



HAL
open science

Modélisation des bilans de surface et des débits sur la France, application à la prévision d'ensemble des débits

Fabienne Rousset Regimbeau

► **To cite this version:**

Fabienne Rousset Regimbeau. Modélisation des bilans de surface et des débits sur la France, application à la prévision d'ensemble des débits. Hydrologie. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2007. Français. NNT: . tel-00197071

HAL Id: tel-00197071

<https://theses.hal.science/tel-00197071>

Submitted on 18 Dec 2007

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.

Modélisation des bilans de surface et des débits sur la France, application à la prévision d'ensemble des débits

Fabienne ROUSSET REGIMBEAU

*Thèse soutenue publiquement le 06 juillet 2007
à Toulouse (Météo-France, CNRM)*

Directeur de thèse
M. Joël NOILHAN

Mots clés : Modélisation hydro-météorologique ; bassin de la Seine ; prévision d'ensemble ; débits

Discipline : Météorologie et hydrologie

Laboratoire d'accueil : Météo-France, Centre National de Recherche Météorologique (groupe GMME, équipe MC2), 42 avenue G. Coriolis, 31057 TOULOUSE CEDEX

Résumé :

Ce travail de thèse s'appuie sur l'utilisation du modèle couplé hydro-météorologique SAFRAN-ISBA-MODCOU.

D'abord, la modélisation couplée du bassin de la Seine est mise en place, en utilisant une représentation détaillée des aquifères du bassin. La capacité de SIM à simuler les différentes composantes des bilans d'eau et d'énergie, le comportement du souterrain, et donc les débits, est présentée. En particulier, SIM est évalué pour la simulation des crues lentes de la Seine à Paris.

Ensuite, une chaîne temps réel de prévision d'ensemble des débits sur la France, basée sur SIM, est construite, où ISBA et MODCOU sont forcés par les prévisions d'ensemble météorologiques du CEPMMT désagrégées. Une analyse statistique de la qualité des prévisions d'ensemble de précipitations désagrégées et des prévisions d'ensemble de débit est effectuée sur près d'un an de prévision. Enfin, une étude des prévisions d'ensemble de plusieurs cas de grandes crues du passé récent est présentée.

Hydrological modelling over France, application to ensemble streamflow prediction

The French coupled hydrometeorological model SIM (SAFRAN : interpolates atmospheric forcing over a 8 km regular grid; ISBA : surface scheme; MODCOU : distributed hydrological model) is first applied over the Seine basin. It is evaluated over a 10-year period, with a particular attention on the underground and the streamflows. The long duration floods of the Seine at Paris are also examined.

A real-time ensemble streamflow prediction system over France, based on SIM, is then described. The ISBA and MODCOU models are forced by meteorological ensemble forecasts from ECMWF, downscaled to a 8 km resolution. A statistical study of the abilities of the system, especially for low flows and floods, is produced using nearly one year of forecasts. An analysis of ensemble forecasts for recent large flood events over France is also presented.

Key words : Distributed hydrological model; water and energy balance; Seine basin; streamflow; ensemble forecast

Résumé

Le thème de ce travail de thèse est la modélisation hydro-météorologique des bassins versants français. Il s'appuie sur l'utilisation du modèle couplé SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU), qui a déjà été appliqué et validé sur les bassins de l'Adour-Garonne et du Rhône.

La première partie de mon travail de thèse a consisté à mettre en place la modélisation couplée du bassin de la Seine, en utilisant une représentation détaillée des nappes aquifères du bassin. Cette étude a montré la capacité de SIM à simuler les différentes composantes des bilans d'eau et d'énergie sur le bassin, en particulier le comportement du souterrain, ce qui conduit à une bonne reproduction des débits. En particulier, la chaîne SIM est un outil performant pour la simulation des crues lentes de la Seine à Paris.

Dans la seconde partie de ma thèse, j'ai mis en place une chaîne de prévision d'ensemble des débits sur la France basée sur SIM, dans laquelle ISBA et MODCOU sont forcés par les prévisions d'ensemble météorologiques produites par le CEPMMT et désagrégées à la résolution d'ISBA. Cette chaîne de prévision fonctionne en temps réel. Une analyse statistique de la qualité des prévisions d'ensemble de précipitations désagrégées et des prévisions d'ensemble de débit est effectuée sur près d'un an de prévision. Enfin, une étude des prévisions d'ensemble de plusieurs cas de grandes crues du passé récent est présentée.

Table des matières

I	Introduction	1
II	La modélisation hydro-météorologique, présentation de la chaîne SIM	7
	Introduction	9
1	Le système d'analyse météorologique SAFRAN	11
2	Le schéma de surface ISBA	13
2.1	Présentation	13
2.2	Les paramètres d'ISBA	13
2.3	Les variables pronostiques d'ISBA	14
2.3.1	Aspect énergétique	15
2.3.2	La gestion de l'eau	15
2.3.3	Le schéma de neige	19
3	Le modèle hydrologique MODCOU	21
3.1	Définition de la structure hydrologique	21
3.2	Calcul du bilan hydrique	23
3.3	Transfert dans la zone non-saturée	23
3.4	Les transferts conjoints superficiels et souterrains	23
3.4.1	Transferts souterrains	23
3.4.2	Transferts superficiels	24
3.4.3	Echanges nappe-rivière	26
4	Le couplage SAFRAN-ISBA-MODCOU	27
5	La chaîne SIM France	29
5.1	Extension de la chaîne SIM à la France	29
5.1.1	Présentation	29
5.1.2	Les maillages développés sur les grands bassins français	29
5.1.3	Le maillage SIM France	30
5.2	Validation de la chaîne SIM France	32
5.3	La chaîne SIM France opérationnelle	36
III	Modélisation hydro-météorologique du bassin de la Seine	39
	Introduction	41
1	Mise en oeuvre de SIM sur le bassin de la Seine	43
1.1	Présentation du domaine géographique	43
1.2	Modélisation hydro-météorologique	43
1.2.1	Extension du domaine de surface	44
1.2.2	Modélisation hydrologique	44
1.2.3	Modélisation météorologique de la couche de surface	46

1.3	La période d'étude	48
1.4	Les données de validation	49
1.4.1	Les stations hydrométriques	49
1.4.2	Les piézomètres	49
2	Reconstitution du forçage atmosphérique	51
2.1	Les paramètres météorologiques reconstitués par SAFRAN	51
2.2	Analyse du forçage	51
2.2.1	Les précipitations	51
2.2.2	Les autres paramètres	54
3	Amélioration du système	57
3.1	Introduction du schéma de ville TEB (Town Energy Budget)	57
3.1.1	Introduction de TEB et modification des données d'entrées	57
3.1.2	Impacts de la prise en compte explicite des villes	58
3.1.3	Conclusion	61
3.2	Le temps de concentration	62
4	Analyse de la simulation SIM sur la période 1985-2002	63
4.1	Analyse des débits	63
4.1.1	Outils statistiques pour l'analyse des débits	63
4.1.2	Les débits journaliers	63
4.1.3	Les débits mensuels	67
4.1.4	Les hautes eaux	68
4.2	Analyse du souterrain	72
4.2.1	Contribution du souterrain au débit de la Seine	72
4.2.2	Bilan du souterrain	73
4.2.3	Comparaison avec les niveaux piézométriques observés	75
4.2.4	Analyse de l'évolution spatiale du souterrain	76
4.3	Analyse du bilan hydrique	78
4.3.1	Variabilité spatiale	78
4.3.2	Variabilité temporelle	79
4.4	Analyse du bilan d'énergie	82
4.4.1	Variabilité spatiale	82
4.4.2	Variabilité temporelle	82
4.5	Bilan de la simulation 1985-2002	83
5	Etude des crues de la Seine	85
5.1	Simulation des crues de la Seine à Paris : les débits	85
5.1.1	Quelques exemples de débits de crue simulés et observés	85
5.1.2	Résultats statistiques	86
5.2	Analyse détaillée des crues de la Seine à Paris	86
5.2.1	Etude détaillée de l'épisode de crue 0102-3 de Février-Mars 2002	86
5.2.2	Résultats obtenus pour les autres épisodes de crue de la période	89
5.2.3	Rôle du souterrain pendant les périodes de crue	95
5.3	Cas des crues de décembre 2001 et janvier 2002	95
5.4	Bilan	96
	Conclusion	97
IV	Prévision d'ensemble des débits	99
1	Les prévisions d'ensemble : une présentation	101
1.1	Introduction	101
1.2	Différents types de prévisions d'ensemble atmosphériques	102

1.3	Les prévisions d'ensemble en hydrologie	105
1.3.1	Contexte international	105
1.3.2	Prévisions d'ensemble hydrologiques à Météo-France	106
2	Mise en place de la chaîne de prévision d'ensemble des débits	109
2.1	Principe général de fonctionnement de la chaîne de prévision d'ensemble des débits .	109
2.2	Stratégie de mise en oeuvre	110
2.3	La désagrégation spatiale des prévisions d'ensemble du Centre Européen	111
2.3.1	Principe	111
2.3.2	Les précipitations	114
2.3.3	Les autres paramètres	120
2.4	Optimisation du temps de traitement/calcul et du volume des entrées/sorties	120
2.5	Visualisation des sorties de la chaîne	121
2.6	Bilan	124
3	Outils statistiques pour l'analyse des performances du système	125
3.1	La vérification des prévisions d'ensemble	125
3.2	Analyse du comportement de la moyenne de l'ensemble et de l'ensemble autour de sa moyenne	126
3.2.1	Score de la moyenne : EQM	126
3.2.2	La dispersion de l'ensemble : S	126
3.3	Les scores statistiques probabilistes	126
3.3.1	Le Score de Brier (BS) et le Skill Score associé (BSS)	126
3.3.2	Décomposition algébrique du score de Brier : fiabilité et résolution	127
3.3.3	Le diagramme d'attributs	129
3.3.4	Le diagramme de fiabilité	130
3.3.5	Le Ranked Probability Score (RPS) et Skill Score associé (RPSS)	131
3.3.6	Diagramme de Talagrand ou diagramme de rang	132
3.4	Taux de succès, fausses alarmes, non prévisions, courbes ROC	133
4	Analyse statistique de la qualité des prévisions d'ensemble de précipitations du CEP désagrégées	135
4.1	Analyse statistique des prévisions d'ensemble de précipitations du CEP désagrégées sur la France	135
4.1.1	Scores de la moyenne de l'ensemble	135
4.1.2	Score de Brier - Fiabilité - Résolution	138
4.1.3	Diagrammes de fiabilité	140
4.1.4	Taux de réussite, de fausses alarmes, de non prévisions	141
4.2	Analyse statistique des prévisions d'ensemble de précipitations du CEP désagrégées pour différentes grandes régions françaises	143
4.2.1	Scores de la moyenne de l'ensemble	143
4.2.2	Score de Brier - Fiabilité - Résolution	145
4.2.3	Diagrammes de fiabilité	147
4.2.4	Taux de réussite, de fausses alarmes, de non prévisions	148
4.3	Conclusion	150
5	Analyse statistique de la qualité des prévisions d'ensemble de débit	151
5.1	Scores de la moyenne, caractéristiques de l'ensemble	151
5.2	Diagrammes de Talagrand / de Rang	158
5.3	Score de Brier et Skill Score associé - Fiabilité - Résolution	160
5.3.1	Résultats pour quelques grandes stations	160
5.3.2	Résultats sur la France	164
5.4	Taux de succès, de fausses alarmes, de non prévisions - Courbes ROC	167
5.4.1	Résultats pour quelques grandes stations	167
5.4.2	Résultats sur la France	172
5.5	Ranked Probability Score et Skill Score associé	176

5.5.1	Résultats pour quelques grandes stations	176
5.5.2	Résultats sur la France	177
5.6	Conclusion	178
6	Etude d'événements particuliers	179
6.1	Introduction	179
6.2	Etude de la crue de la Seine de mars 2001	180
6.3	Etude de la crue du Rhône de décembre 2003	183
6.3.1	Le Rhône à Viviers	183
6.3.2	Le Rhône à Beaucaire	186
6.4	Etude des épisodes de crue de Septembre-Octobre 2006	190
6.4.1	Événement des 14-15 septembre 2006 - Sud Est	190
6.4.2	Événement des 23-25 septembre 2006 - Sud Est	196
6.4.3	Bilan des événements de septembre 2006 dans le Sud Est	201
6.4.4	Événement des 3-4 octobre 2006 - Nord Est	202
V	Conclusions Générales et Perspectives	211
	Bibliographie	217

Première partie

Introduction

L'eau est le premier élément constitutif sur Terre, où elle est présente sous ses trois formes.

Les océans, qui couvrent 70% de la superficie de la planète, concentrent 97% de la masse d'eau totale de la Terre. Le temps de résidence de l'eau dans les océans est très long, par exemple les eaux froides et salées au sud du Groenland qui plongent au fond de l'Atlantique mettent plusieurs milliers d'années avant de réapparaître au sud de l'Inde. Sur les continents, la plus grande partie de l'eau se trouve dans les glaciers et les neiges éternelles (environ 2% de la masse totale), dans lesquels elle reste stockée plusieurs milliers d'années. Le reste (environ 1% de la masse totale) est contenu dans les lacs, les rivières, les sols, et les organismes vivants. Enfin, l'atmosphère contient seulement 0.001% du total de l'eau terrestre. Malgré la faiblesse des pourcentages d'eau de l'atmosphère et des continents, les rôles de ces deux derniers réservoirs d'eau sont primordiaux dans le fonctionnement énergétique et climatique de la planète.

Au coeur de la phase continentale du cycle de l'eau se trouve la partition de l'eau précipitée entre l'évapotranspiration d'une part et les écoulements à la surface (ruissellement) et dans le sol (drainage) d'autre part. En moyenne, à l'échelle de la France, on estime que sur les 800 kg.m^{-2} d'eau précipitée, 60% regagne l'atmosphère par transpiration des plantes ou évaporation, et 40% alimente les cours d'eau et les nappes souterraines. La variabilité spatiale aussi bien que temporelle de ces termes est élevée, et connaître ces termes à des échelles spatiales et temporelles fines permet de mieux appréhender la gestion des ressources en eau à l'échelle locale ou régionale. Ceci est crucial dans le contexte actuel des changements climatiques annoncés pour les décennies à venir, qui risquent d'accroître la pression sur l'eau, sa disponibilité et sa qualité.

Une bonne représentation des échanges d'eau et d'énergie à l'interface entre le sol et l'atmosphère est nécessaire dans les modèles météorologiques, car ils impactent directement les basses couches de l'atmosphère. Elle est essentielle pour la prévision numérique opérationnelle, pour des simulations climatiques, ou des études d'impact de changement climatique.

Pour mieux comprendre les différentes composantes du cycle de l'eau à l'échelle locale, régionale et globale, le programme GEWEX (Global Energy and Water Cycle Experiment, <http://www.gewex.org/>) a été mis en place en 1990, ainsi que le programme GSWP (Global Soil Wetness Project, <http://www.iges.org/gswp/>) qui fait partie de GEWEX. Dans ce cadre, de nombreuses expériences régionales ont été menées sur des milieux variés, des forêts boréales dans BOREAS ([SELLERS et al. 1997]) aux régions tropicales dans LBA (Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia, [NOBRE 1996]).

Dans les zones tempérées, la campagne de mesure HAPEX-MOBILHY (Hydrological Atmospheric Pilot Experiment - Modélisation du Bilan Hydrique, [ANDRE et al. 1986]) a eu lieu en France (bassin de l'Adour), dans le but d'étudier le bilan hydrique sur une zone contrastée (zone sableuse de la forêt des Landes au nord, cultures sur sol argileux au sud) ainsi que la variabilité des flux de surface sur une zone choisie de la taille d'une maille d'un GCM (Global Circulation Model).

De plus, devant la grande diversité des schémas de surface, le programme d'intercomparaison PILPS (Project for Intercomparison of Land-Surface Parametrization Schemes) a été initié en 1992 ([HENDERSON-SELLERS et al. 1993]). Il a permis d'améliorer la simulation des processus de surface. Il a également mis en évidence l'intérêt de prendre en compte certains processus physiques

comme le ruissellement sous-maille (PILPS 2c [WOOD et al. 1998]) ou le gel du sol (PILPS 2d [SCHLOSSER et al. 2000] et PILPS 2e [BOWLING et al. 2001]).

Les projets SnowMIP ([ETCHEVERS et al. 2002 (b)]) et SnowMIP2 ([ETCHEVERS et al. 2004]), dont le but était d'étudier la représentation des processus liés à la neige pour diverses applications (modèles de climat, hydrologie, physique de la neige), ont en particulier souligné l'intérêt de la simulation de l'eau liquide dans la neige.

Enfin, au sein du projet GEWEX (Global Energy and Water cycle EXperiment, soutenu par le WCRP World Climate Research Programme), le programme GEWEX-Rhône ([OTTLE et al. 2001]) a été mis en place afin d'étudier les processus entrant en jeu dans le bilan d'eau à l'échelle du bassin versant du Rhône. Dans la lignée de ce programme, le projet international d'intercomparaison de schémas de surface RHONE-AGG ([BONNE et al. 2004]) a été organisé sur le bassin du Rhône, il a en particulier montré l'intérêt d'utiliser un schéma de neige explicite plutôt qu'implicite ainsi que de représenter la variabilité sous-maille de la végétation.

Toutes ces expériences ont permis de progresser dans la compréhension et la modélisation des processus qui interviennent dans le cycle de l'eau et de leur variabilité, à l'échelle régionale.

De plus, elles ont mis en évidence l'intérêt du couplage entre un schéma de surface et un modèle hydrologique, afin de valider en partie les bilans d'eau et d'énergie à l'échelle du bassin versant, pour lesquels peu de mesures sont disponibles, grâce à la comparaison aux débits observés. En effet, les débits intègrent l'information des différents processus d'écoulement paramétrisés dans le modèle, et sont facilement comparables à des observations grâce à un réseau assez dense de stations de mesure.

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

Ce système couplé est composé de trois modules :

- Le système SAFRAN (Système Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige, [DURAND et al. 1993], [DURAND 1995]) produit une analyse des paramètres météorologiques (précipitations, température, vent, rayonnements, humidité) nécessaires à ISBA, sur une grille régulière 8 km, à partir d'observations de surface et d'analyses de modèle (modèle ARPEGE de Météo-France) ;
- Le schéma de surface ISBA (Intéactions Surface Biosphère Atmosphère, [NOILHAN and PLANTON 1988] calcule les bilans hydrique et énergétique, et utilise en entrée des données fines de végétation et de nature des sols, ainsi que plusieurs paramètres météorologiques (fournis par SAFRAN). ISBA est le schéma de surface opérationnel des modèles de prévision numérique de Météo-France ARPEGE et ALADIN, il est également couplé au modèle de climat ARPEGE-CLIMAT ;
- Enfin, le modèle hydrologique MODCOU (MODèle COUplé, [LEDOUX et al. 1984], [LEDOUX 2003]) simule les transferts hydrologiques de surface, souterrains, et les échanges entre nappes aquifères et rivières.

La chaîne SIM a été appliquée et validée de façon approfondie pour deux grands bassins français : le Rhône ([ETCHEVERS 2000]) et l'Adour-Garonne ([MOREL 2002]). Ces travaux ont mis en évidence la capacité de la chaîne SIM à reproduire les bilans d'eau et d'énergie de ces deux bassins et à bien simuler les débits de la plupart des cours d'eau de ces bassins. En particulier, ces bassins (surtout le Rhône) sont marqués par la forte influence de la composante nivale, et SIM s'est montré capable de simuler de façon correcte l'enneigement des massifs alpin et pyrénéen. De plus, la chaîne SIM a été un outil d'évaluation de l'impact du changement climatique sur les composantes du bilan hydrique de ces bassins, et a également permis d'étudier la prise en compte de l'irrigation sur le bilan hydrique sur le bassin de l'Adour.

Dans la première partie de mon travail de thèse, j'ai été amenée à appliquer et valider la chaîne SIM sur un troisième grand bassin français, le bassin de la Seine. Ce bassin est assez différent des deux précédents, en effet la composante nivale y est absente, en revanche le comportement du

bassin est fortement contraint par la présence de plusieurs nappes aquifères de grande étendue. Pour la première fois, la chaîne SIM bénéficie donc d'une modélisation complexe et détaillée du domaine souterrain. Cette étude est présentée dans la partie III, et a fait l'objet d'une publication au *Journal of Geophysical Research* [ROUSSET et al. 2004].

Suite à ces trois applications et validations sur trois des plus grands bassins versants français, la chaîne SIM a été uniformisée et étendue à l'ensemble de la France. Cette extension permet de simuler les débits de l'ensemble des cours d'eau français, et a été effectuée avec pour objectif d'utiliser la chaîne SIM en temps réel, de façon opérationnelle. Ainsi, la chaîne SIM est en partie exploitée en opérationnel à Météo-France depuis fin 2003, et permet entre autres un monitoring quotidien des composantes du bilan hydrique sur la France.

La seconde partie de ma thèse a été consacrée au développement d'une application nouvelle de la chaîne SIM, pour la prévision d'ensemble des débits.

En effet, les précédentes applications de SIM sur les grands bassins français ont démontré les capacités de la chaîne SIM à reproduire correctement les bilans d'eau et d'énergie de ces bassins, ainsi que les débits de leurs cours d'eau. Une expérience de prévision déterministe des débits du Rhône ([HABETS et al. 2004]) a également donné des résultats encourageants pour la prévision des débits.

De plus, la production de prévision d'ensemble hydrologique est en plein développement au sein de la communauté internationale. On peut citer par exemple la mise en place du projet international HEPEX (Hydrologic Ensemble Prediction EXperiment), ou encore de l'action COST "Propagation of Uncertainty in Advanced Meteo-Hydrological Forecast Systems". La Communauté Européenne a également mis en place un système d'alerte, le système EFAS (European Flood Alert System), pré-opérationnel depuis 2005, qui produit notamment des prévisions d'ensemble de débit à l'échelle de l'Europe et à échéance de 10 jours.

Cette émergence des prévisions d'ensemble en hydrologie fait suite à la demande de plus en plus forte d'une meilleure anticipation des conditions hydrologiques extrêmes (crues aussi bien qu'étiages). La nature probabiliste de ces prévisions permet de qualifier l'incertitude liée à la prévision, et allonge l'échéance de prévision (qui peut aller jusqu'à 10 jours) par rapport aux prévisions déterministes (dont l'échéance est de l'ordre de 2 ou 3 jours).

Météo-France a donc décidé de s'orienter vers la prévision d'ensemble des débits. Pour mettre en place cette chaîne de prévision, j'ai bénéficié de toute l'expertise existante sur la chaîne SIM et des travaux de validation effectués par le passé. La chaîne que j'ai développée produit des prévisions d'ensemble de débit à 10 jours d'échéance pour 907 stations en France. Pour des bassins comme la Seine par exemple, ce type de prévision fournit une information jusqu'à des échéances pour lesquelles il n'est pas possible d'estimer le débit attendu par la connaissance des débits amonts.

La construction de la chaîne de prévision d'ensemble des débits, sa validation statistique, et l'analyse de plusieurs cas de grandes crues du passé récent sont décrites dans la partie IV de ce manuscrit. Ce travail fait également l'objet d'une publication dans *ECMWF Newsletter* ([ROUSSET REGIMBEAU et al. 2007]).

Deuxième partie

**La modélisation
hydro-météorologique, présentation
de la chaîne SIM**

Introduction

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

Le schéma de surface ISBA (Interactions Surface Biosphère Atmosphère, [NOILHAN and PLANTON 1988]) a été développé au CNRM. Il est relativement "simple", car 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.

ISBA, dans la version que j'ai utilisée dans ma thèse et qui est présentée en détails dans le chapitre 2, prend en compte trois couches dans le sol, un seul bilan d'énergie pour le sol et la végétation, et le calcul des transferts d'eau et de chaleur par la méthode Force-Restore.

ISBA est très modulaire, et dispose de nombreuses autres options. Ainsi, il existe notamment la version ISBA-DF qui calcule par diffusion les flux d'eau et de chaleur dans le sol. Dans la version ISBA-A- g_s ([CALVET et al. 1998], [CALVET et al. 2001]), la représentation de la végétation a été améliorée, en tenant compte de l'assimilation nette du CO_2 et du stress hydrique pour décrire l'ouverture et la fermeture des stomates et pour simuler l'évolution de la biomasse et de l'indice foliaire.

De plus, le schéma de surface ISBA est également couplé au modèle hydro-géologique MODCOU (MODèle COUplé, [LEDOUX et al. 1984], [LEDOUX 2003], [HABETS 1998]), développé par le CG/ENSMP (Centre de Géosciences de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris). Le fonctionnement de MODCOU est détaillé au chapitre 3.

Un tel couplage, dont le principe est décrit au chapitre 4, 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.

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 (chapitre 1) pour l'analyse des paramètres météorologiques de surface, pour constituer la chaîne SIM.

Après avoir été validée sur trois grands bassins versants français, le Rhône ([ETCHEVERS 2000]), l'Adour-Garonne ([MOREL 2002]) et la Seine (partie III de ce manuscrit et [ROUSSET et al. 2004]), la chaîne SIM a été étendue à l'ensemble de la France. 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. La chaîne SIM France et son exploitation opérationnelle sont décrites au chapitre 5.

Chapitre 1

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 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 : température de l'air au voisinage de la surface, vent à 10m, humidité spécifique de l'air, précipitations solides et liquides, nébulosité totale, rayonnements solaire (direct et diffus) et infrarouge, au pas de temps horaire, et avec une discrétisation verticale variable (généralement fixée à 300m).

Ensuite, ce système a été étendu sur toute la France, afin de fournir une analyse du forçage atmosphérique sur l'ensemble du territoire ([ETCHEVERS 2000], [LEMOIGNE 2002]). L'analyse des paramètres météorologiques effectuée par SAFRAN sur la France ainsi que sa validation sont décrites en détails dans [QUINTANA-SEGUI et al. 2007].

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

Sur l'ensemble de la France, il y a 615 zones SAFRAN, de forme irrégulière, d'une surface en général inférieure à $1\,000\text{ km}^2$, et sur lesquelles les gradients horizontaux climatologiques (en particulier de précipitations) sont faibles. La carte 1.1 montre le zonage SAFRAN/France.



FIG. 1.1 – Zones SAFRAN sur la France

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

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 6 heures, et avec une résolution verticale de 300 *m*.

Cas particulier du rayonnement : 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]). Celui-ci 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, 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 (comme décrit dans [ETCHEVERS 2000]).

– Interpolation horaire :

L'ensemble des paramètres sont interpolés 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 d'un modèle de transfert radiatif et d'un terme de rappel à l'équilibre ([MARTIN 1988]). La température à 2 *m* à 12 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 °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*.

Ces données sont ensuite interpolées sur la grille régulière 8 *km* sur laquelle travaille ISBA. Chaque maille appartient à un massif SAFRAN, 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*).

Chapitre 2

Le schéma de surface ISBA

2.1 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. Il est couplé avec les modèles opérationnels de prévision numérique utilisés à Météo-France, ARPEGE et ALADIN, mais aussi avec des modèles comme ARPEGE-climat (modèle de circulation générale), Méso-NH (modèle de méso-échelle non-hydrostatique), ou MODCOU (modèle hydro-géologique) (chapitre 4).

2.2 Les paramètres d'ISBA

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

Les paramètres primaires : ce sont le type de sol (via les pourcentages de sable et d'argile) et le type de végétation ;

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 LACARRERE 1995]). Ce sont :

1. *les paramètres liés au sol :*

on les détermine à partir des relations de [CLAPP and HORNBERGER 1978] et du type de sol.

- 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, en dessous de 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. Cette 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), en dessous de ce seuil l'eau contenue dans le sol est inutilisable par les plantes, car elle forme des films très mince autour des particules du sol et les forces capillaires deviennent très fortes. 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.

2. *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, et ce 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 d'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.

3. Enfin, à cette liste s'ajoutent l'albédo α et l'émissivité ϵ de la surface.

2.3 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.

Pour une meilleure compréhension du fonctionnement d'ISBA, la figure 2.1 synthétise les composantes des bilans hydrique et énergétique.

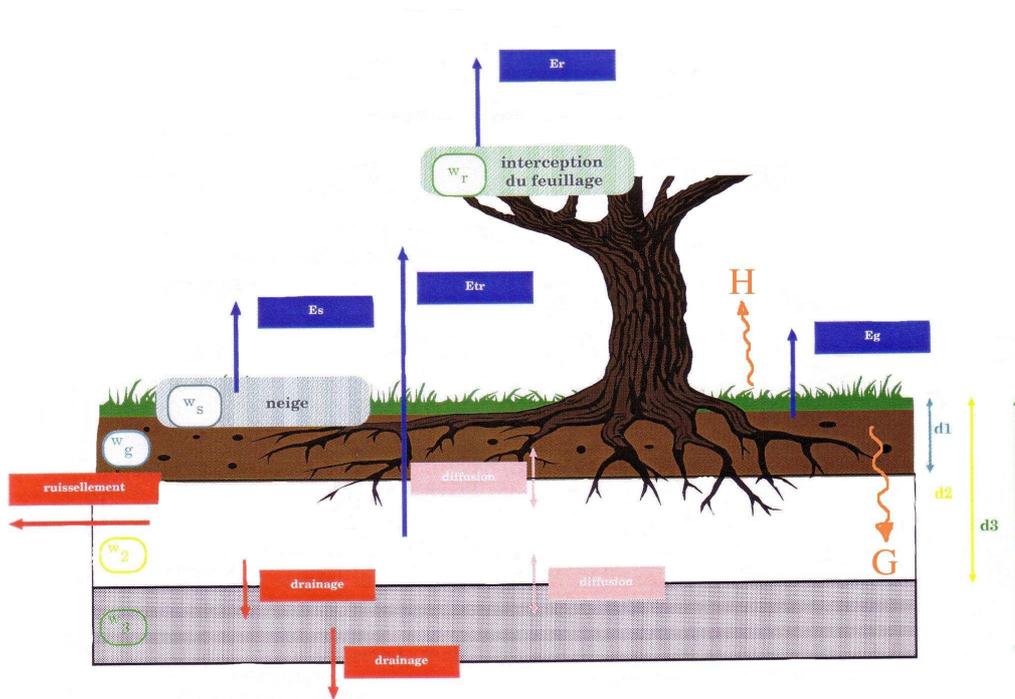


FIG. 2.1 – Principe du schéma de surface ISBA

La version d'ISBA utilisée possède trois réservoirs d'eau dans le sol. 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 (ie d'évaporation) qui permet de coupler ces deux bilans.

Le détail de ce fonctionnement est donné ci-après.

2.3.1 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 latent), 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-couverture neigeuse.

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. Le bilan énergétique dans ISBA

Il s'exprime par la relation suivante :

$$R_n = R_G(1 - \alpha_t) + \epsilon(RAT - \sigma T_s^4) = H + LE + G$$

T_s est la température unique du milieu sol-végétation-neige.

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

H représente 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 :

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

où C_p est la chaleur spécifique de l'air, ρ_a , V_a et T_a sont la densité de l'air, la vitesse du vent et la température 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} .

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

2.3.2 La gestion de l'eau

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

$$\frac{\partial w_g}{\partial t} = \frac{C_1}{\rho_w d_1} (P_g - E_g - F_{gw}) - \frac{C_2}{\tau} (w_g - w_{geq}) \quad 0 \leq w_g \leq w_{sat} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial w_2}{\partial t} = \frac{1}{\rho_w d_2} (P_g - E_g - E_{tr} - F_{2w}) - D_{r1} - D_{f1} \quad 0 \leq w_2 \leq w_{sat} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial w_3}{\partial t} = \frac{d_2}{d_3 - d_2} (D_{r1} + D_{f1}) - D_{r2} \quad 0 \leq w_3 \leq w_{sat} \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial w_r}{\partial t} = vegP - E_r - R - r \quad 0 \leq w_r \leq w_{rmax} \quad (2.6)$$

où ρ_w est la masse volumique de l'eau.

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

$$D_{r1} = \frac{C_3}{d_2 \tau} \max [w_{drain}, (w_2 - w_{fc})] \quad (2.7)$$

$$D_{r2} = \frac{C_3}{\tau (d_3 - d_2)} \max [w_{drain}, (w_3 - w_{fc})] \quad (2.8)$$

(voir paragraphe *Le drainage gravitationnel* page 17)

et la diffusion entre la zone profonde et la zone racinaire est exprimée par :

$$D_{f1} = \frac{C_4}{\tau} (w_2 - w_3) \quad (2.9)$$

L'évolution du contenu en eau du réservoir d'interception W_r (équation 2.6) 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} dépend uniquement de la densité du couvert végétal : $w_{rmax} = 0.2 \times LAI \times veg$. La partie des précipitations qui n'est pas interceptée ($(1 - veg)P$) atteint le sol nu, une partie de cette eau va ruisseler 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 2.3) évolue en fonction du flux d'eau de surface (les précipitations P_g qui s'infiltré, 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 2.4) (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 2.5) 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 :

$$\sum \text{Précipitations} = \sum \text{Evaporation} + \sum \text{Ruissellement} + \sum \text{Drainage} + \Delta w$$

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 :

$$E = E_g + E_v + E_s + E_{gi} + E_{sl}$$

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.

· L'évaporation du sol nu : E_g

Ce terme est donné par les expressions suivantes :

$$E_g = (1 - veg)\rho_a C_H V_a (h_u q_{sat}(T_s) - q_a) \text{ si } q_{sat}(T_s) \geq q_a \quad (2.10)$$

$$E_g = (1 - veg)\rho_a C_H V_a (q_{sat}(T_s) - q_a) \text{ si } q_{sat}(T_s) < q_a \text{ et } T_s < T_a \quad (2.11)$$

avec ρ_a , 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'expression 2.11 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 $E_v = E_r + E_{tr}$.

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

$$E_r = veg\rho_a \frac{\delta}{R_a} [q_{sat}(T_s) - q_a] \text{ où } R_a = \frac{1}{C_H V_a} \quad (2.12)$$

avec δ la fraction de feuillage recouvert d'eau. On considère (d'après [DEARDORFF 1978]) que

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

Le flux de transpiration des plantes s'écrit :

$$E_{tr} = veg\rho_a \frac{1 - \delta}{R_a + R_s} [q_{sat}(T_s) - q_a] \quad (2.13)$$

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 :

$$R_s = \frac{R_{smin}}{LAI} F_1 F_2^{-1} F_3^{-1} F_4^{-1} \quad (2.14)$$

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 de la zone racinaire.

· La sublimation de la neige : E_s , voir chapitre 2.3.3 page 19.– 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 (voir équations 2.7 et 2.8), du type :

$$D = -\frac{C_3}{\tau d} \max [w_{drain}, (w - w_{fc})] \quad (2.15)$$

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 chapitre 4).

Si on suppose que seul le drainage fait évoluer le contenu en eau du sol w , sa décroissance est donc 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 1995] :

$$C_3 = \frac{5.327 X_{clay}^{-1.043}}{d}$$

– Le ruissellement sous-maille :

Le schéma de surface étant utilisé à l'échelle d'un bassin versant et sur des mailles de $8 \times 8 km$, 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 (Variation de la Capacité d'Infiltration) a été paramétrisé dans ISBA. Son principe est présenté sur les figures 2.2 et 2.3 :

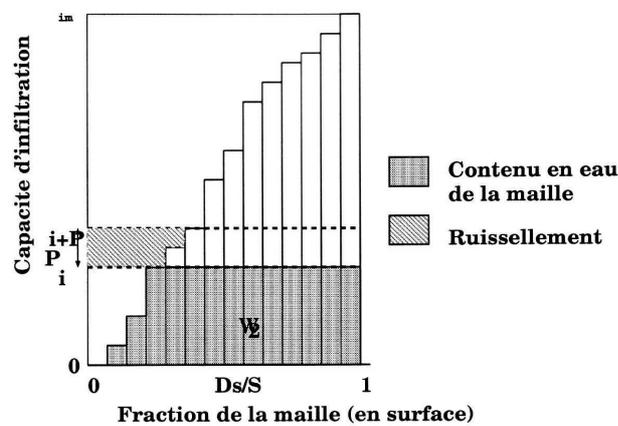


FIG. 2.2 – Principe du schéma de ruissellement sous-maille

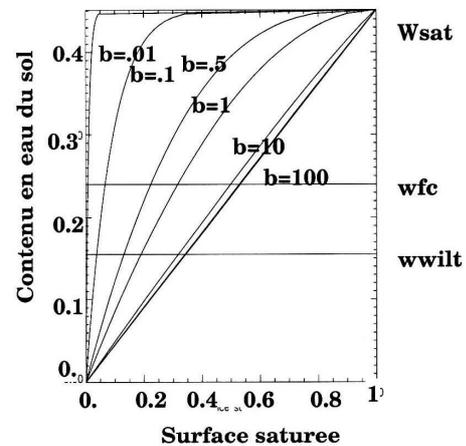


FIG. 2.3 – Variation de la fraction de la maille saturée en fonction du contenu en eau et du paramètre de courbure b

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 (figure 2.2). 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 événement pluvieux, si on considère que les précipitations se répartissent uniformément sur la maille, chaque réservoir recevant $P mm$, la fraction $A(i)$ déjà saturée ne peut plus stocker ce surplus d'eau et va donc l'évacuer par ruissellement. Les réservoirs 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 se saturent lors de l'événement pluvieux.

Dans le schéma de ruissellement sous-maille, on suppose que la capacité d'infiltration de la maille suit la distribution suivante (figure 2.3) :

$$i = i_m \left[1 - (1 - A(i))^{\frac{1}{b}} \right] \iff A(i) = 1 - \left(1 - \frac{i_0}{i_m} \right)^b \quad (2.16)$$

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 :

$$Q_r = \int_i^{i+P} A(i)di = P + \frac{i_m}{b+1} \left[\left(1 - \frac{i+P}{i_m}\right)^{b+1} - \left(1 - \frac{i}{i_m}\right)^{b+1} \right] \quad (2.17)$$

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

$$A(w_2) = 1 - \left(1 - \frac{w_2}{w_{sat}}\right)^{\frac{b}{b+1}} \quad (2.18)$$

Il y a donc ainsi toujours ruissellement sauf lorsque le contenu en eau 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 $w_2 < w_{wilt}$.

2.3.3 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 (voir [BOONE 2000] et [MOREL 2002]).

– L'équivalent en eau du manteau neigeux :

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

$$\frac{\partial W_n}{\partial t} = P_n + p_n P_l - E_n - fonte \quad (2.19)$$

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 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} :

$$D_s = P_n \frac{\Delta t}{\rho_{new}} \quad (2.20)$$

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

$$D_{s1} = \delta 0.25 D_s + (1 - \delta) D_{s1max} \quad (2.21)$$

$$D_{s2} = \delta 0.50 D_s + (1 - \delta) [0.34(D_s - D_{s1max}) + D_{s1max}] \quad (2.22)$$

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

$$\rho_s D_s = \rho_w W_s \quad (2.23)$$

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

$$\frac{1}{\rho_s} \frac{\partial \rho_s}{\partial t} = \text{compaction} + \text{tassement} \quad (2.24)$$

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 :

$$H_s = c_n D (T_s - T_f) - L_f \rho_w (W_s - W_l) \quad (2.25)$$

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.

$$W_l = W_s + \frac{H_s}{L_f \rho_w} \quad (2.26)$$

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 ($L_f \rho_w \frac{\partial W_l}{\partial t}$).

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 et de la sublimation issue de cette première couche :

$$L E_n = \left[\left(1 - \frac{W_l}{W_s}\right) L_s + \frac{W_l}{W_s} L_v \right] E_n \quad (2.27)$$

$$E_n = \rho_a C_h V_a (q_{sat}(T_s) - q_a) \quad (2.28)$$

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.

N.B. : 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.

Chapitre 3

Le modèle hydrologique MODCOU

Le modèle hydrologique MODCOU a été développé par l'Ecole 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]). Le cycle de l'eau est représenté par cinq fonctions, comme le montre la figure 3.1.

