogénéisées. Ce projet a été initié suite aux crues dévastatrices du Danube en 2002. Il conjugue à la fois des recherches sur le thème des prévisions d'ensemble de débits, et l'amélioration de la fourniture, en cas d'alerte, à l'ensemble des pays membres, des prévisions de débits produites. Outre l'amélioration proprement dite de la qualité des prévisions, le projet EFAS vise aussi à proposer des sorties exploitables le plus facilement possible aux utilisateurs finaux, par le biais par exemple de codes couleur simples.

Le projet MAP D-PHASE (Mesoscale Alpine Programme, Demonstration of Probabilistic Hydrological and Atmospheric Simulation of flood Events in the Alpine region) est un projet du WWRP (World Weather Research Programme du WMO (World Meteorological Organization)). Il a pour but de montrer les capacités d'un système d'alerte de crues qui fournit des prévisions déterministes et ensemblistes de débits. L'échéance visée est la courte échéance (1-2 jours) et la moyenne échéance (3-5 jours). Les modèles hydrologiques fournis par les utilisateurs de divers pays "alpains" ont été implémentés sur certains des bassins étudiés, et alimentés par certaines des prévisions météorologiques disponibles. Cette phase

de démonstration a montré de bonnes performances, et va continuer sur un nombre réduit de bassins suisses, grâce au soutien des autorités de protection civile et de MeteoSwiss.

Enfin, de nombreux pays tentent aussi de mettre en place de tels systèmes opérationnels de manière indépendante, afin de fournir des prévisions probabilistes aux services d'alerte locaux.

Toutes ces expériences permettent de faire progresser les performances des modèles hydrologiques et d'améliorer les prévisions de débits à des échelles diverses.

De plus, elles ont mis en lumière l'intérêt de l'approche ensembliste des prévisions de débits par rapport à l'approche déterministe, du fait de ses performances plus élevées. La possibilité de disposer, grâce à l'approche ensembliste, d'une estimation de la qualité de la prévision, et donc de l'incertitude qui régit cette prévision, permet en effet au prévisionniste de mieux anticiper l'évolution possible des crues. Enfin, grâce à cette amélioration des prévisions due à la vision ensembliste, l'échéance des prévisions peut être allongée.

La modélisation hydro-météorologique est engagée depuis de nombreuses années à Météo-France, avec notamment le développement et la validation de la chaîne hydro-météorologique SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM).

Ce système est le couplage de trois modèles différents :

- SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements A la Neige, *Durand et al. (1993), Durand (1995)*) est un système d'analyse météorologique. Il a pour but de fournir différents paramètres météorologiques nécessaires à ISBA (précipitations liquides et solides, température à 2 m, vent à 10 m, rayonnements, humidité de l'air et nébulosité). Cette analyse est réalisée à partir d'observations de surfaces et d'analyses de sorties de modèles.

- ISBA (Interactions entre le Sol, la Biosphère et l'Atmosphère, *Noilhan and Planton (1989)*) est un schéma de surface. ISBA a pour rôle de simuler les bilans hydriques et énergétiques entre le sol et l'atmosphère. Il utilise des données de végétation et d'occupation du sol, ainsi que les paramètres fournis par SAFRAN, afin de réaliser ces calculs.

- MODCOU (MODèle COUplé, *Ledoux et al. (1984)*) est un modèle hydrogéologique. Il simule les transferts hydrologiques de surface, souterrains, ainsi que les échanges entre les nappes aquifères et les rivières.

La chaîne SIM a été appliquée et validée tout d'abord sur des grands bassins français : le Rhône (*Etchevers (2000)*), l'Adour-Garonne (*Morel (2003)*) et enfin la Seine (*Rousset-Regimbeau (2007)*). Ces travaux ont montré la capacité de la chaîne SIM à reproduire les bilans d'eau et d'énergie sur ces bassins, ainsi qu'à simuler de manière satisfaisante les débits sur les rivières de ces bassins. L'adaptation de SIM a été faite sur la France entière et sa validation (*Habets et al. (2008)*) a été réalisée sur une période de 10 années. Elle a montré une très bonne simulation de la plupart des débits ainsi que des scores (critère de Nash) élevés, excepté dans les zones montagneuses, où les débits sont trop influencés notamment par les barrages hydro-électriques.

Suite à ces travaux, Météo-France a désiré développer une application nouvelle basée sur SIM : les prévisions d'ensemble de débits, à moyenne échéance. C'est pourquoi *Rousset-Regimbeau (2007)* a mis en place et validé lors de sa thèse la première application ensembliste basée sur le modèle SIM, chaque membre météorologique servant à produire un membre hydrologique. Ainsi, les prévisions d'ensemble météorologiques à 10 jours d'échéance de l'EPS

(Ensemble Prediction System) du CEPMMT (Centre Européen pour la Prévision Météorologique à Moyen Terme) ont été utilisées en tant que forçage de SIM. Cette chaîne répond à l'attente des utilisateurs d'une meilleure anticipation des conditions hydrologiques extrêmes (à la fois en ce qui concerne les crues et les étiages). La chaîne de prévisions d'ensemble de débits est désormais une chaîne qui tourne en temps réel quotidiennement. Elle a été validée par *Rousset-Regimbeau (2007)*, montrant une faible dispersion des débits notamment aux premières échéances, ainsi que des scores (calculés par rapport aux débits d'analyse de SIM) très bons pour quasiment toutes les stations et tous les seuils considérés.

Cependant, les prévisions d'ensemble de débits à courte échéance, notamment à cause de la faible dispersion des ensembles hydrologiques, restent difficilement exploitables alors que la courte échéance est un aspect très important pour les prévisionnistes. Ceci est dû au fait que l'EPS du CEPMMT est dédié à la moyenne échéance. C'est pourquoi le premier objectif de ma thèse a été d'améliorer les prévisions d'ensemble de débits à courte échéance. Pour cela, il a été choisi d'utiliser des prévisions d'ensemble dédiées à la courte échéance, la PEARP (Prévision d'Ensemble ARPEGE) de Météo-France, en lieu et place de l'EPS du CEPMMT. Le second objectif a été d'améliorer les états initiaux des deux chaînes de prévisions d'ensemble, grâce à une assimilation de débits observés. En effet, la chaîne SIM-analyse n'était jusque là jamais recalée par des observations de débits.

La première partie de mon manuscrit est constituée de l'introduction générale (Chap. 1), la description du modèle SIM (Chap. 2), ainsi que des prévisions d'ensemble à moyenne échéance mises en place par *Rousset-Regimbeau (2007)* (Chap. 3). Ensuite, la description de l'utilisation de la PEARP en remplacement de l'EPS du CEPMMT afin de mettre en place un système de prévisions d'ensemble de débits à courte échéance, est décrite. Les prévisions d'ensemble hydrologiques ainsi créées ont été validées et comparées à celles obtenues par *Rousset-Regimbeau (2007)* grâce à l'EPS du CEPMMT, sur les deux premiers jours d'échéance en commun des deux systèmes. Cette comparaison statistique utilisant une nouvelle fois comme référence les débits de SIM-analyse pour les débits, et l'analyse SAFRAN pour les précipitations, a fait l'objet d'une publication dans le *Journal of HydroMeteorology (Thirel et al. (2008))*.

La seconde partie de ma thèse a été consacrée au développement d'un système d'assimilation des débits. Le but du Chap. 5 a donc été d'implémenter ce système d'assimilation des débits dans la chaîne SIM-analyse, afin de proposer des états initiaux plus performants aux deux chaînes de prévisions d'ensemble de débits. Pour cela, le coupleur dynamique de codes de calcul PALM du CERFACS a été utilisé, et on a implémenté ce système en se servant de l'estimateur BLUE (Best Linear Unbiased Estimator). Ce système a été décrit et validé dans différentes configurations par rapport à des observations de débits, et a fait l'objet d'une soumission à *Hydrology and Earth System Sciences (Thirel et al. (2010a))* (Chap. 6).

Enfin, la dernière partie de ma thèse (Chap. 7) a concerné la quantification de l'apport des états assimilés créés par le système d'assimilation, sur les prévisions d'ensemble de débits. Ainsi, les prévisions de débits utilisant la PEARP et l'EPS du CEPMMT ont été initialisées par des états initiaux issus de l'assimilation de débits. Les prévisions d'ensemble de débits à 10 jours d'échéance utilisant l'EPS du CEPMMT ont donc été cette fois-ci validées par rapport à des observations de débits, et non plus par rapport à des débits de SIM-analyse. Enfin, les deux systèmes SIM-PEARP et SIM-CEPMMT ont à nouveau été comparés entre eux (par

rapport aux observations de débits) afin de déterminer de quelle manière chacun est influencé par les nouveaux états initiaux. Ce travail a fait l'objet d'une soumission à Hydrology and Earth System Sciences.

Chapitre 2

Le modèle SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU)

Introduction

La modélisation hydrométéorologique est engagée depuis plusieurs années à Météo-France, avec le développement et la validation de la chaîne SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM) au Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), ainsi que son utilisation pour des besoins opérationnels à la Direction de la Climatologie (DP/DCLIM/HYDRO).

Le schéma de surface Interactions Surface Biosphère Atmosphère (ISBA, *Noilhan and Planton (1989)*) a été développé au CNRM. Initialement, il avait pour objectif le couplage avec des modèles de circulation générale, pour l'étude du climat ou pour la prévision numérique opérationnelle, avec de fortes contraintes numériques. ISBA est le schéma de surface du modèle de climat de Météo-France ARPEGE-CLIMAT, et il est opérationnel depuis 1998 dans les modèles de prévision de Météo-France ARPEGE et ALADIN, et dans le modèle de prévision AROME depuis fin 2008. Il a été progressivement enrichi, en particulier en ce qui concerne l'hydrologie.

ISBA est couplé au modèle hydrogéologique MODCOU (MODèle COUplé, *Ledoux et al. (1984), Ledoux (2003), Habets (1998)*), développé par le Centre d'Informatique Géologique de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, devenu depuis Centre de Géosciences de Mines-Paristech.

Un tel couplage permet de valider à l'échelle régionale les différents processus d'écoulement paramétrisés par le modèle (superficiels et souterrains). Les débits intègrent en effet cette information et sont facilement comparables à des observations grâce à un réseau assez dense de stations de mesure en France.

Le couplage entre ISBA et MODCOU a été initié en 1998 sur les bassins de l'Adour et du Rhône (*Habets (1998)*). Ces deux modèles sont complétés par le système SAFRAN pour l'analyse des paramètres météorologiques de surface, afin de constituer la chaîne SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU).

Après avoir été validée sur trois grands bassins versants français, le Rhône (*Etchevers (2000)*), l'Adour-Garonne (*Morel (2003)*) et la Seine (*Rousset-Regimbeau (2007), Rousset et al. (2004)*), la chaîne SIM a été étendue et validée à l'ensemble de la France (*Habets et al. (2008)*). De plus, elle est en partie exploitée de façon opérationnelle à Météo-France, afin de fournir un suivi en temps réel des composantes des bilans d'eau et d'énergie, en particulier des réserves en eau du sol. C'est sur cette chaîne hydrométéorologique qu'ont reposé les travaux de cette thèse.

Les trois composantes de SIM, leur couplage ainsi que l'extension de la chaîne SIM à la France entière vont être décrits dans cette partie du manuscrit, après une brève revue des principaux modèles hydrologiques utilisés dans la communauté scientifique.

2.1 Revue de différents modèles hydro-météorologiques

2.1.1 DHSVM

DHSVM (Distributed Hydrology Soil Vegetation Model) est un modèle hydro-météorologique à échelle régionale développé à l'Université de Washington (pour plus d'informations,

voir : <http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/DHSVM/index.shtml>).

Ce modèle distribué a une échelle assez fine (quelques dizaines/centaines de mètres, paramètre réglable par l'utilisateur). Il comprend l'interception par la canopée, l'évaporation, la transpiration, et l'accumulation et la fonte de la neige, de même que la génération du ruissellement via un mécanisme d'excès de saturation (*Wigmosta et al. (1994)*).

2.1.2 VIC

VIC (Variable Infiltration Capacity) est un modèle hydro-météorologique distribué à large échelle développé à l'Université de Washington (description complète disponible sur <http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/>).

Il comprend un schéma de surface à mailles régulières et homogènes qui simule des processus sous-maille (*Liang et al. (1994)*, *Liang (1994)*). VIC utilise un forçage météorologique classique (précipitations, température, vent...) afin de simuler les cycles de l'eau et d'énergie. Enfin, il utilise le modèle hydrologique de Lohmann (*Lohmann et al. (1996)*, *Lohmann et al. (1998)*) afin de réaliser le routage en rivière, par le biais d'hydrographes et des équations de Saint-Venant.

2.1.3 MESH

MESH (Modélisation Environnementale Communautaire - Surface et Hydrologie) est un modèle hydrométéorologique régional développé à Environnement Canada (*Pietroniro et al. (2007)*).

Il inclut 3 modèles de surface : un modèle force-restore, une version du modèle ISBA (*Noilhan and Planton (1989)*), une version du schéma de Surface Canadien (CLASS, Canadian Land Surface Scheme, *Verseghy (2000)*), ainsi que le modèle hydrologique WATFLOOD (*Kouwen et al. (1993)*). Il a été calibré et validé sur la région des Grands Lacs (*Pietroniro et al. (2007)*).

2.1.4 LISFLOOD

LISFLOOD est un modèle hydrométéorologique distribué sur l'ensemble de l'Europe sur une maille de 5 km et développé au Joint Research Center (le manuel de l'utilisateur est disponible ici : http://natural-hazards.jrc.ec.europa.eu/downloads/pdf/ec_jrc_lisfloodUserManual_JvdK-AdR.pdf).

C'est un modèle semi-physique, qui sert notamment à la prévision des crues, le changement climatique, ainsi que l'occupation du sol. Il comprend un schéma de surface simulant le cycle de l'eau, ainsi qu'un modèle hydrologique utilisant les équations de l'onde cinématique. Ce modèle est utilisé dans le cadre du système européen d'alerte des crues (EFAS).

Malheureusement, aucune étude comparative n'existe entre ces différents modèles. C'est pourquoi, suite aux nombreuses années de développement, d'expertise et d'utilisation en opérationnel de SIM à Météo-France, ce modèle a logiquement été choisi dans le cadre de ma thèse. Ses trois composantes, leur couplage, ainsi que l'application SIM-France vont être décrites ici.

2.2 Le système d'analyse météorologique SAFRAN

Le système SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige) a été développé à l'origine dans le cadre de la prévision du risque d'avalanches sur le massif alpin (*Durand et al. (1993), Durand (1995)*). Il avait pour but d'analyser, sur les zones de relief, des paramètres météorologiques de surface : la température de l'air à 2 m, le vent à 10 m, l'humidité de l'air, les précipitations solides et liquides, la nébulosité totale, et les rayonnements solaire (direct et diffus) et infrarouge, au pas de temps horaire, et avec une discrétisation verticale variable (généralement fixée à 300 m).

Par la suite, ce système a été étendu sur la France entière, afin de fournir une analyse du forçage atmosphérique sur l'ensemble du territoire (*Etchevers (2000); Le Moigne (2002)*). L'analyse des paramètres météorologiques effectuée par SAFRAN sur la France ainsi que sa validation ont été décrites en détail dans *Quintana Seguí et al. (2008)*.

SAFRAN ne travaille pas sur un maillage régulier, mais sur des "massifs", c'est-à-dire des zones géographiquement et climatiquement homogènes. C'est le zonage SYMPOSIUM II de Météo-France qui est utilisé.

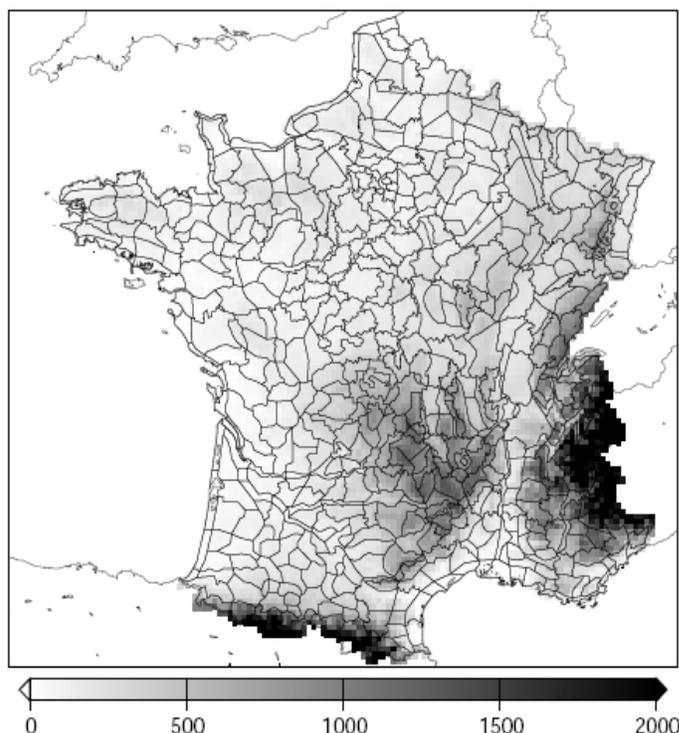


FIGURE 2.1 – Carte des zones SAFRAN sur la France et altitude des mailles ISBA (en m)

Sur l'ensemble de la France, il y a 615 zones SAFRAN, de forme irrégulière, d'une surface en général inférieure à 1000 km², et sur lesquelles les gradients horizontaux climatologiques (en particulier de précipitations) et d'altitude sont faibles. Ces zones sont représentées sur la

figure 2.1.

Le système SAFRAN fait appel à la fois à des observations et à des sorties de modèles (analyses ARPEGE ou CEPMMT) pour réaliser son analyse. A partir de ces données, il fournit pour chaque massif des profils verticaux des paramètres météorologiques au pas de temps horaire (figure 2.2).

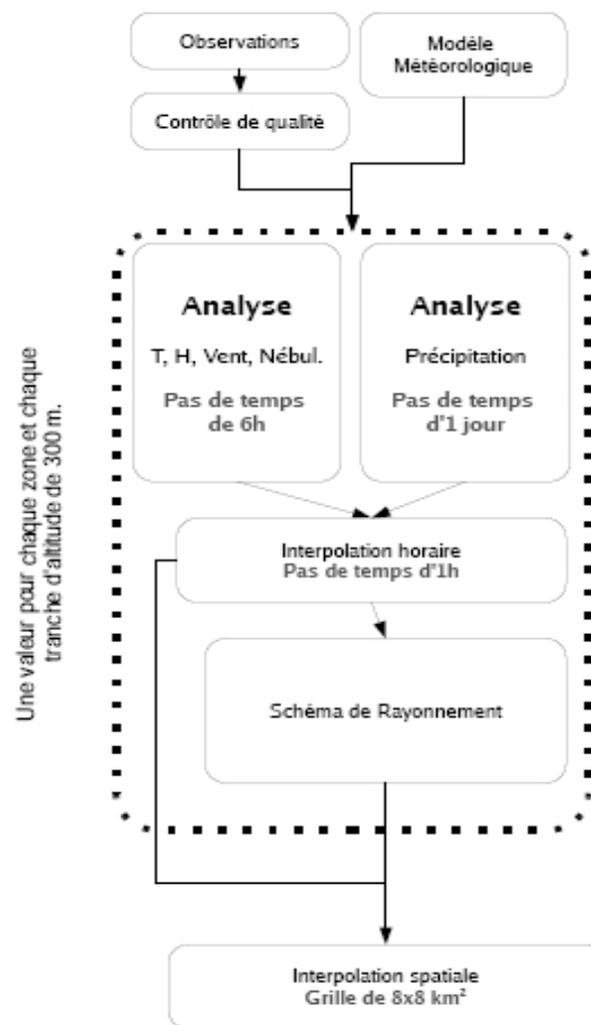


FIGURE 2.2 – Schéma simplifié du fonctionnement de l'analyse météorologique SAFRAN

L'analyse SAFRAN se fait en plusieurs étapes :

- Analyse des profils verticaux de température, vent, humidité, rayonnement et nébulosité :

Pour chaque massif, une ébauche du modèle est comparée aux observations aux niveaux où ont été faites ces mesures, afin de vérifier la cohérence des observations et d'éliminer les

observations douteuses. Ensuite, l'analyse des paramètres est effectuée à l'aide des observations valides et de l'ébauche en utilisant la technique de l'interpolation optimale, au pas de temps de 6H, et avec une résolution verticale de 300 m.

Le cas du rayonnement est traité d'une autre manière. En effet, en raison de la trop faible densité de postes météorologiques fournissant des observations de rayonnement (atmosphérique et solaire), ces derniers sont calculés à l'aide d'un modèle de transfert radiatif (*Ritter and Geleyn (1992)*). Ce modèle utilise les profils verticaux analysés de température et d'humidité, permettant l'estimation d'un profil de nébulosité.

- Analyse des précipitations :

L'analyse des précipitations est faite au pas de temps journalier (à 0600 UTC), afin de pouvoir prendre en compte les points de mesure où seules des observations journalières sont disponibles. Ici, l'ébauche n'est pas fournie par des modèles : SAFRAN utilise un gradient climatologique moyen (*Etchevers (2000)*).

- Interpolation horaire :

L'ensemble des paramètres est interpolé au pas de temps horaire. Cette interpolation se fait de manière linéaire, sauf pour la température et les précipitations.

Pour la température, les variations diurnes sont estimées à l'aide du rayonnement solaire et d'un terme de rappel à l'équilibre (*Martin (1988)*). La température à 2 m à 1200 UTC est corrigée en fonction de la température maximale observée.

La répartition horaire des précipitations est déterminée à partir de l'humidité spécifique. La limite pluie/neige est estimée à partir de l'altitude de l'isotherme $0.5^{\circ}C$ issue de l'analyse de la température, altitude ajustée si besoin par les observations de pluie et de neige dans la zone concernée.

A l'issue de ces étapes, SAFRAN fournit des analyses horaires des paramètres météorologiques sur l'ensemble des massifs, sous forme de profils verticaux de résolution 300 m.

- Interpolation spatiale :

Ces données sont ensuite interpolées sur la grille régulière à 8 km sur laquelle travaille ISBA. Chaque maille appartient à un massif SAFRAN donné, pour lequel on connaît le profil vertical des paramètres météorologiques. Une maille ISBA ayant une altitude connue, l'interpolation se fait entre les deux niveaux SAFRAN entourant cette altitude (distants de 300 m).

2.3 Le schéma de surface ISBA

2.3.1 Présentation

Le schéma de surface ISBA a été développé afin de simuler les échanges d'eau et d'énergie entre le sol, la végétation et les basses couches de l'atmosphère. C'est un schéma de transfert Sol-Végétation-Atmosphère (SVAT). Il est couplé avec les modèles opérationnels de prévision

numérique utilisés à Météo-France : ARPEGE, ALADIN, AROME, mais aussi avec des modèles comme ARPEGE-climat (modèle de circulation générale), Méso-NH (modèle de méso-échelle non-hydrostatique), ou MODCOU (modèle hydrogéologique) (voir le principe de ce dernier couplage dans le paragraphe 2.5).

ISBA utilise la méthode *force-restore* pour déterminer l'évolution de l'eau et de la température dans le sol. Cette méthode est une simplification des principes physiques décrivant les transferts de l'eau et de l'énergie dans le sol. L'évolution de la température et de l'eau dans le sol est régie par l'action d'une contrainte (*force*) et sont rappelées vers une situation dite d'équilibre (*restore*).

Au cours du temps, la physique d'ISBA a été complétée. *Mahfouf and Noilhan (1996)* ont introduit un drainage gravitationnel dans la version initiale du modèle à deux couches pour le sol. Puis, ont été introduits successivement : un schéma de neige simplifié (*Douville et al. (1995)*), une végétation interactive avec l'environnement (*Calvet et al. (1998)*), une troisième couche dans le sol (*Boone et al. (1999)*), les effets de la glace (*Boone (2000)*), un drainage sous-maille (*Habets et al. (1999a)* et *Etchevers et al. (2001)*), une description du ruissellement sous-maille (*Habets et al. (1999b)*), un schéma de neige explicite à 3 couches (*Boone and Etchevers (2001)*) et un profil exponentiel de conductivité hydraulique (*Decharme et al. (2006)*).

Dans SIM, on utilise la version d'ISBA *force-restore* à trois couches pour le sol (*Boone et al. (1999)*) avec le schéma de neige explicite à 3 couches (*Boone and Etchevers (2001)*). Deux bilans d'énergie sont donc calculés, le premier sur le sol et la végétation, et le second sur la neige. On peut voir sur la figure 2.3 le principe de fonctionnement d'ISBA. Les variables et paramètres d'ISBA sont détaillées ci-dessous.

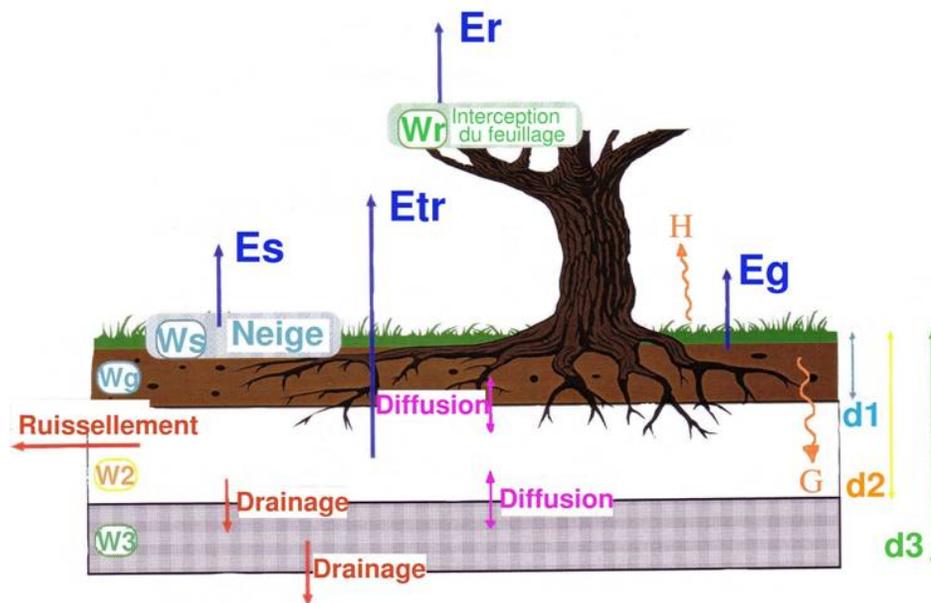


FIGURE 2.3 – Schéma des flux simulés par le modèle de surface ISBA

2.3.2 Les paramètres d'ISBA

Les paramètres en entrée d'ISBA sont classés en deux catégories :

1. Les paramètres primaires, c'est-à-dire le type de sol (via les pourcentages de sable et d'argile), et le type de végétation.

2. Les paramètres secondaires : à partir de l'information texturale du sol décrite ci-dessus, on peut estimer d'autres paramètres à l'aide de relations continues (*Noilhan and Lacarrère (1995)*). Ces paramètres sont :

(a) Les paramètres liés au sol :

On les détermine à partir des relations de *Clapp and Hornberger (1978)* et du type de sol. Ils sont au nombre de 3 :

- le contenu en eau du sol à la saturation w_{sat} (en m^3/m^3), c'est le contenu en eau maximal du sol ou porosité. Sous ce seuil, il y a drainage gravitationnel, jusqu'à ce que le contenu en eau diminue et atteigne la capacité au champ.

- le contenu en eau du sol à la capacité au champ w_{fc} (en m^3/m^3), à partir duquel le drainage gravitationnel devient très faible. Sous ce seuil, l'eau peut être utilisée par la plante par absorption par les racines, mais il y a stress hydrique, jusqu'à ce que le contenu en eau atteigne le point de flétrissement.

- le contenu en eau du sol au point de flétrissement w_{wilt} (en m^3/m^3). Sous ce seuil, l'eau contenue dans le sol est inutilisable par les plantes, car elle forme des films très minces autour des particules du sol et les forces capillaires deviennent supérieures au pouvoir d'extraction des racines.

On définit alors la réserve utile RU par le produit de la différence entre capacité au champ et point de flétrissement, par la profondeur racinaire d_2 :

$RU = d_2 \times (w_{fc} - w_{wilt})$. Elle représente la quantité d'eau disponible pour la plante.

(b) Les paramètres liés à la végétation :

- la fraction de végétation dans la maille veg ($0 \leq veg \leq 1$).

- l'indice foliaire LAI (Leaf Area Index) est le rapport entre la surface de feuilles vertes et la surface du sol.

- la résistance stomatique minimale R_{smin} est définie comme la résistance au transfert de l'eau des racines vers les feuilles dans un environnement optimal (rayonnement solaire important, sol très alimenté en eau, air saturé et température optimale).

- les longueurs de rugosité dynamique z_{0m} et thermique z_{0h} interviennent dans les équations de flux de la couche limite, et représentent les influences liées à la hauteur de la végétation sur les échanges turbulents avec l'atmosphère.

- les profondeurs des trois couches de sol : d_1 , d_2 et d_3 . La couche de surface a une profondeur d_1 au maximum de 1 cm et contrôle l'évaporation du sol nu. Elle fait partie de la couche racinaire de profondeur d_2 qui permet de définir la quantité d'eau utilisable par la plante (RU). Enfin, la dernière couche a une épaisseur $d_3 - d_2$, d_3 étant la profondeur totale du sol.

(c) Enfin, à cette liste s'ajoutent l'albedo α et l'émissivité ϵ de la surface.

2.3.3 Les variables pronostiques d'ISBA

ISBA calcule l'évolution temporelle de 11 variables pronostiques :

- T_s, T_2 : températures respectivement de surface et profonde.
- w_g, w_2, w_3, w_r : contenus en eau respectivement de la couche de surface, de la zone racinaire, du réservoir profond et du réservoir d'interception de la pluie par la végétation.
- w_{sf} et w_{2f} : les équivalents en eau du réservoir de glace respectivement à la surface et dans la zone racinaire.
- W_s, D_s et H_s : le manteau neigeux est discrétisé en trois couches pour lesquelles sont définis respectivement l'équivalent en eau, l'épaisseur, et la quantité de chaleur stockée par la neige.

La version d'ISBA utilisée possède trois réservoirs d'eau dans le sol (ISBA-3L, Boone *et al.* (1999)). Pour établir le bilan hydrique, ISBA calcule la quantité d'eau interceptée par la végétation (w_r), l'équivalent en eau du manteau neigeux total (W_s), la quantité d'eau présente dans le sol (w_g, w_2 et w_3), ainsi que les flux d'eau ruisselée (Q_r), drainée (D) et évaporée, par la surface du sol nu d'une part (E_g et sublimation de la neige E_s), et par la végétation d'autre part (transpiration E_{tr} et évaporation de l'eau interceptée E_r).

Le bilan d'énergie d'ISBA fait intervenir le rayonnement net (donnée d'entrée), le flux de chaleur sensible (H), le flux de chaleur latente (lié aux différents termes d'évaporation), et le flux de conduction dans le sol (G).

C'est le terme de chaleur latente (i.e. d'évaporation) qui permet de coupler ces deux bilans. Le détail de ce fonctionnement est donné ci-dessous.

Aspect énergétique

1. Les équations d'évolution de T_s et T_2 :

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = C_T(R_n - H - LE) - \frac{2\pi}{\tau}(T_s - T_2) \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{1}{\tau}(T_s - T_2) \quad (2.2)$$

La température de surface (équation 2.1) évolue à la fois sous l'influence du flux de chaleur dans le sol $R_n - H - LE = G$ (avec R_n bilan radiatif à la surface, H et LE les flux de chaleur

sensible et latente), et d'un terme de rappel à la température du sol profond T_2 . Le coefficient C_T est la capacité thermique de l'ensemble sol-végétation.

La température profonde T_2 (équation 2.2) est la moyenne journalière de la température de surface ; son évolution dépend d'un terme de rappel vers T_s avec une constante de temps $\tau = 1$ jour.

2. Les différents termes du bilan énergétique :

Rayonnement solaire

Il s'exprime par la relation suivante :

$$R_n = R_G(1 - \alpha_t) + \epsilon(RAT - \sigma T_s^4), \quad (2.3)$$

$$\text{avec : } \begin{cases} T_s & \text{la température unique du milieu sol-végétation-neige} \\ \sigma & \text{la constante de Stefan-Boltzmann} \\ \alpha_t & \text{l'albédo total (sol, végétation et neige)} \\ R_G(1 - \alpha_t) & \text{le rayonnement solaire descendant absorbé} \\ \epsilon RAT & \text{le rayonnement atmosphérique absorbé} \\ \epsilon \sigma T_s^4 & \text{les radiations infrarouges émises par la surface.} \end{cases}$$

Flux de chaleur sensible

H est le flux de chaleur sensible, LE le flux de chaleur latente (évaporation) et G le flux de conduction dans le sol (stockage de chaleur dans le sol). Ces flux sont déterminés par des lois aérodynamiques :

$$H = \rho_a C_p C_H V_a (T_s - T_a) \quad (2.4)$$

où C_p est la chaleur spécifique de l'air. C_H est un coefficient d'échange qui dépend de la stabilité thermique de l'atmosphère et des rugosités z_{0m} et z_{0h} .

Flux de chaleur latente

Le flux de chaleur latente est décrit par la suite, car il décrit le lien entre bilan énergétique et bilan hydrique.

La gestion de l'eau

1. Les équations d'évolution de w_g , w_2 , w_3 et w_r

$$\frac{\partial w_g}{\partial t} = \frac{C_1}{\rho_w d_1} (P_g - E_g - F_{gw}) - \frac{C_2}{\tau} (w_g - w_{geq}), \quad \text{avec } 0 \leq w_g \leq w_{sat} \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial w_2}{\partial t} = \frac{1}{\rho_w d_2} (P_g - E_g - E_{tr} - F_{2w}) - D_{r1} - D_{f1}, \quad \text{avec } 0 \leq w_2 \leq w_{sat} \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial w_3}{\partial t} = \frac{d_2}{d_3 - d_2} (D_{r1} + D_{f1}) - D_{r2}, \quad \text{avec } 0 \leq w_3 \leq w_{sat} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial w_r}{\partial t} = vegP - E_r - R - r, \quad \text{avec } 0 \leq w_r \leq w_{rmax} \quad (2.8)$$

où ρ_w est la masse volumique de l'eau.

Les termes de drainage D_{r1} et D_{r2} sont définis par :

$$D_{r1} = \frac{C_3 d_3}{d_2 \tau} \max[w_{drain}, (w_2 - w_{fc})] \quad (2.9)$$

$$D_{r2} = \frac{C_3 d_3}{\tau(d_3 - d_2)} \max[w_{drain}, (w_3 - w_{fc})] \quad (2.10)$$

(voir le paragraphe ci-après sur *Le drainage gravitationnel*), et la diffusion entre la zone profonde et la zone racinaire est exprimée par :

$$D_{f1} = \frac{C_4}{\tau} (w_2 - w_3) \quad (2.11)$$

L'évolution du contenu en eau du réservoir d'interception w_r (équation 2.8) dépend du taux de précipitations P et de l'évaporation du réservoir E_r . Lorsque w_r excède le contenu maximal w_{rmax} , une quantité R_r est ruisselée vers la surface ($w_{rmax} = 0.2 \times LAI \times veg$). La partie des précipitations qui n'est pas interceptée ($(1 - veg)P$) atteint le sol nu, une partie de cette eau ruisselle en surface (Q_r), et seule la quantité $P_g = (1 - veg)P + R_r - Q_r$ s'infiltré dans le sol.

Le contenu en eau de surface w_g (équation 2.5) évolue en fonction du flux d'eau de surface (les précipitations P_g qui s'infiltreront, l'évaporation du sol nu E_g , et le flux F_{gw} d'eau se transformant en glace), et de la diffusion vers la couche inférieure (rappel vers le contenu en eau w_{geq} à l'équilibre entre les forces de gravité et de capillarité). Les coefficients C_1 et w_{geq} ont été calibrés, ils dépendent de la texture du sol et du contenu en eau.

Le contenu en eau de la zone racinaire w_2 (équation 2.6) (incluant le réservoir de surface) évolue en fonction d'un terme source, le taux de précipitations infiltrées P_g , et de plusieurs termes puits : l'évaporation du sol nu E_g , la transpiration E_{tr} , l'eau se transformant en glace F_{2w} , le drainage gravitationnel vers la couche profonde et les échanges d'eau par capillarité entre ces deux couches.

La zone profonde (équation 2.7) est alimentée en eau par le drainage depuis la zone racinaire (D_{r1}), en perd par sa base par drainage gravitationnel (D_{r2}) et peut en échanger par diffusion avec la couche racinaire (D_{f1}).

Les coefficients C_2 , C_3 et C_4 ont été calibrés et dépendent uniquement de la nature du sol.

2. Le bilan hydrique dans ISBA

L'équation du bilan hydrique sur une durée t est :

$$\sum Pr\acute{e}cipitations = \sum Evaporation + \sum Ruissellement + \sum Drainage + \Delta w \quad (2.12)$$

Δw représente la variation du stock d'eau dans le réservoir total, il a été décomposé réservoir par réservoir dans le paragraphe précédent. Détaillons les autres termes :

- L'évaporation :

Elle résulte de la somme de plusieurs termes :

$$E = E_g + E_v + E_s + E_{gi} + E_{sl} \quad (2.13)$$

où E_g est l'évaporation du sol nu, E_v celle provenant de la végétation, E_s le flux d'évaporation du manteau neigeux (sublimation si $E_s > 0$), E_{gi} le flux de sublimation de la glace, et E_{sl} le flux d'évaporation de l'eau liquide contenue dans la neige.

Par ailleurs, on obtient ainsi le flux de chaleur latente :

$$LE = LE_g + LE_v + L_g(E_s + E_{gi} + E_{sl}), \quad (2.14)$$

avec L et L_g la chaleur spécifique d'évaporation et de sublimation.

. L'évaporation du sol nu : E_g

Ce terme est donné par les expressions suivantes :

$$E_g = (1 - veg)\rho_a C_H V_a (h_u q_{sat}(T_s) - q_a), \quad si \quad q_{sat}(T_s) > q_a \quad (2.15)$$

$$E_g = (1 - veg)\rho_a C_H V_a (q_{sat}(T_s) - q_a), \quad si \quad q_{sat}(T_s) < q_a \quad et \quad T_s < T_a \quad (2.16)$$

avec ρ_a et V_a la densité de l'air et la vitesse du vent, C_H un coefficient d'échange, $q_{sat}(T_s)$ l'humidité spécifique à saturation à la température T_s , q_a l'humidité spécifique de l'air, et h_u l'humidité relative de la surface du sol dépendant du contenu en eau du sol et de la capacité au champ.

L'équation 2.16 décrit en fait le flux de rosée correspondant à $E_g < 0$.

. L'évapotranspiration de la végétation : E_v

Ce terme en regroupe en fait deux : l'évaporation de l'eau interceptée par le feuillage (E_r) et la transpiration de la végétation (E_{tr}). On a donc : $E_v = E_r + E_{tr}$.

Le flux d'évaporation de l'eau interceptée par la végétation est donné par la formule suivante :

$$E_r = veg\rho_a \frac{\delta}{R_a} [q_{sat}(T_s) - q_a], \quad où \quad R_a = \frac{1}{C_H V_a} \quad (2.17)$$

avec δ la fraction de feuillage recouverte d'eau. On considère (d'après *Deardorff (1978)*) que :

$$\delta = \left(\frac{w_r}{w_{rmax}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.18)$$

Le flux de transpiration des plantes s'écrit :

$$E_{tr} = veg\rho_a \frac{1 - \delta}{R_a + R_s} [q_{sat}(T_s) - q_a] \quad (2.19)$$

Dans cette équation, R_s est la résistance de surface à la diffusion de l'eau. Elle est calculée suivant la méthode de *Jarvis (1976)* dont la formule est :

$$R_s = \frac{R_{smin}}{LAI} F_1 F_2^{-1} F_3^{-1} F_4^{-1} \quad (2.20)$$

Les fonctions F_1 , F_3 et F_4 caractérisent les contraintes exercées par l'environnement sur le flux de transpiration (rayonnement solaire, température de l'air, déficit de saturation de l'atmosphère). La fonction F_2 caractérise le stress hydrique de la plante et dépend de la capacité

au champ, du point de flétrissement et du contenu en eau du sol de la zone racinaire.

. La sublimation de la neige : E_s , voir le chapitre suivant sur *Le schéma de neige*.

- Le drainage gravitationnel :

Le drainage gravitationnel est le flux d'eau (vers le bas) qui a lieu à la base de la zone racinaire et du réservoir profond. Il est exprimé sous forme d'un rappel à la capacité au champ (cf équations 2.9 et 2.10), de la forme suivante :

$$D = -\frac{C_3 d_3}{\tau d} \max[w_{\text{drain}}, (w - w_{fc})] \quad (2.21)$$

Si on suppose que seul le drainage fait évoluer le contenu en eau du sol w , sa décroissance est exponentielle jusqu'à la capacité au champ où le drainage vaut w_{drain} .

Une expression de C_3 , vitesse de rappel à la capacité au champ, a été définie par *Noilhan and Mahfouf (1996)* :

$$C_3 = \frac{5.327 X_{\text{clay}}^{-1.043}}{d} \quad (2.22)$$

w_{drain} est un écoulement de base (ou "drainage sous-maille") qui permet de soutenir les débits d'étiage et qui n'intervient que lorsque $w < w_{fc}$. Il permet de simuler l'influence de nappes aquifères non explicitement résolues, sa valeur doit donc être nulle lorsque le domaine souterrain est modélisé (couplage avec le modèle MODCOU, voir le chapitre 2.5). Ce mécanisme a été introduit dans ISBA afin de simuler les débits en saison sèche. Il peut produire un drainage linéaire relativement faible pour des valeurs de contenu en eau du sol relativement petites (*Caballero et al. (2007a)*). La valeur de ce w_{drain} dépend de la texture du sol et est de l'ordre de quelques millimètres par jour. Il est calibré sur chacun des bassins considérés.

On s'intéresse tout d'abord aux bassins-amonts monitorés, et on détermine la valeur du w_{drain} grâce à la formule suivante (*Caballero et al. (2007b)*) :

$$Q_{cM} = w_{\text{drain}} M \times \frac{A_{\text{cell}}}{T_0} \times \sum_i (C_{3i} \times d_{3i} \times A_i) \quad (2.23)$$

avec A_{cell} la surface d'une maille ISBA (8×8 km), T_0 valant 86400s, C_{3i} comme défini ci-dessus (équation 2.22) pour chacune des mailles, d_{3i} la profondeur du sol, et A_i la surface de la maille incluse dans le bassin considéré. Q_c est la moyenne d'un certain nombre des plus faibles débits de ces bassins, calculée sur une longue période.

Pour déterminer le w_{drain} des bassins en aval de bassins monitorés, on utilise les débits d'étiage moyens amont (Q_{cU}) que l'on relie aux débits d'étiage moyens aval (Q_{cD}) :

$$Q_{cD} = Q_{cU} + w_{\text{drain}} D \times \frac{A_{\text{cell}}}{T_0} \times \sum_j (C_{3j} \times d_{3j} \times A_j) \quad (2.24)$$

. Le profil exponentiel de la conductivité hydraulique dans le sol :

Une version améliorée de la physique de l'eau dans le sol d'ISBA a été implémentée par

Quintana Seguí et al. (2009). Cette amélioration n'est pas, à l'heure actuelle, présente dans la version opérationnelle de SIM-analyse, ni dans les divers systèmes de prévisions d'ensemble. Par la suite de cette thèse, elle sera éventuellement utilisée dans le cadre de l'assimilation de données ou dans certains des systèmes de prévisions d'ensemble de débits initialisés par des états assimilés. Cela sera précisé à ce moment-là si le profil exponentiel de la conductivité hydraulique dans le sol est inclus dans l'un ou l'autre des systèmes. Nous allons donc brièvement le décrire ici.

L'équation 2.22 introduite par *Noilhan and Mahfouf (1996)* représente en fait une simplification de l'expression du coefficient C_3 . En effet, la formulation plus complète de celui-ci s'écrit :

$$C_3 = \frac{k_{sat}}{w_{sat}} \frac{\tau(2b+2)}{(w^\alpha/w_{sat})^{-2b-2} - 1}, \quad (2.25)$$

avec $w^\alpha = w_{fc} + (w_{sat} - w_{fc})e^{-1}$ et b la pente de la courbe de rétention d'eau. k_{sat} est la conductivité hydraulique à saturation, calibrée pour chacune des mailles d'ISBA, sa valeur étant constante sur les différentes couches du sol. *Decharme et al. (2006)* et *Quintana Seguí et al. (2009)* ont introduit dans ISBA une nouvelle formulation de k_{sat} , à savoir le profil exponentiel de la conductivité hydraulique. Il dépend de la profondeur et s'écrit :

$$k_{sat}(z) = k_{sat_c} e^{-f(z-d_c)} \quad (2.26)$$

Cette formulation fait varier de manière exponentielle la valeur de la conductivité hydraulique. Ce nouveau k_{sat} a été calibré, pour SIM, par *Quintana Seguí et al. (2009)* sur les différents bassins français afin d'en améliorer les simulations hydrologiques. k_{sat_c} est l'ancienne valeur de la conductivité hydraulique à saturation, et f et d_c définissent respectivement un facteur de forme, et la profondeur de compactation (telle que $k_{sat}(d_c) = k_{sat_c}$).

Une description plus complète de cette expression, de son calibrage, et de son impact dans SIM est présentée dans *Quintana Seguí et al. (2009)*.

- Le ruissellement sous-maille :

Le schéma de surface étant utilisé à l'échelle d'un bassin versant et sur des mailles de $8 \times 8 \text{ km}$, il s'avère nécessaire de paramétrer un ruissellement sous-maille. En effet, sur de telles surfaces, le ruissellement se produit bien avant que toute la maille ne soit saturée. Il faut donc envisager la possibilité que seule une partie d'une maille puisse contribuer au ruissellement total.

C'est pourquoi le schéma de ruissellement sous-maille VIC (Variable Infiltration Capacity) a été paramétrisé dans ISBA. Son principe est présenté sur les figures 2.4 et 2.5 :

Une maille est constituée d'une infinité de réservoirs élémentaires dont la capacité d'infiltration varie continuellement entre 0 et une valeur maximale i_m (voir figure 2.4). Le contenu en eau moyen w_2 de la maille est la somme des contenus en eau de chacun de ces réservoirs. On note i le contenu en eau des réservoirs élémentaires non saturés. Tous les réservoirs qui ont une capacité d'infiltration inférieure à i sont donc saturés. On note $A(i)$ la fraction de la maille qui est ainsi saturée.

Lors d'un évènement pluvieux, si on considère que les précipitations se répartissent uniformément sur la maille, chaque réservoir recevant $P \text{ mm}$, la fraction $A(i)$ déjà saturée ne peut plus stocker ce surplus d'eau et va donc l'évacuer par ruissellement. Les réservoirs

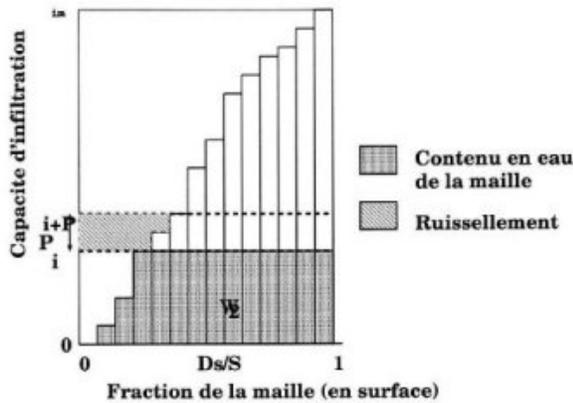


FIGURE 2.4 – Principe du schéma de ruissellement sous-maille

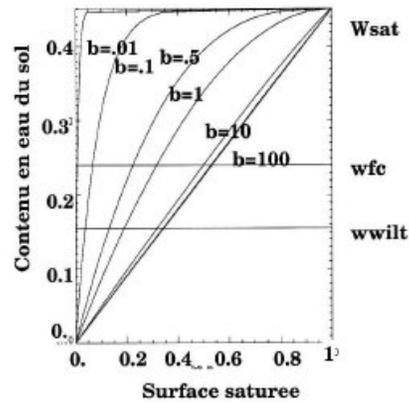


FIGURE 2.5 – Variation de la fraction de la maille saturée en fonction du contenu en eau et du paramètre de courbure b

élémentaires qui ont une capacité d’infiltration inférieure à $i + P$ vont se remplir puis ruisseler le reste des précipitations. Enfin, les autres réservoirs (avec une capacité d’infiltration supérieure à $i + P$) vont pouvoir stocker toute l’eau qu’ils reçoivent.

Le ruissellement est donc la somme des contributions des réservoirs élémentaires déjà saturés et de ceux qui seaturent lors de l’évènement pluvieux.

Dans le schéma de ruissellement sous-maille, on suppose que la capacité d’infiltration de la maille suit la distribution suivante (figure 2.5) :

$$i = i_m [1 - (1 - A(i))^{\frac{1}{b}}] \iff A(i) = 1 - (1 - \frac{i}{i_m})^b \quad (2.27)$$

où $A(i)$ est la fraction de la maille pour laquelle la capacité d’infiltration est inférieure à i ($0 \leq A(i) \leq 1$), i_m est la capacité d’infiltration maximale de la maille, et b est le paramètre de courbure, qui contrôle la fonction de distribution A : le ruissellement est fort lorsque b est grand, et faible lorsque b est petit.

Pour la maille, la quantité d’eau ruissellée est donc :

$$Q_r = \int_i^{i+P} A(i) di = P + \frac{i_m}{b+1} [(1 - \frac{i+P}{i_m})^{b+1} - (1 - \frac{i}{i_m})^{b+1}] \quad (2.28)$$

Pour un contenu en eau de la maille w_2 , on a alors la fraction de la maille saturée $A(w_2)$:

$$A(w_2) = 1 - (1 - \frac{w_2}{w_{sat}})^{\frac{b}{b+1}} \quad (2.29)$$

Il y a donc ainsi toujours ruissellement, sauf lorsque le contenu en eau du sol est nul. Pour éviter des comportements irréalistes sur sol sec, *Habets (1998)* a introduit le seuil w_{wilt} en-dessous duquel le ruissellement est nul : $Q_r = 0$ pour $w_2 < w_{wilt}$. Ainsi, la nouvelle expression de la fraction de maille saturée est (*Habets (1998)*) :

$$A(w_2) = 1 - (1 - \frac{w_2 - w_{wilt}}{w_{sat} - w_{wilt}})^{\frac{b}{b+1}} \quad (2.30)$$

et le ruissellement vaut alors :

$$Q_r = P - d_2(w_{sat} - w_2) \quad (2.31)$$

si $P > (1 + b)(w_{sat} - w_{wilt})(1 - \frac{w_2 - w_{wilt}}{w_{sat} - w_{wilt}})^{\frac{1}{b+1}}$, et :

$$Q_r = P - d_2(w_{sat} - w_2) + d_2(w_{sat} - w_{wilt}) \left[\left(1 - \frac{w_2 - w_{wilt}}{w_{sat} - w_{wilt}}\right)^{\frac{1}{b+1}} - \frac{P}{(w_{sat} - w_{wilt})(b + 1)} \right]^{1+b} \quad (2.32)$$

si $P \leq (1 + b)(w_{sat} - w_{wilt})(1 - \frac{w_2 - w_{wilt}}{w_{sat} - w_{wilt}})^{\frac{1}{b+1}}$.

Le schéma de neige

Le schéma de neige utilisé est un schéma à trois couches développé par *Boone (2000)*.

Dans ce schéma, un grand nombre de processus internes au manteau neigeux sont paramétrisés (absorption du rayonnement solaire incident, rétention d'eau liquide, transfert de chaleur, compaction de la neige, ...). Pour cela, le manteau est discrétisé en trois couches pour lesquelles le modèle calcule l'évolution de trois variables pronostiques : l'équivalent en eau et l'épaisseur du manteau neigeux, ainsi que la chaleur stockée par la neige (*Boone (2000)*; *Morel (2003)*).

- L'équivalent en eau du manteau neigeux :

L'évolution de cette variable est conditionnée par l'équation suivante :

$$\frac{\partial W_n}{\partial t} = P_n + p_n P_l - E_n - fonte \quad (2.33)$$

P_n est le taux de précipitations neigeuses, $p_n P_l$ l'eau de pluie interceptée par la fraction de sol recouverte par la neige, E_n la sublimation à la surface de la neige et *fonte* la fonte générée à la base du manteau neigeux.

- L'épaisseur du manteau :

Le manteau neigeux est discrétisé en trois couches, nombre de couches minimum permettant de simuler correctement les gradients thermiques entre le haut et la base du manteau neigeux (*Boone (2000)*). A partir de l'épaisseur totale de la neige déduite au premier pas de temps de la quantité de neige tombée et de la densité de la neige fraîche ρ_{new} :

$$D_s = P_n \frac{\Delta t}{\rho_{new}}, \quad (2.34)$$

on déduit les épaisseurs respectives des trois couches en respectant les relations suivantes :

$$D_{s1} = \delta 0.25 D_s + (1 - \delta) D_{s1max} \quad (2.35)$$

$$D_{s2} = \delta 0.50 D_s + (1 - \delta) [0.34(D_s - D_{s1max}) + D_{s1max}] \quad (2.36)$$

L'épaisseur de la troisième couche se déduit alors par complémentarité de ces deux couches. Pour des manteaux neigeux inférieurs à 0.2 m, la répartition des épaisseurs est constante ($\delta = 1$), sinon ($\delta = 0$), l'épaisseur de la couche supérieure est constante ($D_{s1max} = 0.05$ m) alors que les couches inférieures évoluent progressivement.

A chaque fois que le manteau neigeux est modifié, soit par un apport de neige (P_n), soit par une perte (fonte) ou par compaction, cette répartition des épaisseurs respectives des couches est recalculée. En effet, la relation

$$\rho_s D_s = W_s \quad (2.37)$$

relie la densité (ρ_s), l'épaisseur (D_s) et l'équivalent en eau (W_s). Sous l'effet de la compaction ou du tassement de la neige fraîche, la densité est modifiée :

$$\frac{1}{\rho_s} \frac{\delta \rho_s}{\delta t} = \text{compaction} + \text{tassement} \quad (2.38)$$

Pour une couche, la compaction dépend du poids des couches supérieures, et de la viscosité de la neige, fonction à la fois de la température et de la densité de la neige (pour plus de détails, voir *Boone (2000)*). Le tassement est une fonction exponentielle de la température de surface et de la densité.

Afin de respecter la conservation de la masse (W_s) sur la colonne de neige, lorsque la densité des couches de neige évolue, il faut à nouveau revoir la distribution verticale des épaisseurs de neige.

- La chaleur stockée par la neige :

Pour chaque couche, elle est définie comme suit :

$$H_s = c_n D (T_s - T_f) - L_f \rho_w (W_s - W_l) \quad (2.39)$$

où D est l'épaisseur de la couche, T_s la température de la neige, T_f la température de fonte, W_s l'équivalent en eau de la neige, W_l l'eau liquide présente dans la couche, L_f la chaleur latente de fusion, et c_n la capacité calorifique de la neige. Cette chaleur contenue dans la neige conditionne la présence de neige froide (et sèche) à une température inférieure ou égale à la température du gel de l'eau, ou de neige chaude (et humide) à une température égale à la température du gel de l'eau, et la présence d'eau liquide.

$$W_l = W_s + \frac{H_s}{L_f \rho_w} \quad (2.40)$$

La température de la neige dans chaque couche évolue en fonction du flux de chaleur total, constitué du flux de chaleur par conduction et du rayonnement solaire, et d'un terme de puits d'énergie associé au changement entre la phase liquide et la phase solide de l'eau ($L_f \rho_w \frac{\delta W_l}{\delta t}$).

Le flux de chaleur latente à la surface de la neige est constitué de l'évaporation de l'eau liquide contenue dans la couche de neige supérieure (ou dépôt de rosée) et de la sublimation issue de cette première couche (ou dépôt de givre) :

$$L E_n = \left[\left(1 - \frac{W_l}{W_s}\right) L_s + \frac{W_l}{W_s} L_v \right] E_n \quad (2.41)$$

$$E_n = \rho_a C_h V_a (q_{sat}(T_s) - q_a) \quad (2.42)$$

Le premier terme représente la sublimation (L_s est la chaleur latente de sublimation) alors que le second représente l'évaporation de l'eau liquide.

NB : L'évaporation se traduit par une perte de masse de la couche supérieure sans changement de son épaisseur, alors que la sublimation réduit à la fois la masse et l'épaisseur mais pas la densité.

2.4 Le modèle hydrogéologique MODCOU

Le modèle hydrologique MODCOU a été développé par le Centre d'Informatique Géologique de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris dans le but de disposer d'un outil capable de "prendre en compte simultanément [...] les maillons du cycle de l'eau entre les précipitations et les débits aux exutoires" (*Ledoux et al. (1984)*).

MODCOU a pour rôle, dans SIM, de prendre en charge le drainage et le ruissellement de surface produits par ISBA sur chacune de ses mailles. MODCOU va assurer le transfert de cette eau vers et dans la rivière, le transfert vers et dans une éventuelle nappe aquifère, ainsi que le transfert nappe-rivière. C'est un modèle distribué à mailles emboîtées.

Nous allons décrire ici son fonctionnement, indépendamment de son intégration dans SIM.

2.4.1 Définition de la structure hydrologique

La représentation des écoulements nécessite la définition de la structure du système hydrologique, à l'aide d'observations de terrain.

Le mode de discrétisation du domaine choisi est une schématisation multi-couches qui fait appel à l'emploi de mailles carrées emboîtées, dont la taille varie de 1 à 8 km, ce qui permet d'affiner la résolution dans les endroits sensibles (rivières et limites de bassins par exemple) (*Gomez (2002)*).

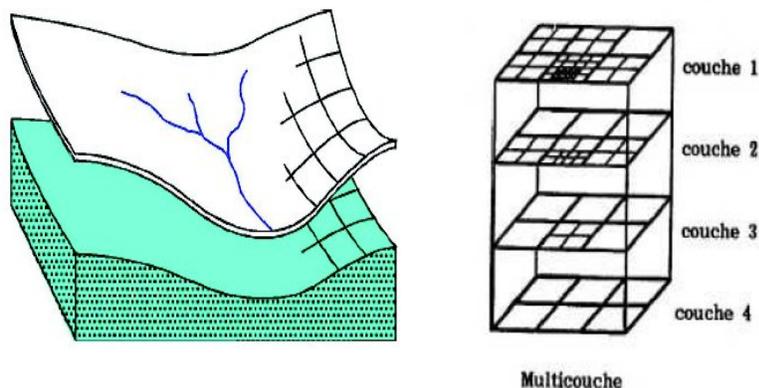


FIGURE 2.6 – Principe de la schématisation multi-couche

Comme le montre la figure 2.6, le modèle distingue :

- une couche supérieure, dite "de surface", où est calculé le bilan hydrique, et où ont lieu les transferts superficiels. A chaque maille de cette couche, on affecte une unique direction de

vidange (liée à la topographie). On appelle également "maille rivière" les mailles appartenant au réseau hydrographique principal, et sur lesquelles ont lieu des échanges à double sens avec le souterrain (voir figure 2.7).

- une ou plusieurs couches profondes, où ont lieu les transferts souterrains. Elles sont éventuellement connectées hydrauliquement entre elles, et elles représentent la succession verticale de couches aquifères séparées par des milieux plus ou moins imperméables, dits semi-perméables.

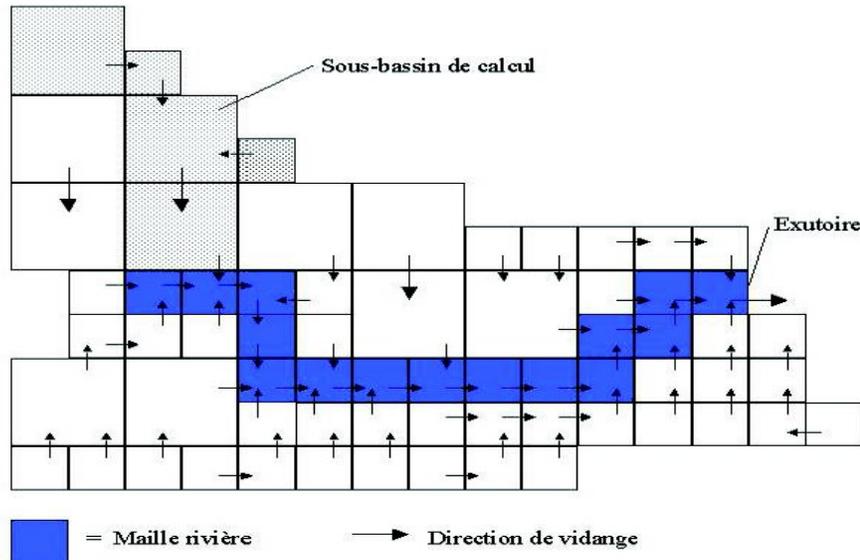


FIGURE 2.7 – Discrétisation et réseau de drainage de la couche de surface (d'après Gomez (2002))

2.4.2 Calcul du bilan hydrique

Sur chaque maille de la couche de surface, le modèle calcule à partir des précipitations et de la valeur de l'*ETP* la quantité d'eau qui va s'évaporer, celle qui va ruisseler, et celle qui va s'infiltrer dans le sol.

Ce calcul est effectué à l'aide de fonctions production, chacune correspondant à un type de sol et de végétation, et fonctionnant sur le principe d'un modèle à réservoirs.

Cependant, cette partie n'est pas utilisée dans SIM, puisque c'est ISBA qui joue ce rôle. Par conséquent, le calcul de ce bilan hydrique n'est pas détaillé ici.

2.4.3 Les transferts conjoints superficiels et souterrains

Transferts souterrains

L'évolution de la charge hydraulique h (en m , définie par $h = z + \frac{P}{\rho g}$), est donnée par l'équation de diffusivité :

$$\text{div}(\vec{K} \vec{\text{grad}}(h)) = q + S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.43)$$

$$\text{avec : } \begin{cases} h & \text{la charge hydraulique} \\ \vec{K} & \text{le tenseur de perméabilité de Darcy} \\ q & \text{le terme source ou puits (débit volumique)} \\ S_s & \text{le coefficient d'emmagasinement spécifique } (m^{-1}) \end{cases}$$

La variable h définit entièrement l'écoulement (elle s'identifie à la piézométrie et ses dérivées spatiales au débit). La résolution de l'équation de diffusivité est l'objectif des modèles hydrodynamiques.

Dans le cas des réservoirs aquifères, on suppose que les écoulements sont principalement horizontaux dans les aquifères et verticaux dans les semi-perméables qui les séparent, et on discrétise l'équation de diffusivité sur des mailles carrées de côté a par la méthode des différences finies. On doit alors résoudre l'équation :

$$\vec{T}\vec{H} = \vec{Q} + a^2\vec{S}\frac{d\vec{H}}{dt} \quad (2.44)$$

$$\text{avec : } \begin{cases} \vec{H} & \text{le vecteur des charges hydrauliques sur chaque maille} \\ \vec{T} & \text{la matrice des transmissivités} \\ \vec{Q} & \text{le vecteur des sources ou puits pour chaque maille (débits surfaciques)} \\ \vec{S} & \text{la matrice des coefficients d'emmagasinement (sans dimension)} \end{cases}$$

Cette équation est alors résolue de manière itérative.

Transferts superficiels

L'eau disponible pour le ruissellement, calculée sur chaque maille du domaine de surface par les fonctions production, est acheminée en deux temps vers l'exutoire du bassin-versant :

- elle est d'abord transférée depuis la maille initiale jusqu'à une maille rivière
- elle est ensuite transférée le long de la rivière jusqu'à l'exutoire du bassin-versant.

1. Transfert de l'eau à la maille rivière

L'algorithme gérant ce transfert repose sur la notion d'isochronisme et la détermination de zones isochrones (zones d'égal temps de transfert), comme le montre la figure 2.8.

Pour chaque maille rivière, il suffit de sommer les volumes d'eau ruisselés sur les sous-bassins en tenant compte du décalage temporel :

$$QR(t) = \sum_{i=1}^m QR_i(t - i\Delta t) \quad (2.45)$$

où $QR_i(t - i\Delta t)$ est le volume d'eau ruisselée total pour les mailles situées à i pas de temps de la maille rivière au temps $t - i\Delta t$.

Constitution des zones isochrones

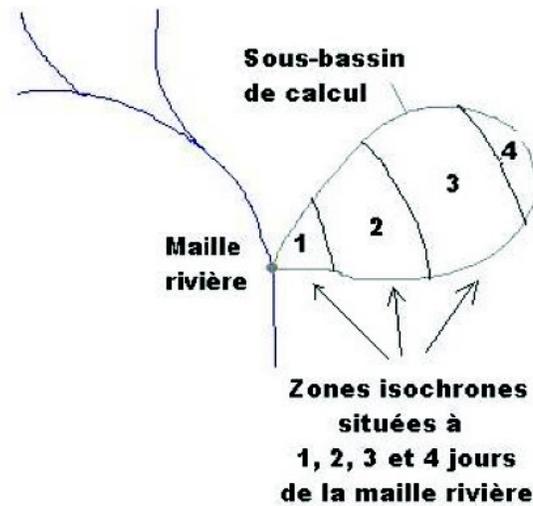


FIGURE 2.8 – Exemple de tracé de zones isochrones (les mailles de surface sont rarement à plus de un jour de transfert de la maille rivière)

Pour chaque maille de surface m (en rivière ou non), un temps de transfert relatif $ttf(m)$ jusqu'à l'exutoire est calculé. Pour connaître ce temps, il suffit de parcourir tout le réseau depuis cette maille jusqu'à l'exutoire en passant par les rivières et de sommer les temps de transit $ttra_{i \rightarrow j}$ entre deux mailles successives i et j qui se trouvent sur le trajet. Cette durée de parcours est ensuite normalisée par la durée calculée la plus longue.

Pour ce faire, il faut en premier lieu déterminer les temps de transit $ttra_{i \rightarrow j}$ entre deux mailles successives. Ce calcul est différent selon qu'il s'agit de mailles rivières ou non.

Dans le cas de mailles qui ne sont pas en rivière, la formule utilisée est la suivante (voir Gomez (2002)) :

$$ttra_{i \rightarrow j} = b \frac{(S(i)L(i))^{(\frac{1}{3})}}{\sqrt{pe(i)}} - b \frac{(S(j)L(j))^{(\frac{1}{3})}}{\sqrt{pe(j)}} \quad (2.46)$$

avec : $\begin{cases} S(i \text{ ou } j) & \text{la surface du sous-bassin drainé par la maille } i \text{ ou } j \text{ en } km^2 \\ L(i \text{ ou } j) & \text{la longueur du thalweg le plus long en } km \\ pe(i \text{ ou } j) & \text{la pente moyenne du bassin en } m/m \\ b & \text{un paramètre à caler} \end{cases}$

Cette équation correspond à la différence entre les temps de concentration calculés pour chacun des sous-bassins correspondants aux mailles i et j .

Dans le cas de mailles rivières, la formule est un peu différente (voir Gomez (2002)) :

$$ttra_{i \rightarrow j} = \frac{dl}{\sqrt{pe} \cdot S(i)^\alpha} \quad (2.47)$$

$$\text{avec : } \begin{cases} dl & \text{la distance entre les mailles } i \text{ et } j \\ pe & \text{la pente entre les mailles } i \text{ et } j \\ S(i) & \text{la surface drainée par la maille } i \\ \alpha & \text{un paramètre à caler} \end{cases}$$

Ce calcul tient compte de la surface drainée suivant l'hypothèse qu'à pente égale, un débit supérieur (lié à une surface drainée plus importante) transite plus rapidement.

Finalement, le temps de transfert relatif est donc :

$$ttf(m) = \frac{\sum_{m \rightarrow ex} ttra_{i \rightarrow j}}{\max_{l=1, N} ttf(l)} \quad (2.48)$$

avec $m \rightarrow ex$ l'ensemble des mailles se trouvant sur le parcours de la maille m à l'exutoire, N le nombre total de mailles, et $\max_{l=1, N} ttf(l)$ le temps de transit maximal sur toutes les mailles.

Ce temps de transfert relatif, compris entre 0 et 1, sera ensuite multiplié par le temps de concentration du bassin : ce temps, exprimé en jours, est un paramètre réglable, et représente le temps maximal nécessaire pour que de l'eau tombée quelque part sur le bassin soit acheminée jusqu'à l'exutoire du bassin.

Sur ce principe, on peut donc calculer pour chaque maille rivière le temps de transfert entre elle et chacune des mailles qu'elle draine, et donc constituer des zones isochrones.

2. Transfert de la maille rivière à l'exutoire

Les mailles rivières sont groupées en biefs, en rassemblant dans un même bief les mailles rivières offrant à l'eau la même durée de transfert jusqu'à l'exutoire du bassin versant, comme le montre la figure 2.9.

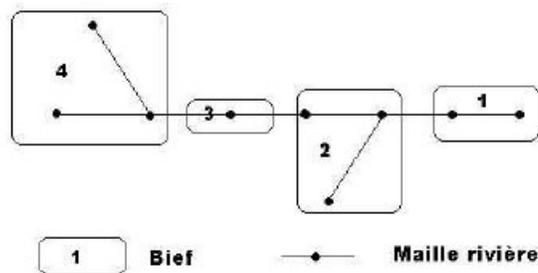


FIGURE 2.9 – Principe de constitution des "biefs" sur le réseau hydrographique principal

Ces biefs se vidangent les uns dans les autres de l'amont vers l'aval, chaque bief étant doté d'un coefficient de vidange note XKB .

Pour connaître la quantité d'eau dans le bief i à l'instant t , on doit tenir compte de ces vidanges ainsi que de la quantité d'eau échangée avec le souterrain (voir plus loin) :

$$Q_i(t) = \begin{cases} (1 - XK B_i)(Q_i(t - \Delta t) + QR_i(t - \Delta t) + QNAP_i(t - \Delta t)) & \text{Eau du bief } i \\ & \text{restant après vidange} \\ + \sum_{k=1}^n XK B_k(Q_k(t - \Delta t) + QR_k(t - \Delta t) + QNAP_k(t - \Delta t)) & \text{Somme des vidanges} \\ & \text{des } n \text{ biefs se vidangeant} \\ & \text{directement dans le bief } i \end{cases}$$

avec :

$$\begin{cases} QR(t) & \text{eau ruisselée en provenance des sous-bassins dans le bief considéré} \\ QNAP(t) & \text{eau échangée algébriquement entre le souterrain et le bief considéré.} \end{cases}$$

Echanges nappe-rivière

La relation nappe-rivière permet de faire le lien entre le domaine souterrain et la surface. Le couplage est effectué à chaque pas de temps uniquement entre une maille rivière et les mailles des couches souterraines qui lui correspondent verticalement. Selon l'état hydrique du système, deux situations sont possibles, comme le montre la figure 2.10.

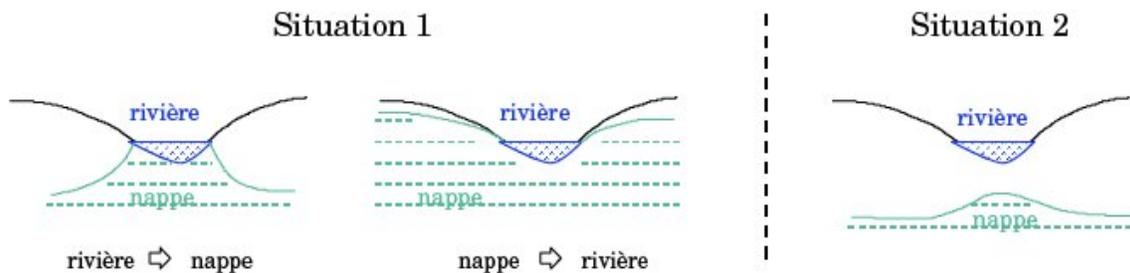


FIG. 3.7 – Principe de la relation nappe-rivière

FIGURE 2.10 – Principe de la relation nappe-rivière

- Situation 1 : la rivière et la nappe sont connectées hydrauliquement, et le débit échangé peut être positif ou négatif, selon que la nappe donne de l'eau à la rivière ou en reçoit. Dans SIM, la nappe alimente la rivière, mais la rivière ne peut pas alimenter la nappe.

- Situation 2 : la nappe et la rivière sont séparées par la présence d'une zone non saturée. Dans ce cas, le modèle considère que la rivière alimente la nappe, avec un débit Q_o qui est le débit maximal qui peut percoler sous la rivière dans le non-saturé.

2.5 Le couplage SAFRAN-ISBA-MODCOU

Le principe du couplage entre ISBA et MODCOU est de remplacer les fonctions production de MODCOU (calcul du bilan hydrique par un modèle à réservoirs) par le schéma de surface ISBA (*Habets et al. (1999b)*). Ainsi, les données de ruissellement sous-maille ainsi que de drainage gravitationnel, issues d'ISBA toutes les cinq minutes, sont cumulées sur des

périodes de 3H, puis alimentent le modèle MODCOU (dans les transferts superficiels pour les premières, et dans les transferts souterrains pour les secondes). Le principe de ce couplage est repris dans la figure 2.11.

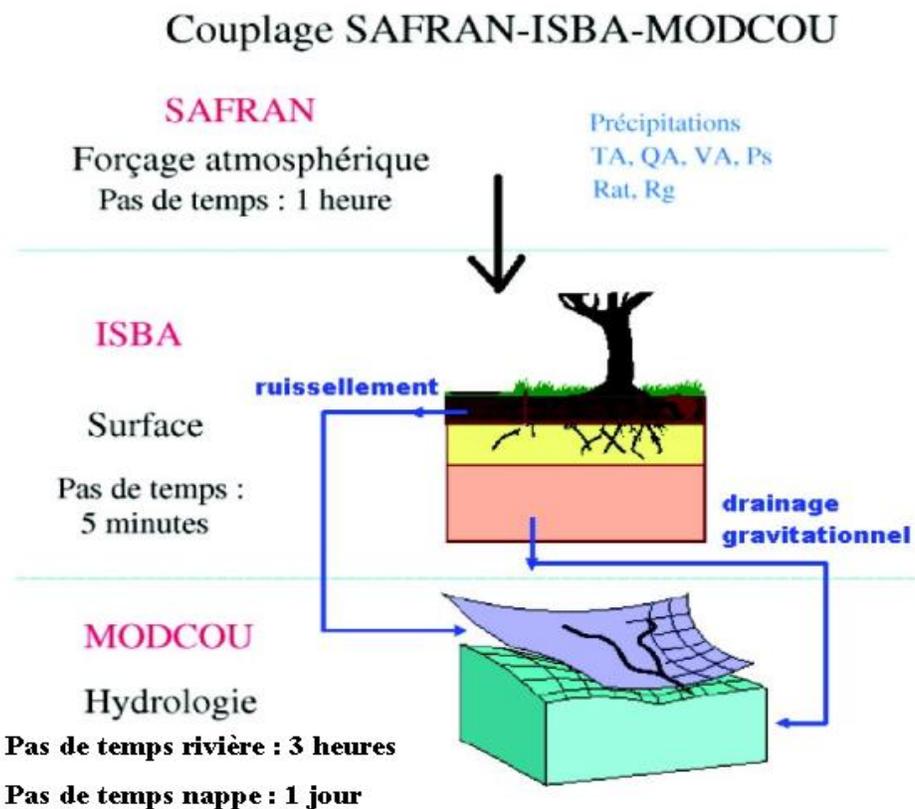


FIGURE 2.11 – Schéma du principe du couplage entre SAFRAN, ISBA et MODCOU

2.6 La chaîne SIM France

2.6.1 Construction de la chaîne SIM France

Présentation

La chaîne SIM a été appliquée et validée dans un premier temps sur plusieurs grands bassins français : le Rhône (*Etchevers (2000)*), l'Adour-Garonne (*Morel (2003)*) et la Seine (*Rousset-Regimbeau (2007)*). A l'occasion de ces diverses études, des modélisations ont été développées indépendamment (figure 2.12).

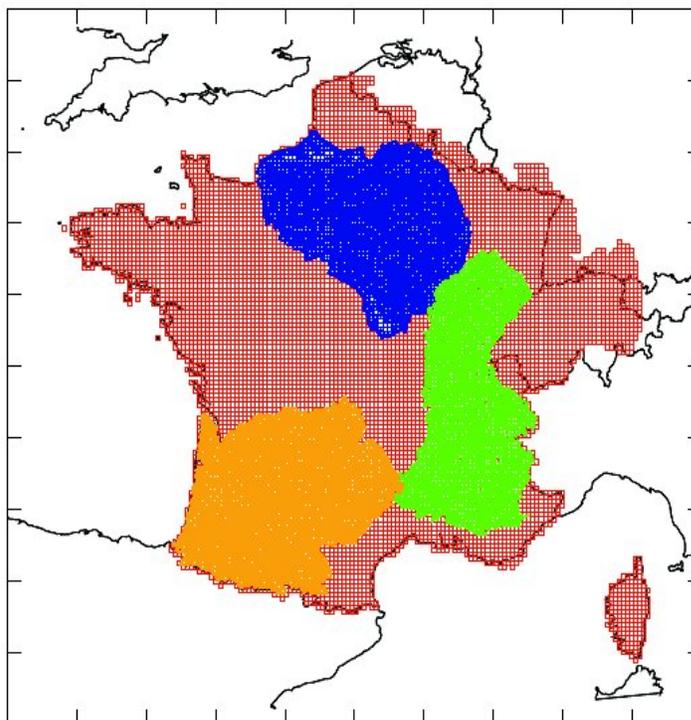


FIGURE 2.12 – Maillages "hydrologiques" de surface développés pour les applications de SIM sur les bassins du Rhône (vert), de l'Adour-Garonne (orange) et de la Seine (bleu), et maillage "météorologique" ISBA sur la France (rouge)

Dans un souci d'uniformisation, et dans le but de pouvoir simuler les débits de l'ensemble des bassins français, le système SIM a été étendu à l'ensemble de la France.

Cette opération, qui a débuté à la fin 2003, a été réalisée en collaboration entre les équipes DP/DCLIM/HYDRO et CNRM/GMME/MC2 de Météo-France et a également fait l'objet d'un stage de fin d'études de 2 mois par deux Techniciens Supérieurs d'Exploitation de la Météorologie (*Guenver and Perrat (2003)*).

Les maillages développés sur les grands bassins français

Le système SAFRAN est appliqué sur l'ensemble de la France sur les zones SAFRAN (zones SYMPOSIUM II), et le schéma de surface ISBA travaille sur un maillage régulier 8 km qui couvre l'ensemble de la France (maillage dit "météorologique").

Le modèle MODCOU utilise quant à lui des mailles carrées emboîtées, de résolution variable 1 à 8 km (maillage dit "hydrologique"). La résolution est forte sur les zones sensibles (rivières, limites de bassins versants par exemple). Dans le cadre des études par bassins, des maillages "hydrologiques" indépendants ont été développés sur chaque bassin (figure 2.12). Ce sont ces maillages qu'il faut uniformiser et étendre à la France.

Le maillage SIM France

Le réseau hydrographique sur la France est basé sur un modèle numérique de terrain (MNT) à 1 km (GOTOPO30). Le logiciel Hydrodem génère un premier maillage hydrologique avec une résolution de 1 km . Ensuite, on utilise le logiciel SIGMOD du Centre de Géosciences de Mines-Paristech pour effectuer un regroupement des mailles voisines, quand leurs caractéristiques le permettent, en une maille plus grande (8 km de côté au plus), afin de réduire le nombre de mailles total, et ainsi de réduire le temps de calcul de MODCOU.

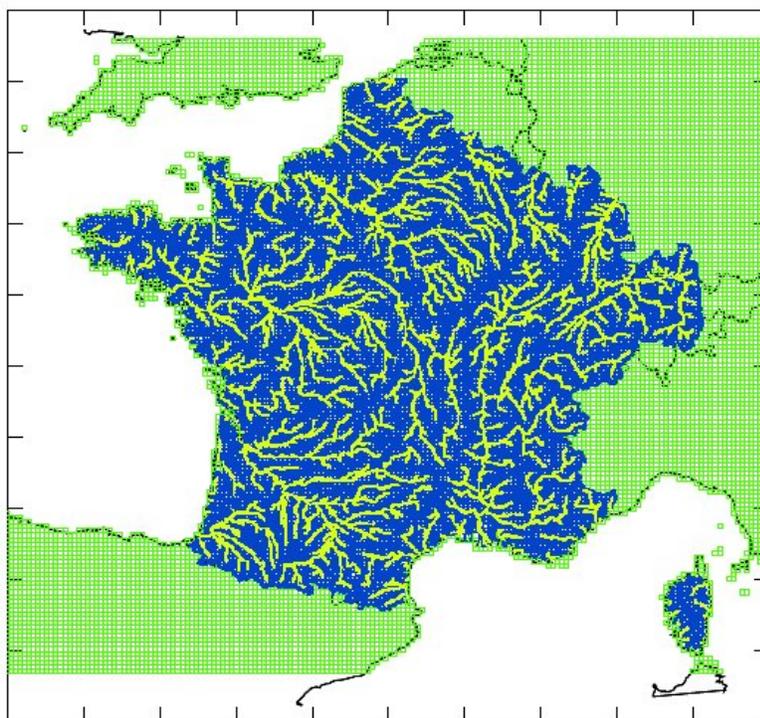


FIGURE 2.13 – Maillage hydrologique de surface sur la France entière (bleu) et mailles rivières associées (vert)

Les maillages "hydrologiques" de chacun des bassins avaient été construits suivant la même méthode (à partir du MNT 1 km et regroupement de mailles), néanmoins ils n'utilisent

pas les mêmes versions des logiciels. En particulier le regroupement des mailles n'est pas semblable à celui effectué pour la France entière. De ce fait, les maillages "hydrologiques" de chaque bassin ne sont pas cohérents avec le maillage "hydrologique" sur la France (les limites de bassins ne correspondent pas exactement, les tailles des mailles ne sont pas les mêmes, l'emplacement des rivières varie très légèrement).

Un gros travail a donc été nécessaire afin de pallier ces problèmes, en particulier dans le but de conserver les calibrations qui avaient été développées indépendamment sur chacun des bassins. Notamment, il était nécessaire de ne pas modifier le maillage développé pour le bassin de la Seine lors de l'extension à la France, afin de pouvoir continuer d'utiliser les maillages des nappes de la Seine, développés et calibrés par le CG (*Rousset (2003)*).

La figure 2.13 présente le maillage "hydrologique" utilisé dans l'application SIM France, ainsi que les mailles rivières correspondantes.

2.6.2 Validation de la chaîne SIM France

Le modèle SAFRAN a été validé de façon approfondie par *Quintana Seguí et al. (2008)*. Cette étude a permis de mettre en évidence la capacité de SAFRAN pour l'analyse des paramètres température, vent et humidité (comparés aux observations). Cependant, il a été montré que l'analyse des rayonnements est moins efficace (présence de biais, en particulier sur les côtes, et cycle saisonnier assez mal reproduit).

La chaîne SIM France complète a été validée sur une période de 10 ans (1995-2005) par *Habets et al. (2008)*. Quelques résultats obtenus sont brièvement présentés ici.

La figure 2.14 montre le cumul moyen de précipitations (*mm*) sur la France.

Cette carte montre l'importance des précipitations sur les reliefs et sur la côte Atlantique. Le Sud-Est de la France connaît des épisodes de précipitations intenses en automne, qui conduisent à des cumuls annuels élevés.

Du point de vue hydrologique, ce sont les précipitations sur chaque bassin qui sont intéressantes. On constate que ce sont les deux bassins du Nord qui reçoivent le moins de précipitations, les bassins du Sud (Garonne et Rhône) étant plus montagneux. Les graphiques d'évolution du cumul annuel de précipitations montrent que pour tous les bassins, l'année 2001-2002 est la plus sèche (avec 1995-1996 pour la Seine). La neige joue un rôle très important sur le Rhône, où elle représente 29% du total des précipitations, mais beaucoup moins sur la Garonne (5.7% du total des précipitations), malgré la présence des Pyrénées.

Pour les quatre bassins représentés, le cycle annuel des précipitations est sensiblement le même (il est toutefois plus marqué pour les bassins du Sud), avec deux maxima de précipitations par an, un en hiver, l'autre au printemps.

La figure 2.15 présente les débits journaliers observés et simulés par SIM de 1995 à 2005 pour quatre stations :

On constate que la Loire et la Seine ont des débits estivaux du même ordre de grandeur

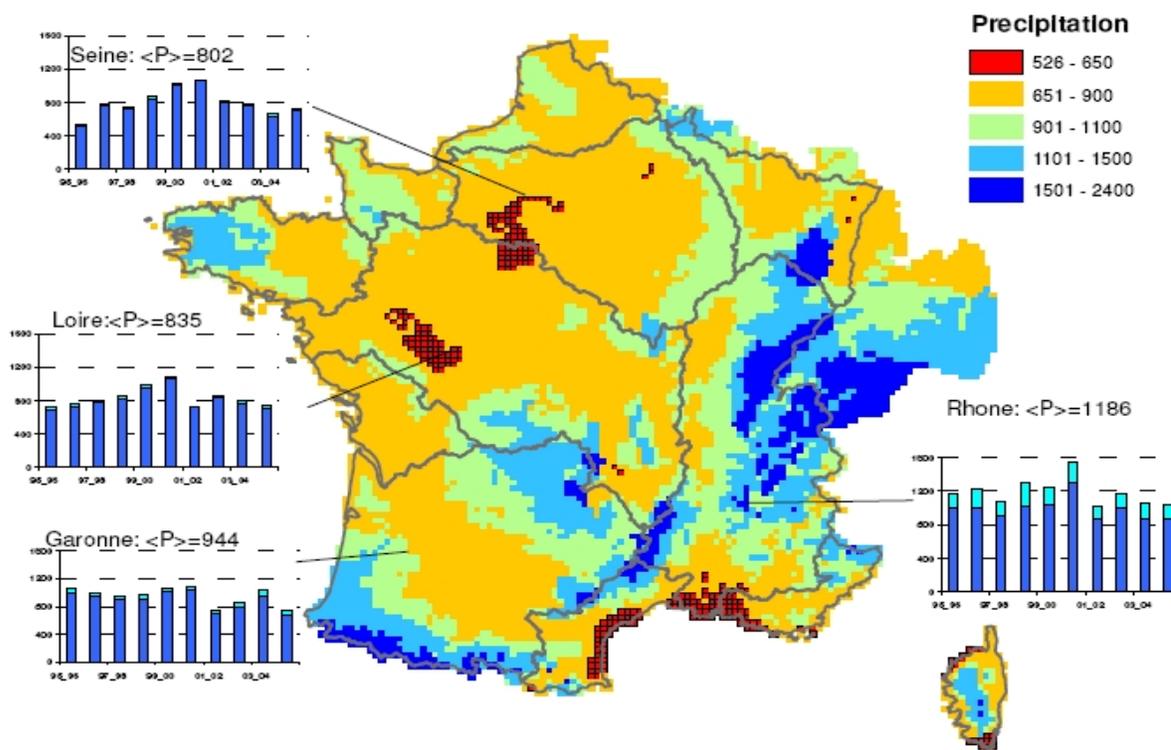


FIGURE 2.14 – Cumul annuel moyen de précipitations (mm) sur la France. Les graphiques représentent le cumul annuel de pluie (bleu foncé) et de neige (bleu clair) pour plusieurs grands bassins français (d’après *Habets et al. (2008)*).

(avec environ 100 à $250 m^3 s^{-1}$), mais les pics de crue de la Loire sont plus élevés que ceux de la Seine (environ $5000 m^3 s^{-1}$ contre environ $2500 m^3 s^{-1}$ respectivement). La Garonne a les débits d’étiage les plus bas (moins de $100 m^3 s^{-1}$), mais plusieurs crues dépassent les $2500 m^3 s^{-1}$. Enfin, le débit annuel le plus élevé est celui du Rhône, les débits d’étiage sont d’environ $500 m^3 s^{-1}$ et les pics de crue dépassent souvent $5000 m^3 s^{-1}$, pour atteindre jusqu’à $10000 m^3 s^{-1}$ (crue de Décembre 2003).

Deux critères statistiques sont calculés pour qualifier la qualité de la simulation SIM : le rapport des lames d’eau Q et l’efficacité E (calculés sur les débits journaliers). Le système SIM est capable de bien représenter les débits des quatre stations de la figure 2.15, avec une efficacité qui s’échelonne de 0.68 à 0.88 , et une erreur sur les lames d’eau de -10% à $+6\%$.

Toutefois, la simulation n’est pas parfaite. Par exemple, SIM semble sous-estimer le débit d’étiage du Rhône à Beaucaire (principalement en raison du fait que les nombreux barrages de la région ne sont pas pris en compte dans le modèle). De plus, sur les bassins de la Loire et de la Garonne, la décrue est trop rapide dans la simulation, ce qui est en partie lié au fait que les nappes aquifères de ces bassins ne sont pas simulées dans SIM.

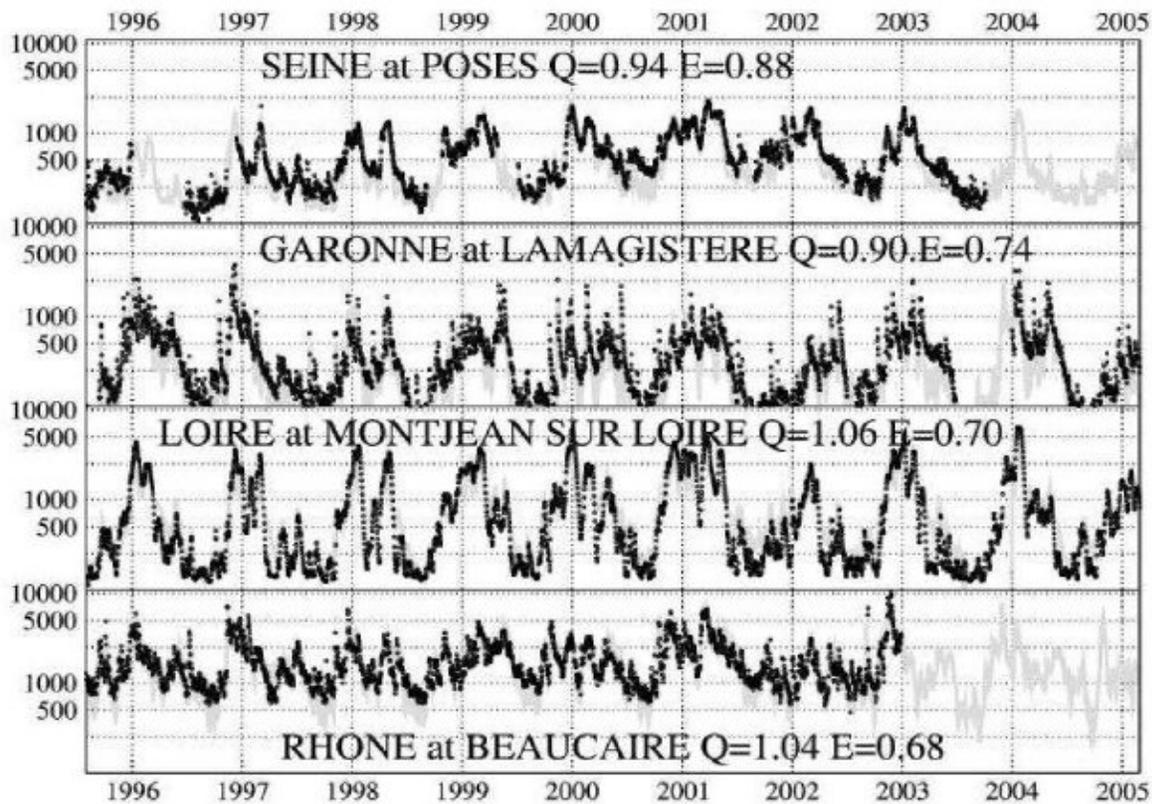


FIGURE 2.15 – Débits journaliers observés (ronds noirs) et simulés (trait gris) pour quatre stations. L'échelle est la même pour les quatre tracés, de 100 à $11000\text{m}^3.\text{s}^{-1}$. Deux critères statistiques sont indiqués dans le titre : l'efficacité E et le rapport des lames d'eau Q (d'après *Habets et al. (2008)*).

Les figures 2.16 et 2.17 présentent la répartition spatiale des critères statistiques (efficacité et rapport des lames d'eau) calculés pour les débits journaliers d'environ 900 stations en France.

Les résultats obtenus pour la majorité des stations sont bons. Néanmoins, quelques stations obtiennent des scores plus contrastés.

En effet, les résultats obtenus dans les Alpes sont relativement faibles. Ceci est dû en grande partie au fait que dans cette région, il existe de nombreux barrages utilisés pour la production électrique, et qui perturbent le débit naturel (ces barrages ne sont pas pris en compte dans SIM). De plus, dans une moindre mesure, une partie de l'eau est utilisée pour l'irrigation ou l'alimentation du réseau d'eau potable.

Sur la Somme, les efficacités obtenues sont relativement faibles, mais le rapport des lames d'eau relativement correct. Ceci est dû au fait que les rivières de cette région sont très fortement influencées par la nappe de la Somme, qui n'est pas prise en compte dans SIM à l'heure actuelle.

En dehors de ces deux régions, les résultats sont assez homogènes sur la France.

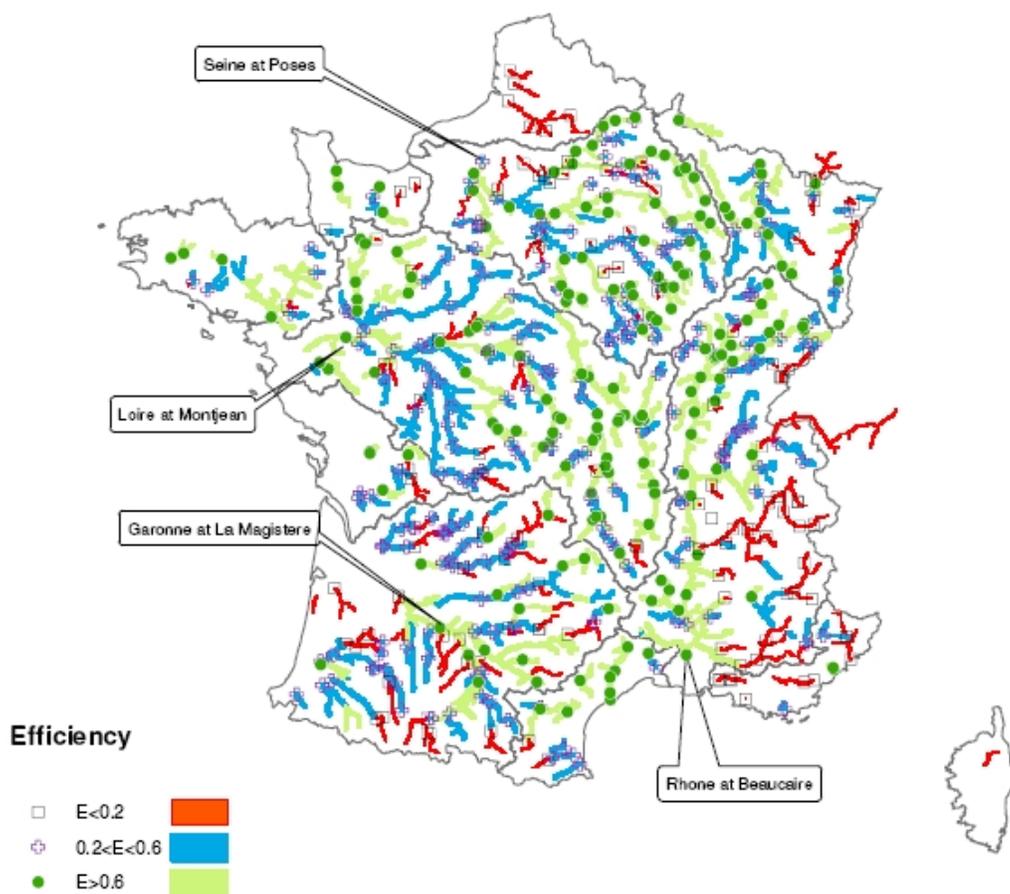


FIGURE 2.16 – Répartition spatiale de l’efficacité pour environ 900 stations en France et réseau hydrographique (d’après *Habets et al. (2008)*).

2.6.3 La chaîne SIM France opérationnelle

La chaîne SIM France est depuis quelques années exploitée de façon opérationnelle et en temps réel à Météo-France (gestion par l’équipe DP/DCLIM/Hydro), en particulier afin d’assurer le suivi quotidien des composantes du bilan hydrique sur la France.

Les modèles SAFRAN et ISBA sont complètement opérationnels et tournent en temps réel depuis décembre 2003 sur des machines opérationnelles de Météo-France. En revanche, le modèle MODCOU n’est pas encore opérationnel. Cependant, pour les besoins de la prévision d’ensemble des débits, une chaîne MODCOU temps réel expérimentale a été mise en place, et préfigure la version réellement opérationnelle de MODCOU.

Deux chaînes SIM sont gérées en opérationnel par DP/CLIM/Hydro :

- la chaîne ”SIM temps réel” :

Cette chaîne tourne de façon quotidienne. Elle est lancée tous les jours vers 0830 UTC, et

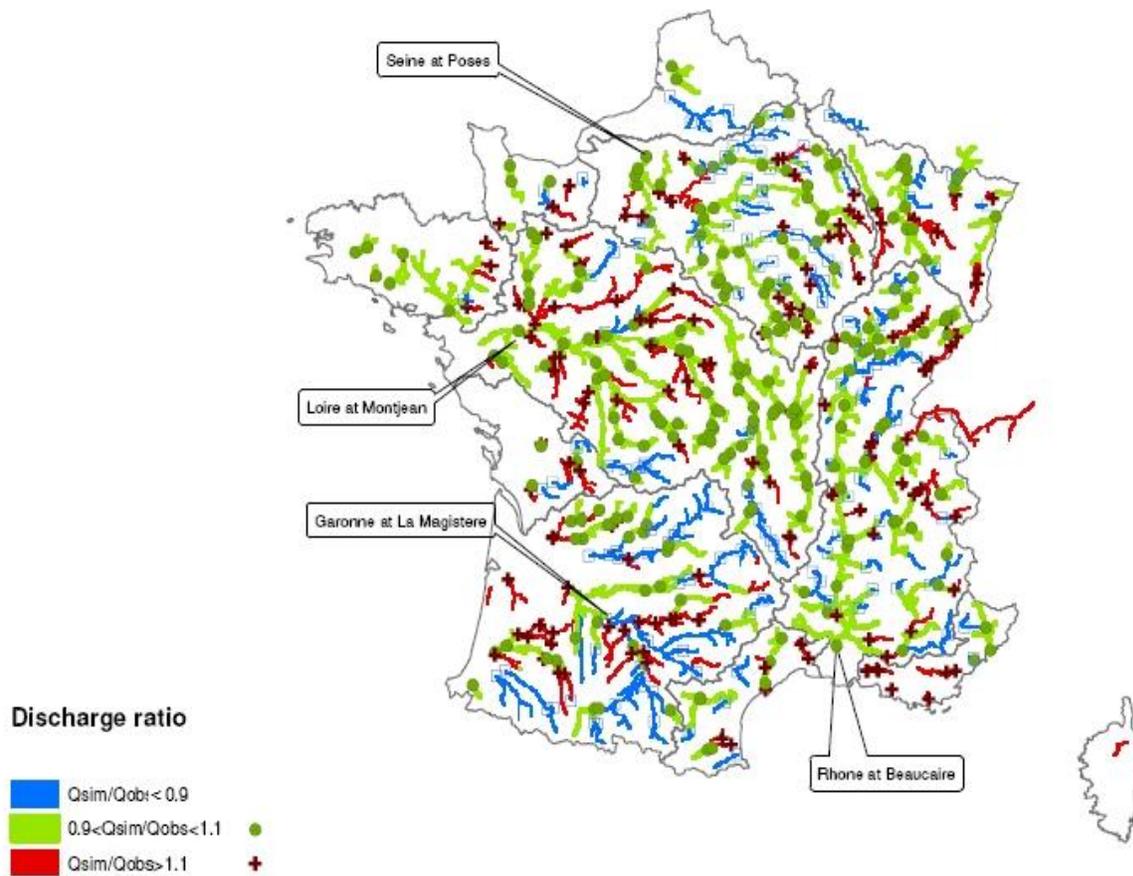


FIGURE 2.17 – Répartition spatiale du rapport des lames d'eau pour environ 900 stations en France et réseau hydrographique

simule la période de J-1 0600 UTC à J 0600 UTC.

Cependant, le délai entre la fin de la période simulée et le lancement de la chaîne étant relativement court, le système SAFRAN ne peut utiliser pour son analyse que les données d'observations qui sont disponibles dans les bases de données de Météo-France au moment du lancement, soit celles des stations qui alimentent les bases de données en temps quasi-réel. Ceci ne constitue pas l'ensemble des données climatologiques de Météo-France.

L'ensemble des sorties de la chaîne SIM "temps réel" est disponible dès sa production dans la Base de Données Analysées et Prévues (BDAP) de Météo-France.

- la chaîne "SIM climatologie" :

Cette chaîne est lancée une fois par mois, vers le 20 de chaque mois M, sur une période allant du 1er août de l'année hydrologique en cours jusqu'à la fin du mois M-1.

Ceci permet au système SAFRAN de prendre en compte un nombre d'observations beaucoup plus grand. En effet, de nombreuses informations n'alimentent pas les bases de données climatologiques en temps réel, mais sont envoyées à des dates ultérieures. Au 20 de chaque

mois, on considère que l'on dispose de la quasi-totalité des données existantes depuis le début de l'année hydrologique jusqu'à la fin du mois précédent.

Un des rôles de la chaîne SIM "climatologie" est de recalibrer la chaîne temps réel. En effet, pour éviter toute dérive et pour se rapprocher au mieux des observations, la chaîne SIM "temps réel" est réinitialisée au premier de chaque mois par les sorties de la chaîne "climatologie".

Il existe de nombreuses applications et utilisations des chaînes SIM opérationnelles, internes à Météo-France ou externes, dont quelques unes sont présentées ici.

Les produits SAFRAN sont en particulier destinés à la réinitialisation quotidienne de la chaîne SIR (Safran-Isba-Routes), ou à la production d'indices de feux de forêts IFM (Indice Feux Météorologique) sur la France. Ils sont également fournis à divers clients.

De plus, un suivi décadaire et mensuel de la sécheresse est fait par l'équipe DP/DCLIM/ACP (Analyse du Climat et Publications) grâce aux sorties SIM.

Ces sorties sont utilisées aussi par les cellules sécheresse (dans les Directions Inter-Régionales de la Météorologie (DIR) et les Centres Départementaux de la Météorologie (CDM)), et par le comité national sécheresse (Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer). Les produits SIM alimentent en particulier le bulletin mensuel BSH national.

Enfin, SIM est utilisé au SCHAPI (Service Central Hydro-météorologique d'Appui à la Prévision des Inondations) du MEEDM, dans le cadre d'une "Expérimentation SIM". En particulier, une combinaison des paramètres humidité initiale des sols (sortie SIM) et pluie prévue est utilisée comme un indice de risque de crue (élaboration d'abaques par bassin versant), et participe à la vigilance crue. SIM contribue également à la prévision des crues d'origine nivale ou de ruissellement, et fournit en outre les forçages atmosphériques et les bilans de surface spatialisés pour l'initialisation de modèles hydrologiques événementiels.

Chapitre 3

Les prévisions d'ensemble hydrologiques

Introduction

Le caractère chaotique du comportement de l'atmosphère fait que, généralement, les prévisions des modèles météorologiques deviennent peu fiables au-delà de quelques jours d'échéance. En effet, il s'avère que des faibles erreurs ou différences dans l'état initial d'un modèle peuvent conduire à des évolutions météorologiques totalement différentes. Ces erreurs auront d'autant plus d'impact sur la prévision, que les phénomènes prévus seront de petite taille.

Ces dernières années, les modèles numériques ont considérablement évolué. Cependant, la qualité de la prévision de certains phénomènes (notamment à méso-échelle) ne s'est pas améliorée autant qu'attendu. En effet, de nombreuses sources d'incertitude restent présentes dans de tels modèles, telles que la résolution du modèle et les paramétrisations physiques. On pense aussi aux approximations réalisées sur certaines équations, notamment les équations de Navier-Stokes dont il n'a pour le moment pas encore été déterminé de solution exacte (ce problème fait encore partie à l'heure actuelle des sept problèmes du millénaire en mathématiques). Enfin, une source non négligeable d'incertitude est issue de la connaissance imparfaite de l'état initial de l'atmosphère. En effet, les observations sont par endroit très peu denses (océans, déserts, ...), et les mesures du profil vertical de l'atmosphère ne sont possibles qu'en un petit nombre de points, malgré les progrès réalisés grâce aux mesures satellitaires. Enfin les mesures en elles-mêmes sont entâchées d'erreurs qu'il est difficile de déterminer précisément.

Pour toutes ces raisons, la mise en place de prévisions d'ensemble s'est développée et, de plus, elle s'est avéré améliorer la qualité des prévisions. Pour une prévision d'ensemble, on ne fournit plus une seule prévision déterministe qui risque, à plus ou moins long terme, de diverger par rapport à la réalité, mais plusieurs scénarios plus ou moins probables de l'évolution de l'atmosphère. L'idée est ensuite de réaliser des statistiques sur l'écoulement probable de l'atmosphère. Le principe des prévisions d'ensemble repose sur le fait que deux états initiaux très proches peuvent conduire à des évolutions de l'état de l'atmosphère très différents. Ainsi, on utilise un ensemble d'états initiaux, qui vont alimenter le modèle de prévision météorologique, en provoquant des scénarios envisageables de l'évolution des différents paramètres du modèle.

Cette mise en oeuvre et le développement de la prévision d'ensemble ont été rendus possibles grâce au développement de la puissance de calcul des super-calculateurs modernes, ainsi que par l'augmentation de la capacité de stockage des données. Cependant, encore aujourd'hui, la puissance de calcul demeure un facteur limitant à l'amélioration des prévisions d'ensemble.

Les différentes méthodes pour produire ces prévisions d'ensemble sont décrites dans la partie suivante. Ensuite sont abordées les diverses expérimentations menées dans la communauté hydrologique sur les prévisions ensemblistes de débits, ainsi que les outils utilisés pour la vérification des prévisions d'ensemble. Le paragraphe suivant aborde la chaîne de prévision d'ensemble de débits de Météo-France, de sa mise en oeuvre à sa validation.

3.1 Présentation générale des prévisions d'ensemble en météorologie et hydrologie, ainsi que des méthodes de vérification

3.1.1 La prévision d'ensemble météorologique

Les systèmes de prévisions d'ensemble ont pour objectif de prendre en compte l'incertitude liée à la prévision, et de fournir à la fois une prévision, et une prévision de la qualité de la prévision.

Ces systèmes sont apparus vers la fin des années 80, date à partir de laquelle les moyens de calculs ont été suffisants pour produire des prévisions d'ensemble à un coût raisonnable. Depuis 1992, le CEPMMT (Centre Européen pour la Prévision Météorologique à Moyen Terme) et le NCEP (National Center for Environmental Prediction, Etats-Unis) produisent des prévisions d'ensemble météorologiques opérationnelles. Météo-France produit aussi ses propres prévisions d'ensemble météorologiques depuis 2004 en mode opérationnel.

Il existe différentes méthodes pour produire des prévisions d'ensemble. Nous allons décrire rapidement les plus connues d'entre elles ci-dessous (*Rousset-Regimbeau (2007)*) :

La méthode des Vecteurs Singuliers et la méthode "Breeding of Growing Modes" :

Ces deux méthodes partent du principe qu'un faible écart dans l'état initial de l'atmosphère peut générer d'importantes différences dans la prévision. L'incertitude dans cet état initial est représentée par un ensemble de perturbations de la meilleure estimation possible de la définition initiale. On a ainsi N valeurs qui définissent la distribution de probabilité de l'état initial de l'atmosphère. On procède ensuite à N intégrations par un modèle météorologique de ces états initiaux, et ainsi est obtenu un ensemble définissant la distribution de probabilité prévue pour l'échéance choisie. La meilleure estimation de l'état initial est elle aussi intégrée. C'est ce qu'on appelle la "prévision de contrôle".

C'est la façon de définir les perturbations de l'état initial qui différencie les deux méthodes. La construction de ces perturbations est cruciale pour l'ensemble. En effet, si ces perturbations étaient faites au hasard, il serait fréquent qu'elles se dissipent avec la progression de la prévision, en raison de phénomènes d'ajustements et de compensations dans le modèle. Pour que les perturbations de l'état initial perdurent dans la prévision et conduisent à un ensemble d'états initiaux correctement dispersif, il faut donc qu'elles correspondent aux modes les plus sensibles du modèle de prévision. Ce travail de définition des perturbations initiales de l'ensemble fait l'objet de nombreux travaux, et deux méthodes différentes sont actuellement le plus souvent utilisées par les grands centres météorologiques pour la production de leurs prévisions d'ensemble atmosphériques : les vecteurs singuliers, et la méthode "Breeding of Growing Modes".

Vecteurs Singuliers (SV) :

C'est la méthode qui a été choisie par le CEPMMT pour la production de ses prévisions d'ensemble (*Molteni et al. (1996), ECMWF (2005)*), ainsi que pour la prévision d'ensemble de Météo-France PEARP (Prévision d'Ensemble ARPege ; *Nicolau (2002)*). Elle nécessite l'utilisation du modèle linéarisé et du modèle adjoint, qui sont par ailleurs nécessaires à l'as-

simulation de données variationnelle (4D-VAR). Mais si le 4D-VAR cherche à minimiser la distance entre les simulations du modèle et les observations, la méthode des vecteurs singuliers recherche au contraire les perturbations de l'état initial qui auront le plus d'impact sur la prévision à une échéance donnée (48H dans le cas du CEPMMT, 12H dans le cas de la PEARP), et sur une zone géographique donnée. Dans le cas du CEPMMT, des vecteurs singuliers sont calculés indépendamment pour la zone tropicale (de 30°N à 30°S), et pour chacun des hémisphères (au-delà de 30°) (*Buizza and Palmer (1995)*). Dans le cas de la PEARP, le calcul se fait sur une zone couvrant le proche Atlantique en ce qui concerne la configuration de la PEARP utilisée lors de cette thèse.

Le calcul conduit à l'obtention de N (50 dans le cas du CEPMMT, 10 pour la PEARP) perturbations de l'état initial, et par suite de N prévisions de l'évolution de l'atmosphère, considérées équiprobables entre elles. Néanmoins, chacune de ces N prévisions, prise individuellement, est statistiquement moins performante que la simulation de contrôle. C'est en effet une conséquence du fait qu'on calcule les perturbations autour de la meilleure estimation possible de l'état initial de l'atmosphère : l'analyse. Les procédures de génération des vecteurs singuliers ont été étalonnées de manière à produire des perturbations dont l'ordre de grandeur est comparable aux erreurs d'analyse, et qui en même temps conduisent à une dispersion de l'ensemble réaliste à moyenne échéance.

Du fait de son coût élevé, la recherche des vecteurs singuliers ainsi que la prévision d'ensemble se font à une résolution réduite par rapport au modèle déterministe. Ceci confère aux prévisions d'ensemble moins de réalisme que dans le cas de la prévision déterministe, ce qui est en particulier sensible dans les régions de montagne.

Dans le cas du CEPMMT, les 51 membres de l'ensemble (la simulation de contrôle ainsi que les 50 simulations perturbées) ont été calculés avec une résolution spectrale T255L40 (environ 80 km sur la France, avec 40 niveaux verticaux), du 21 novembre 2000 jusqu'au 31 janvier 2006. Le 1er février 2006, la résolution du système de prévision d'ensemble a été portée à T399L62 (environ 40 km, avec 62 niveaux verticaux). Le 28 novembre 2006, le système de prévisions d'ensemble du CEPMMT est devenu Var-EPS (Variable Resolution Ensemble Prediction System). L'échéance de prévision a été étendue à 15 jours, les prévisions de 1 à 10 jours sont produites à la résolution T399L62, et celles de 11 à 15 jours à la résolution T255L62.

De plus, les prévisions d'ensemble du CEPMMT sont destinées à la prévision à moyenne échéance. Il a donc été choisi d'utiliser une période d'optimisation des vecteurs singuliers de 48H afin de produire des prévisions les plus adaptées possible à la moyenne échéance.

Enfin, différentes améliorations ont été portées au système de prévision d'ensemble du CEPMMT, en particulier l'utilisation de vecteurs singuliers évolués, c'est-à-dire que l'on considère une combinaison linéaire des vecteurs singuliers croissant entre d et $d + 2$ et ayant crû entre $d - 2$ et d (*Barkmeijer et al. (1999)*). De plus, l'ensemble tient également compte de l'incertitude modèle, avec l'ajout pour chaque membre de l'ensemble (sauf pour la simulation de contrôle) d'un bruit stochastique simulant l'erreur modèle (*Buizza et al. (1999)*).

Breeding of Growing Modes (BGM, méthode des erreurs croissantes) :

Cette méthode est un peu plus simple et moins coûteuse que la précédente. Elle consiste à repérer les modes qui ont le plus crû pendant la période d'assimilation, détectés avec le modèle non-linéaire. Concrètement, on applique une perturbation à l'état initial (analyse) de l'atmosphère au temps t_0 , que l'on propage grâce à une simulation du modèle jusqu'au temps t_1 (généralement $6H$ à $1J$ suffisent). On propage de même l'état initial non-perturbé. La différence entre les deux états finaux au temps t_1 est calculée et ramenée à l'échelle de l'erreur initialement appliquée (au sens de l'eqm). Cette différence "normée" est par la suite ajoutée à l'analyse de l'atmosphère du temps t_1 et les étapes définies ci-dessus sont cyclées (*Toth and Kalnay (1993)*). Les différents membres de l'ensemble sont définis grâce à différentes perturbations initiales. Contrairement au système des vecteurs singuliers du CEPMMT, les prévisions peuvent ici être utilisées pour la courte échéance.

Cette méthode a été choisie par le NCEP pour la production opérationnelle de prévisions d'ensemble météorologiques depuis 1992 (*Tracton and Kalnay (1993)*, *Toth and Kalnay (1993)*, *Toth and Kalnay (1997)*).

Assimilation d'ensemble :

Les méthodes d'assimilation d'ensemble peuvent être utilisées afin de construire une prévision d'ensemble, en utilisant les différentes analyses données par l'assimilation comme états initiaux de chaque membre. En effet, un grand nombre N d'assimilations de données (au moins 10) sont effectuées à partir d'observations perturbées pour les méthodes d'assimilation d'ensemble (EnKF (Ensemble Kalman Filter, *Evensen (2003)*)). Les observations ne sont pas perturbées pour l'ETKF (Ensemble Transformed Kalman Filter, *Wang and Bishop (2003)*). A partir de l'ensemble d'états initiaux obtenus, il est possible de produire des prévisions d'ensemble. Un des avantages de cette méthode est qu'elle peut être utilisée pour la courte échéance.

Quatre des méthodes citées ci-dessus ont été comparées par *Descamps and Talagrand (2007)*, et il apparaît la hiérarchie suivante : $\text{EnKF} \approx \text{ETKF} > \text{BGM} > \text{SV}$. Cependant, elles sont toutes relativement coûteuses, dans le sens où elles nécessitent N intégrations d'un modèle. Il existe néanmoins des méthodes moins lourdes :

Prévision d'ensemble à aire limitée

Cette manière d'obtenir des prévisions d'ensemble combine l'utilisation d'un modèle à aire limitée, et d'un modèle de prévisions d'ensemble plus global. Son principe repose sur le fait d'utiliser les membres de la prévision ensembliste d'un modèle global comme états initiaux et conditions aux limites d'un modèle à aire limitée, c'est-à-dire dont la zone de simulation est restreinte. Par exemple, en Hongrie, la prévision d'ensemble ARPEGE (PEARP) est utilisée comme états initiaux et conditions aux limites du modèle ALADIN pour produire des prévisions d'ensemble météorologiques à fine échelle et à courte échéance sur l'Europe de l'Est (projet LAMEPS, *Hágel and Szépszó (2004)*). La prévision COSMO-LEPS quant à

elle utilise 16 membres dérivés de l'ensemble du CEPMMT à haute résolution, sur l'Europe Centrale et du Sud (*Marsigli et al. (2005)*).

Il semble cependant que cette méthode ne soit pas très efficace, car les perturbations générées par la prévision d'ensemble globale est souvent dédiée à une échelle plus large et à une échéance à moyen terme. C'est pourquoi il est plus efficace d'utiliser pour ce cas une assimilation d'ensemble, comme c'est par exemple le cas en ce qui concerne le système canadien de prévision d'ensemble à courte échéance et à haute résolution.

La prévision d'ensemble "du pauvre" (Poor man's ensemble) :

L'idée ici est d'utiliser les modèles existants qui couvrent le domaine d'intérêt. L'ensemble est donc constitué des prévisions déterministes issues de N modèles. En raison des différences qui existent entre les observations utilisées dans les différents modèles, dans les méthodes d'assimilation de données ou encore dans les stratégies de modélisation, il existe toujours des différences dans les états initiaux et dans les prévisions de ces N modèles.

Néanmoins, le nombre de modèles utilisés est souvent trop faible pour une interprétation probabiliste. De plus, un inconvénient de cette technique est qu'elle ne tente pas d'estimer la prévisibilité réelle de la situation, il est par exemple possible que tous les modèles aillent dans la même (mauvaise) direction. Un des avantages, en plus du coût nul, est en revanche d'utiliser les modèles à leur résolution maximale.

Dans cette approche multi-modèle, toutes les prévisions sont en principe equi-probables. Cependant, il existe un certain degré de corrélation, lié au fait qu'on utilise souvent les mêmes systèmes d'observations, ainsi que des méthodes et hypothèses similaires pour l'assimilation et la modélisation. Pour cette méthode, l'estimation de l'erreur de "modèle" est impossible, car différents modèles sont utilisés.

Lagged Average Forecasting

Cette méthode est une variation de l'approche multi-modèle présentée ci-dessus. Elle part du constat que des prévisions ont déjà été faites 6H, 12H, 24H, etc. avant l'instant initial de la prévision. En attribuant des poids à ces prévisions antérieures, il est possible de produire une prévision moyenne ainsi qu'une estimation de la distribution de probabilité prévue.

Tout comme dans le cas précédent, l'avantage de cette méthode est d'utiliser des prévisions déjà existantes (peu de coût supplémentaire), et également d'utiliser le ou les modèle(s) à sa ou leur résolution maximale. Cette méthode est plus appropriée à la prévision saisonnière, car le décalage temporel est suffisant pour représenter les problèmes d'erreur.

3.1.2 Application des prévisions d'ensemble à l'hydrologie

Si la prévision d'ensemble est couramment utilisée en météorologie, comme on vient de le voir, pour la prévision à moyen terme depuis une vingtaine d'années, son application à l'hydrologie est beaucoup plus récente. La production de prévisions d'ensemble hydrologiques et leur utilisation opérationnelle sont actuellement en plein développement dans la communauté internationale scientifique. En effet, une nécessité de mieux prévoir et se protéger des crues rend obligatoire la mise en œuvre d'efforts supplémentaires, afin de limiter les conséquences de ces crues.

Plusieurs actions internationales récentes en cours témoignent de l'émergence de ces prévisions d'ensemble hydrologiques.

HEPEX :

Mis en place en 2004, le projet HEPEX (Hydrological Ensemble Prediction EXperiment, *Schaake et al. (2007)*), qui rassemble les communautés hydrologique et météorologique, vise à l'amélioration des prévisions d'ensemble hydrologiques. Dans ce cadre, des expériences d'intercomparaisons, des conférences, et des groupes de travail, sont organisés autour de questions telles que "Quelles sont les sources d'incertitude en hydrologie ? Comment les prendre en compte ? Comment utiliser au mieux les systèmes de prévisions d'ensemble météorologiques dans des systèmes couplés hydrométéorologiques ? Comment vérifier des prévisions d'ensemble hydrologiques ? Comment utiliser de telles prévisions et sous quelle(s) forme(s) les communiquer aux utilisateurs (services de sécurité civile, gestionnaires de l'eau, grand public) ?".

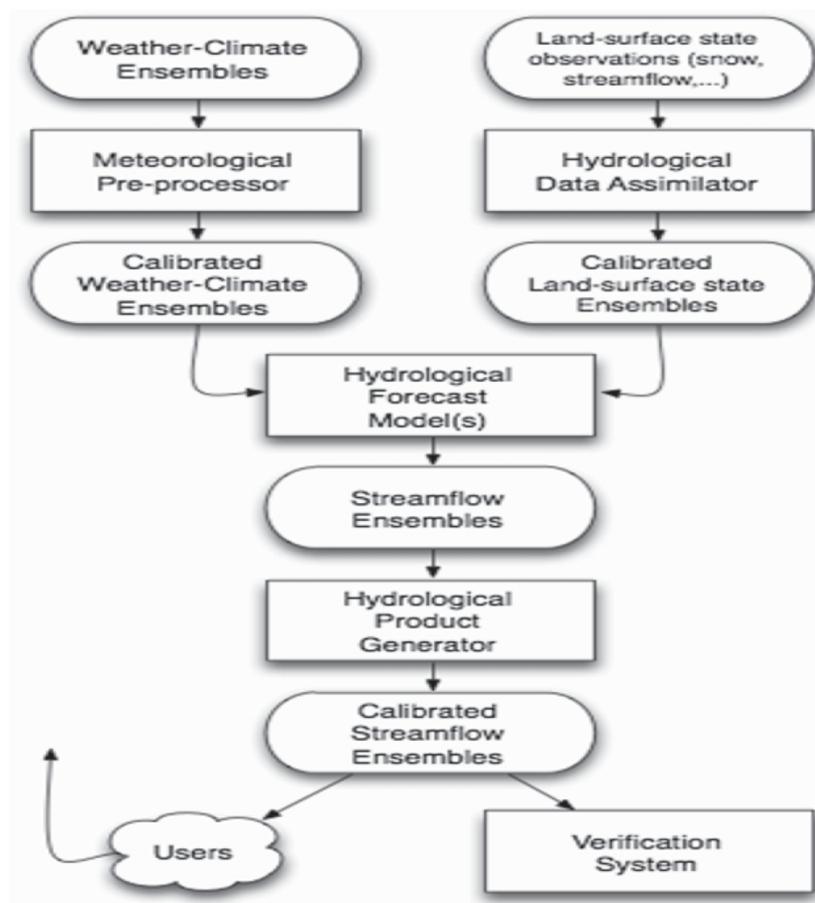


FIGURE 3.1 – Schéma des composants d'un système de prévision d'ensemble de débits (*Schaake et al. (2007)*).

Sur la figure 3.1 est représenté le schéma de l'ensemble des composants d'un système de

prévisions d'ensemble de débits sur lesquels se penche le projet HEPEX. En effet, ce projet s'intéresse à la fois à l'utilisateur final (post-processing), à la vérification statistique des prévisions hydrologiques, à la génération des produits hydrologiques de la prévision d'ensemble, aux modèles hydrologiques eux-mêmes, à l'assimilation de données hydrologiques et au pre-processing des données météorologiques utilisées dans de tels systèmes (*Schaake et al. (2007)*).

COST :

Au niveau européen, dans le cadre de la coopération scientifique COST (European Cooperation in Science and Technology, <http://www.cost.esf.org/>), une nouvelle action a été lancée en 2005 et prendra fin en juin 2010 (COST Action 731 : Propagation of Uncertainty in Advanced Meteo-Hydrological Forecast Systems). Cette action s'intéresse aux questions liées à l'incertitude dans les systèmes météorologiques et à son impact sur les systèmes couplés hydrométéorologiques, à des fins de prévision hydrométéorologique.

EFAS :

Suite à des crues dramatiques de l'Elbe et du Danube en 2002, la Communauté Européenne a mis en place un système d'alerte européen pour les crues (EFAS, European Flood Alert System, <http://natural-hazards.jrc.it/>), développé au JRC (Joint Research Center, Ispra, Italie).

Ce système met à disposition des états européens partenaires des prévisions hydrologiques, déterministes d'une part, basées sur les prévisions météorologiques du CEPMMT à 10 jours et sur celles du DWD (Deutscher Wetter Dienst, le service météorologique allemand) à 7 jours, et d'ensemble d'autre part, basées sur le Var-EPS (Variable Resolution Ensemble Prediction System) du CEPMMT, d'échéance 10 jours.

Le système EFAS est pré-opérationnel depuis 2005. Ses buts sont d'une part de fournir des prévisions hydrologiques à l'échelle de l'Europe, en particulier pour les bassins trans-frontaliers, et d'autre part d'étendre l'échelle temporelle des prévisions hydrologiques habituellement produites et utilisées dans les différents services européens en charge de l'annonce et de la prévision des crues (généralement de l'ordre de deux jours) (*Ramos et al. (2007)*).

Les données fournies aux états partenaires ne sont pas des débits ou des hauteurs d'eau simulés, mais des tableaux d'alerte graduées en fonction du risque décelé et de l'échéance de prévision. En effet, comme les débits simulés ne sont pas forcément du même ordre de grandeur que les débits observés, il a été décidé de ne pas les communiquer aux services des états membres. La décision de déclencher une alerte ou non a été calibrée sur des événements du passé.

Initiatives nationales :

Enfin, au niveau national, de nombreux pays ont lancé la production de prévisions d'ensemble hydrologiques, que ce soit en mode expérimental, pré-opérationnel, ou un peu plus rarement opérationnel.

Parmi les systèmes existant dans divers pays, la plupart ont une approche similaire, qui consiste à forcer un modèle sol-hydrologie plus ou moins détaillé, par une prévision d'ensemble météorologique. Les prévisions météorologiques utilisées sont alors variables selon les nations et leurs besoins (géographie, hydrologie et taille des bassins).

Le service météorologique suisse (Swiss Federal Office of Meteorology and Climatology, MeteoSwiss, http://www.meteosuisse.ch/web/fr/meteo/previsions_numeriques/probabilites.html) a constitué un système de prévisions d'ensemble hydrologiques basé sur l'ensemble de prévision atmosphérique COSMO-LEPS (16 membres dérivés de l'ensemble du CEPMMT à haute résolution, sur l'Europe Centrale et du Sud).

Le service météorologique suédois (SMHI, Swedish Meteorological and Hydrological Institute) dispose quant à lui d'un système de prévision d'ensemble hydrologique opérationnel depuis 2004 nommé AEGIR (<http://www.smhi.se>). Ce système s'appuie sur les prévisions d'ensemble atmosphériques du CEPMMT qui forcent un modèle hydrologique (HBV, *Lindstrom et al. (1997)*), et produit un ensemble de 51 prévisions de débit à 9 jours, sur 58 bassins du pays. L'évaluation des performances de ce système a été réalisée au SMHI (*Olsson and Lindström (2008)*).

Aux Pays-Bas, un système basé sur les prévisions d'ensemble du CEPMMT pour le contrôle des bassins régulant les inondations (*Van Andel et al. (2008)*) a été mis en place. Cette étude a montré l'apport du CEPMMT en terme de scores tels que le Hit Rate, les Fausses Alarmes et les Non Prévisions. Une étude de coûts est en cours.

Enfin, en Belgique, une expérience de prévision d'ensemble des débits de deux petits bassins a été menée sur une période de 6 ans (1996-2002) (*Roulin and Vannitsem (2005)*). Dans le cadre de cette expérience, les prévisions d'ensemble atmosphériques du CEPMMT à 10 jours ont été directement couplées avec un modèle hydrologique. L'analyse statistique des résultats de cette expérience a montré la capacité du système pour la prévision à moyen terme, en particulier en hiver, et ce malgré la faible résolution du champ de précipitation prévu par le système de prévision d'ensemble du CEPMMT. Elle a également mis en évidence l'apport d'une prévision d'ensemble par rapport à la prévision déterministe, et a montré l'intérêt d'un tel système pour la pré-alerte.

Pour être complet, on peut citer d'autres systèmes de prévision d'ensemble hydrologiques opérationnels ou pré-opérationnels, qui sont en place en Finlande (*Vehvilainen and Huttunen (2002)*), aux Etats-Unis (*Mcenery and al. (2005)*), en Hongrie (*Balint et al. (2006)*), ou en Autriche (*Komma et al. (2007)*). Une revue plus complète et critique de ces systèmes a été effectuée par *Cloke and Pappenberger (2009)*.

Dans tous ces systèmes, les précipitations constituent la principale source d'incertitude prise en compte (avec parfois la température de l'air). Néanmoins, d'autres aspects sont source d'incertitude : l'incertitude sur les conditions initiales hydrologiques, ou sur la représentation des processus hydrologiques dans les modèles, par exemple. Ceci n'est pas représenté dans ces systèmes de prévision d'ensemble, et contribue ainsi à une dispersion souvent trop faible dans les prévisions d'ensemble de débits. Introduire un moyen de prendre en compte ces sources d'incertitude permettrait vraisemblablement une amélioration de ces systèmes dans le futur (*Schaake (2006)*).

3.1.3 Outils de vérification des prévisions d'ensemble

Les sorties des prévisions d'ensemble ne s'interprètent pas de la même manière que les sorties des prévisions déterministes. En effet, il est incorrect d'isoler un membre de la prévision et de calculer un quelconque score sur celui-ci. C'est pourquoi des scores ensemblistes doivent être définis et utilisés dans le cadre de l'interprétation des résultats de prévisions d'ensemble.

Dans cette partie sont décrits les principaux scores ensemblistes utilisés pour l'étude des prévisions hydrologiques à moyen terme (CEPMMT ; *Rousset-Regimbeau (2007)*) ainsi que pour la comparaison avec la prévision d'ensemble hydrologique PEARP effectuée durant cette thèse. Ces scores sont l'Ecart Quadratique Moyen (ou RMSE), le Ratio-RMSE, la Dispersion de l'ensemble, la Ratio-dispersion, le Brier Score (*BS*) et le Brier Skill Score (*BSS*), le Ranked Probability Score (*RPS*) et le Ranked Probability Skill Score (*RPSS*), et les taux de succès, fausses alarmes et non prévisions, les courbes de ROC, les diagrammes de Talagrand, et les diagrammes de fiabilité.

Enfin, afin de comparer les deux prévisions d'ensemble, et pour des raisons qui seront détaillées par la suite, différents tests statistiques sont définis. Dans ce chapitre sera aussi présentée une méthode pour prendre en compte le biais qu'une différence de taille entre deux ensembles que l'on compare, induit sur le calcul du *BSS* et du *RPSS*.

Ecart Quadratique Moyen (EQM)

L'Ecart Quadratique Moyen (EQM) ou Root Mean Square Error (RMSE) représente l'erreur quadratique moyenne de l'ensemble par rapport à une référence, en général l'observation :

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - o_i)^2} \quad (3.1)$$

avec N le nombre de jours de prévisions d'ensemble, o_i l'observation de la donnée pour le jour i (i.e. la référence), et m_i la moyenne des membres de l'ensemble pour ce même jour i .

On utilisera aussi le Ratio-RMSE dans le cadre des prévisions d'ensemble de débits, qui revient à normer l'EQM par le débit moyen observé \bar{o} :

$$Ratio - RMSE = \frac{1}{\bar{o}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - o_i)^2} \quad (3.2)$$

Dispersion de l'ensemble (σ)

La dispersion de l'ensemble sur une période donnée est calculée comme étant la moyenne (sur cette période) de l'écart-type des membres par rapport à leur moyenne :

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_{k,i} - m_i)^2} \quad (3.3)$$

avec n le nombre de membres, m_i la moyenne de l'ensemble pour le jour i , $x_{k,i}$ la valeur du membre k pour le jour i , et N le nombre de jours de prévisions d'ensemble de la période étudiée. De même, la Ratio-dispersion a été utilisée :

$$Ratio - \sigma = \frac{1}{\bar{o}N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_{k,i} - m_i)^2} \quad (3.4)$$

Brier Score (BS) et Brier Skill Score (BSS)

Le score le plus connu et le plus utilisé dans le cadre des prévisions d'ensemble est le score de Brier (appelé aussi Brier Score ou BS) (*Brier (1950)*). Le BS quantifie la capacité d'une prévision d'ensemble à prévoir un dépassement ou un non-dépassement de seuil. On le définit de la manière suivante :

$$BS = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y_k - o_k)^2 \quad 0 \leq BS \leq 1 \quad (3.5)$$

avec y_k la probabilité de l'évènement prévu (c'est-à-dire le rapport entre le nombre de membres prévoyant l'évènement et le nombre total de membres), et $o_k = 1$ si l'évènement est observé, $o_k = 0$ sinon. Une prévision parfaite donnera donc $BS = 0$, tandis qu'un BS proche de 1 caractérisera une prévision d'ensemble mauvaise.