La quantité de précipitations qui tombe dans le bassin, réduite de la quantité qui s'évapore, est partagée entre infiltration et ruissellement. L'eau infiltrée traverse une zone non-saturée avant de rejoindre la(les) nappe(s) aquifère(s). L'eau ruissellée est dirigée sur le réseau de surface jusqu'à la rivière et s'écoule le long de celle-ci. La rivière est le siège d'échanges avec la nappe sous-jacente.

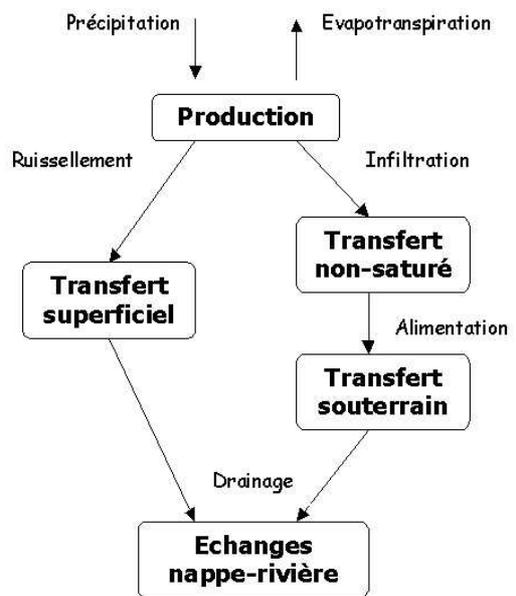


FIG. 3.1 – Le cycle de l'eau dans MODCOU

3.1 Définition de la structure hydrologique

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

Le mode de discrétisation du domaine choisi est une schématisation multicouche qui fait appel à l'emploi de mailles carrées emboîtées, dont la taille varie de 1 à 4 km, ce qui permet d'affiner la résolution dans les endroits sensibles (rivières et limites de bassins par exemple) ([GOMEZ 2002]).

Comme le montre la figure 3.2, 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 3.3).
- 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.

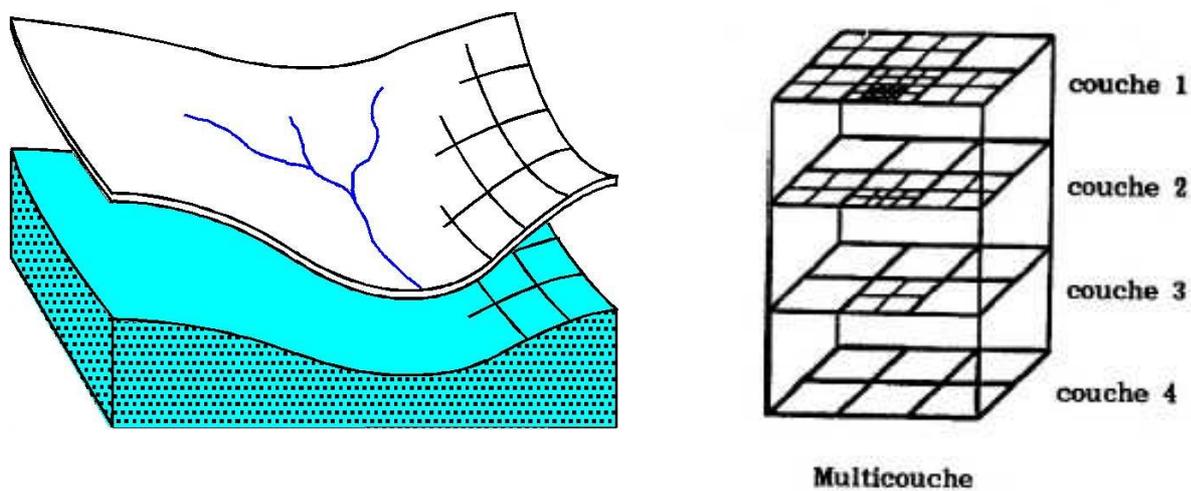


FIG. 3.2 – Principe de la schématisation multicouche

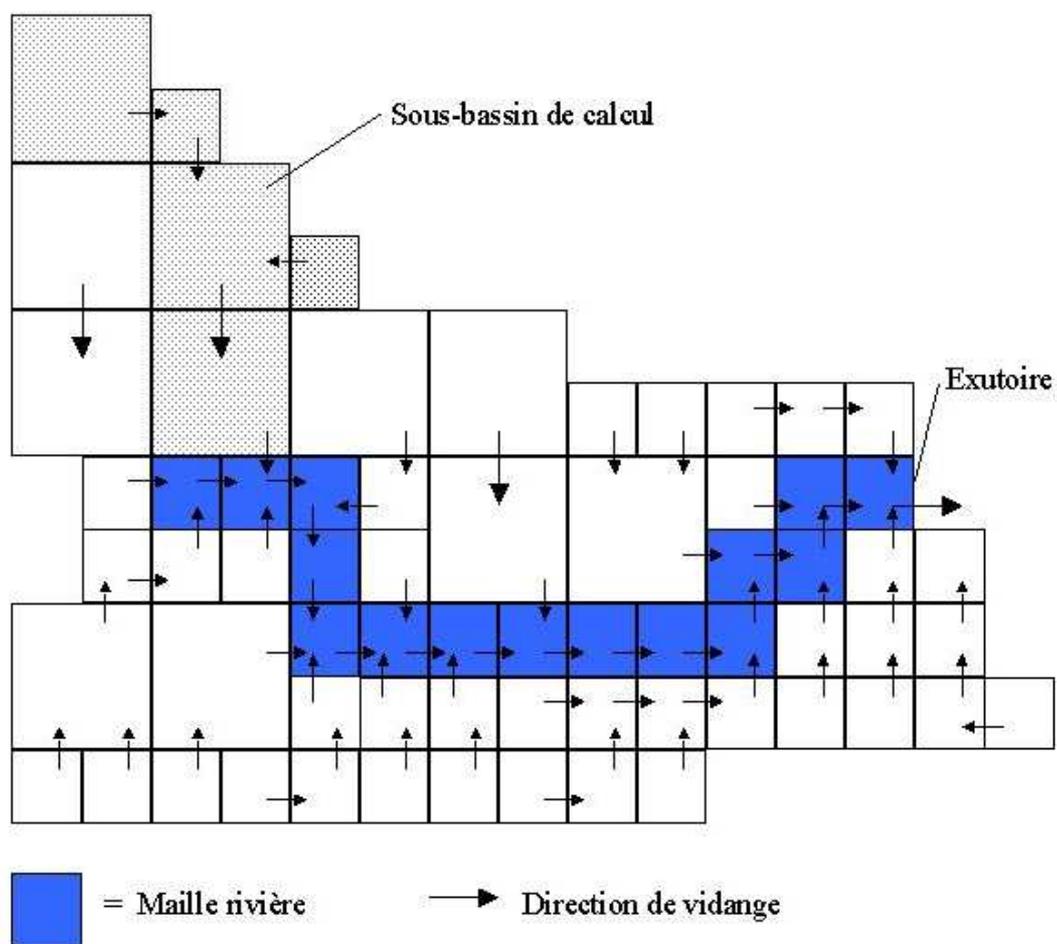


FIG. 3.3 – Discrétisation et réseau de drainage de la couche de surface (d'après [GOMEZ 2002])

3.2 Calcul du bilan hydrique

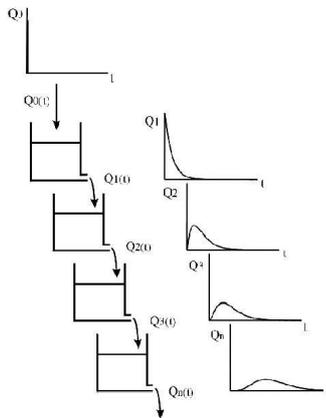
Sur chaque maille de la couche de surface le modèle calcule, à partir des précipitations et de la valeur de l'ETP, la quantité d'eau qui va s'évaporer, celle qui va ruisseler et celle qui va s'infiltrer.

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.

3.3 Transfert dans la zone non-saturée

Entre le sol superficiel et la première nappe souterraine peut exister une zone non-saturée plus ou moins épaisse, et dont l'effet est de moduler l'infiltration calculée précédemment, en fonction de la profondeur de la nappe et des caractéristiques hydrodynamiques du milieu.

Cette modulation est modélisée dans MODCOU à l'aide du modèle à réservoirs en cascade de Nash (voir figure 3.4).



La figure du haut représente l'entrée du modèle à réservoir de Nash (un dirac). En passant par les réservoirs (à gauche) ce dirac est modifié (retardé et étalé, courbes de droite).

FIG. 3.4 – Principe du modèle à réservoirs en cascade de Nash

Deux paramètres doivent être calibrés : le nombre N de réservoirs reflétant l'épaisseur de la zone non-saturée, ainsi que la constante de temps de vidange des réservoirs.

3.4 Les transferts conjoints superficiels et souterrains

3.4.1 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 :

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

avec :

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

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 :

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

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

Cette équation est alors résolue de manière itérative.

3.4.2 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 ;
- ensuite, elle est 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 zone isochrones (zones d'égal temps de transfert), comme le montre la figure 3.5.

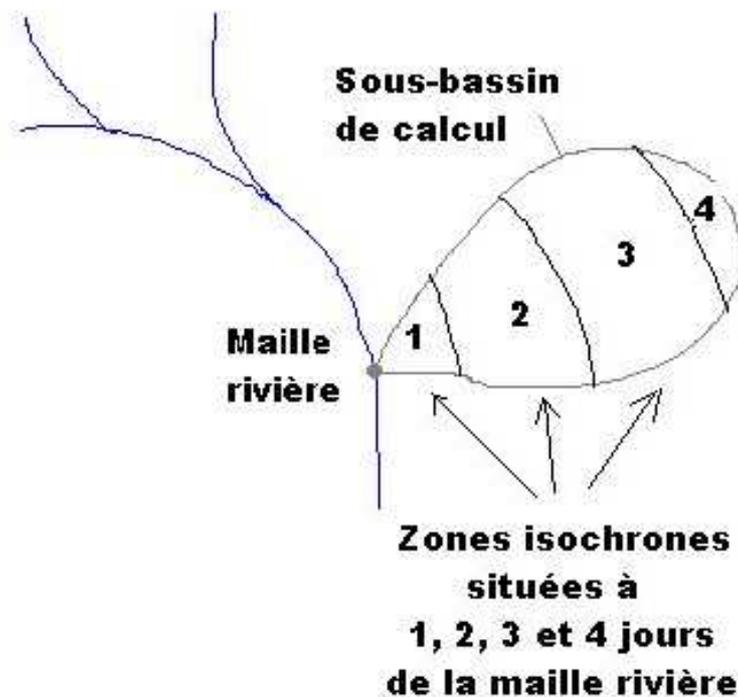


FIG. 3.5 – Exemple de tracé de zones isochrones (les mailles de surface sont rarement à plus de un jour de transfert de la maille rivière)

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

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

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

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 d'abord 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]) :

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

où :

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

Cette équation correspond à la différence entre les temps de concentrations calculé 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]) :

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

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 :

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

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 3.6.

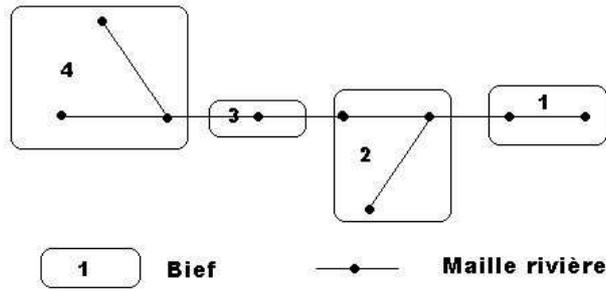


FIG. 3.6 – Principe de constitution des "biefs" sur le réseau hydrographique principal

Ces biefs se vidangent les uns dans les autres de l'amont vers l'aval, chaque bief étant doté d'un coefficient de vidange noté 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) :

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

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

3.4.3 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 hydraulique du système, deux situations sont possibles, comme le montre la figure 3.7.

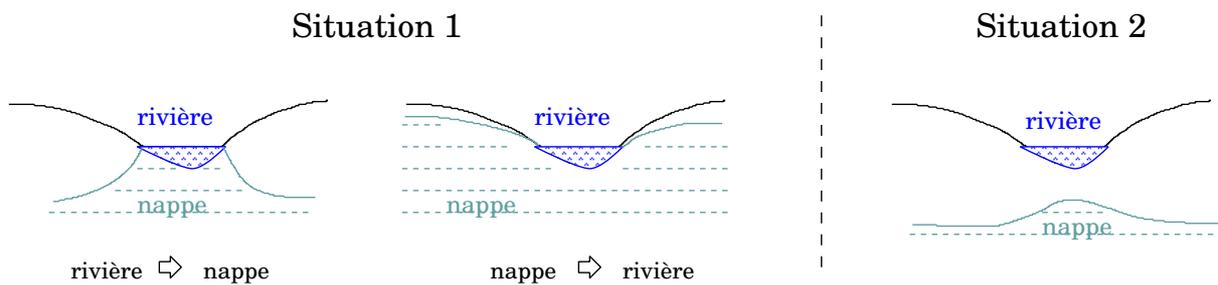


FIG. 3.7 – Principe de la relation nappe-rivière

- Situation 1 : la rivière et la nappe sont connectés hydrauliquement, et le débit échangé peut être positif ou négatif selon que la nappe donne de l'eau à la rivière ou en reçoit.
- Situation 2 : la rivière et la nappe 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_0 qui est le débit maximal qui peut percoler sous la rivière dans le non saturé.

Chapitre 4

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 1999b]). Ainsi, les données de ruissellement sous-maille ainsi que de drainage gravitationnel, issues d'ISBA toutes les cinq minutes, sont cumulées sur la journée, puis injectées dans le modèle MODCOU (dans les transferts superficiels pour les premières, et dans les transferts non-saturé et souterrain pour les secondes). Le principe de ce couplage est repris dans la figure 4.1.

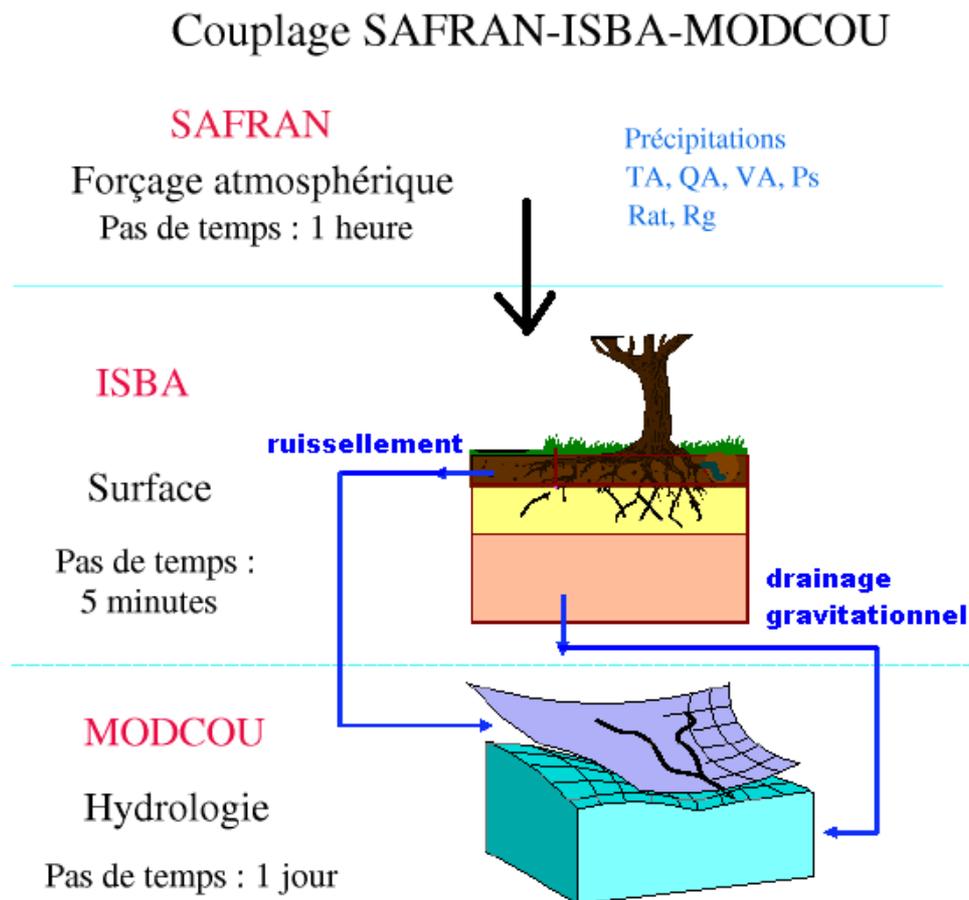


FIG. 4.1 – Schéma du principe du couplage entre ISBA et MODCOU

Chapitre 5

La chaîne SIM France

5.1 Extension de la chaîne SIM à la France

5.1.1 Présentation

La chaîne SIM a été appliquée et validée sur plusieurs grands bassins français : le Rhône ([ETCHEVERS 2000]), l'Adour-Garonne ([MOREL 2002]) et la Seine (partie III). A l'occasion de ces diverses études, des modélisations ont été développées indépendamment (figure 5.1).

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

Cette opération, qui a débuté 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]).

5.1.2 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 5.1). Ce sont ces maillages qu'il faut uniformiser et étendre à la France.

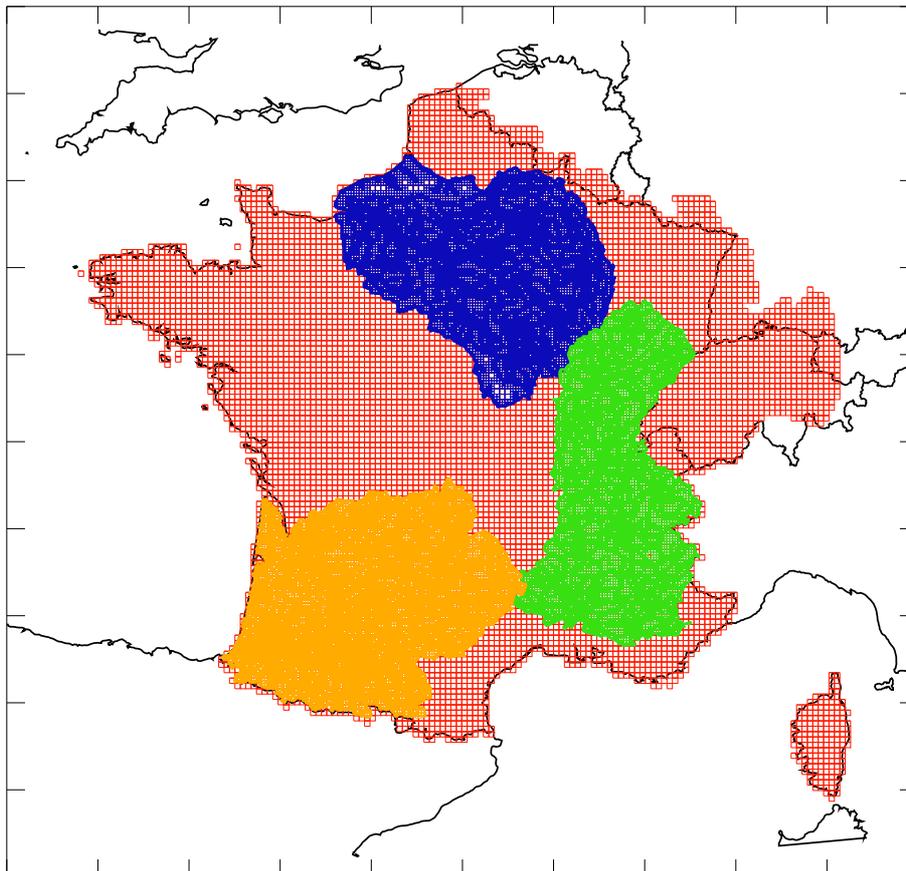


FIG. 5.1 – Maillages "hydrologiques" de surface développés pour les applications de SIM sur les bassins du Rhône (vert), de l'Adour-Garonne (orange) et de la Seine (bleu); et maillage "météorologique" ISBA sur la France (rouge)

5.1.3 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 CG/ENSMP (Centre de Géosciences de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris) 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 d'optimiser le temps de calcul de MODCOU.

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. De ce fait, les maillages "hydrologiques" de chaque bassins 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 palier à ces problèmes, en particulier dans le but de conserver les calibrations qui avaient été développées indépendamment sur chacun des bassins. En particulier, il était nécessaire de ne pas modifier le maillage développé pour le bassin de la Seine lors de l'extension à la France, pour pouvoir continuer d'utiliser les maillages des nappes de la Seine, développés et calibrés par le CG ([ROUSSET 2003]).

La figure 5.2 présente le maillage "hydrologique" utilisé dans l'application SIM France, ainsi que les mailles rivières correspondantes.

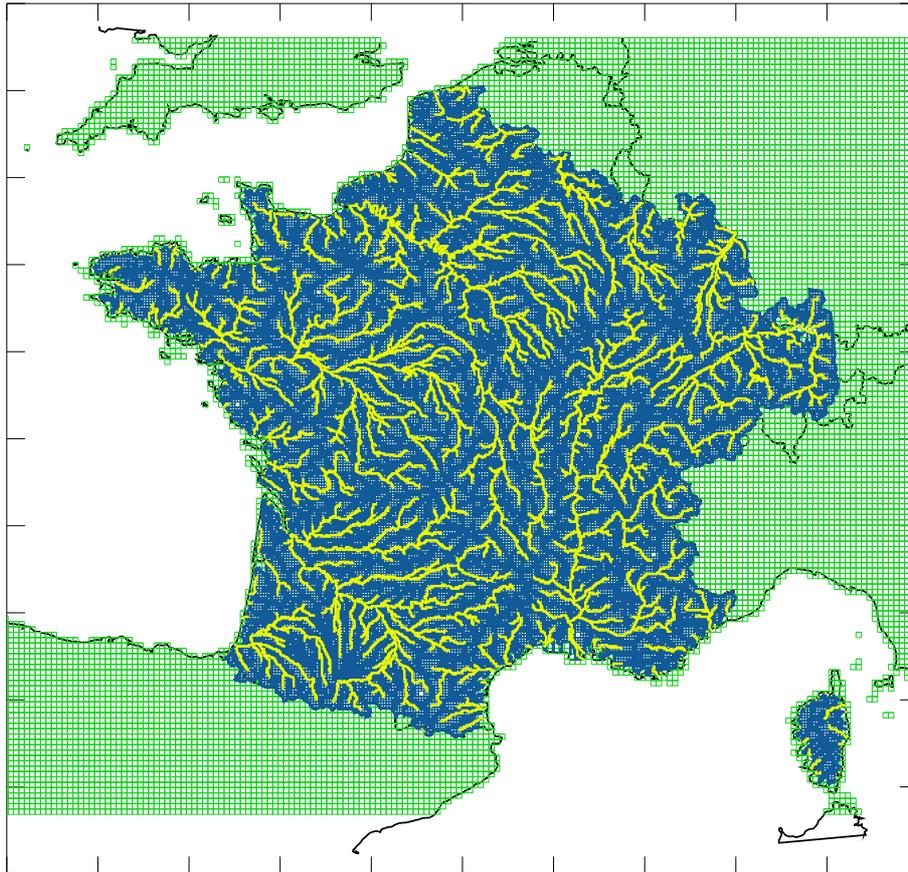


FIG. 5.2 – Maillage hydrologique de surface sur la France entière (bleu) et mailles rivières associées (jaune)

5.2 Validation de la chaîne SIM France

Le modèle SAFRAN a été validé de façon approfondie par [QUINTANA-SEGUI et al. 2007]. Cette étude a permis de mettre en évidence la capacité de SAFRAN pour l'analyse des paramètres température, vent et humidité (comparée aux observations). Néanmoins, 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. 2007]. Quelques résultats obtenus lors de cette étude sont brièvement présentés ici.

La figure 5.3 montre le cumul annuel moyen de précipitations (*mm*) sur la France.

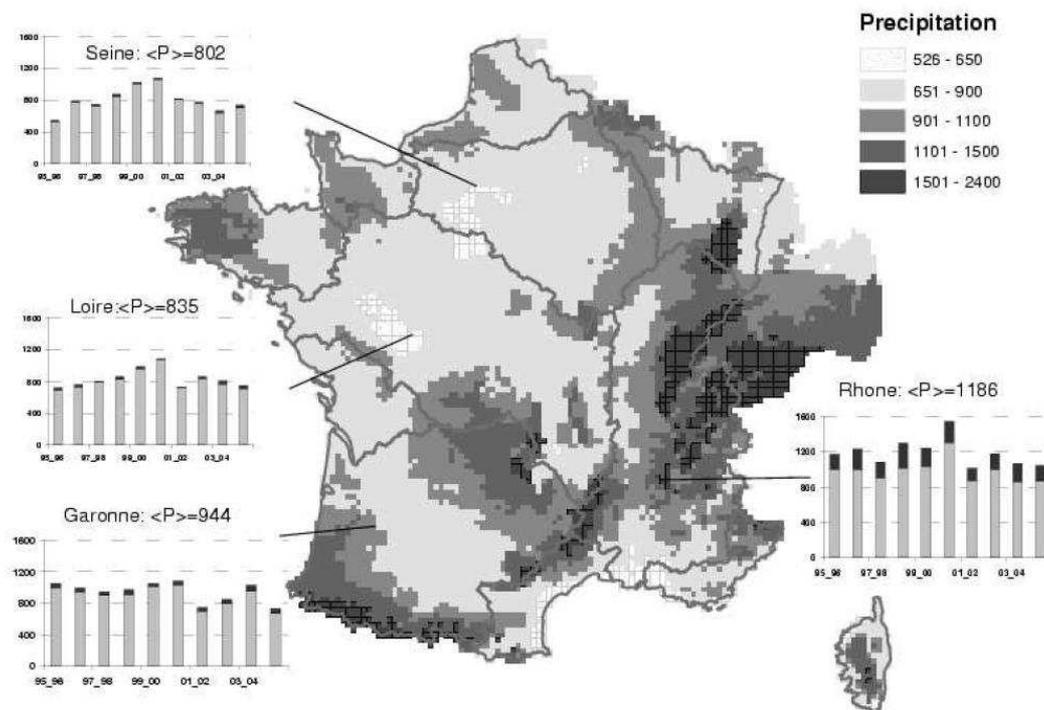


FIG. 5.3 – Cumul annuel moyen de précipitations (*mm*) sur la France. Les graphiques représentent le cumul annuel de pluie (gris clair) et de neige (gris foncé) pour plusieurs grands bassins français (d'après [HABETS et al. 2007]).

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 bassins qui sont intéressantes. On constate que ce sont les deux bassins du nord (Seine et Loire) 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 et l'autre au printemps.

La figure 5.4 présente les débits journaliers observés et simulés par SIM de 1995 à 2005 pour quatre stations.

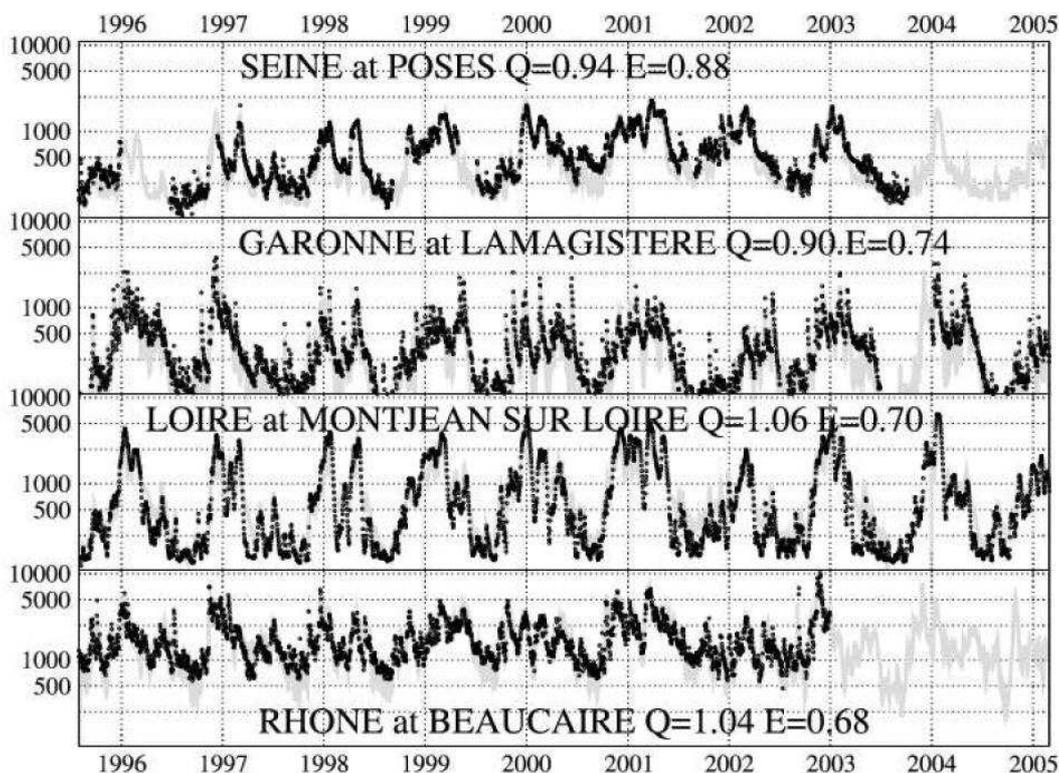


FIG. 5.4 – Débits journaliers observés (ronds noirs) et simulés (trait gris) pour quatre stations. L'échelle est la même pour les quatre tracés, de 100 à 11000 $m^3.s^{-1}$. Deux critères statistiques sont indiqués dans le titre : l'efficacité E et le rapport des lames d'eau Q (d'après [HABETS et al. 2007]).

On constate que la Loire et la Seine ont des débits estivaux du même ordre de grandeur (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 5.4, 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 sur 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.

Les figures 5.5 et 5.6 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.

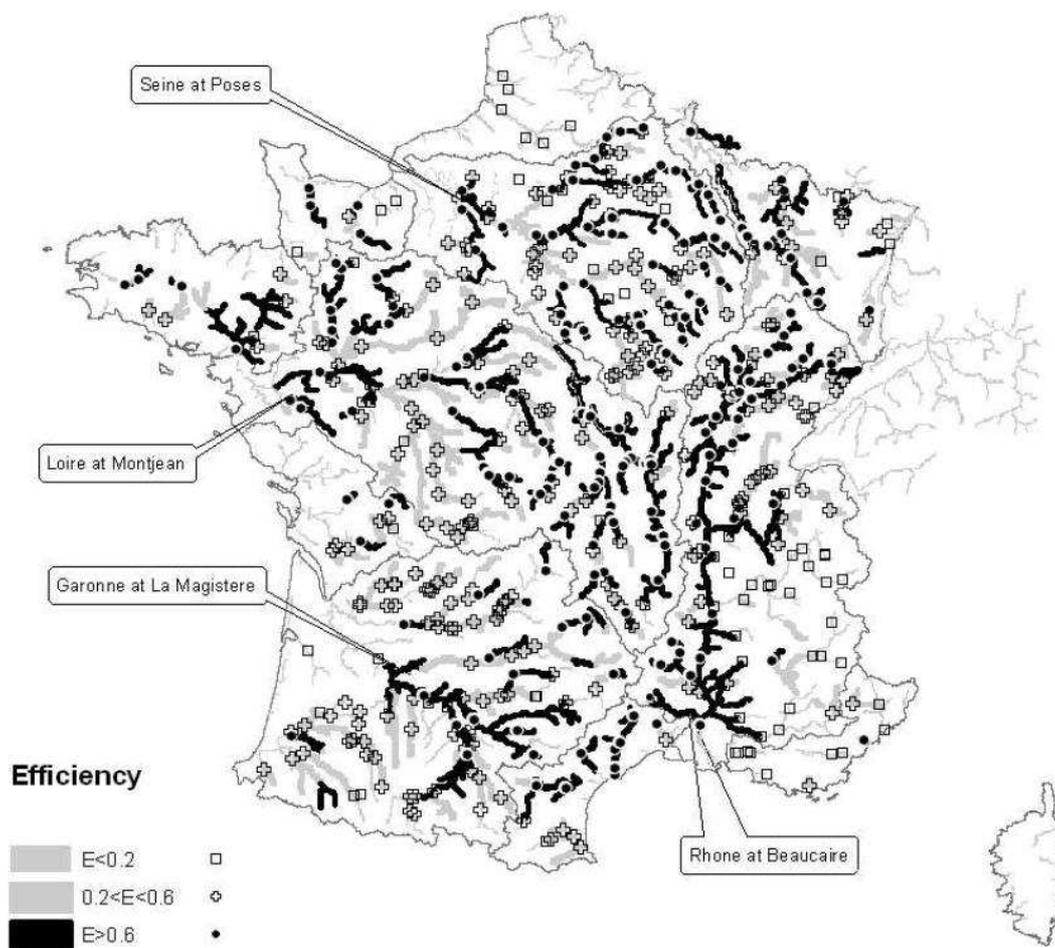


FIG. 5.5 – Répartition spatiale de l'efficacité pour environ 900 stations en France et réseau hydrographique (d'après [HABETS et al. 2007]).

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.

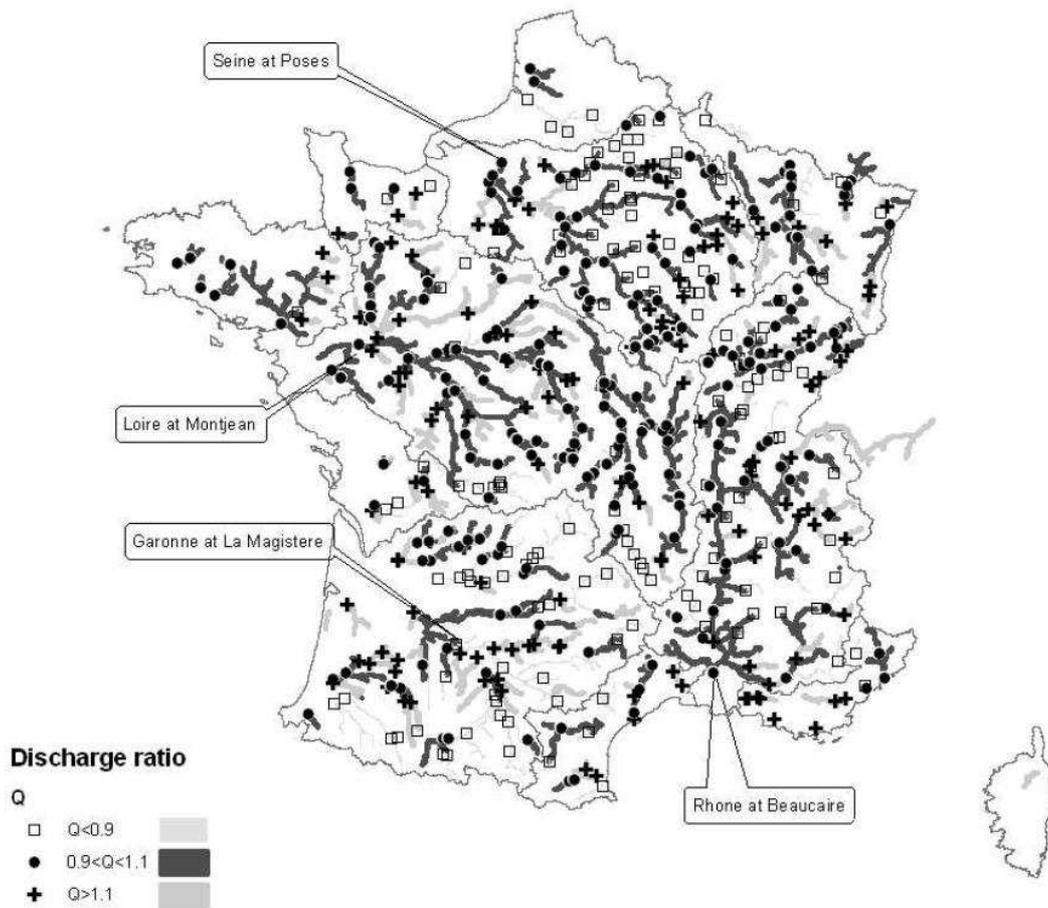


FIG. 5.6 – Répartition spatiale du rapport des lames d'eau pour environ 900 stations en France et réseau hydrographique.

5.3 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 temps réel depuis décembre 2003. En revanche, le modèle MODCOU n'est pas encore opérationnel, cependant, pour les besoins de la prévision d'ensemble des débits, j'ai mis en place une chaîne MODCOU temps réel expérimentale, qui préfigure la version réellement opérationnelle de MODCOU (voir partie IV chapitre 2).

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

- la chaîne "SIM temps réel" :

Cette chaîne tourne de façon quotidienne. Elle est lancée tous les jours vers 8H30 UTC, et simule la période de J-1 6H UTC à J 6H 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 (figure 5.7). Ceci ne constitue pas l'ensemble des données climatologiques de Météo-France.

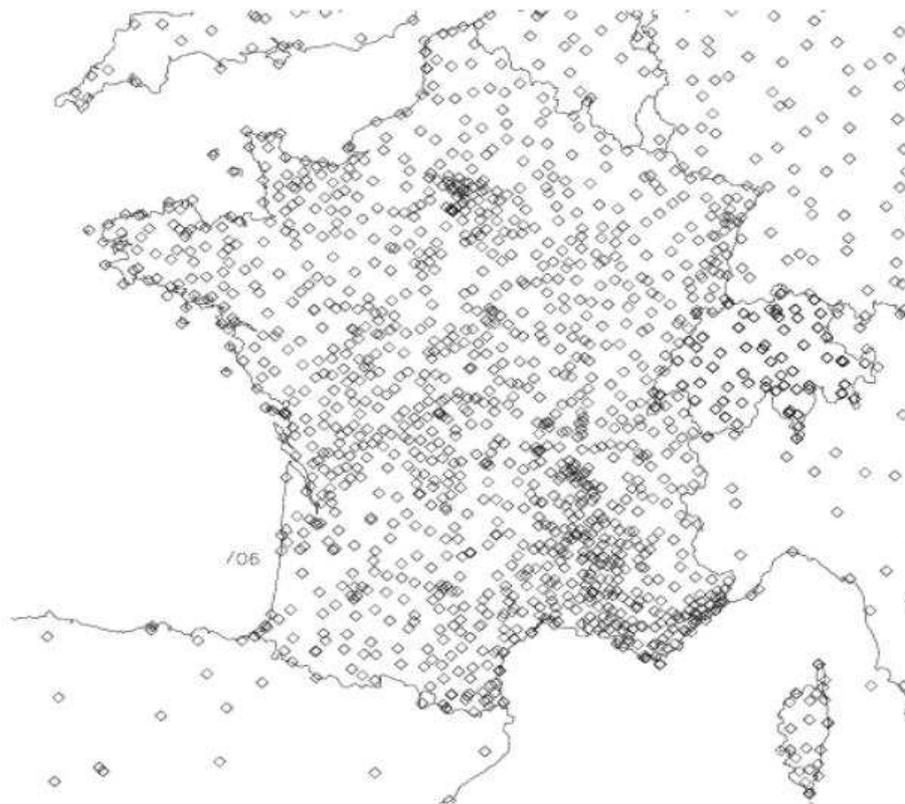


FIG. 5.7 – Observations utilisées pour la chaîne SIM "temps réel" du 04/08/06, environ 1600 postes

L'ensemble des sorties de la chaîne SIM "temps réel" est disponible dès leur 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 la 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 de données beaucoup

plus grand, en effet de nombreuses observations n'alimentent pas les bases de données climatologiques en temps réel mais sont envoyées à certaines dates. Au 20 de chaque mois, on considère que l'on dispose de l'ensemble des données existantes depuis le début de l'année hydrologique jusqu'à la fin du mois précédent (figure 5.8).