On peut décomposer le score de Brier en la somme de trois termes (*Murphy (1973)*), appelés respectivement fiabilité, résolution et incertitude :

$$BS = BS_{fiab} - BS_{rés} + BS_{inc}, \quad (3.6)$$

avec :

$$BS_{fiab} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n+1} N_i (y_i - \bar{o}_i)^2, \quad (3.7)$$

$$BS_{rés} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n+1} N_i (\bar{o}_i - \bar{o})^2, \quad (3.8)$$

$$BS_{inc} = \bar{o}(1 - \bar{o}) \quad (3.9)$$

avec N_i le nombre de prévisions dans la catégorie i , \bar{o} la fréquence moyenne observée du phénomène :

$$\bar{o} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N o_k, \quad (3.10)$$

et \bar{o}_i la fréquence relative d'occurrence dans la classe i :

$$\bar{o}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{k \in N_i} o_k, \quad (3.11)$$

La fiabilité décrit la capacité du système de prévisions d'ensemble à prévoir des probabilités justes. C'est-à-dire que si un dépassement ou non-dépassement de seuil est prévu m fois

avec une probabilité p par le système de prévisions d'ensemble, on doit aussi l'observer avec une fréquence p parmi ces m cas. Ce terme est orienté négativement, avec une fiabilité parfaite pour $BS_{fiab} = 0$.

La résolution représente la capacité du système à séparer les classes de probabilité, elle est orientée positivement.

Enfin, l'incertitude est la variance des observations, elle ne dépend pas du système de prévision.

Le Brier Skill Score (BSS) :

Afin de comparer les performances de plusieurs systèmes de prévisions d'ensemble, on n'utilise pas le BS , mais le BSS (Brier Skill Score). Le BSS possède en effet l'avantage de comparer le BS à un score de référence (BS_{ref} , le BS d'une expérience de référence), et rend donc les comparaisons entre systèmes de prévisions d'ensemble possibles :

$$BSS = 1 - \frac{BS}{BS_{ref}}, \quad -\infty \leq BSS \leq 1 \quad (3.12)$$

Le BSS vaut donc 1 pour une prévision parfaite, un score négatif indiquant une performance moins bonne que la référence utilisée. En général, la référence utilisée est une climatologie (d'observations ou de modèle).

Une autre manière de calculer le BSS permettant de s'affranchir du calcul du BS pour une simulation de référence existe :

$$BSS = \frac{\text{résolution} - \text{fiabilité}}{\text{incertitude}} \quad (3.13)$$

En effet, pour une climatologie, la définition de la fiabilité et de la résolution nous donne des valeurs nulles pour ces deux composantes du BS , donc on a $BS_{ref} = BS_{dim} = \text{incertitude}$.

Ranked Probability Score (RPS) et Ranked Probability Skill Score (RPSS)

Le Ranked Probability Score (RPS) (*Wilks (1995)*) est un score issu du Brier Score. Sa particularité est d'évaluer le système de prévision d'ensemble sur l'ensemble de la gamme des valeurs prises par le paramètre étudié. Les prévisions sont pour cela divisées en J catégories, avec $J = 10$ ou $J = 16$ pour la suite de ce manuscrit. Pour les précipitations, les catégories sont délimitées par les valeurs 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 et 10 $mm \text{ jour}^{-1}$. Pour les débits, ce sont les déciles d'une climatologie de SIM qui sont utilisés lors du cas de la comparaison SIM-CEPMMT/SIM-PEARP sans assimilation (chapitre suivant), et 15 quantiles calculés par la Banque Hydro pour les scores concernant l'étude des impacts de l'assimilation des débits. On définit y_j comme la probabilité de l'évènement prévu pour la classe j . Le RPS et le $RPSS$ sont définis grâce aux variables suivantes, qu'on peut appeler, respectivement, prévision cumulée et observation cumulée :

$$Y_m = \sum_{j=1}^m y_j, \quad m = 1, \dots, J,$$

$$O_m = \sum_{j=1}^m o_j, \quad m = 1, \dots, J.$$

Comme Y_m et O_m sont les cumuls de 1 à m des probabilités de prédiction ou d'observation dans chacune des catégories préalablement définies, on a $Y_J = 1$ et $O_J = 1$ (ici toutes les catégories sont en effet prises en compte).

On décrit alors le RPS comme la somme des écarts quadratiques des différentes composantes de Y_m et O_m , moyennée sur la période considérée (N jours) :

$$RPS = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[\sum_{m=1}^J (Y_m - O_m)^2 \right]_k \quad (3.14)$$

Tout comme le BS , le RPS est un score orienté négativement. C'est-à-dire qu'il est nul pour une prévision d'ensemble parfaite, et positif sinon.

Le Ranked Probability Skill Score ($RPSS$) :

Le Skill Score associé au RPS (appelé $RPSS$) se définit de manière semblable au Brier Skill Score :

$$RPSS = 1 - \frac{RPS}{RPS_{ref}} \quad (3.15)$$

RPS_{ref} est le RPS d'une simulation de référence, souvent choisie comme étant une simulation climatologique ou une climatologie de débits.

Taux de succès, fausses alarmes, non prévisions

De manière semblable à ce qui existe pour les prévisions déterministes, on peut définir pour les prévisions ensemblistes des taux de succès, fausses alarmes et non-prévisions. En effet, il suffit de se fixer un pourcentage minimum p de membres qui prédisent l'évènement considéré pour déterminer si un évènement est prédit ou non par la prévision d'ensemble. Ainsi, on peut, de la même manière que pour les prévisions déterministes, définir la table de contingence suivante :

TABLE 3.1 – Table de contingence des évènements possibles.

Evènement	Observé	Non observé
Prévu	a	b
Non prévu	c	d

Le taux de succès définit la part d'évènements correctement prévus, par rapport à la totalité des cas observés :

$$Taux\ de\ succès = \frac{a}{a + c} \quad (3.16)$$

Le taux de fausses alarmes est la part d'évènements prévus mais non observés, par rapport au nombre de prévisions de ceux-ci :

$$Taux\ de\ fausses\ alarmes = \frac{b}{a + b} \quad (3.17)$$

Le taux de bonnes prévisions est la part de prévisions correctes, par rapport à tous les cas :

$$\text{Taux de bonnes prévisions} = \frac{a + d}{a + b + c + d} \quad (3.18)$$

Enfin, le taux de non-prévisions compte le nombre de cas où des événements observés ont été ratés par la prévision d'ensemble :

$$\text{Taux de non prévisions} = \frac{c}{a + c} \quad (3.19)$$

Courbes de ROC

On peut rassembler les taux de fausses alarmes et de réussite dans un seul et même graphique, que l'on appelle courbe de ROC (*Marzban (2004)*). En fait, ces courbes représentent le tracé des couples taux de fausses alarmes (en abscisse) /taux de réussite (en ordonnée) obtenus pour différents pourcentages (appelé p dans le paragraphe précédent).

On pourra alors déterminer la qualité de la prévision d'ensemble par la position de cette courbe. En effet, une prévision parfaite donnerait un taux de fausses alarmes nul, alors que le taux de bonnes prévisions serait de 1. Ainsi, plus la courbe sera proche de ce couple de valeur (c'est-à-dire en fait proche du coin supérieur gauche du graphe), meilleures seront les prévisions.

Diagrammes de Talagrand

Les diagrammes de Talagrand (aussi appelés diagrammes de rang) sont obtenus en comptant le rang de la vérification (c'est-à-dire l'observation utilisée) parmi les valeurs des membres des prévisions d'ensemble, classés par ordre croissant (*Hamill (2000)*). On effectue cela pour chacun des couples vérification/prévision d'ensemble. Ainsi, si la prévision d'ensemble comporte n membres, le diagramme comportera $n + 1$ catégories.

Une prévision d'ensemble parfaite est caractérisée par sa fiabilité. C'est-à-dire que si un événement est prévu avec une probabilité p un nombre m de fois, on doit l'observer avec une fréquence p parmi ces m cas. Ainsi, chacune des catégories définies par l'ensemble est équiprobable. Un diagramme de rang représentant une prévision d'ensemble parfaite serait donc plat, c'est-à-dire que chacune de ses catégories comprendrait le même nombre de cas.

Cependant, c'est rarement le cas. Ainsi, un manque de variabilité de l'ensemble présentera un diagramme en forme de U, alors qu'une trop forte variabilité donnera un diagramme avec les rangs médians surpeuplés. Enfin, un biais positif (resp. négatif) conduira à une surpopulation des rangs de gauche (resp. droite) du diagramme, c'est-à-dire un diagramme en forme de L (resp. J).

L'interprétation d'un diagramme de rang ne doit pas se faire sans s'intéresser à d'autres scores, son interprétation n'étant pas triviale. Ainsi, un diagramme plat ne représente pas forcément une prévision parfaite (*Hamill (2000)*), tout comme un diagramme en forme de U ne signifie pas obligatoirement que la prévision manque de dispersion. Ils peuvent en effet être le fruit de biais conditionnels.

Diagramme de fiabilité

La performance de la prévision d'ensemble d'un évènement binaire peut être représentée graphiquement par un diagramme de fiabilité (*Wilks (1995)*).

Ce type de diagrammes représente en fait les fréquences relatives observées de cet évènement, par rapport aux probabilités prévues. Plus la courbe sera proche de la diagonale, meilleure sera la prévision d'ensemble.

Tests statistiques pour la comparaison d'ensembles

Comparer deux ensembles à l'aide de scores statistiques permet de déterminer lequel des deux systèmes offre la meilleure prévision, et dans quelles circonstances. Cependant, avant de conclure sur la réelle différence de performance ainsi mise en valeur, il convient de caractériser le degré de confiance que l'on peut avoir en une telle différence. C'est pourquoi il est nécessaire, afin de renforcer les conclusions issues d'une comparaison de prévisions d'ensemble, de vérifier la significativité de la différence des scores ensemblistes, tels que le BSS et le RPSS, par exemple. Les questions que l'on se pose sont : "Tel score est-il *significativement* différent de tel autre ? Telle prévision d'ensemble est-elle *significativement* meilleure que telle autre ?".

C'est pourquoi au cours de cette thèse, dans le cadre de la comparaison de deux chaînes de prévisions d'ensemble (les précipitations de la PEARP et de l'EPS du CEPMMT, ou les prévisions d'ensemble hydrologiques SIM qui en découlent respectivement), plusieurs tests statistiques ont été utilisés. Ces tests, au nombre de trois, sont le *t*-test (aussi appelé student-test), le test non-paramétrique de Wilcoxon, et une méthode de ré-échantillonnage (*Hamill (1999)*). Ces tests peuvent être utilisés dans le cadre des comparaisons d'*EQM*, de dispersion, de *BSS* et de *RPSS*.

Dans les paragraphes suivants, seules les méthodes pour calculer les tests statistiques en ce qui concerne le *BSS* sont détaillées, mais on peut en déduire de manière simple la façon de les calculer pour les autres scores ensemblistes cités précédemment.

Les scores, déterministes ou ensemblistes, sont souvent corrélés spatialement. C'est pourquoi nous utiliserons ici des scores groupés sur la totalité des points de prévision. On préférera utiliser la somme des scores (*BS* ou *RPS*), plutôt que la moyenne journalière de leur skills scores associés (*BSS* et *RPSS*) (*Hamill (1999)*). Cependant, dans le cadre du dernier chapitre, on utilisera la moyenne journalière des *BSS* et *RPSS* car ces scores sont débiaisés (*Weigel et al. (2006)*, voir plus loin dans ce chapitre), ce qui a un impact fort, mais ne se voit pas sur le *BS* et le *RPS*.

Enfin, précisons que dans le cadre des comparaisons entre les prévisions d'ensemble de l'EPS du CEPMMT et de la PEARP, le *t*-test et le test non-paramétrique de Wilcoxon ont été utilisés en ce qui concerne la vérification des précipitations, alors que pour les débits, le test de ré-échantillonnage a été choisi. Ce choix a été fait afin de prendre en compte la corrélation temporelle inhérente aux débits.

Le *t*-test (ou student-test)

Le t -test est un test paramétrique permettant de comparer deux échantillons statistiques. Ces deux échantillons doivent avoir la même variance, et on supposera que ce sera le cas pour les échantillons de BSS et RPSS que l'on comparera par la suite.

Détaillons ici son fonctionnement pour le cas de la comparaison des BSS de deux ensembles différents. Comme tout test statistique, le t -test va tester l'hypothèse nulle :

$$H_0 : BS_{M_1} - BS_{M_2} = 0, \quad (3.20)$$

avec M_1 le modèle 1, et M_2 le modèle 2. Nous allons tout d'abord définir un vecteur \vec{q} , de longueur N le nombre de jours de la période étudiée. Pour chaque jour, ce vecteur sera rempli par la différence entre la somme des BS sur toute la grille d'un premier système de prévisions d'ensemble (par ex. pour la précipitation PEARP), et la somme des BS sur toute la grille d'un second système de prévisions d'ensemble (par ex. pour la précipitation de l'EPS du CEPMMT).

On va calculer \bar{q} sa moyenne, et s_q sa dispersion. Selon le t -test (*Hamill (1999)*), on a donc l'écart du test $\bar{q}/(s_q/\sqrt{N})$ qui est distribuée comme une t -variable, avec $N - 1$ degrés de liberté. On cherche donc la position de cet écart dans une table de Student, pour une variable à $N - 1$ degrés de liberté, par rapport à un taux critique que l'on a fixé (par la suite on a fixé ce taux à 90% de significativité). C'est-à-dire que si $\bar{q}/(s_q/\sqrt{N})$ correspond à moins de 90% de significativité, l'hypothèse (H_0) est vérifiée, et les deux ensembles ne sont pas significativement différents. On ne peut pas conclure sur leur comparaison. Dans le cas contraire, un des deux BS est significativement meilleur que l'autre.

Le test non-paramétrique de Wilcoxon

Ce test a été décrit par *Wilks (1995)*. On ré-utilise ici le vecteur \vec{q} des différences des BS de taille N . On remplit un vecteur \vec{z} de taille N avec les valeurs absolues des éléments de \vec{q} rangées dans un ordre croissant. Enfin, on prend \vec{t} de taille N rempli avec les rangs des éléments de \vec{z} . Quand \vec{z} possède des éléments de même valeur, on leur assigne dans \vec{t} la moyenne de leurs rangs. d_0 est défini comme étant le nombre d'éléments nuls de \vec{q} , d_i le nombre d'éléments égaux et non nuls dans \vec{t} , avec $i = 1, 2, \dots, r$ et r le nombre total d'égalités non nulles dans \vec{t} . Ensuite, on donne aux éléments de \vec{t} le signe des différences quotidiennes d'origine (cf \vec{q}), ce qui nous donne le vecteur \vec{u} . Enfin, on note U^+ la somme des éléments positifs de \vec{u} .

Donc, en respectant l'hypothèse nulle (c'est-à-dire que les BS des deux systèmes de prévisions d'ensemble sont égaux), on considère que la distribution des rangs positifs est Gaussienne, et que sa moyenne vaut :

$$\mu = \frac{N(N+1) - d_0(d_0+1)}{4} \quad (3.21)$$

La dispersion sous l'hypothèse nulle vaut alors :

$$\sigma = \left[\frac{N(N+1)(2N+1) - d_0(d_0+1)(2d_0+1)}{4} - \frac{\sum_{i=1}^r (d_i^3 - d_i)}{48} \right]^{1/2} \quad (3.22)$$

Enfin, il ne reste plus qu'à comparer la position de $(U^+ - \mu)/\sigma$ à la distribution Gaussienne, afin de déterminer la significativité de la différence des deux scores. De la même manière que pour le t -test, cette significativité a été fixée au-delà d'un seuil de 90% de certitude.

Toutefois, ces deux premiers tests ont cet inconvénient en commun qu'ils sont influencés par la dépendance temporelle des éléments comparés, ce qui peut poser problème lors de comparaisons de scores de débits. Ce n'est pas le cas pour les comparaisons de scores de précipitations, du fait de la nature stochastique de celles-ci. C'est pourquoi en ce qui concerne les débits une troisième méthode, dite de ré-échantillonnage, a été utilisée. Les dépendances temporelles sont réduites par ce ré-échantillonnage, et permettent une meilleure fiabilité du test de significativité.

Une méthode de ré-échantillonnage

Cette méthode consiste à considérer les deux vecteurs à comparer, et à créer successivement un certain nombre de nouveaux vecteurs en échangeant aléatoirement leurs éléments. On crée ainsi une distribution gaussienne nulle grâce à la différence des sommes de ces nouveaux vecteurs, qui servira à localiser la différence des sommes des vecteurs originaux (*Hamill (1999)*). Ainsi, cela permet de pallier le problème de la corrélation temporelle des débits.

Concrètement, on utilise à nouveau les deux vecteurs de taille N (le nombre de jours de la période d'étude) contenant les sommes quotidiennes des BS pour les deux modèles sur l'ensemble de la grille : BS_{M_1} et BS_{M_2} . On définit I une distribution nulle créée en générant un vecteur de taille N et contenant des 1 ou des 2 avec une probabilité égale. Ensuite, on échange entre BS_{M_1} et BS_{M_2} leurs coefficients d'indice j si $I_j = 2$, et on stocke la valeur de $\sum_{j=1}^N (BS_{M_1} - BS_{M_2})$ ainsi nouvellement créé. En répétant ce processus un millier de fois, on aura donc créé une distribution gaussienne. Enfin, il ne reste plus qu'à comparer la position de $\sum_{j=1}^N (BS_{M_1} - BS_{M_2})$ pour les vecteurs d'origine dans cette distribution afin de déterminer la significativité de leur différence.

Prise en compte de la taille de l'ensemble pour la comparaison de prévisions d'ensemble

Il a été montré que pour des ensembles de taille inférieure à 40 membres, les scores ensemblistes classiques (BSS et $RPSS$) sont biaisés négativement (*Déqué (1997)*). *Weigel et al. (2006)* ont montré que plus l'ensemble était petit, plus le Skill Score était biaisé négativement. C'est pourquoi *Weigel et al. (2006)* ont proposé une correction analytique simple à appliquer à ces scores. Ils ont proposé des formules corrigeant le score de la simulation utilisée comme référence de la manière suivante (pour le $RPSS$) :

$$RPSS = 1 - \frac{RPS}{RPS_{ref} + D}, \quad (3.23)$$

avec :

$$D = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^J \sum_{i=1}^k [p_i(1 - p_i - 2 \sum_{j=i+1}^k p_j)], \quad (3.24)$$

et n le nombre de membres de l'ensemble, J le nombre de classes pour le $RPSS$ (fixé à 10 ou 16 par la suite), et p_i la probabilité pour la climatologie d'être dans la i^{e} classe. Cette valeur D représente le biais induit par la taille de l'ensemble. Plus le nombre de membres est élevé, plus ce biais est faible.

En ce qui concerne le BSS , une formule peut être facilement déduite. En effet, le BS n'est autre qu'un cas particulier du RPS , pour le cas où on ne considère que deux catégories différentes ($J = 2$ et $p = 0.5$). Dans ce cas, le BSS débiaisé se calcule de la manière suivante :

$$BSS = 1 - \frac{BS}{BS_{ref} + D}, \quad (3.25)$$

avec :

$$D = \frac{1}{n}p(1 - p). \quad (3.26)$$

3.2 La chaîne de prévisions d'ensemble des débits de Météo-France

3.2.1 Prévisions d'ensemble hydrologiques à Météo-France

Dans ce contexte international d'émergence des prévisions d'ensemble en hydrologie, Météo-France a souhaité s'orienter vers la production de prévisions d'ensemble de débits, en se basant sur les outils hydro-météorologiques qui y sont développés depuis plusieurs années.

Il a donc été décidé de développer un système de prévisions d'ensemble des débits qui s'appuie sur le système couplé hydro-météorologique SAFRAN-ISBA-MODCOU (voir partie 2.6 pour la description de SIM-FRANCE).

Depuis de nombreuses années, cet outil a été développé à Météo-France, et a bénéficié d'un important travail de calibration sur les grands bassins versants français (le Rhône (*Etchevers (2000)*), l'Adour-Garonne (*Morel (2003)*) et la Seine (*Rousset-Regimbeau (2007)*, *Rousset et al. (2004)*)), puis sur la France entière (*Habets et al. (2008)*). Depuis fin 2003, il est en partie opérationnel à Météo-France, et fournit un suivi quotidien en temps réel des composantes des bilans d'eau et d'énergie, en particulier du contenu en eau des sols et des débits.

Ainsi, la chaîne de prévision d'ensemble des débits utilisée bénéficie de la robustesse du système couplé SIM.

D'une part, la chaîne SIM opérationnelle temps réel fournit pour chaque prévision un état initial détaillé et obtenu en utilisant le maximum d'observations disponibles au moment de la simulation.

D'autre part, pour les prévisions d'ensemble des débits elles-mêmes, les modules ISBA et MODCOU de SIM sont forcés par les prévisions d'ensemble atmosphériques du CEPMMT (*Molteni et al. (1996)*, *Buizza et al. (1999)*) à 10 jours. Le détail du fonctionnement de ce système est donné par la suite.

Cependant, les prévisions d'ensemble produites par le CEPMMT qui sont disponibles dans la Base de Données Analysées et Prévues (BDAP) de Météo-France, ont une résolution spa-

tiale plus basse (150 km environ) que celle de SIM (8 km), et mal adaptée aux zones de relief (Alpes, Cévennes et Pyrénées notamment). C'est pourquoi une procédure de désagrégation spatiale a été mise en place (voir section 3.2.2).

La chaîne de prévisions d'ensemble des débits basée sur SIM a été mise en place par Rousset-Regimbeau (2007) en utilisant comme prévision d'ensemble météorologique l'EPS du CEPMMT et tourne en temps réel depuis septembre 2004. Le principe général consiste à remplacer l'analyse SAFRAN des paramètres météorologiques (uniquement en ce qui concerne les précipitations et la température) par la prévision d'ensemble de ces paramètres, produite par le CEPMMT : 51 membres, à 10 jours d'échéance, sur une grille de 150 km environ. Ces prévisions d'ensemble atmosphériques forcent les modèles ISBA et MODCOU, et le système de prévisions d'ensemble de débits produit donc 51 prévisions de débits (figure 3.2).

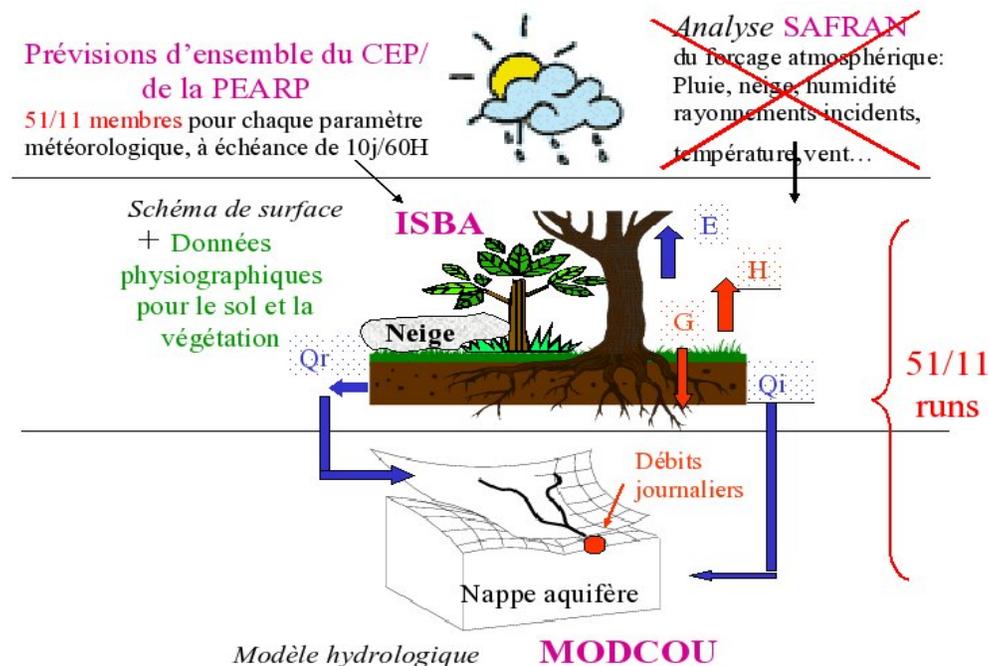


FIGURE 3.2 – Principe de fonctionnement des chaînes de prévisions d'ensemble des débits basées sur SIM. Le fonctionnement est analogue à celui de la chaîne SIM déterministe opérationnelle, à ceci près que pour chaque membre de prévision hydrologique, l'analyse SAFRAN de précipitations et de température est remplacée par un des membres de la prévision d'ensemble utilisée.

La chaîne basée sur l'EPS du CEPMMT fonctionne quotidiennement, en temps réel, et de façon automatique.

Elle utilise les prévisions d'ensemble atmosphériques produites par le CEPMMT sur le réseau de 0000 UTC, reçues dans la BDAP (Base de Données Analysées et Prévues) de Météo-France.

L'initialisation des modèles ISBA et MODCOU en vue de la prévision d'ensemble se fait en deux temps.

En ce qui concerne ISBA, la simulation opérationnelle d'analyse quotidienne nous donne l'initialisation nécessaire à la prévision pour les variables pronostiques (comme l'eau du sol (zone racinaire, réservoir profond), la glace du sol, la température (de surface et profonde), le manteau neigeux (épaisseur, équivalent en eau), etc...).

En revanche, pour le modèle MODCOU, on ne dispose pas d'une telle simulation opérationnelle (seuls les modules SAFRAN et ISBA de SIM sont opérationnels à l'heure actuelle).

Rousset-Regimbeau (2007) a donc développé une filière complémentaire de MODCOU analyse temps réel. Elle produit exactement le résultat que produirait un MODCOU opérationnel, et fournit également l'initialisation pour la prévision d'ensemble : le contenu en eau des rivières et l'état des nappes aquifères.

Pour cette filière, une extraction quotidienne du drainage et du ruissellement produits par ISBA opérationnel a été mise en place, et alimente MODCOU pour une simulation de 24H. Cette filière automatique est non seulement nécessaire à des fins de prévisions, mais elle permet aussi de simuler des débits analyse temps réel, et préfigure la version opérationnelle de MODCOU. Ces débits analysés en temps réel sont aussi utilisés pour la validation a posteriori des débits prévus.

3.2.2 La désagrégation spatiale des prévisions d'ensemble météorologiques de l'EPS du CEPMMT

Dans ce système de prévisions d'ensemble des débits, les prévisions d'ensemble météorologiques de température ainsi que de précipitations sont utilisées à des échelles spatiales différentes de celle d'ISBA (8 km pour ISBA et 150 km pour l'EPS du CEPMMT). C'est pourquoi une désagrégation spatiale s'est avérée nécessaire. Cette désagrégation a aussi pour but de mieux prendre en compte le relief dans les données, car il est bien évident qu'un modèle à 150 km de résolution ne donne pas les mêmes détails sur les zones montagneuses qu'un modèle à 8 km de résolution.

La méthode utilisée à l'heure actuelle pour cette première mise en place d'une telle chaîne de prévisions d'ensemble de débits à Météo-France a été volontairement choisie simple. Une amélioration de la désagrégation, afin de mieux représenter les propriétés statistiques des variables, est une des pistes d'évolution de la chaîne.

La première étape de la désagrégation est d'interpoler spatialement les données sur les zones SYMPOSIUM (i.e. zones SAFRAN). En effet, rester consistant avec le forçage SAFRAN utilisé jusque là a été l'un des principaux objectifs de cette mise en place de la désagrégation. Cela a été réalisé grâce à une interpolation en fonction de l'inverse du carré de la distance entre les centres des mailles et les centres des zones SYMPOSIUM.

Ensuite, une interpolation des précipitations en fonction de l'altitude a été effectuée sur les mailles ISBA, en utilisant un gradient de 2 mm/an/m si l'altitude d'ISBA est inférieure à 800 m, et 0.7 mm/an/m sinon, en gardant une limitation de l'écart d'altitude à 1000 m. Cette désagrégation a été la plus efficace parmi un certain nombre de désagrégations testées. Plus de détails sont fournis dans le manuscrit de la thèse de *Rousset-Regimbeau (2007)*.

Quant aux prévisions d'ensemble de température, elles ont été interpolées en utilisant le gradient adiabatique décrit par l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale, $-6.5^{\circ}\text{C}/1000\text{m}$).

3.2.3 Optimisation du temps de traitement et de calcul et du volume des entrées et sorties

La gestion du temps de calcul et des volumes de fichiers en entrée et en sortie de la chaîne est un point particulièrement important, afin de permettre la mise en œuvre concrète de la chaîne. En effet, les sorties de la chaîne de prévision d'ensemble des débits sont multipliées par 51 par rapport à une simulation déterministe.

Afin de réduire le temps de calcul nécessaire à la simulation, il a été envisagé d'augmenter le pas de temps du modèle ISBA.

Alot et al. (2005) ont montré que l'augmentation du pas de temps d'ISBA est possible sans détériorer significativement les résultats en terme de débits. On utilise donc pour les prévisions d'ensemble un pas de temps de 20 minutes (au lieu de 5 minutes pour la chaîne SIM temps réel), ce qui réduit très significativement le temps de calcul. On conserve pour MODCOU les mêmes pas de temps que pour le module MODCOU temps réel (3H pour les écoulements superficiels, 1 jour pour l'évolution du souterrain).

Enfin, la quantité d'information contenue dans les fichiers de sortie a été réduite au minimum afin de ne pas produire un volume de données trop important, tout en conservant les données nécessaires à l'analyse de la prévision.

3.2.4 Les performances de la chaîne de prévisions d'ensemble des débits SIM à moyen terme (chaîne CEPMMT)

Une analyse statistique des scores concernant dans un premier temps les précipitations, puis les débits, a été réalisée par *Rousset-Regimbeau (2007)* durant sa thèse. Je vais en rappeler ici brièvement les principales conclusions.

La période d'étude se situe du 4 septembre 2004 au 31 juillet 2005, qui est une période remarquablement peu pluvieuse. La référence pour cette validation est l'analyse SAFRAN pour les précipitations, et la simulation SIM analyse (c'est-à-dire utilisant les précipitations et températures de l'analyse SAFRAN en entrée) pour les débits. Ce choix de validation (pour les débits) a été préféré à une validation par rapport à des observations de débits, car la chaîne de prévisions d'ensemble temps réel SIM n'est jamais recalée par rapport à des observations de débits. Son avantage est que l'on teste ainsi la chaîne en conditions "modèle parfait", et donc qu'on ne qualifie que l'apport des prévisions d'ensemble en s'affranchissant des défauts de modélisation. Cependant, l'inconvénient qui résulte est que l'on ne quantifie ainsi pas suffisamment l'apport d'une prévision ensembliste pour un utilisateur (SCHAPI ou Services de Prévision des Crues par exemple).

Analyse statistique des précipitations désagrégées de la chaîne de prévisions d'ensemble météorologiques du CEPMMT

Afin de comprendre le comportement des prévisions d'ensemble de débits, il convient tout d'abord de s'intéresser aux prévisions d'ensemble de précipitations utilisées en entrée du système.

L'écart quadratique moyen entre la moyenne de l'ensemble et l'analyse SAFRAN est du même ordre de grandeur que la dispersion de l'ensemble, avec une augmentation sensible avec l'échéance. Ce respect des deux ordres de grandeur est une caractéristique reflétant la bonne qualité d'une prévision d'ensemble. Cependant, l'ensemble tend à surestimer les faibles pluies, et à sous-estimer les fortes pluies. On peut aussi noter que jusqu'aux dernières échéances, la prévision d'ensemble reste meilleure que la climatologie (*BSS* et *RPSS* positifs).

Néanmoins, il est important de noter que la dispersion des membres de l'ensemble aux premières échéances (environ 2 jours) est trop faible. Ceci est dû à la nature de la conception des vecteurs singuliers de la prévision d'ensemble produite par le CEPMMT, qui est dédiée à la prévision à moyen terme, plutôt qu'à la prévision à court terme (vecteurs singuliers calculés pour être optimaux à partir de 48H de prévision).

De plus, au vu de la période d'étude particulièrement sèche, il est relativement difficile de qualifier le comportement de l'ensemble pour les événements de forte pluie. Il a été montré que l'ensemble est capable d'apporter une information pertinente en cas de faible précipitation et de sécheresse, avec en particulier très peu de fausses alarmes sur les périodes sans pluie.

Enfin, une étude des résultats pour 9 grands bassins français a montré que les différences étaient faibles, si ce n'est des scores un peu moins bons pour le bassin du Rhône et le Sud-Est de la France, et des scores un peu meilleurs pour les bassins de la Seine, de la Loire et de la Charente.

L'étude réalisée par *Rousset-Regimbeau (2007)* a mis en évidence certaines limites dans la méthode de désagrégation spatiale des précipitations, qui reste relativement simple, et pourrait être affinée. De plus, cette méthode n'agit pas sur les caractéristiques statistiques de l'ensemble. Néanmoins, il existe des outils permettant d'améliorer la fiabilité et la résolution qu'il serait possible d'appliquer aux prévisions d'ensemble de précipitations du CEPMMT.

Enfin, il est souhaitable de poursuivre cette étude statistique sur une période plus longue, et plus pluvieuse. On peut penser à la période 2006/2009, dont les sorties sont désormais disponibles. Cependant, il se pose le problème de l'influence des améliorations apportées régulièrement au système de prévisions d'ensemble météorologiques du CEPMMT (augmentation de la résolution en février 2006, Var-EPS (*Buizza et al. (2007)*)) sur les scores statistiques.

Analyse statistique des débits de la chaîne de prévisions d'ensemble des débits SIM-CEPMMT

L'analyse statistique des performances du système de prévisions d'ensemble des débits sur la période septembre 2004 - juillet 2005, a mis en évidence plusieurs caractéristiques (*Rousset-Regimbeau (2007)*).

Pour les quatre grandes stations présentées en détail dans l'étude de *Rousset-Regimbeau (2007)* (Seine à Paris, Loire à Nantes, Garonne à Tonneins et Rhône à Beaucaire), la moyenne de l'ensemble est capable de reproduire correctement les débits analysés sur la période. L'EQM et la dispersion sont du même ordre de grandeur, en particulier pour la Seine et la Loire. Ailleurs, la dispersion est sensiblement plus faible.

Les diagrammes de Talagrand de ces quatre stations font toutefois apparaître une faiblesse dans la dispersion de l'ensemble, en particulier aux premières échéances. Ceci est lié principalement aux prévisions d'ensemble de précipitations elles-mêmes. En effet, elles sont produites à des fins de prévision à moyenne échéance, et non à courte échéance, et sont optimisées pour avoir une dispersion maximale à partir de 48H d'échéance seulement.

Ensuite, les diagrammes ont une forme plus plate, ce qui indique que la fiabilité augmente, principalement pour la Seine et la Loire. Ailleurs, le manque de dispersion reste encore visible. Les aspects hydrologiques, en particulier des grands bassins, induisent un retard dans la dispersion des débits par rapport à la dispersion des précipitations, ce qui ne va pas dans le sens d'une dispersion assez forte au début de la prévision. La faiblesse de la dispersion est en partie due au fait que seule une partie de la variabilité des débits est prise en compte dans notre système. En effet, les seuls éléments perturbés sont les prévisions de précipitations et de température. Une prise en compte des incertitudes dans l'état initial ou dans la modélisation hydrologique par exemple permettrait vraisemblablement d'obtenir une dispersion plus grande de l'ensemble des débits prévus.

De plus, les scores statistiques obtenus pour la majorité des stations sont globalement bons, avec en particulier des Brier Skill Scores et des Ranked Probability Skill Scores proches de 1, et positifs pour plus de 99% des stations, ce qui indique que l'ensemble est une meilleure prévision que la climatologie. On constate aussi que les meilleurs Skill Scores sont obtenus pour les bassins les plus étendus. La décomposition du score de Brier pour les quatre grandes stations présentées montre qu'aux premières échéances, la fiabilité est faible (donc bonne), et la résolution est forte (c'est-à-dire bonne). Avec l'échéance, on note logiquement une dégradation de ces deux paramètres.

Il apparaît également que l'ensemble est capable de produire de bonnes prévisions des faibles débits, car dans cette situation les scores sont bons (BS, RPS et Skill Scores associés). En particulier, le taux de fausses alarmes associé à ce type d'évènements est très faible pour une grande majorité de stations, et le taux de succès tout à fait correct. Au vu de la période d'étude particulièrement sèche, il est plus difficile de conclure sur les capacités de l'ensemble à prévoir les très forts débits, du fait de leur rareté dans l'échantillon utilisé pour la vérification.

Rousset-Regimbeau (2007) a aussi mis en place un site web interne de visualisation des sorties quotidiennes de la chaîne de prévision d'ensemble de débits temps-réel. Ce site est disponible à l'adresse suivante : http://dpnet.meteo.fr/DCLIM/hydro/SIM/site_modcou/index_general.htm. On peut ainsi y trouver pour une sélection de stations sur la France des tableaux d'alerte représentant le pourcentage de membres des prévisions d'ensemble dépassant un seuil donné défini par les SPC (Services de Prévision des Crues) utilisateurs. Pour chaque station, on peut aussi trouver les débits de la chaîne SIM-analyse des 30 derniers jours, les débits d'ensemble journaliers à 10 jours d'échéance, ainsi que les tableaux d'alerte des 30 derniers jours.

Un effort est mené avec le SCHAPI (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations) et les SPC afin de permettre l'utilisation de ces sorties quotidiennes dans l'estimation de la vigilance crue. La réflexion commune porte sur la détermination des seuils utilisés et la nécessité demandée par les utilisateurs de disposer de prédictions cohérentes avec les débits observés. Le SCHAPI et les SPC ont accès aux prévisions d'ensemble de débits de SIM grâce à une copie du site cité ci-dessus.

3.3 Conclusion

Cette partie visait à introduire les prévisions d'ensemble hydrologiques d'une manière générale, puis en focalisant sur la manière dont elles sont abordées à Météo-France.

On a pu voir que diverses méthodes existent dans les centres météorologiques afin de créer des prévisions d'ensemble météorologiques à travers le monde. Ces méthodes sont basées sur différentes manières de créer les prévisions d'ensemble, et utilisent des résolutions de tailles diverses. Les prévisions d'ensemble météorologiques ont fait leurs preuves ces dernières années, et apportent une amélioration des prévisions significative.

En ce qui concerne les prévisions d'ensemble hydrologiques, les travaux sont plus récents (projets HEPEX, COST, EFAS par exemple). Ces systèmes utilisent les prévisions d'ensemble météorologiques en tant que forçage de modèles hydrologiques, chacun des membres météorologiques servant à produire un membre hydrologique. Cependant, la validation et l'utilisation de tels systèmes en mode opérationnel restent plus rares.

Une liste non exhaustive, mais détaillée, des différents outils statistiques utilisés lors de cette thèse afin d'effectuer la vérification des prévisions d'ensemble de débits a été donnée.

Enfin, le système de prévisions d'ensemble de débits de Météo-France, issu de travaux précédents et basé sur SIM, a été décrit. Ce système, implémenté et validé par *Rousset-Regimbeau (2007)* utilise les prévisions d'ensemble météorologiques de l'EPS du CEPMMT à 10 jours d'échéance à une résolution de 150 km. Ce système utilise les états initiaux issus de la chaîne SIM-analyse. Les champs de précipitations et de températures de l'EPS du CEPMMT ont été interpolés spatialement sur les zones SAFRAN, puis des gradients altitudinaux ont été utilisés afin d'obtenir des valeurs proches de l'analyse SAFRAN, et sur la grille ISBA à 8 km. Des analyses statistiques ont montré l'apport positif des précipitations d'ensemble comparé à une climatologie d'observations, mais que la dispersion de l'ensemble reste faible. La dispersion de l'ensemble hydrologique est quant à elle encore plus faible, du fait de l'inertie introduite par l'hydrologie. Une validation des débits d'ensemble par rapport à des débits issus de SIM-analyse a été effectuée, montrant qu'ils apportent une meilleure information que ne le ferait l'utilisation d'une climatologie de débits de SIM-analyse. Des efforts de diffusion de ces débits pour le SCHAPI ainsi que de visualisation ont été réalisés.

Cependant, plusieurs limitations ont été mises en lumière par les travaux de *Rousset-Regimbeau (2007)*. En effet, l'utilisation de l'EPS du CEPMMT à courte échéance est très délicate, car cet EPS a été mis en place en étant optimal après une période de 48H. On a pu voir que la dispersion de l'ensemble des débits est très faible, et que c'est particulièrement vrai pour les premiers jours d'échéance. C'est pourquoi l'utilisation d'une prévision d'ensemble dédiée à la courte échéance (la PEARP de Météo-France) sera étudiée dans la suite de ce

manuscrit.

Ensuite, la chaîne SIM-analyse initialisant les prévisions d'ensemble de débits n'étant à aucun moment recalée par des observations de débits, les performances du système peuvent s'en trouver limitées. C'est pourquoi un système d'assimilation de débits observés sera mis en place, décrit et validé dans la suite de ce recueil, et son impact sur les prévisions d'ensemble de débits sera étudié. Enfin, cela permettra la validation des prévisions d'ensemble de débits par rapport à des observations de débits, et non plus par rapport aux débits de SIM-analyse, et ce pour la première fois.

Chapitre 4

Amélioration des prévisions d'ensemble de débits à courte échéance grâce à la Prévision d'Ensemble ARPEGE (PEARP)

Introduction

La chaîne de prévisions d'ensemble de débits SIM-CEPMMT a prouvé son utilité à des fins d'alerte et de pré-alerte, pour la moyenne échéance. Cependant, son utilisation à courte échéance (les deux premiers jours) reste délicate, du fait de la faible dispersion de la pluie de l'EPS du CEPMMT, qui n'est pas conçu pour être utilisé à cette échéance. De plus, la résolution de l'EPS (150 km) est une limite à la bonne prévision d'évènements sévères et localisés.

Affiner la précision de la prévision de crues extrêmes est un enjeu majeur pour la sauvegarde des biens et des personnes. Il est indispensable de tenter d'améliorer cet aspect. Cela passe par une meilleure résolution des prévisions météorologiques. De plus, il est évident que l'échelle temporelle des prévisions de tels évènements se situe à la courte échéance, plutôt qu'à la moyenne échéance.

C'est donc naturellement que l'utilisation d'une prévision d'ensemble météorologique à courte échéance (la Prévision d'Ensemble ARPEGE (PEARP)) a été envisagée, puis mise en place lors de ma thèse. En effet, la PEARP (telle qu'utilisée dans cette étude) a une résolution spatiale de 25 km environ sur la France (Nicolau (2002)) et une échéance de prévision de 60H. On dispose ainsi de 11 prévisions météorologiques (on n'utilisera pour les prévisions d'ensemble hydrologiques que les précipitations et la température), calculées grâce à des vecteurs singuliers optimisés pour l'échéance 12H.

4.1 Fonctionnement de la chaîne de prévisions d'ensemble des débits basée sur la PEARP de Météo-France

La chaîne de prévision d'ensemble des débits utilisant la PEARP (appelée SIM-PEARP) s'appuie sur la chaîne SIM-CEPMMT développée par Rousset-Regimbeau (2007).

Le principe général consiste à remplacer l'analyse SAFRAN des précipitations et de la température par la prévision d'ensemble de la PEARP de ces paramètres. Ces prévisions d'ensemble atmosphériques forcent les modèles ISBA et MODCOU, dont on réalise 11 simulations, et qui produisent 11 prévisions différentes de débits (voir la figure 3.2), de manière analogue à la chaîne SIM-CEPMMT.

On utilise les prévisions d'ensemble atmosphériques produites par la PEARP de Météo-France sur le réseau de 1800 UTC, stockées dans la BDAP de Météo-France. Ces prévisions d'ensemble ont une durée de 60H. La structure de SIM ne permettant de tourner que sur un nombre de jours entier, la durée de simulation est de 3 jours pour chaque prévision d'ensemble. Pendant les 12 dernières heures, comme le forçage est extrapolé et supposé constant, cette période ne sera jamais étudiée. On commence donc les simulations de la prévision d'ensemble de débits à 1800 UTC. La mise en place de cette chaîne de prévisions est résumée par la figure 4.1.

L'initialisation des modèles ISBA et MODCOU en vue de la prévision d'ensemble se fait (comme pour la chaîne SIM-CEPMMT) en deux temps.

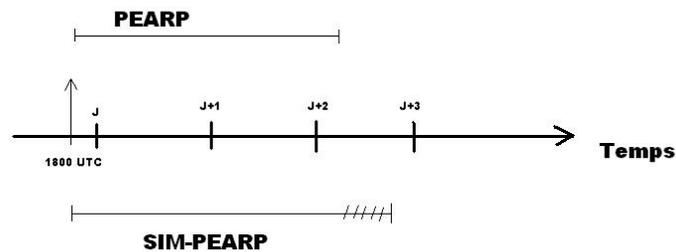


FIGURE 4.1 – Graphique représentant la séquence temporelle des chaînes de prévisions météorologique et hydrologique.

En ce qui concerne ISBA, les variables sont obtenues à l'échéance de 1800 UTC de la simulation analyse de SIM, et non plus de 0000 UTC (SIM-CEPMMT), afin de respecter l'horaire de l'initialisation de la prévision d'ensemble PEARP.

Pour MODCOU, il a été techniquement impossible d'obtenir les sorties à 1800 UTC. En effet, le pas de temps de simulation des nappes souterraines, est journalier, et de plus, les débits au pas de temps intra-journalier (tri-horaire) n'ont jamais été validés. C'est pourquoi les sorties à 0000 UTC (6H plus tard, c'est-à-dire exactement celles utilisées pour la prévision d'ensemble des débits basée sur l'EPS du CEPMMT) ont été utilisées. On estime que du fait de l'inertie de l'évolution des nappes et des rivières, les prévisions d'ensemble des débits n'en seront que peu affectées.

Les prévisions validées de débits de MODCOU sont des prévisions journalières. Aussi, comme les prévisions d'ensemble de la PEARP sont "à cheval" sur 4 jours, il convient de définir précisément ce que l'on appellera par la suite jours de prévisions. En effet, les échéances de 0 à 6H de la PEARP et des prévisions d'ensemble de débits issues de la PEARP ne seront pas prises en compte lors des scores statistiques, de même que les 6 dernières heures. Ainsi, il ne reste que des échéances couvrant entièrement 2 jours complets (de 0H à 24H), et qui correspondent aux 2 premiers jours des prévisions CEPMMT. Cependant, les échéances de la PEARP non retenues pour les scores ont bien été utilisées lors des prévisions de débits.

La chaîne basée sur la PEARP n'a pour le moment d'autre vocation que de tourner sur des épisodes du passé.

4.2 Désagrégation des prévisions météorologiques PEARP

Malgré la meilleure résolution de la PEARP (25 km) par rapport à l'EPS du CEPMMT (150 km) telles qu'utilisées par la chaîne SIM, une désagrégation de la PEARP sur la grille ISBA (8 km) a été mise en place. Ici aussi, il a été décidé d'utiliser une méthode simple dans un premier temps.

La première étape est identique à celle utilisée pour la désagrégation de l'EPS du CEPMMT, à savoir une interpolation spatiale sur le zonage SYMPOSIUM II en fonction de l'inverse du carré de la distance entre les centres des mailles et les centres des zones SYMPOSIUM.

La seconde étape est en revanche différente, en ce qui concerne les précipitations. En effet, les gradients altitudinaux utilisés par *Rousset-Regimbeau (2007)* se sont avérés inefficaces pour le cas de la PEARP. Des écarts significatifs et opposés par rapport à la référence SAFRAN ont été observés, notamment sur les Alpes. L'écart entre les précipitations issues de SAFRAN et la PEARP n'étant donc pas dues de manière simple à des différences d'altitude entre les orographies des deux modèles, une autre méthode qu'un gradient altitudinal a été utilisée.

Un débiaisage point par point a donc été mis en place. Les précipitations directement issues de la PEARP (donc sans désagrégation) ont été comparées aux pluies SAFRAN sur une période d'un an (11 Mars 2005 à 10 Mars 2006) sur la grille ISBA. Cette comparaison a permis d'établir un débiaisage maille par maille des précipitations PEARP, appliqué ensuite à chacun des membres sur la période considérée (voir figure 3 de l'article donné ci-après). La validation sur une période allant du 11 Mars 2006 au 30 Septembre 2006 a montré un bon respect des quantités cumulées de précipitations, à la fois en moyenne (légère sur-estimation), spatialement, et pour les 2 jours de l'échéance (plus de détails sont donnés plus loin dans l'article).

Le gradient OACI a été utilisé de la même manière pour la PEARP que pour l'EPS du CEPMMT en ce qui concerne les températures.

4.3 Etude comparative des chaînes SIM-CEPMMT et SIM-PEARP

4.3.1 Résumé de l'article

Comme on l'a vu dans le chapitre précédent, la prévision d'ensemble des débits à moyen terme mise en place par *Rousset-Regimbeau (2007)* apporte des résultats encourageants. Cependant, à courte échéance (c'est-à-dire pour les deux ou trois premiers jours), le manque de dispersion des prévisions météorologiques du CEPMMT se répercute sur les prévisions d'ensemble de débits. En effet, l'EPS du CEPMMT se concentre sur le moyen terme, ses vecteurs singuliers étant optimisés pour une échéance supérieure à 48H. Ce manque de dispersion est un facteur limitant à la prévision des événements extrêmes lors des courtes échéances, tous les membres de l'ensemble ayant plus ou moins tendance à se diriger vers le même scénario.

C'est pourquoi il a été envisagé d'étudier l'apport de prévisions d'ensemble à courte échéance dans le système de prévisions d'ensemble de débits de Météo-France. En effet, si

les prévisions à moyen terme sont intéressantes en terme de pré-alerte et d'alerte, on comprend vite l'intérêt d'un organisme tel que le SCHAPI (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations) à préciser les risques de crues à court terme.

Le choix de ce nouvel EPS météorologique s'est tout naturellement porté sur la PEARP (Prévision d'Ensemble ARPege (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle (*Courcier et al. (1991)*))) de Météo-France. Cette prévision d'ensemble météorologique a en effet été créée dans le but de mieux prévoir les événements sévères et localisés. De plus, ses caractéristiques (60H de prévisions sur le réseau de 1800 UTC, vecteurs singuliers optimaux dès 12H de prévisions et grille de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (*Nicolau (2002)*)) apportent *a priori* un plus indéniable pour les crues extrêmes et localisées sur des petits bassins par rapport à l'EPS du CEPMMT.

Afin de qualifier l'apport d'une telle prévision à courte échéance, j'ai donc mis en place sur le même modèle que les prévisions d'ensemble hydrologiques basées sur l'EPS du CEPMMT, des prévisions d'ensemble des débits avec SIM, en utilisant les prévisions d'ensemble météorologiques de la PEARP en entrée. Ensuite, une comparaison a été réalisée entre les prévisions d'ensemble météorologiques du CEPMMT et de la PEARP dans un premier temps (précipitations désagrégées sur la grille ISBA), puis entre les prévisions d'ensemble de débits issues de l'EPS du CEPMMT et de la PEARP dans un second temps. Cette comparaison a porté sur les jours 1 et 2 de la prévision d'ensemble du CEPMMT, et sur les heures 7 à 54 de la prévision PEARP, qui sont les deux seuls jours entiers communs aux deux prévisions d'ensemble. La période d'étude va du 10 Mars 2005 au 30 Septembre 2006 (soit 570 jours). Les scores probabilistes utilisés pour cette comparaison sont ceux décrits précédemment (paragraphe 3.1.3).

La référence utilisée pour le calcul des scores statistiques des prévisions d'ensemble de précipitations est l'analyse SAFRAN. La comparaison des champs de précipitation des deux EPS a montré que tous les scores étaient meilleurs pour la PEARP par rapport à l'EPS du CEPMMT, les scores restant tout de même positifs pour ce dernier (ce qui indique une meilleure performance que la climatologie SAFRAN). Cependant, il convient de noter que la méthode de désagrégation de la grille initiale vers la grille ISBA était différente pour les deux EPS (gradient d'altitude pour l'EPS du CEPMMT, et biais point par point pour la PEARP). On note aussi une plus grande dispersion des précipitations de la PEARP que du CEPMMT, ainsi que l'absence de biais saisonnier dans les scores. La désagrégation des précipitations reste cependant un point à améliorer dans notre système de prévisions d'ensemble.

Pour calculer des scores statistiques sur les prévisions d'ensembles de débits, une simulation SIM forcée par l'analyse SAFRAN a été utilisée. Cette étude a mis en avant la meilleure performance de la PEARP en ce qui concerne les débits des bassins de petite taille ainsi que les forts débits, par rapport au CEPMMT pour la courte échéance. A l'inverse, les débits obtenus grâce à l'EPS du CEPMMT semblent légèrement meilleurs pour les grands bassins et pour les périodes d'étiage. Il est néanmoins nécessaire de noter que, malgré la conception de la PEARP (focalisée sur la courte échéance), la dispersion des débits les deux premiers jours reste faible et pourrait être améliorée. Elle est cependant plus importante que celle de l'EPS du CEPMMT. Enfin, aucun biais saisonnier notable n'a été décelé que ce soit pour le CEPMMT ou pour la PEARP.

On peut se féliciter des bons scores rencontrés pour les prévisions d'ensemble de débits malgré la faible dispersion des précipitations.

Cette étude a pu montrer l'intérêt de l'utilisation d'une prévision d'ensemble météorologique dédiée à la courte échéance pour une prévision d'ensemble de débits à court terme. Néanmoins, certaines limites sont apparues, notamment au niveau de l'utilisation des prévisions météorologiques. Seules les prévisions de température et de précipitations ont en effet été utilisées. De plus, leur désagrégation est restée assez sommaire et mériterait de plus amples efforts, afin notamment de pallier la faible dispersion. On peut aussi penser à l'intégration dans le système de la prise en compte des erreurs modèle, ce qui n'est pour le moment pas fait, mais pourrait apporter beaucoup à la dispersion des prévisions d'ensemble.

Enfin, il convient de rappeler que durant toute cette étude, le modèle MODCOU n'a jamais été réinitialisé par des observations, et que la référence utilisée pour tous les scores de débits est une simulation SIM de référence. C'est pourquoi un système d'assimilation des débits a été mis en place dans SIM afin de rapprocher les prévisions d'ensemble des débits, des observations. Ce système est décrit dans les chapitres suivants.

Cette étude comparative a fait l'objet d'une publication dans le Journal of HydroMeteorology (*Thirel et al. (2008)*). Cet article est donné dans son intégralité dans le paragraphe suivant.

4.3.2 Article paru dans le Journal of HydroMeteorology

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise
éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise
éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise
éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise
éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise
éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise
éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise
éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise
éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

4.4 Comparaison des prévisions d'ensemble de débits issues des modèles GR (CEMAGREF) et SIM, forcés par la PEARP

Une étude d'inter-comparaison de modèles a été effectuée conjointement avec le CEMAGREF d'Antony. Cette étude s'est déroulée dans le cadre de l'Expérimentation sur les prévisions d'ensemble hydrologiques au SCHAPI. En effet, le SCHAPI souhaite s'orienter vers l'utilisation de produits de prévisions hydrologiques, plutôt tournés vers la courte échéance.

Cette expérimentation a pour but de comparer les débits des prévisions d'ensemble basées sur SIM et la PEARP (les mêmes que dans l'article inclus dans le paragraphe 4.3.2 (*Thirel et al. (2008)*)), avec les prévisions d'ensemble des débits réalisées sur la base des modèles GR (Génie-Rural) du CEMAGREF, et en utilisant là aussi comme forçage météorologique d'ensemble la PEARP (précipitations et température). Ainsi, la seule différence entre les deux systèmes est le modèle hydrologique utilisé. Les débits SIM-PEARP utilisés pour cette comparaison sont exactement les mêmes que ceux étudiés dans l'article publié dans le JHM (*Thirel et al. (2008)*). Ici encore, la comparaison s'effectuera sur les deux premiers jours entiers de prévision.

Ce travail a été réalisé par Annie Randrianasolo lors de son stage de *Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie*, effectué au CEMAGREF d'Antony dans l'équipe HBAN, sous la direction de Maria-Helena Ramos. Je vais ici donner les principaux résultats de cette étude, à laquelle j'ai participé au niveau de la fourniture des données, et en tant qu'"expert" des comparaisons de prévisions d'ensemble hydrologiques et de l'utilisation de la PEARP en

hydrologie. La totalité des résultats figure dans le rapport d'A. Randrianasolo (*Randrianasolo (2009)*).

L'étude porte sur la période allant du 10 mars 2005 au 31 juillet 2006. Cette période est incluse dans celle de l'article publié au JHM. En fait, les données de pluie observées (analyse SAFRAN) n'ont pas pu être utilisées pour les deux derniers mois de la période initiale (du 10 mars 2005 au 30 septembre 2006), ce qui a réduit d'autant la période de cette étude. En effet, les données SAFRAN des mois d'août et septembre 2006 n'avaient pas pu être post-traitées par le CEMAGREF à l'époque de cette étude. Enfin, il convient de préciser que les précipitations d'ensemble seront comparées aux données SAFRAN. Les données de débits, quant à elles, seront comparées aux débits observés afin de calculer les scores ensemblistes. Cela n'était pas le cas dans l'étude comparative de SIM-PEARP et SIM-CEPMMT (*Thirel et al. (2008)*), où l'on avait utilisé les simulations de SIM-analyse comme référence.

4.4.1 Le modèle GR3P du CEMAGREF

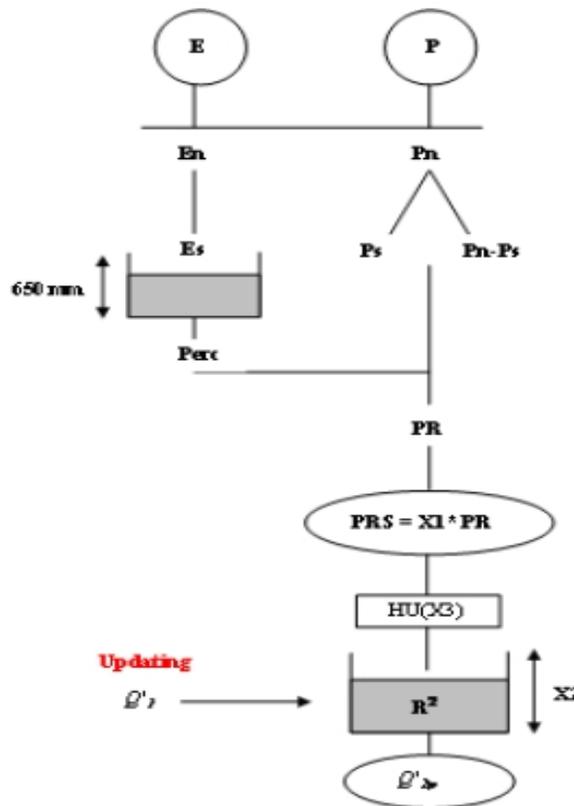


FIGURE 4.2 – Schéma du modèle hydrologique de prévision GR3P.

Les modèles GR (Génie rural) sont des modèles pluie-débit globaux à réservoir, c'est-à-dire qu'ils ne contiennent pas d'équations physiques. Il existe plusieurs modèles GR, suivant le nombre de paramètres utilisés pour les définir. Le modèle GR3P utilisé lors de cette étude est décrit sur la figure 4.2.

Il possède 3 paramètres qui ont été calés pour chaque bassin :

- X1 le coefficient d'échange
- X2 la capacité à un jour de son réservoir de stockage
- X3 la caractéristique de son hydrogramme unitaire HU dérivable en son sommet.

Les précipitations (PEARP) et l'évapotranspiration potentielle (ETP) sont des forçages pour ce modèle. Tout d'abord, un premier réservoir (réservoir de production) définit la fraction de pluie qui se transforme en pluie nette en fonction de son taux de remplissage. Ensuite, un second réservoir (réservoir de routage), grâce à un hydrogramme unitaire, permet d'étaler dans le temps cette pluie nette afin d'obtenir le débit de sortie.

Enfin, il est important de noter que deux versions différentes du modèle GR3P ont été utilisées dans cette étude. La première sans mise à jour, et la seconde, plus performante, avec mise à jour des débits. Cette mise à jour consiste en la remise à niveau du réservoir de routage en fonction du dernier débit observé.

4.4.2 Les bassins versants étudiés

L'étude a porté sur un ensemble de bassins versants, afin de disposer de conclusions les plus robustes possible. Ainsi, en croisant les bassins simulés par SIM et ceux simulés par les GR, 243 bassins en commun ont été sélectionnés. Cependant, l'absence ou le manque de données sur certains d'entre eux a réduit ce nombre de stations à 211. On peut voir la localisation de ces 211 bassins sur la figure 4.3.

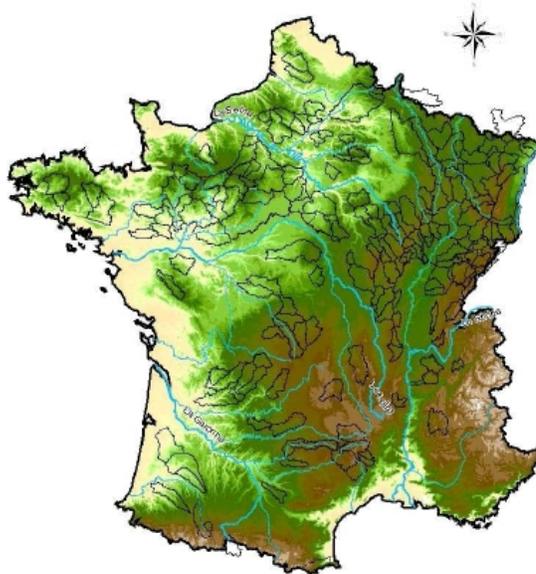


FIGURE 4.3 – Carte de la France représentant les 211 bassins versants communs à SIM et aux GR pris en compte dans cette étude.

Ces bassins sont répartis sur toute la France. On peut noter que ces bassins sont plutôt de

petite taille par rapport à l'ensemble des bassins simulés dans SIM, qui est plutôt dédié aux grands bassins.

4.4.3 Résultats de la comparaison statistique

Les scores utilisés pour cette étude sont semblables à ceux utilisés et définis dans ce manuscrit (chapitre 3.1.3).

Les précipitations

Les scores ont été calculés pour les précipitations PEARP sur les 211 bassins versants étudiés. On a considéré ici les valeurs de précipitations agrégées sur chacun des bassins étudiés. Ces scores sont très comparables, du point de vue de leur ordre de grandeur, à ceux obtenus dans *Thirel et al. (2008)*. On présente sur la figure 4.4 les cartes de RMSE et ratio-RMSE pour les deux jours d'échéance considérées.

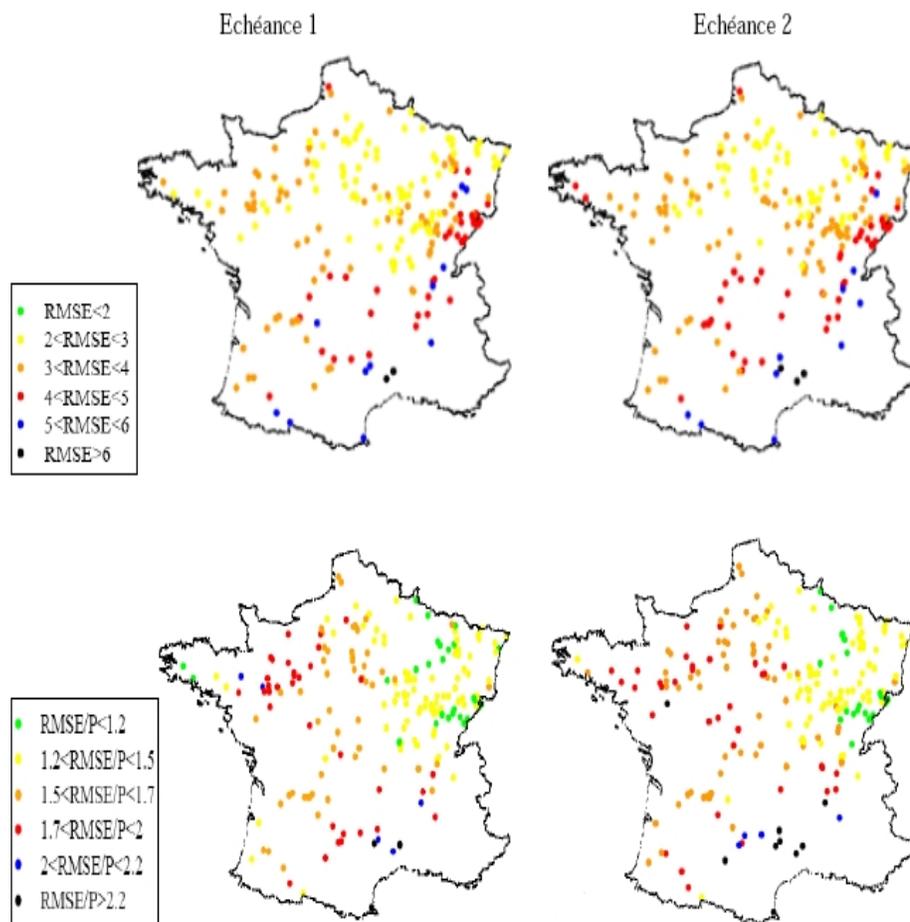


FIGURE 4.4 – Cartes représentant les RMSE (en haut) et les ratio-RMSE (en bas) de la moyenne de l'ensemble pour le jour 1 et le jour 2 pour les précipitations issues de la PEARP, par rapport aux analyses SAFRAN.

Globalement, les valeurs les plus faibles sont obtenues pour la moitié Nord de la France en ce qui concerne le RMSE, et sur le quart Nord-Est en ce qui concerne le ratio-RMSE. Mais il est difficile d'isoler une tendance marquée.

Les débits

Nous allons, dans ce paragraphe, passer en revue les différents scores calculés par *Randrianasolo (2009)* lors de son stage de fin d'études. Ces scores ont été calculés par rapport aux observations de débits, s'il y a lieu. Cependant, nous ne montrerons ici que des graphes concernant le Brier Skill Score (BSS) dans un souci de concision. Les conclusions apportées par l'étude des autres scores sont similaires à celles apportées par le BSS.