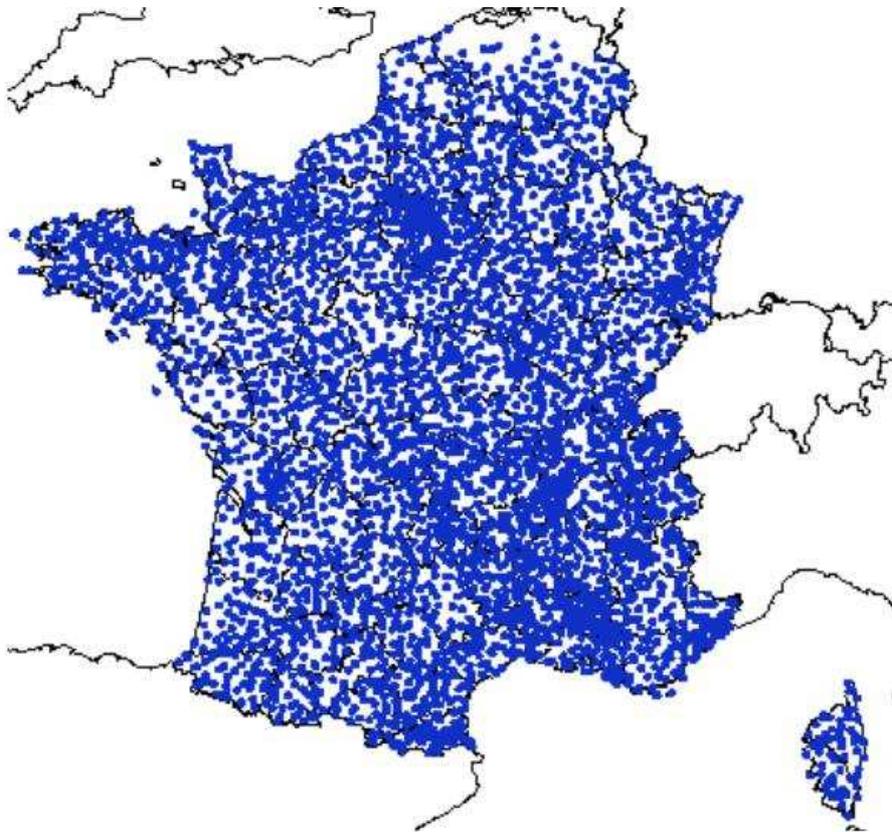


FIG. 5.8 – Observations utilisées pour la chaîne SIM "climatologie", réseau RCE (Réseau Climatologique d'Etat), environ 3000 postes

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 DIR (Directions Inter-régionales de la Météorologie) et les CDM (Centre Départementaux de la Météorologie)), et par le comité national sécheresse (MEDD, Ministère de l'Environnement et du Développement Durable). Les produits SIM alimentent en particulier le bulletin mensuel BSH national (www.eaufrance.fr, rubriques eau dans le sol et manteau neigeux).

Enfin, SIM est utilisé au SCHAPI (Service Central Hydro-météorologique d'Aide à la Prévision des Inondations) du MEDD, dans le cadre d'une "Expérimentation SIM". En particulier, une combinaison des paramètres humidité des sols initiale (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.

Troisième partie

Modélisation hydro-météorologique du bassin de la Seine

Cette partie a fait l'objet d'une publication dans *Journal of
Geophysical Research* [ROUSSET et al. 2004]

Introduction

Le bassin versant de la Seine est l'un des bassins les plus urbanisés de France, avec 25 % de la population française sur 12 % du territoire. C'est aussi un important pôle industriel et agricole, avec des régions d'agriculture intensive comme la Beauce. Les pressions urbaines et agricoles sur la qualité et la quantité d'eau sont donc considérables sur ce bassin, et les sécheresses et inondations y sont lourdes de conséquences, tant sur le plan humain qu'économique. Les récentes et dramatiques inondations de la Somme (2000) et de Prague (2002) ont mis en avant de la scène médiatique le risque généré par les crues lentes dans les zones très urbanisées. A Paris, le niveau élevé des nappes en 2000-2001 a ravivé les craintes de crues de l'ampleur de celle de 1906, et de nombreux chantiers sont entrepris pour minimiser les dégâts qu'une telle crue pourrait engendrer (protection des lignes de RER, déménagement des oeuvres d'art en sous-sol au musée du Louvre, etc.).

C'est pourquoi la modélisation hydro-météorologique de ce bassin est particulièrement importante, afin de mieux comprendre, reproduire, puis à terme prévoir, le comportement hydrologique du bassin de la Seine.

Cette première partie de ma thèse présente la mise en oeuvre du système couplé SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM) sur le bassin de la Seine sur une longue période (17 ans). La chaîne SIM a déjà été testée avec succès sur les bassins du Rhône et de l'Adour-Garonne ([HABETS 1998], thèses [ETCHEVERS 2000] et [MOREL 2002], partie II), il est maintenant utilisé sur le bassin de la Seine. Ce bassin se distingue des précédents par le faible rôle joué par le manteau neigeux (et plus généralement par le relief), mais également par la forte densité urbaine, ainsi que par l'étendue et la complexité des nappes souterraines sous-jacentes. La représentation du bassin versant de la Seine dans le modèle MODCOU a fait l'enjeu d'une thèse à l'Ecole des Mines de Paris ([GOMEZ 2002]), et dont ce travail bénéficie pour la partie aquifère. Le but de mon travail est de qualifier le comportement de SIM sur ce bassin, et en particulier son potentiel à reproduire les épisodes de crues lentes.

Dans le système couplé SIM, SAFRAN (Système Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige) permet de reconstituer les champs météorologiques nécessaires à cette modélisation (précipitations, température, etc.). Le schéma de surface ISBA (Interactions Sol Biosphère Atmosphère) représente les bilans énergétique et hydrique. Il est couplé avec le modèle hydrologique MODCOU (MODèle COUplé). Ce modèle, développé au Centre de Géosciences de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (CG/ENSMP), permet à partir des lames d'eau ruisselée et drainée issues d'ISBA de calculer les débits des rivières et les niveaux des nappes, qui peuvent être confrontées aux nombreuses mesures réparties sur le bassin et disponibles pour de nombreuses années (partie II).

Dans cette partie de ma thèse, le bassin de la Seine et la représentation de la couche de surface et des aquifères sont tout d'abord décrits dans le chapitre 1.

La climatologie reconstituée par SAFRAN sur les 17 années de simulation au pas de temps horaire est analysée au chapitre 2.

Ensuite la simulation de SIM sur la période 1985-2002 est présentée. Je me suis tout d'abord attaché à mieux représenter les surfaces urbaines grâce à l'utilisation du schéma de ville TEB (Town Energy Budget) (chapitre 3). L'analyse de la simulation sur la période 1985-2002 est détaillée dans le chapitre 4, en terme de débits et de niveau de nappes puis en terme de bilans. Pour l'analyse

des débits on utilise des outils statistiques couramment employés en hydrologie : calcul de scores (corrélation, critère de Nash) pour les débits journaliers et mensuels, calcul de la médiane et des quintiles pour les débits mensuels, étude des hautes eaux (ajustement par la loi de Gumbel du débit moyen sur une durée de 1 à 30 jours). Une étude du comportement du souterrain est présentée, avec en particulier son évolution spatiale et temporelle. La fin de ce chapitre est consacrée à l'étude des bilans hydrique et énergétique, et de leur variabilité spatiale et temporelle (annuelle et inter-annuelle).

Pour terminer, le chapitre 5 se concentre sur les épisodes de crue de la Seine à Paris les plus récents, dans le but de cerner le potentiel de SIM à représenter ces épisodes.

Ce travail de modélisation hydro-météorologique du bassin de la Seine a fait l'objet d'une publication dans *Journal of Geophysical Research* ([ROUSSET et al. 2004]).

Chapitre 1

Mise en oeuvre du modèle couplé SAFRAN-ISBA-MODCOU sur le bassin de la Seine

1.1 Présentation du domaine géographique

Le bassin versant de la Seine s'étend du Morvan à la Champagne au Nord et à la Normandie à l'ouest, il représente 12 % de la surface de la France. Le relief de ce bassin est peu accidenté, avec des altitudes généralement inférieures à 300 m, dépassant rarement 500 m sauf dans le Morvan où elles atteignent les 600 m (carte 1.1). Ces altitudes modérées expliquent les faibles pentes des cours d'eau et l'existence de nombreux méandres.

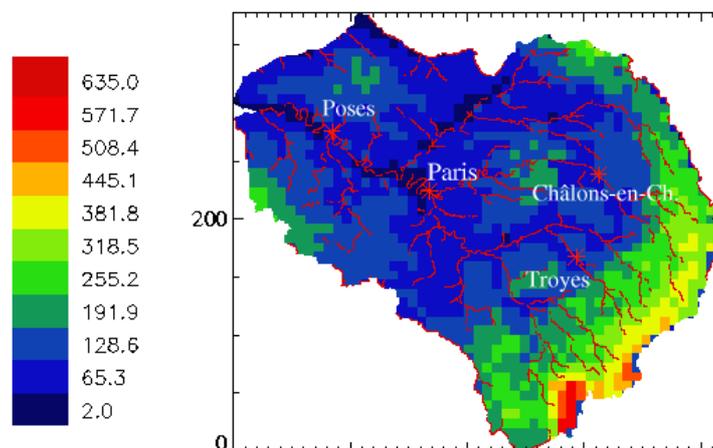


FIG. 1.1 – Relief du bassin de la Seine

La Seine, d'une longueur de 776 km, prend sa source à 471 m d'altitude sur le plateau de Langres, en Bourgogne. Ses principaux affluents sont l'Oise, la Marne, l'Yonne, l'Eure et l'Aube. Ces cours d'eau ont un régime hydrologique dit "pluvial océanique", avec un débit maximal en hiver lorsque l'évapotranspiration est faible, et minimal en été lorsque l'évapotranspiration est forte.

1.2 Modélisation hydro-météorologique

La modélisation hydrologique du bassin avec MODCOU a été mise en place par le Centre de Géosciences de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris (CG/ENSMP) (voir [GOMEZ 2002]). Mon travail a consisté à mettre en place le modèle SIM sur le bassin de la Seine en utilisant la représentation des nappes souterraines de [GOMEZ 2002].

1.2.1 Extension du domaine de surface

Les nappes alimentant le bassin de la Seine sont plus étendues que le bassin versant de surface. En effet, elles s'étendent plus au nord et plus au sud. Le domaine de surface pris en compte sera donc plus vaste que le seul bassin versant de la Seine. La carte 1.2 présente ce domaine étendu.

Sur le bassin versant de la Seine (partie centrale en rouge), l'eau ruisselée va alimenter les rivières et l'eau drainée va alimenter les nappes. En revanche sur les autres bassins versants (parties externes en bleu), l'eau drainée alimente toujours les nappes sous-jacentes, mais l'eau ruisselée sort du système car elle alimente des rivières qui ne sont pas modélisées (puisqu'elles ne font pas partie du bassin de la Seine), comme la Somme par exemple.

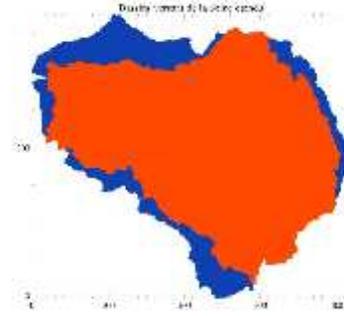


FIG. 1.2 – Bassin versant de surface de la Seine et extension

1.2.2 Modélisation hydrologique

Pour effectuer le routage de l'eau en surface, MODCOU utilise une grille plus fine que de celle d'ISBA, mais néanmoins parfaitement superposable. Cette grille est constituée de mailles carrées emboîtées, dont la taille varie de 1 à 8 km.

La couche de surface a été discrétisée en 35698 mailles et sa superficie est de 95560 km^2 (figure 1.4). Le réseau hydrographique a été constitué en ne conservant comme maille rivière que les mailles drainant une surface supérieure à 250 km^2 (figure 1.4), ce qui conduit à 6481 mailles rivières.

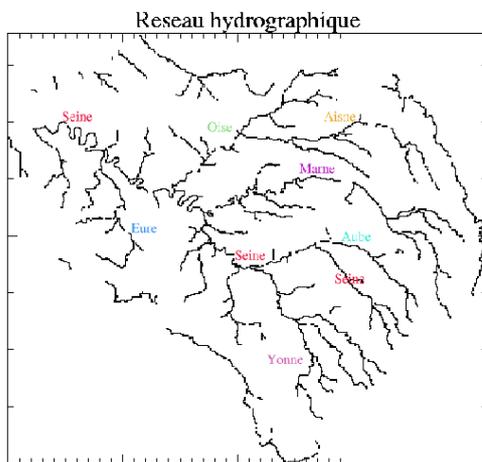


FIG. 1.3 – Réseau hydrographique de surface utilisé par MODCOU

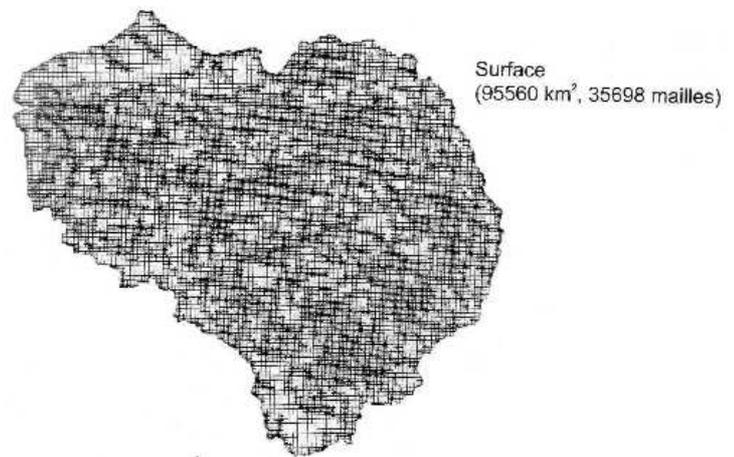


FIG. 1.4 – Couche de surface utilisée par MODCOU

Aquifères modélisés

Le bassin de la Seine est un bassin sédimentaire dont la carte géologique simplifiée est donnée ci-après (figure 1.5).

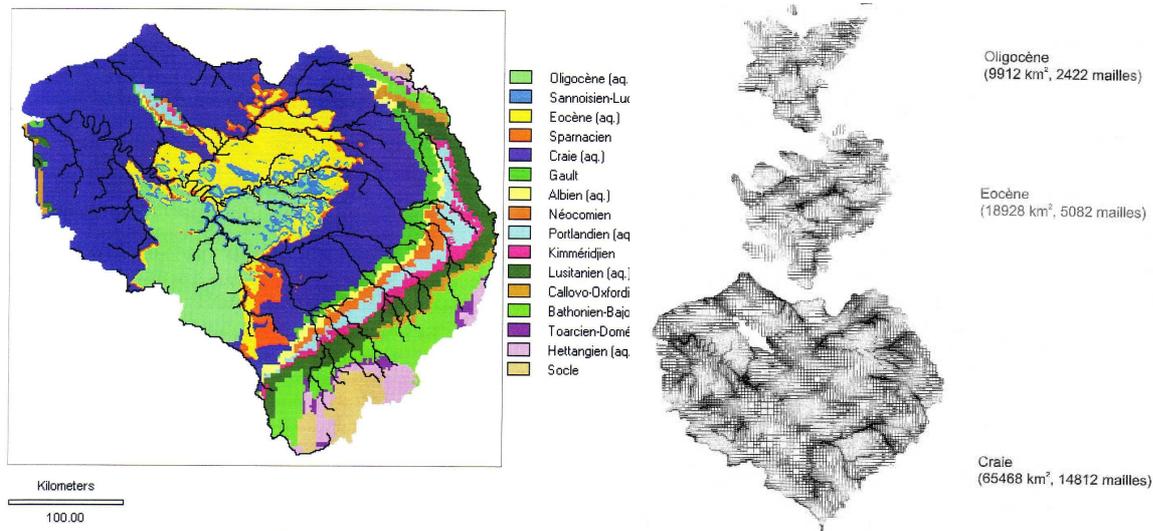


FIG. 1.5 – Carte géologique simplifiée ([GOMEZ 2002])

FIG. 1.6 – Modélisation des 3 couches souterraines

Le fonctionnement hydrologique souterrain de ce bassin est complexe, et tous les aquifères ne sont pas modélisés. Trois aquifères principaux ont été sélectionnés par [GOMEZ 2002] :

- aquifère de l'Oligocène (nappe de Beauce) ;
- aquifère de l'Eocène (nappes du Soissonnais et de Champigny) ;
- aquifère de la Craie.

Ces trois aquifères ont été discrétisés en respectivement 2422, 5082 et 14812 mailles, avec des superficies respectives de 9912 km², 18928 km² et 65468 km² (figure 1.6).

Des échanges hydrauliques peuvent avoir lieu entre l'Oligocène et l'Eocène, ainsi qu'entre l'Eocène et la Craie. Enfin, pour tenir compte de l'alimentation de l'aquifère de la Craie par l'aquifère de l'Albien sous-jacent (non modélisé), un débit (entrant) de 600 l.s⁻¹ est affecté à la Craie ([GOMEZ 2002]).

Relation avec la surface

Cette superposition de trois nappes aquifères ne correspond pas entièrement à la couche de surface. La carte 1.7 montre les zones de la couche de surface en contact avec le domaine souterrain (en rouge au centre) et les zones où aucune nappe n'est présente sous la surface (en bleu).

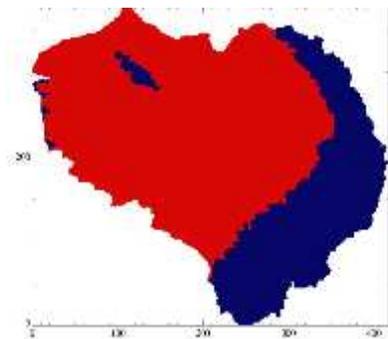


FIG. 1.7 – Superposition de la couche de surface et du souterrain (en rouge)

Le traitement de l'eau drainée et ruisselée (quantités calculées par ISBA) dépend de la présence du souterrain :

- si le souterrain est présent : l'eau ruisselée est acheminée vers la rivière sur la couche de surface, et l'eau drainée alimente la nappe sous-jacente ;
- si le souterrain est absent : l'eau ruisselée s'écoule vers la rivière comme dans le cas précédent, mais l'eau drainée rejoint elle aussi la rivière après un retard dû à son trajet dans le sol.

Calibration des paramètres hydrologiques

Les paramètres caractérisant les trois couches souterraines (comme la transmissivité ou le coefficient d'emménagement), ainsi que ceux de la couche de surface (temps de transfert, etc...) utilisés par MODCOU, ont été calibrés par [GOMEZ 2002].

1.2.3 Modélisation météorologique de la couche de surface

La grille utilisée par ISBA pour calculer les bilans hydrique et énergétique, qui est également la grille sur laquelle sont définis le forçage atmosphérique et les données physiographiques, est une grille régulière dont les mailles ont un côté de 8 km (1594 mailles).

Les paramètres de surface utilisés par ISBA sont extraits de la base de données ECOCLIMAP ([MASSON et al. 2001]). Elle est basée sur une cartographie de la végétation à 1 km de résolution, obtenue à partir de la combinaison de cartes de végétation existantes (comme CORINE) et d'une carte des climats. ECOCLIMAP permet d'associer à chaque type de végétation les paramètres correspondants nécessaires à ISBA, et les agrège à la résolution souhaitée. Elle est utilisée aussi bien à méso-échelle que dans des modèles de climat.

Certains paramètres sont constants dans le temps, et d'autres suivent un cycle annuel qui est reproduit à l'identique d'une année sur l'autre tout au long de la simulation (LAI, fraction de végétation, albédo, rugosité de surface).

1. Les paramètres constants dans le temps

Le paramètre w_{drain} définit l'intensité du drainage sous-maille (l'écoulement de base qui se produit quand le contenu en eau est en dessous de la capacité au champ) et représente les nappes alluviales non simulées explicitement. Il doit donc prendre une valeur nulle sur toute la partie du domaine où le souterrain est présent, et garde sa valeur standard de $10^{-3} m^3 \cdot m^{-3}$ ailleurs. Les mailles situées à la limite de ces deux zones ont une valeur de w_{drain} inversement proportionnelle à la fraction de leur surface non couverte par le souterrain, comme le montre la figure 1.8.

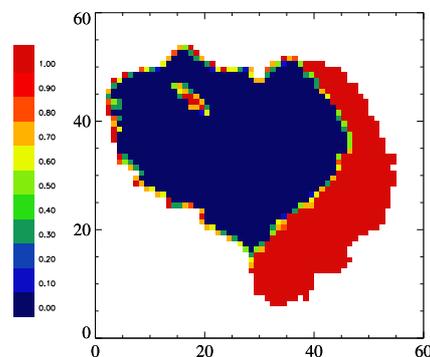
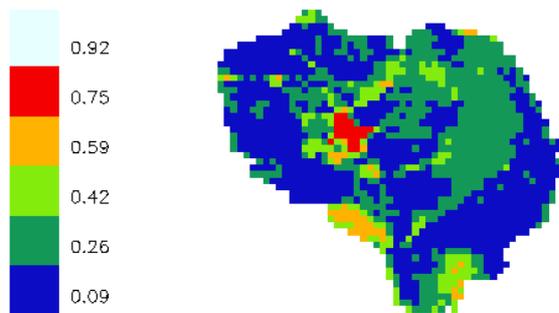
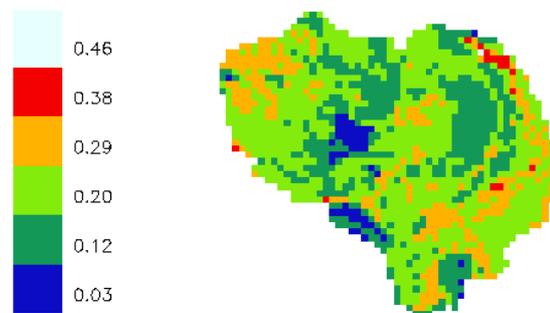


FIG. 1.8 – Valeurs de w_{drain} ($m^3 \cdot m^{-3}$) ($\times 1000$)

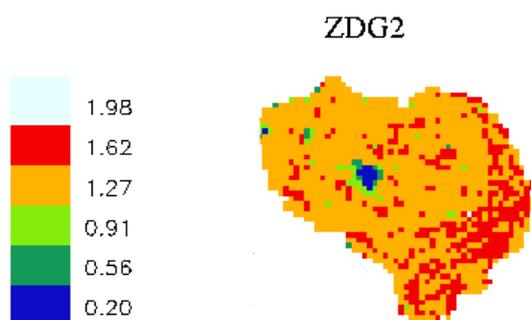
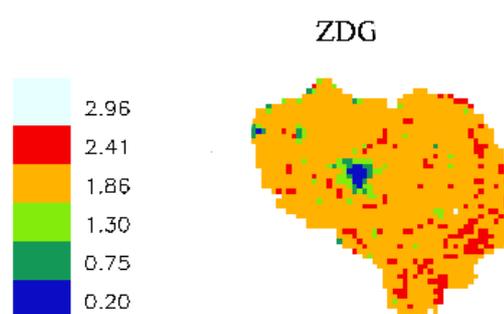
Les données de texture du sol, fraction de sable et d'argile, sont présentées sur les figure 1.9 et 1.10.

Le pourcentage d'argile est assez homogène sur le bassin (entre 15 et 25 % environ), sauf en Sologne et sur l'Île-de-France où il est très faible (quelques pourcents). Le pourcentage de

FIG. 1.9 – *Pourcentage de sable*FIG. 1.10 – *Pourcentage d'argile*

sable est un peu plus contrasté, il varie globalement de moins de 10 % à plus de 40 %, mais il atteint 60 % en Sologne, zone naturellement très sableuse, et 90 % sur les zones urbaines, en effet celles-ci sont considérées comme des zones de sol nu, très sableux et peu profond.

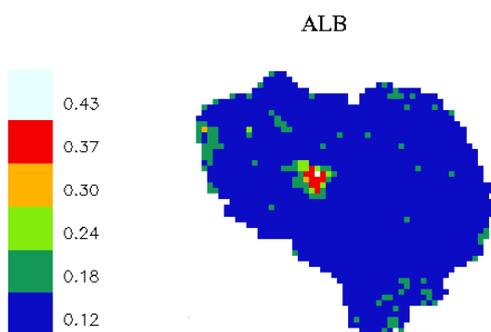
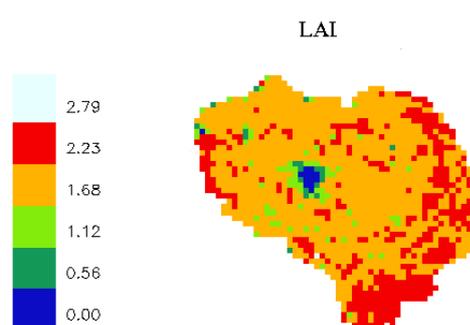
Les épaisseurs des différentes couches de sol sont présentées sur les figures 1.11 (épaisseur de la zone racinaire) et 1.12 (épaisseur totale du sol). Ces paramètres ont été étalonnés lors des études précédentes (sur l'Adour-Garonne et le Rhône, [HABETS 1998], [MOREL 2002], [ETCHEVERS 2000]).

FIG. 1.11 – *Profondeur de la zone racinaire*FIG. 1.12 – *Profondeur totale du sol*

Le bassin est en grande partie recouvert de cultures pour lesquelles on associe un sol d'une profondeur d'environ 2 m, dont 1.5 m pour la zone racinaire. Sur l'est le sol est un peu plus profond à cause de la présence de forêts pour lesquelles la profondeur du sol atteint les 3 m. On distingue nettement sur ces cartes les zones urbaines, pour lesquelles les sols sont très peu profonds (20 cm au total).

2. Les paramètres suivant un cycle annuel

Les cartes 1.13 et 1.14 présentent la moyenne annuelle de l'albédo et du LAI.

FIG. 1.13 – *Albédo en moyenne annuelle*FIG. 1.14 – *LAI en moyenne annuelle*

L'albédo moyen varie peu sur le bassin (il vaut environ 0.15), les zones de sol nu qui correspondent aux zones urbaines comme l'Ile-de-France se distinguent par un albédo beaucoup plus élevé (jusqu'à 0.4). L'albédo est plus faible en hiver, et plus fort au printemps (on passe en moyenne d'un peu plus de 0.1 à un peu moins de 0.2). Le LAI est logiquement très faible sur les zones comme l'Ile-de-France, et s'échelonne de $1.5 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ à plus de $2 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ voir $2.5 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$. Il est maximal au printemps (avril-mai), il atteint $3.5 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ sur une grande majorité du bassin et dépasse $4 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ par endroits. En revanche en hiver il est minimal, avec à peine $1 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ seulement sur une grande partie du domaine.

1.3 La période d'étude

La période étudiée se compose de 17 années hydrologiques (une année hydrologique commence au 1^{er} août d'une année civile N et s'achève au 31 juillet de l'année civile $N + 1$, et ce dans le but de couvrir entièrement la période de crue). Elle s'étend d'août 1985 à juillet 2002.

Cette période est assez longue pour qu'on y rencontre des situations météorologiques contrastées, ce qui permet de qualifier le comportement du modèle dans différentes circonstances. Il est également possible de calculer des critères statistiques liés à l'étude des séries temporelles de façon relativement pertinente.

1.4 Les données de validation

1.4.1 Les stations hydrométriques

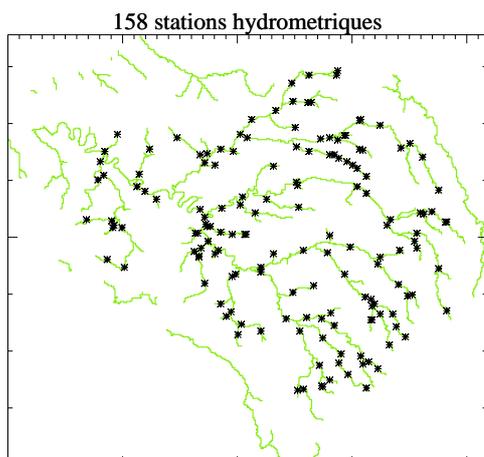


FIG. 1.15 – Position des 158 stations hydrométriques

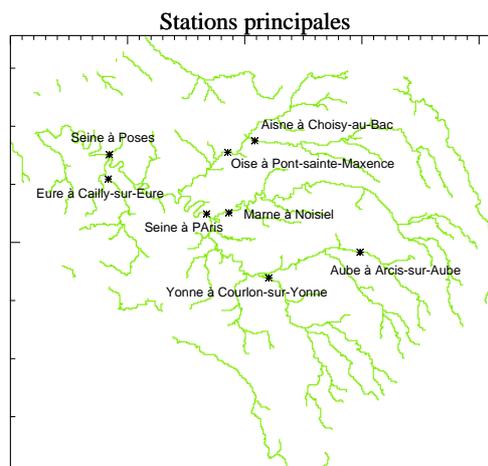


FIG. 1.16 – Position des 8 stations principales

On dispose des données de 158 stations hydrométriques, dont la position est donnée sur la carte 1.15 ci-dessus. Parmi ces dernières, on sélectionne celles qui présentent des données pendant la période qui nous intéresse, 1985-2002, il reste alors 113 stations de mesure des débits réparties sur les cours d'eau du bassin.

Parmi ces 113 points de mesure, nous nous intéresserons tout particulièrement aux stations dont la localisation est portée sur la carte 1.16.

1.4.2 Les piézomètres

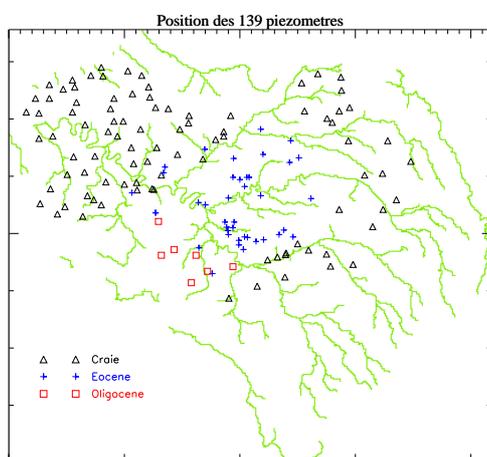


FIG. 1.17 – Position des 139 piézomètres

Les niveaux des nappes mesurés par 139 piézomètres ont été fournis par le Centre de Géosciences de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (CG/ENSM). Comme l'indique la carte 1.17 ci-contre, des données sont mesurées pour chacune des trois nappes modélisées.

Là encore, on ne retient que les piézomètres pour lesquels des mesures ont été effectuées pendant la période d'étude, soit 138 piézomètres.

Chapitre 2

Reconstitution du forçage atmosphérique

2.1 Les paramètres météorologiques reconstitués par SAFRAN

Sept paramètres météorologiques sont reconstitués par SAFRAN et utilisés en entrée dans le schéma de surface ISBA. Ce sont :

- la température à 2 mètres, notée TA ;
- la force du vent à 10 mètres, notée UA ;
- le rayonnement solaire descendant, noté RV ;
- le rayonnement atmosphérique, noté RI ;
- les précipitations (liquides, notées RR , et solides, notées SR) ;
- l’humidité spécifique, notée QA ;
- la pression de surface, elle est considérée comme constante tout au long de la simulation.

2.2 Analyse du forçage

Les moyennes annuelles sur la période 1985-2002 (cumuls annuels moyens pour les précipitations RR et SR) et les écart-types correspondants sont présentés dans le tableau 2.1. On remarque en particulier que les précipitations, paramètre d’une influence considérable, ont la plus grande variabilité.

Paramètre	$RR(mm)$	$SR(mm)$	$QA(g.kg^{-1})$	$TA(K)$	$RI(W.m^{-2})$	$RV(W.m^{-2})$	$UA(m.s^{-1})$
Moyenne	798.40	19.34	6.60	283.63	310.78	129.52	3.10
Ecart-type	152.30	11.34	0.30	0.59	6.03	7.16	0.22

TAB. 2.1 – Moyenne annuelle sur le domaine et écart-type des paramètres météorologiques

2.2.1 Les précipitations

1. Variabilité temporelle

Les graphiques 2.1 et 2.4 représentent l’évolution du cumul annuel de précipitations solides et liquides en moyenne sur le domaine, pour la période 1985/2002.

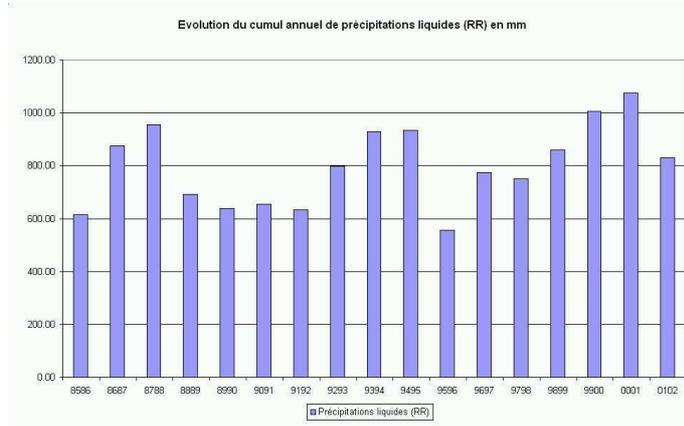


FIG. 2.1 – Cumul annuel de précipitations liquides sur la période 1985-2002

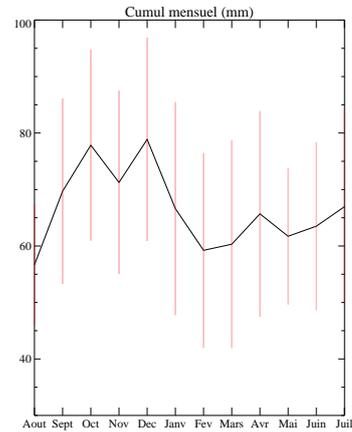


FIG. 2.2 – Cumul mensuel moyen et écart-type

La figure 2.1 met en lumière :

- des années sèches : il est tombé seulement 555 mm de pluie en 95-96, 615 mm en 85-86, et environ 640 mm en 88-89, 89-90, 90-91 et 91-92 ;
- des années très pluvieuses, avec 955 mm en 87-88, et environ 930 mm en 93-94 et 94-95, et jusqu'à 1005 mm en 99-00 et 1075 mm en 00-01.

La figure 2.2 montre le cumul mensuel moyen de pluie en moyenne sur le domaine et sur la période d'étude ainsi que l'écart-type correspondant (barres verticales).

On constate qu'en moyenne la variabilité saisonnière des précipitations est faible (elle est en particulier beaucoup moins marquée que sur les bassins du Rhône et de la Garonne, voir [ETCHEVERS 2000] et [MOREL 2002]). Néanmoins, la variabilité interannuelle est très marquée (écart-types très forts), or la répartition dans l'année des précipitations joue un rôle prépondérant.

En effet, on conçoit facilement que les pluies hivernales ou estivales n'ont pas la même influence sur le bilan hydrique : ces dernières sont fortement évaporées par la végétation, et ne contribuent que peu à l'approvisionnement des rivières et des nappes, ce qui n'est pas le cas des pluies hivernales.

Ainsi, les années 88-89 et 89-90 par exemple ont un cumul sensiblement égal, mais comme le montre la figure 2.3, en 88-89 c'est le printemps qui est le plus arrosé (210 mm contre 160 mm l'hiver), en 89-90 les pluies tombent en hiver (260 mm, 135 mm en automne et 95 mm au printemps).

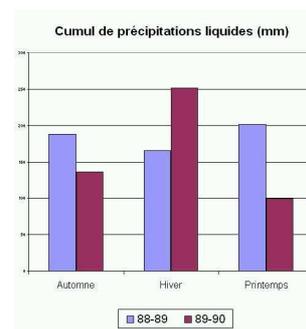


FIG. 2.3 – Répartition saisonnière du cumul de précipitations pour deux années

En ce qui concerne les précipitations solides (figure 2.4), on note l'occurrence d'années à neige, comme 85-86, 86-87, 90-91 et 98-99 avec environ 40 mm, et d'années sans neige, telles que 88-89, 89-90, 91-92, 92-93 avec seulement quelques millimètres.

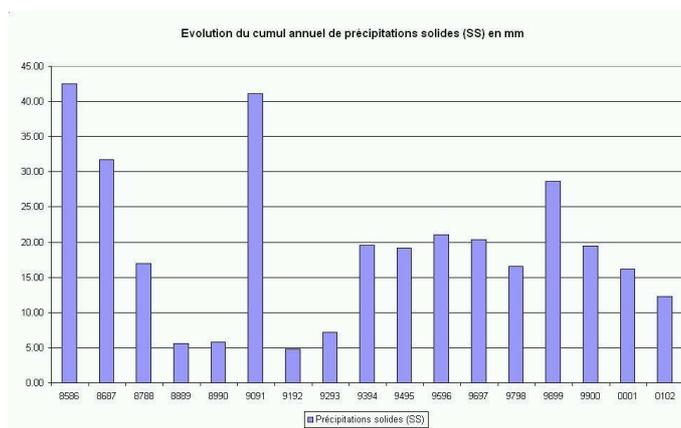


FIG. 2.4 – Cumul annuel de précipitations solides sur la période 1985-2002

2. Variabilité spatiale

Les cartes suivantes présentent la distribution spatiale du cumul annuel moyen sur la période d'étude des précipitations liquides (RR) et des précipitations solides (SR).

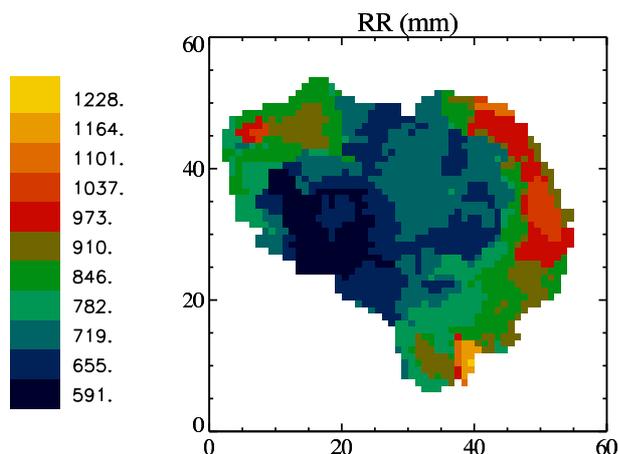


FIG. 2.5 – Carte de cumul moyen annuel de précipitations liquides sur la période 1985-2002

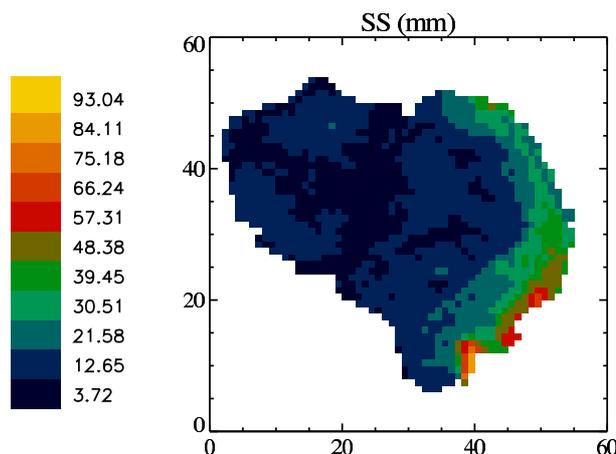


FIG. 2.6 – Carte de cumul moyen annuel de précipitations solides sur la période 1985-2002

La carte 2.5 montre que les régions les plus arrosées sont les régions d'altitude plus élevée à l'est du bassin, où la plupart des rivières prennent leur source, ainsi que la partie côtière au nord ouest. Le centre du bassin bénéficie au contraire d'un climat plus sec.

En ce qui concerne la neige, la carte 2.6 fait apparaître un net gradient ouest-est. En effet, la partie côtière ainsi que tout le centre du bassin ne reçoivent que très peu de précipitations neigeuses, celles-ci tombent en bien plus grande quantité sur la partie est où les altitudes sont plus élevées.

La répartition spatiale des précipitations solides et liquides varie relativement peu d'une année sur l'autre.

2.2.2 Les autres paramètres

Les autres paramètres du forçage atmosphérique ont des variations moins marquées que les précipitations, néanmoins on peut souligner quelques caractéristiques remarquables de ces paramètres.

Les figures 2.7 à 2.11 présentent l'évolution annuelle moyenne sur l'ensemble du bassin, la répartition moyenne et le cycle annuel moyen sur la période d'étude de chacun des paramètres.