La dispersion des débits prévus est très faible, surtout pour les modèles GR. En effet, elle est de 5 à 6 fois plus faible pour les GR que pour SIM pour le jour 1, et environ deux fois plus faible pour le jour 2. On note aussi que la mise à jour dans les GR ne modifie pas ce score, ce qui n'est d'ailleurs pas son but.

L'étude des ratio-RMSE montre que le modèle GR avec mise à jour est le meilleur sur l'ensemble des stations, ce qui est logique car c'est le seul à disposer d'une procédure visant à rapprocher les prévisions des observations. En ce qui concerne SIM et GR sans mise à jour, les résultats de ces deux modèles sont très proches.

Les taux de fausses alarmes et de réussite ont été calculés pour les seuils représentés par les Q10 (non-dépassement), Q50 et Q90 (dépassements) issus de la Banque HYDRO. Les variations selon le jour d'échéance ainsi que selon le pourcentage de membres à prendre en compte pour définir un évènement, sont très faibles. Ici aussi, le GR avec mise à jour est le meilleur. Le GR sans mise à jour et SIM sont très proches, surtout pour le taux de fausses alarmes, qui est plus faible pour SIM en général.

Les Brier Skill Scores ont été présentés sous formes de box-plots par *Randrianasolo (2009)*. Ils représentent notamment les valeurs de BSS pour 95%, 75%, 25% et 5% des stations, ainsi que la médiane de ce score (figure 4.5).

Pour le dépassement du Q50, la hiérarchie est très nettement le GR avec mise à jour, puis sans mise à jour, et enfin SIM. On note que dans l'ensemble les scores sont bons (i.e. positifs), et même très bons pour le GR avec mise à jour.

Concernant le dépassement du Q90, le GR avec mise à jour est une nouvelle fois le meilleur. Cependant, SIM et le GR sans mise à jour sont très proches à la fois entre eux, mais aussi du GR avec mise à jour (moins de 0.2 de BSS d'écart). Ce résultat est très encourageant pour SIM qui n'a pas été conçu dans l'optique de travailler sur les crues rapides et sur les petits bassins, et qui n'utilise pas d'assimilation de données dans cette version.

Le RPSS a été calculé en utilisant les dix seuils : Q10, Q20, ..., Q80 et Q90 de la Banque HYDRO. Le RPSS montre encore une fois une meilleure attitude du GR avec mise à jour, puis le GR sans mise à jour, et enfin SIM. Cependant, pour ces deux derniers, le score est négatif, indiquant une performance moins bonne que si l'on utilisait une climatologie de débits observés. Cela est surprenant au vu des BSS très positifs observés pour le Q90 et le Q50.

Enfin, les diagrammes de Talagrand montrent des diagrammes semblables en forme de "U" pour les trois modèles. Comme la dispersion de l'ensemble est très faible, et que pour le cas de SIM ce n'est pas dû à un biais conditionnel (*Thirel et al. (2008)*), on peut supposer que cette forme n'est que le reflet d'une sous-dispersion des trois systèmes.

4.4.4 Conclusion

Cette étude réalisée au CEMAGREF a été l'occasion de réaliser une comparaison inter-modèles sur des prévisions d'ensemble hydrologiques à courte échéance, entre deux modèles basés sur des concepts complètement différents. En effet, si le modèle SIM est un modèle distribué basé sur la physique, les modèles GR sont des modèles conceptuels.

La comparaison a montré une meilleure performance du modèle GR avec mise à jour du débit par rapport aux débits observés pour tous les scores, ce qui est logique car les deux autres

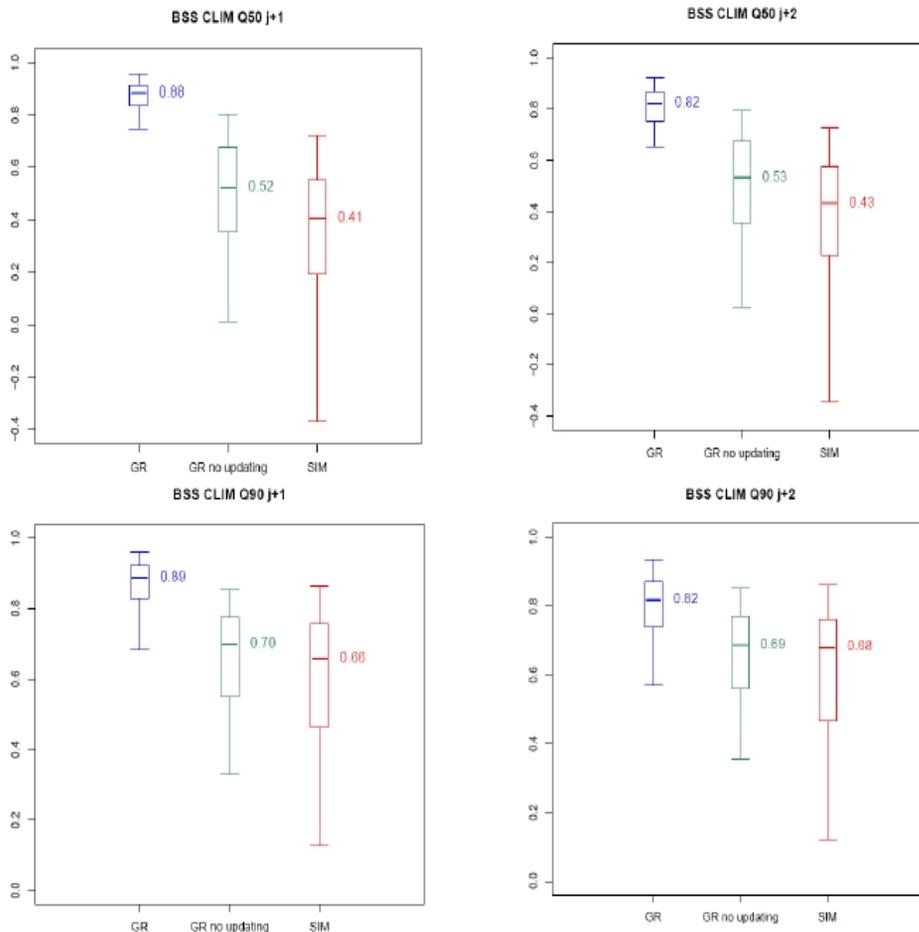


FIGURE 4.5 – Brier Skill Scores pour le Q50 (en haut) et pour le Q90 (en bas). Le jour 1 d'échéance est à gauche, et le jour 2 à droite. Les BSS pour le modèle GR avec mise à jour est en bleu, pour le modèle GR sans mise à jour en vert, et pour SIM en rouge.

modèles n'utilisent pas de mise à jour ou d'assimilation.

La comparaison entre SIM et le modèle GR sans mise à jour montre en revanche des résultats plus proches, même si légèrement à l'avantage du GR. Cependant, sur des scores comme le taux de fausses alarmes, SIM est meilleur, et le BSS est très proche de celui du GR sans mise à jour.

Enfin, il est important de noter que la dispersion des membres hydrologiques, qui était à la base déjà faible dans SIM, est encore plus faible pour les deux modèles GR. C'est indiscutablement un aspect à améliorer dans le cadre d'une utilisation finale de ces prévisions d'ensemble hydrologiques, car sans une représentation assez significative de l'incertitude des prévisions, la vision ensembliste n'est pas optimale.

Ce travail a donné lieu à des communications lors de conférences internationales, et donnera lieu à une publication dans une revue à comité de lecture (*Randrianasolo et al. (2010)*).

4.5 Conclusion

Nous avons pu voir dans ce chapitre comment améliorer les prévisions d'ensemble de débits à courte échéance en utilisant la PEARP.

Tout d'abord, les prévisions d'ensemble hydrologiques mises en place lors de la thèse de *Rousset-Regimbeau (2007)* (basées sur SIM et l'EPS du CEPMMT) ont été comparées sur leurs deux premiers jours d'échéance avec les prévisions d'ensemble hydrologiques basées sur SIM et la PEARP (*Thirel et al. (2008)*). En effet, un organisme comme le SCHAPI est très demandeur de prévisions de débits à courte échéance améliorées (moins de 3 jours), afin de mieux anticiper les risques de crues. C'est dans ce cadre que l'utilisation d'une prévision d'ensemble météorologique de meilleure qualité et dédiée aux événements extrêmes et localisés (la PEARP) a été testée lors de ma thèse.

Une comparaison complète utilisant de nombreux scores statistiques ensemblistes a été faite. Il a été montré qu'en prenant comme référence une simulation de SIM-analyse, la PEARP donnait de meilleurs résultats que l'EPS du CEPMMT pour les bassins de petite taille et les forts débits (*Thirel et al. (2008)*), sur l'ensemble des 881 stations de SIM. En revanche, pour les bassins de plus grande taille et les faibles débits, la tendance semble inverse. Enfin, le second jour de prévision semble favorable à la PEARP.

En complément, une comparaison inter-modèles avec les GR du CEMAGREF a été réalisée sur une sélection de 211 stations communes, en utilisant en entrée des deux modèles, les mêmes prévisions d'ensemble météorologiques de la PEARP (*Randrianasolo (2009)*). Là aussi, de nombreux scores statistiques ont été étudiés. Si, comme on s'y attendait, le modèle GR avec mise à jour est bien meilleur que SIM, le modèle GR sans mise à jour donne des résultats très proches de SIM, même s'il reste légèrement meilleur.

Ces deux études ont permis d'identifier l'apport d'une meilleure prévision d'ensemble météorologique utilisée en entrée de SIM. Ainsi, on espère de plus amples améliorations en utilisant les prévisions d'ensemble météorologiques actuelles qui ont été améliorées au niveau

de leur résolution et de leur échéance (et même de leur nombre de membres en ce qui concerne la PEARP) depuis ces deux études (EPS du CEPMMT et PEARP sont devenues VAR-EPS et PEARP2).

Cependant, l'étude comparative avec les modèles GR du CEMAGREF montre aussi que le modèle SIM devrait être amélioré afin d'obtenir de meilleurs résultats. L'assimilation de données afin de disposer de meilleurs états initiaux pour les prévisions d'ensemble hydrologiques est une importante voie d'amélioration, qui sera exploitée dans la suite de ce manuscrit.

Chapitre 5

Un système d'assimilation des débits dans SIM

Introduction

Pour justifier l'idée d'une assimilation des débits dans SAFRAN-ISBA-MODCOU, il convient de rappeler que MODCOU n'utilise aucunement des observations de débits lors de son initialisation dans le but de se recalibrer. L'état initial du jour J de la chaîne SIM-analyse est, pour chaque jour, l'état final du jour J-1 issu de la simulation du jour précédent. Si cette méthode présente l'avantage d'être simple, il apparaît évident que les simulations peuvent s'éloigner de la réalité. En effet, l'hydrologie est directement dépendante de la pluviométrie, et les données de précipitations ont, elles aussi, des sources d'incertitude (pluies mal situées, non prévues, mal estimées). Par exemple, il est connu que les pluies calculées en temps réel par SAFRAN sont souvent sous-estimées.

Par conséquent, il arrive que certains épisodes de crues soient mal prévus par le modèle. C'est pourquoi on a envisagé d'étudier la faisabilité de la mise en place d'une assimilation des débits dans SIM. L'objectif de cette assimilation est de rapprocher le plus possible les prévisions de débits, des débits observés, en prenant en compte les erreurs sur les observations.

Ainsi, dans le cadre des prévisions d'ensemble, les scores probabilistes pourront plus facilement être comparés directement aux observations, et non plus à une simulation de référence de SIM. En effet, lors de toutes les études précédemment menées au CNRM sur la chaîne SIM-prévision d'ensemble de débits, les prévisions de débits avaient à chaque fois été comparées aux débits de la chaîne SIM-analyse.

Enfin, ceci rend plus accessible aux utilisateurs finaux (prévisionnistes) l'interprétation des débits d'ensemble.

Dans notre cas, nous avons choisi comme variable de contrôle l'humidité du sol dans le modèle ISBA. Cela signifie que l'on va modifier l'humidité initiale du sol d'ISBA afin d'améliorer les simulations de débits. En effet, en procédant ainsi, des défauts de modélisation peuvent être en partie comblés, et des épisodes de pluie "ratés" ou surestimés peuvent être réajustés en augmentant ou diminuant l'humidité du sol. Concrètement, cela signifie qu'on assimile les débits observés des rivières, afin d'estimer le meilleur état initial de l'eau du sol, dans le but d'obtenir finalement la meilleure simulation possible des débits, sans trop s'éloigner de l'état initial de l'eau dans le sol. La méthodologie employée sera décrite dans le paragraphe 5.3. Il est important de noter que le but n'est pas de déterminer le meilleur état "vrai" de l'humidité du sol, mais d'estimer l'état de l'humidité du sol conduisant à la meilleure simulation des débits des rivières possible.

5.1 L'assimilation de données

L'assimilation de données représente un ensemble de méthodes permettant de combiner de manière optimale toutes les sources de données disponibles, qui, bien souvent, sont issues de sources hétérogènes, dans le but de décrire au mieux l'état d'un système. Ces méthodes s'accroissent d'observations incomplètes, voire indirectes.

L'assimilation de données est utilisée dans de nombreux domaines aussi variés que la météorologie, l'océanographie, l'hydrologie, la glaciologie, la sismique, la médecine, le bâtiment, etc...

Les plus courantes de ces méthodes, à savoir l'estimation du Meilleur Estimateur Linéaire non-Biaisé (Best Linear Unbiased Estimator, BLUE), le filtre de Kalman étendu, le filtre de Kalman d'ensemble, le filtre particulière, et l'assimilation variationnelle, vont être décrites ici de manière générale.

Mais tout d'abord, on va définir dans un tableau les symboles des principaux vecteurs, matrices et opérateurs qui interviennent dans l'assimilation de données (*Ide et al. (1997)*) :

Symbole	Nom de la variable
\mathbf{y}^0	Observations
\mathbf{x}^b	Ebauche
\mathbf{x}^a	Analyse
\mathcal{M}	Modèle (non linéaire)
$\mathcal{H}(\mathbf{x}^b)$	Equivalent modèle des observations
\mathbf{M}	Modèle linéaire
\mathbf{R}	Matrice de covariance d'erreurs d'observations
\mathbf{B}	Matrice de covariance d'erreurs d'ébauche
\mathbf{A}	Matrice de covariance d'erreurs d'analyse
\mathbf{H}	Matrice Jacobienne de l'opérateur d'observation
\mathbf{K}	Matrice de gain

TABLE 5.1 – Définition des principaux vecteurs, matrices et opérateurs de l'assimilation de données.

5.1.1 La méthode du Best Linear Unbiased Estimator (BLUE)

Les hypothèses du BLUE reposent sur le fait que les erreurs d'ébauche, d'observations et d'analyse sont non-biaisées (*Gelb (1974)*), et que le modèle utilisé doit être linéaire, ou utilisé dans un domaine de linéarité.

Définissons le vecteur \mathbf{x} (de dimension N_x) comme représentant les variables pronostiques d'un modèle noté \mathcal{M} qui décrit leur évolution dans le temps.

Le vecteur \mathbf{y}^0 (de dimension N_y) représente quant à lui les observations, dont on connaît l'erreur ϵ^0 au moyen d'une matrice de covariance d'erreurs d'observations, appelée \mathbf{R} ($\mathbf{R} = E(\epsilon^0 \epsilon^{0T})$).

$$\mathbf{y}^0 = \mathbf{y}^t + \epsilon^0 \quad (5.1)$$

On note \mathcal{H} l'opérateur d'observations qui permet d'obtenir l'équivalent de la variable d'état dans l'espace des observations :

$$\mathbf{y}^t = \mathcal{H}(\mathbf{x}^t) \quad (5.2)$$

La matrice Jacobienne \mathbf{H} représente l'approximation linéaire de l'opérateur d'observations \mathcal{H} :

$$\mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}} \quad (5.3)$$

On dispose aussi de la prévision \mathbf{x}^b (avec b comme background, aussi appelée ébauche) des variables \mathbf{x} à l'instant t , dont on connaît l'erreur ϵ^b au moyen de sa matrice de covariance d'erreurs \mathbf{B} ($\mathbf{B} = E(\epsilon^b \epsilon^{bT})$) :

$$\mathbf{x}^b = \mathbf{x}^t + \epsilon^b \quad (5.4)$$

On fait l'hypothèse que les erreurs (caractérisées dans l'algorithme d'assimilation par \mathbf{R} et \mathbf{B}) sont non-biaisées.

L'état analysé de la variable assimilée est recherché comme étant une combinaison linéaire de l'ébauche et des observations, avec \mathbf{L} un opérateur linéaire, et \mathbf{K} appelée matrice de gain :

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{L}\mathbf{x}^b + \mathbf{K}\mathbf{y}^0 \quad (5.5)$$

Cet état analysé approxime l'état "vrai" \mathbf{x}^t de la variable considérée avec une erreur d'analyse non-biaisée ϵ^a :

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^t + \epsilon^a \quad (5.6)$$

L'état analysé de la variable assimilée (\mathbf{x}^a) est caractérisé par une erreur dont \mathbf{A} est la matrice de covariance d'erreur d'analyse. *Bouttier and Courtier (1999)* ont montré que cette matrice \mathbf{A} ($=E(\epsilon^a \epsilon^{aT})$) est décrite de la manière suivante :

$$\mathbf{A} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{H})\mathbf{B}(\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{H})^T + \mathbf{K}\mathbf{R}\mathbf{K}^T, \quad (5.7)$$

et que l'analyse de la variable assimilée est égale à son ébauche, à laquelle on applique un terme correctif de la manière suivante :

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^b + \mathbf{K}(\mathbf{y}^0 - \mathcal{H}(\mathbf{x}^b)) \quad (5.8)$$

La trace de la matrice \mathbf{A} représente la variance de l'erreur d'analyse, il convient donc de la minimiser afin de déterminer l'état le plus proche possible de l'état vrai \mathbf{x}^t (au sens de la minimisation de la variance). Son minimum est déterminé pour la matrice \mathbf{K} suivante (*Bouttier and Courtier (1999)*) :

$$\mathbf{K} = (\mathbf{B}^{-1} + \mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1} \quad (5.9)$$

L'état analysé s'écrit donc :

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^b + (\mathbf{B}^{-1} + \mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y}^0 - \mathcal{H}(\mathbf{x}^b)) \quad (5.10)$$

Enfin, en remplaçant la valeur exacte de \mathbf{K} dans l'équation 5.7, on obtient :

$$\mathbf{A} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{H})\mathbf{B} \quad (5.11)$$

Cette méthode a l'avantage de déterminer la matrice \mathbf{K} de manière explicite. Cependant, les inversions des matrices \mathbf{B} et \mathbf{R} rendent son utilisation très coûteuse pour des systèmes à grandes dimensions. De plus, la linéarisation de \mathbf{H} est elle aussi coûteuse.

On rappelle que les hypothèses de BLUE sont que les erreurs d'ébauche et d'observations sont non-biaisées, ainsi que l'erreur d'analyse (*Ricci (2004)*). De plus, le modèle utilisé doit être linéaire, ou utilisé dans un domaine de linéarité.

5.1.2 Le filtre de Kalman étendu (EKF)

C'est une méthode séquentielle qui est en fait une extension du BLUE (*Gelb (1974), Ricci (2004), Massart (2003)*). Elle consiste à propager l'état analysé ainsi que l'erreur d'analyse. Ses hypothèses sont les mêmes que pour le BLUE.

Les premières étapes sont strictement identiques à celles du BLUE (i.e. détermination de l'état analysé). Ensuite, $\mathbf{x}^a(t)$ est propagé par le modèle non-linéaire \mathcal{M} jusqu'à $\mathbf{x}^b(t+1)$, et ce nouvel état servira d'ébauche au cycle d'assimilation suivant. La seule différence avec le BLUE, est que l'erreur d'analyse est propagée dans le temps.

L'analyse est propagée de manière simple par le modèle afin de produire l'ébauche au temps suivant :

$$\mathbf{x}^b(t+1) = \mathcal{M}(\mathbf{x}^a(t)) \quad (5.12)$$

L'obtention de la matrice de covariance d'erreur d'analyse pose problème. En effet, elle nécessite de calculer, stocker, multiplier et propager par le linéaire-tangent et l'adjoint du modèle (\mathbf{M} et \mathbf{M}^T) la matrice \mathbf{A} , et de définir une matrice \mathbf{Q} qui représente les covariances d'erreur du modèle :

$$\mathbf{B}(t+1) = \mathbf{M}\mathbf{A}(t)\mathbf{M}^T + \mathbf{Q}(t) \quad (5.13)$$

La matrice \mathbf{A} propagée est par définition la matrice \mathbf{B} au temps $t+1$. En effet, la propagation au temps $t+1$ de l'analyse étant utilisée comme ébauche, il a été montré (en supposant que l'opérateur de prévision \mathcal{M} était linéaire (*Gelb (1974), Ricci (2004)*)) que la propagation de la matrice \mathbf{A} au temps $t+1$ était égale à la matrice de covariance d'erreurs d'ébauche.

5.1.3 Le filtre de Kalman d'ensemble (EnKF)

Une méthode ensembliste dite "filtre de Kalman d'ensemble (EnKF)" a été développée il y a plusieurs années. Cette méthode a l'avantage d'estimer les principaux termes nécessaires pour le calcul de l'analyse et de l'erreur d'analyse, ce qui permet de ne pas avoir à les calculer directement (*Evensen (2003)*). L'équation d'analyse est la même que celle utilisée pour le BLUE (équation 5.10), mais on préférera l'écrire de la manière suivante :

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^b + \mathbf{B}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}(\mathbf{y}^0 - \mathcal{H}(\mathbf{x}^b)) \quad (5.14)$$

On va construire un ensemble d'ébauches grâce à un ensemble d'états initiaux, puis on pourra calculer les deux termes suivants :

$$\mathbf{B}\mathbf{H}^T \approx E[(\mathbf{x}^b - \bar{\mathbf{x}}^b)(\mathcal{H}(\mathbf{x}^b) - \overline{\mathcal{H}(\mathbf{x}^b)})^T] \quad (5.15)$$

$$\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T \approx E[(\mathcal{H}(\mathbf{x}^b) - \overline{\mathcal{H}(\mathbf{x}^b)})(\mathcal{H}(\mathbf{x}^b) - \overline{\mathcal{H}(\mathbf{x}^b)})^T], \quad (5.16)$$

avec $\bar{\mathbf{x}} = E[\mathbf{x}]$. Cela permet de déterminer l'état analysé sans expliciter les différentes matrices (*Evensen (2003)*).

La matrice \mathbf{B} peut être estimée à partir de l'ensemble de N prévisions :

$$\mathbf{B} \approx E[(\mathbf{x}^b - \bar{\mathbf{x}}^b)(\mathbf{x}^b - \bar{\mathbf{x}}^b)^T] \quad (5.17)$$

La matrice de covariance d'erreur d'analyse au temps $t+1$ sera définie grâce à la propagation au temps $t+1$ de l'échantillon des états d'analyse :

$$\mathbf{B}(t+1) \approx \mathbf{A}(t+1) \approx E[(\mathbf{x}^a - \bar{\mathbf{x}}^a)(\mathbf{x}^a - \bar{\mathbf{x}}^a)^T] \quad (5.18)$$

Cependant, l'échantillon étant souvent de taille réduite ($N \approx 10$), la matrice d'erreur d'analyse est sous-estimée, conduisant à un effondrement du filtre (\mathbf{A} est trop petite, donc l'ébauche prend le pas sur les observations). Ce problème peut être réglé en perturbant les observations.

5.1.4 Le filtre particulaire

Considérons le système dynamique suivant :

$$\mathbf{x}(t) = \mathcal{M}(\mathbf{x}(t-1)) + \mathbf{Q}(t) \quad (5.19)$$

$$\mathbf{y}(t) = g(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{R}(t) \quad (5.20)$$

\mathcal{M} et g sont des fonctions non-linéaires, et les erreurs du modèle ($\mathbf{Q}(t)$) et d'observations ($\mathbf{R}(t)$) sont non-gaussiennes. Le but du filtre particulaire va alors être d'approcher la distribution du vecteur d'état (\mathbf{x}) (voir *Arulampalam et al. (2002)* et *Moradkhani et al. (2005)*). Pour cela, on va simuler une distribution uniforme a priori des variables du vecteur d'état (les particules), chaque particule ayant le même poids. Ensuite, on propage chacune de ces particules grâce au modèle, jusqu'à la prochaine observation disponible. Chacune des particules se voit alors attribuer un nouveau poids, en fonction de sa distance avec l'observation. La "moyenne" de ces particules, pondérées par leur poids, sera alors l'état analysé.

A noter que le poids de certaines particules peut rapidement devenir négligeable (*Doucet et al. (2001)*). Il existe différentes méthodes de redistribution des particules afin de pallier ce problème. Une revue détaillée de l'utilisation des filtres particulaires en géophysique, ainsi que des méthodes de re-distribution des particules, est donnée dans *van Leeuwen (2009)*. Si l'approche du filtre particulaire peut paraître intéressante en ce qui concerne les problèmes non-linéaires, le nombre de particules nécessaires est le plus souvent supérieur au nombre de membres d'un filtre de Kalman d'ensemble, ce qui peut limiter son utilisation.

5.1.5 Assimilation variationnelle

L'assimilation peut aussi être décrite grâce à un formalisme variationnel dans lequel on cherche un état \mathbf{x} qui minimise une fonctionnelle mesurant l'écart à l'ébauche \mathbf{x}^b et aux observations \mathbf{y}^0 (*Ricci (2004)*, *Daget (2008)*) :

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^b) + \frac{1}{2}(\mathbf{y}^0 - \mathcal{H}(\mathbf{x}))^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y}^0 - \mathcal{H}(\mathbf{x})) \quad (5.21)$$

Lorsque \mathcal{H} est linéaire, on peut montrer que cette approche est identique au filtre de Kalman étendu.

On détermine le minimum de J grâce à un algorithme de minimisation en utilisant son gradient :

$$\nabla J(\mathbf{x}) = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^b) + \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y}^0 - \mathcal{H}(\mathbf{x})) \quad (5.22)$$

avec \mathbf{H}^T l'adjoint de l'opérateur d'observation.

Un aspect intéressant de la formulation de cette fonction-coût est de ne pas faire intervenir explicitement la notion de temps. Ainsi, elle peut s'appliquer à un instant donné comme le filtre de Kalman (3D-Var), mais aussi sur un intervalle temporel : on va alors chercher à

déterminer un état \mathbf{x}^0 au début de la fenêtre d'assimilation conduisant à une évolution de l'état \mathbf{x}^t s'ajustant à des observations disponibles à plusieurs instants dans la période (4D-Var). Cela revient à considérer que l'opérateur d'observation est la combinaison d'un premier opérateur (le modèle de prévision) faisant évoluer l'état initial \mathbf{x}^0 jusqu'à un instant t où un vecteur d'observations \mathbf{y}^{0t} est disponible :

$$\mathbf{x}^t = \mathcal{M}(\mathbf{x}^0) \quad (5.23)$$

et d'un "vrai" opérateur d'observation (celui précédemment défini pour l'EKF) qui fournit l'équivalent modèle de l'observation au même instant :

$$\mathbf{y}^t = \mathcal{H}(\mathbf{x}^t) \quad (5.24)$$

Finalement, on écrit la relation entre la variable que l'on cherche à analyser et les observations disponibles comme :

$$\mathbf{y}^t = \mathcal{H}_1(\mathbf{x}^0) \quad (5.25)$$

avec $\mathcal{H}_1 = \mathcal{H}\mathcal{M}$. Un avantage de cette méthode est de pouvoir considérer une modulation de la matrice \mathbf{B} par les versions linéarisées du modèle de prévision : à un instant t , la matrice \mathbf{B} effective sera $\mathbf{M}\mathbf{B}\mathbf{M}^T$. Ceci est analogue à la propagation de la matrice \mathbf{A} dans le filtre de Kalman, sans le terme d'erreur modèle, et sans avoir à propager explicitement la matrice \mathbf{B} dans le temps.

Le coût de la méthode variationnelle est élevé si on ne peut pas estimer analytiquement \mathcal{H}_1 car il implique à la fois l'opérateur d'observation "statique" \mathcal{H} mais surtout l'adjoint du modèle de prévision \mathbf{M} . On en a effectivement besoin à chaque itération de l'algorithme de minimisation.

5.2 Etat de l'art de l'assimilation en hydrologie

L'assimilation de données est indispensable dans la communauté météorologique et océanographique afin de fournir les états initiaux des modèles numériques.

Cette voie est désormais de plus en plus suivie par les hydrologues. L'enjeu est alors d'améliorer l'état hydrique du sol, ou les prévisions de débits, en assimilant des humidités du sol observées, ou des débits observés.

Par exemple, *Reichle et al. (2002)* ont mis en place un système d'assimilation du contenu en eau du sol pour améliorer les états de surface dans un modèle de bassin en Autriche, grâce à des filtres de Kalman étendu et de Kalman d'ensemble à 4, 10 ou 100 membres.

Rüdiger (2006) a, quant à lui, utilisé une approche bayésienne d'assimilation de l'humidité de surface et des débits pour retrouver l'humidité en zone racinaire en Australie. En effet, des perturbations itératives de l'humidité du sol ont été opérées jusqu'à ce que les états hydriques et les débits se rapprochent le plus possible des observations.

Pauwels and De Lannoy (2005) ont choisi d'assimiler les débits observés afin de retrouver une bonne humidité du sol avec TOPMODEL sur un bassin versant en Belgique grâce à un

EnKF. Ils ont ainsi pu améliorer les flux et les états hydriques.

Zaitchik et al. (2008) se sont penchés sur l'utilisation des données satellitaires GRACE d'humidité du sol dans le cas du fleuve Mississippi, afin d'améliorer le contenu en eau du sol ainsi que les flux d'eau.

Crow and Ryu (2009) ont mis en place une assimilation séquentielle de données satellitaires d'humidité du sol sur des cas synthétiques. Le but est ici d'améliorer à la fois les états initiaux d'humidité du sol avant des tempêtes et les quantités de précipitation à l'échelle de l'orage.

Enfin, les débits observés peuvent être assimilés afin de mieux prévoir les débits futurs, comme cela a été le cas durant ma thèse.

Aubert et al. (2003) ont développé une assimilation séquentielle (EKF) de l'humidité du sol et des débits observés pour améliorer les prévisions de débits sur un sous-bassin de la Seine. Cette étude a montré une meilleure efficacité de l'assimilation de l'humidité du sol durant les pics de crue, et une meilleure efficacité de l'assimilation des débits pour les périodes d'étiage.

Concernant les applications en opérationnel d'une assimilation pour améliorer les prévisions des débits, peu d'exemples existent pour le moment. *Komma et al. (2008)* ont mis en place un filtre EnKF sur un bassin autrichien afin d'assimiler les débits observés de 16 stations. Cette assimilation a pour but d'ajuster l'humidité du sol, afin de prévoir de meilleurs débits en temps réel. *Seo et al. (2009)* ont implémenté un système opérationnel d'assimilation variationnelle (VAR) des débits, des précipitations, et de l'évaporation potentielle dans un modèle hydrologique à un pas de temps horaire (Etats-Unis). Enfin, des systèmes interactifs permettant la mise à jour manuelle d'états du modèle par les prévisionnistes existent, comme par exemple au Canada (*R. Turcotte and Villeneuve (2004)*) ou aux Etats-Unis (*Smith and Page (1993)*).

5.3 Méthodologie appliquée pour SIM

5.3.1 Stations de mesure assimilées

SIM comprend 881 points de simulation de débits sur l'ensemble de la France. Parmi ces 881 stations simulées, il a fallu en sélectionner un certain nombre d'entre elles jugées pertinentes pour l'assimilation.

Tout d'abord, il a fallu vérifier la disponibilité des observations pour la période étudiée. Pour cela, on s'est servi de la base de données de la Banque Hydro. Une vérification de la qualité des observations a été effectuée selon les remarques établies sur le site de la Banque Hydro, par les collecteurs de ces données.

Enfin, il a été jugé préférable de ne pas sélectionner des stations qui étaient trop mal simulées par SIM, afin de limiter le travail de l'assimilation. En effet, si la dynamique de la simulation des débits et la physique du modèle sont vraiment trop mauvaises, il paraît peu opportun de tenter de les rendre correctes par l'assimilation des débits.

Sur un total de 881 stations simulées dans SIM, 186 stations ont été retenues pour l'assimilation des débits dans cette application. Ces stations sont assez bien réparties sur l'ensemble de la France (figure 5.1), excepté le long des côtes (en raison des effets de marée), et dans les Alpes (en raison des effets des barrages hydro-électriques). En effet, ces éléments ne sont pas pris en compte dans SIM. L'ensemble des mailles ISBA irriguant au moins une des stations assimilées est représenté figure 5.1.

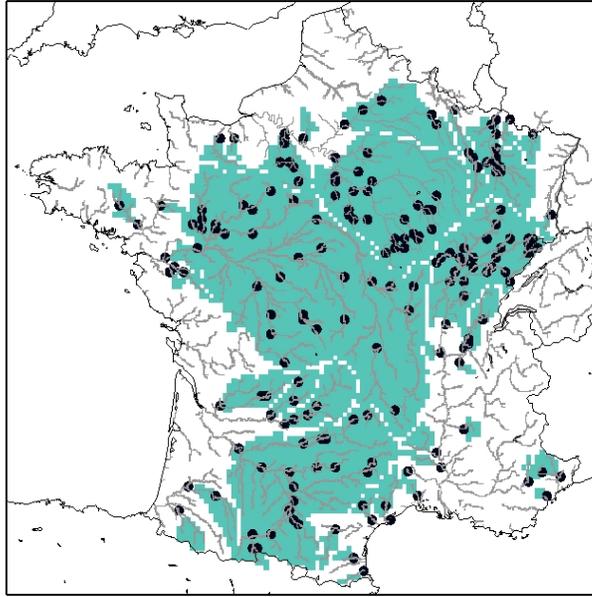


FIGURE 5.1 – Les 186 stations assimilées et les mailles ISBA les irriguant.

5.3.2 Méthodologie du système d'assimilation des débits dans SIM avec le BLUE

Définitions et méthodologie

Le meilleur estimateur linéaire non-biaisé (BLUE) a été choisi pour effectuer l'assimilation des débits dans SIM. Ce choix a pu être fait en raison du faible coût du calcul de la vraie solution du BLUE, étant donné la dimension des variables impliquées (ordre de grandeur : 186, à la fois dans le domaine des observations, et dans le domaine de la variable de contrôle). En effet, ces faibles dimensions rendent le calcul matriciel réalisable, et on le suppose moins coûteux que la minimisation. Les hypothèses de linéarité seront discutées par la suite.

Il a été supposé que la faiblesse principale du modèle venait de l'humidité du sol dans ISBA, et c'est donc cette variable que l'on a choisi de modifier (explications données dans le paragraphe suivant). Les observations sont des débits, mesurés sur des stations simulées par SIM, au nombre de 186. L'objectif de l'assimilation est donc d'utiliser des débits observés, et de modifier l'humidité du sol pour améliorer la simulation des débits par le modèle.

Reprenons l'équation d'analyse du BLUE (Eq. 5.10) :

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^b + (\mathbf{B}^{-1} + \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y}^0 - \mathcal{H}(\mathbf{x}^b)) \quad (5.26)$$

- \mathbf{x}^a est l'état d'analyse, il représente l'état initial (c'est-à-dire au début de la fenêtre d'assimilation) de l'humidité du sol dans ISBA permettant la meilleure simulation de débits possible.

- \mathbf{x}^b est l'état d'ébauche, il représente l'état initial (c'est-à-dire au début de la fenêtre d'assimilation) de l'humidité du sol dans ISBA avant assimilation. C'est cet état qui va servir de base à l'assimilation, et être incrémenté d'un terme correctif pour donner l'état d'analyse.

- \mathbf{B} est la matrice de covariance d'erreur d'ébauche, elle représente une estimation des erreurs du modèle en ce qui concerne l'humidité du sol. Elle sera plus amplement discutée dans la partie *Matrice de covariance d'erreur d'ébauche* \mathbf{B} .

- \mathbf{R} est la matrice de covariance d'erreur d'observations, elle représente une estimation des erreurs d'observations des débits. Elle sera plus amplement discutée dans la partie *Matrice de covariance d'erreur d'observations* \mathbf{R} .

- \mathbf{H} est la matrice Jacobienne de l'opérateur d'observation, elle définit la sensibilité de la simulation des débits par le modèle, par rapport à des variations d'humidité du sol. Elle sera plus amplement discutée dans la partie *Jacobienne* \mathbf{H} .

- \mathbf{y}^0 contient les observations de débits.

- Enfin, $\mathcal{H}(\mathbf{x}^b)$ représente les débits simulés par SIM, consécutifs à un état initial de l'humidité du sol \mathbf{x}^b . La différence ($\mathbf{y}^0 - \mathcal{H}(\mathbf{x}^b)$) est appelée vecteur innovation, et représente l'écart entre les observations et les simulations de débits. Son importance déterminera donc dans l'équation d'analyse l'amplitude de l'incrément à appliquer à l'humidité du sol donné par le BLUE.

Pour résumer ces définitions, on reprend le tableau 5.1 en faisant correspondre les symboles des variables utilisées avec leur nature dans notre application d'assimilation des débits dans SIM :

Symbole	Nom de la variable
\mathbf{y}^0	Débits observés
\mathbf{x}^b	Humidité du sol (ISBA) initiale avant assimilation
\mathbf{x}^a	Humidité du sol (ISBA) initiale après assimilation
\mathcal{M}	ISBA-MODCOU
$\mathcal{H}(\mathbf{x}^b)$	Débits simulés par ISBA-MODCOU avec une humidité initiale \mathbf{x}^b
\mathbf{M}	Version linéaire d'ISBA-MODCOU (non utilisée dans ce travail)
\mathbf{R}	Matrice de covariance d'erreurs d'observations (débits)
\mathbf{B}	Matrice de covariance d'erreurs d'ébauche (humidité du sol (ISBA))
\mathbf{H}	Matrice Jacobienne (sensibilité des débits MODCOU à l'humidité du sol ISBA)
\mathbf{A}	Matrice de covariance d'erreurs d'analyse
\mathbf{K}	Matrice de gain

TABLE 5.2 – Définition des principaux vecteurs, matrices et opérateurs de l'assimilation des débits dans SIM.

Choix de la variable d'état

Lors de ce travail, qui est une première approche de l'assimilation de données dans SIM, il a été décidé de choisir comme variable d'état (c'est-à-dire la variable que l'on va ajuster afin de se rapprocher des observations de débits) l'humidité du sol dans ISBA. Cependant, il convient de justifier ce choix. En effet, il aurait tout aussi bien été possible de modifier certains paramètres, ou même directement les états de l'eau dans les rivières, par exemple.

Dans ISBA, les deux processus importants en ce qui concerne les débits des rivières, sont le drainage gravitationnel, et le ruissellement (sous-maille).

Le drainage gravitationnel représente les flux d'eau vers le bas qui ont lieu à la base de la couche racinaire et de la couche profonde. C'est ce dernier qui est transmis à MODCOU. On rappelle que le drainage s'écoulant de la base de la couche profonde vers MODCOU s'écrit sous la forme :

$$D = -\frac{C_3 d_3}{\tau(d_3 - d_2)} \max[w_{\text{drain}}, (w_3 - w_{fc})], \quad (5.27)$$

avec d_2 et d_3 les profondeurs des couches 2 et 3 du sol, w_{drain} le drainage sous-maille minimal, w_{fc} la capacité au champ du sol, w_3 le contenu en eau du sol de la couche 3, C_3 la vitesse de rappel à la capacité au champ, et τ une constante de temps.

Le drainage est donc directement (et linéairement) dépendant de l'humidité de la couche 3 du sol.

Le ruissellement sous-maille représente la quantité d'eau de pluie qui ruisselle, alors que la maille ISBA n'est pas entièrement saturée. Il consiste à saturer progressivement des réservoirs élémentaires inclus dans la maille ISBA. Ce processus a été décrit plus tôt dans ce manuscrit (paragraphe 2.3.3). Le ruissellement est le second flux transmis à MODCOU. Il s'écrit :

$$Q_r = P - d_2(w_{\text{sat}} - w_2) \quad (5.28)$$

si $P > (1 + b)(w_{\text{sat}} - w_{\text{wilt}})\left(1 - \frac{w_2 - w_{\text{wilt}}}{w_{\text{sat}} - w_{\text{wilt}}}\right)^{\frac{1}{b+1}}$, et :

$$Q_r = P - d_2(w_{\text{sat}} - w_2) + d_2(w_{\text{sat}} - w_{\text{wilt}})\left[\left(1 - \frac{w_2 - w_{\text{wilt}}}{w_{\text{sat}} - w_{\text{wilt}}}\right)^{\frac{1}{b+1}} - \frac{P}{(w_{\text{sat}} - w_{\text{wilt}})(b + 1)}\right]^{1+b} \quad (5.29)$$

si $P \leq (1 + b)(w_{\text{sat}} - w_{\text{wilt}})\left(1 - \frac{w_2 - w_{\text{wilt}}}{w_{\text{sat}} - w_{\text{wilt}}}\right)^{\frac{1}{b+1}}$. On voit donc que le ruissellement est dépendant de l'humidité de la couche 2 du sol.

Les humidités des couches 2 et 3 d'ISBA sont donc des variables d'état envisageables.

En ce qui concerne MODCOU, les processus sont découpés en trois processus. En effet, l'eau (issue du drainage (seulement si aucune nappe n'est simulée) ou du ruissellement) est transférée du sol vers les mailles rivières grâce à la notion de zones isochrones. Ensuite, l'eau de la rivière est dirigée vers son exutoire. Enfin, des échanges ont lieu entre le sol et les nappes, si elles sont simulées à cet endroit.

Le transfert de l'eau du sol vers la rivière est directement dépendant du ruissellement ou du drainage, et donc équivaut à s'intéresser à l'humidité des couches 2 ou 3 du sol d'ISBA.

Il est aussi possible de jouer sur les temps de transfert constituant les zones isochrones. Cependant, en cas d'épisode pluvieux manqué ou sur-estimé, il ne sera jamais possible de se

rapprocher ainsi de la bonne quantité d'eau en rivière. Cette méthode ne serait efficace que dans le cas de décalages temporels de pics de crue.

Une autre solution aurait pu être d'aller modifier directement les contenus en eau des biefs des rivières. Cependant, avec cette méthode, on ne tiendrait plus compte de la physique inhérente à ISBA, ce qui est dommage.

Enfin, la modification des hauteurs piezométriques a été envisagée durant cette thèse, mais n'a pas pu être abordée faute de temps.

Ce raisonnement nous a amenés à choisir les humidités des couches 2 et 3 du sol d'ISBA comme possibles variables de contrôle dans ce travail. Nous verrons dans le paragraphe suivant la manière exacte dont nous envisagerons de les prendre en compte dans le système d'assimilation.

Comment agréger une humidité du sol de la grille ISBA (9892 mailles) vers la dimension de la variable d'état (186 valeurs) ?

Gestion de l'étendue spatiale des bassins :

En effet, même si la grille ISBA comporte 9892 mailles sur l'ensemble de la France et une partie des pays limitrophes, toutes ces mailles ne seront pas modifiées par l'intermédiaire de l'assimilation des débits. Seules les humidités des mailles irriguant au moins l'une des stations de mesure dont on utilise les débits observés seront modifiées par l'intermédiaire du BLUE.

Pour créer la variable de contrôle pour un bassin simple (c'est-à-dire un bassin dont le débit d'une seule station est assimilé, y compris en amont ou en aval), les humidités du sol de toutes les mailles l'irriguant sont sommées. Cependant, certaines stations sont emboîtées dans un même bassin global. Pour bien comprendre comment a été géré ce cas de figure, regardons la figure 5.2.

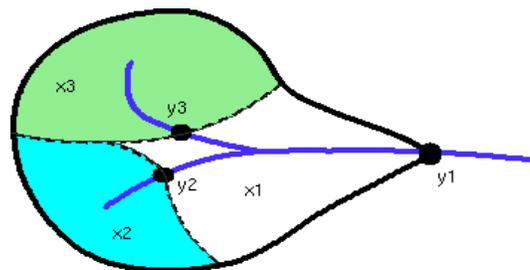


FIGURE 5.2 – Schéma d'un bassin avec trois stations.

Cette figure représente un bassin, comprenant 3 stations (y_1 , y_2 et y_3), chacune des stations étant à l'exutoire d'un sous-bassin. Nous appellerons par la suite "bassin" l'ensemble de la surface (délimitée par un trait épais), et "sous-bassins" les zones exclusives à chacun des espaces irriguant les stations. Nous avons donc ici 3 sous-bassins, chacun étant d'une couleur différente sur le schéma.

Pour ce cas de figure, la variable d'état du sous-bassin 1 (x_1) sera calculée en sommant les humidités des mailles situées sur la zone blanche. Pour x_2 , on ne prendra que les mailles sur

la zone bleue, et pour x_3 celles sur la zone verte. Dans notre application, on ne considère donc les sous-bassins que de manière disjointe.

Cette agrégation a été réalisée en sommant simplement l'humidité du sol sur les mailles concernées.

Gestion des couches du sol :

ISBA dans sa version utilisée (ISBA 3L) comporte trois couches de sol, dont deux seulement sont réellement utilisées pour l'hydrologie (couche racinaire et couche profonde de la figure 5.3). En effet, la couche de surface est en réalité une partie de la couche racinaire, et n'est là que pour déterminer les flux entre l'atmosphère et la surface liés à l'évaporation du sol nu.

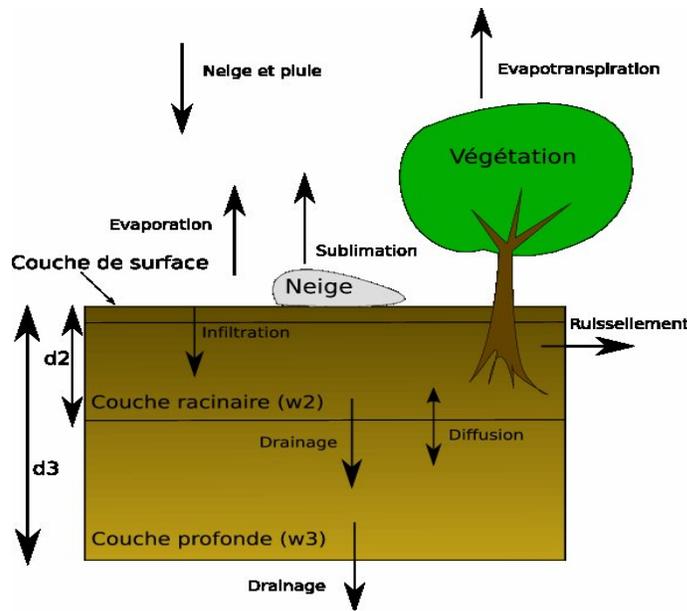


FIGURE 5.3 – Schéma en coupe d'ISBA. Les principaux transferts du cycle de l'eau sont représentés.

Il existe donc différentes façons de définir la variable de contrôle, c'est-à-dire la variable qui sera modifiée afin d'améliorer les simulations de débits. Trois différentes manières de considérer l'humidité du sol ont été testées lors de ce travail. Nous allons les décrire ici. Appelons w_2 et w_3 le contenu en eau (en m^3/m^3) d'une maille ISBA donnée, respectivement pour la couche 2 et la couche 3 de cette maille. d_2 et d_3 sont les profondeurs respectives de ces couches.

La première variable de contrôle envisagée a été une moyenne des contenus en eau des deux couches du sol, pondérés par les épaisseurs respectives des couches, ce qui donne :

$$x_i = \sum_{\text{sous-bassin } i} \frac{d_2 * w_2 + (d_3 - d_2) * w_3}{d_3} \quad (5.30)$$

x_i représente ici la valeur de la variable de contrôle pour le i^e sous-bassin. $\sum_{\text{sous-bassin } i}$ signifie que l'on somme les termes (d_2 , w_2 , d_3 et w_3) sur chacune des mailles du sous-bassin i ,

excepté celles appartenant à un sous-bassin en amont.

Une seconde méthode, n'utilisant que l'humidité de la couche 2 du sol, a été testée :

$$x_i = \sum_{\text{sous-bassin } i} w_2 \quad (5.31)$$

Cette option est venue de l'idée que cette méthode pourrait être plus efficace pour l'amélioration de la simulation des forts débits, qui sont principalement régis par le ruissellement. En effet, le ruissellement est gouverné par l'humidité de la couche 2 du sol dans ISBA.

Enfin, une dernière variable de contrôle (de taille doublée) séparant les deux couches du sol, a été testée :

$$\begin{cases} x_i = \sum_{\text{sous-bassin } i} w_2, & \text{si } 1 \leq i \leq 186 \\ x_i = \sum_{\text{sous-bassin } (i-186)} w_3, & \text{si } 187 \leq i \leq 372 \end{cases} \quad (5.32)$$

En effet, on peut se dire que, comme le ruissellement et le drainage sont les deux phénomènes contrôlant le débit des rivières, et que dans SIM ils sont issus de deux couches différentes du sol, il serait peut-être plus efficace de considérer séparément les modifications apportées à l'humidité du sol par l'assimilation. Ainsi les deux processus seraient traités de manière séparée.

Comment désagréger l'humidité du sol de la dimension de la variable d'état (186 valeurs) vers la grille ISBA (9892 mailles) ?

Après assimilation, c'est-à-dire une fois que le BLUE a fourni l'état d'analyse de l'humidité du sol, il reste une dernière étape afin de déterminer l'état de l'humidité du sol la meilleure possible sur la grille ISBA. En effet, il est nécessaire de re-transformer l'humidité du sol d'une dimension 186 (variable d'état) vers une dimension 9892 (maillage ISBA).

Pour cela, l'analyse est comparée à l'ébauche dans la dimension de la variable d'état. On obtient, pour chacun des 186 sous-bassins, un ratio entre ces deux valeurs. Ces ratios seront ensuite appliqués à l'humidité initiale (ébauche dans la dimension du maillage ISBA), sur chacune des mailles des sous-bassins assimilés respectifs. C'est-à-dire que le ratio d'un sous-bassin sera appliqué à chacune des mailles exclusives de ce sous-bassin.

Matrice de covariance d'erreur d'observations R

Cette matrice a pour but de représenter un ordre de grandeur des erreurs réalisées sur les mesures de débits utilisées. En effet, même si le but de la mise en place de cette assimilation est de se rapprocher des observations de débits, il est important de garder à l'esprit que ces mesures ne sont pas parfaites. Ainsi, tout comme notre modèle, les observations représentent

imparfaitement la réalité. On peut considérer que cet état vrai se situe entre les simulations du modèle, et les observations.

Il est bien évidemment très difficile et fastidieux de déterminer précisément la valeur des erreurs commises. Il est très difficile de trouver une étude liée aux erreurs d'observations. C'est donc une estimation plus ou moins sommaire qui a été réalisée pour ce travail.

Tout d'abord, il a été supposé que les erreurs ne sont pas corrélées entre les différentes stations de mesure. En effet, l'instrument de mesure n'est pas le même, et les personnes qui relèvent et traitent ces données non plus en règle générale. On pourrait imaginer le cas de l'utilisation d'un même type d'appareils sur plusieurs stations de mesure, et qui soit biaisé pour une gamme de débits, mais ce cas de figure peut être surmonté par l'approximation dépendante du débit choisie par la suite. Même si différentes sources de corrélation peuvent apparaître en ce qui concerne la paramétrisation des courbes de tarage, ou si ponctuellement de la végétation ou de la glace peuvent apparaître au niveau de certaines stations d'une même zone, on peut considérer que les effets de tels phénomènes restent faibles. C'est donc finalement une matrice de "variances" d'erreur d'observations qu'il nous reste à déterminer, c'est-à-dire $186 \times N$ valeurs (avec N le nombre de jours de la fenêtre d'assimilation). En effet, plusieurs observations successives peuvent être utilisées, et l'assimilation aura alors pour but de rapprocher la trajectoire de la simulation le plus possible de l'ensemble des observations. Cette matrice est recalculée pour chaque assimilation, et dépend de la valeur des débits observés.

Deux méthodes différentes ont été testées (figure 5.4).

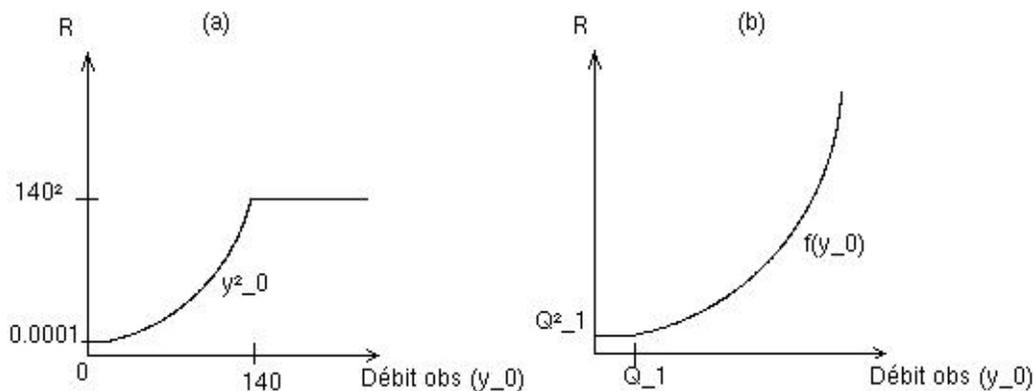


FIGURE 5.4 – Détermination des coefficients de la matrice \mathbf{R} en fonction des débits correspondants. (a) la première méthode décrite dans le texte. (b) la seconde méthode. Pour la seconde méthode, on a $f(y_0) = y_0^2/200 + 199/200 * Q_1^2$.

La première consiste à considérer directement les coefficients comme égaux au carré du débit observé correspondant. Deux limitations ont été imposées : une valeur plancher de $0.0001 (m^3 s^{-1})^2$ a été imposée car l'écriture de \mathbf{K} rend impossible d'avoir des erreurs nulles, et les erreurs ont été plafonnées pour des débits supérieurs à $140 m^3 s^{-1}$. En effet, pour ces débits élevés, les ajustements effectués par BLUE étaient rares car on avait une erreur d'ob-

servations trop importante, donc l'algorithme d'assimilation faisait beaucoup plus confiance à l'ébauche qu'à l'observation.

La seconde méthode part du principe que l'erreur de mesure n'est pas simplement proportionnelle au débit. En effet, pour les faibles débits la topographie du fond du lit de la rivière est déterminante, or celle-ci évolue constamment, sans que la courbe de tarage ne soit réajustée systématiquement. Il a donc été décidé de considérer, pour des débits inférieurs au Q_1 , que l'erreur était du même ordre de grandeur que ce quantile. C'est-à-dire que l'on a pris la variance d'erreur égale à Q_1^2 . Pour les débits supérieurs à ce seuil, on a pris une erreur équivalente à 7% du débit observé (donc la variance d'erreur d'observations est dans ce cas une fonction affine de $y_0^2/200$).

Ces deux méthodes sont schématisées sur la figure 5.4, à gauche pour la première méthode (a), et à droite pour la seconde (b). Il est important de souligner qu'elles ne sont pas directement comparables au niveau de leurs valeurs. En effet, afin de faire la balance entre la matrice de covariance d'erreur d'ébauche \mathbf{B} et la matrice de covariance d'erreur d'observations \mathbf{R} , un coefficient sera appliqué et calibré par la suite pour chacune des expériences envisagées. Ce coefficient est logiquement différent pour les deux choix de matrice \mathbf{R} envisagés.

Des tests sur des cas d'assimilation d'observations réelles ont montré que la seconde méthode apportait des résultats sensiblement meilleurs. En effet, nous avons utilisé des expériences d'assimilation quotidienne des débits sur une période courte de 3 mois, en ne modifiant que la manière d'estimer \mathbf{R} . On a trouvé que le score de Nash ainsi que le *rmse* étaient sensiblement améliorés avec la seconde méthode.

C'est donc cette méthode qui a été choisie dans le cadre de l'implémentation avec des observations réelles.

Matrice de covariance d'erreur d'ébauche \mathbf{B}

Cette matrice a pour fonction de donner un ordre de grandeur de l'incertitude liée au calcul de l'humidité du sol par le modèle. Cette matrice a été elle aussi prise diagonale afin de simplifier le travail à réaliser pour estimer cette matrice dans ce premier travail d'assimilation dans SIM. On a donc supposé que les erreurs d'ébauche ne sont pas corrélées.

Cette incertitude de l'humidité du sol dans ISBA est elle-même très fortement influencée par le forçage atmosphérique, et notamment les précipitations. La méthode choisie pour estimer \mathbf{B} a donc été la suivante : on a réalisé 2 simulations de SIM (en pratique SAFRAN-ISBA suffisent, MODCOU n'est pas nécessaire), l'une avec le forçage SAFRAN original, la seconde avec un forçage SAFRAN perturbé, au niveau de la pluie, de la neige, et des températures à 2m. Ainsi, en sommant les différences au carré entre les humidités des deux simulations, selon la manière dont a été définie la variable de contrôle, on obtient bien une variance d'erreur d'ébauche.

On peut résumer cette méthode de calcul par l'équation suivante (ici pour un des coefficients de la matrice \mathbf{B} correspondant au i^e bassin) :

$$\begin{cases} \mathbf{B}_{i,i} = (x_{i,ref} - x_{i,perturbé})^2 \\ \mathbf{B}_{i,j} = 0 \text{ pour } i \neq j \end{cases} \quad (5.33)$$

avec x_i calculée selon les équations 5.30, 5.31 ou 5.32. Ainsi, la taille de la matrice **B** est de 186 lignes par 186 colonnes dans les deux premiers cas, et de 186×2 lignes par 186×2 colonnes dans le second cas.

Pour créer le forçage SAFRAN perturbé, on a utilisé les résultats de *Quintana Seguí et al. (2008)* qui ont montré que les erreurs quadratiques moyennes commises par SAFRAN étaient de $1.5^{\circ}C$ pour la température, et 2.4 mm jour^{-1} pour les précipitations. On a donc perturbé artificiellement l'analyse SAFRAN, en utilisant un bruit gaussien blanc pour les températures. En revanche, pour les précipitations, on a essayé de manière simple de se rapprocher d'un bruit gaussien. La nature même des précipitations fait qu'il est impossible d'appliquer un bruit gaussien à des champs de précipitations, mais comme le but est d'avoir une estimation de l'erreur de simulation de l'humidité du sol, on peut se contenter de cette méthode. Le bruit sur les précipitations a été simulé de la manière suivante :

Si précipitation horaire < 0.01 mm : $0.5 * \text{précipitation horaire} + \text{bruit d'écart-type } 2.4 \text{ mm/J}$

Si $0.01 \text{ mm} < \text{précipitation horaire} < 0.2 \text{ mm}$: $0.85 * \text{précipitation horaire} + \text{bruit d'écart-type } 2.4 \text{ mm/J}$

Si précipitation horaire > 0.2 mm : précipitation horaire + bruit d'écart-type 5 mm/J

Bien évidemment, une valeur minimale des précipitations à 0 mm a été fixée.

L'erreur quadratique moyenne de la température et des précipitations SAFRAN ainsi créées sont représentées sur les figures 5.5 et 5.6. On voit que l'erreur sur les températures est bruitée et indépendante des zones géographiques, comme attendu (figure 5.5).

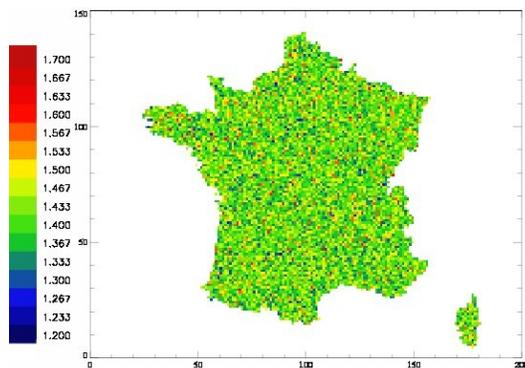


FIGURE 5.5 – RMSE de la température SAFRAN perturbée pour déterminer **B** (en $^{\circ}C$)

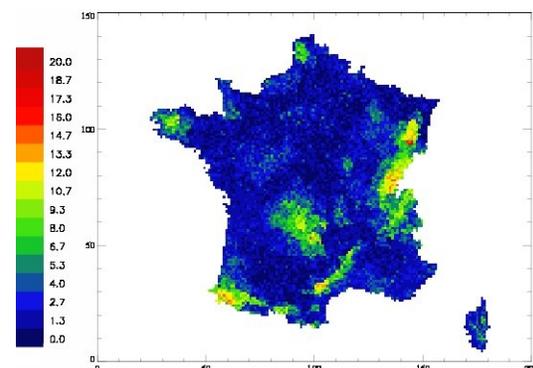


FIGURE 5.6 – RMSE des précipitations SAFRAN perturbées pour déterminer **B** (en mm jour^{-1})

En revanche, l'erreur sur les précipitations est très fortement liée à la quantité initiale de précipitations de SAFRAN, c'est-à-dire qu'elle est la plus importante sur les zones les plus pluvieuses de la France, à savoir le relief (figure 5.6). En effet, on a supposé que plus le cumul de pluie était important, plus l'erreur commise était forte. Cette impression de dépendance aux zones de fortes précipitations est renforcée par la valeur plancher des précipitations (0 mm) qui limite plus fréquemment les erreurs créées dans les zones plus sèches.

Selon la méthode utilisée pour déterminer la variable de contrôle, on a montré que la variance d'erreur ainsi calculée pour l'humidité du sol d'ISBA se situait autour de $0.01 (m^3/m^3)^2$, ce qui correspond à une erreur d'un peu plus de 10% du carré de l'humidité du sol moyenne (qui se situe aux environs de $0.3 m^3/m^3$).

Cette variance d'erreur est représentée sur les figures 5.7 (dans le cas d'une variable de contrôle prenant en compte une moyenne des humidités des deux couches d'ISBA (équation 5.30)), 5.8 (équation 5.31, équation 5.32 pour la couche 2 uniquement) et 5.9 (seulement la couche 3 (équation 5.32)). L'erreur a ici été ramenée à une valeur "par maille" car la nature des variables de contrôle (somme sur l'ensemble des mailles des sous-bassins) aurait compliqué une quelconque comparaison spatiale.

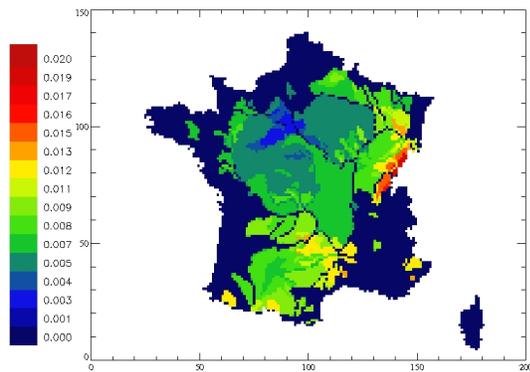


FIGURE 5.7 – Valeur de la matrice **B** sur les mailles ISBA, correspondant au cas de l'équation 5.30 (valeurs de **B** en $(m^3/m^3)^2$)

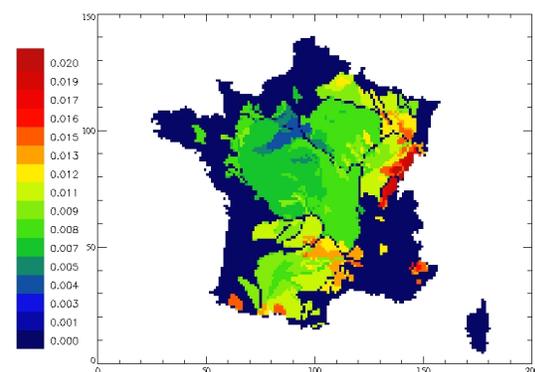


FIGURE 5.8 – Valeur de la matrice **B** sur les mailles ISBA, correspondant au cas de l'équation 5.31, ainsi qu'au cas de l'équation 5.32 pour la couche 2 d'ISBA

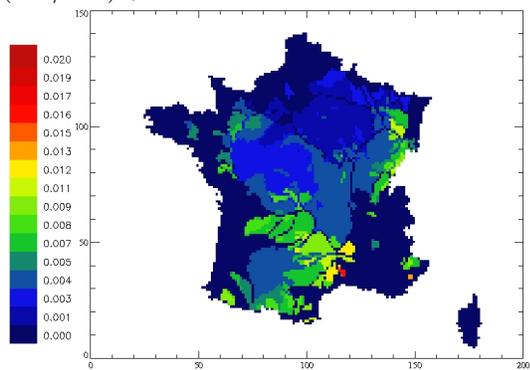


FIGURE 5.9 – Valeur de la matrice **B** sur les mailles ISBA, correspondant au cas de l'équation 5.32 pour la couche 3 d'ISBA

On voit ici que les zones de plus fortes erreurs sont situées sur les zones montagneuses. Elles correspondent donc logiquement aux zones de fortes erreurs sur les précipitations.

De plus, on note que l'erreur commise sur la couche 2 (figure 5.8) est plus importante que celle commise sur la couche 3 (figure 5.9). Cela correspond bien à la physique d'ISBA, car la couche 2 est beaucoup plus sensible aux interactions avec l'atmosphère (précipitations et température) que la couche 3, qui elle a un comportement plus lent. Enfin, quand la variable de contrôle est une moyenne des deux couches (figure 5.7), les valeurs semblent bien se situer

entre les valeurs des deux autres cas. Cependant, elle reste plus proche des valeurs pour la couche 2 que pour la couche 3, du fait de la plus grande épaisseur moyenne de la couche 2 (environ 1.5 m) par rapport à la couche 3 (environ 0.5 m).

Jacobienne \mathbf{H}

L'opérateur d'observation \mathcal{H} est l'opérateur qui décrit le lien entre la variable observée (les débits observés \mathbf{y}^0 dans notre cas) et la variable d'état (l'humidité du sol \mathbf{x}) : $\mathbf{y} = \mathcal{H}(\mathbf{x})$. La Jacobienne \mathbf{H} représente en fait l'approximation linéaire de l'opérateur \mathcal{H} . On peut donc écrire la Jacobienne de la manière suivante :

$$\mathbf{H} = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mathbf{x}} \quad (5.34)$$

L'hypothèse du tangent-linéaire est une hypothèse majeure du BLUE. Cela signifie que, pour chaque assimilation, l'état d'ébauche et l'état d'analyse définissent une plage de valeurs sur laquelle le modèle (ISBA-MODCOU) reste linéaire. Cette hypothèse sera vérifiée dans la suite du manuscrit.