1. Variabilité temporelle

Les graphiques de ces figures font apparaître l'influence du régime des précipitations (évoqué précédemment) sur les autres paramètres :

- Les précipitations sont accompagnées d'une forte humidité, et en particulier d'une forte humidité spécifique (QA). Ce phénomène est particulièrement flagrant pour les années 87-88, 93-94, 94-95 et 99-00, pour lesquelles cumul de précipitations et valeur moyenne de QA sont particulièrement élevés ;
 - Les précipitations sont généralement liées à une forte nébulosité, ce qui se traduit par un fort rayonnement atmosphérique (RI). Ainsi, en 87-88, 93-94, 94-95 et 99-00, la valeur moyenne de RI est également élevée ;
 - Enfin, le rayonnement solaire (RV) diminue logiquement en cas de forte couverture nuageuse, et de précipitations. On note alors en 87-88, 93-94, 94-95 et 99-00 une baisse sensible de la valeur moyenne de ce paramètre ;
- Le phénomène inverse est également observable : les années 89-90, 90-91, 95-96 et 96-97 sont marquées par un faible cumul de précipitations et une faible humidité spécifique, ainsi que par un rayonnement solaire (RV) relativement élevé et par une baisse sensible du rayonnement atmosphérique (RI).
- Quant au vent, on ne peut guère le corrélérer avec les précipitations, sa distribution semble plus chaotique.

Néanmoins, la variabilité interannuelle de ces paramètres reste relativement faible, et leur évolution annuelle reste proche du cycle annuel moyen présenté dans les graphiques.

Les paramètres TA , QA , RI et RV présentent logiquement une baisse en hiver, le vent au contraire se renforce pendant cette saison.

2. Variabilité spatiale

Les cartes des figures 2.7 à 2.11 présentent la répartition moyenne sur la période d'étude de ces paramètres. Elles montrent en particulier qu'en moyenne la température est plus basse sur les reliefs de l'est et plus élevée en Ile-de-France.

Bilan

Les paramètres météorologiques, et en particulier leurs variations spatio-temporelles, ont une grande influence sur les simulations d'ISBA. Connaître ces dernières est donc utile en vue de mieux comprendre et interpréter le comportement du modèle.

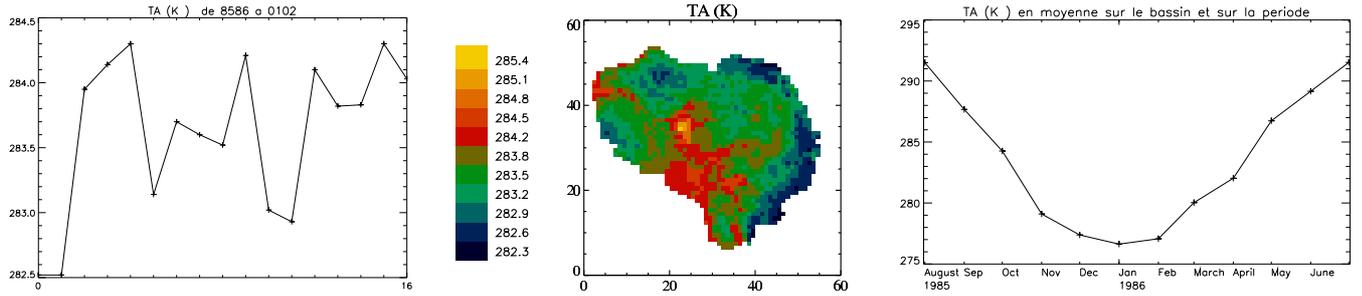


FIG. 2.7 – Température : évolution de la moyenne annuelle, répartition moyenne et cycle annuel moyen

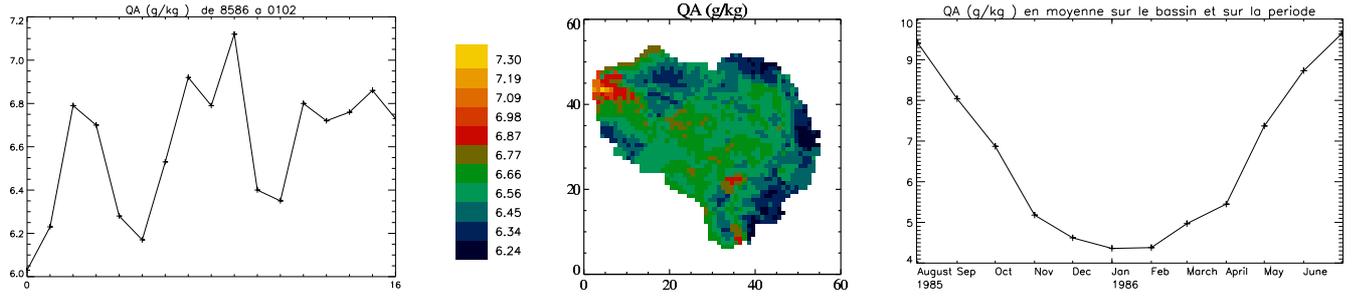


FIG. 2.8 – Humidité spécifique : évolution de la moyenne annuelle, répartition moyenne et cycle annuel moyen

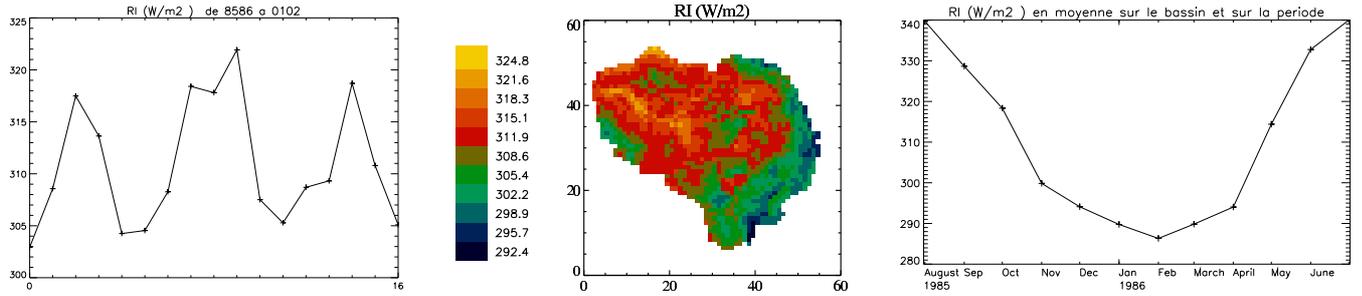


FIG. 2.9 – Rayonnement atmosphérique : évolution de la moyenne annuelle, répartition moyenne et cycle annuel moyen

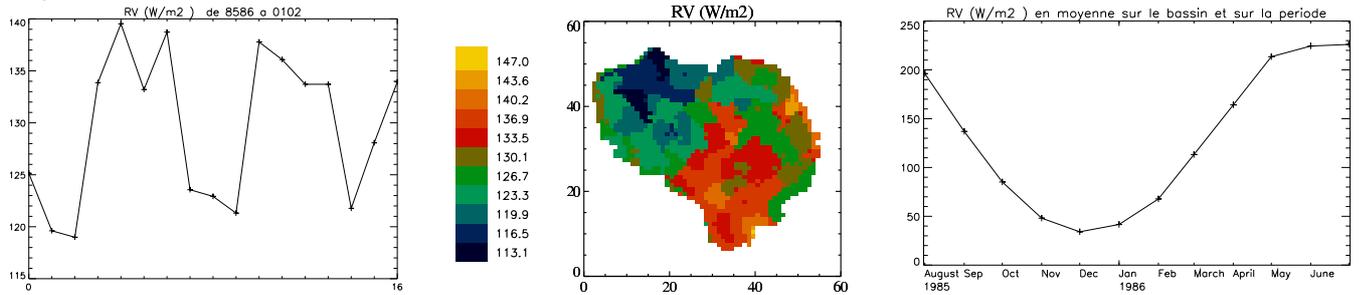


FIG. 2.10 – Rayonnement solaire descendant : évolution de la moyenne annuelle, répartition moyenne et cycle annuel moyen

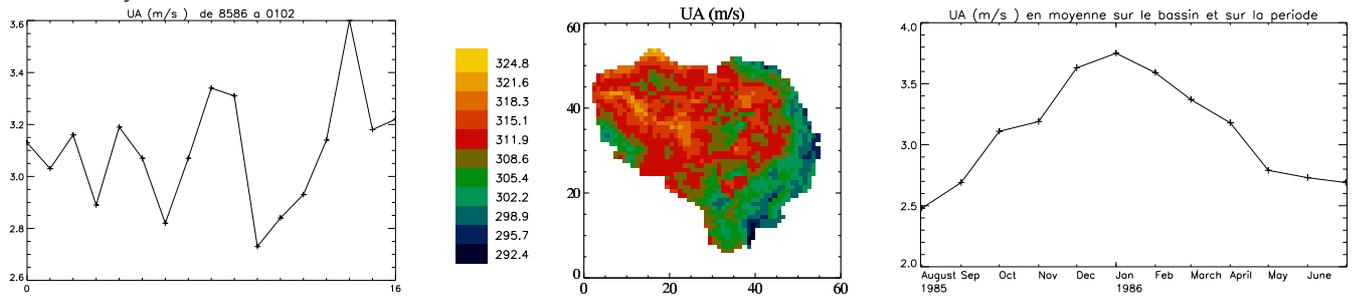


FIG. 2.11 – Vent : évolution de la moyenne annuelle, répartition moyenne et cycle annuel moyen

Chapitre 3

Amélioration du système

3.1 Introduction du schéma de ville TEB (Town Energy Budget)

Le schéma de ville TEB ([MASSON 1999]) a pour but de simuler les bilans énergétique et hydrique des surfaces urbanisées. Il utilise une géométrie en canyon pour la représentation de la ville, dans laquelle les rayonnements peuvent être piégés. Il distingue les routes, les toits et les murs et calcule pour chacun un bilan d'énergie. Le bilan hydrique est effectué pour les toits et pour les routes (avec interception d'eau ou de neige par les toits et les routes et ruissellement des toits vers les routes).

Ce système a été testé dans le modèle Més0-NH pour la simulation de la couche limite urbaine sur Marseille et Paris pour quelques belles journées d'été ([LEMONSU et al. 2003 -a]), ainsi qu'en off-line sur un petit bassin versant pour plusieurs cycles annuels ([LEMONSU et al. 2003 -b]).

3.1.1 Introduction de TEB et modification des données d'entrées

Cette étude est l'occasion de tester l'impact d'une modélisation explicite des zones urbaines sur la modélisation hydro-météorologique à l'échelle d'un grand bassin versant, ce qui n'avait pas encore été réalisé.

Le bassin de la Seine se prête particulièrement à cette étude car c'est l'un des bassins les plus urbanisés de France. La carte 3.1 montre la fraction de ville sur l'ensemble du domaine.

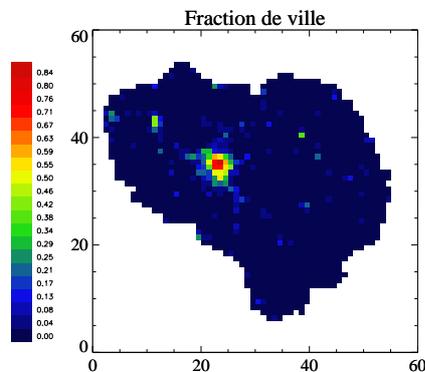


FIG. 3.1 – Fraction de ville sur la grille ISBA

Lorsqu'on utilise seulement ISBA, les zones urbaines sont prises en compte en étant considérées comme des zones de sol nu, sableux et peu profond.

En revanche, lorsqu'on utilise TEB ces zones sont prise en compte indépendamment, et ISBA ne prend en considération que la végétation naturelle.

Ce principe est repris sur la figure 3.2.

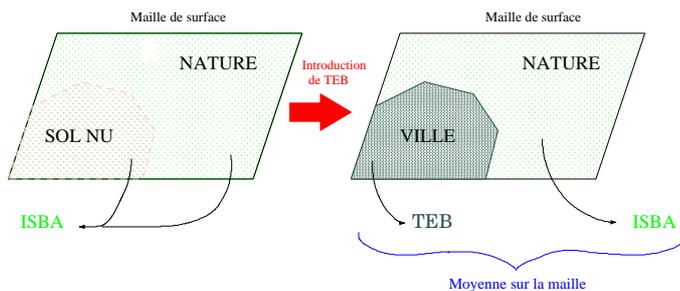


FIG. 3.2 – Principe de l'utilisation de TEB

C'est pourquoi l'introduction de TEB nécessite de redéfinir de nombreux paramètres d'entrée concernant le sol et la végétation, ainsi que l'albédo et l'émissivité. De plus, des paramètres spécifiques à TEB sont nécessaires : ce sont des paramètres liés à la géométrie de la ville (fraction occupée par les bâtiments ou les routes, rapport d'aspect des bâtiments et des routes, ...), des paramètres radiatifs (albédo et émissivité des routes, des murs et des bâtiments) ainsi que des paramètres thermiques (conductivités thermiques, capacités calorifiques, ...). Ces nouveaux paramètres sont également extraits de la base de données ECOCLIMAP.

Enfin, un forçage supplémentaire doit être introduit, il concerne les flux de chaleur latente et sensible dus à l'industrie et à la circulation. On impose par exemple un flux de chaleur sensible dû à la circulation relativement faible sauf aux heures habituelles de forte circulation routière (début de matinée et fin d'après-midi).

3.1.2 Impacts de la prise en compte explicite des villes

Deux simulations ont été réalisées sur la période 1985-1990, avec et sans le schéma de ville TEB. Les résultats obtenus sont comparés ici.

Simulation des bilans hydrique et énergétique

Le bilan hydrique

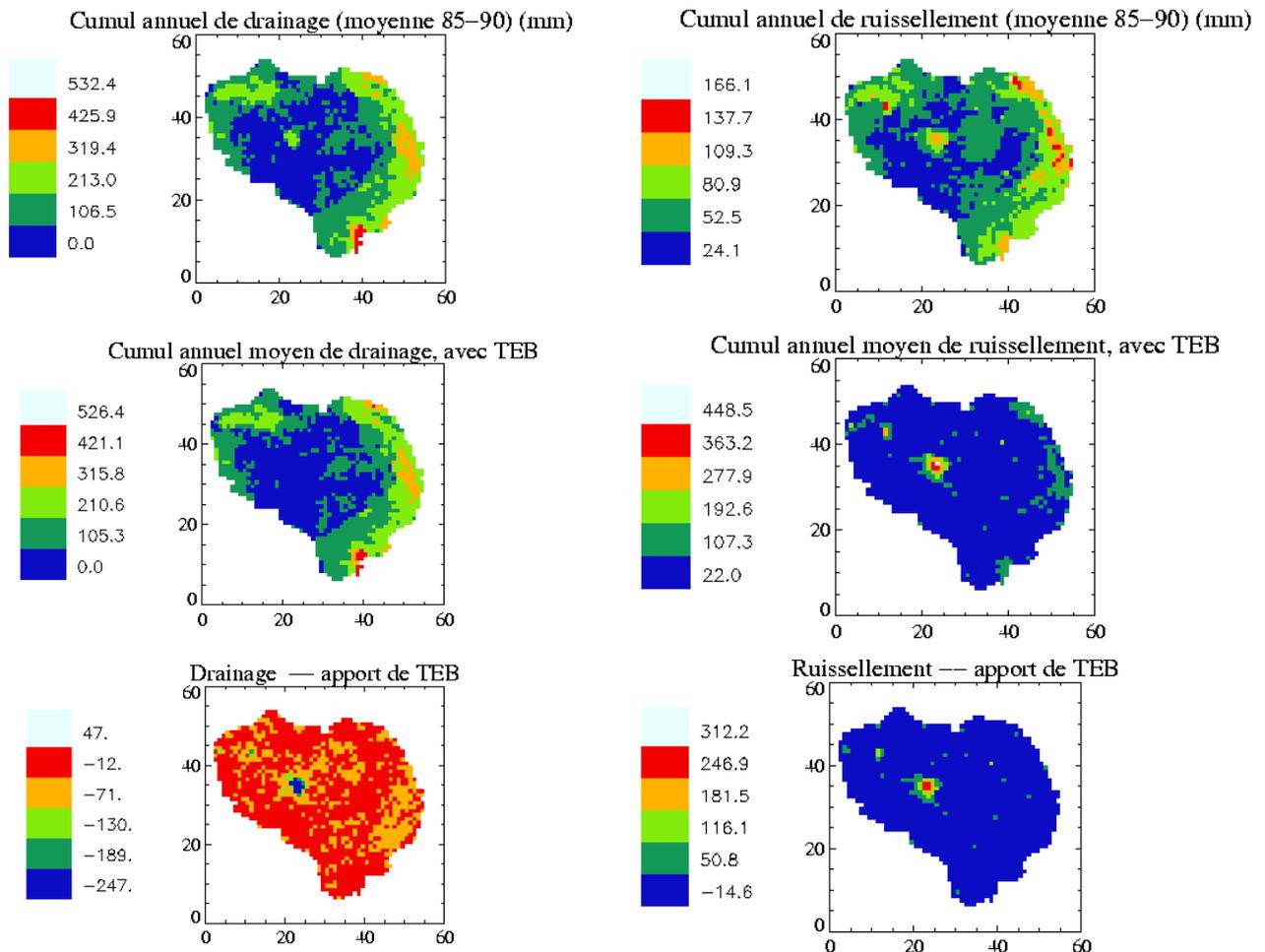


FIG. 3.3 – Cumul annuel moyen de drainage avec ISBA seul (en haut), avec ISBA et TEB (au milieu), et différence (en bas)

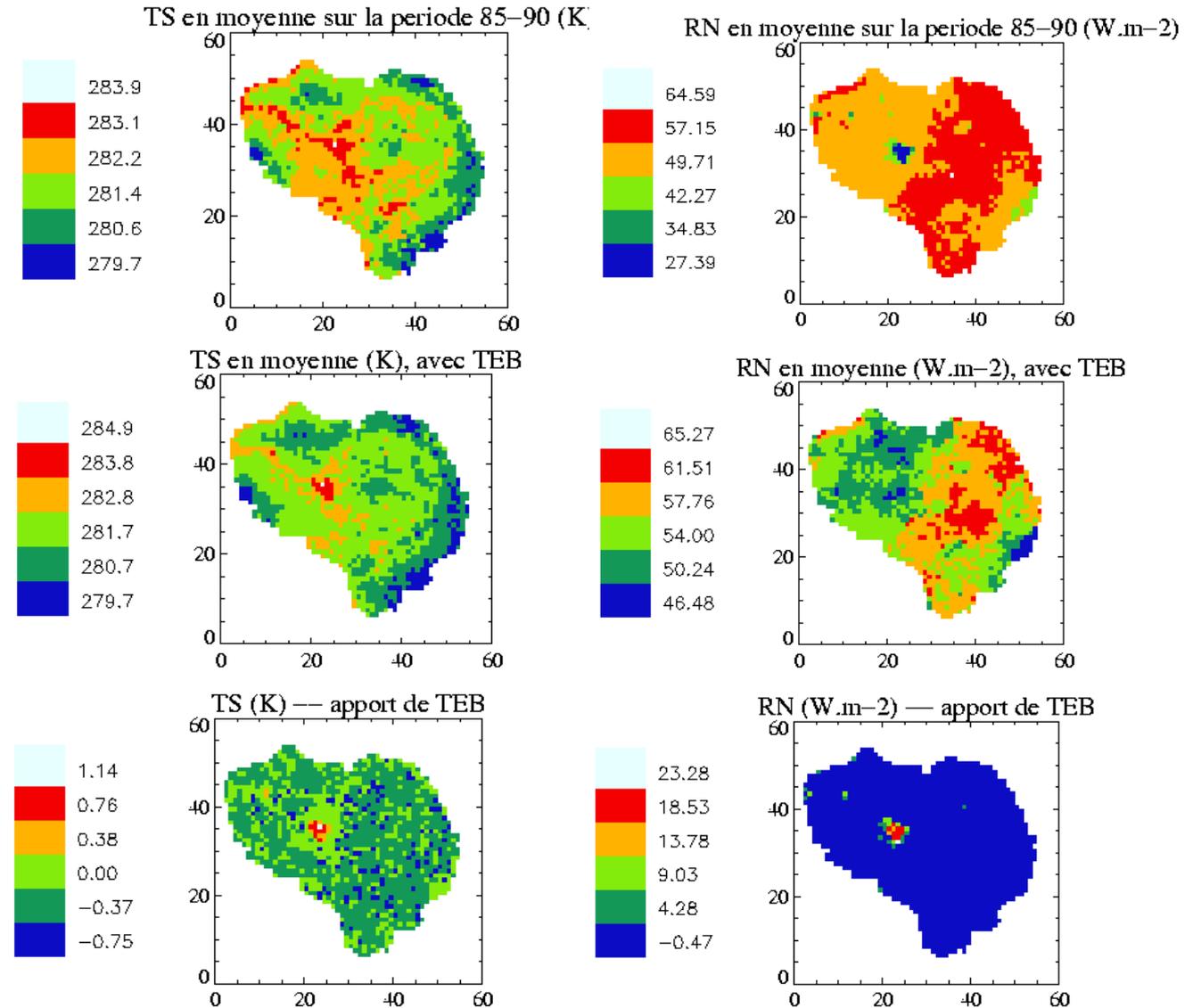
FIG. 3.4 – Cumul annuel moyen de ruissellement avec ISBA seul (en haut), avec ISBA et TEB (au milieu), et différence (en bas)

Les différences entre la simulation avec ISBA seul et celle avec ISBA et TEB se remarquent surtout en Ile-de-France car c'est la partie du bassin la plus urbanisée (jusqu'à 80% de ville).

On constate sur cette zone un ruissellement beaucoup plus fort avec TEB (figure 3.4), en effet les réservoirs de TEB (eau stockée sur les toits et sur les routes) ont une faible capacité ce qui favorise le ruissellement.

En outre le drainage est lui beaucoup plus faible avec TEB sur cette zone (figure 3.3) car il n'y a pas de réservoir de sol au-dessous des surfaces urbaines (imperméables), et donc pas de drainage.

Le bilan d'énergie



Là encore, les différences les plus marquées sont situées en Ile-de-France.

Ainsi on remarque que la température de surface (figure 3.5) est plus élevée avec TEB sur la ville d'environ 1 degré C. En outre le rayonnement net est également plus fort sur cette zone avec TEB (figure 3.6). Ces différences sont à relier aux modifications d'albédo et d'émissivité sur les zones urbaines lors de l'introduction de TEB.

Malgré une température de surface plus forte (et donc un rayonnement infra-rouge émis plus grand) le rayonnement net est plus élevé avec TEB, il semble donc que les effets liés à l'albédo (plus faible, et donc moins de rayonnement solaire renvoyé) et au piégeage du rayonnement solaire dans les rues soient prépondérants.

En outre une évaporation moins importante sur les zones urbaines (figure 3.8) va également dans le sens d'une température de surface plus élevée.

On note enfin que le flux de chaleur sensible est plus fort avec TEB sur les surfaces urbaines (figure 3.7), ce qui est relié à l'élévation de la température de surface.

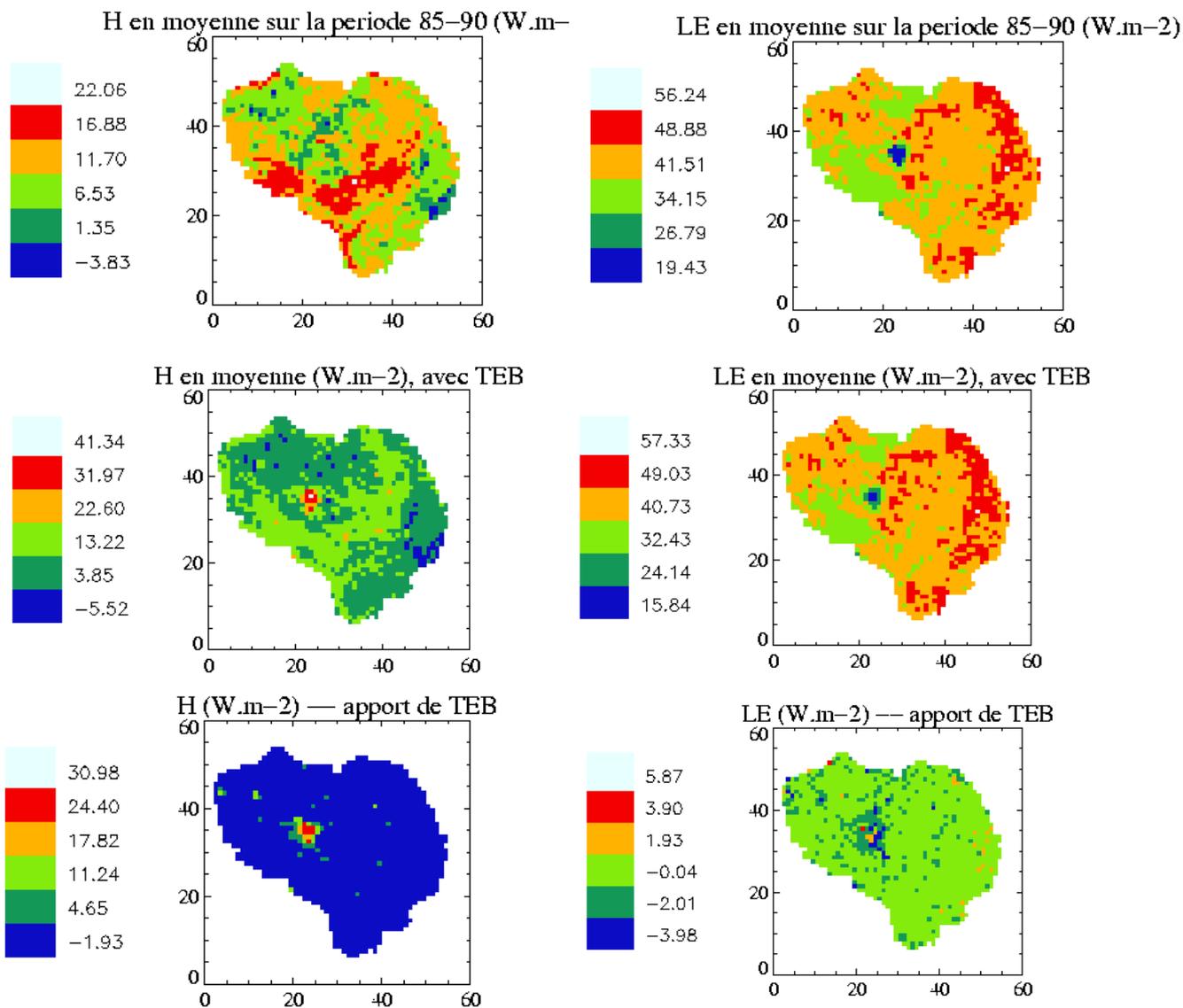


FIG. 3.7 – Flux moyen de chaleur sensible avec ISBA seul (en haut), avec ISBA et TEB (au milieu), et différence (en bas)

FIG. 3.8 – Flux moyen de chaleur latente avec ISBA seul (en haut), avec ISBA et TEB (au milieu), et différence (en bas)

Simulation des débits

L'introduction du schéma de ville TEB n'a globalement que peu d'impact au niveau des débits, néanmoins pour quelques stations correspondant aux sous-bassins les plus urbanisés (6 % de ville sur l'Orge et l'Yerre, 2 % sur l'ensemble du bassin), on note un impact non négligeable de TEB, présenté dans le tableau 3.1.

	1985-1986				1986-1987				1987-1988			
	Rapport		Nash		Rapport		Nash		Rapport		Nash	
	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
ORGE (Morsang)	0.88	1.01	0.62	0.41	0.93	0.89	0.38	0.42	0.67	0.76	0.45	0.43
YERRES (Evry)	1.11	1.29	0.48	0.49	1.32	1.27	0.45	0.47	0.54	0.58	0.28	0.32
SEINE (Poissy)	0.97	0.99	0.80	0.81	0.89	0.92	0.71	0.77	0.83	0.84	0.78	0.79
SEINE (Poses)	1.00	1.02	0.83	0.84	1.09	1.05	0.77	0.81	0.94	0.95	0.84	0.85
SEINE (Paris)	1.02	1.03	0.76	0.75	1.01	0.97	0.72	0.71	0.90	0.99	0.85	0.68

	1988-1989				1989-1990				Moyenne sur 5 ans			
	Rapport		Nash		Rapport		Nash		Rapport (écart à 1)		Nash	
	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
ORGE (Morsang)	0.66	0.74	0.44	0.47	0.75	0.86	0.68	0.71	0.222	0.152	0.514	0.488
YERRES (Evry)	0.69	0.78	0.51	0.58	Pas d'observations				0.300	0.300	0.43	0.465
SEINE (Poissy)	0.88	0.88	0.71	0.72	1.11	1.12	0.81	0.83	0.108	0.098	0.762	0.784
SEINE (Poses)	0.96	0.96	0.77	0.78	1.09	1.09	0.82	0.81	0.056	0.05	0.806	0.818
SEINE (Paris)	0.99	0.98	0.73	0.7	1.13	1.13	0.73	0.69	0.054	0.044	0.758	0.706

TAB. 3.1 – Rapport des lames d'eau annuelles et critères de Nash pour les sous-bassins les plus urbanisés, obtenus avec (a) ISBA seul et (b) ISBA et TEB, par année de 1985 à 1990 et en moyenne sur la période

On constate qu'en moyenne sur la période le rapport des lames d'eau annuelles est meilleur avec TEB, en effet l'écart à 1 est plus faible pour les 5 sous-bassins considérés (on a par exemple pour l'Orge un écart à 1 moyen de 0.152 avec TEB contre 0.222 avec ISBA seul).

Les critères de Nash moyens sont également améliorés par l'introduction de TEB pour 3 des 5 sous-bassins : l'Yerres, la Seine à Poissy et à Poses.

Pour les deux autres bassins, ce critère est en moyenne moins bon avec TEB, mais cette baisse est due seulement à la contribution d'une année (1985-1986 pour l'Orge et 1987-1988 pour la Seine à Paris) pour laquelle le critère de Nash est particulièrement détérioré par TEB, les autres années présentant au contraire en majorité une amélioration de ce critère.

3.1.3 Conclusion

Le schéma de ville TEB a un impact peu marqué sur l'ensemble du bassin en terme de débits, mais globalement positif. Son influence est nettement plus sensible sur la température de surface et le bilan d'énergie qu'il rend plus réaliste.

Il sera donc utilisé tout au long de la simulation 1985-2002.

3.2 Le temps de concentration

Comme il a été présenté dans la partie II, dans la version de MODCOU utilisée pour ce travail, les écoulements sont transférés par isochronisme. Cela suppose la définition de zones, constantes dans le temps, pour lesquelles le temps de transfert jusqu'à l'exutoire est égal à 1, 2, 3 ou t_c jours, le temps de concentration t_c étant le temps de transfert maximal du bassin. Ce temps est étalonné lors de la mise en place du modèle sur chaque nouveau bassin.

Les zones isochrones sont définies par l'ensemble des mailles où le produit temps de transfert relatif $\times t_c = n$, où n vaut de 1 à t_c , et où le temps de transfert relatif a été défini dans la partie II.

Le temps de concentration défini par le CG/ENSMP pour le bassin de la Seine est de 17 jours. Nous avons constaté rapidement que ce temps de concentration générait des décalages entre les crues simulées et les crues observées, et qu'il fallait donc le modifier.

Or il a été mesuré que la vitesse du courant de la Seine est normalement de 1 à 2 km/h , elle augmente à 4 km/h en début de crue et atteint 5 à 7 km/h quand les barrages sont ouverts. Donc pour parcourir les 750 km (environ) de la Seine, il faut 16 jours en période normale, 8 jours en début de crue et à peine 4 jours quand les barrages sont ouverts. Il apparaît donc que le temps de concentration varie avec le débit, ce qui ne peut pas être pris en compte avec le principe de l'isochronisme.

De ce fait plusieurs choix étaient possibles :

- utiliser un modèle de transfert dynamique, capable de calculer la vitesse des courants. Il est envisagé au CIG d'implanter dans MODCOU un module de calcul des écoulements en rivière qui tienne compte du débit, qui permettrait une meilleure simulation des débits à la fois pour les étiages et les crues.
- choisir un temps de concentration moyen qui soit le plus satisfaisant possible tout au long de l'année et pour l'ensemble des stations.

Pour choisir le temps de concentration, des tests de sensibilité ont été réalisés.

Pour effectuer ces tests, on conserve les quantités d'eau ruisselée et infiltrée simulées par ISBA. En revanche, on simule grâce à MODCOU les écoulements de surface avec des temps de concentration de 8 à 17 jours, ce qui conduit bien sûr à des débits simulés différents pour chaque temps de concentration.

Ces tests auraient dû permettre de choisir un temps de concentration unique qui aurait conduit à une simulation des débits et un phasage temporel des crues optimaux pour chaque station. Mais il est apparu que le temps de concentration optimal n'est pas le même pour chaque station. Il semble que le temps de transfert doit être plus ou moins diminué selon la partie du bassin. Ceci signifie que le zonage isochrone est mal adapté, c'est-à-dire que le temps de transfert relatif n'est pas optimal.

Simulation 1985-2002

Pour réaliser la simulation complète sur la période 1985-2002 (chapitre 4), le temps de concentration utilisé est de 12 jours. C'est ce temps qui dans les tests de sensibilité conduisait globalement aux meilleurs résultats sur l'ensemble des stations.

Etude des crues de la Seine à Paris

Comme on l'a vu, le temps de transfert diminue par temps de crue. Le temps de concentration fixé précédemment, qui n'est pas optimum pour toutes les stations, n'est pas le plus adapté pour la simulation des crues de la Seine à Paris. En effet on constate que les crues ont un temps de transfert de 7 jours environ, ce qui conduit à un temps de concentration de 8 jours.

Chapitre 4

Analyse de la simulation SAFRAN-ISBA-MODCOU sur la période 1985-2002

4.1 Analyse des débits

4.1.1 Outils statistiques pour l'analyse des débits

L'analyse des débits est faite à l'échelle journalière, mensuelle et annuelle, sur l'ensemble des 17 années de la simulation, en utilisant divers outils statistiques :

- Pour les débits journaliers : on utilise des critères tels que la corrélation R^2 et le critère de Nash (ou efficacité) E , plus ils sont proches de 1 et meilleure est la simulation ;
- Pour les débits mensuels, on calcule la médiane, les quintiles ou les déciles pour mettre en évidence des phénomènes hydrologiques comme les fortes crues ou les étiages ;
- Pour les débits annuels, c'est le rapport des lames d'eau annuelles (simulée Q_{sim} sur observée Q_{obs}) permet de qualifier la capacité du modèle à simuler l'eau s'écoulant sur le bassin à l'échelle de l'année ;
- Enfin, on étudie les *hautes eaux* : on détermine d'abord les débits moyens sur une durée donnée (1, 2, 5, 10, 20 et 30 jours), appelés les 'VCXA', on en extrait la série des maxima annuels et on ajuste cette série avec une loi de Gumbel, ce qui permet d'analyser la qualité de la simulation des crues de différentes durées et intensités.

4.1.2 Les débits journaliers

Les stations principales

En ce qui concerne les 8 stations correspondant à la Seine et ses principaux affluents (figures 4.1 et 4.2), les résultats (tableau 4.1) sont plutôt satisfaisants avec de bons critères de Nash, en particulier à l'exutoire de la Seine (Poses) où on atteint 0.87.

Station	Rapport	Nash	Station	Rapport	Nash
Aisne (Choisy)	1.01	0.87	Oise (Pont-Sainte-Maxence)	0.92	0.87
Aube (Arcis)	0.77	0.68	Seine (Paris)	1.05	0.86
Eure (Charpont)	1.05	0.67	Seine (Poses)	0.98	0.87
Marne (Noisiel)	0.95	0.83	Yonne (Courlon)	0.95	0.78

TAB. 4.1 – Scores statistiques des stations principales

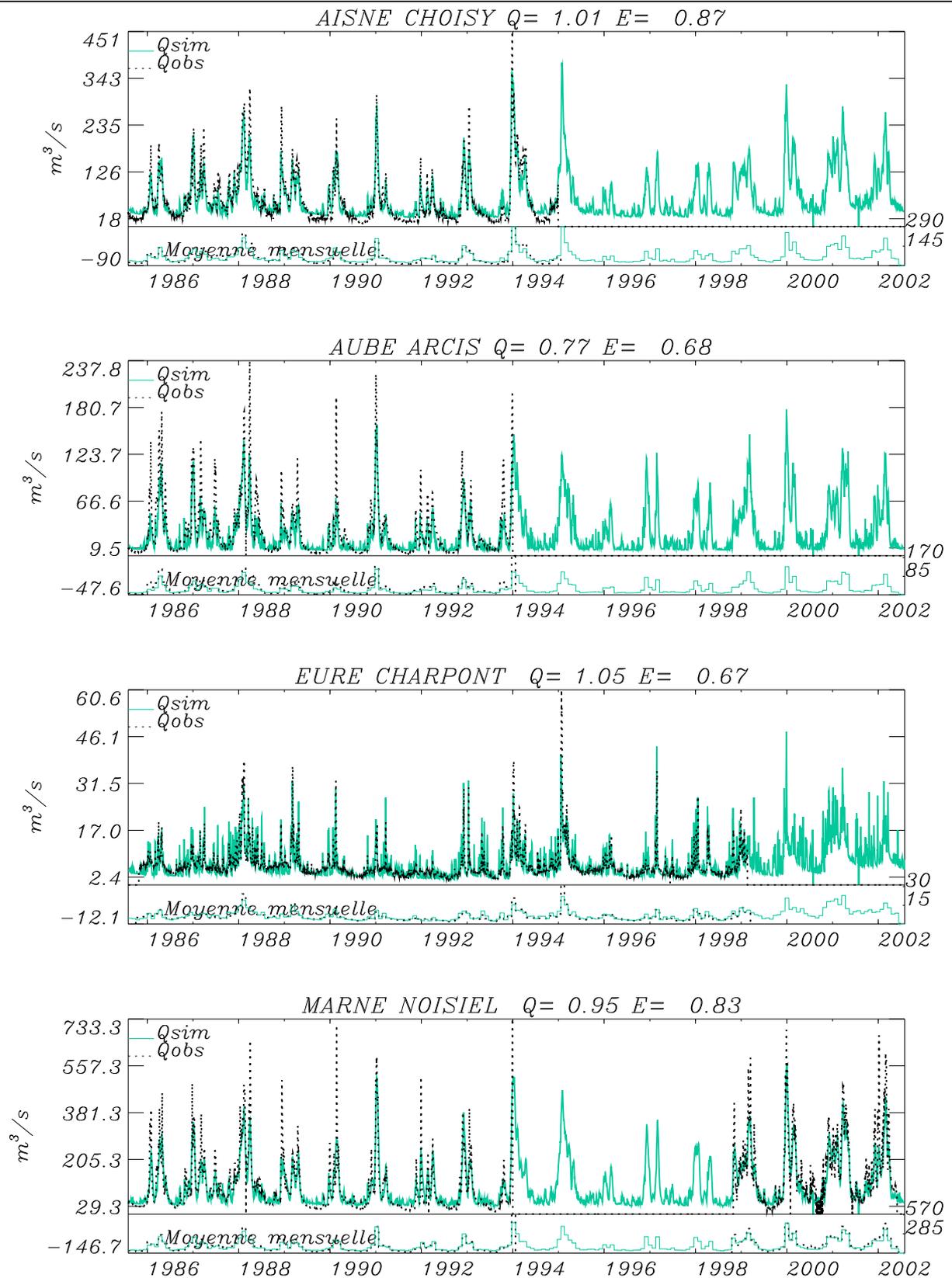


FIG. 4.1 – Débits journaliers simulés et observés pour la Seine et ses principaux affluents (1)

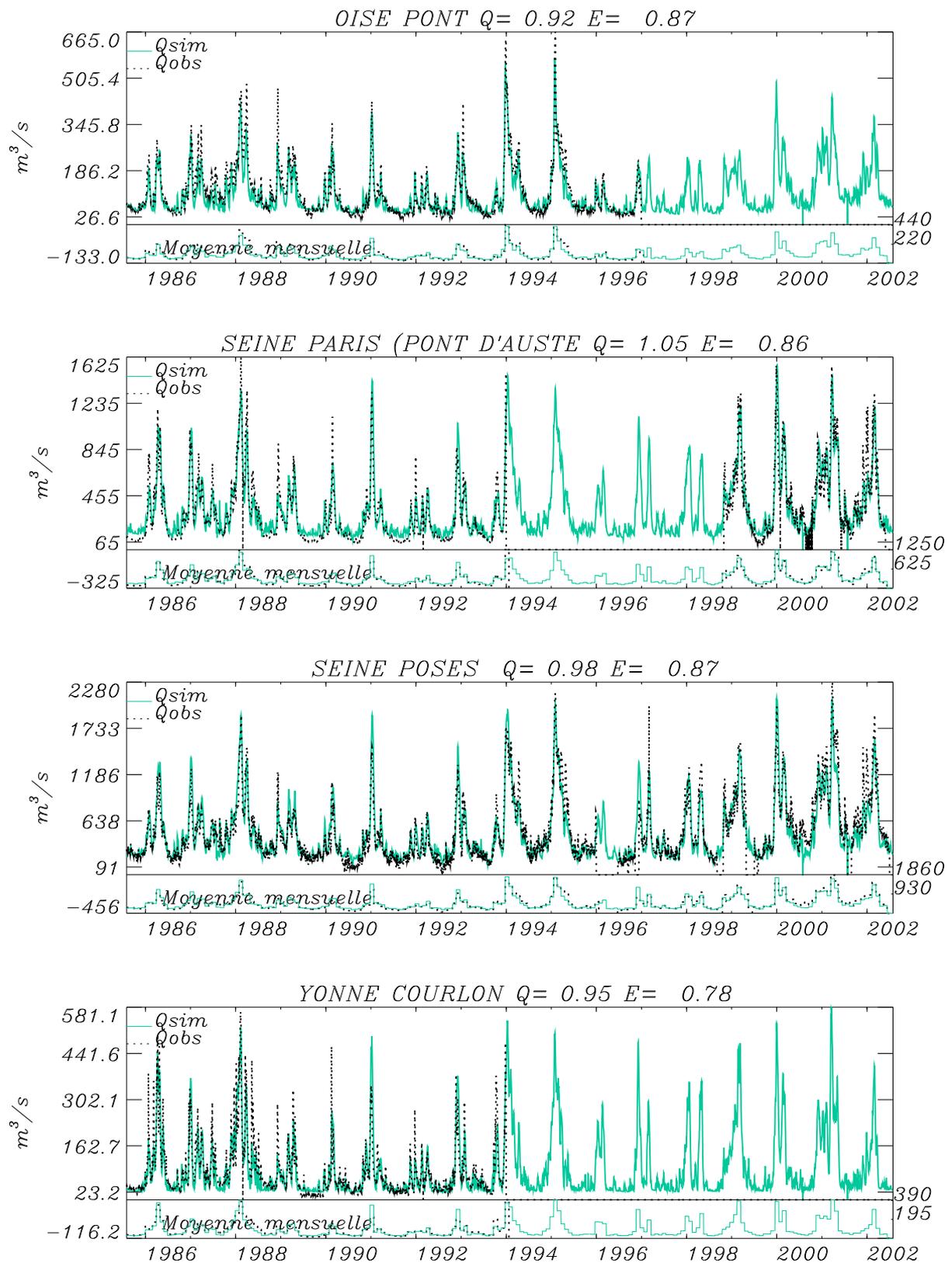


FIG. 4.2 – Débits journaliers simulés et observés pour la Seine et ses principaux affluents (2)

Les statistiques globales

La figure 4.3 présente les scores statistiques (rapport des lames d'eau annuelles (en bas) et critère de Nash calculé à partir des débits journaliers (en haut)), en moyenne sur la période, pour toutes les stations.

On constate que 57 des 104 stations simulées ont un critère de Nash supérieur à 0.5, soit 55%, dont 26 stations pour lesquelles ce critère dépasse les 0.7, soit 25% du total.

On peut comparer ces chiffres aux résultats obtenus sur le bassin de l'Adour-Garonne par [MOREL 2002] : en ce qui concerne les stations dont le critère de Nash est supérieur à 0.5, les résultats obtenus sur la Garonne sont meilleurs (70 %), cependant il y a plus de petits bassins sur la Seine, qui sont généralement moins bien simulés, ce qui peut expliquer cette différence. Le pourcentage de stations ayant un critère de Nash au dessus de 0.7 est de 13 % sur la Garonne, soit plus faible que pour la Seine. Sur le bassin du Rhône, les résultats sont équivalents : 24% des stations ont un critère de Nash supérieur à 0.7 ([ETCHEVERS 2000]).

On remarque également sur la figure 4.3 que le critère de Nash augmente avec la surface du bassin, en effet parmi les stations correspondant à un bassin de plus de 1000 km², 84% ont un critère de Nash supérieur à 0.5 et 54% un critère de Nash supérieur à 0.7.

Une partie des stations, notamment celles qui correspondent aux petits bassins, sont néanmoins simulées de façon moins satisfaisante, on a en effet 17 stations pour lesquelles le critère de Nash est négatif.

Un tiers des stations ont un rapport de lames d'eau annuelles moyen (lame d'eau simulée sur lame d'eau observée) compris entre 0.9 et 1.1, ce qui est relativement satisfaisant. On note globalement une sous-estimation de la lame d'eau annuelle par SIM, le rapport moyen est en effet de 0.89. Plus le bassin est grand et meilleur est le rapport des lames d'eau, en effet il est compris entre 0.9 et 1.1 pour la moitié des bassins dont la superficie est comprise entre 1000 km² et 10000 km² et pour tous les bassins d'une superficie dépassant les 10000 km².

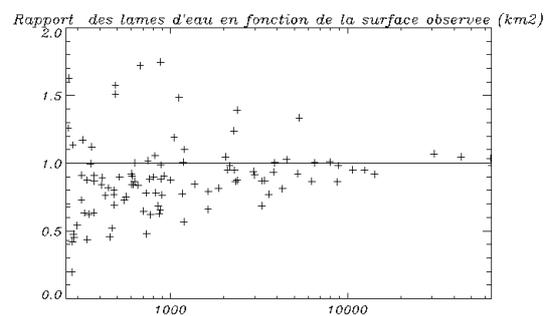
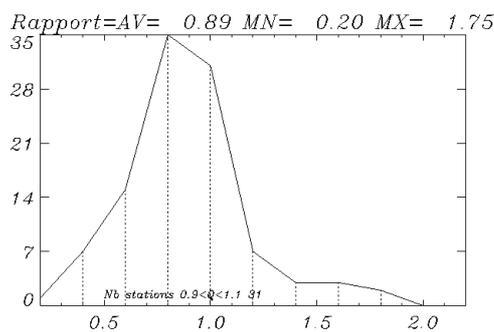
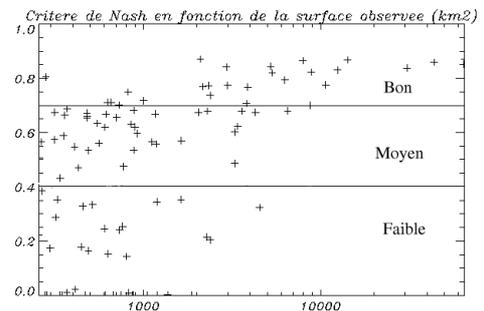
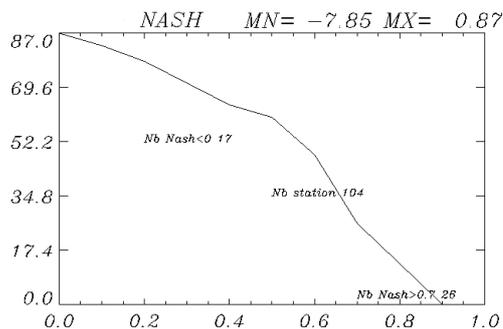


FIG. 4.3 – Critère de Nash pour les débits journaliers et rapport des lames d'eau annuelles pour l'ensemble des stations hydrométriques

4.1.3 Les débits mensuels

Débits mensuels observés

La figure 4.4 présente les caractéristiques de la Seine et de ses principaux affluents, via leurs débits mensuels et le calcul de la médiane et des quartiles et quintiles secs et humides.

Pour tous ces cours d'eau le débit est fort en hiver, et également élevés au début du printemps pour la plupart d'entre eux (sauf l'Eure), ce qui s'explique par la répartition annuelle des précipitations.

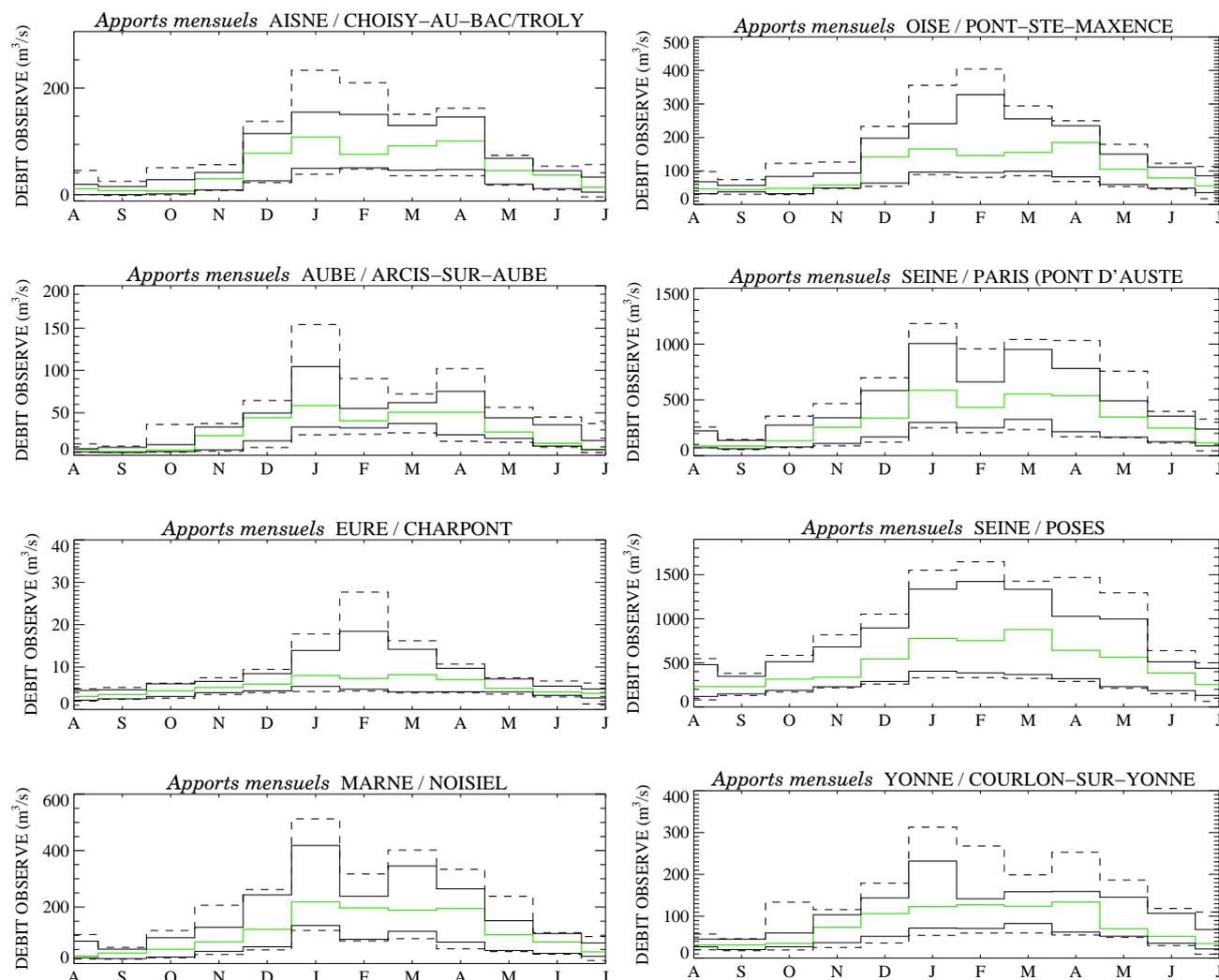


FIG. 4.4 – Apports mensuels de la Seine et de ses principaux affluents : médiane en vert, quartiles et quintiles sec et humides (Q_{20} et Q_{25})

Débits mensuels simulés

Les débits mensuels simulés et observés dans les 8 stations principales figurent en-dessous des débits journaliers dans les graphiques 4.1 et 4.2. On observe globalement une bonne restitution des débits mensuels par le modèle, ce qui se traduit au niveau des critères statistiques présentés dans le tableau 4.2.

Le passage des débits journaliers aux débits mensuels se traduit par une nette amélioration des critères statistiques (corrélation et critère de Nash), comme le montre le tableau 4.2. On passe par exemple pour la Marne de 0.847 à 0.955 pour la corrélation et de 0.830 à 0.932 pour le critère de Nash. Parmi ces stations, la moitié ont un critère de Nash supérieur à 0.9 (soit très bon) pour les débits mensuels. Néanmoins on retrouve des scores médiocres pour les stations où les débits journaliers étaient mal simulés.

Station	Corrélation R^2		Critère de Nash E	
	Journ.	Mens.	Journ.	Mens.
Aisne (Choisy)	0.871	0.916	0.864	0.905
Aube (Arcis)	0.748	0.902	0.679	0.782
Eure (Charpont)	0.699	0.872	0.674	0.863
Marne (Noisiel)	0.847	0.955	0.830	0.932
Oise (Pont)	0.884	0.920	0.866	0.896
Seine (Paris)	0.861	0.944	0.858	0.941
Seine (Poses)	0.870	0.913	0.869	0.912
Yonne (Courlon)	0.792	0.894	0.775	0.876

TAB. 4.2 – Comparaison des critères statistiques (corrélation et critère de Nash) obtenus à partir des débits journaliers et mensuels, pour les stations principales

4.1.4 Les hautes eaux

L'analyse des hautes eaux (figure 4.5) consiste en un ajustement par la loi de Gumbel (voir paragraphe suivant) de la série des maxima annuels des débits moyens sur 1, 2, 5, 10, 20 et 30 jours. Cette technique est couramment utilisée en hydrologie (voir notamment [MOREL 2002]). On présente ici les résultats obtenus pour trois stations : l'Aisne à Choisy, l'Oise à Pont-Ste-Maxence et la Seine à Paris.

Ces ajustements ont été réalisés à partir des débits observés (traits continus) et de débits simulés (traits pointillés) : dans chaque cas (simulé et observé), on commence par constituer l'échantillon des débits moyens sur la durée choisie (de 1 à 30 jours), puis on en extrait la série des maxima annuels (notée $VCXA$). On ajuste cette série par la loi de Gumbel, ce qui conduit aux tracés de la figure 4.5. Sur chaque graphique on trouve en ordonnée le débit moyen (sur une durée de 1 à 30 jours) et en abscisse la variable de Gumbel associée (axe horizontal du bas) et aussi la durée de retour correspondante (axe horizontal du haut).

L'ajustement par la loi de Gumbel permet de comparer la restitution des débits moyens sur une durée donnée par rapport aux observations, et donc d'estimer la qualité du modèle pour des crues de diverses durées et intensités.

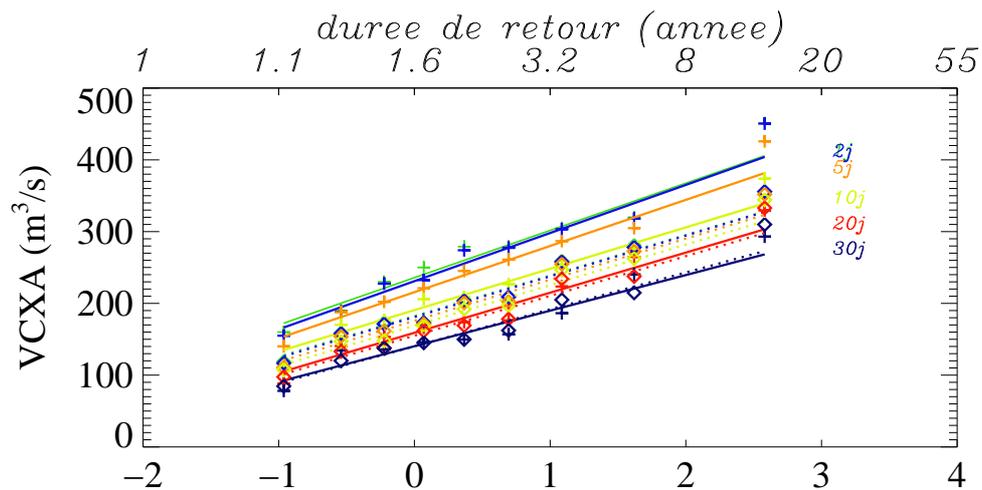
Aucune station ne possède une série d'observations couvrant toute la période 1985-2002, aussi figure pour chaque station le nombre d'années qui a été utilisé. Ce nombre est généralement égal à une dizaine d'années, ce qui est relativement peu pour employer la théorie de Gumbel, aussi il convient de prendre avec précaution les durées de retour qui figurent sur ces graphes.

Néanmoins ces graphes permettent de qualifier le comportement du modèle : on note globalement que les crues de 1 à 5 jours sont sous-estimées par le modèle, en revanche quand on passe à l'échelle du mois (ajustement avec 20 et 30 jours) les résultats sont plus satisfaisants.

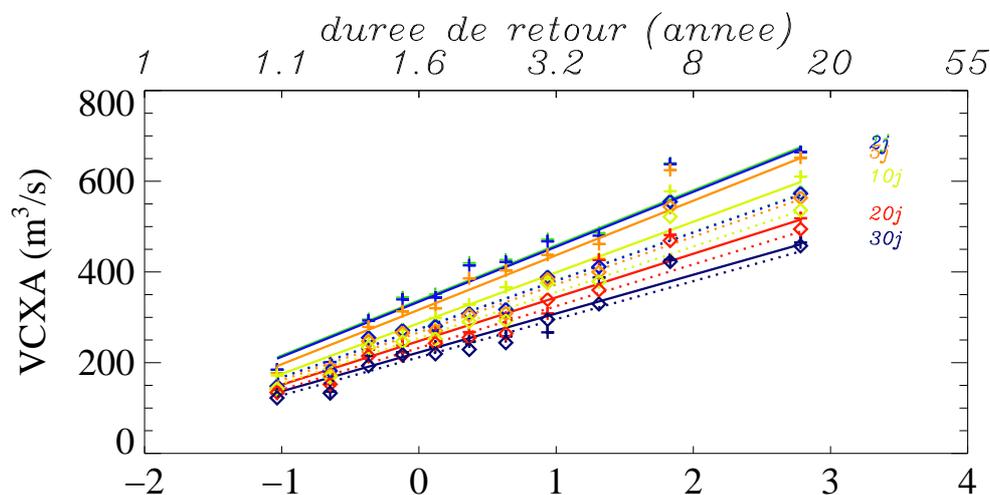
Ainsi à Choisy les droites d'ajustement pour 20 et 30 jours observées et simulées sont presque confondues, ce qui n'est pas le cas pour 1, 2 et 5 jours. Un débit moyen sur 2 jours de $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ aura une durée de retour observée de 3 ans environs contre une dizaine d'années pour la durée de retour simulée. Ces remarques sont sensiblement les mêmes pour l'Oise à Pont-Ste-Maxence.

C'est sur la Seine à Paris que le modèle est le plus à même de reproduire les observations, en effet les droites d'ajustement sont assez proches les unes des autres pour les courtes durées de 1 à 5 jours comme pour les plus longues.

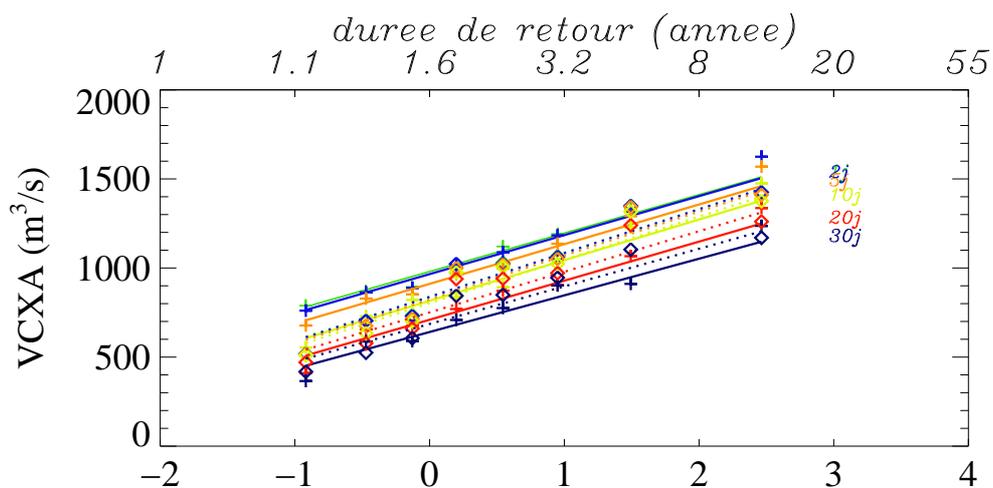
Ces résultats sont là encore comparables avec ceux obtenus sur le bassin Adour-Garonne par [MOREL 2002].



Hautes eaux AISNE / CHOISY-AU-BAC/TROLY (9. ans)



Hautes eaux OISE / PONT-STE-MAXENCE (11. ans)



Hautes eaux SEINE / PARIS (PONT D'AUSTE) (8. ans)

FIG. 4.5 – Ajustement par la loi de Gumbel des VCXA

Présentation théorique

On s'intéresse au maximum de X sur une période donnée, par exemple une année.

On note :

$$M_n = \sup_{1 \leq i \leq n} X_i$$

(M_n est le maximum de n valeurs, n étant le nombre de valeurs sur la période).

On a :

$$P_r \{M_n < x\} = P_r \left\{ \sup_{1 \leq i \leq n} X_i < x \right\} = P_r \left(\{X_1 < x\} \cap \{X_2 < x\} \cap \dots \cap \{X_n < x\} \right)$$

Si les X_i sont indépendants et identiquement distribués suivant la fonction de répartition F , on en déduit immédiatement G la fonction de répartition de M_n :

$$P_r \{M_n < x\} = P_r \{X_1 < x\} \times P_r \{X_2 < x\} \times \dots \times P_r \{X_n < x\}$$

$$G(x) = P_r \{M_n < x\} = \prod_{i=1}^n P_r \{X_i < x\} = [F(x)]^n$$

On remarque que, si x_0 est la borne supérieure de la distribution :

$$\forall x < x_0, G(x) \rightarrow 0 \text{ lorsque } n \rightarrow +\infty$$

C'est-à dire que lorsque $n \rightarrow +\infty$, M_n converge en probabilité vers la borne supérieure de la distribution. Pour savoir comment cette convergence s'effectue, on introduit une normalisation à l'aide des coefficients réels a_n ($a_n > 0$) et b_n tels que :

$$P_r \left(\frac{M_n - b_n}{a_n} < x \right) = F^n(a_n x + b_n) \rightarrow G(x) \text{ quand } n \rightarrow +\infty \quad (4.1)$$

Quand cette limite existe, G est dite max-stable et F est dans le domaine d'attraction de G .

Théorème 1 (Théorème des valeurs extrêmes) *S'il existe une séquence de constantes réelles a_n ($a_n > 0$) et b_n telle que 4.1*

alors G suit l'un des types de distribution suivants, après homothétie et translation :

Fischer-Tippett Type I loi de Gumbel $G(x) = \exp(-\exp(-x))$, $-\infty < x < +\infty$

Fischer-Tippett Type II loi de Fréchet $\begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ \exp(-x^{-\alpha}) & x > 0, \alpha > 0 \end{cases}$

Fischer-Tippett Type III loi de Weibull $\begin{cases} \exp(-(-x)^\alpha) & \alpha < 0, x < 0 \\ 1 & x \geq 0 \end{cases}$

En pratique, on s'intéresse à la forme de la distribution, définie par l'un des types ci-dessus, et non pas aux suites de constantes a_n et b_n .

Les trois types de lois se résument en une seule, la **loi généralisée des valeurs extrêmes (GEV)** (présentation unifiée) :

$$P_r(\mathbf{M}_n < \mathbf{x}) = \mathbf{G}(\mathbf{x}) = \exp \left[- \left(1 + \xi \frac{\mathbf{x} - \mu}{\sigma} \right)^{\frac{-1}{\xi}} \right]$$

avec $\begin{cases} \mu \text{ le paramètre de localisation (ou mode),} \\ \sigma \text{ le paramètre d'échelle (ou gradex, } \sigma > 0), \\ \text{et } \xi = \frac{1}{\alpha} \text{ le paramètre de forme.} \end{cases}$

Si $\xi = 0$, on se retrouve dans le cas de Gumbel, si $\xi > 0$ c'est une loi de Fréchet et si $\xi < 0$ c'est une loi de Weibull.

Ajustement d'un échantillon à la loi de Gumbel

A partir de l'échantillon de données, on extrait la série des N maxima sur la période considérée (souvent l'année). On souhaite savoir si la loi de ces maxima est une loi de Gumbel, en procédant à un ajustement graphique.

Pour cela, on définit la variable de Gumbel $g = \frac{x-\mu}{\sigma}$, ce qui conduit à $G(x) = \exp(\exp(-g))$ soit $g = -\ln(-\ln(G(x)))$.

La première étape consiste à calculer les N valeurs de g en fonction de celles de x . Pour cela on utilise la relation $g = -\ln(-\ln(G(x)))$, et une des estimations de $G(x)$ suivante :

$$G(x_i) = \frac{i}{N+1} \text{ ou } G(x_i) = \frac{i-0.5}{N}$$

Ensuite, on porte ces points sur un graphique. S'ils forment une droite, c'est que la loi des maxima est bien une loi de Gumbel, et on peut estimer les valeurs de μ et σ à l'aide de la pente et de l'ordonnée à l'origine de la droite ainsi tracée. On peut également extrapoler cette loi pour des plus grandes valeurs de x et calculer des durées de retour.

La durée de retour T de l'évènement $\{X > x\}$ est la durée moyenne qui sépare deux occurrences de cet évènement. On montre que :

$$T(x) = \frac{1}{1-G(x)}$$

4.2 Analyse du souterrain

4.2.1 Contribution du souterrain au débit de la Seine

Le graphique 4.7 montre le débit simulé, le débit observé et la contribution du souterrain à Poses en moyenne sur la période 1985-2002. On constate que la contribution du souterrain représente une forte part du débit total en été (période d'étiage), jusqu'à 80 % en moyenne. En revanche en période de crue cette part est plus limitée, avec seulement 25 % du débit des mois de janvier à mars provenant du souterrain.

Comme le montre la figure 4.6, les différents termes varient d'une année sur l'autre, et en période d'étiage la part du débit en provenance du souterrain peut approcher des 100 % (été 1986, 1990, 1992, 1996 par exemple). De même l'intensité du débit dû au souterrain varie d'un hiver sur l'autre, il va de $150 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ à $250 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ environ les années de fortes crues, et dépasse même $300 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ en 1995-1996 et 2001-2002.

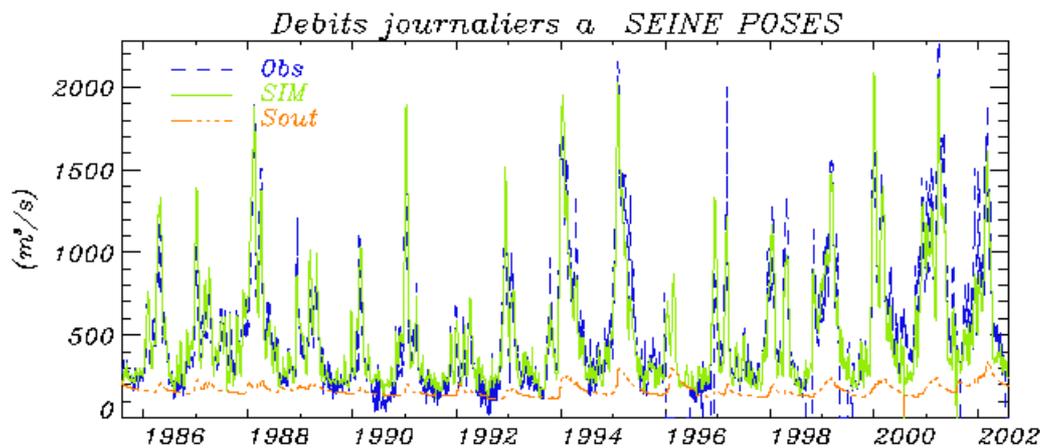


FIG. 4.6 – Débits simulé, observé et contribution du souterrain à Poses

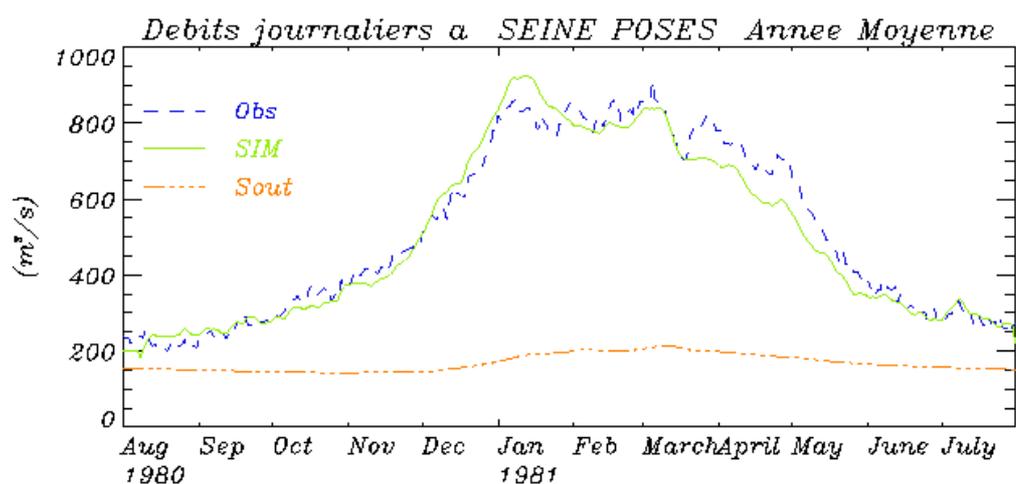


FIG. 4.7 – Débits simulé, observé et contribution du souterrain à Poses, en moyenne sur les 17 ans de simulation

Ces figures mettent donc en évidence le fait que la contribution du souterrain aux débits est capitale en période d'étiage, mais relativement faible en période de crue (le rôle du souterrain pendant les périodes de crues est détaillé dans le paragraphe 5).

4.2.2 Bilan du souterrain

La figure 4.8 montre la variation annuelle de la quantité d'eau du souterrain, pour chaque couche et en globalité.

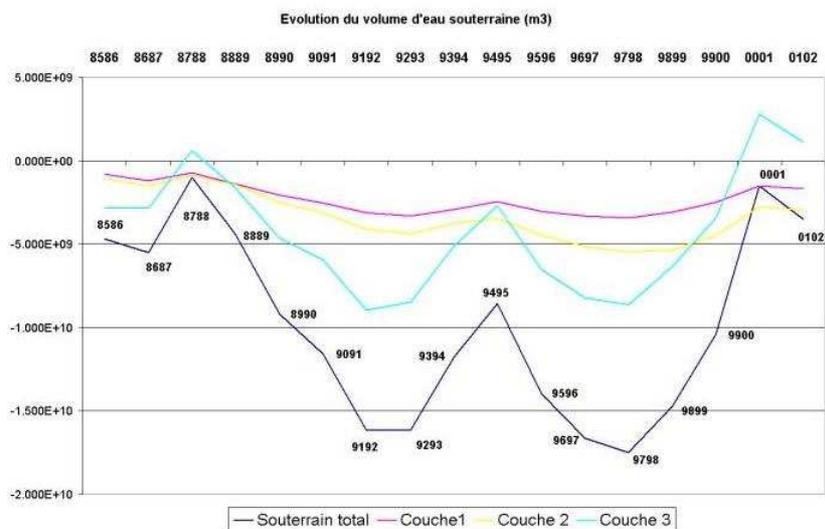


FIG. 4.8 – Variation annuelle de la quantité d'eau stockée dans le souterrain

Elle fait apparaître des années de stockage (comme 87-88, 93-93 ou encore 00-01) qui correspondent aux années de fortes précipitations, ainsi que des années de déstockage (89-90, 92-93, 01-02 par exemple) qui sont également les années faiblement pluvieuses.

A la fin de la période (fin juillet 2002) on constate que le volume d'eau dans la nappe est en dessous de son volume d'origine (début août 1985).

Ceci se retrouve sur la figure 4.9, qui détaille chacun des termes du bilan du souterrain sur l'ensemble des trois couches.

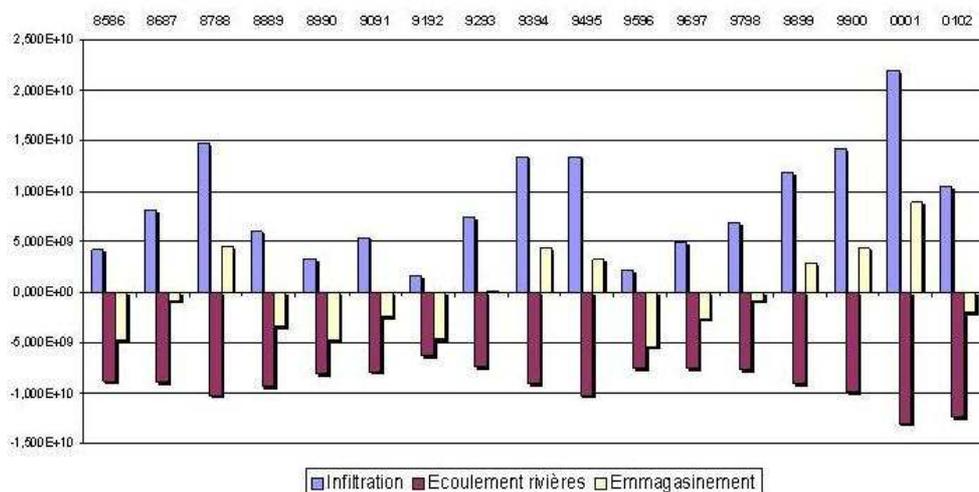


FIG. 4.9 – Evolution annuelle des composantes du bilan du souterrain global

L'emmagasinement (quantité d'eau stockée dans le souterrain) moyen sur la période est négatif, ce qui correspond à une diminution de la quantité d'eau souterraine, de $-0.2 \cdot 10^9 m^3/an$ en moyenne.

La quantité d'eau infiltrée dans la nappe vaut en moyenne $8.8 \cdot 10^9 m^3/an$, mais elle varie fortement d'une année sur l'autre ce qui se traduit par un fort écart-type ($5.5 \cdot 10^9 m^3$). Cette valeur est deux fois plus importante que sur le bassin du Rhône (où l'infiltration moyenne est de $4.6 \cdot 10^9 m^3/an$) du fait de la plus petite taille de la nappe, mais est aussi variable (même rapport entre moyenne et écart-type) ([ETCHEVERS 2000]).

La quantité d'eau qui s'écoule en rivières est en moyenne de $9.0 \cdot 10^9 m^3$ /an, mais varie moins que l'eau infiltrée dans la nappe (l'écart-type est seulement de $1.8 \cdot 10^9 m^3$). Sur le bassin du Rhône, la quantité d'eau drainée en rivière est là encore deux fois moins importante que sur le bassin de la Seine, et sa variabilité inter-annuelle est aussi moins forte que celle de l'eau infiltrée.

Le drainage moyen en rivière est du même ordre de grandeur que l'infiltration moyenne pour les deux bassins (Rhône et Seine), ce qui entraîne un stockage moyen environ dix fois plus petit dans les deux cas.

Le détail de ce bilan pour chacune des couches du souterrain (figure 4.8, et 4.10 à 4.12 pour le détail de chaque composante du bilan) fait ressortir la prépondérance de la nappe de la Craie, qui est la plus étendue des trois nappes modélisées et qui impose le comportement global du souterrain.

En effet la quantité d'eau infiltrée dans la nappe de la Craie (couche 3) représente 79.1% du volume total infiltré, contre seulement 9.6% et 13.3% pour l'Oligocène (couche 1) et l'Eocène (couche 2). Il en va de même pour la quantité d'eau écoulee en rivière, 76.4% provient de la Craie, 6.2% de l'Oligocène et 17.4% de l'Eocène.

En ce qui concerne l'emmagasinement, il est en moyenne positif pour la Craie (on a plus d'eau dans cette nappe à la fin de la simulation qu'au début), mais les deux autres nappes perdent de l'eau ce qui conduit à un emmagasinement moyen global négatif. Néanmoins, la Craie impose l'amplitude des variations inter-annuelles de l'emmagasinement (figure 4.8).

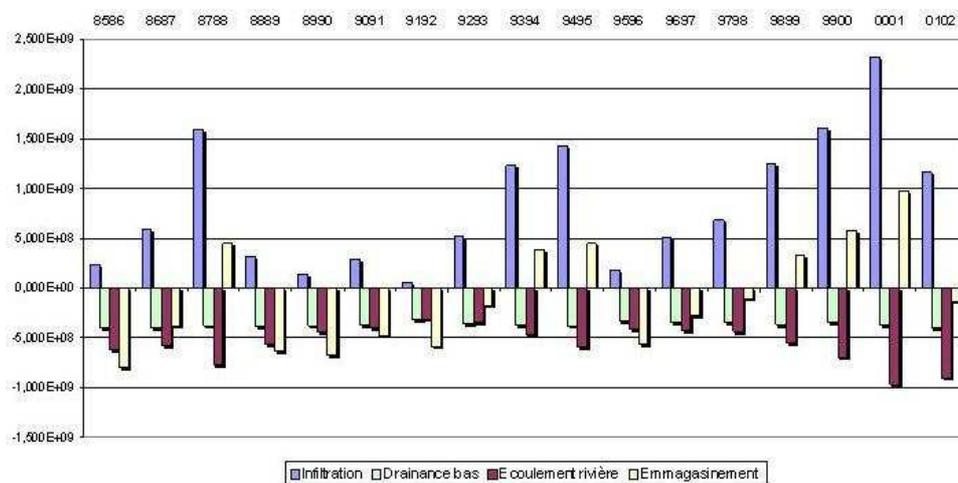


FIG. 4.10 – Evolution annuelle des composantes du bilan de la nappe de l'Oligocène

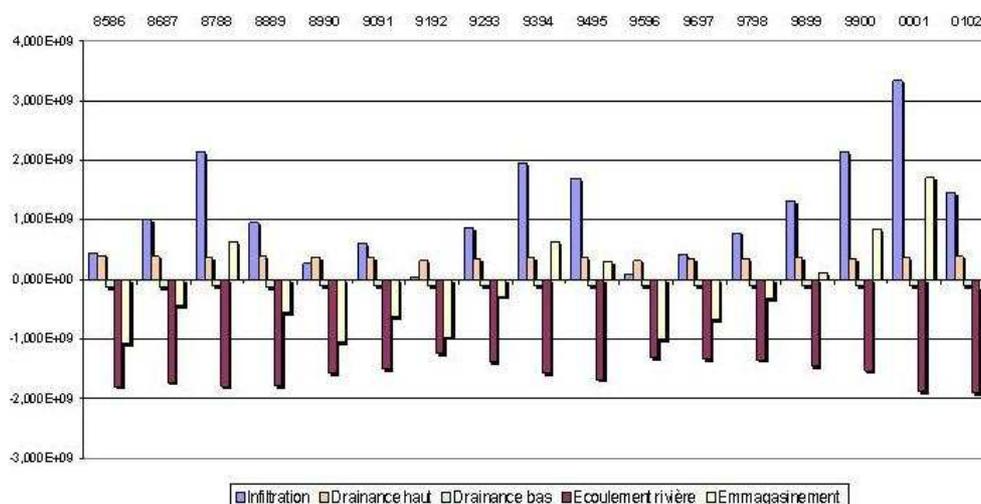


FIG. 4.11 – Evolution annuelle des composantes du bilan de la nappe de l'Eocène

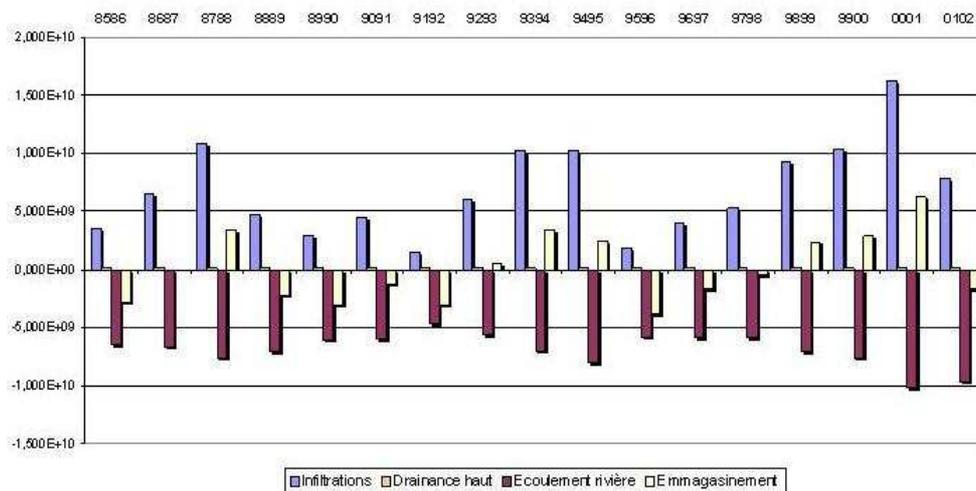


FIG. 4.12 – Evolution annuelle des composantes du bilan de la nappe de la Craie

4.2.3 Comparaison avec les niveaux piézométriques observés

La simulation du niveau de chacune des trois nappes conduit aux mêmes résultats que ceux obtenus par [GOMEZ 2002]. On a globalement une restitution correcte de l’amplitude des variations du niveau des nappes, même si la valeur absolue est biaisée. C’est ce qui se passe pour les quatre piézomètres présentés sur la figure 4.13 et représentant chacune des trois nappes modélisées.