Supposant donc la validité de l'hypothèse du tangeant-linéaire, on peut approximer le débit simulé par SIM, suite à une variation $\Delta \mathbf{x}$ de l'état initial de l'eau dans le sol, par un développement de Taylor :

$$\mathcal{H}(\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}) \approx \mathcal{H}(\mathbf{x}) + \mathbf{H} \Delta \mathbf{x} \quad (5.35)$$

On peut donc déterminer les coefficients de la Jacobienne en retournant l'équation précédente et en utilisant un schéma aux différences finies décentré à droite, ce qui donne :

$$H_{i,j} = \left. \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{i,j} \approx \frac{\mathcal{H}(\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x})_i - \mathcal{H}(\mathbf{x})_i}{\Delta x_j} = \frac{\Delta y_i}{\Delta x_j} \quad (5.36)$$

Δy_i représente la modification du débit de la station i suite à une modification Δx_j de l'humidité du sol du sous-bassin j . Ainsi, pour déterminer entièrement \mathbf{H} , il suffit de comparer les débits de référence de SIM avec des débits perturbés (c'est-à-dire résultant de modifications de l'humidité du sol). Cependant, le fait de considérer un réseau de stations dont les sous-bassins sont emboîtés fait que ce calcul n'est pas trivial, aussi, il sera décrit plus précisément dans la partie suivante.

Pour un cas simple, c'est-à-dire que l'on ne considère ici qu'un seul jour de données observées, et que l'on considère les cas où la variable de contrôle prend en compte les humidités des couches du sol selon les équations 5.30 (moyenne pondérée des deux couches) et 5.31 (uniquement la couche 2), on a donc une matrice de 186 lignes par 186 colonnes. Plus précisément, la Jacobienne \mathbf{H} définit la dépendance des 186 stations de mesures considérées (186 lignes) aux humidités du sol des 186 sous-bassins les irriguant (186 colonnes).

Pour des raisons de temps de calcul (le BLUE va en effet inverser $(\mathbf{B}^{-1} + \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H})$ qui sera diagonale par bloc si \mathbf{H} est diagonale par bloc) et de pratique, les stations (et les sous-bassins) ont été triées. On a regroupé ensemble les stations qui définissaient un bassin. Ensuite, à l'intérieur de chacun de ces groupes de stations, on a classé les stations en mettant en première position la station aval, puis une première station amont, puis une première station amont de celle-ci si elle en possède une, et ainsi de suite. Ainsi, on dispose d'une matrice

triangulaire supérieure (car les sous-bassins amonts de chaque station sont placés après celle-ci), et même triangulaire par blocs.

Cela revient à construire des arbres de dépendances entre les stations, comme on peut le voir pour le cas de la Garonne (figure 5.10) :

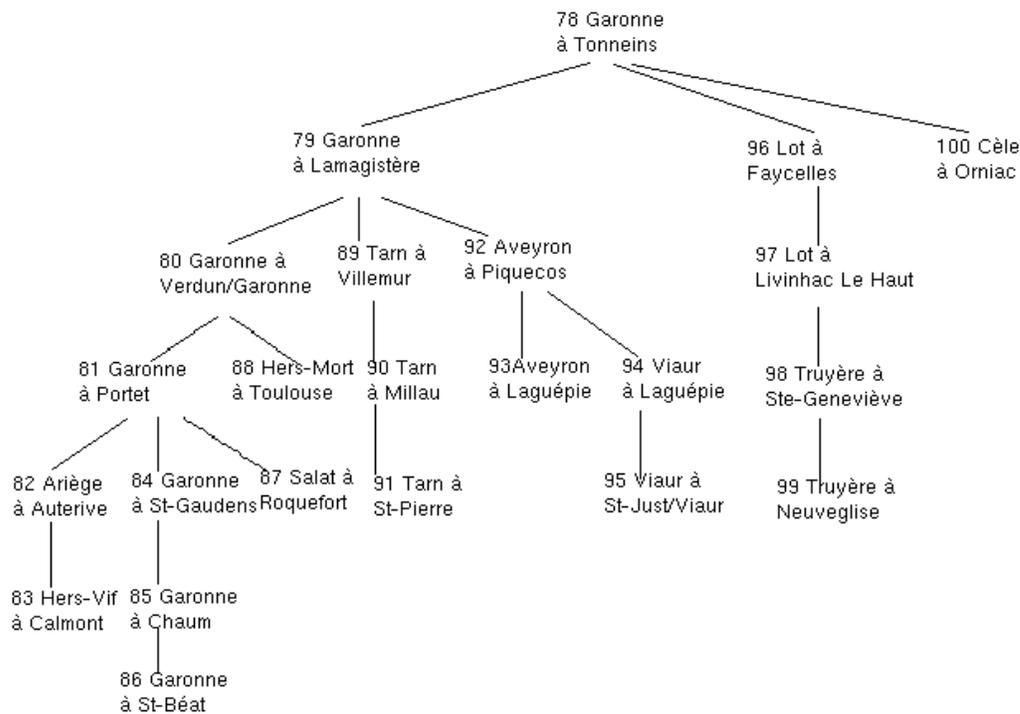


FIGURE 5.10 – Arbre de la Garonne. Les numeros indiqués pour les stations sont les numeros des lignes correspondantes des matrices H , R , B , x , et y pour ces stations

Les numeros indiqués pour les stations sont les numeros des lignes correspondantes des matrices H , R , B , x , et y pour ces stations. Ainsi, il est évident que la Jacobienne sera triangulaire supérieure. En effet, une station donnée (par exemple la Garonne à Tonneins, numero 78) ne sera influencée que par les sous-bassins avec des numeros plus élevés (ici de 78 à 100).

On a représenté (figure 5.11) une Jacobienne :

On observe bien une matrice triangulaire supérieure. On a isolé les quatre plus grands bassins français assimilés (c'est-à-dire ceux dont on va assimiler le plus grand nombre de stations) par le biais de cadres, à savoir la Loire, la Seine, la Garonne, et la Saône. Il est remarquable d'observer que dans le cas de la Seine, les valeurs sont les plus faibles. Ceci s'explique par le fait que la valeur de l'humidité du sol a ici une influence sur les débits plus faible qu'ailleurs, à cause de la présence de nappes souterraines dans MODCOU. C'est aussi le cas pour les bassins de l'Eure et de l'Oise (non-encadrés ici).

Pour bien comprendre ce que cette matrice représente, prenons le cas de la Garonne. On peut observer une ligne horizontale. Celle-ci correspond à la Garonne à Tonneins (station 78).

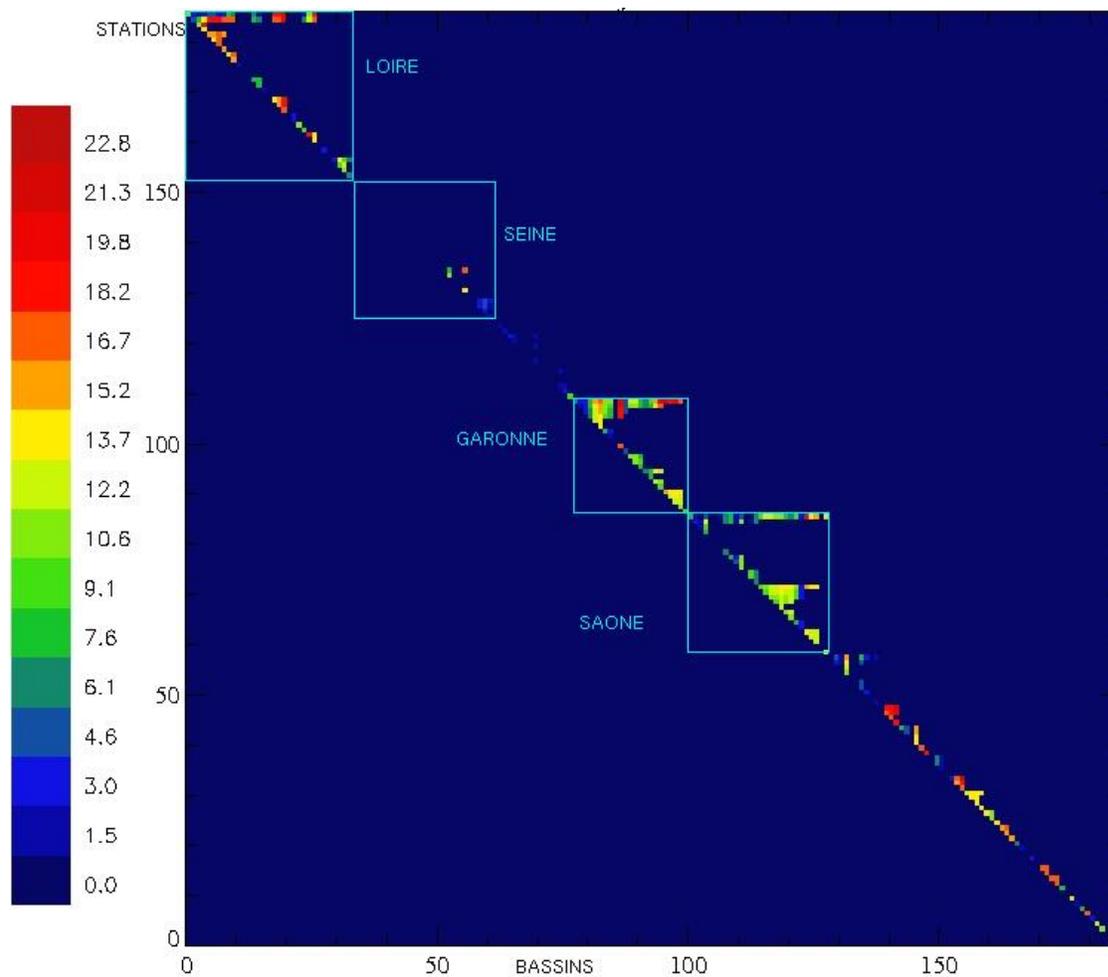


FIGURE 5.11 – Une Jacobienne (en $(m^3/s)/(m^3/m^3)$) pour une variable de contrôle définie selon l'équation 5.30, et dans le cas d'une fenêtre d'assimilation d'un jour. Chaque ligne correspond à une station, et chaque colonne correspond à un sous-bassin. Les quatre plus grands bassins au nombre de stations assimilées sont situés par des cadres.

Les valeurs sur cette ligne (qui correspondent aux colonnes 78 à 100) signifient que cette station est influencée par l'humidité du sol de tous les sous-bassins situés en amont, d'une manière plus ou moins forte. On peut aussi voir se dessiner à l'intérieur de ce triangle, de plus petits triangles, qui sont définis par l'ordonnancement de l'arbre de la Garonne (on voit nettement trois petits groupes de pixels non nuls, qui représentent le Tarn (3 stations/pixels horizontaux), l'Aveyron/Viaur (4 stations) et le Lot/Truyère (4 stations)).

Enfin, cette structure en "blocs" disjointes de matrices triangulaires devient évidente à imaginer car une station sur la Loire ne dépendra jamais de l'humidité du sol d'un sous-bassin irriguant une station de la Garonne.

La taille de la Jacobienne est de 186 lignes par 186 colonnes pour une variable de contrôle définie selon les équations 5.30 ou 5.31, et dans le cas d'une fenêtre d'assimilation d'un jour. Si la fenêtre d'assimilation est longue de N jours, sa taille sera de $186 \times N$ lignes pour 186

colonnes (on superpose les occurrences successives des Jacobiennes).

Si la variable de contrôle est définie selon l'équation 5.32 (les deux couches du sol considérées séparément), la taille de la Jacobienne est de 186×2 lignes par 186×2 colonnes pour une fenêtre d'assimilation d'un jour ; en fait cela revient à prolonger en diagonale la matrice par une seconde matrice traitant de la couche 3.

5.3.3 Méthodologie de l'estimation de la Jacobienne H

Comme on l'a dit précédemment, la Jacobienne peut être déterminée en réalisant des simulations dites "perturbées" de SIM. C'est-à-dire que l'on va comparer les débits d'une simulation de référence de SIM, avec les débits résultant d'une simulation initialisée par une humidité légèrement perturbée (la perturbation doit être faible afin de respecter l'hypothèse de linéarité). On peut donc réécrire l'équation 5.36 de la manière suivante :

$$H_{i,j} = \frac{\Delta y_i}{\Delta x_j} = \frac{y_{i,pert} - y_{i,ref}}{x_{j,pert} - x_{j,ref}} \quad (5.37)$$

Cependant, plusieurs simulations perturbées de SIM sont nécessaires. En effet, si l'on compare une simulation de référence avec une simulation dont l'humidité des 186 sous-bassins est perturbée, toute la matrice **H** ne pourra pas être déterminée.

Reprenons l'exemple de la Garonne (figure 5.10). Si l'humidité de tous les sous-bassins du bassin de la Garonne est perturbée, on pourra bien déterminer la dépendance du débit de l'Hers-Vif à Calmont par rapport à l'humidité de son propre sous-bassin ($H_{83,83}$), la dépendance du débit de la Garonne à Saint-Béat par rapport à l'humidité de son propre sous-bassin ($H_{86,86}$), la dépendance du débit du Salat à Roquefort par rapport à l'humidité de son propre sous-bassin ($H_{87,87}$) et ainsi de suite. En revanche, il sera impossible de différencier la dépendance du débit de la Garonne à Tonneins par rapport à l'humidité des sous-bassins de la Garonne à Lamagistère et du Lot à Faycelles, ou même par rapport à l'humidité de son propre sous-bassin. En effet, celles-ci seront confondues car tout le bassin sera perturbé en même temps.

C'est pourquoi à l'intérieur d'un même grand bassin (Loire, Garonne, ...) il est indispensable de réaliser les perturbations des humidités des sous-bassins de manière séparée. Ainsi, cette méthode est la seule permettant de déterminer tous les coefficients non nuls de la Jacobienne par le biais de perturbations.

Détermination de la Jacobienne : exemple :

Intéressons-nous à un exemple théorique simple, afin de détailler la méthode de détermination de la Jacobienne. On s'intéresse à un bassin simple qui comprend trois sous-bassins, soit au total trois stations (figure 5.12). Si on considère le cas où l'assimilation ne prend pas en compte de manière séparée les humidités des couches 2 et 3 du sol (équations 5.30 et 5.31 uniquement), la matrice est de forme 3×3 (figure 5.13).

On va devoir perturber séparément l'humidité de chacun des sous-bassins afin de déterminer tous les termes de la Jacobienne (en partant à chaque fois du même état initial). Dans un premier temps, on réalise une simulation non-perturbée de SIM. Ensuite, on perturbe le sous-bassin 1 (zone colorée, figure 5.14). Cette perturbation ne va entraîner aucun changement du débit des stations 2 et 3, leurs sous-bassins versants respectifs étant disjoints du sous-bassin

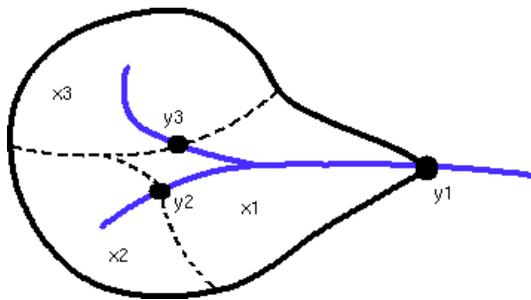


FIGURE 5.12 – Schéma d'un bassin simple qui comprend trois stations

$$H = \begin{pmatrix} ? & ? & ? \\ ? & ? & ? \\ ? & ? & ? \end{pmatrix}$$

FIGURE 5.13 – Matrice Jacobienne associée

1. Les termes $H_{2,1}$ et $H_{3,1}$ sont donc nuls (figure 5.15). En revanche, le terme $H_{1,1}$ comprend logiquement la réponse Δy_1 de la station 1 à une perturbation Δx_1 de l'humidité du sol du sous-bassin 1.

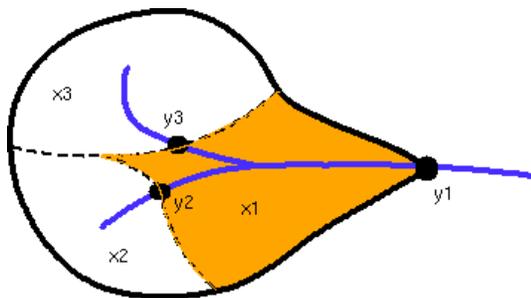


FIGURE 5.14 – Ici l'humidité du sous-bassin 1 est perturbée

$$H = \begin{pmatrix} \frac{\Delta y_1}{\Delta x_1} & ? & ? \\ 0 & ? & ? \\ 0 & ? & ? \end{pmatrix}$$

FIGURE 5.15 – Matrice Jacobienne associée

Ensuite, on perturbe l'humidité du sol du sous-bassin 2 (figure 5.16). Cette perturbation n'a évidemment aucun effet sur le débit de la station 3, donc $H_{3,2} = 0$. En revanche, elle a un effet sur les débits des stations 1 et 2, qui se situent en aval du bassin 2, ce qui donne les valeurs des deux derniers coefficients de cette colonne (figure 5.17).

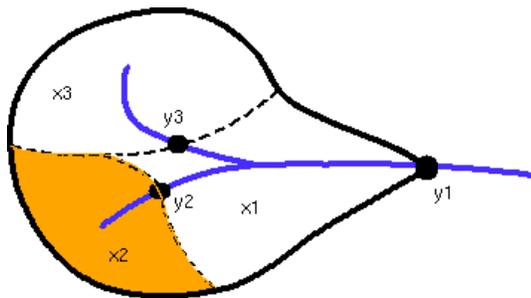


FIGURE 5.16 – Ici l'humidité du sous-bassin 2 est perturbée

$$H = \begin{pmatrix} \frac{\Delta y_1}{\Delta x_1} & \frac{\Delta y_1}{\Delta x_2} & ? \\ 0 & \frac{\Delta y_2}{\Delta x_2} & ? \\ 0 & 0 & ? \end{pmatrix}$$

FIGURE 5.17 – Matrice Jacobienne associée

Enfin, l'humidité du sol du dernier sous-bassin (3) est perturbée (figure 5.18). Dans ce cas-ci, la perturbation va se répercuter sur les débits des stations 1 et 3, mais le débit de la station

2 restera inchangée. La matrice Jacobienne est ainsi totalement déterminée comme le montre la figure 5.19.

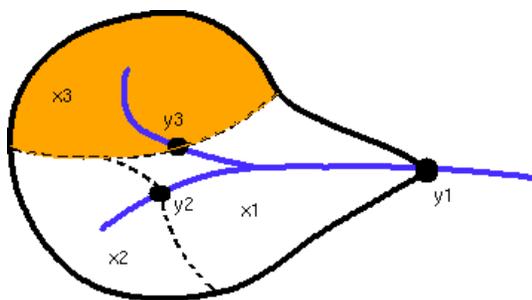


FIGURE 5.18 – Ici l'humidité du sous-bassin 3 est perturbée

$$H = \begin{pmatrix} \frac{\Delta y_1}{\Delta x_1} & \frac{\Delta y_1}{\Delta x_2} & \frac{\Delta y_1}{\Delta x_3} \\ 0 & \frac{\Delta y_2}{\Delta x_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta y_3}{\Delta x_3} \end{pmatrix}$$

FIGURE 5.19 – Matrice Jacobienne associée

Pour déterminer entièrement les coefficients de la matrice Jacobienne pour un ensemble de stations liées, il faut donc effectuer autant de simulations perturbées qu'il y a de sous-bassins.

Cependant, il est tout à fait possible de calculer les coefficients de la Jacobienne en parallèle pour des ensembles de stations liées, disjoints entre eux. En effet, perturber l'humidité sur le bassin de la Loire n'aura pas de conséquence sur le débit de la Garonne. Ainsi, c'est l'ensemble de stations liées comportant le plus grand nombre de sous-bassins qui déterminera le nombre maximum de simulations perturbées à faire. Ici, c'est la Loire, avec 34 stations (ou sous-bassins), qui en comporte le plus.

Pour déterminer complètement la matrice Jacobienne H , il faudra ainsi 35 simulations de SIM différentes (une simulation de référence + 34 simulations perturbées).

Choix de l'amplitude de la perturbation de l'eau du sol appliquée - Tests de sensibilité

Le choix de l'amplitude de la perturbation de l'eau du sol appliquée est une étape importante de la mise en place du système d'assimilation des débits. En effet, cette perturbation doit être assez forte pour avoir un impact sur les débits simulés, mais doit aussi respecter les hypothèses de linéarité émises par le BLUE. C'est pourquoi une étude préliminaire a été effectuée.

Tout d'abord, on a réalisé des tests sur l'amplitude de la perturbation, sur une maille unique ISBA pour des raisons de temps de calcul. Les variables étudiées sont ici le ruissellement et le drainage d'ISBA, qui sont les deux variables transmises à MODCOU pour le calcul des débits. La répercussion de modifications de l'humidité du sol d'ISBA sur le ruissellement et le drainage a été étudiée pour des perturbations variant sur la gamme 0-10% du contenu en eau du sol.

Comme on a pu le voir sur l'équation 5.27 définissant le drainage, celui-ci dépend linéairement de l'humidité de la couche 3 d'ISBA, excepté pour les sols très secs. En revanche, en ce qui concerne le ruissellement, plus la couche 2 du sol sera humide, plus une partie importante de la pluie se transformera en ruissellement (car de plus en plus de réservoirs élémentaires seront saturés). En effet, on a observé que pour des valeurs trop élevées (i.e. $> 2\%$), sur des sols très humides, le ruissellement augmentait de manière non-linéaire avec l'humidité. On a donc restreint nos perturbations à la gamme 0 – 2%, et plus précisément, on a regardé par la

suite des perturbations de 0.1 et 1%.

On s'est par la suite intéressé au signe de la perturbation à appliquer. Ici, on a utilisé SIM en entier sur la France. Le signe de la perturbation influence la manière donc SIM va répondre. En effet, en ajoutant de l'eau, on va favoriser le ruissellement, ce qui n'est pas le cas en retirant de l'eau du sol, et risque donc de créer des réponses non-linéaires. On a montré que pour la perturbation 1%, la réponse de l'ensemble ruissellement+drainage était de 30 à 40% plus élevée pour une perturbation positive, que pour une perturbation négative (figure 5.20). En revanche, pour la perturbation 0.1%, cette différence n'était que de 4%. Il est donc évident que la perturbation d'amplitude 0.1% est préférable.

On a représenté sur la figure 5.20 l'évolution de la valeur moyenne de la Jacobienne sur 5 jours, pour des perturbations de ± 0.1 et $\pm 1\%$ effectuées au début du premier jour. On peut voir une augmentation de la Jacobienne suite à la perturbation initiale, avec une valeur maximale autour du troisième jour, ce qui est dû à l'influence des temps de concentration des bassins de MODCOU. On remarque aussi que le signe de la perturbation a peu d'influence pour la perturbation la plus faible, montrant ici un régime de quasi-linéarité, ce qui n'est pas le cas pour la perturbation 1%.

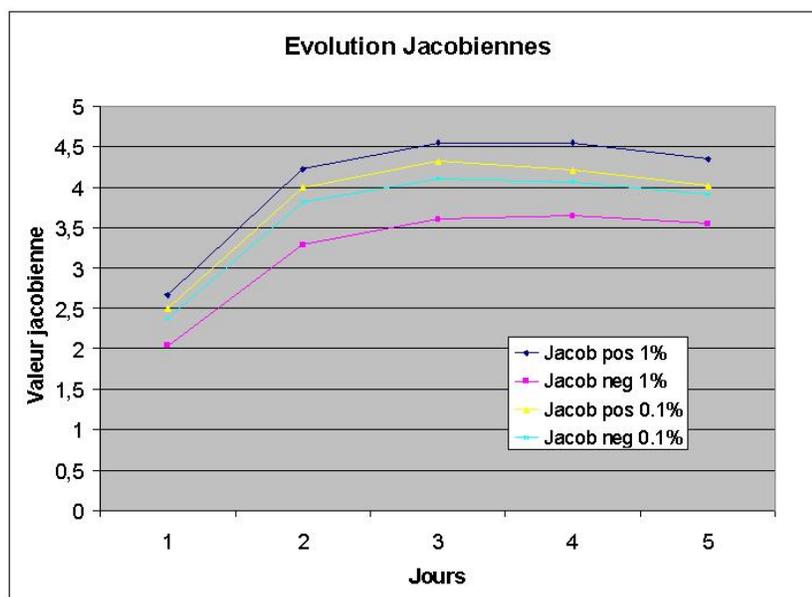


FIGURE 5.20 – Evolution de la valeur moyenne de la Jacobienne (en $(m^3/s)/(m^3/m^3)$) sur 5 jours, pour des perturbations de ± 0.1 et $\pm 1\%$ effectuées au début du premier jour.

Il a donc été décidé pour la suite de conserver cette valeur de 0.1% comme perturbation à appliquer au contenu en eau du sol d'ISBA afin de calculer la Jacobienne. On verra aussi que cette valeur est assez proche des incréments imposés par BLUE, dans le cas des assimilations d'observations réelles (voir l'article du chapitre suivant).

On a représenté sur la figure 5.21 l'évolution de la valeur moyenne de la jacobienne au cours de l'année, pour des perturbations de +0.1% et -0.1%, pour 5 jours consécutifs de simulations de SIM.

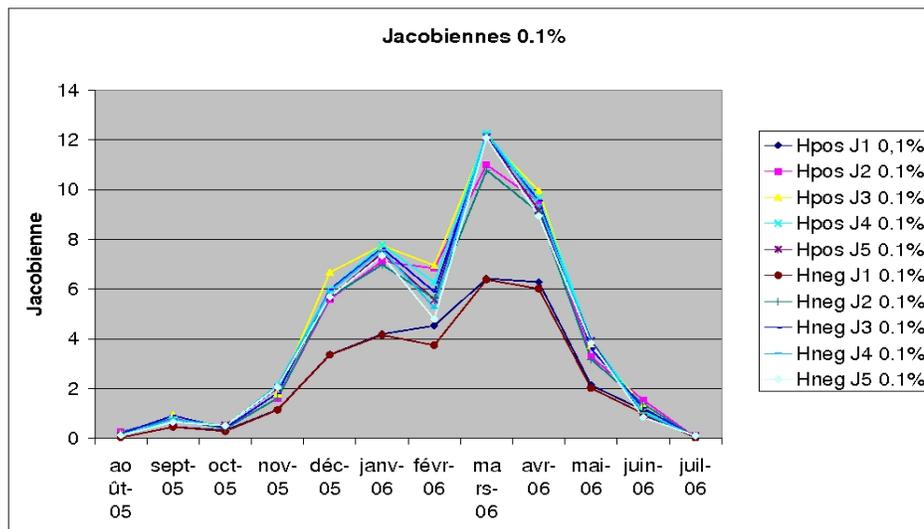


FIGURE 5.21 – Evolution de la valeur moyenne de la Jacobienne (en $(m^3/s)/(m^3/m^3)$) sur 5 jours au cours de l'année pour une perturbation de $\pm 0.1\%$. Une simulation a été réalisée chaque 15 du mois, puis les coefficients non nuls ont été moyennés.

On voit tout d'abord que la réponse des débits MODCOU par rapport à une modification de l'humidité du sol d'ISBA est indépendante du fait que l'on considère une perturbation positive ou négative, et ce tout au long de l'année. En effet, les courbes représentant l'évolution de la Jacobienne pour des perturbations opposées et correspondant au même jour, sont très proches.

De plus, on peut observer une forte augmentation de la Jacobienne au cours de l'hiver. En effet, le sol est alors plus humide, renforçant le phénomène de ruissellement. C'est pour cette raison qu'il a été décidé de recalculer la Jacobienne pour chaque assimilation dans la suite de ce travail.

5.3.4 L'algorithme

La figure 5.22 représente un schéma de l'assimilation des débits dans SIM :

On rappelle l'idée principale de l'assimilation, à savoir que BLUE va incrémenter une humidité du sol initiale x^b afin de déterminer la meilleure valeur possible x^a pour la simulation de débits.

- On réalise donc tout d'abord une simulation non perturbée de SIM à partir de cette humidité initiale x^b , afin de calculer l'évolution des débits $\mathcal{H}(x^b)$ sur la durée de la fenêtre d'assimilation ($[J-N, J-1]$).

- Ensuite, afin de déterminer la matrice Jacobienne, on effectue 34 simulations de SIM de N jours pour propager les différentes humidités du sol perturbées $x^b + \Delta x$ et donc calculer

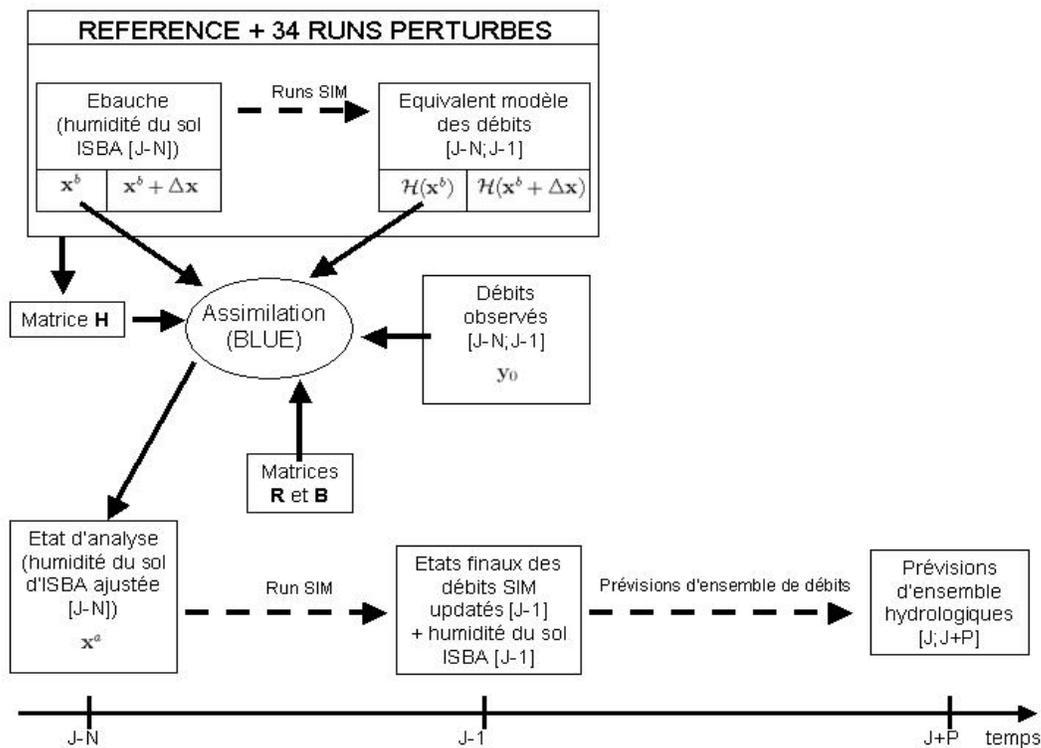


FIGURE 5.22 – Schéma de principe de l'assimilation des débits dans SIM

les débits perturbés $\mathcal{H}(x^b + \Delta x)$. Ces humidités et débits, perturbés et non-perturbés, servent à déterminer entièrement la Jacobienne.

- En utilisant les données précédemment citées ainsi que les observations de débits de la période $[J-N, J-1]$ et les matrices **B** (prise constante) et **R** (recalculée à chaque assimilation), le BLUE peut déterminer l'état d'analyse x^a .

- On utilise cet état d'analyse sur la fenêtre d'assimilation $[J-N, J-1]$ pour une simulation avec SIM. Cet état d'analyse est optimal, au sens où c'est l'état initial (i.e. à la date $J-N$) qui permet la meilleure simulation possible des débits sur l'ensemble de la période $[J-N, J-1]$.

- Enfin, les états finaux d'une simulation de SIM sur cette période (c'est-à-dire les contenus en eau du sol, des rivières, et les débits, au jour J à 0000 UTC) seront utilisés afin d'initialiser les prévisions d'ensemble de débits SIM/PEARP et SIM/CEPMMT.

5.4 Implémentation dans PALM

PALM (Parallel Assimilation with a Lot of Modularity (*Fouilloux and Piacentini (1999), Buis et al. (2006)*)) est un coupleur dynamique de codes de calculs, développé par le CERFACS (Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique) dans l'équipe Global Change. PALM a été initialement créé afin de mettre en place une assimilation de données de manière couplée dans le cadre du projet d'océanographie opérationnelle MERCATOR (*Brasseur et al. (2005)*).

PALM est actuellement utilisé en chimie atmosphérique, dans le domaine du nucléaire et en océanographie notamment. De plus amples renseignements sur PALM sont disponibles sur

le site du CERFACS à l'adresse suivante : http://www.cerfacs.fr/globc/PALM_WEB/index.html et des fiches remplies par les différents utilisateurs de PALM sont données à l'adresse suivante : http://www.cerfacs.fr/globc/PALM_WEB/FR/APPLICATIONS/index.html.

J'ai été amené au cours de ma thèse à participer à deux formations PALM dispensées par le CERFACS afin de maîtriser les rudiments de ce logiciel : une formation générale sur PALM donnée par T. Morel, et une formation spécifique à l'assimilation de données dans PALM (dispensée par B. Bouriquet et S. Massart).

Les versions de PALM et PrePALM (c'est-à-dire l'interface de PALM) utilisées au cours de cette thèse sont : PrePALM_MP 2.4.0 et PALM_MP 2.4.0, PrePALM_MP 2.5.1 et PALM_MP 2.5.1.

5.4.1 Le logiciel PALM

Principes généraux

PALM est un coupleur dynamique de codes de calculs, c'est-à-dire qu'il permet le couplage parallèle de différents modèles, tout en autorisant ces modèles à être démarrés quand cela est nécessaire. Ainsi, il n'est pas obligatoire que chacun des modèles démarre au lancement de l'application, permettant ainsi la libération (ou plus précisément la non-utilisation) de ressources mémoire et CPU inutiles. PALM va gérer l'agencement des tâches de l'algorithme implémenté, et va aussi gérer les échanges entre modèles.

La base d'une application PALM est constituée par une ou plusieurs branches. Celle(s)-ci représente(nt) l'algorithme de l'application construite dans PALM. On y trouve principalement les éléments classiques d'un algorithme, à savoir des boucles (*while*, *do*), des conditions (*if*, *then*, *else*), des instructions en code fortran 90, mais aussi des unités et des communications entre ces unités (voir ci-dessous).

Les unités sont en fait les programmes ou modèles utilisés pour l'application. Ils doivent être codés en fortran 90 ou 77, en C ou en C++, qui sont les langages supportés par PALM. La seule différence avec les modèles non *PALMés* (i.e. les programmes initiaux) est la présence d'une carte d'identité permettant à PALM d'identifier le programme. Cette carte d'identité va permettre de définir les types et les dimensions des objets à échanger. De plus, on notera la présence de *Palm_Get* et *Palm_Put* permettant respectivement la réception et la mise à disposition d'objets à échanger avec d'autres éléments de l'application aux endroits du code opportuns. Ces deux éléments sont à placer à l'intérieur du programme, à l'endroit-même où les échanges sont désirés.

La gestion des communications est un atout important de PALM. On appelle communication l'échange entre deux unités, entre deux branches ou bien entre une branche et une unité, d'une donnée (entier, réel, matrice, chaîne de caractères, etc...) définie au préalable dans PALM à un temps ou/et avec un TAG donné(s). L'échange est géré par PALM. On peut noter qu'il existe différents types de communications : directe (qui va directement d'un *Palm_Put* à un *Palm_Get*) ou indirecte (qui est stockée temporairement ou indéfiniment dans un Buffer). Le Buffer permet l'utilisation de la donnée qui y est stockée à n'importe quel moment, ainsi que des opérations sur une donnée créée à des pas de temps différents au cours du déroulement

de l'application (interpolation, somme), et peut-être vidé simplement au cours de l'application.

L'interface utilisateurs PrePALM

PALM est doté d'une interface appelée PrePALM qui permet la construction des applications PALM souvent complexes, de manière assez simple. C'est ici qu'on va créer les branches, les algorithmes qu'elles contiennent, et inclure les unités. Les communications seront créées de manière intuitive en reliant manuellement les Palm_Puts et les Palm_Gets matérialisés par des petits plots.

C'est aussi par cette interface que l'on va créer l'exécutable nécessaire au lancement de l'application.

Les plus de PALM

PALM comprend dans son interface PrePALM un visualisateur en temps réel de l'état d'avancement de l'application qui permet de voir où en est l'application, et combien de fois on est passé dans telle ou telle unité. On peut aussi visualiser l'évolution de l'occupation de la mémoire.

PALM est doté d'outils de post-processing utiles afin d'optimiser l'application ou de la déboguer si besoin est.

Il est aussi important de noter que PALM peut gérer seul du calcul multi-processeurs. Par exemple, une simulation simple de SIM qui mettait 11H de temps réel à s'effectuer sur un PC local dual-core peut être effectuée en 7H uniquement en isolant dans une seconde branche la partie MODCOU de la partie ISBA. Et cela sans que l'utilisateur n'ait la moindre connaissance en calcul parallèle multi-processeurs. La technologie utilisée par PALM pour la gestion du calcul parallèle est le MPI-1 et MPI-2.

De plus, PALM est utilisable sur le super-calculateur NEC de Météo-France, ce qui est indispensable dans le cas de calculs aussi coûteux que l'assimilation de données, et a permis de réaliser des simulations plus longues et plus variées pour la suite de cette thèse.

Enfin, PALM inclut les bibliothèques de calcul algébrique et analytique BLAS (Basic Linear Algebra Subprograms), permettant ainsi de ne pas avoir à coder des opérations matricielles, des recherches de valeurs propres, des minimiseurs, des interpolateurs, des inversions de matrices, et des solveurs d'équations linéaires.

5.4.2 Description de l'application dans PALM de l'assimilation des débits dans SIM

La figure 5.23 présente l'application de l'assimilation des débits dans SIM telle qu'elle a été définie dans PrePALM.

L'application se découpe en deux étapes successives (les unités sont décrites dans l'ordre chronologique de leur utilisation par l'application) :

Etape 1 : l'assimilation sur une fenêtre [J-N,J-1] :

L'unité *isba_init* va lire les fichiers d'initialisation d'ISBA à l'échéance voulue.

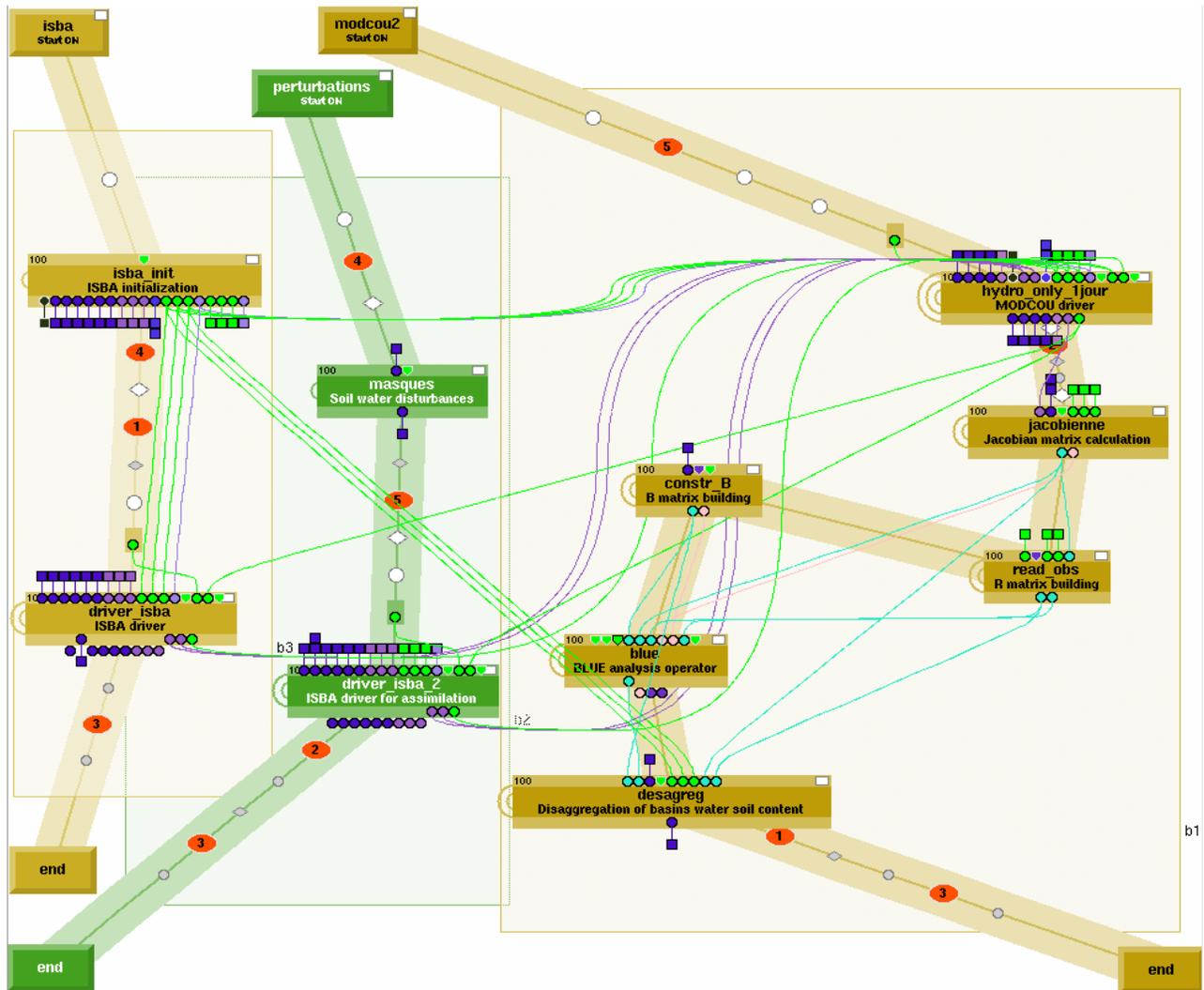


FIGURE 5.23 – Aperçu de l’application PrePALM conçue pour l’assimilation des débits dans SIM.

L’unité *masques* est utilisée afin de définir les cartes d’humidité du sol ISBA nécessaires aux simulations perturbées de SIM pour le calcul de la Jacobienne. Ici, les humidités du sol des sous-bassins assimilés sont modifiées de manière adéquate et mises à disposition dans le buffer pour être utilisées lors des simulations perturbées successives de SIM.

L’unité *driver_isba_2* représente le modèle ISBA, et est utilisée dans le cadre du calcul de la matrice jacobienne, en parallèle avec l’unité *hydro_only_1jour* (modèle MODCOU). Ces deux unités vont produire les débits perturbés, ainsi que l’occurrence non-perturbée des débits. Ces deux unités sont itérées 34+1 fois, afin de mettre à disposition les données nécessaires au calcul de la Jacobienne.

L’unité *jacobienne* utilise les débits perturbés de SIM ainsi que l’occurrence des débits non-perturbés, en association avec les états initiaux de l’humidité du sol ISBA correspondant, afin de calculer la jacobienne. De plus, cette unité met à disposition les débits simulés au format adéquat pour son utilisation dans l’opérateur d’analyse du BLUE.

L'unité *read_obs* va lire les observations de débits sur la fenêtre d'assimilation. Ainsi, cette unité va mettre à disposition ces débits observés et la matrice de covariance d'erreurs d'observations.

L'unité *constr_B* va lire le fichier définissant la matrice de covariance d'erreurs d'ébauche pour la mettre à disposition de l'algorithme. De plus, cette unité agrège l'ébauche de l'humidité du sol de la dimension d'ISBA (9892 mailles) vers la dimension du problème d'assimilation (186 valeurs), selon la définition choisie pour la variable de contrôle.

L'unité *blue* utilise toutes les variables qui lui sont nécessaires afin de produire l'état analysé de l'humidité du sol.

L'unité *desagreg* va utiliser cet état analysé pour le désagréger de la dimension des variables d'assimilation (186 valeurs) vers la grille ISBA (9892 mailles). Cette désagrégation est réalisée en comparant l'état analysé avec l'état ébauche (de dimension 186). On obtient ainsi un rapport pour chaque sous-bassin qui est appliqué respectivement sur l'humidité de chacune des mailles ISBA de manière uniforme sur un même sous-bassin.

Etape 2 : construction de l'état assimilé :

L'unité *driver_isba*, initialisée par l'état analysé ainsi déterminé, et l'unité *hydro_only_1jour*, vont produire les débits dits assimilés sur la fenêtre d'assimilation. L'eau en rivière à la fin de la dernière journée de cette fenêtre d'assimilation servira, associée à l'humidité du sol finale correspondante, et aux hauteurs des nappes finales, à initialiser les prévisions d'ensemble de débits.

5.5 Conclusion

L'objectif de cette partie de ma thèse était de mettre en place une assimilation des débits dans SIM, afin d'améliorer les simulations de débits. On a vu dans ce chapitre la méthode mise en œuvre afin de construire ce système, qui sera validé dans le chapitre suivant.

L'opérateur d'analyse choisi est le Best Linear Unbiased Estimator (BLUE), car il permet de calculer la solution exacte de la matrice de gain résolvant l'équation d'analyse, et reste peu coûteux du fait des petites dimensions du problème. Cependant, le BLUE repose sur des hypothèses de linéarité du modèle, qui ne sont pas forcément respectées par SIM. L'utilisation d'une boucle externe (c'est-à-dire calculer une nouvelle fois la matrice Jacobienne, mais cette fois-ci autour de l'état d'analyse, et l'utiliser afin d'incrémenter à nouveau l'ébauche) pourrait prendre en compte ces non-linéarités.

La méthodologie choisie pour le système d'assimilation a été d'utiliser des observations de débits sur des stations simulées par SIM afin d'améliorer ses débits simulés. La variable à ajuster choisie est l'humidité du sol dans ISBA, mais pourra par la suite être étendue à d'autres variables (par exemple les hauteurs de nappes). La définition de la variable de contrôle basée sur l'humidité du sol a été testée de trois manières différentes : en moyennant les humidités des deux couches d'ISBA, en ne prenant en compte que l'humidité de la couche racinaire, ou en différenciant les humidités des deux couches du sol. Ensuite, les humidités de chacune des mailles des sous-bassins considérés sont sommées.

La définition des erreurs commises sur les observations de débits et sur l'humidité du sol dans ISBA reste très sommaire. Il est raisonnable de penser que de chercher une estimation

plus précise de ces erreurs améliorerait la performance du système d'assimilation.

Enfin, la définition des stations assimilées pourrait être revue afin d'optimiser le temps de calcul. En effet, c'est le nombre maximal de sous-bassins des bassins qui impose le nombre de simulations perturbées de SIM à faire afin de déterminer la matrice Jacobienne. Ainsi, en définissant des bassins plus petits (i.e. avec moins de sous-bassins), on diminuerait significativement le nombre d'itérations à réaliser.

Grâce à l'utilisation du coupleur dynamique de codes de calcul PALM du CERFACS, nous avons pu mettre en place une maquette du système. Cette maquette est très modulable, ce qui permettra dans le futur de faciliter les tests et améliorations à implémenter. Elle utilise au mieux les capacités du super-calculateur de Météo-France, en permettant de réaliser du calcul en parallèle de manière très simple.

La validation du système d'assimilation des débits dans SIM, ainsi que la quantification de l'impact des états initiaux assimilés sur les prévisions d'ensemble de débits sont l'objet des deux chapitres suivants.

Chapitre 6

Apport de l'assimilation dans SIM analyse

Introduction

On a pu voir dans le chapitre précédent, comment a été envisagée la mise en œuvre du système d'assimilation des débits dans SIM.

Le présent chapitre a pour objet de présenter l'article soumis à Hydrology and Earth System Sciences (*Thirel et al. (2010a)*), et qui traite à la fois de la description du système d'assimilation des débits dans SIM, et de son impact sur les simulations de débits de SIM-analyse.

6.1 Résumé de l'article

Le but du travail présenté dans cet article, est de mettre en place et valider un système d'assimilation des débits dans SIM, afin d'améliorer les états initiaux des chaînes de prévisions d'ensemble des débits basées sur SIM.

En effet, deux chaînes, utilisant la PEARP de Météo-France et l'EPS du CEPMMT, ont été implémentées à Météo-France en utilisant SIM comme modèle hydro-météorologique. On obtient ainsi des ensembles de débits à, respectivement, 60 heures et 10 jours d'échéance. Cependant, ces chaînes, ainsi que la chaîne SIM-analyse qui l'initialise, ne sont jamais recalées par le biais d'observations quelconques. C'est pourquoi, dans le but d'améliorer ces systèmes, un système d'assimilation de données a été mis en place.

Les deux systèmes de prévisions d'ensemble des débits, que l'on va appeler respectivement SIM-PEARP et SIM-CEPMMT par la suite, sont composés de deux parties successives. Tout d'abord, la chaîne SIM-analyse, c'est-à-dire utilisant les observations de pluies données par l'analyse SAFRAN, tourne chaque jour. Les états finaux quotidiens de cette chaîne, à la fois concernant les états d'ISBA (température, humidité du sol, etc...) et de MODCOU (eau dans les rivières et dans les nappes) sont utilisés pour initialiser les chaînes ensemblistes. Celles-ci, en effet, utilisent pour chaque jour de prévision, les états finaux de la simulation de la chaîne SIM-analyse de la veille.

Ainsi, le but de l'assimilation des données va être d'améliorer les états finaux quotidiens de la chaîne SIM-analyse pour fournir les états initiaux optimaux aux prévisions ensemblistes de débits. Concrètement, on va utiliser des données observées de débits journaliers sur un certain nombre de stations simulées par SIM, et ajuster en conséquence l'humidité de leurs sous-bassins respectifs. Le but de l'assimilation dans notre cas n'est pas d'améliorer l'humidité du sol, mais les débits qui en résultent.

Le Meilleur Estimateur Linéaire Non-biaisé (BLUE, Best Linear Unbiased Estimator) a été utilisé, afin de déterminer les états de l'humidité du sol optimaux pour les simulations de débits. L'implémentation du système a été réalisée grâce au coupleur de codes de calcul PALM du CERFACS.

Les détails techniques du système d'assimilation des débits ont été donnés dans le chapitre précédent, seuls les principaux aspects seront donc rappelés dans ce résumé.

186 stations ont été utilisées pour les observations de débits, ainsi que pour définir les variables de contrôle du système (i.e. une seule humidité du sol par station de débits assimilée, et vice-versa).

Trois différentes manières de prendre en compte l'humidité dans le sol ont été testées dans ce travail : la première utilise une moyenne pondérée des humidités des deux couches du sol importantes pour l'hydrologie dans ISBA (couches 2 et 3), la seconde ne prend en compte que la couche 2, et enfin la dernière méthode a été de prendre en compte ces deux humidités du sol de manière séparée. De plus, pour chacune de ces trois méthodes, l'utilisation d'une amélioration de la physique d'ISBA (profil exponentiel de la conductivité hydraulique dans le sol) a été testée. On a donc un total de six expériences différentes. Ces humidités du sol ont été sommées sur chacun des sous-bassins particuliers des stations assimilées afin de constituer la variable de contrôle du système.

Si les matrices de covariance d'erreur d'observations \mathbf{R} et d'ébauche \mathbf{B} ont été estimées grossièrement, en revanche la matrice Jacobienne \mathbf{H} est déterminée grâce à des différences finies. Des petites perturbations appliquées sur l'humidité du sol autour de l'ébauche au début de chaque fenêtre d'assimilation, permettent de déduire la dépendance des débits MODCOU par rapport à l'humidité du sol d'ISBA.

Tout d'abord, des expériences jumelles (c'est-à-dire utilisant des observations synthétiques) ont été réalisées en perturbant fortement l'humidité du sol d'ISBA au début de la période étudiée. Une assimilation des débits (ici ce sont les débits de SIM-analyse sans perturbation de l'humidité initiale qui sont utilisés) a été réalisée tous les 5 jours sur une période d'un mois, en utilisant la moyenne des humidités des deux couches du sol, et sans le profil exponentiel de la conductivité hydraulique dans le sol. Cette assimilation a montré qu'elle permettait un retour beaucoup plus rapide des débits vers les "observations synthétiques" que dans le cas où on n'utilise pas d'assimilation de débits.

Ensuite, des observations réelles de débits ont été utilisées pour les six expériences définies plus haut, et la fréquence de l'assimilation est devenue quotidienne sur une période de 19 mois environ. Ces six expériences ont montré une diminution significative du Ratio-rmse, une amélioration du Nash, et une légère diminution du Ratio-biais. L'expérience utilisant une moyenne des humidités du sol, ainsi que le profil exponentiel de la conductivité hydraulique (appelée IS_2 (Initial States) dans l'article, ou EI_2 en français (Etats Initiaux)), donne les meilleurs résultats globaux concernant ces trois critères. De plus, les incréments de BLUE pour cette expérience sont les plus faibles des six expériences, ce qui a l'avantage de peu perturber les différents flux d'ISBA. Cette meilleure performance de l'expérience IS_2 a été confirmée par l'étude des scores sur 49 stations indépendantes. On a aussi pu voir que l'assimilation des débits est plus efficace et plus réactive l'hiver, c'est-à-dire lorsque le sol est très humide, que l'été, où son impact est très faible du fait de la sécheresse du sol. En effet, sur sol sec, les débits sont principalement issus d'une éventuelle nappe ou bien du *wdrain*. Enfin, on a observé que l'apport d'itérations du BLUE était très faible, ce qui montre que la linéarité de SIM est globalement très bien respectée par l'assimilation. L'expérience EI_2 sera retenue par la suite pour initialiser les prévisions d'ensemble, car c'est elle qui permettra les meilleures prévisions d'ensemble de débits.

6.2 Article soumis a Hydrology and Earth System Sciences

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

6.3 Conclusion

Nous avons pu voir, dans ce chapitre, un résumé de la méthode mise en œuvre pour l'assimilation des débits dans SIM, ainsi que la validation de cette assimilation pour six expériences différentes. Ces résultats sont présentés dans l'article soumis à Hydrology and Earth System Sciences (*Thirel et al. (2010a)*).

Nous ne reviendrons pas en détail sur la mise en œuvre de l'assimilation des débits dans cette conclusion, car c'était l'objet du chapitre précédent.

La validation a porté sur un ensemble de 148 stations sur le total de 186 stations assimilées, les stations où les observations de débits étaient trop rares, et celles pour lesquelles l'assimilation n'avait pas eu l'effet escompté, ayant été exclues ici (présence de la simulation des nappes dans MODCOU, l'humidité du sol ne régit alors plus principalement les simulations de débits). Cette validation a montré que l'assimilation améliorait significativement les simulations de débits pour les six expériences considérées (voir tableau 2 de l'article *Thirel et al. (2010a)*). En effet, on a pu observer une amélioration du critère de Nash pour chacune d'entre elles, ainsi qu'une diminution du Ratio-biais et du Ratio-rmse. De plus, l'utilisation du profil exponentiel de la conductivité hydraulique dans le sol a pour effet, du fait de l'amélioration de la physique qu'elle représente, de diminuer l'amplitude des incréments donnés par BLUE. L'utilisation par la suite de cette physique pour les prévisions d'ensemble de débits semble donc d'autant plus s'imposer, qu'elle fera perdurer plus longtemps les effets bénéfiques de l'assimilation des débits.

La meilleure configuration de l'assimilation est celle combinant l'inclusion du profil exponentiel et une variable d'état moyennant les humidités des couches 2 et 3 du sol. Cette configuration possède à la fois des scores parmi les meilleurs des six expériences, et les incréments imposés par BLUE les plus faibles. En effet, l'utilisation de cette même variable d'état, mais sans le profil exponentiel, est moins efficace. Si on ne considère que la couche 2 seule, l'assimilation n'est pas forcément plus efficace, et les incréments sont beaucoup plus élevés. Enfin, l'ajustement séparé des humidités des deux couches ne semble pas apporter les améliorations attendues. Ces conclusions ont été confirmées par l'étude des scores sur un ensemble de 49 stations indépendantes.

Cependant, on a pu remarquer la très faible efficacité de l'assimilation en ce qui concerne les bassins où une nappe aquifère est simulée dans MODCOU (par exemple pour le bassin de la Seine). En effet, dans cette application, il a été choisi d'influer sur l'humidité du sol dans ISBA afin d'améliorer les simulations de débits. Mais, pour les bassins avec une nappe simulée, cette nappe devient le facteur le plus important pour les simulations de débits. Ainsi, on peut penser que modifier les hauteurs piezométriques dans MODCOU apporterait les améliorations attendues pour ces bassins. L'assimilation de données piezométriques est en effet un des thèmes d'une thèse qui devrait avoir lieu à l'UMR Sisyphe/Mines ParisTech.

Des améliorations pourraient encore être apportées au système d'assimilation des débits dans SIM. En effet, par exemple, il a été choisi d'estimer grossièrement les matrices de covariance d'erreur d'observations \mathbf{R} et d'ébauche \mathbf{B} . Il semble qu'effectuer un calibrage par bassin (à la place d'un calibrage global comme effectué pour cette validation) de ces deux

matrices apporterait une amélioration des performances du système. Cela pourrait éviter un déséquilibre entre les erreurs d'ébauche et d'observations, qui peut être observé parfois, quand par exemple on considère une station en aval d'un grand bassin, mais dont le sous-bassin particulier est de petite taille. Pour ce genre de sous-bassin, l'erreur d'observation sera élevée (car d'autant plus élevée que le débit observé est important), mais l'erreur d'ébauche restera faible.

De plus, nous avons choisi d'utiliser BLUE, malgré des hypothèses de linéarité qui sont parfois difficiles à respecter (sur des sols très humides, ou pendant des crues soudaines). L'utilisation du BLUE de manière itérée a montré son faible impact et son coût élevé, cependant, d'autres opérateurs d'analyse pourraient être testés afin de déterminer s'ils sont plus efficaces. Par exemple, le filtre de Kalman d'ensemble a pour particularité d'estimer les termes de l'équation d'analyse grâce à des ensembles d'assimilation, et donc pourrait permettre de mieux prendre en compte certaines non-linéarités de SIM avec un coût réduit.

Chapitre 7

Apport de l'assimilation dans les prévisions d'ensemble hydrologiques

Introduction

Ce chapitre vise à quantifier l'apport du système d'assimilation des débits dans le système SIM, sur les prévisions d'ensemble des débits. En effet, le but de ce système d'assimilation est de rapprocher les prévisions d'ensemble hydrologiques de SIM des observations de débits en améliorant ses états initiaux, plus que d'améliorer la chaîne SIM-analyse en elle-même.

On a initialisé les différentes prévisions d'ensemble de débits SIM par les états résultant des versions EI_1 et EI_2 (resp. IS_1 et IS_2 dans *Thirel et al. (2010a)*) du système d'assimilation des débits, décrites dans l'article du chapitre précédent. La physique utilisée pour le système de prévision d'ensemble des débits (utilisation ou non du profil exponentiel) est cohérente avec la physique utilisée par le système d'assimilation pour chacune des simulations ensemblistes étudiées ici. C'est-à-dire que le système de prévisions d'ensemble initialisé par les états EI_1 n'utilise pas le profil exponentiel, alors que le système de prévisions d'ensemble initialisé par EI_2 l'utilise. Pour rappel, voici le tableau décrivant les 6 différentes expériences d'assimilation testées :

Expérience	Variable d'état	Profil exponentiel
EI_1	Eq. 5.30 : $w_2 + w_3$	Non
EI_2	Eq. 5.30 : $w_2 + w_3$	Oui
EI_3	Eq. 5.31 : w_2	Non
EI_4	Eq. 5.31 : w_2	Oui
EI_5	Eq. 5.32 : (w_2, w_3)	Non
EI_6	Eq. 5.32 : (w_2, w_3)	Oui

TABLE 7.1 – Définition des six différentes expériences évaluées pour l'assimilation d'observations réelles. EI signifie "Etats Initiaux".

Dans ce chapitre, on a choisi de s'intéresser à l'impact des états EI_1 et EI_2 . En effet, utiliser chacun des 6 jeux d'états initiaux aurait consommé trop de temps CPU et aurait demandé trop de travail d'interprétation des résultats. Les prévisions d'ensemble de débits SIM telles qu'elles sont à l'heure actuelle (en mode temps réel pour SIM-CEPMMT et en mode expérimental pour SIM-PEARP) n'utilisent ni assimilation, ni le profil exponentiel. L'expérience d'assimilation EI_2 ayant été désignée comme la meilleure des 6 expériences (cf *Thirel et al. (2010a)*), on a tout naturellement choisi de l'étudier ici. Cependant, elle contient à la fois l'assimilation des débits, et l'utilisation du profil exponentiel. C'est pourquoi il a aussi été décidé de quantifier l'impact des états EI_1 sur les prévisions de débits, c'est-à-dire l'impact d'une assimilation seule.

Tous les scores (exceptée la dispersion de l'ensemble) ont été calculés dans ce chapitre par rapport aux débits observés. De plus, ils sont présentés en moyenne sur l'ensemble des 148 stations assimilées considérées dans l'article du chapitre précédent. La période d'étude est une nouvelle fois la période allant du 11 mars 2005 au 30 septembre 2006.

Nous allons tout d'abord nous intéresser à l'impact de l'initialisation d'une chaîne SIM de simulations quotidiennes à 10 jours en utilisant l'analyse SAFRAN comme forçage météorologique.

Puis, nous regarderons l'influence de l'assimilation des débits sur les prévisions d'ensemble à 10 jours SIM-CEPMMT.

Enfin, nous comparerons sur leurs deux premiers jours d'échéance communs, les chaînes de prévisions d'ensemble de débits SIM-CEPMMT et SIM-PEARP, de manière similaire à ce qui a été réalisé dans *Thirel et al. (2008)*, mais en prenant comme référence cette fois-ci des observations de débits, et non plus des débits SIM-analyse.

7.1 Impact de l'assimilation des débits sur des simulations quotidiennes à 10 jours de SIM

Afin de quantifier la persistance sur la durée des apports des expériences EI_1 et EI_2 sur les simulations de débits, on a décidé de réaliser des "pseudo-prévisions" de SAFRAN-ISBA-MODCOU en utilisant l'analyse SAFRAN en forçage météorologique, avant de passer aux prévisions d'ensemble. Ainsi, chaque jour, des simulations de 10 jours de SIM ont été réalisées en utilisant les états initiaux des expériences EI_1 et EI_2 . La version de SIM utilisant les états EI_2 utilise le profil exponentiel de la conductivité hydraulique dans le sol, afin de s'harmoniser avec les états initiaux. La version de SIM utilisant les états EI_1 n'utilise pas ce profil exponentiel.

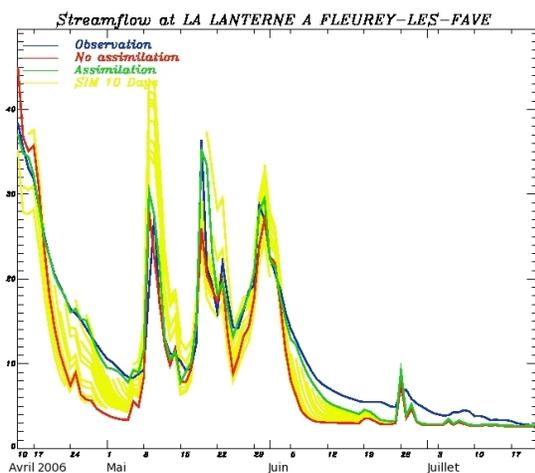


FIGURE 7.1 – Débits (en m^3s^{-1}) pour la Lanterne à Fleurey-les-Faverney pour l'expérience EI_2 d'avril à juillet 2006.

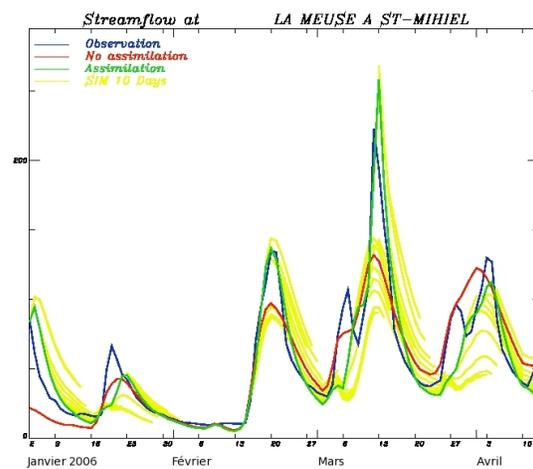


FIGURE 7.2 – Débits (en m^3s^{-1}) pour la Meuse à Saint-Mihiel pour l'expérience EI_2 de janvier 2006 à avril 2006.

Les figures 7.1 et 7.2 représentent les débits pour la Lanterne à Fleurey-Les-Faverney et la Meuse à Saint-Mihiel pour l'expérience EI_2 sur des périodes de 4 mois. En bleu se trouvent les débits observés, en rouge les débits sans assimilation mais avec le profil exponentiel de la conductivité hydraulique dans le sol, en vert les débits avec l'assimilation EI_2 . En jaune se trouvent les débits de 1 à 10 jours initialisés par cette expérience, c'est-à-dire que pour

chaque jour, une courbe jaune représentant 10 jours de "pseudo-prévisions" de SIM est tracée. Chaque courbe jaune commence donc 1 jour après la précédente, et se termine 10 jours plus tard, c'est-à-dire 1 jour après la précédente.

On remarque plusieurs choses sur ces deux figures. Tout d'abord, lors de périodes assez "monotones" (par exemple les deux décrues lentes de la Lanterne), les débits à 10 jours commencent à hauteur des débits assimilés, pour tendre vers les débits sans assimilation. Peu à peu, l'assimilation perd de son influence au cours de l'échéance.

Cependant, ce n'est pas toujours le cas. Par exemple, juste après des crues rapides, les fins d'échéance de quelques simulations semblent sur-estimer la décrue (comme c'est le cas pour la Meuse sur la figure 7.2). En effet, pour mieux simuler ces crues rapides sous-estimées, une certaine quantité d'eau a été ajoutée dans le sol, conduisant à un état adéquat pour le début de l'échéance, mais qui paraît trop humide pour la suite de la simulation.

Néanmoins, dans l'ensemble, l'amélioration semble très significative.

La figure 7.3 représente l'évolution du critère de Nash calculé par rapport aux observations de débits, pour SIM à 10 jours pour les expériences EI_1 et EI_2 en moyenne pour les 148 stations considérées.