Néanmoins certains piézomètres sont mal simulés tant pour ce qui est du niveau lui-même que de ses variations.

Ceci traduit la difficulté d’une telle simulation, et pose la question de la représentativité d’un piézomètre, qui peut être soumis à des effets locaux (rabattement de nappes), et dont les mesures sont comparées à des valeurs moyennes sur un maille entière.

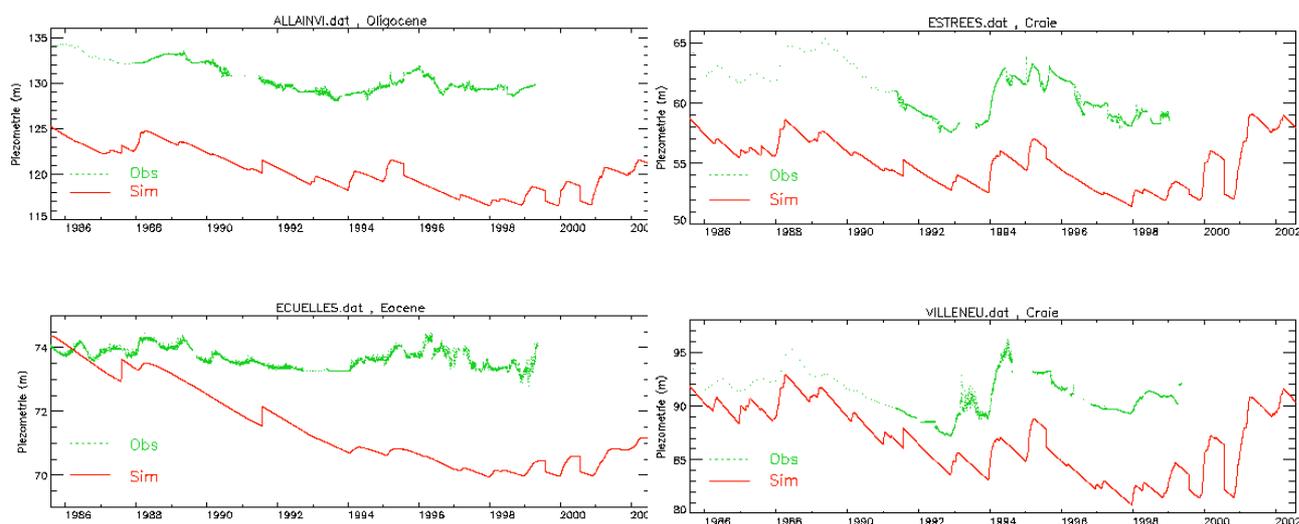


FIG. 4.13 – Piézométrie observée et simulée pour les piézomètres de Allainville (Oligocène), Ecuelles (Eocène), Estrées et Villeneuve (Craie) sur la période 1985-2002

4.2.4 Analyse de l'évolution spatiale du souterrain

Le comportement du souterrain varie très fortement d'une année sur l'autre, c'est pourquoi nous nous intéresserons à deux années particulières : une année sèche qui correspond à un destockage du souterrain (95-96), et une année pluvieuse (00-01) pendant laquelle le souterrain stocke de l'eau, plutôt qu'à des moyennes sur la période.

Les figures 4.14, 4.15, 4.16 et 4.17 présentent les cartes d'évolution du niveau piézométrique de chacune des trois couches de souterrain, pour chacune des deux années considérées, pendant deux périodes : du milieu de l'été au milieu de l'hiver suivant et du milieu de l'hiver au milieu de l'été suivant (entre un niveau a priori bas en août et un niveau a priori élevé en janvier).

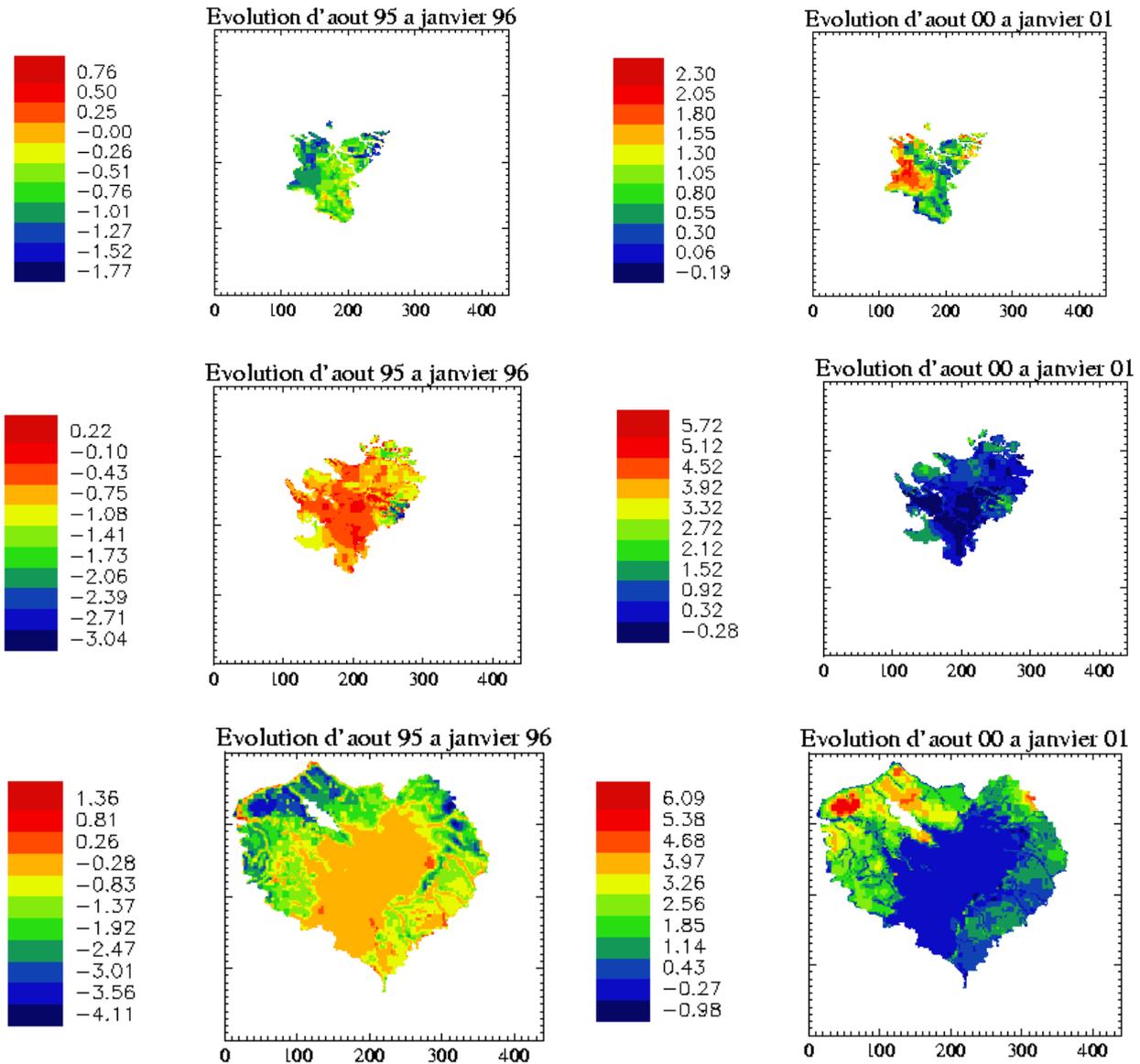


FIG. 4.14 – Evolution du niveau piézométrique des nappes (Oligocène, Eocène et Craie) de l'été à l'hiver suivant lors d'une année sèche (95-96)

FIG. 4.15 – Evolution du niveau piézométrique des nappes (Oligocène, Eocène et Craie) de l'été à l'hiver suivant lors d'une année pluvieuse (00-01)

Pendant la période automnale (figure 4.14 et 4.15) on constate de très grandes différences entre l'année sèche et l'année humide. En effet, si le souterrain semble avoir tendance à stocker de l'eau pendant cette période en 00-01, ce n'est pas le cas en 95-96 où même en automne on assiste à une baisse du niveau des nappes. En certains points de la nappe de la Craie on passe d'une augmentation du niveau de 5 mètres environ en 00-01 à une baisse de 4 mètres en 95-96 (partie nord ouest de la nappe).

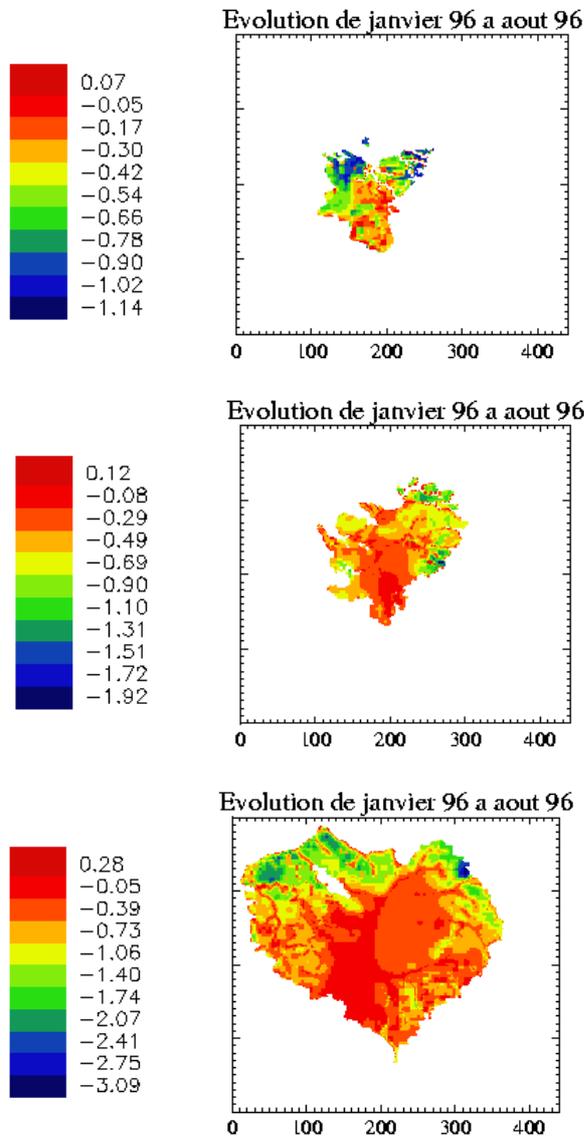


FIG. 4.16 – Evolution du niveau piézométrique des nappes (Oligocène, Eocène et Craie) de l'hiver à l'été suivant lors d'une année sèche (95-96)

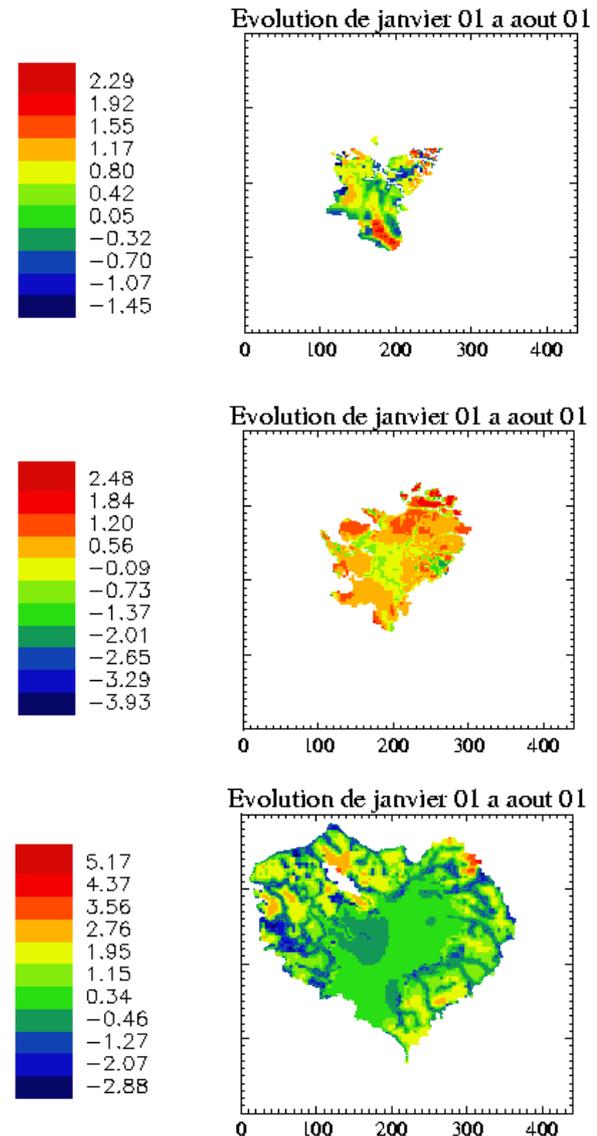


FIG. 4.17 – Evolution du niveau piézométrique des nappes (Oligocène, Eocène et Craie) de l'hiver à l'été suivant lors d'une année pluvieuse (00-01)

Au printemps (figures 4.16 et 4.17), les différences entre les deux années sont encore très marquées. En 95-96 le niveau du souterrain semble globalement baisser, alors qu'en 00-01 le comportement des nappes est plus contrasté, avec même des augmentations du niveau piézométrique en certaines parties des nappes.

4.3 Analyse du bilan hydrique

4.3.1 Variabilité spatiale

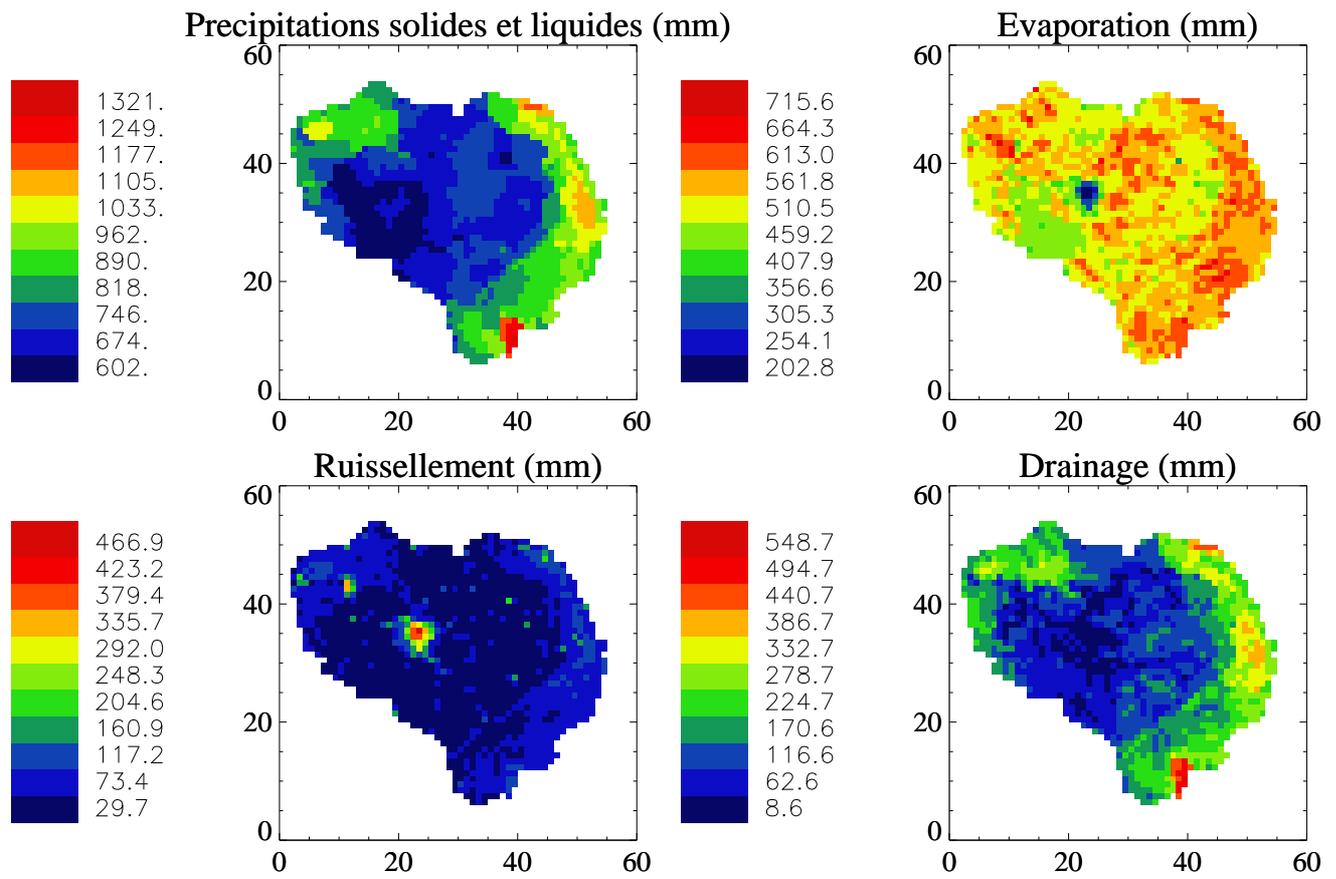


FIG. 4.18 – Cartes de cumul annuel de précipitations, évaporation, ruissellement et drainage, en moyenne sur la période

Les cartes de la figure 4.18 présentent la répartition spatiale des cumuls annuels des termes du bilan hydrique : précipitations (solides et liquides), évaporation, ruissellement et drainage.

On remarque une corrélation entre les précipitations d'une part, et le ruissellement et le drainage d'autre part. Tous ces termes ont des valeurs particulièrement élevées à l'ouest du bassin (près de la côte) et surtout à l'est sur la partie la plus élevée.

Les zones urbaines se traduisent par un fort ruissellement, un faible drainage et une faible évaporation, ce que l'on remarque surtout sur l'Ile-de-France.

En moyenne sur le domaine et sur les 17 ans, le cumul annuel des précipitations totales est de 818 mm, il est de 563 mm pour l'évaporation, 78 mm pour le ruissellement et 178 mm pour le drainage. Le drainage est donc en moyenne 2.3 fois plus important que le ruissellement, chiffre assez proche du rapport de 3 existant entre drainage et ruissellement sur le bassin de l'Adour-Garonne ([MOREL 2002]). L'évaporation représente en moyenne 70% des précipitations totales, et 30% pour la somme drainage plus ruissellement. Sur l'Adour-Garonne ces proportions sont respectivement de 60% et 40%. La part de l'évaporation est donc plus grande sur le bassin de la Seine, ce qui peut s'expliquer par l'absence de zone très montagneuse comme les Pyrénées où l'évaporation est très faible. Sur le bassin du Rhône ce rapport évaporation sur précipitations évolue de 60% à 80% sauf sur les zones de montagnes où il ne vaut que 20% à 50% ([ETCHEVERS 2000]).

4.3.2 Variabilité temporelle

Variabilité saisonnière

La figure 4.19 présente la répartition mensuelle moyenne des termes du bilan hydrique : les précipitations solides et liquides, l'évaporation, le ruissellement et le drainage. La variation mensuelle moyenne du stock d'eau dans le sol est également représenté par des croix. Ce graphique permet de qualifier la variation saisonnière de chacun de ces termes : les précipitations sont plus fortes en hiver qu'en été (voir paragraphe 3), et l'évaporation suit la tendance inverse avec un maximum au printemps. Le stock d'eau dans le sol augmente en hiver, et diminue en été.

Le rapport entre évaporation et précipitations varie fortement au cours de l'année, l'évaporation représente moins de 20% des précipitations en hiver (en décembre, 15 mm pour l'évaporation contre 79 mm de précipitations), et dépasse largement les 100 % au printemps et en été (une partie de l'eau évaporée est puisée dans le stock du sol), comme en mai avec 100 mm d'évaporation et seulement 60 mm de précipitations.

Le rapport entre drainage et ruissellement fluctue lui aussi pendant l'année. Le drainage est jusqu'à six fois plus important que le ruissellement en hiver (avec par exemple 60 mm en janvier pour 10 mm de ruissellement). En revanche en été le drainage est plus faible que le ruissellement, en septembre par exemple il est deux fois moins important.

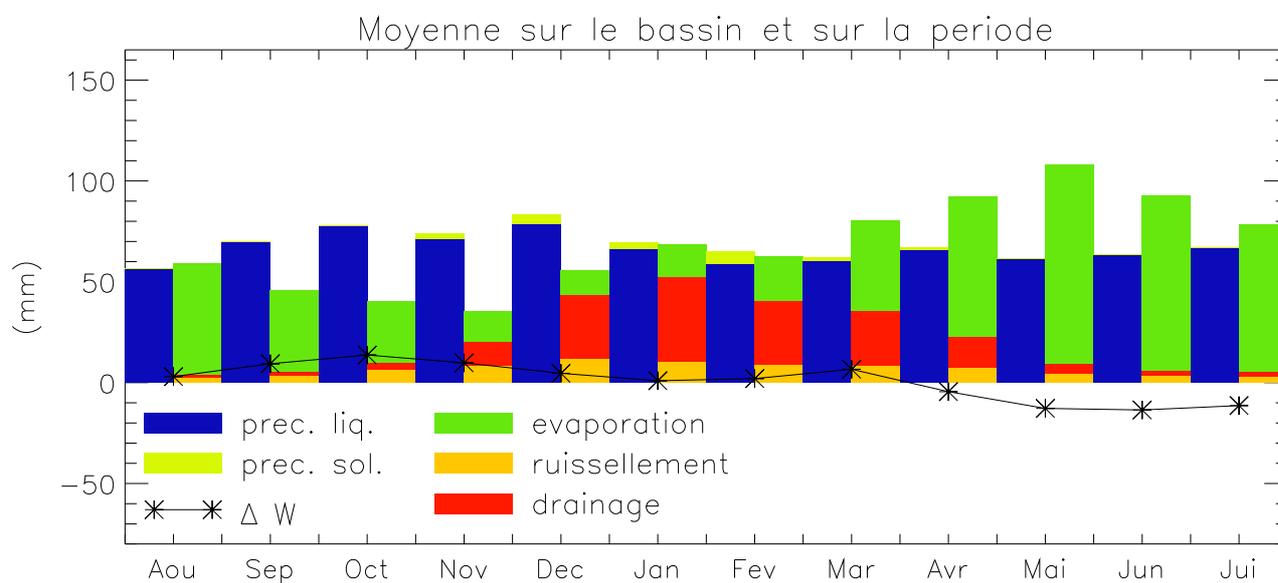


FIG. 4.19 – Bilan hydrique mensuel en moyenne sur le bassin et sur la période

Variabilité interannuelle

Les figures 4.20 et 4.21 présentent les variations interannuelles du bilan hydrique mensuel. On peut remarquer :

- certaines années très sèches comme 89-90 ou 91-92 par exemple sont caractérisées par un drainage extrêmement faible, l'évaporation devient le terme puits principal du bilan ;
- a contrario, pour certaine années très arrosées comme 94-95 ou 00-01 on a un très fort drainage et une forte évaporation au printemps ce qui entraîne un fort destockage ;
- l'évaporation est très liée au stock d'eau dans le sol : ainsi en juillet 97 et en juillet 98 le cumul de pluie est quasiment le même, et pourtant l'évaporation est beaucoup plus forte en 97. Ceci s'explique par le climat des mois précédents : le printemps 97 a été très arrosé et le sol a stocké de l'eau, en revanche le printemps 98 a été beaucoup moins humide et l'évaporation en juillet est limitée par les réserves d'eau du sol.

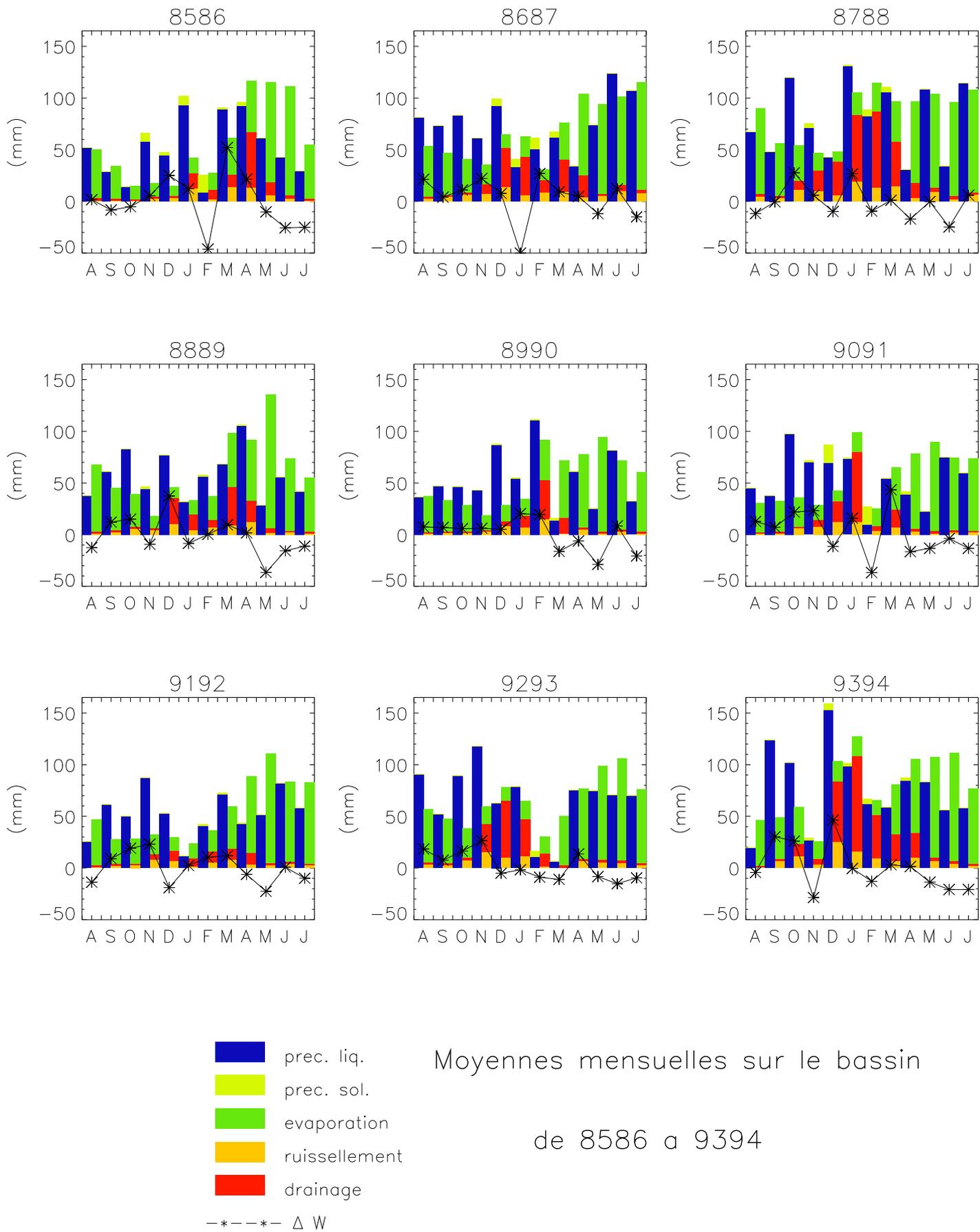


FIG. 4.20 – Bilan hydrique mensuel en moyenne sur le bassin pour chaque année (1)

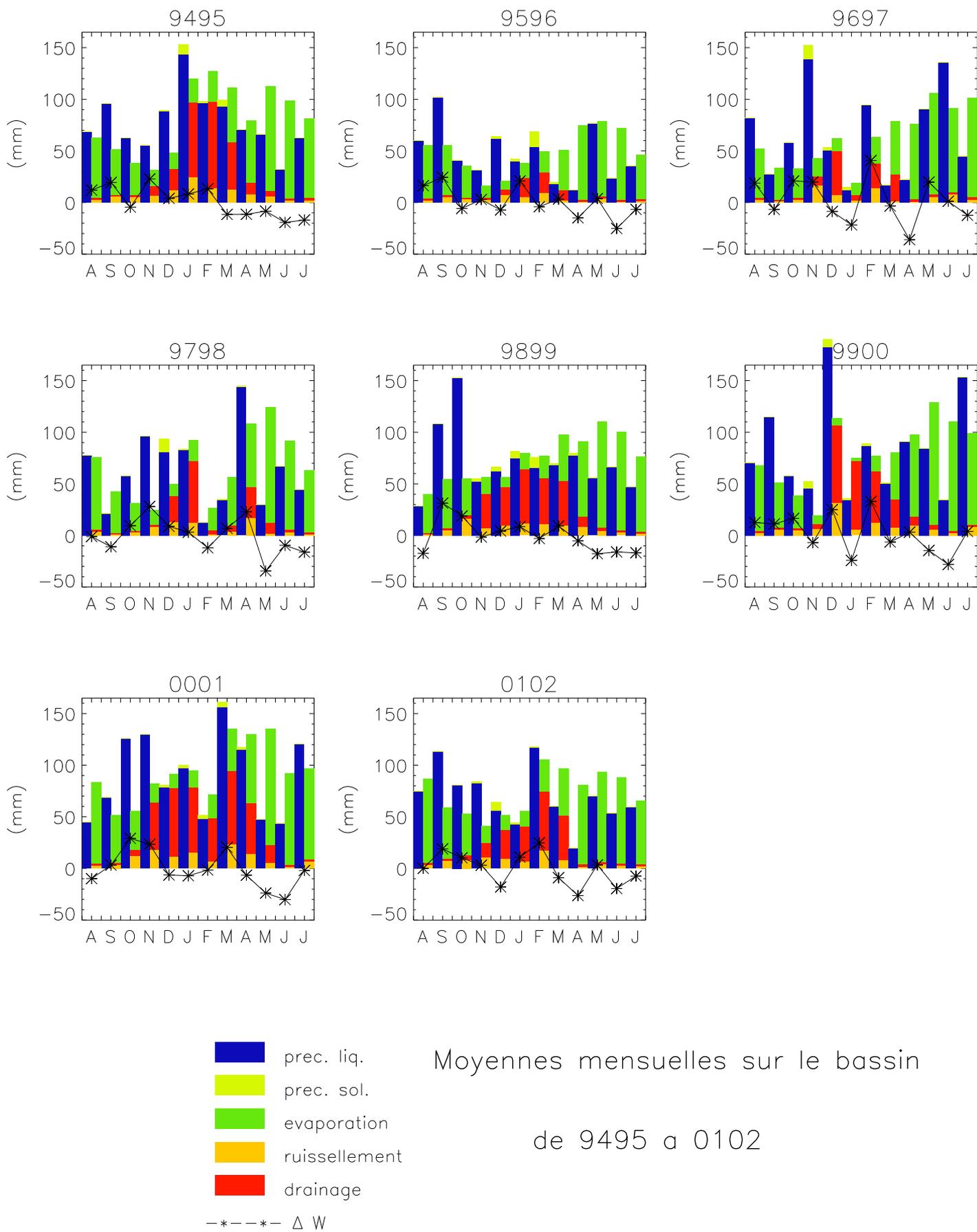


FIG. 4.21 – Bilan hydrique mensuel en moyenne sur le bassin pour chaque année (2)

4.4 Analyse du bilan d'énergie

4.4.1 Variabilité spatiale

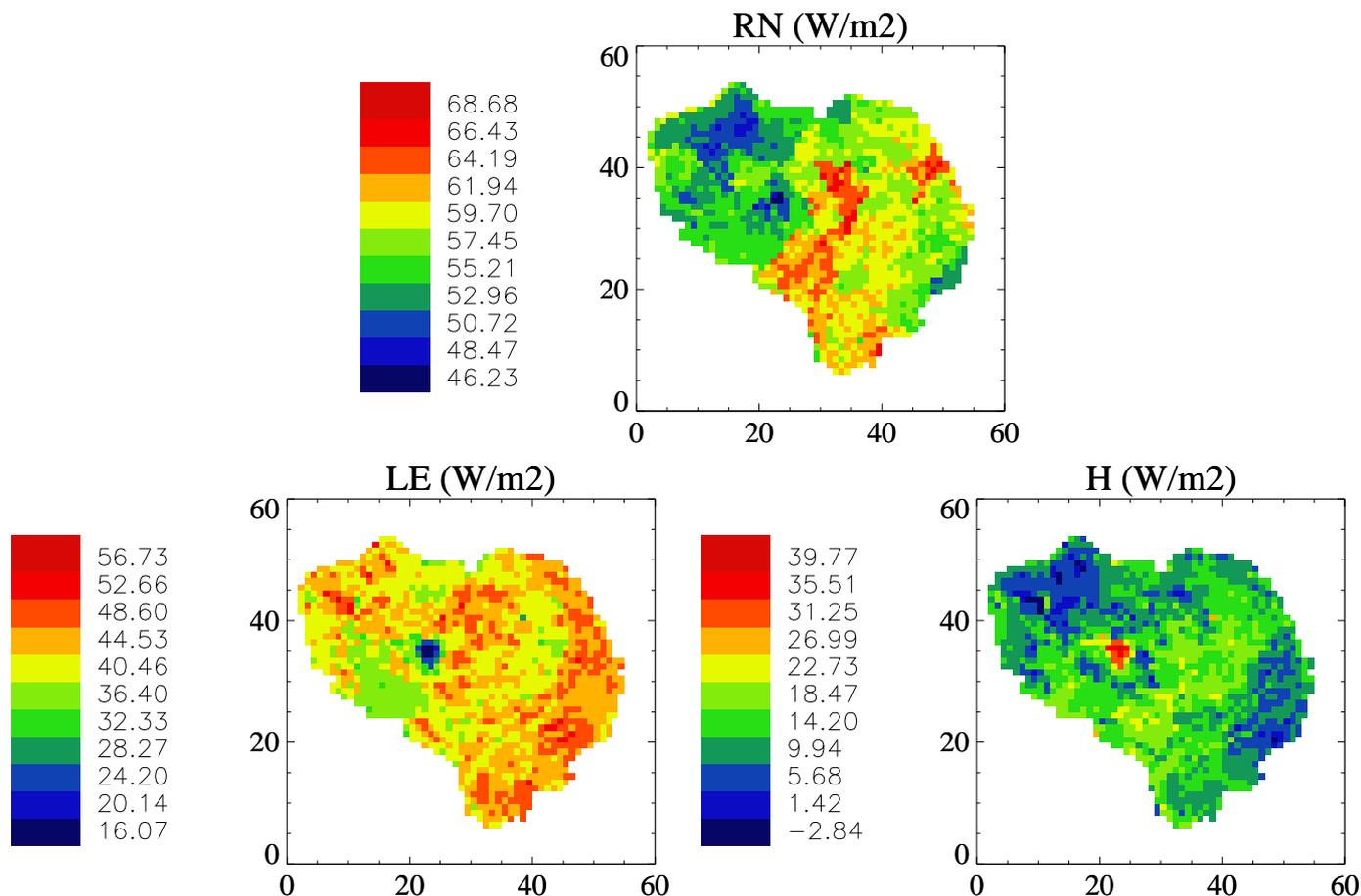


FIG. 4.22 – Cartes de RN , H et LE en moyenne sur la période

Les cartes de la figure 4.22 présentent la répartition spatiale moyenne du rayonnement net (RN), du flux de chaleur latente (LE) et du flux de chaleur sensible (H).

Le rayonnement net varie relativement peu dans l'espace, il est un peu plus faible au nord du bassin et sensiblement plus fort au centre.

Les flux de chaleur sensible et latente varient plus fortement, et sont marqués par l'influence de la ville. En effet le flux de chaleur latente (évaporation) est très faible en Ile-de-France, et le flux de chaleur sensible y est particulièrement élevé.

4.4.2 Variabilité temporelle

La figure 4.23 présente la variabilité saisonnière des termes du bilan d'énergie. On remarque que les variations des flux de chaleurs sensible et latente sont pilotées par le rayonnement net, minimal en hiver et maximal en été.

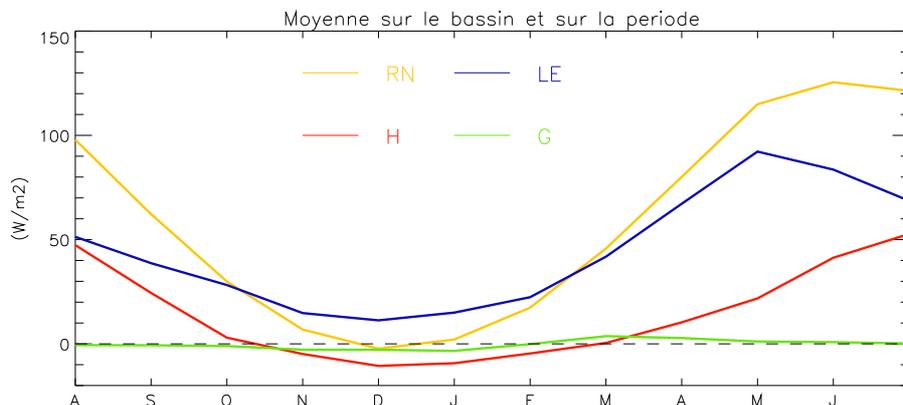


FIG. 4.23 – Bilan d'énergie mensuel en moyenne sur le bassin et sur la période

Les variations interannuelles de ce bilan d'énergie sont représentées sur la figure 4.24.

On peut d'abord noter que le flux de chaleur sensible est négatif presque tous les hivers, ce qui n'est pas surprenant au vu de la latitude du bassin.

Ensuite, on voit apparaître des années pour lesquelles le flux de chaleur latente est limité par le stress hydrique, l'énergie reçue se dissipant en chaleur sensible qui devient prépondérante. C'est particulièrement le cas pour les étés 1989, 1990, 1991 et 1996. En revanche pour les années plus arrosées et sans autant de stress hydrique le flux de chaleur latente reste toujours plus fort que le flux de chaleur sensible.

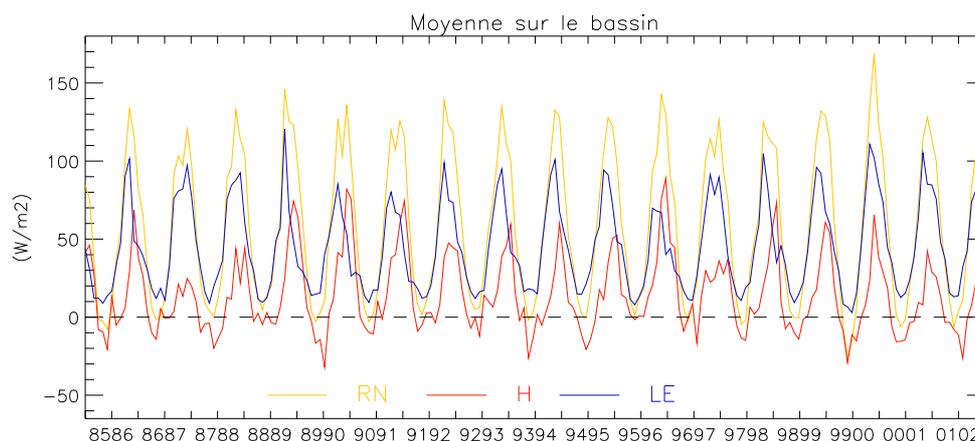


FIG. 4.24 – Evolution du bilan d'énergie mensuel en moyenne sur le bassin

Les mêmes phénomènes avaient globalement pu être constatés sur l'Adour-Garonne ([MOREL 2002]) et le Rhône ([ETCHEVERS 2000]).

4.5 Bilan de la simulation 1985-2002

L'analyse de cette simulation montre que le comportement du système couplé SIM est très satisfaisant sur le bassin de la Seine, avec globalement une bonne restitution des débits notamment sur les plus grands bassins. Ceci nous conduit à nous intéresser plus spécifiquement aux épisodes extrêmes que sont les crues, en particulier celles qui concernent le bassin de la Seine à Paris, et ce dans le but de qualifier la capacité de SIM à reproduire ces événements.

Chapitre 5

Etude des crues de la Seine

5.1 Simulation des crues de la Seine à Paris : les débits

Comme précisé dans le paragraphe 3.2, le temps de concentration utilisé pour cette étude est de 8 jours, ce qui correspond à un temps de transfert pour la Seine à Paris de 7 jours.

L'étude des crues de la Seine à Paris est réalisée sur la période la plus récente pour laquelle des observations sont présentes, soit 1998-2002. Sur ces 4 ans on sélectionne les 9 épisodes de crues les plus fortes. Parmi ces épisodes, le débit dépasse les $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dans 6 cas, d'après les résultats obtenus dans le chapitre 4 un tel événement a une durée de retour de l'ordre de 2 ans environ ; le débit maximal atteint $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dans 2 cas, ce qui se produit en moyenne tous les 10 ans environ. Tous ces épisodes correspondent à des crues lentes dont la durée est de l'ordre du mois.

5.1.1 Quelques exemples de débits de crue simulés et observés

Les graphiques de la figure 5.1 présentent les débits simulés (traits tiretés), observés (traits pleins) et dus au souterrain (traits pointillés) pour quatre épisodes de crues, sans réinitialisation de SIM depuis le 1er août 1985.

Ils montrent que SIM peut restituer de façon très satisfaisante les crues, aussi bien en ce qui concerne le phasage dans le temps du pic de crue qu'en ce qui concerne l'intensité de la crue.

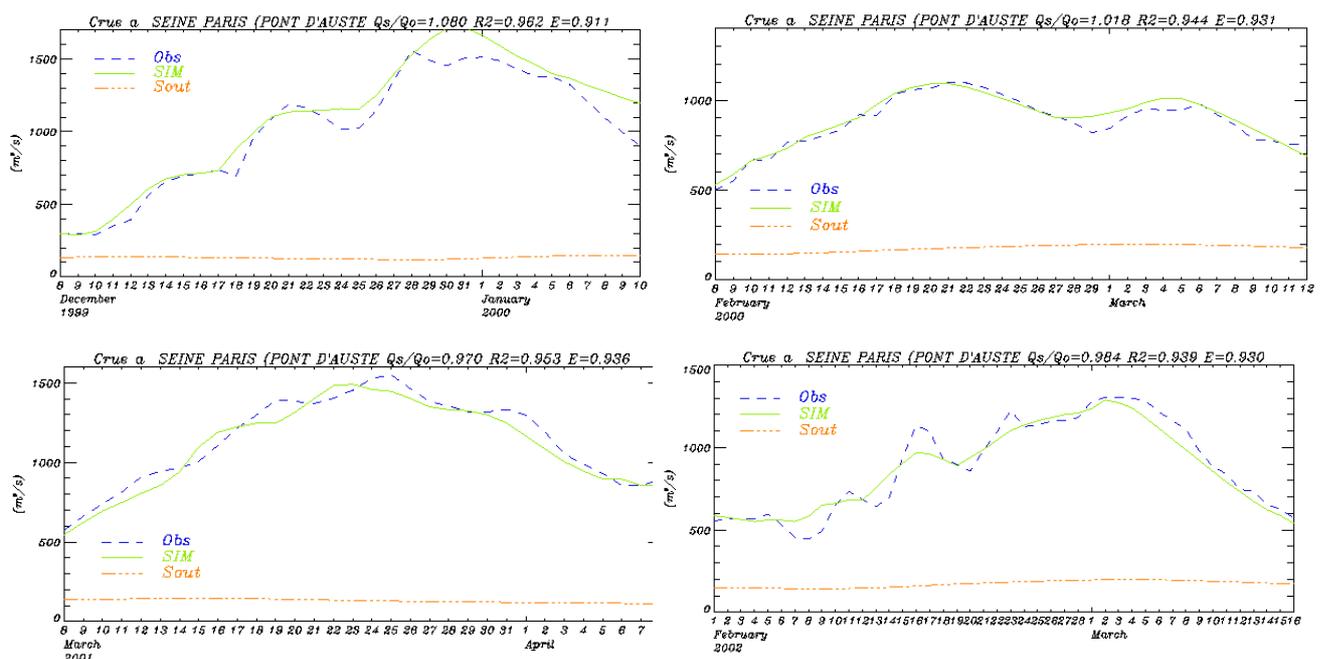


FIG. 5.1 – Débits lors de plusieurs épisodes de crues entre 2000 et 2002

5.1.2 Résultats statistiques

Le tableau 5.1 présente les statistiques (rapport des lames d'eau, coefficient de corrélation au carré et critère de Nash) obtenus pendant les épisodes de crue ainsi que le débit maximal observé.

Crue		$\frac{Q_{sim}}{Q_{obs}}$	R^2	Nash	Débit maximal observé
Dénomination	Date				
9899	20-02-99 / 25-03-99	0.974	0.801	0.761	1300 $m^3.s^{-1}$
9900-1	08-12-99 / 10-01-00	1.080	0.962	0.911	1550 $m^3.s^{-1}$
9900-2	08-02-00 / 12-03-00	1.018	0.944	0.931	1100 $m^3.s^{-1}$
0001-1	19-11-00 / 09-12-00	0.980	0.831	0.683	900 $m^3.s^{-1}$
0001-2	20-01-01 / 25-02-01	1.054	0.868	0.812	900 $m^3.s^{-1}$
0001-3	08-03-01 / 08-04-01	0.970	0.953	0.936	1550 $m^3.s^{-1}$
0102-1	25-11-01 / 21-12-02	0.907	0.883	0.701	870 $m^3.s^{-1}$
0102-2	25-12-01 / 15-01-02	0.721	0.761	0.176	1200 $m^3.s^{-1}$
0102-3	01-02-02 / 16-03-02	0.984	0.939	0.930	1300 $m^3.s^{-1}$

TAB. 5.1 – Scores statistiques et débits maxima observés sur les épisodes de crues de 1998 à 2002

Ce tableau montre que les crues de la Seine sont reproduites par SIM de façon très satisfaisante, avec pour quatre crues des critères de Nash supérieurs à 0.9, soit très bons.

Ce critère est un peu moins bon pour les crues de 9899, 0001-1 et 0001-2, avec respectivement 0.761, 0.683 et 0.812, ce qui reste tout de même de bons scores. En outre le rapport des lames d'eau est très proche de 1 dans chacun de ces cas (0.974, 0.980 et 1.054), ce qui permet de conclure que ces épisodes sont bien simulés.

Seules les deux crues 0102-1 et 0102-2 sont moins bien reproduites par SIM. Malgré des scores statistiques corrects, le pic de la crue 0102-1 est assez largement sous-estimé par SIM (sous-estimation de la lame d'eau de 10 % sur la période). Il en va de même de la crue 0102-2 qui présente des scores relativement médiocres avec un critère de Nash de seulement 0.176 et un rapport des lames d'eau sur la période de 0.721. Ces deux cas sont traités dans le paragraphe 5.3.

5.2 Analyse détaillée des crues de la Seine à Paris

Une étude détaillée a été menée pour chacun des épisodes de crue, les résultats étant globalement similaires (sauf pour les crues 0102-1 et 0102-2), seule l'étude de l'épisode 0102-3 sera complètement détaillée.

5.2.1 Etude détaillée de l'épisode de crue 0102-3 de Février-Mars 2002

Les graphiques 5.2 et 5.3 présentent le déroulement temporel de la crue 0102-3, avec d'une part les débits (simulés, observés et dû au souterrain), et d'autre part le cumul journalier de précipitations, ainsi que de ruissellement et de drainage (en moyenne sur le bassin) tels que simulés par ISBA.

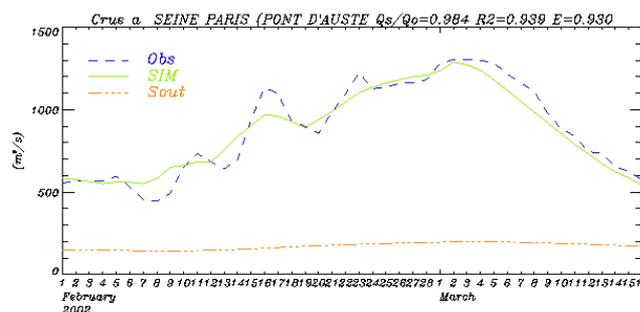


FIG. 5.2 – Débits lors de la crue 0102-3

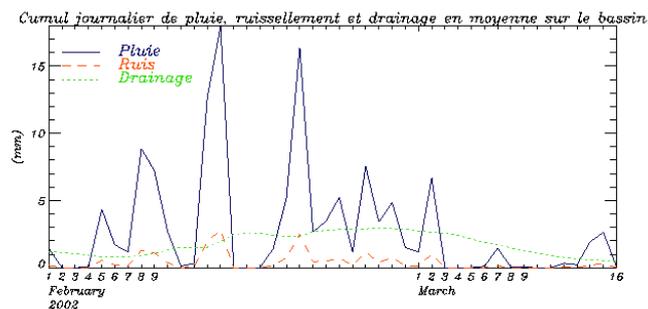


FIG. 5.3 – Pluie, ruissellement et drainage lors de la crue 0102-3

Les figures 5.4 à 5.6 présentent la répartition spatiale du cumul de pluie, de ruissellement et de drainage sur la période de crue, et la carte 5.7 montre la valeur du SWI (Soil Water Index, indice d’humidité dans le sol qui vaut 1 quand la quantité d’eau du sol est égale à la capacité au champ et 0 au point de flétrissement) en début de crue (moyenne sur les trois premiers jours de la période).

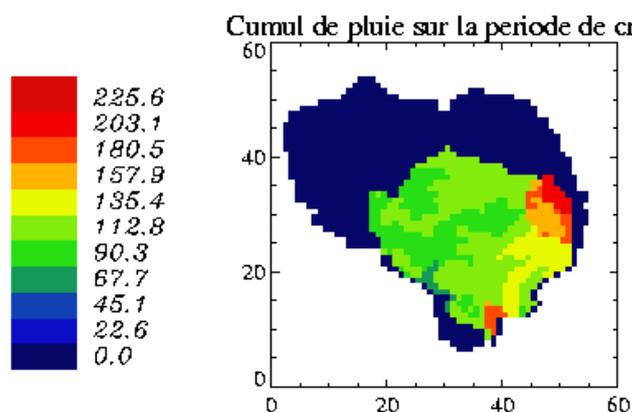


FIG. 5.4 – Cumul de précipitations lors de la crue 0102-3

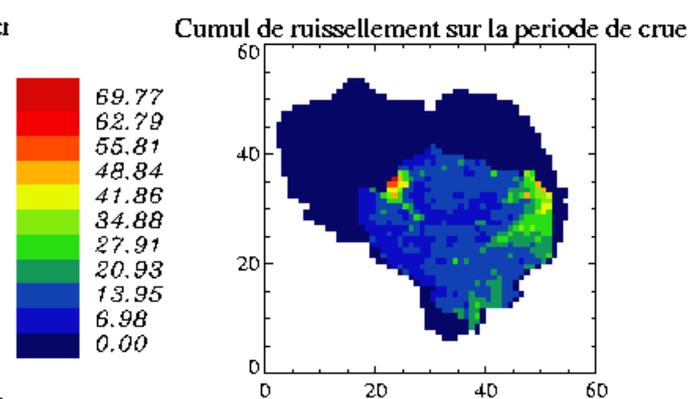


FIG. 5.5 – Cumul de ruissellement lors de la crue 0102-3

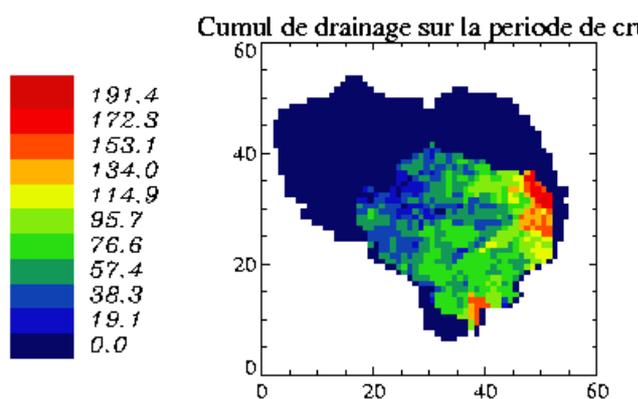


FIG. 5.6 – Cumul de drainage lors de la crue 0102-3

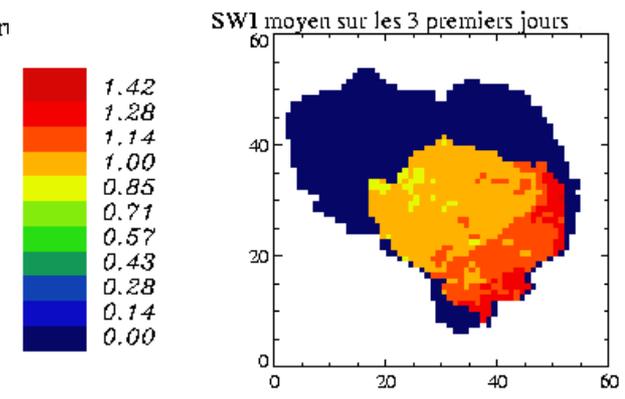


FIG. 5.7 – Répartition spatiale du SWI au début de la crue 0102-3

Pendant les périodes de crues, les pluies sont souvent de relativement faible intensité, par rapport à des pluies orageuses par exemple, néanmoins les épisodes pluvieux s’étalent sur plusieurs jours.

On constate également que les crues surviennent souvent avec un retard par rapport aux pluies de l’ordre de quelques jours (de 4 à 8 jours environ). Ce décalage est fonction à la fois du type d’écoulement (prépondérance d’un écoulement rapide (ruissellement) ou d’un écoulement lent (drainage)) et de la localisation des pluies dans le bassin.

En outre, si le ruissellement se produit logiquement en même temps que les précipitations et présente de nombreux pics, le drainage est quant à lui plus continu pendant ces périodes de crues

et est maximal quelques jours après les précipitations, ce qu'on retrouve sur la figure 5.3.

La partie Est du bassin, où l'altitude est la plus élevée, est la plus pluvieuse. Cette zone correspond en outre à la partie du bassin où il n'y a pas de modélisation explicite des écoulements de nappes. Toute l'eau qui tombe sur cette zone est donc transmise aux rivières, après un éventuel retard lié à un parcours dans le sol, et contribue à la crue de la Seine à Paris en quelques jours (qui correspondent au temps de transfert de 7 jours de la Seine à Paris). On a calculé que 70 % du débit de la Seine à Paris provient de l'écoulement issu de cette région.

En février-mars 2002, les précipitations atteignent 225 *mm* en un mois et demi dans cette partie Est, et sont beaucoup plus faibles ailleurs (figure 5.4). C'est ce qui explique que le drainage et le ruissellement soient sur cette zone beaucoup plus fort que sur le reste du bassin (exceptée l'Ile-de-France, zone urbaine où le ruissellement est très important) (figures 5.5 et 5.6).

Enfin, on constate pour tous les épisodes bien simulés que les précipitations tombent sur un sol relativement humide. La carte 5.7 présente la moyenne du SWI pendant les trois premiers jours de la période. Cet indice est presque partout supérieur ou égal à 1, et il est particulièrement fort dans la partie est du bassin, zone la plus pluvieuse.

Ainsi les crues de la Seine sont liées à des précipitations relativement peu intenses mais étalées dans le temps, et qui tombent en grande partie à l'Est du bassin, sur des sols déjà assez humides. Ces phénomènes sont bien vus par le système SIM puisque les crues sont simulées de façon très satisfaisante pour 7 des 9 crues ayant eu lieu entre 1998 et 2002.