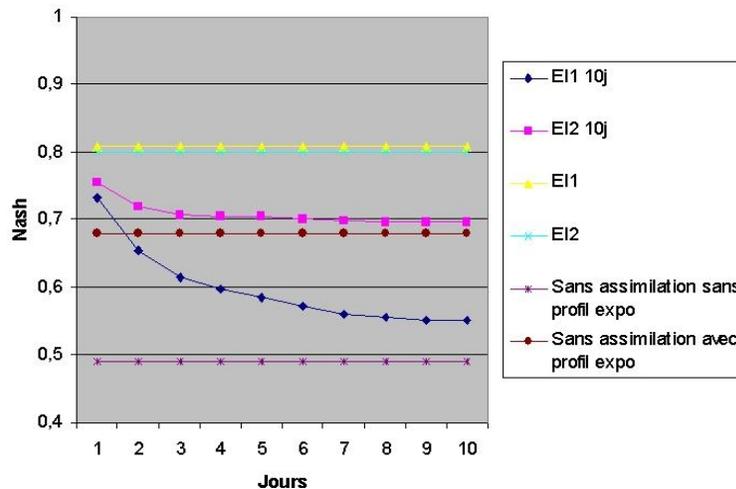


FIGURE 7.3 – Evolution du critère de Nash pour SIM de 1 à 10 jours en moyenne sur les 148 stations considérées.

Pour SIM initialisé par l'expérience EI_1 (courbe en bleu foncé), on peut voir que son critère de Nash est légèrement supérieur à 0.7 pour le premier jour d'échéance (valeur inférieure au score de 0.81 des débits assimilés EI_1 en eux-mêmes). Avec l'échéance, le score décroît jusqu'à 0.55 environ, mais reste encore meilleur que celui de la chaîne SIM-analyse opérationnelle à Météo-France qui se situe environ à 0.49 (c'est-à-dire sans assimilation et sans profil exponentiel de la conductivité hydraulique).

En ce qui concerne EI_2 , l'expérience SIM à 10 jours initialisée par cet état (courbe rose) a une valeur légèrement supérieure à SIM à 10 jours initialisée par EI_1 , mais est inférieure au score des débits assimilés. Cependant, à partir du second jour, la décroissance du score reste très faible. Le score avoisine en effet 0.7 à partir du troisième jour, et reste légèrement supérieur au score de SIM-analyse utilisant le profil exponentiel de la conductivité hydrau-

lique, mais pas l'assimilation des débits. De plus, cette courbe montre que le score de Nash pour SIM à 10 jours initialisée par EI_2 est largement supérieur au score de SIM à 10 jours initialisée par EI_1 . En effet, même si l'état initial est de qualité équivalente, l'amélioration de la physique apportée par le profil exponentiel permet de garder un apport du système par rapport à la chaîne SIM-analyse de base.

La figure 7.4 montre l'évolution du Ratio-rmse avec l'échéance de la même manière que la figure précédente le fait pour le critère de Nash.

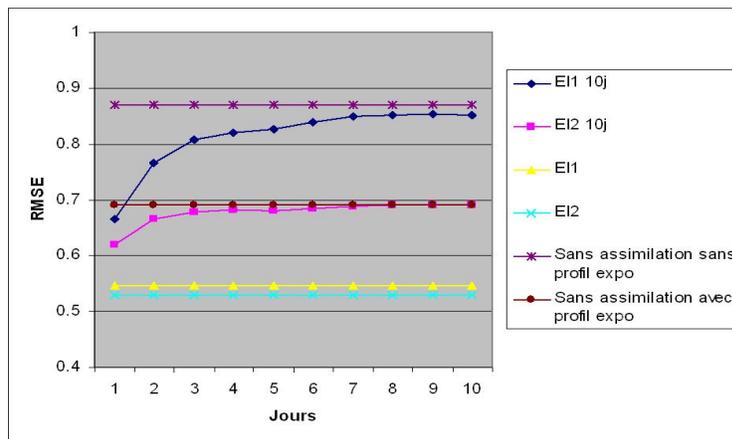


FIGURE 7.4 – Evolution du Ratio-rmse pour SIM à 10 jours (sans unité) en moyenne sur les 148 stations considérées.

Ce score est intéressant, car c'est directement celui que l'assimilation de données vise à diminuer, plus que le Nash ou un autre score. On voit ici encore que les simulations de SIM à 10 jours sont nettement plus améliorées (par rapport à SIM-analyse) avec les états initiaux EI_2 que les états initiaux EI_1 , et que cette amélioration est plus durable. Ainsi, SIM à 10 jours initialisé par EI_2 est meilleur pour son dixième jour d'échéance que SIM à 10 jours initialisé par EI_1 pour son deuxième jour d'échéance !

7.2 Impact de l'assimilation des débits pour les prévisions d'ensemble à 10 jours SIM-CEPMMT

Pour cette partie, les prévisions d'ensemble à 10 jours SIM-CEPMMT initialisées par les états EI_1 (donc sans profil exponentiel) et EI_2 (avec profil exponentiel) ont été comparées avec les prévisions d'ensemble temps réel à 10 jours du CEPMMT (c'est-à-dire sans assimilation, et sans profil exponentiel). A cause du temps de calcul important que cela demandait, et parce que le but de cette thèse n'était pas de quantifier l'apport particulier du profil exponentiel de la conductivité hydraulique dans le sol, aucune prévision d'ensemble de débits sans assimilation mais avec ce profil exponentiel n'a été réalisée (contrairement à ce qui a été fait pour les tests du paragraphe précédent, moins coûteux).

7.2.1 Exemples de tracés de débits

On a tracé sur les figures 7.5, 7.6 et 7.7 les débits quotidiens d'ensemble utilisant l'EPS du CEPMMT pour la Mayenne à Lhuisserie, ainsi que les débits d'analyse correspondants (sans assimilation, EI_1 , et EI_2) et les débits observés, du 20 au 29 Mars 2005.

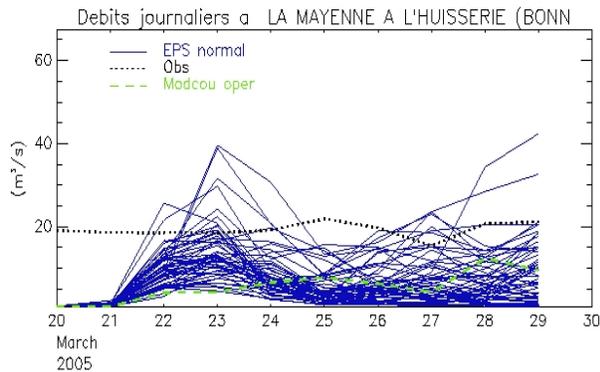


FIGURE 7.5 – Débits d'ensemble quotidiens de SIM-CEPMMT pour la Mayenne à l'Huisserie du 20 au 29 Mars 2005 sans assimilation.

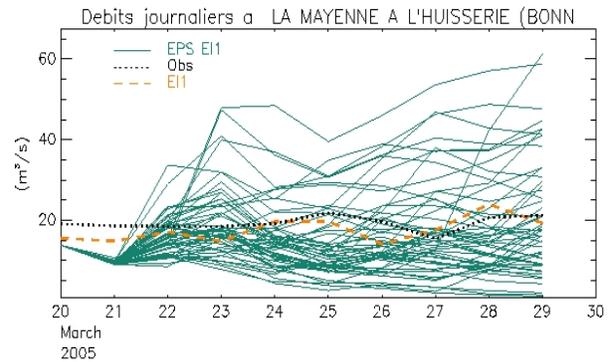


FIGURE 7.6 – Débits d'ensemble quotidiens de SIM-CEPMMT pour la Mayenne à l'Huisserie du 20 au 29 Mars 2005 avec les états assimilés EI_1 .

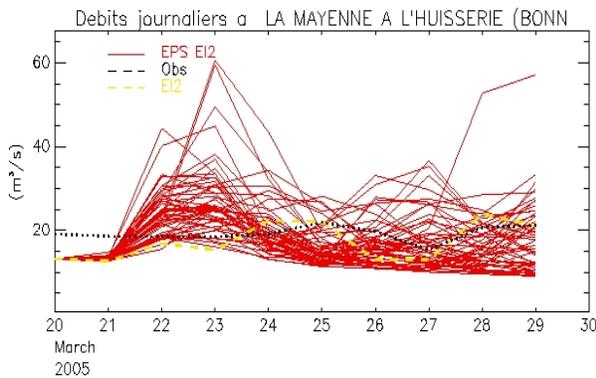


FIGURE 7.7 – Débits d'ensemble quotidiens de SIM-CEPMMT pour la Mayenne à l'Huisserie du 20 au 29 Mars 2005 avec les états assimilés EI_2 .

Ces figures montrent que pour les deux expériences avec assimilation, les débits d'analyse sont beaucoup plus proches des observations. On voit que par conséquent les débits d'ensemble utilisant des états initiaux meilleurs, sont nettement rapprochés des débits observés.

En revanche, il semble évident que la dynamique des débits n'est que peu modifiée par l'assimilation, cette dernière revenant principalement à réhausser (ou abaisser) les valeurs des débits. Cependant, l'allure générale des débits d'ensemble initialisés par EI_1 semble un peu modifiée par rapport aux deux autres expériences. Cela est probablement dû aux modifications de l'humidité du sol qui sont plus fortes pour EI_1 que pour EI_2 , ce qui provoque des modifications des flux d'ISBA plus importantes, et donc se répercute sur les débits.

7.2.2 Dispersion de l'ensemble et RMSE

La dispersion de l'ensemble et le RMSE sont les deux scores les plus simples qui représentent la qualité d'une prévision d'ensemble. La figure 7.8 représente l'évolution de la Ratio-dispersion des prévisions d'ensemble de débits utilisant l'EPS du CEPMMT pour les 10 jours d'échéance, avec ou sans les états assimilés.

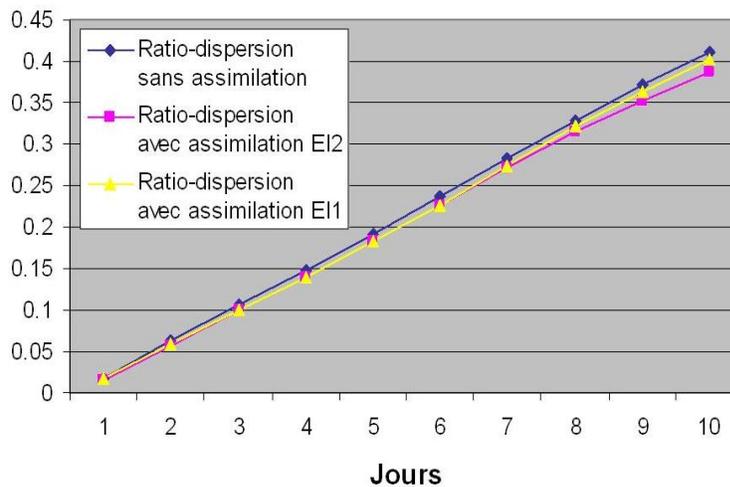


FIGURE 7.8 – Evolution de la Ratio-dispersion (sans unité) des membres des prévisions d'ensemble de débits SIM sans assimilation (bleu), avec assimilation EI_2 (rose) et avec assimilation EI_1 (jaune) en moyenne sur les 148 stations considérées.

On peut voir que la différence entre les trois expériences est très faible, avec une très légère diminution de la dispersion pour les échéances les plus lointaines pour l'expérience EI_2 . En effet, l'assimilation n'a en aucun cas la prétention de modifier ce caractère de l'ensemble.

En revanche, et comme on pouvait s'y attendre, l'assimilation réduit significativement le Ratio-rmse de la prévision ensembliste (figure 7.9).

En effet, le but de l'assimilation en elle-même est de réduire l'écart aux observations, et plus précisément le RMSE. On a vu lors du chapitre précédent que c'était bien le cas, avec un Ratio-rmse de 0.53 pour EI_2 , de 0.55 pour EI_1 , alors que pour la version de SIM utilisée jusqu'alors dans les prévisions d'ensemble (c'est-à-dire sans le profil exponentiel de la conductivité hydraulique du sol), ce score était de 0.87. Le Ratio-rmse pour les prévisions d'ensemble est plus élevé que les valeurs correspondantes pour SIM-analyse, ce qui s'explique par la dégradation de la qualité de la prévision avec l'échéance.

On observe que l'expérience EI_2 est, comme attendu, la meilleure des 3, et que cet avantage perdure tout le long des 10 jours d'échéance de la prévision d'ensemble. En comparant la prévision d'ensemble sans assimilation, avec la prévision d'ensemble EI_1 (c'est-à-dire avec uniquement le système d'assimilation des débits), on observe que l'apport de l'assimilation est très fort pour les premiers jours d'échéance, mais qu'il tend à s'estomper au cours du temps, pour finalement devenir quasiment négligeable pour les 3 derniers jours d'échéance.

En revanche, en utilisant les états initiaux issus de l'expérience EI_2 (donc avec le profil exponentiel en plus du système d'assimilation), l'apport est encore visible après 10 jours

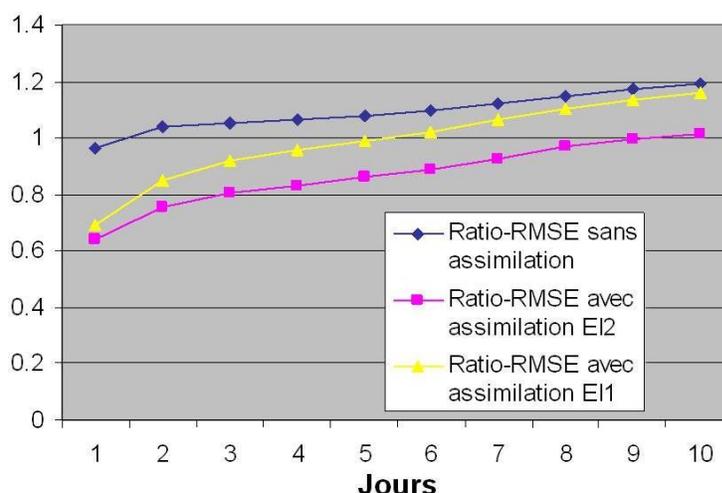


FIGURE 7.9 – Evolution du Ratio-rmse (sans unité) de la prévision d'ensemble de débits SIM sans assimilation (bleu), avec assimilation EI_2 (rose) et avec assimilation EI_1 (jaune) en moyenne sur les 148 stations considérées.

d'échéance. Cette persistance du gain apporté par EI_2 est due à la meilleure physique utilisée pour ce cas.

7.2.3 Brier Skill Score et Ranked Probability Skill Score

Les scores de BSS présentés par la suite sont tracés pour les dépassements des seuils Q99, Q98, Q95, Q90, Q80, Q70, Q60, Q50, et pour les non-dépassements des seuils Q40, Q30, Q20, Q10, Q5, Q2 et Q1. Ces mêmes seuils sont utilisés pour le calcul du RPSS. Tous ces seuils sont les quantiles de débits journaliers établis par la Banque Hydro sur des périodes longues (généralement plus de 30 ans). Une climatologie de débits observés est ici utilisée pour définir le Brier Score de référence. Enfin, tous les BSS et RPSS calculés pour la suite du manuscrit l'ont été en utilisant le débiaisage introduit par *Weigel et al. (2006)* (description chapitre 3.1.3), afin de tenir compte du nombre de membres de l'ensemble.

Brier Skill Score

La figure 7.10 représente l'évolution des Brier Skill Scores en fonction des seuils pour le premier jour de prévision. La courbe représentant le système initial sans assimilation montre que, en moyenne, le système apporte de l'information par rapport à la climatologie en ce qui concerne les débits moyens à forts (de Q30 à Q90) car le score est positif. En revanche, pour les très forts débits, le score est négatif, et pour les étiages le système paraît mauvais. Cependant cette caractéristique s'explique en partie par l'échantillon un peu plus faible de stations où le score pour les extrêmes a pu être calculé (environ une centaine sur les 148 stations au total pour les Q99, Q98, Q2 et Q1).

En revanche, les BSS pour la prévision d'ensemble de débits avec les états initiaux EI_1 sont tous positifs du Q20 au Q99. L'amélioration la plus notable se situe pour les très forts débits. En effet, les scores pour les débits moyens sont déjà assez bons (supérieurs à 0.5),

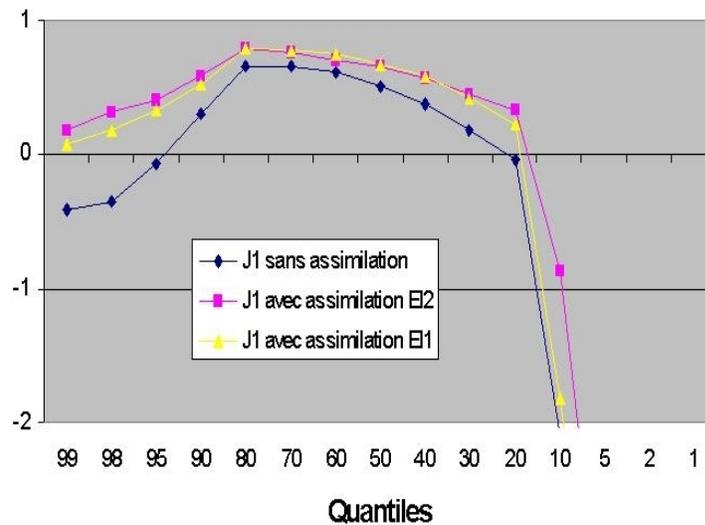


FIGURE 7.10 – Brier Skill Scores en fonction des seuils pour le premier jour de prévision, sans assimilation (bleu), avec assimilation EI_2 (rose) et avec assimilation EI_1 (jaune) en moyenne sur les 148 stations considérées.

donc plus difficilement améliorables. Le nombre de stations concernées par les dépassements ou non-dépassements des seuils extrêmes se situe là aussi autour de la centaine.

Enfin, la prévision d'ensemble de débits avec les états initiaux EI_2 a un score très légèrement meilleur que celle utilisant les états initiaux EI_1 et ce pour tous les seuils. C'est encore une fois la meilleure simulation.

Le test de ré-échantillonnage a été réalisé pour comparer les 3 systèmes (voir partie 3.1.3 pour la définition de ce test). Il montre que EI_2 et EI_1 sont significativement différents excepté pour les seuils de Q95 à Q70 pour ce premier jour de prévision. En revanche, EI_1 et l'expérience sans assimilation sont significativement différents pour tous les seuils.

Sur la figure 7.11, les Brier Skill Scores sont cette fois-ci représentés pour le dixième jour d'échéance. Là encore, les meilleurs scores sont pour les seuils intermédiaires, et la simulation avec les états initiaux EI_2 est meilleure que la simulation avec les états initiaux EI_1 , qui est meilleure que la simulation sans assimilation. Cependant, on peut remarquer deux choses : tout d'abord, pour certains seuils (Q95, Q90 et Q80), la simulation EI_1 est très légèrement moins bonne que la simulation sans assimilation. On peut penser que la non-utilisation du profil exponentiel provoque une bosse sur les débits dite de drainage, et qui arrive après une crue soudaine pour laquelle l'assimilation a ajouté de l'eau dans le sol. L'intensité de ces bosses étant plus faible que celle des crues, cela peut correspondre aux seuils incriminés. Deuxièmement, l'écart entre la simulation EI_1 et la simulation EI_2 est plus grand pour le jour 10 que pour le jour 1. Cela s'explique par la présence du profil exponentiel de la conductivité hydraulique dans le sol, qui améliore durablement la physique de SIM.

Le test de significativité indique ici que EI_2 et EI_1 sont significativement différents pour tous les seuils, alors que EI_1 et l'expérience sans assimilation ne sont différents que pour les seuils les plus extrêmes. Enfin, l'expérience sans assimilation et celle avec les états initiaux EI_2 sont significativement différentes. Cela signifie que l'apport de l'assimilation est

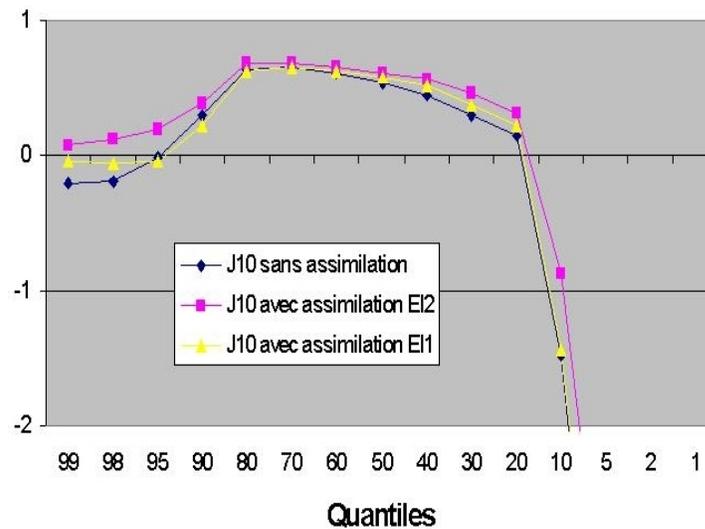


FIGURE 7.11 – Brier Skill Scores en fonction des seuils pour le dixième jour de prévision, sans assimilation (bleu), avec assimilation EI_2 (rose) et avec assimilation EI_1 (jaune) en moyenne sur les 148 stations considérées.

très faible au bout de 10 jours, alors que celui du profil exponentiel est toujours conséquent.

Ranked Probability Skill Score

La figure 7.12 représente l'évolution du RPSS en fonction de l'échéance pour les 3 systèmes.

Ces scores sont tous positifs, indiquant un apport globalement positif de la prévision d'en-

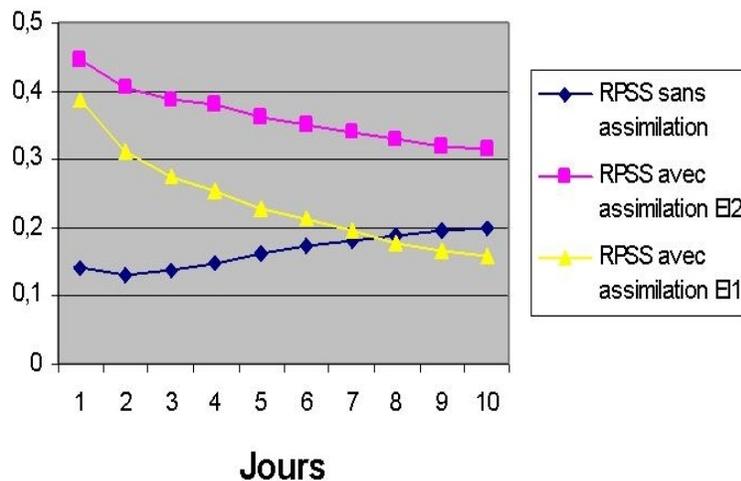


FIGURE 7.12 – Ranked Probability Skill Scores en fonction des 10 jours d'échéance, sans assimilation (bleu), avec assimilation EI_2 (rose) et avec assimilation EI_1 (jaune) en moyenne sur les 148 stations considérées.

semble des débits par rapport à une climatologie de débits observés. Le RPSS pour la chaîne sans assimilation reste toutefois assez faible, même s'il augmente légèrement avec l'échéance. Cette particularité peut s'expliquer par le fait que cette chaîne tourne en temps réel, et donc utilise une version temps réel (et donc "dégradée") de SAFRAN pour ses états initiaux. Cette version temps-réel de SAFRAN a tendance à sous-estimer les pluies. Cependant, il a été montré par *Rousset-Regimbeau (2007)* que l'EPS du CEPMMT sur-estimait les pluies pour ses échéances les plus lointaines (2 mm jour^{-1} pour SAFRAN sur la période du 4 septembre 2004 au 31 juillet 2005, 2.1 mm jour^{-1} pour le premier jour de l'EPS, et jusqu'à 2.4 mm jour^{-1} pour le dixième jour d'échéance de l'EPS). On peut donc penser que le déficit d'humidité du sol des états initiaux issus de la chaîne SIM temps-réel (induit par le déficit en précipitations de SAFRAN temps-réel) est comblé par le surplus de précipitations de l'EPS aux échéances les plus lointaines, augmentant ainsi légèrement le score des prévisions d'ensemble de débits sans assimilation, avec l'échéance. Cette augmentation du RPSS ne s'observe pas pour les expériences avec états initiaux assimilés, puisqu'elles disposent d'états initiaux plus conformes. Cela semble aussi expliquer le meilleur comportement de l'expérience sans assimilation pour le jour 10 du BSS (figure 7.11) pour les seuils allant du quantile 70 au quantile 95.

En revanche, les expériences initialisées par EI_1 et EI_2 voient logiquement leurs RPSS décroître, avec EI_2 étant meilleur que EI_1 . On peut aussi noter que EI_1 se dégrade plus vite que EI_2 , du fait de la physique moins bonne qui est utilisée. Enfin, on peut noter que pour les trois derniers jours d'échéance, l'expérience initialisée par EI_1 devient moins bonne que l'expérience sans assimilation.

Le test de ré-échantillonnage indique une différence significative pour les deux premiers jours de prévisions entre EI_1 et EI_2 puis une différence plus faible (entre 60% et 70%) par la suite. En revanche, la différence entre EI_1 et l'expérience sans assimilation est élevée pour les cinq premiers jours d'échéance, puis non significative par la suite (les courbes se croisent).

7.2.4 Décomposition du score de Brier

Résolution

Les figures 7.13 et 7.14 représentent la résolution pour les jours 1 et 10 des prévisions d'ensemble hydrologiques du CEPMMT, en fonction des différents seuils. La résolution représente la capacité du système à séparer les classes de probabilité. Elle est la meilleure pour les seuils moyens (de Q20 à Q70). Pour les seuils inférieurs au Q20, le sol est le plus sec et les précipitations sont rares, par conséquent il est très difficile d'obtenir une dispersion des prévisions de débits. Pour les seuils supérieurs au Q70, on peut supposer que le plus faible nombre de cas ainsi que la difficulté de prévoir ces événements extrêmes influencent négativement la résolution.

On peut voir que ce score est amélioré par l'assimilation pour tous les seuils pour le premier jour de prévision. Cependant, les expériences EI_1 et EI_2 semblent équivalentes. Pour le dixième jour de prévision, seuls les seuils moyens (de Q20 à Q60) semblent être améliorés par l'assimilation, et l'expérience EI_2 donne la meilleure amélioration.

Les figures 7.15 et 7.16 représentent l'évolution de la résolution pour les 10 jours d'éché-

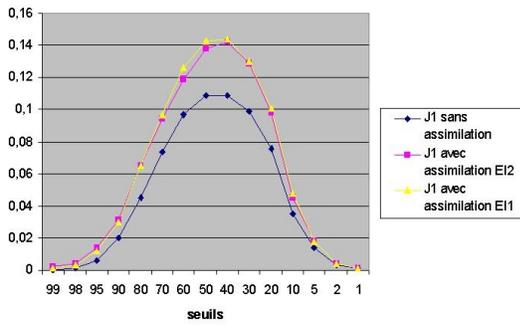


FIGURE 7.13 – Résolution pour le premier jour de prévision en fonction des seuils, sans assimilation (bleu), avec assimilation EI_2 (rose) et avec assimilation EI_1 (jaune).

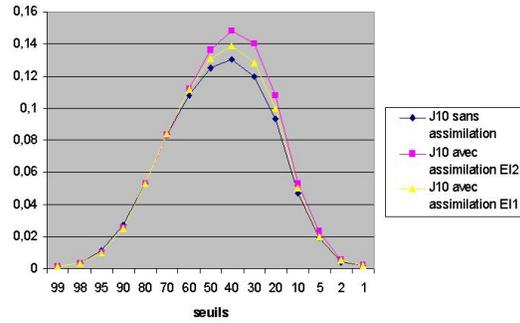


FIGURE 7.14 – Résolution pour le dixième jour de prévision en fonction des seuils, sans assimilation (bleu), avec assimilation EI_2 (rose) et avec assimilation EI_1 (jaune).

ance et pour le dépassement des quantiles Q95 et Q50.

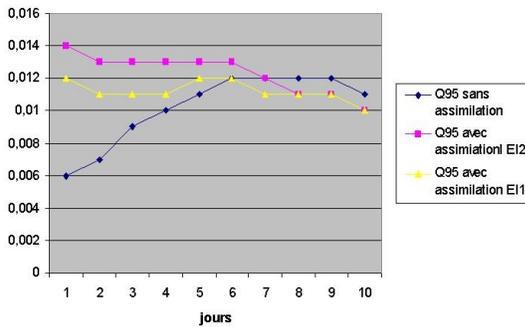


FIGURE 7.15 – Résolution pour le dépassement du quantile 95 en fonction des jours de prévision, sans assimilation (bleu), avec assimilation EI_2 (rose) et avec assimilation EI_1 (jaune).

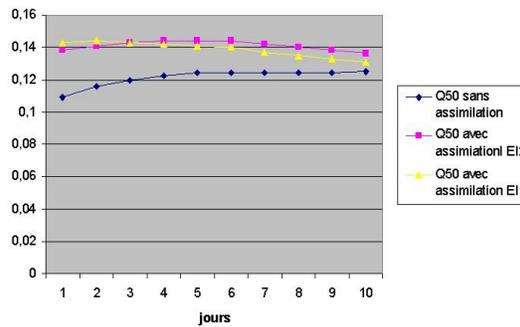


FIGURE 7.16 – Résolution pour le dépassement du quantile 50 en fonction des jours de prévision, sans assimilation (bleu), avec assimilation EI_2 (rose) et avec assimilation EI_1 (jaune).

Pour le dépassement du Q95, les expériences avec assimilation améliorent la résolution pour les premiers jours d'échéance et donnent un résultat légèrement moins bon pour la fin de la prévision. Cependant, le score étant très faible, les écarts sont minimes.

Pour le dépassement du Q50, on peut voir des scores légèrement décroissants pour les expériences avec assimilation, et légèrement croissants pour l'expérience sans assimilation. L'expérience EI_2 est meilleure que l'expérience EI_1 qui est elle-même meilleure que la prévision sans assimilation. On voit que l'expérience EI_1 se dégrade plus vite que EI_2 du fait de la physique moins bonne qui est utilisée.

Fiabilité

Les figures 7.17 et 7.18 représentent la fiabilité pour les jours 1 et 10 des prévisions d'ensemble hydrologiques SIM-CEPMMT, en fonction des différents seuils. La fiabilité représente la capacité du système à prévoir des probabilités justes. Ce score est ici le meilleur pour les seuils les plus élevés.

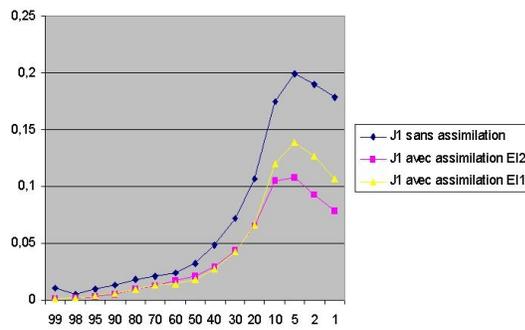


FIGURE 7.17 – Fiabilité pour le premier jour de prévision en fonction des seuils, sans assimilation (bleu), avec assimilation EI_2 (rose) et avec assimilation EI_1 (jaune).

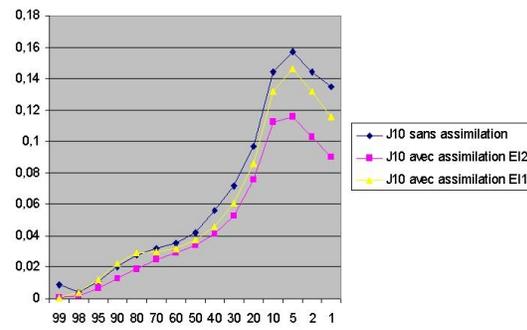


FIGURE 7.18 – Fiabilité pour le dixième jour de prévision en fonction des seuils, sans assimilation (bleu), avec assimilation EI_2 (rose) et avec assimilation EI_1 (jaune).

On remarque que, pour le jour 1, les simulations avec assimilation sont équivalentes, excepté pour les seuils les plus faibles pour lesquels EI_2 est meilleur que EI_1 . De plus, la fiabilité est améliorée par le système d'assimilation des débits pour tous les seuils. Pour le dixième jour d'échéance, l'assimilation EI_2 est nettement meilleure que l'assimilation EI_1 pour tous les seuils. En effet, cette dernière est beaucoup plus proche des prévisions d'ensemble sans assimilation.

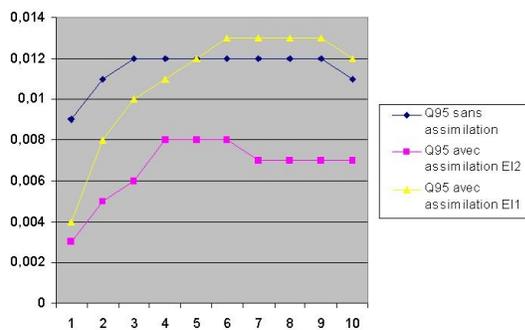


FIGURE 7.19 – Fiabilité pour le dépassement du quantile 95 en fonction des jours de prévision, sans assimilation (bleu), avec assimilation EI_2 (rose) et avec assimilation EI_1 (jaune).

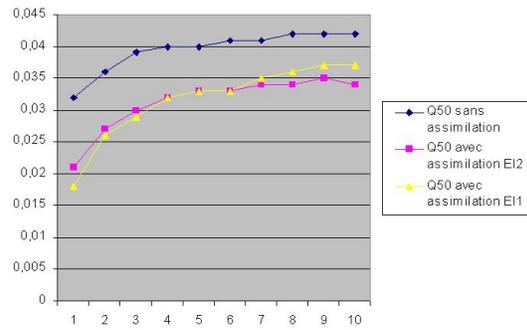


FIGURE 7.20 – Fiabilité pour le dépassement du quantile 50 en fonction des jours de prévision, sans assimilation (bleu), avec assimilation EI_2 (rose) et avec assimilation EI_1 (jaune).

Les figures 7.19 et 7.20 représentent l'évolution de la fiabilité pour les 10 jours d'échéance et pour le dépassement des quantiles Q95 et Q50.

Pour le dépassement du Q95, les expériences avec assimilation améliorent la fiabilité, excepté pour l'expérience EI_1 pour la fin de la prévision. Cependant, le score étant très faible, les écarts sont minimes et il est difficile de conclure.

Pour le dépassement du Q50, on peut voir des scores croissants, surtout pour les tous premiers jours d'échéance. L'expérience EI_1 semble très légèrement meilleure que l'expérience EI_2 pour les premiers jours, alors que l'expérience EI_2 prend le dessus pour la fin des

prévisions. Ces deux prévisions sont nettement améliorées par rapport à la prévision d'ensemble des débits sans assimilation.

Incertitude

La figure 7.21 représente l'évolution de l'incertitude en fonction des seuils étudiés.

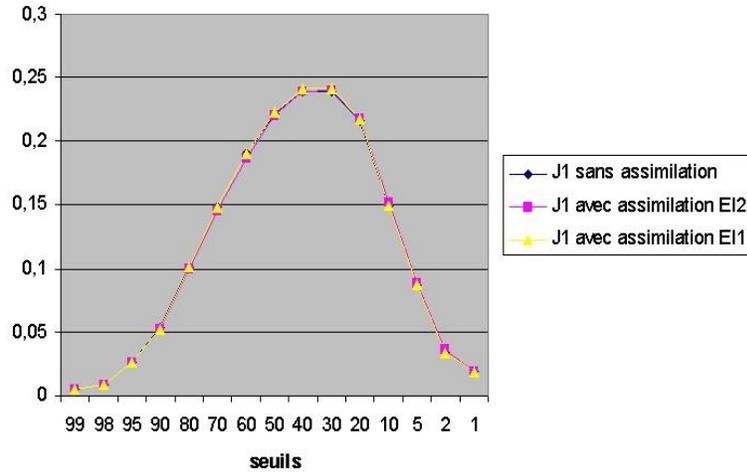


FIGURE 7.21 – Incertitude en fonction des seuils, sans assimilation (bleu), avec assimilation EI_2 (rose) et avec assimilation EI_1 (jaune).

L'incertitude indique la difficulté à prévoir un évènement, indépendamment du système de prévision. Plus l'incertitude est élevée, plus il est difficile de prévoir cet évènement. Ici, les débits moyens sont donc les plus difficiles à prévoir. On remarque enfin que, comme ce score ne dépend pas du système de prévision, il est le même pour nos trois expériences considérées.

7.2.5 Diagrammes de rang

Les figures 7.22, 7.23 et 7.24 représentent les diagrammes de rang pour nos trois expériences, et pour les 10 jours d'échéance de l'EPS. Les diagrammes de rang sont obtenus en comptant le rang des observations parmi les valeurs des membres de l'ensemble des prévisions classés par ordre croissant.

On remarque que pour les trois expériences, les 6 premiers jours de prévision voient leurs diagrammes de rang marqués par une sur-population des extrêmes (diagrammes en forme de U). Cela dénote un manque de variabilité des prévisions d'ensemble hydrologiques. Cette forme peut soit provenir d'un manque de dispersion de l'ensemble, soit d'un biais conditionnel. Pour éliminer ou confirmer le biais conditionnel, on se reportera au paragraphe ci-après traitant des scores différenciés par saison. De plus, le rang de droite est plus important que celui de gauche, semblant indiquer un biais négatif des prévisions d'ensemble.

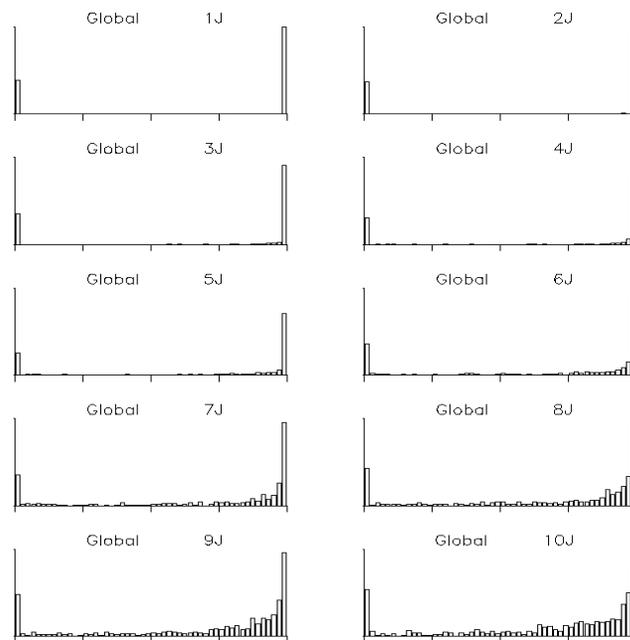


FIGURE 7.22 – Diagrammes de rang de la prévision d'ensemble hydrologique à 10 jours du CEPMMT sans assimilation.

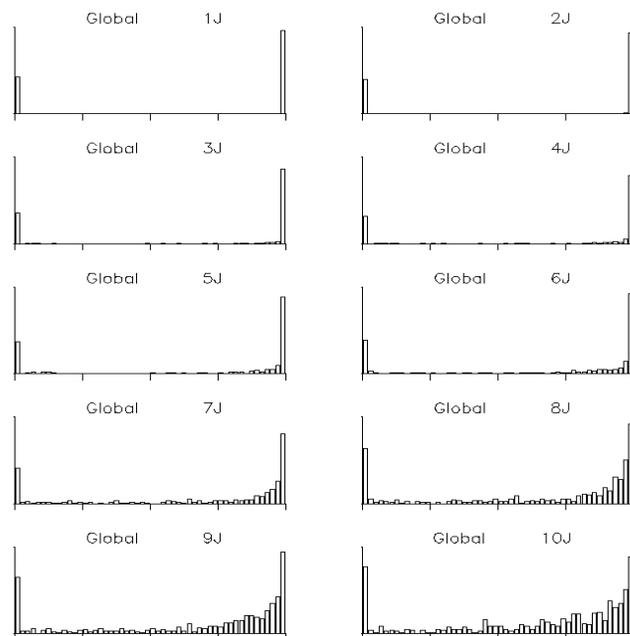


FIGURE 7.23 – Diagrammes de rang de la prévision d'ensemble hydrologique à 10 jours du CEPMMT utilisant les états assimilés EI_1 .

En ce qui concerne les 4 derniers jours d'échéance, la variabilité des prévisions semble

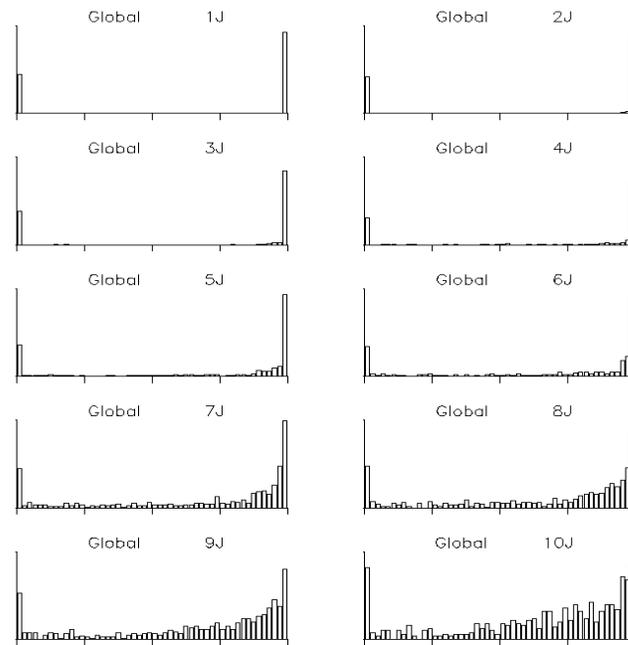


FIGURE 7.24 – Diagrammes de rang de la prévision d'ensemble hydrologique à 10 jours du CEPMMT utilisant les états assimilés EI_2 .

plus importante. En effet, les rangs médians sont plus peuplés. Cependant, cette variabilité demeure insuffisante car les deux extrêmes dominent toujours les diagrammes de rang. On remarque également que les membres sur la droite des diagrammes sont surpeuplés par rapport à ceux de gauche, indiquant un biais plutôt négatif des prévisions encore une fois.

Enfin, si l'on compare les trois expériences les unes par rapport aux autres, on remarque que l'expérience sans assimilation est celle avec la plus faible variabilité. Ensuite vient l'expérience utilisant les états initiaux EI_1 , puis EI_2 . Ce résultat est cohérent avec les conclusions déduites de l'observation des scores de la décomposition du score de Brier, précédemment décrites.

7.2.6 Diagrammes de fiabilité

Sur les 6 graphes suivants sont représentés les diagrammes de fiabilité des différentes expériences. Chacun des graphes présente l'ensemble des diagrammes de fiabilité pour les 15 seuils étudiés depuis le début de ce chapitre.

Si on s'intéresse aux diagrammes pour le jour 1 pour les trois expériences (sans assimilation (figure 7.25), avec les états assimilés EI_1 (figure 7.27), avec les états assimilés EI_2 (figure 7.29)), on remarque que les trois diagrammes sont en forme de J, et très peu différents d'une expérience à l'autre. La forme en J traduit une sur-estimation des fortes probabilités. On observe aussi que les diagrammes sont un peu plus proches de la diagonale pour les seuils moyens, même s'ils demeurent très mauvais.

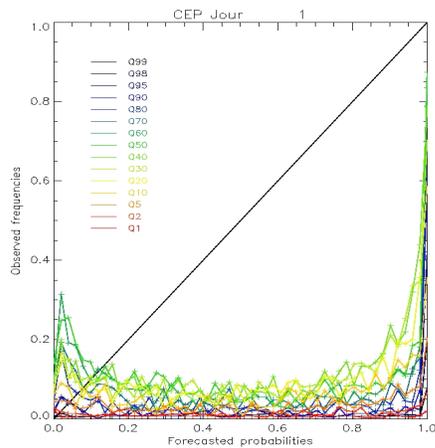


FIGURE 7.25 – Diagramme de fiabilité pour l'expérience sans assimilation (jour 1).

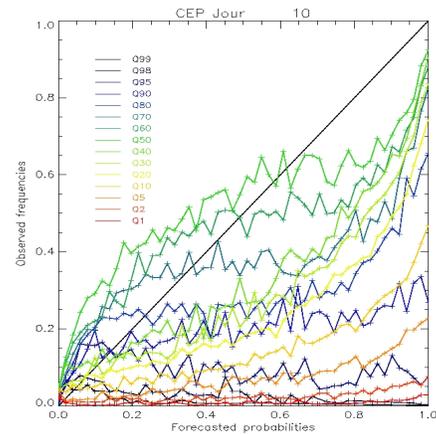


FIGURE 7.26 – Diagramme de fiabilité pour l'expérience sans assimilation (jour 10).

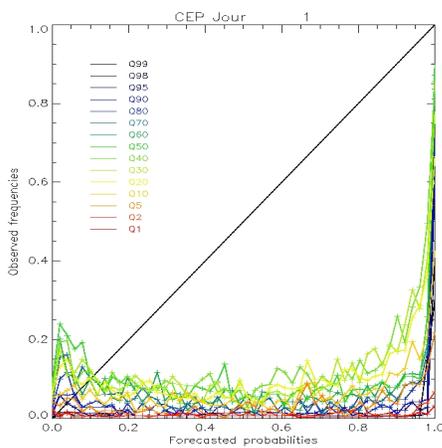


FIGURE 7.27 – Diagramme de fiabilité pour l'expérience EI_1 (jour 1).

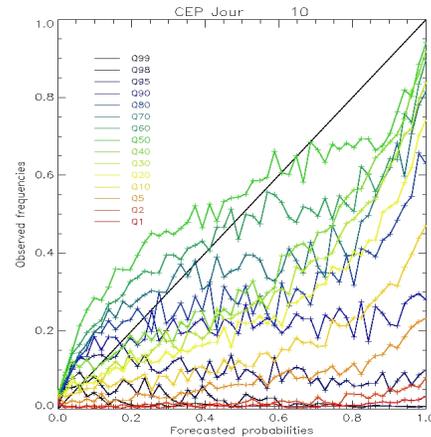


FIGURE 7.28 – Diagramme de fiabilité pour l'expérience EI_1 (jour 10).

Si on s'intéresse aux diagrammes pour le jour 10 pour les trois expériences (sans assimilation (figure 7.26), avec les états assimilés EI_1 (figure 7.28), avec les états assimilés EI_2 (figure 7.30)), on remarque que les trois diagrammes sont beaucoup plus rapprochés de la diagonale. Ceci est particulièrement vrai pour les seuils moyens, les diagrammes pour les seuils extrêmes (Q1 à Q5 et Q95 à Q99) restant très mauvais. Il reste très difficile de remarquer une différence entre les trois expériences.

7.2.7 Taux de succès, fausses alarmes, bonnes prévisions, non prévisions et courbes de ROC

Pour ce paragraphe, les taux de succès, fausses alarmes, bonnes prévisions et non prévisions sont présentés pour un pourcentage de 90% des membres définissant un dépassement ou non-dépassement de seuil. Des courbes de ROC seront présentées pour des pourcentages de 50%, 70% et 90%.

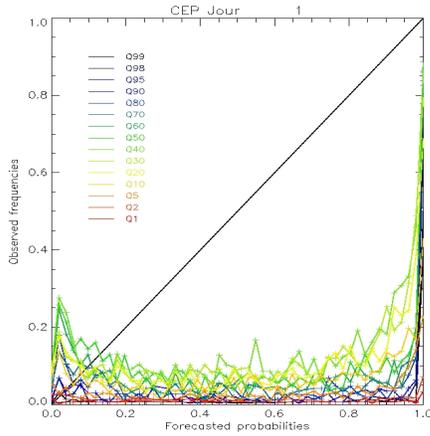


FIGURE 7.29 – Diagramme de fiabilité pour l'expérience EI_2 (jour 1).

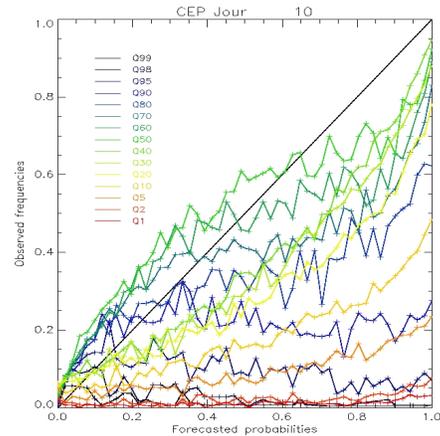


FIGURE 7.30 – Diagramme de fiabilité pour l'expérience EI_2 (jour 10).

Taux de succès (Hit Rate)

Les figures 7.31 et 7.32 représentent les taux de succès des trois expériences pour le premier et le dixième jours de prévisions. Le taux de succès représente le ratio entre le nombre de (non-)dépassements de seuils prévus et observés, et le nombre total de (non-)dépassements de seuils observés.

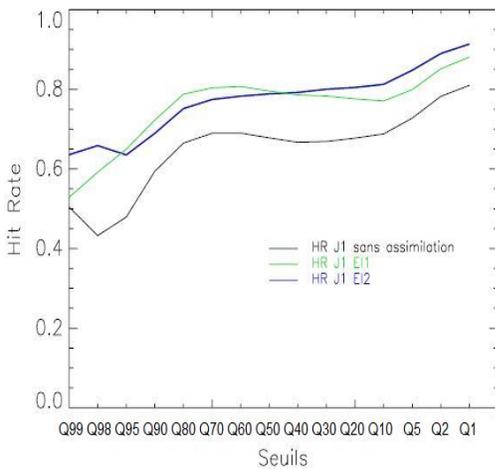


FIGURE 7.31 – Taux de succès pour le premier jour de SIM-CEPMMT en moyenne sur les 148 stations considérées.

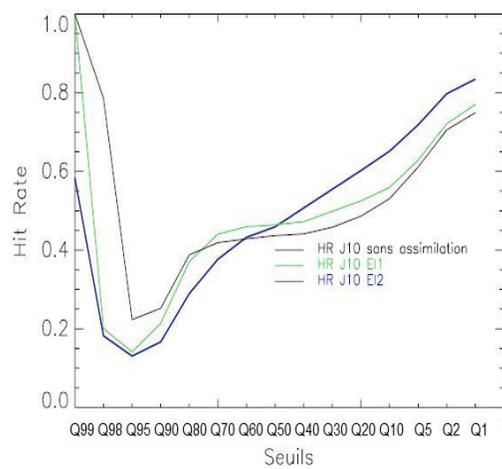


FIGURE 7.32 – Taux de succès pour le dixième jour de SIM-CEPMMT en moyenne sur les 148 stations considérées.

Sur la figure 7.32, pour les seuils Q99 voire Q98, on semble observer des scores excellents. Cependant, il est très probable que ce ne soit qu'un effet du très faible nombre de cas impliqués.

Les effets de l'assimilation impliquent une amélioration notable du taux de bonnes prévisions, surtout pour le premier jour. On peut cependant noter une dégradation du score pour les seuils Q80 à Q99, pour la fin d'échéance, ce qui est surprenant.

Taux de fausses alarmes

Les figures 7.33 et 7.34 représentent les taux de fausses alarmes des trois expériences, c'est-à-dire le ratio entre le nombre de (non-)dépassements de seuils prévus mais non observés, et le nombre total de (non-)dépassements de seuils observés.

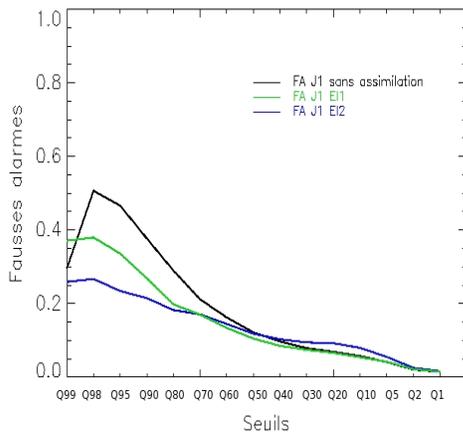


FIGURE 7.33 – Taux de fausses alarmes pour le premier jour de SIM-CEPMMT en moyenne sur les 148 stations considérées.

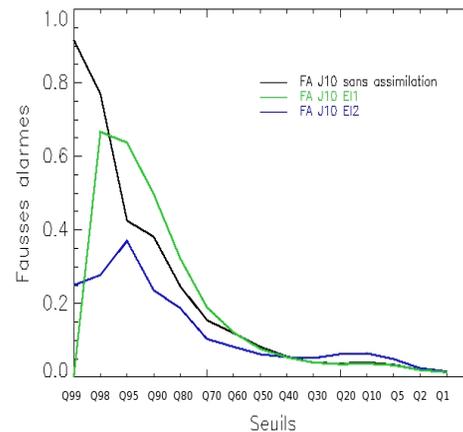


FIGURE 7.34 – Taux de fausses alarmes pour le dixième jour de SIM-CEPMMT en moyenne sur les 148 stations considérées.

Ces figures montrent que les fausses alarmes sont les plus importantes pour les forts débits pour les trois expériences, avec un taux parfois supérieur à 60% en fin d'échéance. Pour les seuils plus faibles (sous le Q70), le taux de fausses alarmes devient tout à fait correct (inférieur à 20%).

Les figures 7.33 et 7.34 montrent une amélioration substantielle des scores avec l'assimilation, et plus particulièrement avec les états EI_2 . Cette amélioration est surtout visible pour les seuils élevés, l'expérience EI_2 présentant un taux de fausses alarmes inférieur à 40% pour tous les seuils.

Cependant, pour les seuils les plus faibles, le taux de fausses alarmes semble s'améliorer légèrement avec l'échéance pour les trois systèmes, ce qui est difficilement explicable.

Taux de bonnes prévisions

Les figures 7.35 et 7.36 représentent les taux de bonnes prévisions des trois expériences, c'est-à-dire le ratio entre les prévisions correctes, et le nombre total de cas.

Ce score est assez bon, avec au moins 60% de bonnes prévisions quel que soit le seuil ou l'expérience. Les meilleurs scores sont obtenus pour les seuils les plus élevés, avec un taux de bonnes prévisions supérieur à 95% pour les quantiles 80 à 99. En revanche, les scores les plus faibles se situent au niveau du Q10. De plus, le taux de succès a logiquement tendance à diminuer avec l'échéance (d'après les autres échéances, non présentées ici).

Si l'on compare les trois expériences entre elles, on peut voir que l'assimilation des débits (EI_1 et EI_2) améliore le taux de bonnes prévisions quelle que soit l'échéance ou le seuil considéré (la moins bonne attitude du système sans assimilation pour les Q99 et Q98 semble

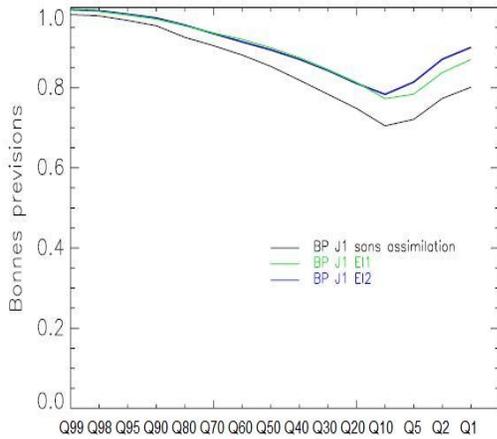


FIGURE 7.35 – Taux de bonnes prévisions pour le premier jour de SIM-CEPMMT en moyenne sur les 148 stations considérées.

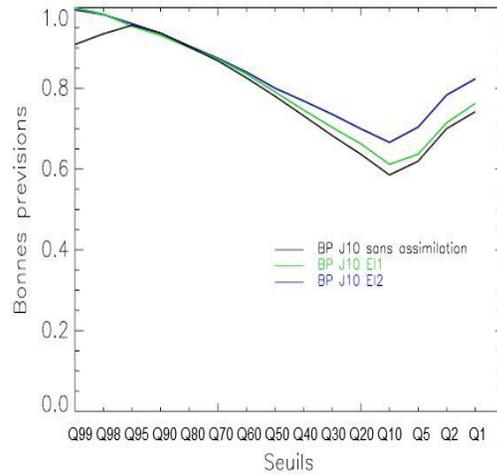


FIGURE 7.36 – Taux de bonnes prévisions pour le dixième jour de SIM-CEPMMT en moyenne sur les 148 stations considérées.

n'être qu'une anomalie due au faible nombre de cas). Pour EI_1 cependant, l'amélioration est plus nette pour les premières échéances, alors que vers la fin des prévisions, le score semble très proche de l'expérience sans assimilation. Pour EI_2 en revanche, les effets de l'assimilation des débits perdurent tout au long de l'échéance.

Taux de non-prévisions

Les figures 7.37 et 7.38 représentent les taux de non-prévisions des trois expériences, c'est-à-dire le ratio entre le nombre de cas observés mais non prévus, et le nombre total de cas observés.

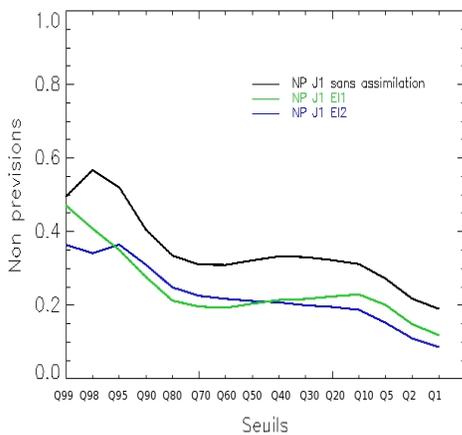


FIGURE 7.37 – Taux de non prévisions pour le premier jour de SIM-CEPMMT en moyenne sur les 148 stations considérées.

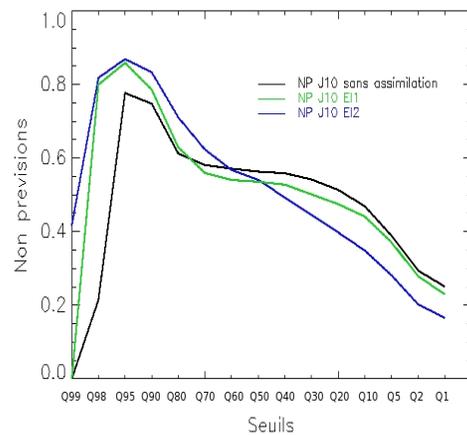


FIGURE 7.38 – Taux de non prévisions pour le dixième jour de SIM-CEPMMT en moyenne sur les 148 stations considérées.

Là aussi, le score pour les seuils Q99 et Q98 semble biaisé par le nombre d'occurrences pour le dixième jour d'échéance. Dans l'ensemble, le taux de non-prévisions semble plus faible pour les seuils les plus faibles. On note que l'assimilation des débits dans SIM améliore ce score, plus spécialement pour les premières échéances. Enfin, l'apport de l'assimilation semble perdurer plus longtemps pour EI_2 que pour EI_1 .

Courbes de ROC

Les figures 7.39, 7.40 et 7.41 représentent les courbes de ROC pour les trois expériences pour le jour 1. Ces mêmes courbes pour le dixième jour d'échéance sont données figures 7.42, 7.43 et 7.44. On a utilisé pour ces courbes trois pourcentages différents (90%, 70% et 50%) de membres qui doivent dépasser ou non les seuils considérés. Rappelons que plus les courbes se

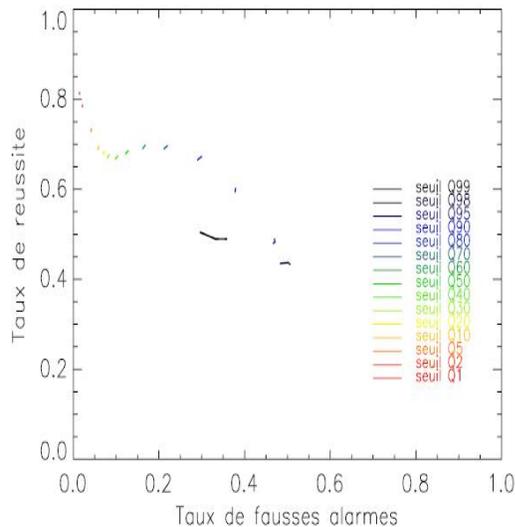


FIGURE 7.39 – Courbes de ROC sans assimilation (jour 1).

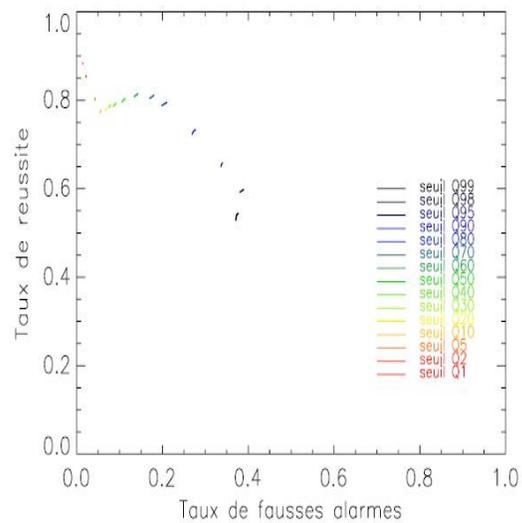


FIGURE 7.40 – Courbes de ROC pour l'expérience EI_1 (jour 1).

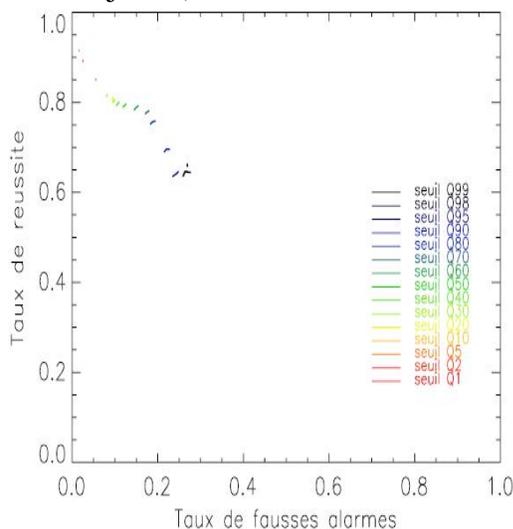


FIGURE 7.41 – Courbes de ROC pour l'expérience EI_2 (jour 1).

situent dans le coin supérieur gauche, meilleure est la prévision (taux de fausses alarmes = 0, et Taux de réussite = 1).

On observe une nouvelle fois l'amélioration apportée par l'assimilation, et plus spécialement pour l'expérience EI_2 . En effet, les courbes de ROC sont alors plus proches du coin supérieur gauche. Les meilleurs scores semblent être pour les plus faibles débits pour les trois expériences, et que ce soit pour le jour 1 ou le jour 10.

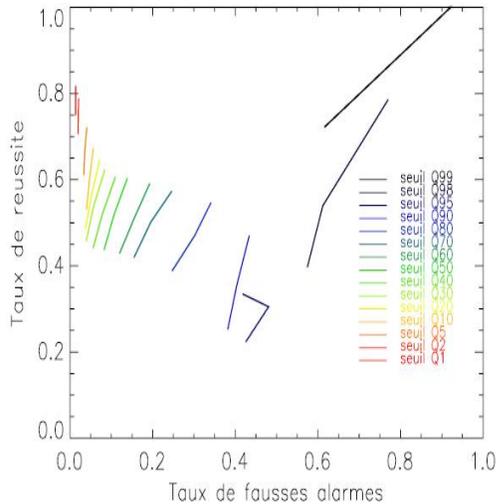


FIGURE 7.42 – Courbes de ROC sans assimilation (jour 10).

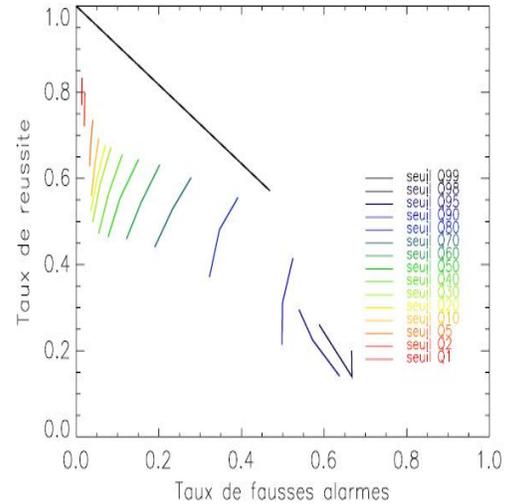


FIGURE 7.43 – Courbes de ROC pour l'expérience EI_1 (jour 10).

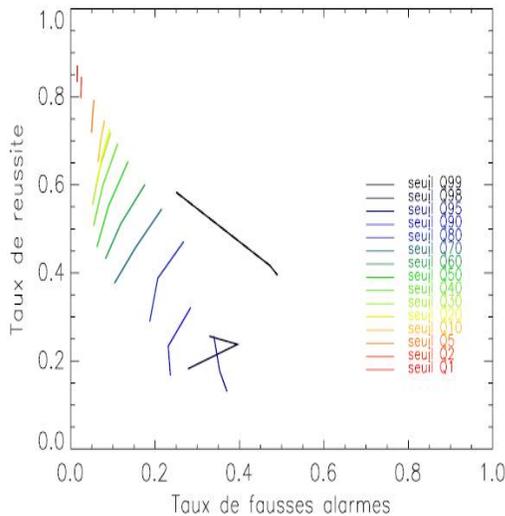


FIGURE 7.44 – Courbes de ROC pour l'expérience EI_2 (jour 10).

On remarque que, pour le jour 1, les trois pourcentages utilisés font peu varier les taux de fausses alarmes et de réussite (courbes de petite taille). En revanche, pour le jour 10, les courbes sont beaucoup plus étalées, montrant l'importance de bien choisir le pourcentage afin d'optimiser l'utilisation des prévisions. Pour notre cas, c'est le pourcentage 90% qui donne le meilleur résultat. Enfin, même si les courbes de ROC sont moins bonnes pour le dixième

jour d'échéance, l'information apportée par le système reste très intéressante et améliorée par rapport aux prévisions d'ensemble de débits SIM d'origine.

7.2.8 Scores par taille de bassin

Pour ce paragraphe, on a classé les 148 stations selon la taille du bassin versant les irriguant. On a défini 6 catégories, de la même manière qu'on l'a fait dans l'article publié au Journal of HydroMeteorology (*Thirel et al. (2008)*) : les bassins plus petits que 600 km^2 , entre 600 et 1000 km^2 , entre 1000 et 2000 km^2 , entre 2000 et 4000 km^2 , entre 4000 et 10000 km^2 , et enfin les bassins de superficie supérieure à 10000 km^2 .

Les figures 7.45 et 7.46 représentent le Ratio-RMSE moyen des prévisions d'ensemble de débits par rapport aux tailles des bassins, pour le premier et le dixième jour d'échéance des prévisions d'ensemble de débits. Le Ratio-RMSE est en fait le RMSE de la prévision d'ensemble de débits par rapport aux débits observés, divisé par le débit observé moyen sur la période considérée. On a fait ici la moyenne sur les 148 stations considérées.

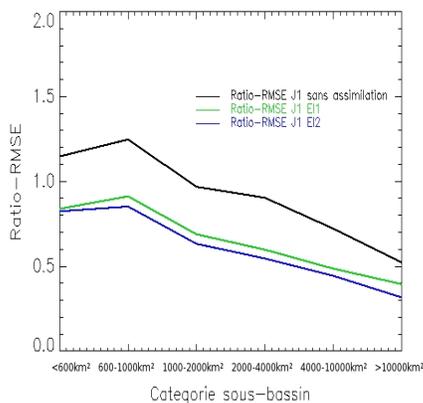


FIGURE 7.45 – Ratio-RMSE en fonction des tailles des bassins pour le premier jour de prévision.

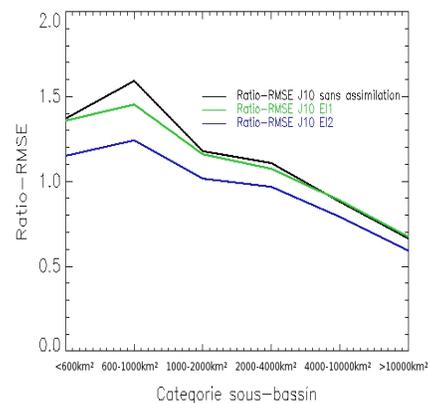


FIGURE 7.46 – Ratio-RMSE en fonction des tailles des bassins pour le dixième jour de prévision.

Plus le bassin est grand, plus le RMSE est important, mais en ce qui concerne le Ratio-RMSE, cela semble être l'inverse, ce score étant plus faible pour les plus grands bassins pour le premier et le dixième jours d'échéance. Le Ratio-RMSE croît en fonction de l'échéance. On peut noter que l'amélioration apportée par le système d'assimilation des débits est équivalente en proportion pour l'ensemble des bassins en ce qui concerne le premier jour de prévision. Cependant, pour le dixième jour de prévision, l'assimilation EI_2 est plus efficace pour les petits bassins que pour les grands bassins, alors que pour EI_1 elle a très peu d'impact sur le Ratio-RMSE.

Les figures 7.47, 7.48 et 7.49 représentent l'évolution du RPSS en fonction des tailles des bassins. Le RPSS semble assez peu évoluer en fonction de la taille des bassins, excepté pour la catégorie comprenant les bassins les plus grands, pour laquelle le score est le plus élevé. Cependant, c'est la catégorie qui comprend le moins de bassins (12), ce qui peut biaiser sa

moyenne.

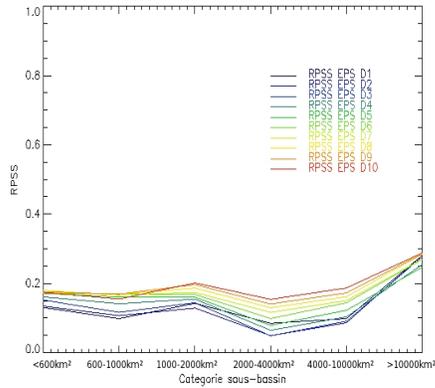


FIGURE 7.47 – RPSS sans assimilation en fonction des tailles des bassins.

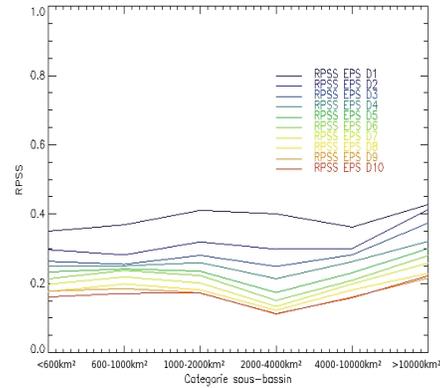


FIGURE 7.48 – RPSS pour l'expérience EI_1 en fonction des tailles des bassins.

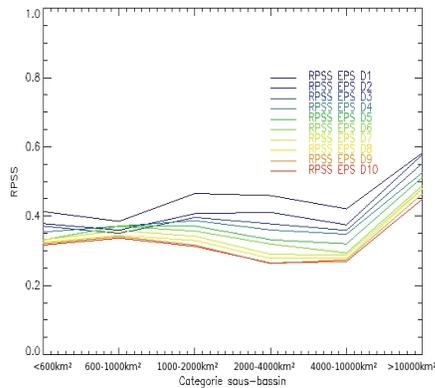


FIGURE 7.49 – RPSS pour l'expérience EI_2 en fonction des tailles des bassins.

A noter, encore une fois, que le score pour l'expérience sans assimilation et sans l'utilisation du profil exponentiel de la conductivité hydraulique dans le sol (SIM-CEPMMT temps réel) semble s'améliorer au fil de l'échéance.

7.2.9 Scores par saison

Afin de déterminer si l'impact de l'assimilation des débits est influencé par les conditions climatiques, on a regardé l'évolution de certains scores statistiques selon la saison. On a distingué deux périodes : l'été et l'hiver. L'été comprend (sur notre période) 365 jours, à savoir les mois d'avril à septembre en 2005 et 2006. L'hiver, quant à lui, comprend le mois de mars 2005, et les mois d'octobre 2005 à mars 2006 (204 jours).

Les tableaux 7.2 et 7.3 représentent le RPSS pour l'été et l'hiver respectivement.

On remarque tout d'abord que les scores sont meilleurs l'hiver que l'été pour les 7 à 8 premiers jours d'échéance pour les 3 expériences. Cependant, les expériences avec assimilation accentuent cette différence. Cette particularité peut s'expliquer par les difficultés que peut

TABLE 7.2 – RPSS pour les trois expériences pour l'été en moyenne pour les 148 stations considérées.

Exp/Echéance	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
Sans assimilation	-0.104	-0.096	-0.072	-0.049	-0.016	-0.001	0.017	0.041	0.068	0.093
EI_1	0.144	0.066	0.046	0.034	0.046	0.053	0.054	0.06	0.083	0.111
EI_2	0.262	0.228	0.231	0.231	0.239	0.231	0.225	0.224	0.232	0.25

TABLE 7.3 – RPSS pour les trois expériences pour l'hiver en moyenne pour les 148 stations considérées.

Exp/Echéance	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
Sans assimilation	0.021	-0.005	0.005	0.016	0.01	0.025	0.037	0.047	0.049	0.045
EI_1	0.424	0.329	0.277	0.231	0.164	0.126	0.095	0.062	0.037	0.018
EI_2	0.473	0.429	0.402	0.389	0.345	0.331	0.307	0.283	0.256	0.232

avoir l'assimilation de données à améliorer les faibles débits en modifiant l'humidité du sol.

Les scores estivaux semblent rester stables avec l'échéance pour les deux expériences avec assimilation, et augmenter pour l'expérience sans assimilation. On s'attendrait plutôt à ce qu'ils diminuent tous les trois. Cependant, la sur-estimation des précipitations de l'EPS du CEPMMT semble ici pallier certaines déficiences du modèle pour les faibles débits. Enfin, alors que l'expérience EI_1 n'apporte que peu d'amélioration au bout de 5 jours et ensuite (moins de 0.06 en plus pour son RPSS), l'expérience EI_2 quant à elle améliore toujours le RPSS de plus de 0.15 après 10 jours.

En ce qui concerne les scores hivernaux, on peut voir que l'apport de l'assimilation de données est plus important pour les premières échéances que durant l'été. Le score de l'expérience sans assimilation reste à peu près stable avec l'échéance, alors que les scores des expériences avec assimilation diminuent logiquement au cours du temps. On peut ainsi noter que l'expérience EI_1 obtient un score plus mauvais que l'expérience sans assimilation pour les trois derniers jours d'échéance.

Les diagrammes de rang (non-montrés ici) pour l'été montrent des sur-populations des extrêmes, avec globalement un biais négatif des prévisions d'ensemble de débits plus marqué avec l'échéance. Les diagrammes sont très similaires pour l'hiver. Ceci indique un manque de dispersion général des membres hydrologiques, et non pas un biais conditionnel lié à la saison.

7.2.10 Conclusion

Nous avons pu voir dans cette partie l'impact de l'assimilation des débits avec et sans le profil exponentiel de la conductivité hydraulique dans ISBA, sur les prévisions d'ensemble de

SIM à 10 jours du CEPMMT. Cette étude a porté sur les 10 jours d'échéance des prévisions de débits de SIM-CEPMMT, et les scores ont été calculés par rapport aux observations de débits.

Le RMSE, les BSS et les RPSS ont montré l'amélioration apportée par les deux configurations de l'assimilation pour tous les seuils par rapport à la prévision d'ensemble de SIM temps réel à 10 jours du CEPMMT. Le gain de l'assimilation des débits tend à diminuer avec l'échéance, l'expérience EI_1 donnant même des résultats moins bons que la prévision d'origine sur les 3 derniers jours. Cependant, cela semble s'expliquer par l'augmentation du score de cette prévision sans assimilation avec l'échéance, qui est due à une sur-estimation des précipitations du CEPMMT à moyenne échéance qui vient contre-balancer une sous-estimation des précipitations SAFRAN-analyse en temps réel. En ce qui concerne EI_2 , l'apport reste significatif même au bout de 10 jours d'échéance.

L'assimilation des débits dans SIM semble aussi améliorer certaines caractéristiques intrinsèques des prévisions d'ensemble hydrologiques, comme par exemple la résolution ou la fiabilité pour la plupart des seuils et échéances. Ceci indique que l'utilisation de ces prévisions d'ensemble peut se faire en ayant plus de confiance en ces prévisions.

Les taux de fausses alarmes, de réussite, de bonnes prévisions ainsi que de non-prévisions sont eux aussi globalement améliorés. Ces scores sont très utilisés par les prévisionnistes pour qualifier la qualité des prévisions qu'ils utilisent.

Enfin, l'assimilation est dans l'ensemble aussi efficace pour les bassins de petite taille que pour les bassins de grande taille. Cependant, on peut observer qu'au fil de l'échéance, les petits bassins semblent plus bénéficier de l'apport de la configuration EI_2 de l'assimilation que les grands bassins.

Néanmoins, toutes les caractéristiques des prévisions d'ensemble hydrologiques de SIM ne sont pas améliorées grâce à l'assimilation des débits. En effet, on a pu voir que la dispersion des membres n'était pas améliorée. Or, le manque de dispersion induit une sous-représentation de l'incertitude des prévisions d'ensemble. Cela est confirmé par les diagrammes de rang qui sont surpeuplés sur les extrêmes, et par les diagrammes de fiabilité qui sont éloignés de la diagonale, ainsi que par l'étude saisonnière de certains scores. Ce manque de dispersion semble un point important des prévisions d'ensemble SIM à améliorer pour avoir une meilleure qualité des prévisions.

7.3 Impact de l'assimilation des débits pour les prévisions d'ensemble à courte échéance

Cette partie traite de l'impact de l'assimilation des débits sur les prévisions d'ensemble à courte échéance. On a ici effectué une nouvelle comparaison des prévisions d'ensemble SIM-PEARP et SIM-CEPMMT sur les deux premiers jours, semblable à celle réalisée dans l'article *Thirel et al. (2008)*. Cependant, on a initialisé les prévisions d'ensemble par les états issus de EI_1 et EI_2 et on les a comparés aux prévisions d'ensemble sans assimilation, c'est-à-dire celles de l'article. Enfin, les scores statistiques présentés ici sont calculés par rapport à des observations de débits comme pour le paragraphe précédent, et non plus par rapport à des débits issus de SIM-analyse comme cela avait été le cas dans *Thirel et al. (2008)*.

7.3.1 Exemples de tracés de débits

On a tracé, dans un but illustratif, sur les figures 7.50, 7.51 et 7.52, les débits quotidiens d'ensemble utilisant la PEARP pour la Mayenne à Lhuisserie, ainsi que les débits d'analyse respectifs (sans assimilation, EI_1 et EI_2) et les observations.

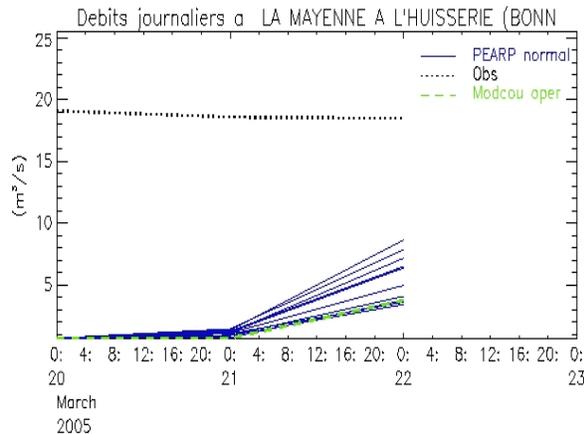


FIGURE 7.50 – Débits d'ensemble quotidiens de SIM-PEARP pour la Mayenne à l'Huisserie du 20 au 22 Mars 2005 sans assimilation.

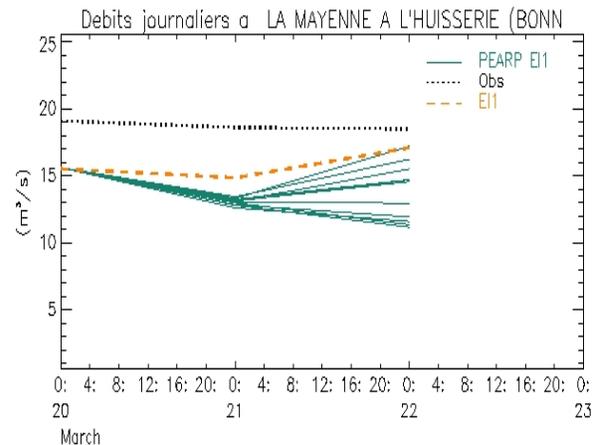


FIGURE 7.51 – Débits d'ensemble quotidiens de SIM-PEARP pour la Mayenne à l'Huisserie du 20 au 22 Mars 2005 avec les états assimilés EI_1 .

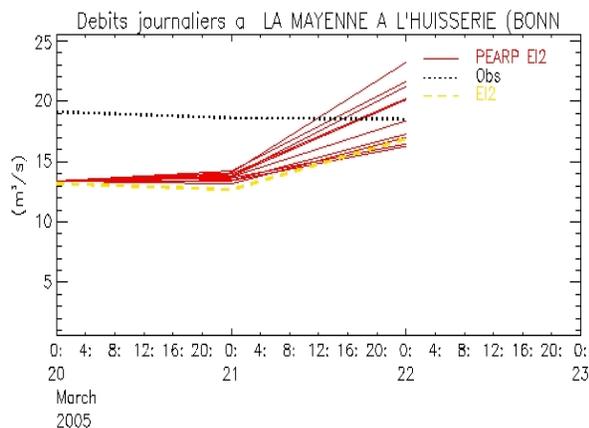


FIGURE 7.52 – Débits d'ensemble quotidiens de SIM-PEARP pour la Mayenne à l'Huisserie du 20 au 22 Mars 2005 avec les états assimilés EI_2 .

Ces figures montrent que pour les deux expériences avec assimilation, les débits d'analyse sont beaucoup plus proches des observations. Pour les débits d'ensemble, on a tracé pour le 20 Mars les débits des deux premières échéances (+3 et +6H) des prévisions, ramenées à l'échelle quotidienne. On voit que les débits d'ensemble utilisant des états initiaux assimilés, et donc meilleurs, sont nettement rapprochés des débits observés.

Enfin, il est important de noter que la dispersion pour ces deux premiers jours d'échéance semble rester faible.

7.3.2 Dispersion de l'ensemble et RMSE

On peut voir sur le tableau 7.4 la ratio-dispersion de chacune des 6 expériences considérées dans cette partie.

TABLE 7.4 – Ratio-dispersion (sans unité) des débits prévus pour les expériences sans assimilation, avec EI_1 et avec EI_2 , en utilisant l'EPS du CEPMMT et la PEARP.

Exp/Echéance	J1	J2
Sans assimilation CEPMMT	0.020	0.066
EI_1 CEPMMT	0.017	0.058
EI_2 CEPMMT	0.016	0.057
Sans assimilation PEARP	0.023	0.066
EI_1 PEARP	0.021	0.063
EI_2 PEARP	0.020	0.063

La ratio-dispersion de la PEARP est, pour chacun des cas et chacune des échéances, plus élevée que celle de l'EPS du CEPMMT. On peut aussi noter que la dispersion n'est pas ou peu influencée par l'assimilation dans le cas de la PEARP, alors que pour l'EPS du CEPMMT, la dispersion semble légèrement diminuer lorsqu'une assimilation des débits est utilisée.

Cependant, cette dispersion reste faible, même pour le cas de la PEARP.

Le tableau 7.5 montre les différents ratio-rmse pour les 6 expériences considérées.

TABLE 7.5 – Ratio-rmse (sans unité) des débits prévus pour les expériences sans assimilation, avec EI_1 et avec EI_2 , en utilisant l'EPS du CEPMMT et la PEARP.

Exp/Echéance	J1	J2
Sans assimilation CEPMMT	0.971	1.043
EI_1 CEPMMT	0.691	0.847
EI_2 CEPMMT	0.639	0.754
Sans assimilation PEARP	1.007	0.990
EI_1 PEARP	0.759	0.931
EI_2 PEARP	0.721	0.887

On peut voir sur ce tableau que les deux systèmes d'assimilation EI_1 et EI_2 diminuent considérablement le ratio-rmse des débits prévus. Cependant, si le ratio-rmse pour la prévision d'ensemble des débits utilisant l'EPS du CEPMMT sans assimilation de données était très proche du ratio-rmse pour la PEARP sans assimilation, la différence est assez importante en ce qui concerne les expériences avec assimilation. En effet, pour les deux échéances et les deux jeux d'états initiaux assimilés, l'EPS du CEPMMT a un meilleur ratio-rmse que la PEARP.

Ceci peut s'expliquer par le fait que les prévisions d'ensemble de débits utilisant la PEARP débutent à 1800 UTC. Donc, pour pouvoir mettre en place cette chaîne, on utilise les états d'ISBA (humidité et température du sol, ...) tels qu'ils existent chaque jour à 1800 UTC. De plus, on utilise les états initiaux MODCOU (eau en rivière) tels qu'ils existent à 2400 UTC, car il est impossible dans MODCOU d'isoler les états de 1800 UTC. En procédant comme cela, on crée une petite incohérence entre débits et humidité du sol.

7.3.3 Brier Skill Score et Ranked Probability Skill Score

Brier Skill Score

On a représenté l'évolution du BSS pour SIM-PEARP pour le jour 1 (figure 7.53) et pour le jour 2 (figure 7.54). Les expériences sans ou avec assimilation (EI_1 et EI_2) sont tracées pour l'ensemble des 15 seuils définis auparavant dans ce manuscrit.

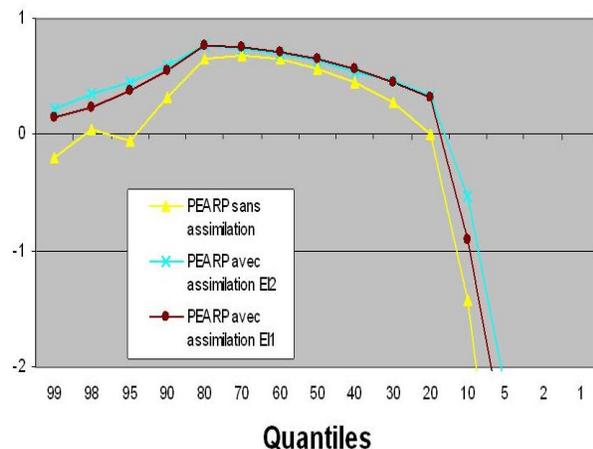


FIGURE 7.53 – Brier Skill Scores en fonction des seuils pour le premier jour de prévision de SIM-PEARP, sans assimilation (jaune), avec assimilation EI_1 (marron) et avec assimilation EI_2 (bleu).

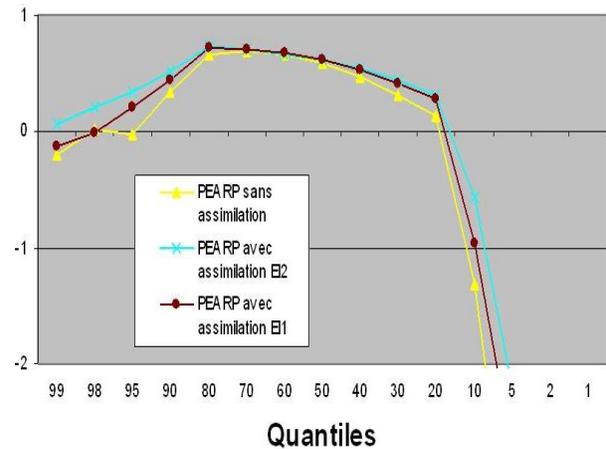


FIGURE 7.54 – Brier Skill Scores en fonction des seuils pour le second jour de prévision de SIM-PEARP, sans assimilation (jaune), avec assimilation EI_1 (marron) et avec assimilation EI_2 (bleu).

L'interprétation de ces deux graphes est assez semblable à celle effectuée dans le cas de SIM-CEPMMT dans la partie précédente. En effet, on peut voir que pour le jour 1, l'expérience utilisant les états initiaux EI_2 donne les meilleurs résultats pour tous les seuils, même si EI_1 a des résultats très proches en particulier pour les seuils Q20 à Q80 (mais les différences sont significatives excepté pour les seuils Q95 et Q80). Les scores pour les expériences avec assimilation sont positifs pour tous les seuils supérieurs ou égaux au Q20. L'amélioration du BSS semble importante par rapport à l'expérience sans assimilation, plus particulièrement pour les très forts débits pour lesquels les scores étaient très légèrement négatifs (différences significatives dans l'ensemble excepté pour Q2 et Q95).

En revanche pour le jour 2, l'amélioration apportée par l'assimilation est moins importante, en particulier pour l'expérience EI_1 dont le BSS est plus proche de l'expérience sans assimilation (différence non significative pour Q98, Q50 et Q2). Pour cette expérience, le BSS

devient même négatif pour le Q99 et le Q98.

On a représenté sur les figures 7.55 et 7.56 le Brier Skill Score pour SIM-PEARP et SIM-CEPMMT initialisés par les états assimilés EI_2 , c'est-à-dire les meilleurs états initiaux possibles. Les deux jours d'échéance commune sont représentés.

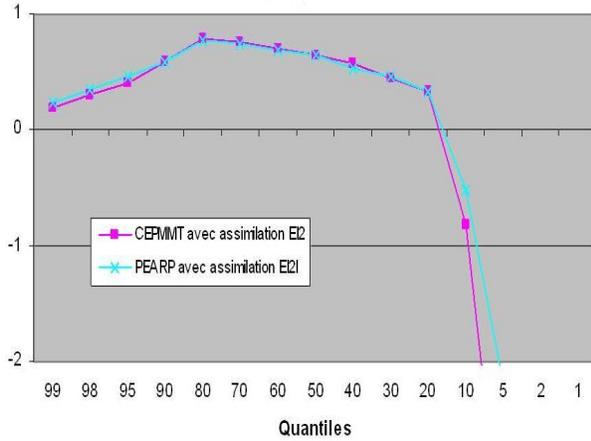


FIGURE 7.55 – Brier Skill Scores en fonction des seuils pour le premier jour de prévision avec assimilation EI_2 pour SIM-PEARP (bleu) et pour SIM-CEPMMT (rose).

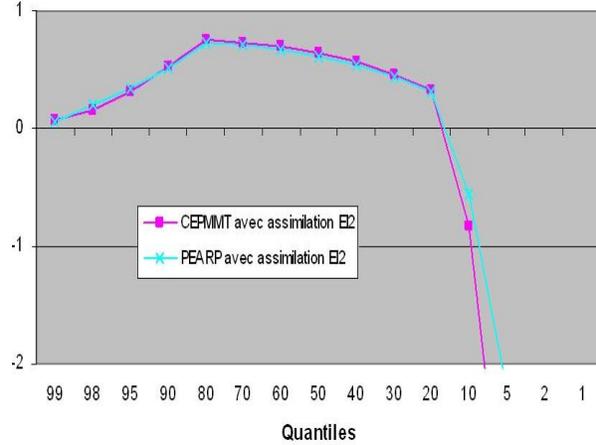


FIGURE 7.56 – Brier Skill Scores en fonction des seuils pour le second jour de prévision avec assimilation EI_2 pour SIM-PEARP (bleu) et pour SIM-CEPMMT (rose).

On peut voir sur la figure 7.55 que la PEARP donne les meilleurs résultats pour les seuils extrêmes, alors que le CEPMMT est meilleur pour les quantiles moyens Q40 à Q80. Cependant, la différence entre les deux systèmes reste très faible. Pour le second jour, la PEARP semble se dégrader très légèrement plus que le CEPMMT, qui est le meilleur pour les seuils Q40 à Q90. Toutes ces différences sont significatives selon le test de ré-échantillonnage, excepté pour le Q2.

Précisons aussi que le BSS a été débiaisé (*Weigel et al. (2006)*), ce qui a pour effet d'augmenter le score de manière d'autant plus importante que le nombre de membres est faible, et que le BSS non-débiaisé est faible. Cela augmente donc davantage le BSS de SIM-PEARP.

Ranked Probability Skill Score

On peut voir sur le tableau 7.6 l'amélioration apportée par l'assimilation de données aux prévisions d'ensemble de débits issues de la PEARP et du CEPMMT pour les deux premiers jours d'échéance.

En effet, on peut observer un gain de 0.26 en RPSS pour le CEPMMT (échéance 1) avec EI_1 par rapport à l'expérience sans assimilation, et de 0.32 pour EI_2 . Pour le jour 2, les gains sont de 0.19 et 0.29 respectivement. Pour la PEARP, le gain est de 0.22 pour EI_1 et 0.26 pour EI_2 le jour 1, et, respectivement, de 0.12 et 0.19 pour le jour 2. On peut donc voir que le gain est plus important pour le CEPMMT que pour la PEARP. Cependant, le RPSS sans assimilation était plus faible pour le CEPMMT, ce qui a facilité son augmentation. Les différences, pour chacune des expériences PEARP entre elles, pour chacune des expériences CEPMMT

TABLE 7.6 – RPSS pour les expériences sans assimilation, avec EI_1 et avec EI_2 , en utilisant l'EPS du CEPMMT et la PEARP.

Exp/Echéance	J1	J2
Sans assimilation CEPMMT	0.125	0.114
EI_1 CEPMMT	0.386	0.304
EI_2 CEPMMT	0.442	0.400
Sans assimilation PEARP	0.227	0.245
EI_1 PEARP	0.448	0.367
EI_2 PEARP	0.493	0.432

entre elles, et entre EI_2 CEPMMT et EI_2 PEARP, sont toutes pleinement significatives (100% de significativité selon le test de ré-échantillonnage).

Il est important de remarquer que le RPSS est supérieur (pour chacune des expériences) pour la PEARP par rapport au CEPMMT. Cela était déjà légèrement le cas pour le BSS. Cependant, on a observé que, pour le RMSE, le CEPMMT obtenait le plus faible (et donc le meilleur) score. Cette différence entre le BSS et le RPSS d'un côté, et le RMSE de l'autre côté, pourrait sembler surprenante, cependant il faut se rappeler que le BSS et le RPSS sont débiaisés grâce à la méthode de *Weigel et al. (2006)*. Ce débiaisage a pour effet d'augmenter ces deux scores probabilistes de manière d'autant plus importante que le nombre de membres de l'ensemble est faible. Ainsi, les scores de la PEARP sont plus impactés (positivement) par ce débiaisage que ceux du CEPMMT. Enfin, ce débiaisage est aussi d'autant plus important que le score initial est faible (ce qui est le cas ici par rapport aux scores obtenus dans *Thirel et al. (2008)* qui étaient comparés à SIM-analyse, et donc élevés). On peut donc dire que le débiaisage de *Weigel et al. (2006)* change dans notre cas la hiérarchie des deux systèmes, en nous indiquant que si la PEARP et le CEPMMT avaient le même nombre de membres (nombre infini en théorie), SIM-PEARP serait légèrement plus performant que SIM-CEPMMT.

7.3.4 Décomposition du score de Brier

Résolution

On a représenté sur les figures 7.57 et 7.58 la résolution pour la PEARP (respectivement jour 1 et jour 2) concernant les expériences sans assimilation et avec les états EI_1 et EI_2 . On peut voir une augmentation (et donc amélioration) assez importante de la résolution pour le premier jour d'échéance pour les seuils moyens quand l'assimilation des débits est utilisée. L'expérience EI_1 semble très légèrement meilleure que l'expérience EI_2 pour certains seuils. Pour le second jour d'échéance, l'amélioration apportée par l'assimilation est plus faible, et concentrée sur les seuils Q10 à Q50.

Si l'on compare les prévisions d'ensemble de débits issues du CEPMMT et de la PEARP utilisant les états assimilés EI_2 (représentées sur les figures 7.59 pour le jour 1 et 7.60 pour le jour 2), on peut voir que la résolution est plus élevée pour le CEPMMT pour tous les seuils. Cette différence est encore plus importante pour le second jour d'échéance des prévisions, et

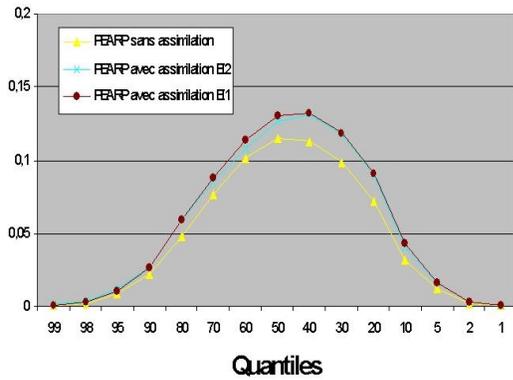


FIGURE 7.57 – Résolution en fonction des seuils pour le premier jour de prévision de SIM-PEARP, sans assimilation (jaune), avec assimilation EI_1 (marron) et avec assimilation EI_2 (bleu).

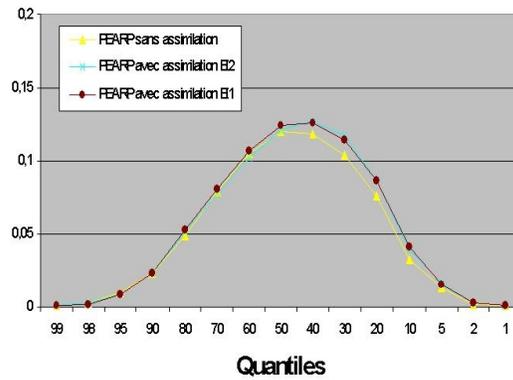


FIGURE 7.58 – Résolution en fonction des seuils pour le deuxième jour de prévision de SIM-PEARP, sans assimilation (jaune), avec assimilation EI_1 (marron) et avec assimilation EI_2 (bleu).

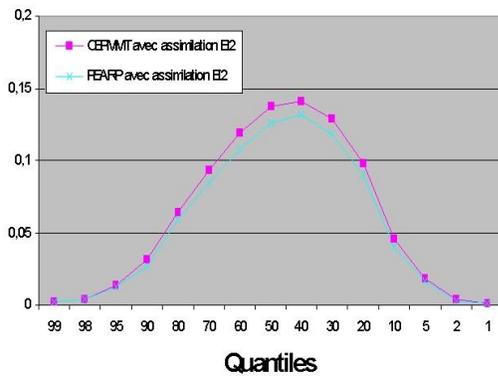


FIGURE 7.59 – Résolution en fonction des seuils pour le premier jour de prévision avec assimilation EI_2 pour SIM-PEARP (bleu) et pour SIM-CEPMMT (rose).

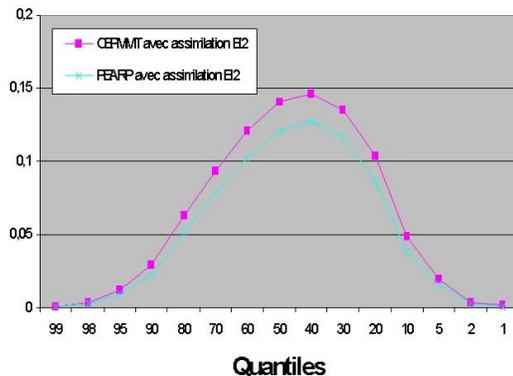


FIGURE 7.60 – Résolution en fonction des seuils pour le deuxième jour de prévision avec assimilation EI_2 pour SIM-PEARP (bleu) et pour SIM-CEPMMT (rose).

surtout pour les seuils médians.

Fiabilité

On a représenté sur les figures 7.61 et 7.62 la fiabilité pour SIM-PEARP (respectivement jour 1 et jour 2) concernant les expériences sans assimilation et avec les états EI_1 et EI_2 .

On peut voir une diminution (et donc amélioration) assez importante de la fiabilité pour le premier jour d'échéance quand l'assimilation des débits est utilisée. Cette amélioration est plus sensible pour les plus petits seuils, où le score était déjà à l'origine le moins bon. L'expérience EI_1 semble très proche de l'expérience EI_2 pour les seuils Q20 à Q99, mais l'expérience EI_2 est incontestablement meilleure pour les seuils Q1 à Q10. Pour le second jour d'échéance, l'amélioration apportée par l'assimilation est plus faible, mais reste sensible pour tous les seuils considérés.

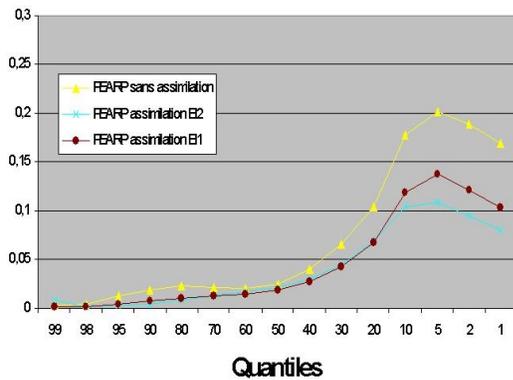


FIGURE 7.61 – Fiabilité en fonction des seuils pour le premier jour de prévision de SIM-PEARP, sans assimilation (jaune), avec assimilation EI_1 (marron) et avec assimilation EI_2 (bleu).

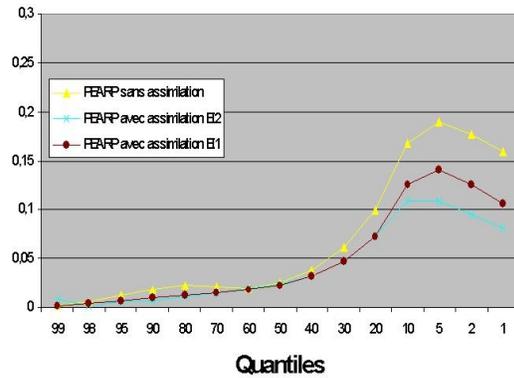


FIGURE 7.62 – Fiabilité en fonction des seuils pour le deuxième jour de prévision de SIM-PEARP, sans assimilation (jaune), avec assimilation EI_1 (marron) et avec assimilation EI_2 (bleu).

Si l'on s'intéresse à une comparaison entre SIM-CEPMMT et SIM-PEARP pour l'expérience EI_2 (figure 7.63 pour le premier jour, et figure 7.64 pour le second jour), on voit que la fiabilité est très proche pour les deux systèmes de prévisions et pour tous les seuils. On peut uniquement noter le très léger meilleur comportement de la PEARP pour les seuils Q30 à Q80 pour le second jour de prévision.

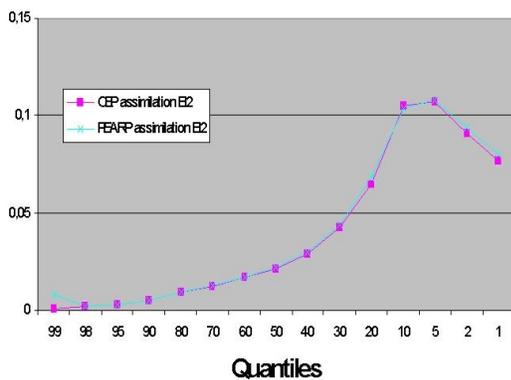


FIGURE 7.63 – Fiabilité en fonction des seuils pour le premier jour de prévision avec assimilation EI_2 pour SIM-PEARP (bleu) et pour SIM-CEPMMT (rose).

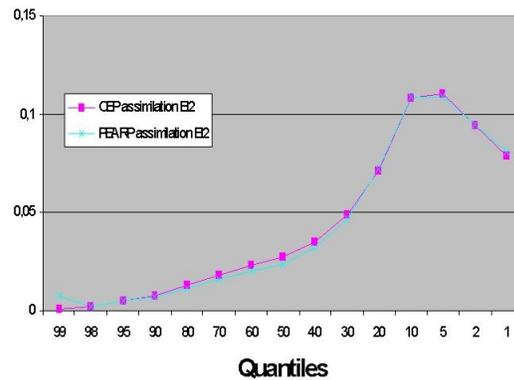


FIGURE 7.64 – Fiabilité en fonction des seuils pour le deuxième jour de prévision avec assimilation EI_2 pour SIM-PEARP (bleu) et pour SIM-CEPMMT (rose).

Incertitude

Pour l'incertitude, comme elle est indépendante du système de prévisions, se reporter à la partie sur l'apport de l'assimilation sur la prévision d'ensemble à 10 jours du CEPMMT. Ici encore, les (non-)dépassements de seuils les plus difficiles à prévoir sont situés pour des seuils moyens.

7.3.5 Diagrammes de rang

On s'est intéressé aux diagrammes de Talagrand pour les prévisions d'ensemble de débits basées sur la PEARP et sur le CEPMMT, pour les états initiaux EI_1 , EI_2 et sans assimilation, et pour les deux jours d'échéances. Cependant, comme entre les différentes expériences et les différents systèmes de prévisions d'ensemble, les résultats étaient très semblables, on n'a représenté ici que le cas de SIM-PEARP, pour les deux jours d'échéance, utilisant les états assimilés EI_2 (figure 7.65).

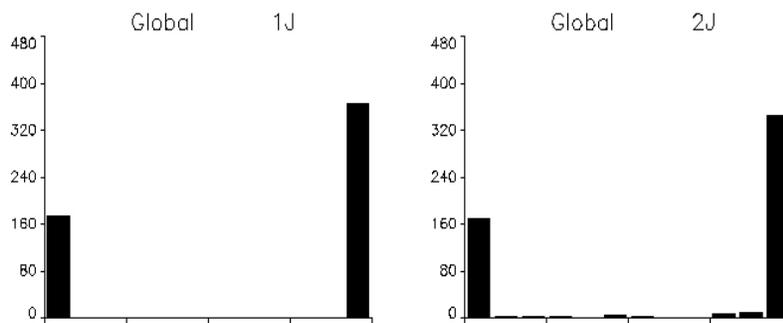


FIGURE 7.65 – Diagrammes de rang de la prévision d'ensemble hydrologique basée sur la PEARP avec les états assimilés EI_2 pour le premier jour d'échéance (à gauche) et pour le second jour (à droite). En ordonnée, le nombre d'utilisation de chaque rang.

Les caractéristiques de ces diagrammes de rang sont donc les mêmes pour chacun des cas (avec ou sans assimilation des débits, utilisant l'EPS du CEPMMT ou bien la PEARP, et pour le jour 1 ou le jour 2), à savoir une très nette surpopulation des extrêmes. Le second jour, les rangs centraux sont très légèrement plus peuplés que le premier jour, mais les diagrammes gardent une forme en "J", indiquant une sur-estimation des débits par SIM.

L'assimilation des débits change très peu les diagrammes de rang. Enfin, il semblerait que l'EPS du CEPMMT donne des diagrammes de rang avec encore moins de cas en ce qui concerne les rangs centraux.

7.3.6 Diagrammes de fiabilité

Les diagrammes de fiabilité montrent que l'assimilation de débits rapproche les courbes de la diagonale (qui représente le cas où les fréquences prévues sont les fréquences observées) pour la PEARP par rapport à la prévision sans assimilation de débits. C'est aussi le cas avec l'échéance qui améliore ces diagrammes. L'expérience EI_2 semble donner de meilleurs diagrammes que l'expérience EI_1 . Cependant, tous ces diagrammes ne sont pas parfaits pour autant, les événements prévus avec des fréquences différentes ayant tendance à correspondre à des observations de fréquence équivalente.

On a représenté dans cette partie les diagrammes de fiabilité pour les expériences EI_2 utilisant les prévisions d'ensemble de la PEARP et du CEPMMT, pour les deux jours d'échéance.

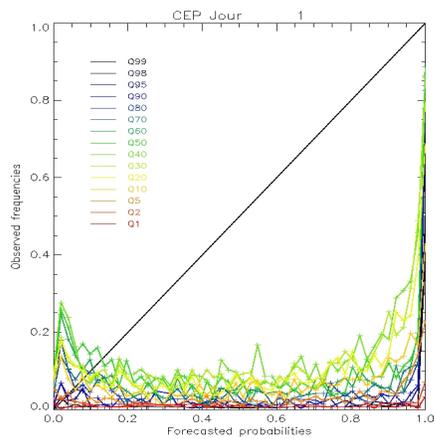


FIGURE 7.66 – Diagramme de fiabilité pour SIM-CEPMMT pour l'expérience EI_2 (jour 1).

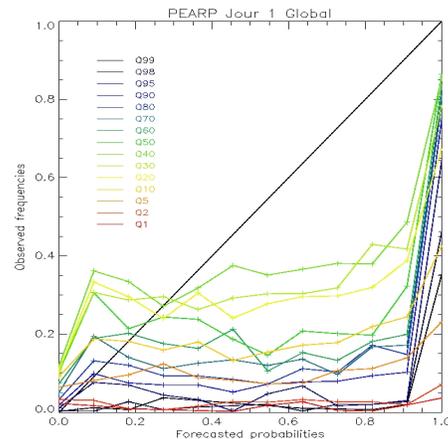


FIGURE 7.67 – Diagramme de fiabilité pour SIM-PEARP pour l'expérience EI_2 (jour 1).

Les diagrammes de fiabilité pour le premier jour d'échéance montrent que pour chacun des seuils, le système SIM-CEPMMT (figure 7.66) prévoit des fréquences différentes pour des évènements qui ne sont observés qu'à une seule fréquence fixe (moins de 10% du temps). On ne peut donc avoir que peu de confiance en une telle prévision.

Pour la PEARP, SIM montre des diagrammes un peu plus rapprochés de la diagonale pour le jour 1 (figure 7.67). Cependant, là aussi les fréquences d'observations restent relativement constantes.

On note que pour les deux systèmes, les courbes les plus proches se situent pour les seuils moyens (de Q20 à Q70 environ).

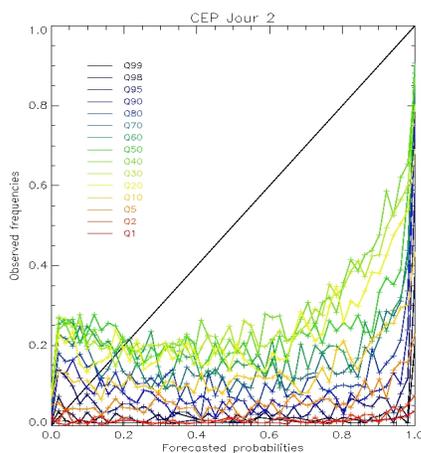


FIGURE 7.68 – Diagramme de fiabilité pour SIM-CEPMMT pour l'expérience EI_2 (jour 2).

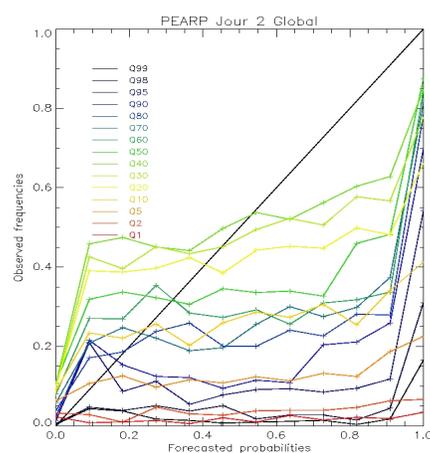


FIGURE 7.69 – Diagramme de fiabilité pour SIM-PEARP pour l'expérience EI_2 (jour 2).

Les diagrammes de fiabilité pour le second jour d'échéance montrent des courbes beaucoup plus proches de la diagonale, que ce soit pour SIM-CEPMMT (figure 7.68) ou pour

SIM-PEARP (figure 7.69). Cependant, là encore les prévisions d'ensemble de débits peinent à prévoir des probabilités de (non-)dépassements de seuils justes.

7.3.7 Taux de succès, fausses alarmes, bonnes prévisions, non prévisions et courbes de ROC

En raison du nombre très important de courbes qui pourraient être montrées ici, on a dû effectuer un choix afin de ne sélectionner que les plus pertinentes d'entre elles. Nous allons présenter ici les taux pour SIM-PEARP et SIM-CEPMMT pour les deux jours d'échéance et en utilisant un pourcentage de 90% des membres pour définir un dépassement de seuil. Il y aura un graphe par état initial utilisé (sans assimilation, avec EI_1 et avec EI_2).

Taux de succès (Hit Rate)

On a représenté les taux de succès pour l'expérience sans assimilation (figure 7.70), avec les états initiaux EI_1 (figure 7.71) et avec les états initiaux EI_2 (figure 7.72).

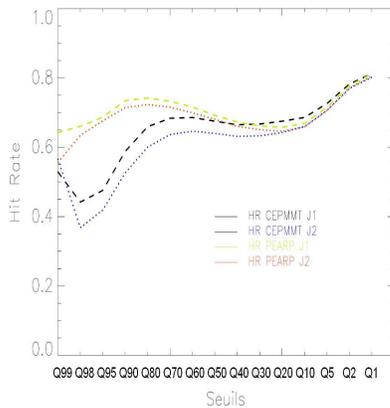


FIGURE 7.70 – Taux de succès de SIM-PEARP sans assimilation.

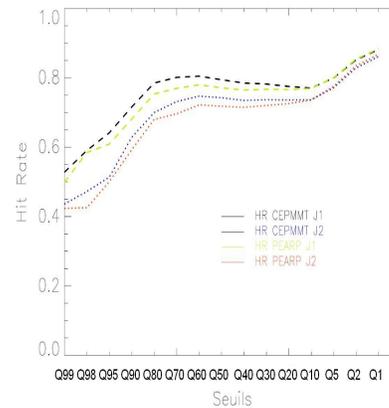


FIGURE 7.71 – Taux de succès de SIM-PEARP pour l'expérience EI_1 .

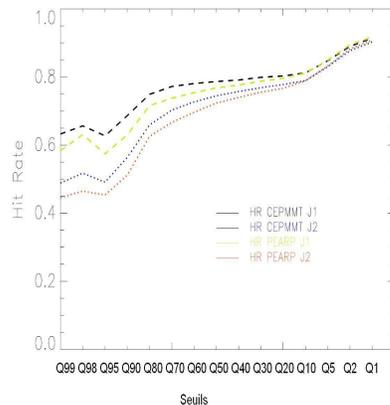


FIGURE 7.72 – Taux de succès de SIM-PEARP pour l'expérience EI_2 .

Sur ces figures ont été tracés les taux de succès pour SIM-PEARP et SIM-CEPMMT pour

les deux jours d'échéance.

Ces taux de réussite sont plus élevés pour les non-dépassements des seuils les plus faibles quelle que soit l'expérience d'assimilation ou la prévision d'ensemble météorologique utilisées. Si l'apport des états initiaux EI_1 est plus important pour les faibles débits, les états initiaux EI_2 améliorent la prévision pour l'ensemble de la gamme des seuils considérés. Les taux de réussite sont situés au-dessus des 60% pour tous les seuils, excepté les plus forts (au-dessus du Q80).

Enfin, on peut remarquer que SIM-CEPMMT est beaucoup plus amélioré par l'assimilation des débits que SIM-PEARP. En effet, sans assimilation, les deux jours d'échéance de SIM-PEARP obtenaient un plus fort taux de réussite que SIM-CEPMMT. En revanche, avec assimilation, le premier jour d'échéance de SIM-CEPMMT est meilleur que le premier jour d'échéance de SIM-PEARP, et le second jour de prévisions de SIM-CEPMMT est meilleur que le second jour de SIM-PEARP. Ceci est encore plus visible pour les états initiaux EI_2 que pour les états EI_1 .

Taux de fausses alarmes

On a représenté les taux de fausses alarmes pour l'expérience sans assimilation (figure 7.73), avec les états initiaux EI_1 (figure 7.74) et avec les états initiaux EI_2 (figure 7.75).

Les taux de fausses alarmes restent assez faibles pour les deux systèmes (inférieurs à 20% pour la plupart des seuils). Cependant, ce taux est plus élevé pour les dépassements des seuils les plus forts. On peut voir que l'assimilation de données améliore le taux de fausses alarmes pour les seuils supérieurs au Q80, et plus particulièrement pour le premier jour d'échéance.

SIM-PEARP et SIM-CEPMMT semblent très proches, que ce soit avec ou sans assimilation.

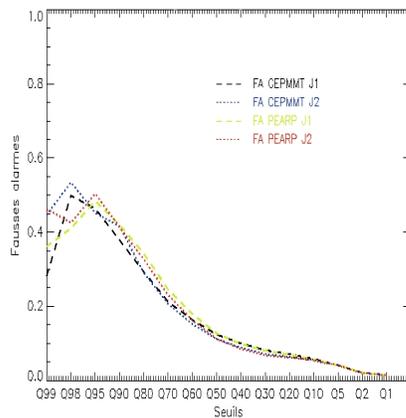


FIGURE 7.73 – Taux de fausses alarmes de SIM-PEARP pour l'expérience sans assimilation.

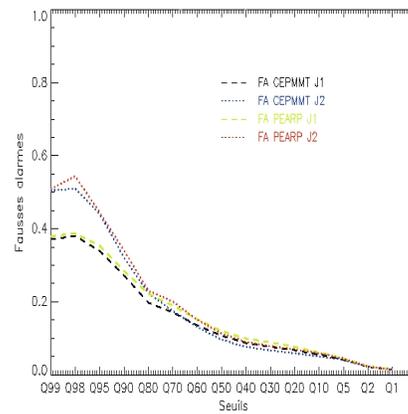


FIGURE 7.74 – Taux de fausses alarmes de SIM-PEARP pour l'expérience avec états assimilés EI_1 .

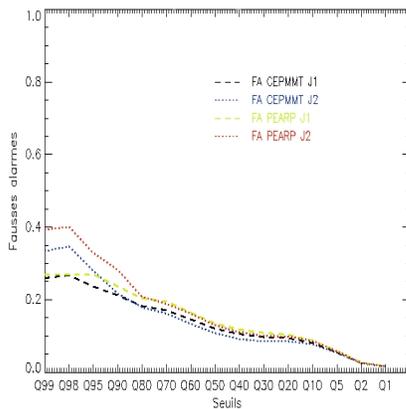


FIGURE 7.75 – Taux de fausses alarmes de SIM-PEARP pour l'expérience avec états assimilés EI_2 .

Taux de bonnes prévisions

On a représenté les taux de bonnes prévisions pour l'expérience sans assimilation (figure 7.76), avec les états initiaux EI_1 (figure 7.77) et avec les états initiaux EI_2 (figure 7.78).

Toutes les courbes, que ce soit pour le jour 1 ou le jour 2 de prévisions, ou quelle que soit la prévision d'ensemble météorologique utilisée, sont très proches les unes des autres. On observe les plus forts taux de bonnes prévisions pour les dépassements des seuils les plus élevés, alors que ce score est moins bon pour les non-dépassements des seuils faibles. Globalement, ce score est très bon pour l'ensemble des seuils considérés ($> 70\%$). Les taux de bonnes prévisions sont améliorés par l'assimilation des débits dans SIM, les états initiaux EI_2 donnant la plus grande amélioration.

Si les deux systèmes de prévisions d'ensemble (PEARP et l'EPS du CEPMMT) sont équivalents sans assimilation, SIM-CEPMMT semble bénéficier légèrement plus de l'apport de l'assimilation de données pour les deux jours d'échance par rapport à SIM-PEARP.

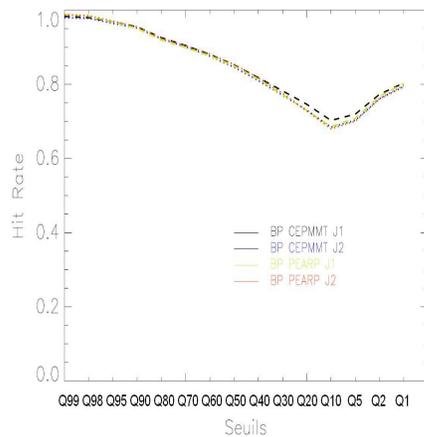


FIGURE 7.76 – Taux de bonnes prévisions de SIM-PEARP pour l'expérience sans assimilation.

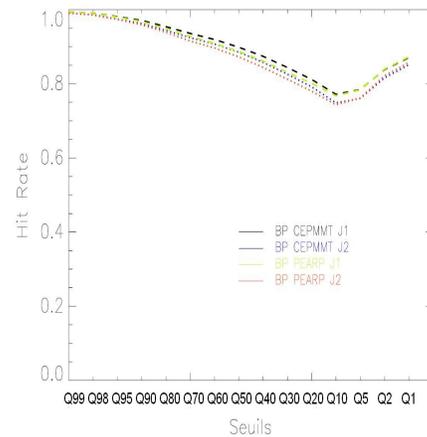


FIGURE 7.77 – Taux de bonnes prévisions de SIM-PEARP pour l'expérience avec états assimilés EI_1 .

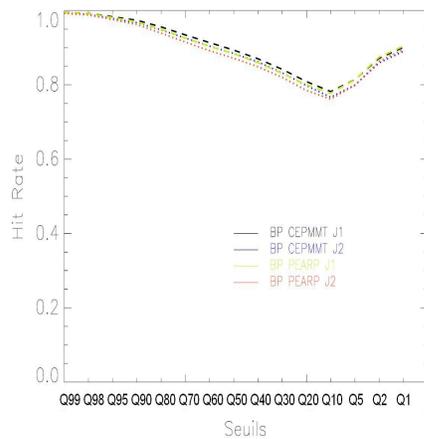


FIGURE 7.78 – Taux de bonnes prévisions de SIM-PEARP pour l'expérience avec états assimilés EI_2 .

Taux de non prévisions

On a représenté les taux de non prévisions pour l'expérience sans assimilation (figure 7.79), avec les états initiaux EI_1 (figure 7.80) et avec les états initiaux EI_2 (figure 7.81).

Les taux de non prévisions les plus élevés se situent pour les seuils les plus forts, avec des valeurs pouvant dépasser les 40% à partir du Q80. Encore une fois, on remarque que, si pour l'expérience sans assimilation, SIM-PEARP a le meilleur taux de non prévisions, pour les expériences avec assimilation c'est SIM-CEPMMT. De plus, on peut voir que l'assimilation de données dégrade ce score pour SIM-PEARP pour les seuils les plus élevés, alors qu'elle l'améliore pour SIM-CEPMMT pour tous les seuils.

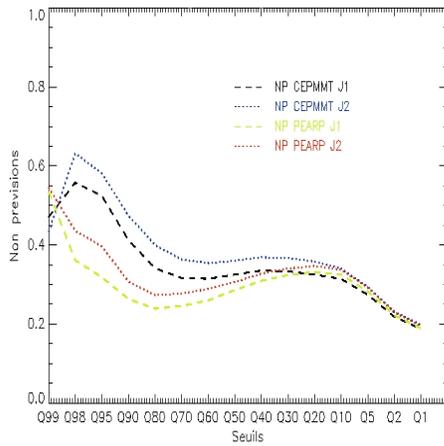


FIGURE 7.79 – Taux de non prévisions de SIM-PEARP pour l'expérience sans assimilation.

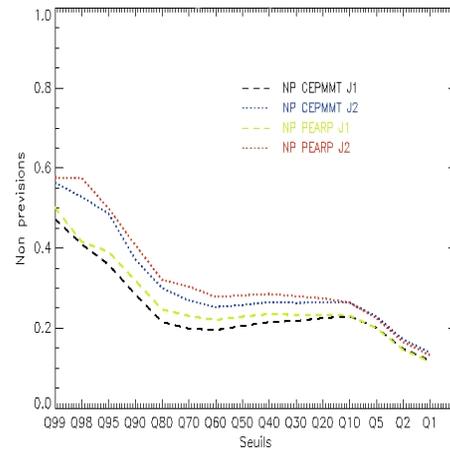


FIGURE 7.80 – Taux de non prévisions de SIM-PEARP pour l'expérience avec états assimilés EI_1 .

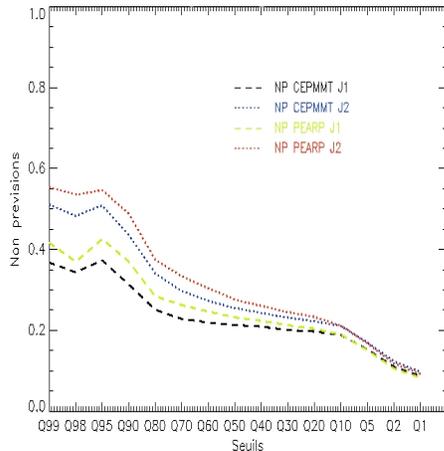


FIGURE 7.81 – Taux de non prévisions de SIM-PEARP pour l'expérience avec états assimilés EI_2 .

Courbes de ROC

On ne va représenter ici les courbes de ROC que pour le premier jour de prévision. Les courbes de ROC pour les expériences sans assimilation sont représentées figure 7.82 (SIM-PEARP) et figure 7.83 (SIM-CEPMMT). Les courbes de ROC pour les expériences utilisant les états initiaux EI_1 sont représentées figure 7.84 (SIM-PEARP) et figure 7.85 (SIM-CEPMMT). Enfin, les courbes de ROC pour les expériences utilisant les états initiaux EI_2 sont représentées figure 7.86 (SIM-PEARP) et figure 7.87 (SIM-CEPMMT).

On peut voir que les seuils pour lesquels les courbes de ROC sont les meilleures (c'est-à-dire combinant les meilleurs taux de fausses alarmes et de réussite) sont les seuils les plus faibles. Dans l'ensemble, les courbes sont assez proches du coin supérieur gauche qui représente une prévision parfaite. En ce qui concerne les dépassements des seuils les plus élevés, les taux de fausses alarmes sont les plus élevés alors que les taux de réussite sont

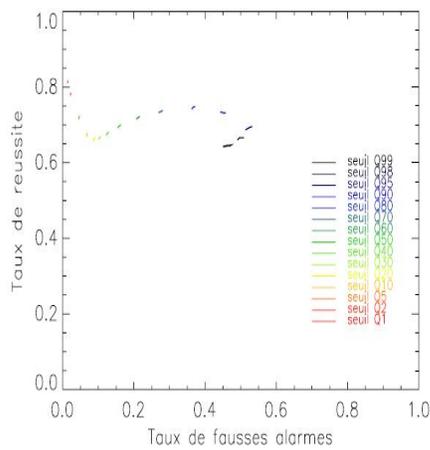


FIGURE 7.82 – Courbes de ROC de SIMPEARP pour l'expérience sans assimilation (jour 1).

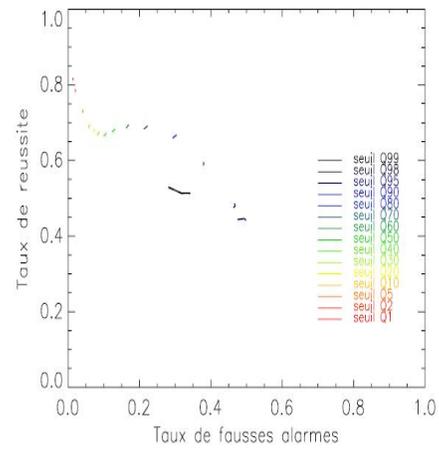


FIGURE 7.83 – Courbes de ROC de SIMCEPMMT pour l'expérience sans assimilation (jour 1).

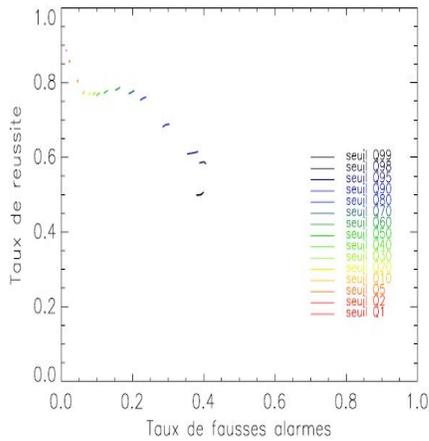


FIGURE 7.84 – Idem que ci-dessus pour l'expérience EI_1 .

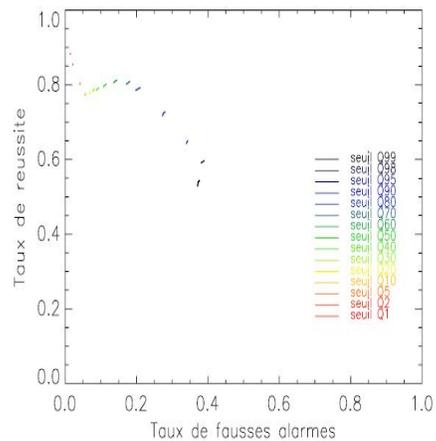


FIGURE 7.85 – Idem que ci-dessus pour l'expérience EI_1 .

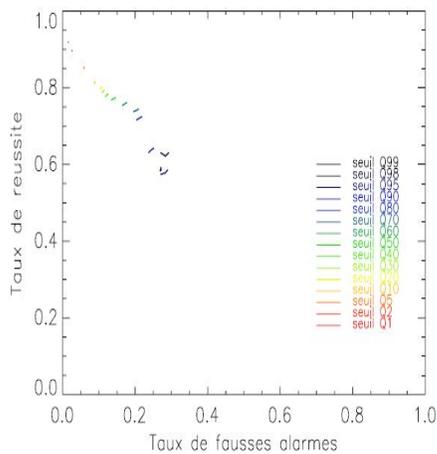


FIGURE 7.86 – Idem que ci-dessus pour l'expérience EI_2 .

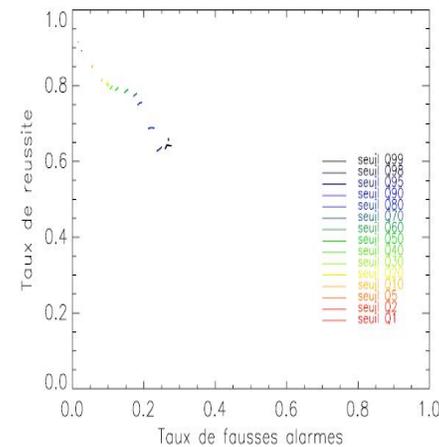


FIGURE 7.87 – Idem que ci-dessus pour l'expérience EI_2 .

les plus faibles. Les non-dépassements des seuils les plus faibles sont caractérisés par peu de fausses alarmes, et un taux de réussite assez élevé.

Une nouvelle fois, si SIM-PEARP semble légèrement meilleur sans assimilation, l'assimilation des débits dans SIM avantage SIM-CEPMMT par rapport à SIM-PEARP. Enfin, on remarque que l'apport de l'assimilation est particulièrement sensible en ce qui concerne les forts débits, notamment par le biais d'une réduction forte des taux de fausses alarmes, et que pour les autres seuils, l'amélioration est plus faible, mais reste significative.

7.3.8 Scores par taille de bassin

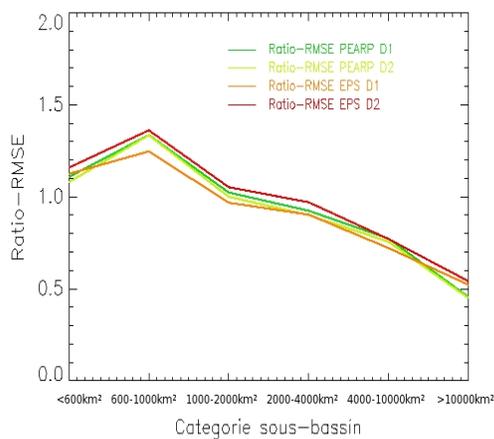


FIGURE 7.88 – Ratio-rmse pour l'expérience sans assimilation en fonction des tailles des bassins.

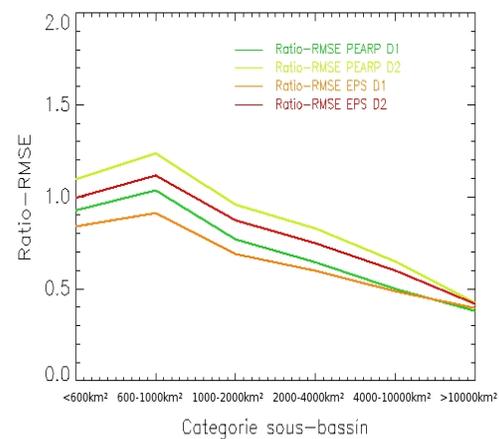


FIGURE 7.89 – Ratio-rmse pour l'expérience EI_1 en fonction des tailles des bassins.

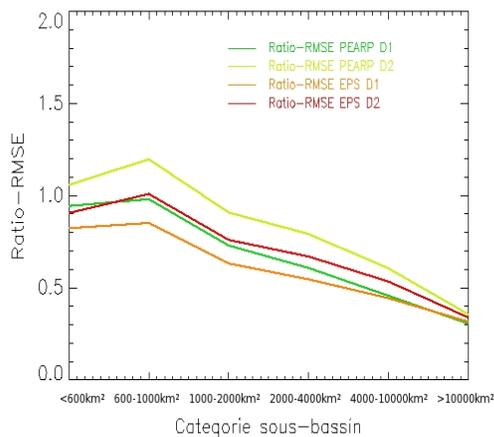


FIGURE 7.90 – Ratio-rmse pour l'expérience EI_2 en fonction des tailles des bassins.

Les figures 7.88, 7.89 et 7.90 représentent le Ratio-RMSE des prévisions d'ensemble de

débits par rapport aux tailles des bassins.

Comme pour le Ratio-rmse de SIM-CEPMMT à 10 jours d'échéance, le Ratio-rmse décroît avec la taille des bassins considérés, et il est amélioré de manière équivalente selon la taille des bassins pour les premiers jours d'échéance. Enfin, les états initiaux EI_2 sont légèrement plus efficaces que les états initiaux EI_1 pour les premières échéances, et pour toutes les tailles de bassins.

Les expériences sans assimilation montrent que SIM-PEARP et SIM-CEPMMT ont des Ratio-rmse très proches l'un de l'autre pour les deux jours d'échéance. Cependant, les deux cas utilisant les états assimilés EI_1 et EI_2 donnent des Ratio-rmse légèrement plus faibles dans le cas de l'EPS du CEPMMT que dans le cas de la PEARP. Ceci est particulièrement vrai pour les bassins de plus petite taille. Cela montre que l'assimilation semble plus efficace (pour ce score tout du moins) pour le système SIM-CEPMMT que pour le système SIM-PEARP.

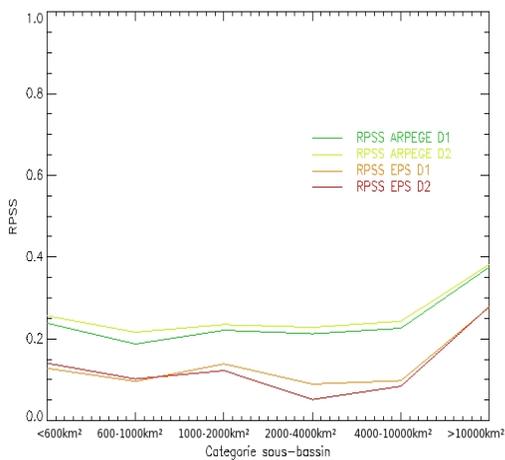


FIGURE 7.91 – RPSS sans assimilation en fonction des tailles des bassins.

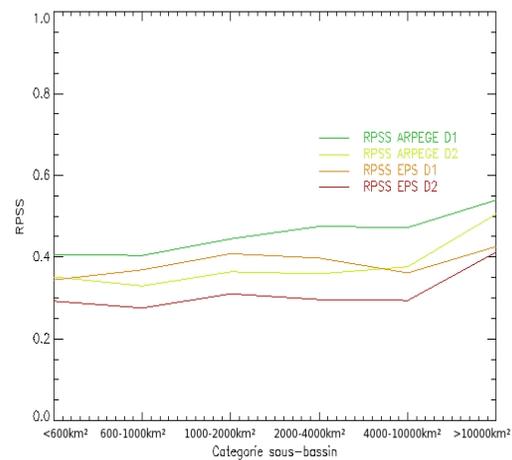


FIGURE 7.92 – RPSS pour l'expérience EI_1 en fonction des tailles des bassins.

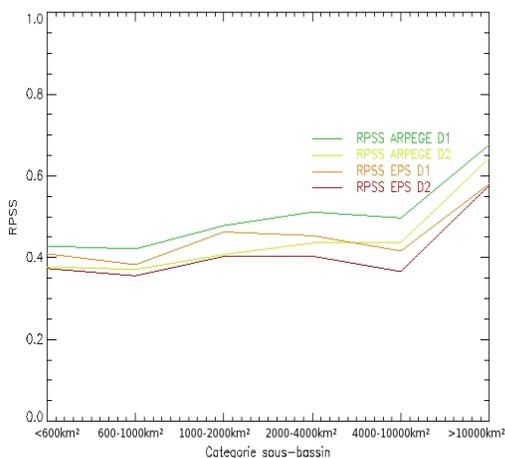


FIGURE 7.93 – RPSS pour l'expérience EI_2 en fonction des tailles des bassins.

Les figures 7.91, 7.92 et 7.93 représentent l'évolution du RPSS en fonction des tailles

des bassins. Le RPSS semble indépendant de la taille des bassins, excepté pour la catégorie comprenant les plus grands bassins, dont le score est plus élevé. Cependant, cette catégorie ne comporte que 12 bassins, ce qui est faible et peut biaiser la moyenne de ce score. Il n'y a donc pas de catégorie de bassin pour laquelle l'assimilation des débits dans SIM semble apporter de meilleurs résultats.

On voit nettement que si aucune assimilation des débits n'est utilisée, SIM-PEARP a un meilleur RPSS pour ses deux échéances que SIM-CEPMMT pour l'ensemble des tailles des bassins, le second jour de SIM-PEARP étant même meilleur que le premier jour de SIM-CEPMMT. Pour les expériences utilisant les états assimilés, la différence est moins importante, cependant le premier (resp. second) jour de SIM-PEARP est meilleur que le premier (resp. second) jour de SIM-CEPMMT. Notons tout de même que sans débiaisage du RPSS par la méthode de *Weigel et al. (2006)*, SIM-CEPMMT serait alors plus performant que SIM-PEARP.

7.3.9 Scores par saison

On s'est de nouveau intéressé à la différenciation de quelques scores selon la saison. On a distingué deux périodes : l'été et l'hiver. L'été comprend (sur notre période) 365 jours, à savoir les mois d'avril à septembre en 2005 et 2006. L'hiver, quant à lui, comprend le mois de mars 2005, et les mois d'octobre 2005 à mars 2006 (204 jours).

Les tableaux 7.7 et 7.8 représentent le RPSS pour l'été et l'hiver respectivement.

TABLE 7.7 – RPSS pour les trois expériences pour l'été.

PEARP	J1	J2	CEPMMT	J1	J2
Sans assimilation	0.133	0.147	Sans assimilation	-0.135	-0.126
EI_1	0.318	0.252	EI_1	0.117	0.033
EI_2	0.392	0.342	EI_2	0.239	0.205

TABLE 7.8 – RPSS pour les trois expériences pour l'hiver.

PEARP	J1	J2	CEPMMT	J1	J2
Sans assimilation	0.173	0.199	Sans assimilation	0.056	0.008
EI_1	0.478	0.372	EI_1	0.416	0.302
EI_2	0.497	0.427	EI_2	0.456	0.387

On remarque tout d'abord que les scores sont meilleurs l'hiver que l'été pour les 2 jours d'échéance quand l'assimilation de données est utilisée. Cette particularité était déjà visible pour SIM-CEPMMT à 10 jours, mais l'est aussi pour SIM-PEARP. Cela peut s'expliquer par les difficultés que peut avoir l'assimilation de données à améliorer les faibles débits en modifiant l'humidité du sol. En effet, l'amélioration du RPSS est bien plus importante l'hiver que

l'été, quel que soit le système de prévisions d'ensemble météorologiques utilisé.

On remarque enfin que quelle que soit l'échéance, et quels que soient les états initiaux utilisés, SIM-PEARP donne de meilleurs résultats que SIM-CEPMMT pour la période estivale et pour la période hivernale.

Les diagrammes de rang (non-montrés ici) pour l'été montrent des sur-populations des extrêmes (forme du diagramme en "U"), avec globalement un biais négatif des prévisions d'ensemble de débits (rang de droite plus peuplé que celui de gauche). Les diagrammes sont très similaires pour l'hiver. Ceci indique un manque de dispersion des membres hydrologiques, et non pas un biais conditionnel climatique.

7.3.10 Conclusion

Cette partie du manuscrit avait pour objet de quantifier l'apport de l'assimilation de débits dans SIM sur les prévisions d'ensemble de débits à deux jours d'échéance en utilisant des prévisions météorologiques issues de la PEARP et de l'EPS du CEPMMT. Les états assimilés EI_1 et EI_2 ont été utilisés pour initialiser les expériences étudiées ici, et ces expériences ont été comparées aux prévisions d'ensembles de débits originales (c'est-à-dire sans assimilation), et déjà utilisées dans *Thirel et al. (2008)*. Les scores ont été calculés par rapport aux observations de débits.

Tout comme lors de la partie précédente de cette thèse (concernant l'apport de l'assimilation sur les prévisions d'ensemble à 10 jours de SIM-CEPMMT), il a été montré que les deux jeux d'états initiaux assimilés (EI_1 et EI_2) amélioreraient significativement les prévisions de débits. Ici aussi, les états EI_2 s'avèrent plus efficaces que les états EI_1 . Cette amélioration est marquée par une diminution du rmse, ainsi qu'une amélioration du BSS et du RPSS. Bien entendu, les effets de l'assimilation sont plus faibles pour le second jour d'échéance que pour le premier. Enfin, le RPSS et le BSS sont meilleurs pour SIM-PEARP que pour SIM-CEPMMT. Mais cette hiérarchie est grandement due au débiaisage effectué (voir *Weigel et al. (2006)*) qui a pour effet d'augmenter ces scores de manière d'autant plus forte que le nombre de membres de la prévision d'ensemble est petit. D'ailleurs, le rmse de SIM-PEARP est plus élevé que celui de SIM-CEPMMT.

Cependant, la dispersion de l'ensemble reste inchangée selon les états initiaux utilisés, mais le but de l'assimilation de données n'étant pas de modifier cet aspect de la prévision d'ensemble, cela était attendu. Certains autres aspects ont en revanche été améliorés par l'assimilation de données. En effet, la résolution issue de la décomposition du Score de Brier est légèrement améliorée. On peut aussi voir qu'elle est meilleure pour SIM-CEPMMT que pour SIM-PEARP. Si la fiabilité est elle aussi améliorée par l'assimilation des débits, elle est équivalente entre SIM-CEPMMT et SIM-PEARP. L'incertitude n'étant pas dépendante du modèle, mais des observations, la qualité des états initiaux ou les prévisions d'ensemble météorologiques utilisés ne la modifient pas.

En ce qui concerne les diagrammes de fiabilité, ils sont meilleurs avec assimilation, et pour la PEARP. SIM-CEPMMT est amélioré de manière plus importante que SIM-PEARP en ce qui concerne les taux de succès, de bonnes prévisions, et de non prévisions, et les courbes de

ROC. En revanche les taux de fausses alarmes semblent équivalents. Cette meilleure performance des prévisions d'ensemble de débits issues de l'EPS du CEPMMT se retrouve pour le Ratio-rmse pour toutes les tailles de bassins considérées. En revanche, l'inverse est observé pour le RPSS sur ces mêmes tailles de bassins, et pour la différenciation été/hiver.

En résumé, si certains scores semblent indiquer une meilleure performance de SIM-PEARP par rapport à SIM-CEPMMT avec l'assimilation, il faut noter que ces scores (BSS et RPSS) sont débiaisés pour tenir compte de leur faible nombre de membres, ce qui avantage SIM-PEARP davantage que SIM-CEPMMT. En effet, utiliser ce débiaisage revient à déterminer quelle serait la performance des systèmes ensemblistes s'ils avaient le même nombre (infini) de membres. En revanche, lorsque l'on s'intéresse à d'autres scores qui, a priori, ne dépendent pas de la même manière du nombre de membres, on voit que, si SIM-PEARP était globalement meilleur que SIM-CEPMMT sans assimilation, c'est l'inverse qui se produit lorsque l'assimilation de données est utilisée.

L'explication de cette particularité (en effet la PEARP est censée être meilleure que l'EPS du CEPMMT à courte échéance car elle est optimisée à cette échéance alors que l'EPS du CEPMMT vise la moyenne échéance) est probablement due à la manière dont SIM-PEARP a été construite. En effet, la PEARP est construite sur le réseau de 1800 UTC pour une durée de 60H. SIM, quant à lui, est construit de manière à fonctionner sur la base de temps quotidienne. Si pour la partie ISBA il est possible d'obtenir des états intermédiaires, pour la partie MODCOU cela s'est avéré impossible. Ainsi, on a débuté la prévision SIM-PEARP à 1800 UTC en utilisant les états du sol ISBA à 1800 UTC, et les états MODCOU utilisés ont été ceux de 2400 UTC, c'est-à-dire les plus proches possible disponibles. Mais ceci a probablement introduit une inconsistance, dégradant les résultats de l'assimilation avec SIM-PEARP.

D'ailleurs, la moins bonne utilisation de la chaîne SIM-analyse par SIM-PEARP avait pu être entrevue lors de l'étude comparative entre SIM-PEARP et SIM-CEPMMT par rapport à SIM-analyse (voir chapitre 4 et *Thirel et al. (2008)*). En effet, si les prévisions météorologiques PEARP étaient supérieures pour toutes les échéances, tous les seuils considérés et tous les scores étudiés, à l'EPS du CEPMMT, les résultats de SIM-PEARP étaient beaucoup plus contrastés. Il pourrait donc être intéressant de faire débiter les prévisions SIM-PEARP à 0000 UTC, c'est-à-dire n'utilisant pas les six premières heures de la PEARP, afin de mesurer la différence de performances.

A noter que ce chapitre est complété par un article soumis à Hydrology and Earth System Sciences (*Thirel et al. (2010b)*), qui comprend notamment une quantification de l'apport de l'assimilation sur les prévisions d'ensemble à 10 jours basées sur l'EPS du CEPMMT, y compris pour une sélection de stations indépendantes.

7.4 Conclusion

Ce dernier chapitre a permis de quantifier l'impact de l'assimilation des débits dans SIM, sur les prévisions de débits.

Pour des raisons de temps de calcul et de travail, qui étaient limités, seuls deux jeux d'états initiaux ont été utilisés ici. Ces deux jeux sont EI_1 et EI_2 (voir tableau 7.1), c'est-à-dire une assimilation de débits utilisant une moyenne pondérée des humidités des deux couches du sol

d'ISBA, et l'utilisation (EI_2) ou non (EI_1) du profil exponentiel de la conductivité hydraulique dans le sol. Enfin, afin de quantifier l'apport de ces deux jeux d'états initiaux assimilés, des états initiaux sans assimilation (c'est-à-dire en fait les expériences de base traitées dans le chapitre 4) ont aussi été utilisés.

Trois parties différentes composaient ce chapitre. Tout d'abord, on a regardé l'apport de l'assimilation des débits sur des simulations quotidiennes de SIM à 10 jours d'échéance en se servant de l'analyse SAFRAN comme prévision météorologique. Ensuite, on a étudié l'impact de l'assimilation de données sur les prévisions d'ensemble de débits de SIM-CEPMMT à 10 jours. Enfin, on s'est de nouveau intéressé à une comparaison à courte échéance (2 jours) des prévisions d'ensemble de débits de SIM-PEARP et SIM-CEPMMT, afin de déterminer lequel des deux systèmes était le plus performant quand on le compare à des observations réelles de débits, avec ou sans assimilation.

L'analyse des prévisions de SIM à 10 jours réalisées grâce à un forçage météorologique SAFRAN-analyse montre que l'assimilation des débits améliore fortement les scores étudiés. En effet, le critère de Nash est augmenté, alors que le rmse est diminué. Cela est vrai à toutes les échéances, même si l'apport de l'assimilation est de plus en plus faible au fil de l'échéance. On remarque que les états assimilés EI_2 apportent une amélioration plus durable que les états initiaux EI_1 . Les simulations avec ces deux jeux d'états initiaux sont très proches au début de l'échéance, mais l'utilisation du profil exponentiel de la conductivité hydraulique permet à l'expérience utilisant EI_2 de voir ses scores rester meilleurs plus longtemps que ceux de l'expérience basée sur EI_1 . En fait, ces deux expériences semblent converger, avec l'échéance, vers les scores de SIM-analyse avec la configuration de l'assimilation correspondante, au fur et à mesure que l'apport des états initiaux ne se fait plus sentir.

Concernant les prévisions d'ensemble SIM-CEPMMT à 10 jours d'échéance, on a pu voir qu'elles étaient rapprochées des observations de débits par le biais de l'utilisation de l'assimilation des débits. La dispersion est resté inchangée, montrant que l'assimilation des débits ne modifiait que peu la dynamique des prévisions. Le rmse des expériences utilisant l'assimilation des données est diminué pour les 10 jours d'échéance. Si l'expérience utilisant EI_1 semble tendre vers l'expérience sans assimilation au cours de l'échéance, l'expérience utilisant les états EI_2 reste significativement améliorée même après 10 jours d'échéance. Le profil exponentiel de la conductivité hydraulique permet en effet aux prévisions de rester plus proches des observations. Des conclusions similaires peuvent être tirées de l'étude du BSS et du RPSS, qui deviennent assez bons grâce à l'assimilation. Cependant, on peut remarquer que pour les derniers jours d'échéance, le BSS et le RPSS de SIM-CEPMMT initialisé par EI_1 deviennent inférieurs à SIM-CEPMMT sans assimilation. Cette caractéristique peut être expliquée par la sur-estimation des précipitations de l'EPS du CEPMMT, qui viendrait contre-balancer le déficit des précipitations de SIM-analyse, utilisé en mode temps-réel pour l'expérience sans assimilation.

La décomposition du score de Brier a montré l'amélioration de la résolution et de la fiabilité par l'assimilation des débits. Cependant, les diagrammes de rang et les diagrammes de fiabilité restent assez mauvais, l'assimilation n'influant que peu sur ces diagrammes. Cela indique que la confiance à avoir envers ces prévisions d'ensemble de débits reste limitée. Il a été montré une amélioration, grâce à l'assimilation des débits, des taux de bonnes prévisions, taux de non prévisions, taux de succès et taux de fausses alarmes, ainsi que des courbes de

ROC pour la plupart des seuils et échéances considérés. Une étude par taille de bassin semble aussi indiquer que les prévisions de l'ensemble de la gamme des tailles de bassins semblent améliorées, et de manière à peu près équivalente, excepté pour les échéances les plus lointaines, pour lesquelles l'assimilation semble plus efficace pour les petits bassins. Enfin, les prévisions d'ensemble sont moins bonnes l'été que l'hiver, et l'assimilation des débits est plus efficace l'hiver. En effet, la dépendance des débits à l'humidité du sol est plus importante l'hiver que l'été, où des phénomènes comme le drainage sous-maille deviennent prépondérants. Cette étude a été complétée dans un article soumis à Hydrology and Earth System Sciences (*Thirel et al. (2010b)*), dans lequel l'impact de l'assimilation de débits passés dans SIM a aussi été étudié en ce qui concerne des stations indépendantes.

On peut donc voir que les prévisions d'ensemble SIM-CEPMMT sont significativement améliorées par l'assimilation des débits, dans le sens où elles sont plus proches des observations. Cette amélioration est la plus sensible pour le début des prévisions, mais continue à être présente après 10 jours de prévisions, lorsque le profil exponentiel de la conductivité hydraulique est utilisé. Cependant, les qualités intrinsèques des prévisions (comme la dispersion de l'ensemble, ou la confiance que l'on peut avoir en elle) ne sont que peu améliorées par l'assimilation. Il semble donc nécessaire de travailler à améliorer ces aspects par la suite.

Enfin, les prévisions d'ensemble de débits SIM-PEARP et SIM-CEPMMT ont été, pour la première fois, comparées entre elles sur les deux premiers jours d'échéance, par rapport à des débits observés. Toutefois, dans le même temps un article (reproduit en Annexe A) a été publié dans l'Atmospheric Science Letters suite au Workshop Hepex (*Thirel et al. (2010c)*). Dans cet article, une validation de SIM-PEARP et SIM-CEPMMT sans assimilation a été effectuée sur plus de 300 stations disposant d'observations. Cet article représente donc une étape intermédiaire entre la première validation des systèmes par rapport à SIM-analyse, et l'étude de l'impact de l'assimilation de données décrit dans ce chapitre. Pour l'impact de l'assimilation de données, une fois encore ces prévisions sont améliorées significativement par l'utilisation des états initiaux assimilés. En effet, si l'écart-type est resté inchangé pour les deux systèmes, le rmse, le BSS et le RPSS sont tous trois améliorés. Comme pour SIM-CEPMMT à 10 jours, les états initiaux EI_2 sont plus efficaces que les états initiaux EI_1 pour l'initialisation de SIM-PEARP. En comparant SIM-PEARP et SIM-CEPMMT, on remarque que le rmse est meilleur pour SIM-CEPMMT, alors que le BSS et le RPSS débiaisés sont meilleurs pour SIM-PEARP. Cependant, ces deux Skill Scores représentent la qualité que les prévisions d'ensemble de débits auraient si elles avaient toutes deux le même nombre (infini) de membres. Ainsi, la non-utilisation de ce débiaisage, qui avantage SIM-PEARP du fait de son plus petit nombre de membres, indique que les deux Skill Scores sont meilleurs pour SIM-CEPMMT que pour SIM-PEARP. Cela est confirmé par d'autres scores, tels que la décomposition du score de Brier, les taux de succès, fausses alarmes, bonnes prévisions, non prévisions, et courbes de ROC, qui sont globalement meilleurs pour SIM-CEPMMT pour les deux jours d'échéance.

Cette moins bonne réponse de SIM-PEARP par rapport à l'assimilation des débits, est probablement due au fait que l'on utilise les états hydriques de MODCOU de 00H pour initialiser les prévisions d'ensemble de débits à 18H. En effet, la structure de MODCOU ne permet pas d'utiliser les états hydriques de MODCOU de 18H. Il serait intéressant de tenter de commencer les prévisions d'ensemble PEARP à 0000 UTC, c'est-à-dire en excluant les 6 premières heures d'échéance. Une petite part de la dispersion des 6 premières heures serait perdue, mais

on peut penser que la qualité globale des prévisions serait améliorée.

Pour résumer, on a pu voir que les prévisions d'ensemble de débits étaient améliorées par les états assimilés. De plus, les états EI_2 , c'est-à-dire avec l'utilisation du profil exponentiel de la conductivité hydraulique dans le sol d'ISBA (à la fois pour l'assimilation et les prévisions d'ensemble) apportent une amélioration plus importante, et plus durable. Donc, cette configuration devrait être privilégiée dans le cadre d'une mise en opérationnel de l'assimilation des débits dans SIM, car la version temps réel des prévisions d'ensemble de débits ne comprend ni assimilation des débits, ni utilisation du profil exponentiel de la conductivité hydraulique dans le sol. On espère ainsi améliorer significativement les performances du système, et rendre plus facilement exploitable par les services opérationnels de prévisions des crues, les prévisions d'ensemble des débits de SIM

Quant à la comparaison entre l'apport de la PEARP et l'apport de l'EPS du CEPMMT sur les deux premiers jours d'échéance des prévisions d'ensemble de débits de SIM, elle semble plus difficile à établir. En effet, certains scores ensemblistes indiquent que la PEARP serait plus efficace que l'EPS du CEPMMT si le nombre de membres de ces deux systèmes était équivalent. En effet, le débiaisage alors utilisé avantage SIM-PEARP. Cependant, ce que voient les prévisionnistes sont les prévisions de débits, et non les scores débiaisés. On peut donc se demander si c'est le score débiaisé ou le score non débiaisé qui est à considérer pour conclure sur l'efficacité des deux systèmes.

Chapitre 8

Conclusions et perspectives

Mon travail de thèse avait pour thème les prévisions d'ensemble de débits, axées sur la courte et la moyenne échéance, ainsi que l'amélioration de ses états initiaux.

Mon premier travail a été d'adapter la chaîne SIM ensembliste à l'utilisation de prévisions d'ensemble météorologiques à courte échéance : la PEARP (Prévision d'Ensemble ARPEGE) de Météo-France. C'est une prévision d'ensemble qui a une échéance de 60H et une meilleure résolution spatiale (25 km sur la France) que l'EPS du CEPMMT. Elle est spécialement dédiée à la prévision d'événements extrêmes et localisés. Un travail a été nécessaire au niveau de la désagrégation des prévisions d'ensemble de précipitations de la PEARP, la méthode utilisée pour l'EPS du CEPMMT n'ayant pas pu être réutilisée. Ainsi, un ajustement point de grille ISBA par point de grille ISBA a été calibré sur une période d'un an.

Une étude comparative des deux systèmes a été menée sur les deux premiers jours d'échéance communs. Cela a donné lieu à l'établissement d'une méthode assez complète permettant de comparer des prévisions d'ensemble de précipitations et de débits sur un large éventail de scores ensemblistes, ainsi que de déterminer l'utilisation de tests statistiques robustes permettant de conclure sur la significativité des différences entre les scores des deux systèmes.

En premier lieu, une comparaison statistique des prévisions d'ensemble de précipitations a été menée sur une période de 18 mois, en utilisant l'analyse SAFRAN comme référence. En effet, la précipitation est la principale variable influençant les prévisions de débits. Cette comparaison a montré la meilleure performance de la PEARP par rapport à l'EPS du CEPMMT pour les deux jours d'échéance, pour l'ensemble des seuils et des saisons, et pour tous les scores étudiés. De plus, les scores calculés ont montré la bonne performance globale des deux systèmes. Cependant, il est important de noter que pour les deux systèmes, la dispersion de l'ensemble reste faible. C'est donc un aspect qu'il sera primordial d'améliorer à l'avenir.

Ensuite, une comparaison statistique des prévisions d'ensemble de débits SIM-PEARP et SIM-CEPMMT a été effectuée sur ces mêmes deux premiers jours d'échéance et sur la même période de 19 mois. Ici, les débits issus de la chaîne SIM-analyse ont été pris comme référence pour le calcul des scores lorsqu'une référence était nécessaire. Cette étude comparative a montré la très bonne performance des deux systèmes pour l'ensemble des scores, excepté la dispersion qui est très faible. Si les précipitations PEARP donnaient les meilleures performances, les résultats au niveau des débits sont plus contrastés. En effet, le système SIM-PEARP a montré de meilleures performances que SIM-CEPMMT en ce qui concerne les petits bassins et les forts débits, mais le résultat est plutôt inversé pour les grands bassins et

les débits d'étiage. Cela s'explique à la fois par les caractéristiques intrinsèques des prévisions d'ensemble météorologiques, mais aussi par le fait que, pour des raisons techniques, les débits MODCOU de 00H ont dû être utilisés afin d'initialiser les prévisions de SIM-PEARP à 18H, créant ainsi une certaine incohérence entre les états initiaux.

Ce travail a fait l'objet d'une publication dans le *Journal of HydroMeteorology* (Thirel *et al.* (2008)).

Après cette phase concernant les prévisions d'ensemble de débits avec SIM à courte échéance, la mise en place d'un système d'assimilation des débits a composé la seconde partie de ma thèse.

Il a été choisi d'implémenter l'assimilation de données de la manière suivante : on utilise des débits observés, le but étant de rapprocher les simulations de débits de SIM-analyse de ces observations, et on modifie les simulations en incrémentant l'humidité du sol initiale dans ISBA de la manière adéquate. Pour cela, 186 stations, peu influencées par l'Homme et pour lesquelles on possédait des observations de débits sur la période de 19 mois déjà utilisée précédemment, ont été sélectionnées. Afin de déterminer de quelle façon on allait modifier l'humidité du sol pour chacune des stations, on a sommé les humidités de chacune des mailles exclusives aux sous-bassins irriguant ces stations. Trois manières différentes de prendre en compte la répartition verticale de l'humidité dans le sol dans ISBA ont été testées. Cette assimilation de débits a été implémentée grâce au coupleur dynamique de codes de calculs PALM (CERFACS), et on a utilisé l'estimateur BLUE (Best Linear Unbiased Estimator). Les erreurs d'ébauche (c'est-à-dire commises sur l'humidité du sol) et d'observations ont été estimées de manière simple dans cette première application de l'assimilation des débits dans SIM. Enfin, deux physiques d'ISBA (l'utilisation ou non du profil exponentiel de la conductivité hydraulique dans le sol) ont été testées.

Cet algorithme a été tout d'abord validé sur des cas synthétiques en modifiant l'humidité initiale du sol, et en utilisant la simulation non perturbée comme observation, pour un ensemble de 148 stations. Ces tests ont montré une bonne réaction de l'assimilation de données malgré les modifications brutales de l'humidité du sol nécessaires pour se rapprocher des observations. Par la suite, des expériences utilisant des vraies observations de débits ont été faites, toujours sur la même période de 19 mois. Des assimilations quotidiennes ont été réalisées, afin de déterminer la capacité du système à se rapprocher des observations. Les six configurations testées ont montré une amélioration significative des performances des simulations de SIM, avec un RMSE et un critère de Nash améliorés. De plus, les incréments imposés par le BLUE sont restés en moyenne d'intensité faible, perturbant ainsi très peu les différents flux du modèle. La meilleure configuration est celle utilisant une moyenne pondérée des humidités du sol, ainsi que le profil exponentiel de la conductivité hydraulique dans le sol, comme cela a été prouvé par l'étude de scores sur 49 stations indépendantes.

Ce travail a permis d'établir un premier algorithme d'assimilation de données afin d'améliorer les simulations de SIM, montrant ainsi la faisabilité d'une telle application. Les simulations de débits ont pu être améliorées de manière satisfaisante. Cependant, les stations influencées par la simulation d'une nappe aquifère dans MODCOU n'ont pu être que peu impactées par l'assimilation. En effet, pour ces stations, ce sont les hauteurs piézométriques qui influencent les débits, alors que l'humidité du sol n'a qu'un rôle moindre. Il serait donc intéressant à l'avenir de tenter de modifier d'autres paramètres que l'humidité du sol, comme par exemple les hauteurs piézométriques ou les hauteurs de neige. Enfin, les estimations

d'erreurs d'ébauche et d'observations pourraient être améliorées afin d'augmenter les performances du système d'assimilation. Ce travail a fait l'objet d'un article soumis à *Hydrology and Earth System Sciences* (Thirel et al. (2010a)).

La dernière partie de ma thèse a concerné la quantification de l'impact des états initiaux créés grâce à l'assimilation de débits précédemment décrite, sur les prévisions d'ensemble de débits de SIM. Pour cela, deux jeux d'états assimilés (ceux provenant de l'assimilation utilisant la moyenne des humidités des deux couches d'ISBA, sans (premier jeu) et avec (second jeu) profil exponentiel de la conductivité hydraulique dans le sol) ont été utilisés pour initialiser la chaîne SIM-CEPMMT à 10 jours d'échéance et SIM-PEARP à 60H d'échéance. Les résultats de ces deux chaînes ont été comparés entre eux (uniquement sur les 2 premiers jours d'échéance) et à leurs pendants sans assimilation, c'est-à-dire les résultats des chaînes originales. Pour cette étude, on a utilisé les observations de débits comme référence (lorsque c'était nécessaire), permettant ainsi pour la première fois la validation des systèmes de prévisions d'ensemble de débits basés sur SIM par rapport à des observations réelles.

Tout d'abord, des "pseudo-prévisions" (déterministes) de SIM-analyse à 10 jours d'échéance ont été réalisées avec les états initiaux assimilés. L'étude de ces simulations avec assimilation a montré que l'amélioration des prévisions était importante par rapport à la simulation SIM-analyse sans assimilation. Si les simulations SIM, utilisant l'assimilation de données mais pas le profil exponentiel, montrent une amélioration importante sur le début de l'échéance, celle-ci est très faible pour la fin d'échéance. Les simulations utilisant à la fois l'assimilation de données et le profil exponentiel conservent une amélioration non négligeable jusqu'au dixième jour d'échéance, ce qui montre l'intérêt conjugué de ces deux composantes.

Ensuite, les prévisions d'ensemble de débits SIM-CEPMMT ont été étudiées sur leurs 10 jours d'échéance. Les deux mêmes jeux d'états assimilés ont été utilisés pour comparer ces prévisions aux prévisions originales. Le RMSE, ainsi que les scores probabilistes tels que le BSS et le RPSS, ont montré une nette amélioration, pour les deux jeux d'états assimilés, notamment pour les premiers jours d'échéance. Là aussi, les états issus de l'assimilation avec profil exponentiel gardent un apport positif sur les prévisions d'ensemble jusqu'au dixième jour d'échéance, du fait de la présence du profil exponentiel dans le système de prévisions d'ensemble. Si les qualités intrinsèques des prévisions d'ensemble de débits ne sont que peu influencées (dispersion, fiabilité), les scores classiquement utilisés par les prévisionnistes sont améliorés (taux de fausses alarmes, de succès, de bonnes prévisions). Globalement, les scores des prévisions de débits avec assimilation sont bons, montrant qu'il est possible d'exploiter ces prévisions, même jusqu'à 10 jours d'échéance.

Enfin, une nouvelle comparaison des prévisions d'ensemble de débits SIM-PEARP et SIM-CEPMMT a été effectuée sur les deux premiers jours d'échéance, et avec les deux mêmes jeux d'états assimilés que ci-dessus. Là aussi, une amélioration globale des scores (exceptée la dispersion) a été observée en utilisant les débits observés comme référence. Les conclusions à ce sujet sont les mêmes que celles du paragraphe précédent. Il est plus difficile de conclure sur la comparaison SIM-PEARP/SIM-CEPMMT en elle-même. En effet, certains scores comme le RMSE semblent meilleurs pour SIM-CEPMMT que pour SIM-PEARP, alors que les scores ensemblistes tels que le BSS ou le RPSS indiquent l'inverse. Cette contradiction peut être expliquée par l'utilisation du débiasage introduit par Weigel et al. (2006) qui a pour effet d'augmenter le BSS ou le RPSS des prévisions d'ensemble de manière d'autant plus importante que le nombre de membres est faible. Ainsi, SIM-PEARP est avantagé, son BSS et son

RPSS restant inférieurs à ceux de SIM-CEPMMT si ce débiaisage n'est pas utilisé. Il est aussi remarquable que SIM-PEARP semble moins impacté que SIM-CEPMMT par les deux jeux d'états initiaux. Une nouvelle fois, la différence de 6H entre l'état initial d'ISBA utilisé au début de la prévision pour le temps 18H et l'état initial de MODCOU de 00H utilisé peut expliquer une moins bonne exploitation des avantages de l'assimilation.

Ce travail de thèse a donc été l'occasion d'orienter SIM vers la prévision d'ensemble de débits à courte échéance en valorisant l'expertise liée à la prévision d'ensemble météorologique PEARP. De plus, on a pu se placer dans le domaine innovant que représente l'assimilation de débits, permettant ainsi la première validation des chaînes de prévisions d'ensemble de débits SIM par rapport aux débits observés.

La chaîne de prévisions d'ensemble temps réel de débits de Météo-France peut encore être améliorée, notamment grâce aux travaux de ma thèse comme on vient de le voir. Diverses voies d'améliorations sont envisageables.

Tout d'abord, une première amélioration des prévisions d'ensemble hydrologiques résulterait de l'amélioration des prévisions d'ensemble météorologiques. En effet, la chaîne temps réel de prévisions d'ensemble SIM utilise à l'heure actuelle l'EPS du CEPMMT à 10 jours d'échéance et à une résolution spatiale de 150 *km*. Cette configuration n'est plus optimale au vu des prévisions d'ensemble météorologiques désormais disponibles. Tout d'abord, l'utilisation d'une version améliorée de la PEARP de Météo-France avec ses 11 membres à 60H d'échéance et 25 *km* de résolution spatiale est envisageable. La PEARP (version appelée PEARP2 en cours de développement) va bientôt compter (d'ici 2010) 35 membres à une résolution spatiale de 15 *km* sur la France, et va jusqu'à une échéance de 108H. Cependant, dans le même temps, l'EPS du CEPMMT s'est aussi amélioré, devenant le Var-EPS, et maintenant une échéance de 15 jours sur une grille de 50 *km*, permettant de disposer d'informations au-delà de 10 jours sur les débits et les contenus en eau du sol, ce qui est intéressant pour sa gestion. L'évolution des prévisions d'ensemble météorologiques utilisées pose le problème du suivi des améliorations. En effet, il est intéressant de quantifier l'amélioration que peut apporter une nouvelle version de prévisions d'ensemble utilisées. Pour cela, des re-prévisions (refaire tourner les prévisions d'ensemble de débits SIM sur une longue période) semblent nécessaires à étudier. Cependant, le manque de temps humain et de temps de calcul rend de telles expériences très difficiles à mettre en place.

Ce passage à l'utilisation d'une meilleure prévision d'ensemble météorologique devrait s'accompagner de la mise en place en opérationnel de l'assimilation des débits que j'ai implémentée durant ma thèse, grâce à une version éventuellement améliorée. Ainsi, l'utilisation et l'interprétation en temps réel de ces prévisions d'ensemble de débits par le SCHAPI et les SPCs pourra se faire plus facilement, les prévisions étant plus proches des observations. Cela sera aussi l'occasion d'utiliser le profil exponentiel de la conductivité hydraulique dans le sol (dans le système d'assimilation et dans SIM) afin de faire profiter la chaîne SIM ensembliste des progrès qu'il apporte, notamment pour les plus forts débits ainsi que pour les décrues.

Le choix futur entre le Var-EPS du CEPMMT et la PEARP n'est pas encore totalement décidé. La philosophie de MODCOU est plutôt axée sur la simulation hydrologique à large échelle, pour les grands bassins. Par conséquent, le système SIM semble dédié aux phénomènes ayant une échéance assez longue. De plus, on a vu que jusqu'à 48H d'échéance, il était difficile de conclure sur la meilleure efficacité de l'EPS ou de la PEARP. Il est possible

que l'utilisation des deux systèmes améliorés mènent à une conclusion similaire. En effet, avec la différence du nombre de membres et de désagrégation rend difficile une comparaison. Un travail de calibration de la désagrégation devrait être à nouveau effectué avant de valider les deux chaînes. Des travaux plus axés sur la courte échéance sont réalisés dans l'équipe CNRM/GMME/MICADO. Ils visent à utiliser les modèles ISBA et TOPMODEL, ainsi qu'une désagrégation dynamique de la PEARP.

Enfin, divers travaux de recherche sont en cours ou à effectuer en ce qui concerne à la fois le système de prévision d'ensemble de débits et l'assimilation de données.

Tout d'abord, la désagrégation des champs de température et surtout de précipitations a été réalisée de manière très simple dans un premier temps. Il serait intéressant d'améliorer cet aspect. Par exemple, des méthodes bayésiennes pour débiaiser chaque membre des modèles météorologiques existent. Ensuite, afin d'améliorer la représentation de l'incertitude, on pourrait calibrer a posteriori la fonction de densité de probabilité (pdf) des ensembles. Enfin, des méthodes de désagrégation bayésienne des variables peuvent être utilisées afin de disposer de ces variables aux échelles d'espace et de temps désirées.

Ensuite, d'autres paramètres des prévisions d'ensemble météorologiques pourraient être fournis à notre système s'ils sont disponibles. On pense en particulier au vent et aux radiations dont les prévisions d'ensemble sont produites. En effet, cela donnerait une meilleure représentation de l'incertitude pour le système.

Diverses améliorations de MODCOU sont actuellement développées aux Mines Paris-Tech (nouvelles nappes de la Somme, de la Loire et du Rhin), et pourraient enrichir la chaîne SIM exploitée à Météo-France.

Des travaux sur l'assimilation pourront être menés afin d'améliorer ses performances. Par exemple, une meilleure estimation des matrices de covariances d'erreur d'ébauche et d'observations rendrait le système d'assimilation plus efficace. De plus, l'ordre de grandeur de ces deux matrices est calibré grâce à un coefficient, que l'on pourrait désormais calibrer pour chacune des stations assimilées, au lieu de le définir de manière globale, affinant ainsi la définition des erreurs. Certaines non-linéarités de SIM ont été relevées lors de mes travaux, ce qui peut dégrader l'efficacité du BLUE. Des tests sur l'utilisation d'un filtre de Kalman d'ensemble détermineraient si ces non-linéarités peuvent être mieux appréhendées par l'assimilation de données. Il est aussi envisagé d'assimiler d'autres variables (hauteurs piezométriques et de neige notamment). Ainsi, les difficultés du système d'assimilation à améliorer les simulations des zones où MODCOU comprend une nappe phréatique seront en partie traitées. De plus, les rivières dont les débits sont à forte composante de fonte nivale, bénéficieront de l'assimilation des hauteurs de neige. Enfin, le système d'assimilation semble moins efficace dans le cadre des étiages. Pour ces faibles débits, la mauvaise connaissance des prélèvements d'eau, ainsi que la moins bonne qualité des mesures de débits rend difficile a priori l'assimilation. De plus, le drainage sous-maille, qui est utilisé à l'heure actuelle pour soutenir les faibles débits lorsqu'aucune nappe n'est simulée dans MODCOU est une vision assez simpliste. Une meilleure représentation des nappes, en introduisant par exemple un réservoir entre ISBA et MODCOU, améliorerait la qualité de la simulation des étiages.

Une collaboration permanente avec le SCHAPI permet aussi d'avancer sur le thème de l'utilisation des prévisions d'ensemble de débits. Par exemple, un stage a été effectué sur la comparaison entre les systèmes SIM et EFAS, afin de les comprendre du point de vue uti-

lisateur, et d'explorer de nouvelles pistes pour la visualisation. De plus, des travaux ont été effectués afin de déterminer le seuil d'alerte optimal à utiliser par SIM. Enfin, des travaux sont en cours avec les Services de Prévision des Crues (SPCs) dont certains sont volontaires pour choisir des stations d'intérêt et déterminer un seuil d'alerte.

Enfin, d'autres travaux, comme la prévision saisonnière hydrologique avec SIM, se développent à Météo-France suite aux résultats des travaux réalisés par F. Regimbeau et moi-même. Cette prévision saisonnière est forte des développements des prévisions d'ensemble à courte et moyenne échéance basées sur SIM et des performances aperçues. Il est donc logique de tenter d'étendre à une plus longue échéance les prévisions du système SIM. Ainsi, la prévision à plusieurs mois d'échéance de l'évolution de la ressource en eau, des débits et du manteau neigeux semble indiquer une capacité intéressante à renseigner sur les tendances d'après les premières études effectuées. Des travaux approfondis sur le sujet sont prévus pour un futur proche dans le cadre d'une thèse.

Annexe A

Annexe A : Short and medium-range hydrological ensemble forecasts over France (*Thirel et al. (2010c)*, Atmospheric Science Letters)

Un article (*Thirel et al. (2010c)*) a été publié dans l'Atmospheric Science Letters. Il décrit la désagrégation des prévisions d'ensemble météorologiques, ainsi qu'une brève première validation des prévisions d'ensemble hydrologiques de SIM par rapport à des observations de débits.

Cet article est inclus dans cette annexe.

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise
éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise
éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise
éditrice de l'article

L'article a été retiré en respect des restrictions de reproduction imposées par l'entreprise
éditrice de l'article

Bibliographie

- C. Alot, G. Leches, and M. Hakam. Etude préliminaire à la mise en place d'une prévision d'ensemble des débits. Technical report, Ecole Nationale de la Météorologie, Projet Modélisation, 2005.
- M. S. Arulampalam, S. Markell, N. Gordon, and T. Clapp. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002.
- D. Aubert, C. Loumagne, and L. Oudin. Sequential assimilation of soil moisture and stream-flow data in a conceptual rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology* 280 (2003) 145-161, 2003.
- G. Balint, A. Csik, P. Bartha, B. Gauzer, and I. Bonta. Application of meteorological ensembles for Danube flood forecasting and warning. In : *Transboundary floods : reducing risks through flood management*, J. Marsalek, G. Stancalie and G. Balint (Editors), Springer, NATO Science Series, Dordrecht, The Netherlands, pp. 57-68, 2006.
- J. Barkmeijer, R. Buizza, and T. N. Palmer. 3D-Var Hessian singular vectors and their potential use in the ECMWF Ensemble Prediction System. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 125, Part B 2333-2351, 1999.
- A. Boone. *Modélisation des processus hydrologiques dans le schéma de surface ISBA : inclusion d'un réservoir hydrologique, du gel et modélisation de la neige*. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 2000.
- A. Boone and P. Etchevers. An intercomparison of three snow schemes of varying complexity coupled to the same land surface model : Local scale evaluation at an Alpine site. *Journal of HydroMeteorology*, 2 :374-394, 2001.
- A. Boone, J. C. Calvet, and J. Noilhan. Inclusion of a Third Soil Layer in a Land Surface Scheme Using the Force-Restore Method. *Journal of Applied Meteorology*, 38 :1611-1630, 1999.
- F. Bouttier and P. Courtier. Data assimilation concepts and methods. *ECMWF Lecture Note*, 1999.
- P. Brasseur, P. Bahurel, L. Bertino, F. Birol, J.-M. Brankart, N. Ferry, S. Losa, E. Remy, J. Schröter, S. Skachko, C.-E. Testut, B. Tranchant, P.J. Van Leeuwen, and J. Verron. Data assimilation in operational ocean forecasting systems : the MERCATOR and MERSEA developments. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131, pp. 3561-3582, 2005.

- G.W. Brier. Verification of forecasts expressed in terms of probability. *Monthly Weather Review*, Volume 78, No 1, pp. 1-3, Jan. 1950.
- S. Buis, A. Piacentini, and D. Déclat. PALM : A Computational framework for assembling high performance computing applications. *Concurrency Computat. : Pract. Exper.*, Vol. 18(2), 2006, 247-262, 2006.
- R. Buizza and T. N. Palmer. The singular vector structure of the atmosphere global circulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 52, 1434-1456, 1995.
- R. Buizza, M. Miller, and T. N. Palmer. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 125, 2887-2908, 1999.
- R. Buizza, J.-R. Bildot, N. Wedi, M. Fuentes, M. Hamrud, G. Holt, and F. Vitart. The new ECMWF VAREPS (Variable Resolution Ensemble Prediction System). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133, 681-695, 2007.
- Y. Caballero, P. Chevallier, A. Boone, J. Noilhan, and F. Habets. Calibration of the Interaction Soil Biosphere Atmosphere land-surface scheme on a small tropical high-mountain basin (Cordillera Real, Bolivia). *Water Resources Research*, VOL. 43, W07423, doi :10.1029/2005WR004490, 2007a.
- Y. Caballero, S. Voirin-Morel, F. Habets, J. Noilhan, P. Le Moigne, A. Lehenaff, and A. Boone. Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change. *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 43, W07448, doi :10.1029/2005WR004192, 2007b.
- J. C. Calvet, J. Noilhan, J. L. Roujean, P. Bessemoulin, M. Cabelguenne, A. Olioso, and J. P. Wigneron. An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92, 73-95, 1998.
- R. B. Clapp and G. M. Hornberger. Empirical equations for some hydraulic properties. *Water Resources Research*, 14, 601-604, 1978.
- H.L. Cloke and F. Pappenberger. Operational flood forecasting : a review of ensemble techniques. *Submitted to Journal of Hydrology*, 2009.
- P. Courtier, C. Freydier, J.-F. Geleyn, F. Rabier, and M. Rochas. The Arpege project at Météo-France. *ECMWF Workshop on Numerical Methods in Atmospheric Modelling*, 9-13 Sept 1991, vol 2, p. 193-231, 1991.
- W. T. Crow and D. Ryu. A new data assimilation approach for improving runoff prediction using remotely-sensed soil moisture retrievals. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 1-16, 2009, 2009.
- N. Daget. *Estimation d'ensemble des paramètres des covariances d'erreur d'ébauche dans un système d'assimilation variationnelle de données océaniques*. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 2008.
- J. W. Deardorff. Efficient prediction of ground temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation. *Journal of Geophysical Research*, 83, 1889-1903, 1978.
-

- B. Decharme, H. Douville, A. Boone, F. Habets, and J. Noilhan. Impact of an Exponential Profile of saturated Hydraulic Conductivity within the ISBA LSM : Simulations over the Rhône Basin. *Journal of Hydrometeorology*, 7 :61-80, 2006.
- L. Descamps and O. Talagrand. On Some Aspects of the Definition of Initial Conditions for Ensemble Prediction. *Monthly Weather Review*, 2007.
- A. Doucet, N. D. Freitas, and N. Gordon. *Sequential Monte Carlo Methods in Practice*. Springer, New York, 581pp, 2001.
- H. Douville, J. F. Royer, and J. F. Mahfouf. A new snow parameterization for the Météo-France climate model. *Climate Dynamics*, 12 :21-35, 1995.
- M. Déqué. Ensemble size for numerical weather forecasts. *Tellus*, 49A, 74-86, 1997.
- Y. Durand. Analyse des principaux paramètres météorologiques de surface sur les massifs alpins et d'autres zones climatiquement homogènes. Technical report, Météo-France. Note scientifique et technique SAFRAN, CEN, Grenoble, 1995.
- Y. Durand, E. Brun, L. Merindol, G. Guyomarc'h, B. Lesaffre, and E. Martin. A meteorological estimation of relevant parameters for snow schemes used with atmospheric models. *Annals of Glaciology*, 18, 65-71, 1993.
- ECMWF. User Guide to ECMWF forecasts products 4.0. Technical report, available at <http://www.ecmwf.int>, 2005.
- P. Etchevers. *Modélisation de la phase continentale du cycle de l'eau à l'échelle régionale. Impact de la modélisation de la neige sur l'hydrologie du Rhône*. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2000.
- P. Etchevers, C. Golaz, and F. Habets. Simulation of the water budget and the river flows of the Rhône basin from 1981 to 1994. *Journal of Hydrology*, 244 :60-85, 2001.
- G. Evensen. The ensemble Kalman filter : Theoretical formulation and practical implementation. *Ocean Dynamics*, 53, 343-367, 2003.
- A. Fouilloux and A. Piacentini. The PALM Project : MPMD Paradigm for an Oceanic Data Assimilation Software. *Lecture Notes In Computer Science*, Vol. 1685, pp. 1423 - 1430, 1999.
- A. Gelb. *Applied Optimal Estimation*. Cambridge Mass. : MIT. Press, 1974.
- E. Gomez. *Modélisation intégrée du transfert de nitrate à l'échelle régionale dans un système hydrologique. Application au bassin de la Seine*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 2002.
- B. Guenver and E. Perrat. Mise en place du maillage hydrographique sur la France et son application pour une simulation des débits sur le bassin versant de la Loire. Technical report, Ecole Nationale de la Météorologie, Rapport de stage de fin d'études numéro 910a, 2003.
-

- F. Habets. *Modélisation du cycle continental de l'eau à l'échelle régionale : application aux bassins versants de l'Adour et du Rhône*. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1998.
- F. Habets, P. Etchevers, C. Golaz, E. Leblois, E. Ledoux, E. Martin, J. Noilhan, and C. Ottlé. Simulation of the water budget and the river flows of the Rhône basin. *Journal of Geophysical Research*, 104 : 31145-31172, 1999a.
- F. Habets, J. Noilhan, C. Golaz, J. P. Goutorbe, P. Lacarrère, E. Leblois, E. Ledoux, E. Martin, C. Ottlé, and D. Vidal-Madjar. The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model, applied to the HAPEX-MOBILHY area : Part 2 simulation of streamflows and annual water budget. *Journal of Hydrology*, 217, 97-118, 1999b.
- F. Habets, A. Boone, J. L. Champeau, P. Etchevers, E. Leblois, E. Ledoux, P. Lemoigne, E. Martin, S. Morel, J. Noilhan, P. Quintana Segui, F. Rousset-Regimbeau, and P. Viennot. The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research*, 113, D06113, doi :10.1029/2007JD008548, 2008.
- E. Hágel and G. Szépszó. Preliminary results of LAMEPS experiments at the Hungarian Meteorological Service. *ALADIN Newsletter no 26*, 2004.
- T. M. Hamill. Hypothesis Tests for Evaluating Numerical Precipitation Forecasts. *Weather and Forecasting*, 14, 155-167., 1999.
- T. M. Hamill. Interpretation of Rank Histograms for Verifying Ensemble Forecasts. *Monthly Weather Review*, March 2001, Volume 129, pp. 550-560., 2000.
- K. Ide, P. Courtier, M. Ghil, and A. C. Lorenc. Unified Notation for Data Assimilation : Operational, Sequential and Variational. *Journal of Meteorological Society of Japan, Special Issue on Data Assimilation in Meteorology and Oceanography : Theory and Practice*, Vol. 75, No. 1B, pp. 181-189, 1997.
- P. G. Jarvis. The interpretation of variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 273, 593-610, 1976.
- J. Komma, C. Reszler, G. Blöschl, and T. Haiden. Ensemble prediction of floods - catchment non-linearity and forecast probabilities. *Natural Hazards Earth System Science*, 7 : 431-444, 2007.
- J. Komma, G. Blöschl, and C. Reszler. Soil moisture updating by Ensemble Kalman Filtering in real-time flood forecasting. *Journal of Hydrology*, 2008.
- N. Kouwen, E. D. Soulis, A. Pietroniro, J. Donald, and R. A. Harrington. Grouping Response Units for Distributed Hydrologic Modelling. *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, 119(3), 289-305, 1993.
- P. Le Moigne. Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN. Technical report, Note de Centre GMME, Météo-France, 2002.
-

- E. Ledoux. Modèles mathématiques en hydrogéologie. *Cours - Centre d'Informatique Géologique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris*, 2003.
- E. Ledoux, G. Girard, and J. P. Villeneuve. Proposition d'un modèle couplé pour la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. *La Houille Blanche, No.1/2-1984*, 1984.
- X. Liang. A Two-Layer Variable Infiltration Capacity Land Surface Representation for General Circulation Models. *Water Resources Series, TR140, 208 pp., Univ. of Washington, Seattle*, 1994.
- X. Liang, D. P. Lettenmaier, E. F. Wood, and S. J. Burges. A Simple hydrologically Based Model of Land Surface Water and Energy Fluxes for GSMs. *Journal of Geophysical Resources, 99(D7), 14, 415-14, 428*, 1994.
- G. Lindstrom, B. Johansson, M. Persson, M. Gardelin, and S. Bergstrom. Development and test of the distributed BHV-96 model. *Journal of Hydrology, 201, 272-288*, 1997.
- D. Lohmann, R. Nolte-Holube, and E. Raschke. A large-scale horizontal routing model to be coupled to land surface parametrization schemes. *Tellus, 48(A), 708-721*, 1996.
- D. Lohmann, E. Raschke, B. Nijssen, and D. P. Lettenmaier. Regional scale hydrology : I. Formulation of the VIC-2L model coupled to a routing model. *Hydrological Sciences Journal, 43(1), 131-141*, 1998.
- J. F. Mahfouf and J. Noilhan. Inclusion of gravitational drainage in a land surface scheme based on the force-restore method. *Journal of Applied Meteorology, 35 : 987-992*, 1996.
- C. Marsigli, F. Boccanera, A. Montani, and T. Paccagnella. The COSMO-LEPS mesoscale ensemble system : validation of the methodology and verification. *Nonlinear Processes in Geophysics, 12(4) :527-536*, 2005.
- E. Martin. Etude expérimentale des flux de chaleur au-dessus de la neige. Technical report, Université Scientifique et Médicale de Grenoble. Rapport de DEA., 1988.
- C. Marzban. The ROC curve and the Area under It as Performance Measures. *Weather and Forecasting, 2004, Volume 19, pp 1106-1114*, 2004.
- S. Massart. *Méthodologie de l'assimilation de données. Application à la chimie atmosphérique et à la mécanique des structures*. PhD thesis, I.N.P.T., Toulouse, France, 2003.
- J. Mcenery and al. NOAA's Advanced Hydrologic Prediction Service : Building pathways for better science in water forecasting. *Bulletin of American Meteorological Society, 86 : 375-385*, 2005.
- F. Molteni, R. Buizza, T. N. Palmer, and T. Petroliaigis. The ECMWF Ensemble Prediction System : methodology and validation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 122, 73-119*, 1996.
-

- H. Moradkhani, K.-L. Hsu, H. Gupta, and S. Sorooshian. Uncertainty assessment of hydrologic model states and parameters : sequential data assimilation using the particle filter. *Water Resources Research*, 41, 2005.
- S. Morel. *Modélisation à l'échelle régionale des bilans énergétique et hydrique de surface et des débits ; application au bassin Adour-Garonne*. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 2003.
- A. H. Murphy. A new vector partition of the probability score. *Journal of Applied Meteorology*, 1973 Volume 12, pp. 595-600, 1973.
- J. Nicolau. Short-Range Ensemble Forecasting. Technical report, WMO/CSB Technical Conference meeting, Cairns (Australia), 2002.
- J. Noilhan and P. Lacarrère. GCM Grid-Scale Evaporation from Mesoscale Modeling. *Journal of Climate*, Vol. 8, No. 2, Février 1995, p206-223, 1995.
- J. Noilhan and J. F. Mahfouf. The ISBA land surface parameterization scheme. *Global and Planetary Change* 13, p145-159, 1996.
- J. Noilhan and S. Planton. A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models. *Monthly Weather Review*, 117, 536-549, 1989.
- J. Olsson and G. Lindström. Evaluation and calibration of operational hydrological ensemble forecasts in Sweden. *Journal of Hydrology*, 350(1-2) :14 – 24, 2008. ISSN 0022-1694. doi : DOI : 10.1016/j.jhydrol.2007.11.010.
- V. R. N. Pauwels and G. J. M. De Lannoy. Improvement of Modeled Soil Wetness Conditions and Turbulent Fluxes through the Assimilation of Observed Discharge. *Journal of HydroMeteorology*, 2005.
- A. Pietroniro, V. Fortin, N. Kouwen, C. Neal, R. Turcotte, B. Davison, D. Versegny, E. D. Soulis, R. Caldwell, N. Evora, and P. Pellerin. Development of the mesh modelling system for hydrological ensemble forecasting of the laurentian great lakes at the regional scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(4) :1279–1294, 2007. ISSN 1027-5606.
- P. Quintana Seguí, P. Le Moigne, Y. Durand, E. Martin, F. Habets, M. Baillon, C. Canellas, L. Franchisteguy, and S. Morel. Analysis of near surface atmospheric variables : Validation of the SAFRAN analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47, 92-107, 2008.
- P. Quintana Seguí, E. Martin, F. Habets, and J. Noilhan. Improvement, calibration and validation of a distributed hydrological model over France. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 163-181, 2009.
- C. Dimnik R. Turcotte, P. Lacombe and J.-P. Villeneuve. Prévision hydrologique distribuée pour la gestion des barrages publics du Québec. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(2), 308-320, 2004.
-

- M.-H. Ramos, J. Bartholomes, and J. T. del Pozo. Development of decision support products based on ensemble forecasts in the European flood alert system. *Atmospheric Science Letters*, 8, 113-119, 2007.
- A. Randrianasolo, M. H. Ramos, G. Thirel, V. Andréassian, and E. Martin. Comparing the scores of hydrological ensemble forecasts issued by two different hydrological models. *Atmospheric Sciences Letters*, *accepted*, 2010.
- R. A. Randrianasolo. Evaluation de la qualité des prévisions pour l'alerte aux crues. Technical report, Université Pierre et Marie Curie, Ecole des Mines de Paris, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Rapport de Master 2 Recherche, 2009.
- C. Rüdiger. *Streamflow Data Assimilation for Soil Moisture Prediction*. PhD thesis, Dept. of Civil & Environmental Engineering, The University of Melbourne, 414pp., 2006.
- R. H. Reichle, J. F. Walker, R. D. Koster, and P. R. Houser. Extended versus Ensemble Kalman Filtering for Land Data Assimilation. *Journal of HydroMeteorology*, 2002.
- S. Ricci. *Assimilation variationnelle océanique : modélisation multivariée de la matrice de covariance d'erreur d'ébauche*. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 2004.
- B. Ritter and J. F. Geleyn. A comprehensive radiation scheme for numerical prediction models with potential applications in climate radiations. *Monthly Weather Review*, 120 (2), 1992.
- E. Roulin and S. Vannitsem. Skill of Medium-Range Hydrological Ensemble Predictions. *Journal of Hydrometeorology*, Volume 6, pp. 729-744, 2005.
- F. Rousset. Récapitulatif sur les maillages utilisés par le système couplé SAFRAN-ISBA-MODCOU. Technical report, Météo-France, Document Interne, 2003.
- F. Rousset, F. Habets, E. Gomez, P Le Moigne, S. Morel, J. Noilhan, and E. Ledoux. Hydro-meteorological modeling of the Seine basin using the SAFRAN-ISBA-MODCOU system. *Journal of Geophysical Research*, 109, D14105, doi : 10.1029/2003JD004403, 2004.
- F. Rousset-Regimbeau. *Modélisation des bilans de surface et des débits sur la France, application à la prévision d'ensemble des débits*. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 2007.
- J. Schaake. Hydrologic Ensemble Prediction : Past, Present and Opportunities for the Future. Technical report, Abstracts of oral and poster contributions to the international CHR-Workshop Expert Consultation 'Ensemble Predictions and Uncertainties in Flood Forecasting', Bern, Switzerland, 30-31 March 2006 ; International Commission for the Hydrology of the Rhine basin (CHR) - World Meteorological Organization Sub Group on Flood Forecasting and Warning ; available at <http://www.chr-khr.org/>, 2006.
- J.C. Schaake, T.M. Hamill, R. Buizza, and M. Clark. HEPEX : The Hydrological Ensemble Prediction Experiment. *Journal of HydroMeteorology*, 88, 1541-1547, 2007.
-

- D.-J. Seo, L. Cajina, R. Corby, and T. Howieson. Automatic State Updating for Operational Streamflow Forecasting via Variational Data Assimilation. *Journal of Hydrology*, doi : 10.1016/j.jhydrol.2009.01.019, 2009.
- G. F. Smith and D. Page. Interactive forecasting with the National Weather Service River Forecast System. *Conference Proceedings of the Third National Technology Transfer Conference, Baltimore, MD, Dec 1-3, 1992, NASA Conference Publication 3189, Vol. 1, 527-536, 1993.*
- G. Thirel, R. Rousset-Regimbeau, E. Martin, and F. Habets. On the Impact of Short-Range Meteorological Forecasts for Ensemble Streamflow Predictions. *Journal of HydroMeteorology*, 9, 1301-1317., 2008.
- G. Thirel, E. Martin, J.-F. Mahfouf, S. Massart, S. Ricci, and F. Habets. A past discharges assimilation system for ensemble streamflow forecasts over France. Part 1 : Description and validation of the assimilation system. *Submitted to Hydrology and Earth System Sciences.*, 2010a.
- G. Thirel, E. Martin, J.-F. Mahfouf, S. Massart, S. Ricci, F. Regimbeau, and F. Habets. A past discharges assimilation system for ensemble streamflow forecasts over France. Part 2 : Impact on the ensemble streamflow forecasts. *Submitted to Hydrology and Earth System Sciences.*, 2010b.
- G. Thirel, F. Regimbeau, E. Martin, J. Noilhan, and F. Habets. Short and medium-range hydrological ensemble forecasts over France. *Atmospheric Science Letters.*, 2010c.
- Z. Toth and E. Kalnay. Ensemble forecasting at the NMC : The generation of perturbations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74, 2317-2330, 1993.
- Z. Toth and E. Kalnay. 3D-Var Hessian singular vectors and their potential use in the ECMWF Ensemble Prediction System. *Monthly Weather Review*, 125, 3297-3319, 1997.
- M. S. Tracton and E. Kalnay. Ensemble forecasting at NMC : Operational implementation. *Weather and Forecasting*, 8, 379-398, 1993.
- S. J. Van Andel, R. K. Price, A. H. Lobbrecht, F. van Kruiningen, and R. Mureau. Ensemble Precipitation and Water-Level Forecasts for Anticipatory Water-System Control. *Journal of HydroMeteorology*, Volume 9, 2008.
- P. J. van Leeuwen. Particle Filtering in Geophysical Systems. *Monthly Weather Review*, 137, 4089-4114, 2009.
- B. Vehvilainen and M. Huttunen. Hydrological forecasting and real time monitoring in Finland : The watershed simulation and forecasting system (WSFS). <http://www.environment.fi/waterforecast>, 2002.
- D. L. Verseghy. The Canadian Land Surface Scheme (CLASS) : Its history and future. *Atmosphere-Ocean*, 38(1), 1-13, 2000.
- X. Wang and C. Bishop. A comparison of breeding and ensemble transform Kalman filter ensemble forecast schemes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 60, 1140-1158, 2003.
-

- A. P. Weigel, M. A. Liniger, and C. Appenzeller. The Discrete Brier and Ranked Probability Skill Scores. *Monthly Weather Review*, 135, 118-124, 2006.
- M. S. Wigmosta, L. W. Vail, and D. P. Lettenmaier. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resources Research*, 30(6), 1665-1679, 1994.
- D.S. Wilks. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, 467 pp, 1995.
- B. F. Zaitchik, M. Rodell, and R. H. Reichle. Assimilation of GRACE Terrestrial Water Storage Data into a Land Surface Model : Results for the Mississippi River Basin. *Journal of HydroMeteorology*, 2008.

Improvement of the SAFRAN-ISBA-MODCOU ensemble streamflows predictions over France

ABSTRACT :

The aim of this thesis was to improve the performances of the hydrological ensemble predictions of the SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM) suite of Météo-France.

First, the short-range ensemble prediction of ARPEGE (PEARP) was used (instead of the 10-day ECMWF EPS). A comparative statistical study of both meteorological forcings and streamflow predictions, was performed.

Then, the initial states of the ensemble streamflow predictions were improved by a streamflow assimilation system in the SIM-analysis suite. The goal was to improve the streamflow simulations by modifying the soil moisture with the Best Linear Unbiased Estimator (BLUE). Several configurations were tested and showed a significant improvement of streamflow simulations.

Finally, the impact of the assimilation system on the two ensemble streamflow predictions systems was quantified. The improvement was significant, even at a medium time-range.

AUTEUR

Guillaume THIREL

TITRE

Amélioration des prévisions d'ensemble des débits
sur la France de SAFRAN-ISBA-MODCOU

DIRECTEUR DE THESE

Eric MARTIN

LIEU ET DATE
DE SOUTENANCE

Centre National de Recherche
Météorologique, Toulouse
Le 23 Novembre 2009

RESUME :

L'objectif de cette thèse était d'améliorer les performances des prévisions d'ensemble hydrologiques du modèle SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM) de Météo-France.

D'abord, la Prévision d'Ensemble ARPEGE (PEARP) a été utilisée (en remplacement de l'EPS à 10 jours du CEPMMT). Une étude statistique comparative à courte échéance des deux forçages météorologiques désagrégés et prévisions de débits a été réalisée.

Ensuite, les états initiaux des prévisions d'ensemble de débits ont été améliorés par une assimilation des débits dans SIM-analyse (qui initialise le système ensembliste). Le but est d'améliorer les simulations de débits en modifiant l'humidité du sol avec la méthode du Best Linear Unbiased Estimator (BLUE). Plusieurs configurations ont été testées et ont montré une nette amélioration des simulations de débits.

Enfin, on a quantifié l'impact de cette assimilation de débits sur les deux systèmes de prévisions d'ensemble des débits. L'amélioration est significative, même à moyenne échéance.

MOTS-CLES

Hydrologie, Prévisions d'ensemble Météorologiques
Prévisions d'ensemble Hydrologiques, Désagrégation
Comparaison statistique, Scores ensemblistes
Assimilation de données, BLUE

DISCIPLINE

Météorologie et Hydrologie

INTITULE ET ADRESSE
DU LABORATOIRE

CNRM GAME (Météo-France CNRS)
42 Avenue G. Coriolis 31057 Toulouse