5.2.2 Résultats obtenus pour les autres épisodes de crue de la période

Crue de 9899

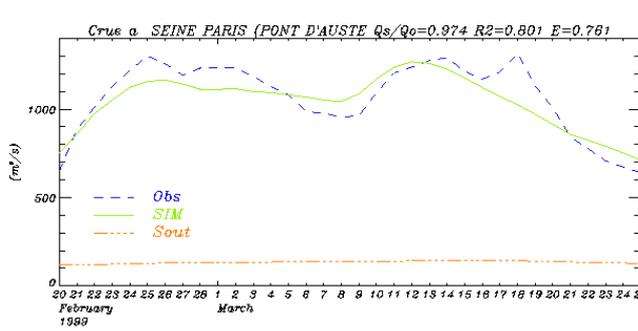


FIG. 5.8 – Débits lors de la crue 9899

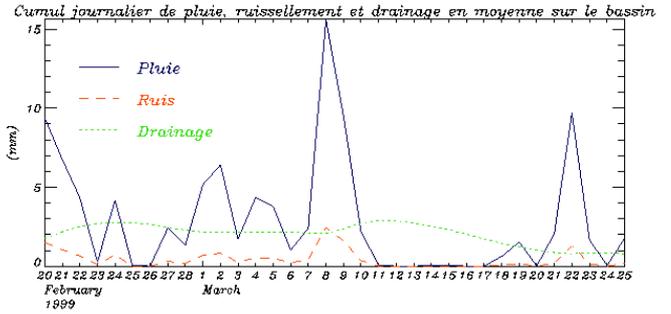


FIG. 5.9 – Pluie, ruissellement et drainage lors de la crue 9899

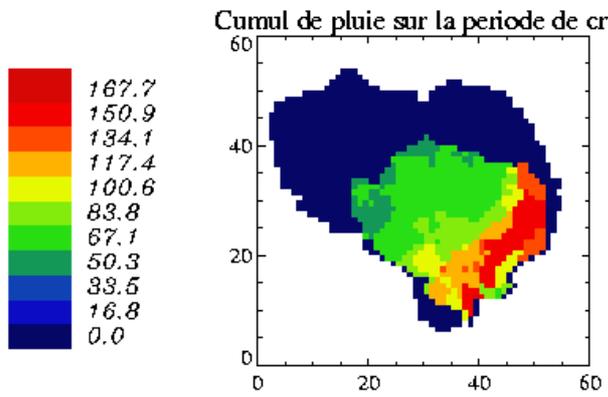


FIG. 5.10 – Cumul de précipitations lors de la crue 9899

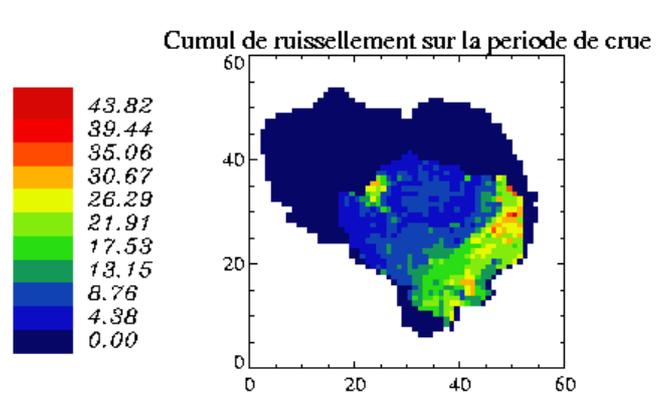


FIG. 5.11 – Cumul de ruissellement lors de la crue 9899

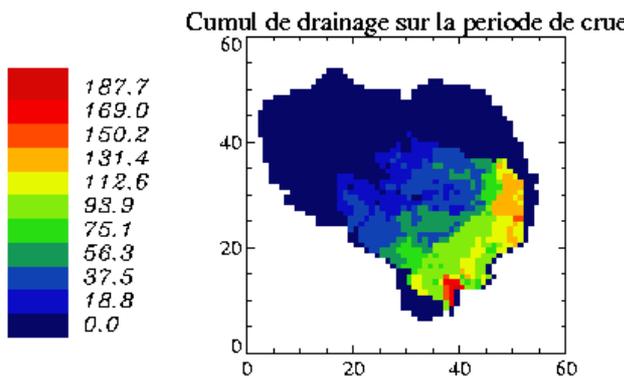


FIG. 5.12 – Cumul de drainage lors de la crue 9899

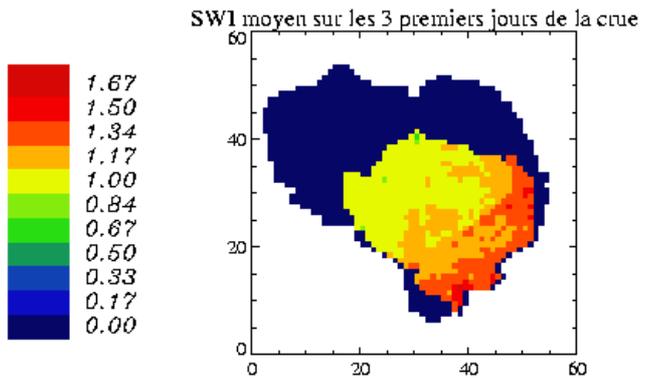


FIG. 5.13 – Répartition spatiale du SWI au début de la crue 9899

Crue de 9900-1

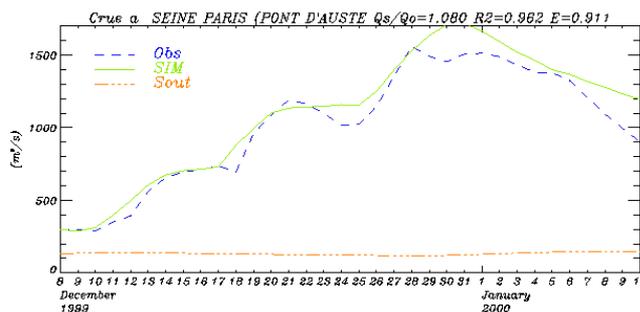


FIG. 5.14 – Débits lors de la crue 9900-1

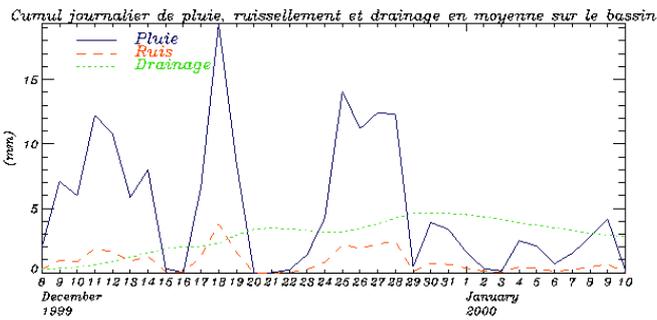


FIG. 5.15 – Pluie, ruissellement et drainage lors de la crue 9900-1

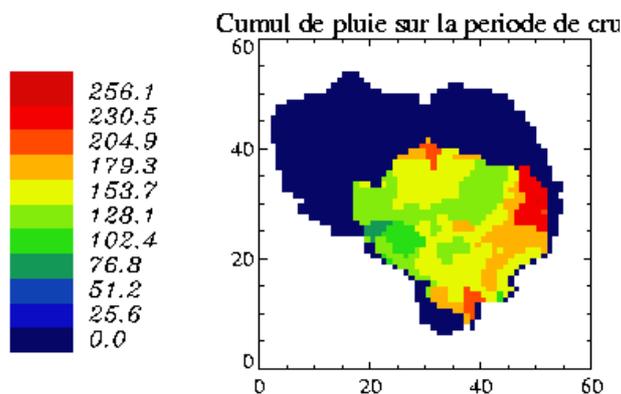


FIG. 5.16 – Cumul de précipitations lors de la crue 9900-1

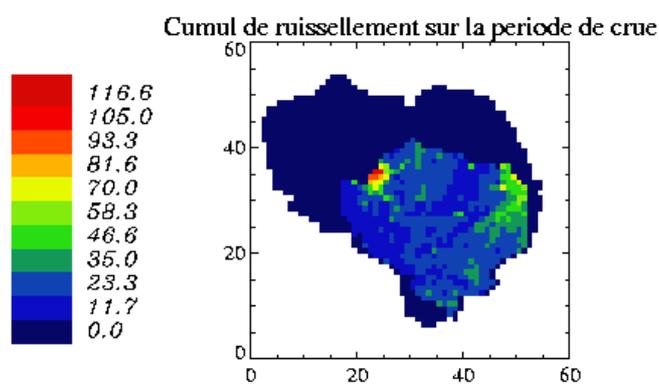


FIG. 5.17 – Cumul de ruissellement lors de la crue 9900-1

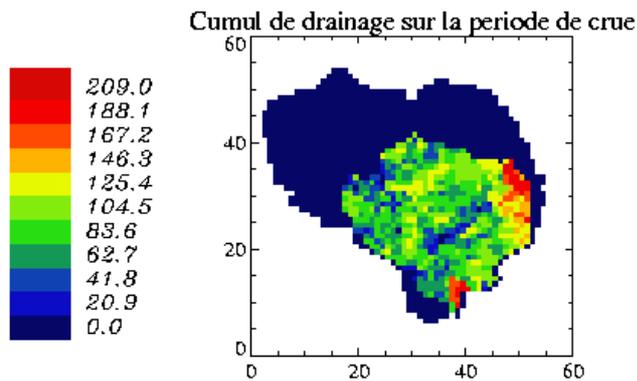


FIG. 5.18 – Cumul de drainage lors de la crue 9900-1

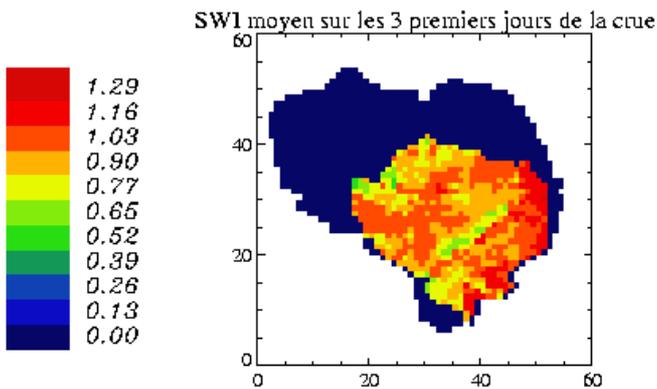


FIG. 5.19 – Répartition spatiale du SWI au début de la crue 9900-1

Crue de 9900-2

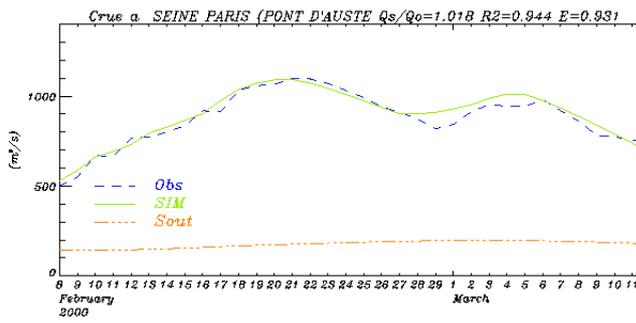


FIG. 5.20 – Débits lors de la crue 9900-2

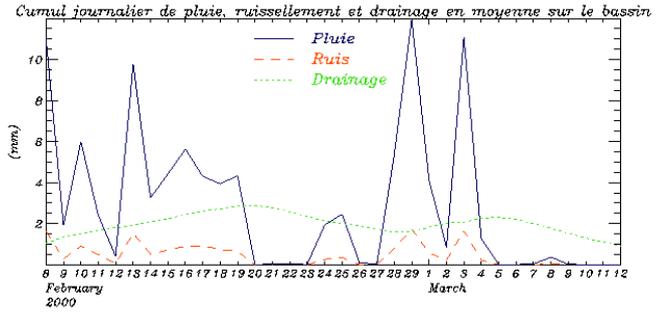


FIG. 5.21 – Pluie, ruissellement et drainage lors de la crue 9900-2

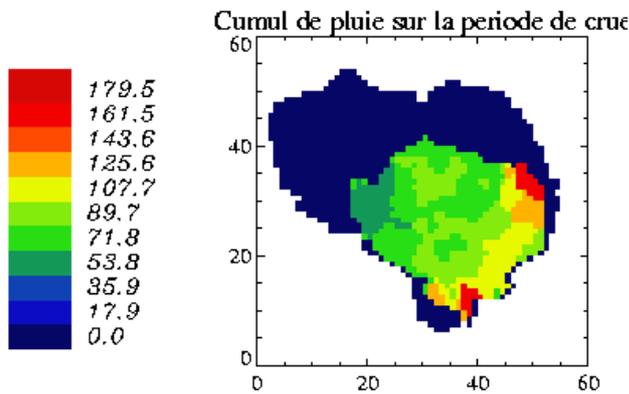


FIG. 5.22 – Cumul de précipitations lors de la crue 9900-2

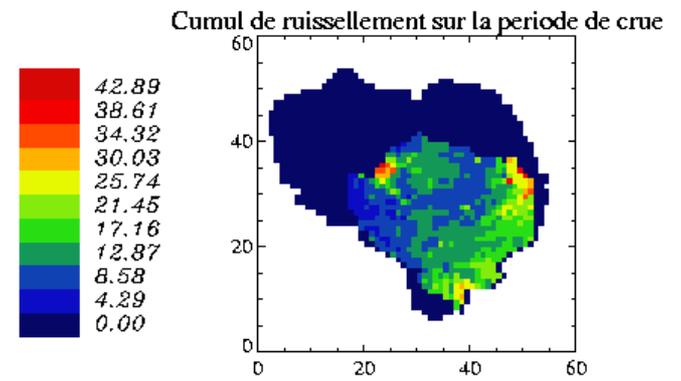


FIG. 5.23 – Cumul de ruissellement lors de la crue 9900-2

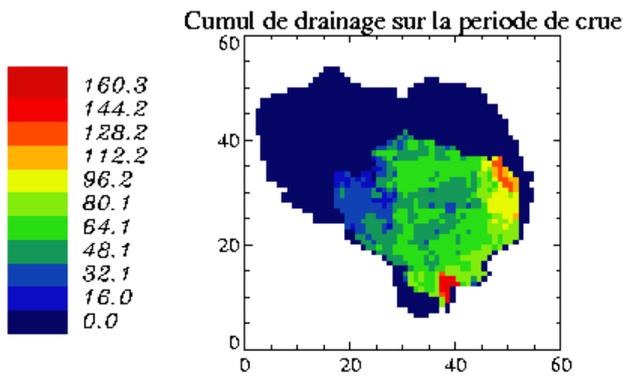


FIG. 5.24 – Cumul de drainage lors de la crue 9900-2

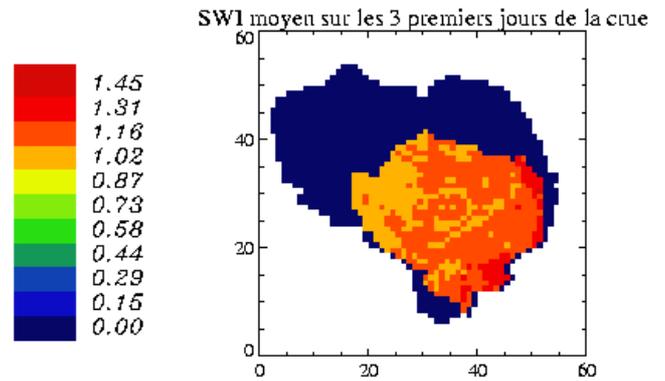


FIG. 5.25 – Répartition spatiale du SWI au début de la crue 9900-2

Crue de 0001-1

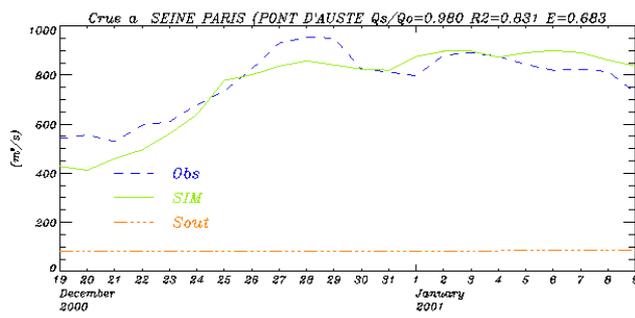


FIG. 5.26 – Débits lors de la crue 0001-1

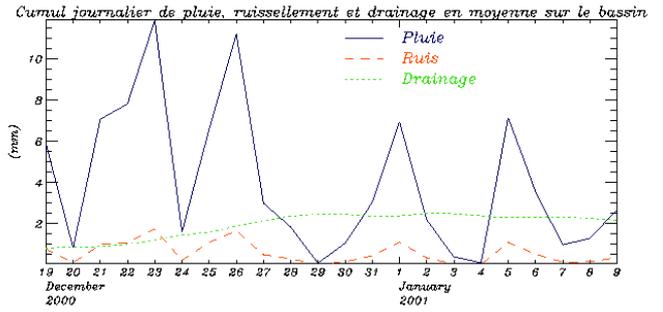


FIG. 5.27 – Pluie, ruissellement et drainage lors de la crue 0001-1

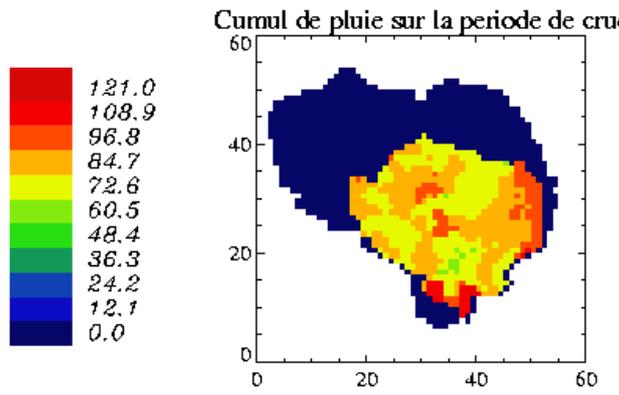


FIG. 5.28 – Cumul de précipitations lors de la crue 0001-1

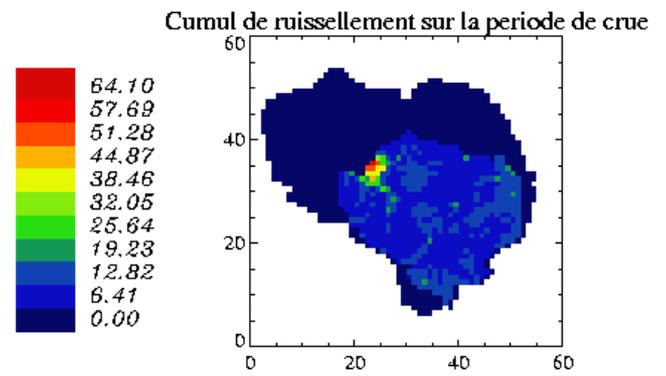


FIG. 5.29 – Cumul de ruissellement lors de la crue 0001-1

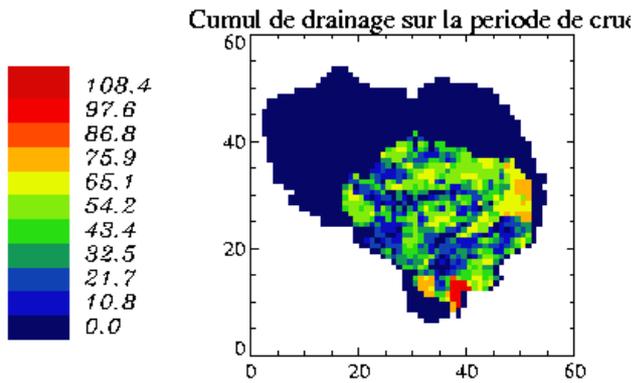


FIG. 5.30 – Cumul de drainage lors de la crue 0001-1

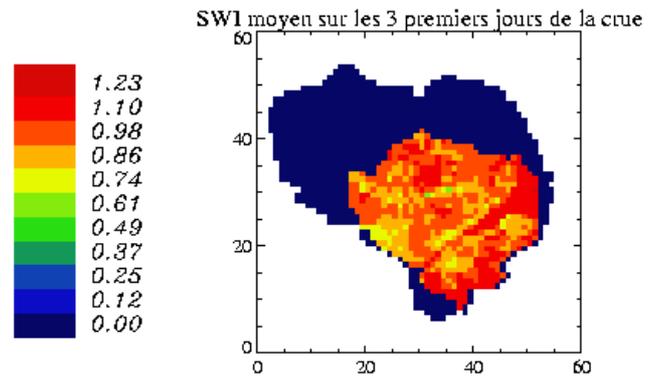


FIG. 5.31 – Répartition spatiale du SWI au début de la crue 0001-1

Crue de 0001-2

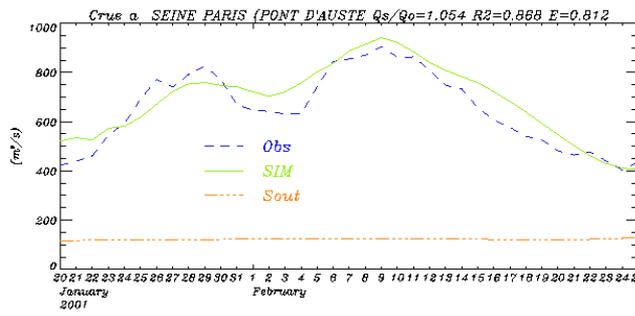


FIG. 5.32 – Débits lors de la crue 0001-2

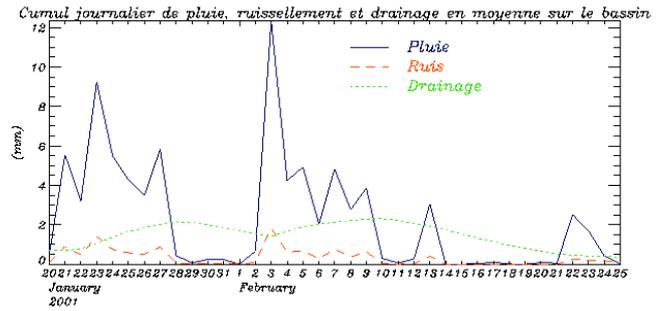


FIG. 5.33 – Pluie, ruissellement et drainage lors de la crue 0001-2

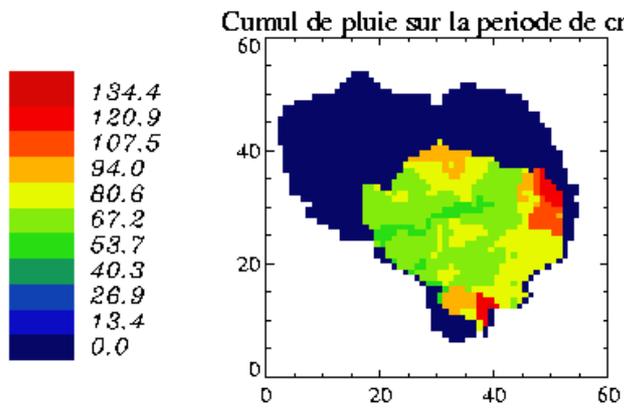


FIG. 5.34 – Cumul de précipitations lors de la crue 0001-2

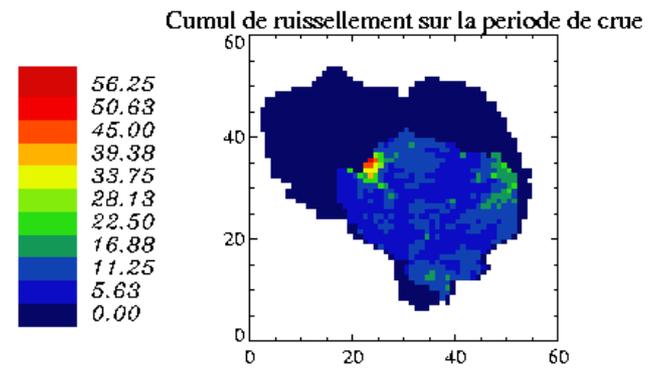


FIG. 5.35 – Cumul de ruissellement lors de la crue 0001-2

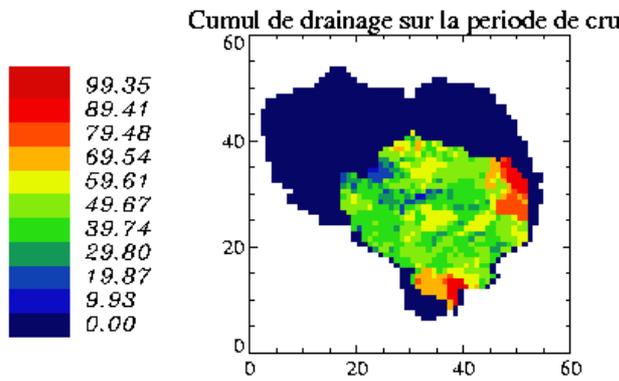


FIG. 5.36 – Cumul de drainage lors de la crue 0001-2

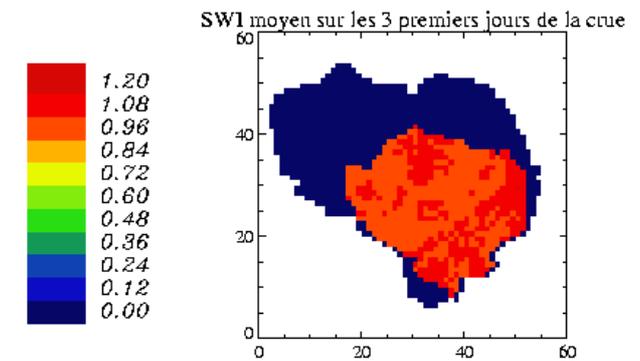


FIG. 5.37 – Répartition spatiale du SWI au début de la crue 0001-2

Crue de 0001-3

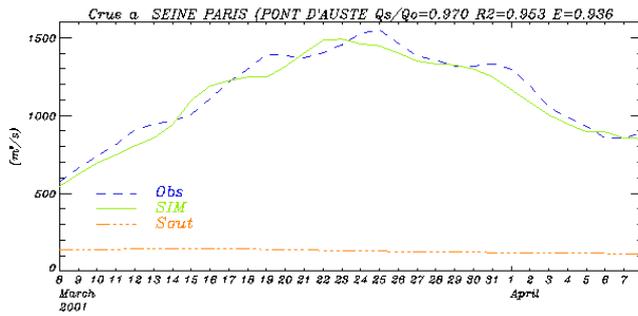


FIG. 5.38 – Débits lors de la crue 0001-3

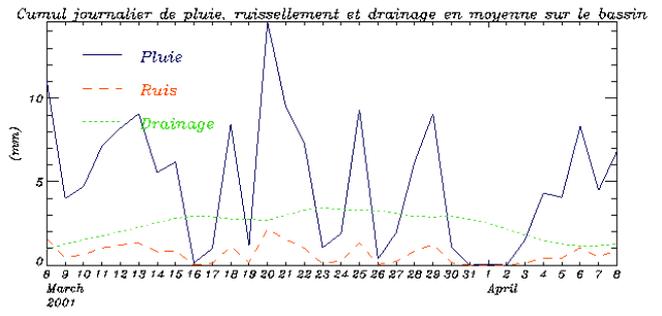


FIG. 5.39 – Pluie, ruissellement et drainage lors de la crue 0001-3

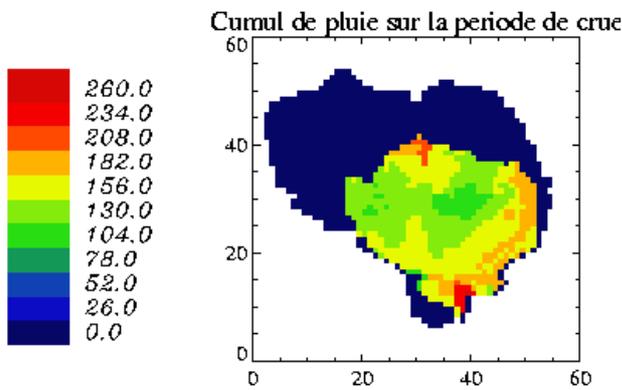


FIG. 5.40 – Cumul de précipitations lors de la crue 0001-3

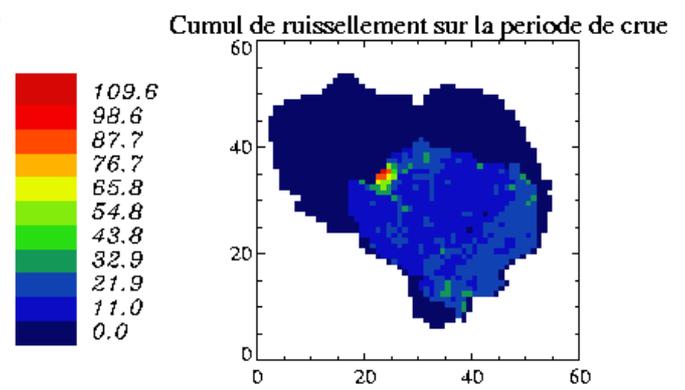


FIG. 5.41 – Cumul de ruissellement lors de la crue 0001-3

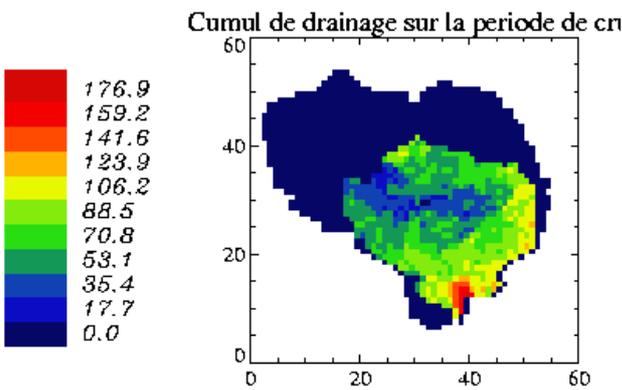


FIG. 5.42 – Cumul de drainage lors de la crue 0001-3

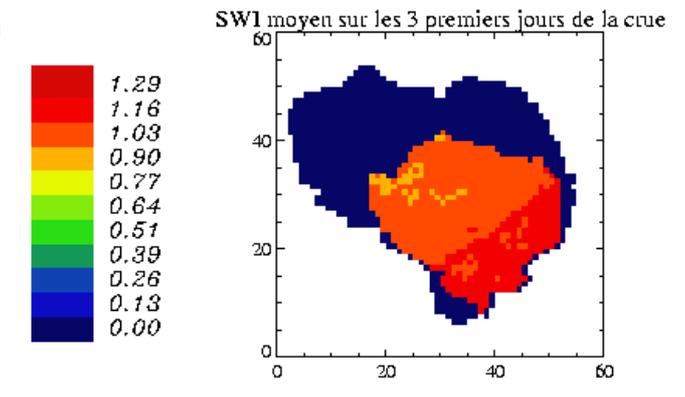


FIG. 5.43 – Répartition spatiale du SWI au début de la crue 0001-3

5.2.3 Rôle du souterrain pendant les périodes de crue

On a vu (paragraphe 4 et carte 5.2) que la contribution du souterrain aux débits de la Seine à Paris est relativement faible et constante (environ $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) lors des périodes de crues.

Mais il apparaît que le souterrain joue un rôle crucial : en effet une partie des précipitations est drainée vers la nappe, qui stocke de l'eau pendant la période de crue et joue ainsi un rôle de tampon.

Sans le souterrain toute cette eau stockée dans la nappe serait ruisselée vers les rivières, ce qui provoquerait une hausse du débit de la Seine à Paris d'en moyenne $540 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ sur toute la période de crue. Par exemple, le débit maximal de la crue de février-mars 2002 serait de $1600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ au lieu de $1300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La figure 5.44 monte le débit qui aurait été atteint lors de la crue de décembre 1999 (9900-1) si le souterrain n'avait pas stocké une partie de l'eau, en particulier le débit maximal aurait été de près de $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ au lieu de $1550 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

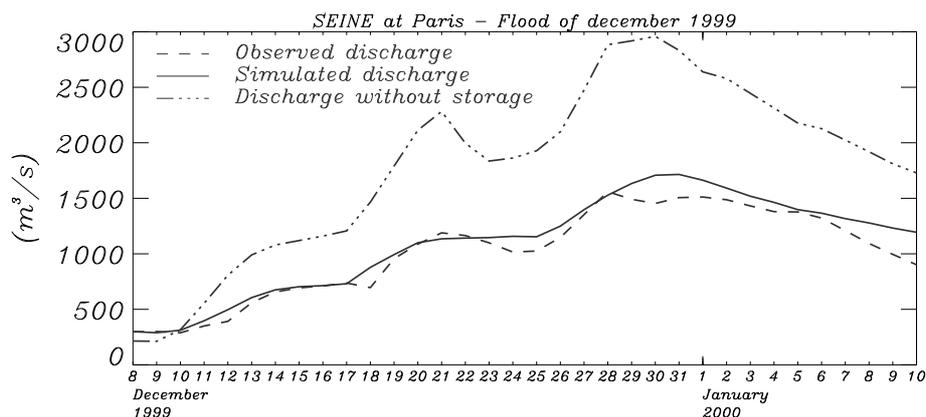


FIG. 5.44 – Débits observés et simulés pendant la crue de décembre 1999, et débit simulé sans stockage d'eau dans le souterrain

Le tableau 5.2 indique ces quantités d'eau et ces débits pour les cinq crues les plus importantes (débit maximal supérieur à $1100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Crue	Débit max. ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Drainage – Ecoulement en rivière \Rightarrow Stockage (10^9 m^3)	Débit suppl. ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
9899	1300	1.27 – 0.40 \Rightarrow 0.87	299
9900-1	1550	2.62 – 0.39 \Rightarrow 2.23	760
9900-2	1100	1.62 – 0.52 \Rightarrow 1.10	376
0001-3	1550	1.82 – 0.36 \Rightarrow 1.46	528
0102-3	1300	1.82 – 0.65 \Rightarrow 1.17	307

TAB. 5.2 – Débit maximal observé, quantité d'eau drainée vers la nappe, quantité fournie par la nappe à la rivière et quantité stockée par le souterrain sur cinq périodes de crue et débit supplémentaire (moyen sur la période de crue) qui serait engendré sans le souterrain

Cette étude permet une validation supplémentaire du souterrain, en effet si le système SIM ne simulait pas correctement ce rôle de tampon du souterrain, les crues ne pourraient pas être reproduites de façon satisfaisante.

Ainsi, en stockant une partie des précipitations, le souterrain permet "d'amortir" la crue en diminuant son intensité et donc sa dangerosité.

5.3 Cas des crues de décembre 2001 et janvier 2002

Les graphiques 5.45 et 5.46 présentent les débits mal simulés des crues 0102-1 (décembre 2001) et 0102-2 (janvier 2002).

On constate une sous-estimation de l'intensité de la crue par le modèle (de 25 % en janvier et de 30 % en décembre), néanmoins le phasage temporel est satisfaisant.

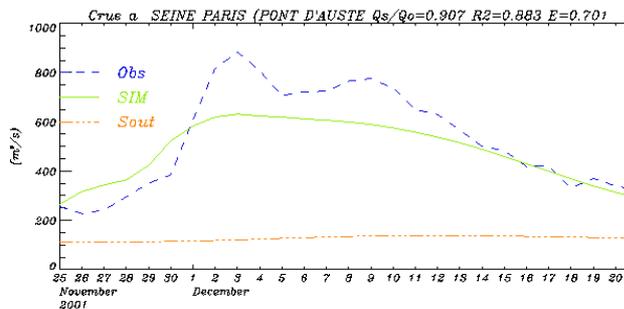


FIG. 5.45 – Débits de la crue 0102-1 (décembre)

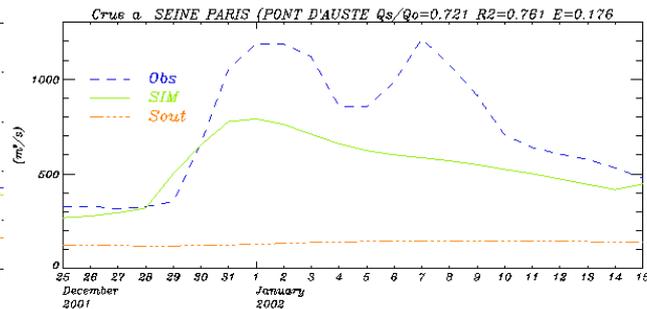


FIG. 5.46 – Débits de la crue 0102-2 (janvier)

Dans ces deux cas, la répartition des pluies et leur intensité est semblable à celles des autres crues de même intensité.

En revanche, on remarque que dans la partie sud du bassin, le sol est moins humide que sur le reste du domaine, et aussi moins humide que dans les autres cas de crues. On constate sur la carte 5.47 qu'au début de la crue de décembre le SWI est de seulement 0.6 environ dans le sud, les pluies qui tombent alors pendant la période sont stockées dans le sol, et au début du mois de janvier (carte 5.48) le SWI est remonté à 0.8 environ, ce qui reste quand même assez faible.

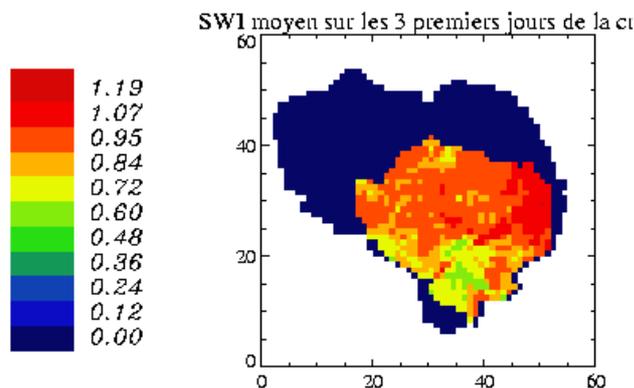


FIG. 5.47 – SWI au début de la crue de décembre

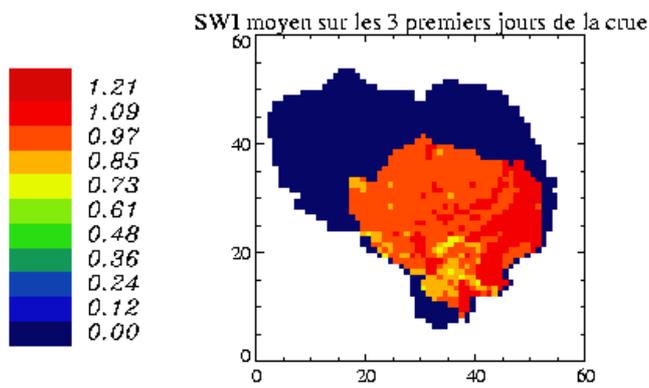


FIG. 5.48 – SWI au début de la crue de janvier

A cause du stockage des précipitations dans le sol, le drainage et le ruissellement sont faibles, ce qui explique peut-être la sous-estimation des crues de décembre et janvier.

L'automne et le début de l'hiver 2001 sont relativement peu pluvieux (en particulier décembre et janvier), et l'automne relativement doux. En octobre l'évaporation est au-dessus de la moyenne de ce mois, ce qui pourrait contribuer à assécher le sol. L'évaporation pourrait être surestimée, notamment par le fait que le cycle annuel de la végétation imposé dans le modèle ne correspond peut être pas tout à fait aux conditions de cette année là (surestimation de l'indice foliaire par exemple).

5.4 Bilan

Cette étude des crues de la Seine à Paris a mis en évidence la capacité de SIM à reproduire ces épisodes de façon très satisfaisante dans la plupart des cas, avec une bonne simulation aussi bien de l'intensité de la crue que de son phasage temporel, ce qui se traduit par de très bons scores statistiques. Pour seulement quelques épisodes la crue est moins bien reproduite, avec une sous-estimation de 10 à 30 % du débit maximal, mais on peut conclure que **SIM semble être un outil adapté à la simulation des crues lentes du bassin de la Seine.**

Synthèse et perspectives

Cette partie de ma thèse avait pour objectif la modélisation du cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant de la Seine, en utilisant le système couplé SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU). Dans ce bassin qui concentre 25 % de la population française et 1/3 de la production industrielle et agricole, la pression sur l'eau est considérable. De ce fait, les aléas climatiques, avec les risques de sécheresse et d'inondation, peuvent avoir des conséquences dramatiques. C'est pourquoi la mise en place d'une modélisation intégrée du bassin versant de la Seine est importante.

Le système SIM, après avoir été testé avec succès sur les bassins du Rhône et de l'Adour-Garonne, a été pour la première fois étendu au bassin de la Seine. Ce bassin se distingue des précédents à cause du faible rôle du relief, du taux d'urbanisation très fort et de l'étendue et de la complexité du souterrain (3 aquifères principaux modélisés).

En utilisant les données météorologiques reconstituées par SAFRAN à l'aide d'observations et d'analyses de modèle, ISBA calcule des lames d'eau évaporée, ruisselée et drainée, au pas de temps de 5 minutes. Ces données sont cumulées sur la journée pour que MODCOU réalise une simulation des débits et des niveaux des nappes.

La reconstitution du forçage atmosphérique par SAFRAN a été réalisée sur une durée de 17 ans au pas de temps horaire et à la résolution de 8 km, et l'analyse de ces paramètres météorologiques a constitué la première phase de ce travail. On a pu vérifier la faible variabilité dans l'année des précipitations (il pleut en moyenne presque autant en été qu'en hiver), en revanche sa variabilité inter-annuelle est très marquée, avec des années très pluvieuses et d'autres très sèches, et des répartitions des précipitations dans l'année très contrastées. Les autres paramètres météorologiques ont des variations moins importantes, mais subissent l'influence du régime des précipitations.

Diverses améliorations du système ont été mises en place. On a constaté des décalages temporels entre les crues observées et simulées par SIM, liés à des problèmes dans les transferts de MODCOU. Le découpage en zones isochrones du bassin ne permet pas de faire varier la vitesse d'écoulement dans le temps, or on sait que la vitesse moyenne du courant varie de 2 km.h⁻¹ à 7 km.h⁻¹. L'idéal serait à terme l'utilisation d'un transfert de surface dynamique (vitesse d'écoulement variable, en fonction du débit) en remplacement du système de zones isochrones, une telle évolution est en projet au CG/ENSMP. Dans ce travail, le temps de concentration a été optimisé pour améliorer le phasage temporel des crues simulées et observées. Pour la simulation sur la période 1985-2002, on a choisi un temps de concentration de 12 jours qui conduit globalement à de bons résultats. En revanche pour l'étude plus fine des crues de la Seine à Paris on a utilisé un temps de 8 jours plus adapté aux crues.

Pour la première fois dans une modélisation d'un grand bassin, les zones urbaines ont été traitées explicitement grâce à l'utilisation du schéma de ville TEB. On a mis en évidence un impact globalement faible sur les débits à l'échelle de l'ensemble du bassin versant où la fraction d'urbanisation vaut seulement 2 %. Cependant l'impact est non négligeable sur les sous-bassins très urbanisés où l'adjonction de TEB améliore les simulations des débits. L'effet de la prise en compte explicite des villes est nettement plus sensible pour les bilans d'eau et d'énergie (en particulier, faible évaporation urbaine et flux de chaleur sensible élevé).

Le système étant ainsi mis en place et optimisé, la simulation sur la période 1985-2002 a été réalisée et analysée, en terme de débits pour une validation indirecte puis en terme de bilans.

En particulier, l'analyse des débits simulés et observés a montré un bon comportement de la chaîne SIM malgré la complexité du domaine souterrain, avec de bons scores statistiques dans un

grand nombre de stations de mesures, notamment celles qui correspondent aux plus grands bassins. En effet, parmi les stations drainant une surface supérieure à 1000 km^2 , 84 % ont un critère de Nash supérieur à 0.5 et 54 % dépassent 0.7. Pour la Seine à Poses (exutoire du bassin), le critère de Nash vaut 0.87 (soit très bon). En outre, la quantité d'eau qui s'écoule sur le bassin à l'échelle de l'année est bien reproduite par le modèle puisque le rapport des lames d'eau annuelles (simulée sur observée) vaut 0.98 à Poses et est compris entre 0.9 et 1.1 dans la moitié des stations correspondant à une surface supérieure à 1000 km^2 .

La simulation du comportement des nappes a en outre permis de suivre l'évolution annuelle des réserves en eau souterraine en fonction du régime de précipitations pendant les 17 années simulées, on a constaté en particulier que le souterrain emmagasine de l'eau 5 années sur 17 (les années pluvieuses) et en perd les 12 autres années (les années moins arrosées), et que globalement la quantité d'eau stockée dans le souterrain diminue entre 1985 et 2002.

L'analyse de bilan hydrique d'ISBA a montré que le rapport évaporation sur précipitation est en moyenne égal à 0.7 (soit un peu plus fort que sur les bassins du Rhône et de l'Adour-Garonne), mais varie dans l'année (de 0.2 en hiver à plus de 1 au printemps) et d'une année sur l'autre. Le drainage est en moyenne 2.3 fois plus important que le ruissellement, il suit lui aussi un cycle annuel, avec un minimum en été et un maximum en hiver. On a également constaté que le bilan d'énergie varie au long de la simulation, par exemple les années sèches le flux de chaleur latente est limité par le stress hydrique et le flux de chaleur sensible devient prépondérant.

Enfin, la dernière partie de ce travail de modélisation hydro-météorologique du bassin de la Seine a consisté à analyser les épisodes de crues de la Seine à Paris ayant eu lieu entre 1998 et 2002. Elle a mis en lumière la capacité de SIM à reproduire ces événements, avec des débits de crues très bien simulés, tant au niveau du débit maximal observé que du phasage temporel du pic de crue, ce qui se traduit par des scores statistiques très satisfaisants. SIM se révèle être un outil adapté à la simulation des épisodes de crues lentes.

Seules deux crues sur neuf ont été nettement sous-estimées par SIM. Ces crues se produisent relativement tôt (fin d'automne), sur un sol partiellement sec. La cause de l'erreur est encore mal connue, mais pourrait être une sur-estimation de l'évaporation durant les mois précédents, liée à une prescription mal adaptée des paramètres de végétation qui sont reconduits à l'identique d'une année sur l'autre dans SIM (données de l'année 2000). On pourrait améliorer le système, soit en utilisant des paramètres dérivés de satellites pour l'année en question, soit en utilisant la version ISBA-Ags qui calcule la photosynthèse et la croissance de la végétation. Néanmoins, le travail de D. Arcos ([ARCOS 2004]) a montré un faible impact sur les débits et les bilans de l'utilisation de paramètres issues des données satellitaires de l'année réelle.

En outre, on a mis en lumière le rôle crucial joué par le souterrain pendant les épisodes de crues. Une partie des précipitations est drainée dans la nappe, ce qui permet d'atténuer l'intensité des crues. On a en effet constaté que si cette eau n'était pas stockée par le souterrain, les débits des périodes de crues augmenteraient fortement, de $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à plus de $700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (soit une multiplication par 1.5 du débit) sur un mois environ. Cette eau est restituée en été, permettant de soutenir à 80 % environ les débits d'étiage.

Ce travail de modélisation hydro-météorologique du bassin de la Seine a fait l'objet d'une publication dans le *Journal of Geophysical Research* ([ROUSSET et al. 2004]). De plus, il a été récompensé du prix de l'AAM 2004 (Association des Anciens de la Météorologie) et un article a été publié dans la revue *Arc-En-Ciel* de l'association ([ROUSSET 2004]).

L'anticipation des crues de la Seine est capitale en raison des dégâts sur les infrastructures qu'elles peuvent occasionner et du danger qu'elles représentent pour les personnes. Les résultats encourageants de cette dernière étude conduisent à la perspective d'utiliser la chaîne SIM pour la prévision de ces crues lentes, en utilisant non plus des champs météorologiques reconstitués par SAFRAN, mais des prévisions issues des modèles de prévision numérique météorologiques, à plusieurs jours d'échéance (partie IV).

Quatrième partie

Prévision d'ensemble des débits

Chapitre 1

Les prévisions d'ensemble : une présentation

1.1 Introduction

Il y a quelques décennies, l'augmentation fulgurante des moyens informatiques, l'arrivée de données satellitaires, ainsi que l'amélioration des modèles de prévision numérique, ont conduit à un grand optimisme quant aux avancées attendues en matière de prévision météorologique. Cependant, la qualité des prévisions météorologiques ne s'est pas améliorée autant qu'espéré. La question s'est alors posée de l'existence de limites dans la prévisibilité de l'état de l'atmosphère.

Ce problème n'est pas nouveau, déjà au début du 20^{ème} siècle Poincaré en avait l'intuition, sans en avoir de preuve mathématique :

Pourquoi les météorologistes ont-ils tant de peine à prédire le temps avec quelque certitude ? Pourquoi les chutes de pluie, les tempêtes elles-mêmes nous semblent-elles arriver au hasard, de sorte que bien des gens trouvent tout naturel de prier pour avoir la pluie ou le beau temps, alors qu'ils jugeraient ridicule de demander une éclipse par une prière ? [...] un dixième de degré en plus ou en moins en un point quelconque, le cyclone éclate ici et non plus là, et il étend ses ravages sur des contrées qu'il aurait épargnées. Si on avait connu ce dixième de degré, on aurait pu le savoir d'avance, mais les observations n'étant ni assez serrées, ni assez précises, et c'est pour cela que tout semble dû à l'intervention du hasard. ([POINCARÉ 1908])

Cette idée a par la suite été confirmée par de nombreux travaux, et d'abord par ceux de Lorenz ([LORENZ 1963]).

Le système océan-atmosphère-surfaces continentales est un système très complexe, qui combine des processus lents et rapides, de grande et de petite échelle. Ces derniers peuvent sembler d'impact faible sur de courtes durées et à moyenne échelle, mais ils peuvent à plus longue échéance influencer très fortement l'évolution de l'atmosphère.

Etant donné la nature chaotique de l'atmosphère, des petites erreurs dans l'état initial vont rapidement s'amplifier. Ces erreurs auront d'autant plus d'impact sur la prévision que les phénomènes prévus seront de petites tailles, la prévisibilité d'un phénomène est donc à la fois fonction de l'échéance de la prévision et de l'échelle du phénomène. A moyenne échéance (au delà de 3 ou 4 jours), les phénomènes de méso-échelle, voire d'échelle synoptiques, ne sont plus prévisibles.

Dans le cadre de la prévision météorologique, plusieurs facteurs sont à l'origine de l'incertitude des prévisions.

Même si les modèles numériques ont considérablement évolué au cours de ces dernières décennies, les approximations et paramétrisations physiques qui existent dans les modèles, ainsi que leur résolution, sont sources d'incertitude.

Néanmoins, la principale source d'incertitude se trouve dans l'erreur d'analyse. En effet, l'état initial de l'atmosphère est connu avec peu de précision. 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. Dans ce dernier domaine des progrès sont faits grâce aux informations satellitaires, malgré tout celles-ci sont encore limitées par exemple par la présence de nuage, et ne donnent pas d'information sur l'ensemble des paramètres.

La combinaison des facteurs d'erreur modèle et d'erreur sur l'état initial fait qu'à partir de situations initiales très proches, on peut obtenir des prévisions très différentes. Une telle divergence devient importante à partir d'une certaine échéance et rend inefficace la simple prévision météorologique déterministe à moyen terme. Aujourd'hui, ce genre de prévision est statistiquement fiable jusqu'à 6 ou 7 jours. Mais cette échéance peut varier selon les différentes situations météorologiques : une prévision peut être fautive à partir de 4 jours alors qu'une autre peut garder une information utile jusqu'à 10 jours ([CANDILLE 2003]).

Pour tenir compte de ce problème de la prévisibilité du temps à moyen terme, on peut se tourner vers les prévisions probabilistes, et plus particulièrement vers les systèmes de prévision d'ensemble. Ainsi, on ne fournit plus une unique prévision déterministe qui risque, à moyenne échéance, de diverger par rapport à la réalité, mais plusieurs scénarios plus ou moins probables de l'évolution de l'atmosphère.

Le principe des prévisions d'ensemble est représenté sur la figure 1.1.

On part de situations initiales très proches, comme représenté sur la figure de gauche : l'état initial réel (représenté par un point rouge), l'analyse opérationnelle (point vert), et un certain nombre d'autres états initiaux proches (ronds gris).

Les prévisions réalisées à partir de ces états initiaux ne vont pas toutes nécessairement dans la même direction, et peuvent conduire à des états de l'atmosphère très éloignés les uns des autres. La figure de gauche montre la divergence entre la trajectoire réelle (trait rouge) et les trajectoires issues de l'analyse opérationnelle (=prévision déterministe, trait vert) et des autres états initiaux.

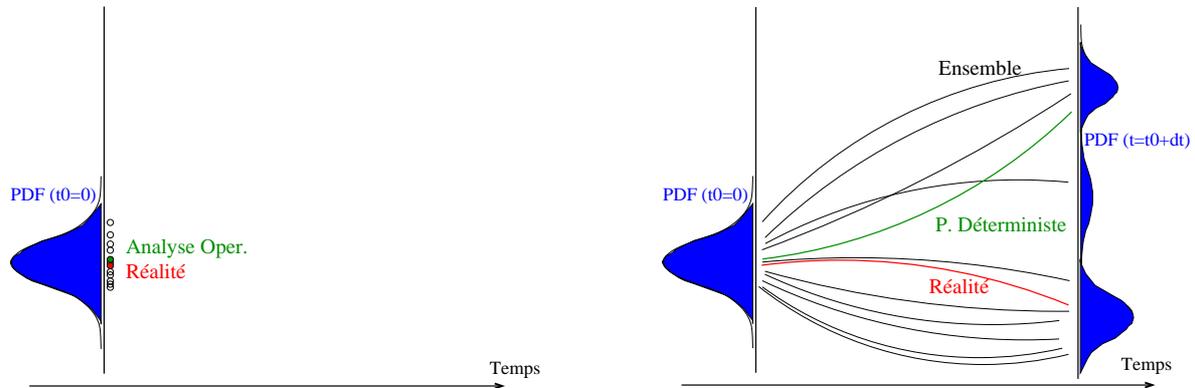


FIG. 1.1 – Schéma représentant des prévisions de l'évolution de l'atmosphère faites à partir de situations initiales très proches.

Les différentes méthodes pour produire ces prévisions d'ensemble météorologiques sont décrites dans le paragraphe suivant.

1.2 Différents types de prévisions d'ensemble atmosphériques

Les systèmes de prévision 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 mesure de la qualité de la prévision.

Ils 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 Prédiction Météorologique à Moyen Terme) et le NCEP (National Center for Environmental Prediction, USA) produisent des prévisions d'ensemble météorologiques opérationnelles.

Il existe différentes méthodes pour produire des prévisions d'ensemble, dont les plus connues sont brièvement décrites ci-dessous ([UNDEN 2006]) :

★ 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. On s'attache alors à la définition de l'incertitude dans cet état initial, qui est représentée par un ensemble de perturbations de la meilleure estimation possible de la situation 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 de ces états initiaux, et on obtient un ensemble définissant la distribution de probabilité prévue pour l'échéance choisie. On procède également à une intégration de la meilleure estimation de l'état initial, qui est dénommée "run 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 correctement dispersif, il faut qu'elles correspondent aux modes les plus sensibles du modèle de prévisions. Ce travail de définition des perturbations initiales de l'ensemble fait l'objet de nombreux travaux, et deux méthodes différentes sont actuellement utilisées par les grands centres météorologiques pour la production de leurs prévisions d'ensemble atmosphériques :

· *Vecteurs Singuliers* :

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). Elle nécessite l'utilisation du modèle linéarisé et du modèle adjoint, qui sont par ailleurs nécessaires à l'assimilation de données variationnelle. 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.

Ce 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 N prévisions de l'évolution de l'atmosphère, équiprobables entre elles. Néanmoins, chacune de ces N prévisions, prise individuellement, est statistiquement moins performante que le run de contrôle. En effet, c'est 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 générations 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 (environ de moitié) comparée 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 (le run de contrôle ainsi que les 50 runs perturbés) ont été calculés avec une résolution de T255L40 (environ 80 km

sur la France, 40 niveaux verticaux), du 21 novembre 2000 jusqu'au 31 janvier 2006. Le 1er février 2006, la résolution du système de prédiction d'ensemble a été portée à T399L62 (environ 40 km, 62 niveaux). Le 28 novembre 2006, le système de prédiction d'ensemble du CEPMMT est devenu VarEPS (VARIABLE Resolution Ensemble Prediction System). L'échéance de prédiction 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, au CEPMMT, les prévisions d'ensemble sont destinées à la prédiction à moyenne échéance. C'est pourquoi il a 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. Néanmoins, ce choix rend délicate l'utilisation des prévisions d'ensemble du CEPMMT pour la courte échéance (les deux premiers jours de prédiction).

Enfin, diverses améliorations ont été portées au système de prédiction d'ensemble du CEPMMT, en particulier l'utilisation de vecteurs singuliers évolués, *ie* on considère une combinaison linéaire des vecteurs singuliers croissant entre d et $d + 2$ et ayant cru 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 le run de contrôle) d'un bruit stochastique simulant l'erreur modèle ([BUIZZA et al. 1999]).

· *Breeding of Growing Modes :*

Cette méthode, un peu plus simple et moins coûteuse que la précédente, repère les modes qui ont le plus cru pendant la période d'assimilation, détectés avec le modèle non linéaire, *ie* on repère les modes dont l'erreur a le plus cru juste avant l'instant initial. 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 ([TRACTON and KALNAY 1993], [TOTH and KALNAY 1993], [TOTH and KALNAY 1997]).

★ Assimilation d'ensemble

Un grand nombre N d'assimilations de données (au moins 10) sont effectuées à partir d'observations perturbées. 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.

Ces trois méthodes sont relativement coûteuses, dans le sens où elles nécessitent N intégrations d'un modèle. Il existent d'autres méthodes moins lourdes :

★ La prédiction 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, 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 modèle utilisé 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.

Dans cette approche multi-modèle, toutes les prévisions sont en principe équi-probables, néanmoins 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.

★ 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 par exemple 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/les modèles à leur résolution maximale.

1.3 Les prévisions d'ensemble en hydrologie

1.3.1 Contexte international

Si la prévision d'ensemble est couramment utilisée en météorologie pour la prévision à moyen terme depuis une vingtaine d'années, son application à l'hydrologie est beaucoup plus récente.

En effet, la production de prévisions d'ensemble hydrologiques et leur utilisation opérationnelle sont actuellement en plein développement dans la communauté internationale.

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

Mis en place en 2004, le projet HEPEX (Hydrologic Ensemble Prediction EXperiment, <http://hydrodis8.eng.uci.edu/hepex/>), 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 prévision d'ensemble météorologiques dans des systèmes couplés hydro-météorologiques? 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)?"

Au niveau européen, dans le cadre de la coopération scientifique COST (<http://www.cost.esf.org/>), une nouvelle action a été lancée récemment (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 hydro-météorologiques, à des fins de prévision hydro-météorologique.

De plus, 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 partenaires européens 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, service météorologique allemand) à 7 jours, et d'ensemble d'autre part, basées sur les EPS (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 la prévision des crues (généralement de l'ordre de 2 jours). Les prévisions d'ensemble permettent de prendre en compte

l'incertitude liée à la moyenne échéance.

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 module 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).

En effet, le service météorologique suisse (Swiss Federal Office of Meteorology and Climatology, MeteoSwiss, http://www.meteosuisse.ch/web/fr/meteo/previsions_numeriques/probabilites.html) envisage par exemple de constituer un système de prévisions d'ensemble hydrologiques basé sur l'ensemble de prévision atmosphérique COSMO-LEPS (LEPS : système de prévision d'ensemble à aire limitée; COSMO : Consortium for Small-scale Modelling; COSMO-LEPS : 16 membres dérivés de l'ensemble du CEPMMT à haute résolution, sur l'Europe centrale et du sud).

De plus, le service météorologique allemand (DWD, Deutscher Wetter Dienst) met en place un super-ensemble de prévisions météorologiques, qui sera utile également pour l'hydrologie, composé des 3 ensembles disponibles au DWD : COSMO-LEPS, SNRWP-PEPS (ensemble "du pauvre" composé des sorties de différents modèles européens (UKMO (United Kingdom MetOffice), ALADIN (Météo-France), etc..), www.dwd.de/PEPS) et LMK (système de prévision d'ensemble haute résolution sur l'Allemagne, courte échéance, 6 membres).

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. 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 est en cours au SMHI ([LINDSTROM 2006]).

Enfin, en Belgique, une expérience de prévision d'ensemble des débits de deux petits bassins a été menée récemment 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 d'échéance ont directement été couplées avec un modèle hydrologique. L'analyse statistique des résultats de cette expérience ont 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.

Dans tous ces systèmes, les précipitations constituent la seule source d'incertitude prise en compte. 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 aussi 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]).

1.3.2 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 développés depuis plusieurs années. Ceci a constitué la seconde partie de mon travail de thèse.

Il a donc été décidé de développer un système de prévision d'ensemble des débits qui s'appuie sur le système couplé hydro-météorologique SIM (partie II chapitre 5).

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 (L'Adour-Garonne, le Rhône, la Seine (partie III)). Depuis fin 2003, il est en partie opérationnel à Météo-France, et fournit un suivi quotidien en temps réel des composantes des bilan d'eau et d'énergie, en particulier du contenu en eau des sols (partie II chapitre 5).

La chaîne de prévision d'ensemble des débits que j'ai développée 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 la prévision d'ensemble des débits, les modules ISBA et MODCOU de SIM sont forcés par les prévisions d'ensemble atmosphériques du CEPMMT à 10 jours d'échéance. Le détail du fonctionnement du système que j'ai développé est décrit au chapitre 2.

Néanmoins, les prévisions d'ensemble produites par le CEPMMT ont une résolution spatiale (environ 80 km) relativement basse, mal adaptée aux zones de relief (Alpes, Cévennes, Pyrénées par exemple). C'est pourquoi une procédure de désagrégation spatiale est mise en place afin de prendre en compte les effets de relief et de prévoir au mieux les débits des rivières des régions concernées (chapitre 2).

De plus, j'ai utilisé plusieurs outils statistiques classiques en prévision probabiliste, présentés au chapitre 3, afin de qualifier la qualité des prévisions d'ensemble de débits. Cette étude statistique a été menée sur une période de près d'un an, les résultats sont détaillés dans les chapitres 4 et 5.

Enfin, afin de compléter cette étude statistique, j'ai analysé plusieurs cas de grandes crues du passé récent, comme par exemple une crue décennale de la Seine à Paris en 2001 ou la crue du Rhône de décembre 2003. Ces résultats sont présentés au chapitre 6.

Chapitre 2

Mise en place de la chaîne de prévision d'ensemble des débits

2.1 Principe général de fonctionnement de la chaîne de prévision d'ensemble des débits

La chaîne de prévision d'ensemble des débits que j'ai mise en place s'appuie sur le système SIM, développé depuis plusieurs années au CNRM et maintenant en partie opérationnel à Météo-France (partie II).

Le principe général consiste à remplacer l'analyse SAFRAN des paramètres météorologiques (précipitations, température, vent, ...) par la prévision d'ensemble de ces paramètres : 51 membres, à 10 jours d'échéance, produite par le CEPMMT (Centre Européen pour la Prévision Météorologique à Moyen Terme). Ces prévisions d'ensemble atmosphériques forcent les modèles ISBA et MODCOU, dont on réalise 51 runs, et qui produisent 51 scénarios de débit (figure 2.1).

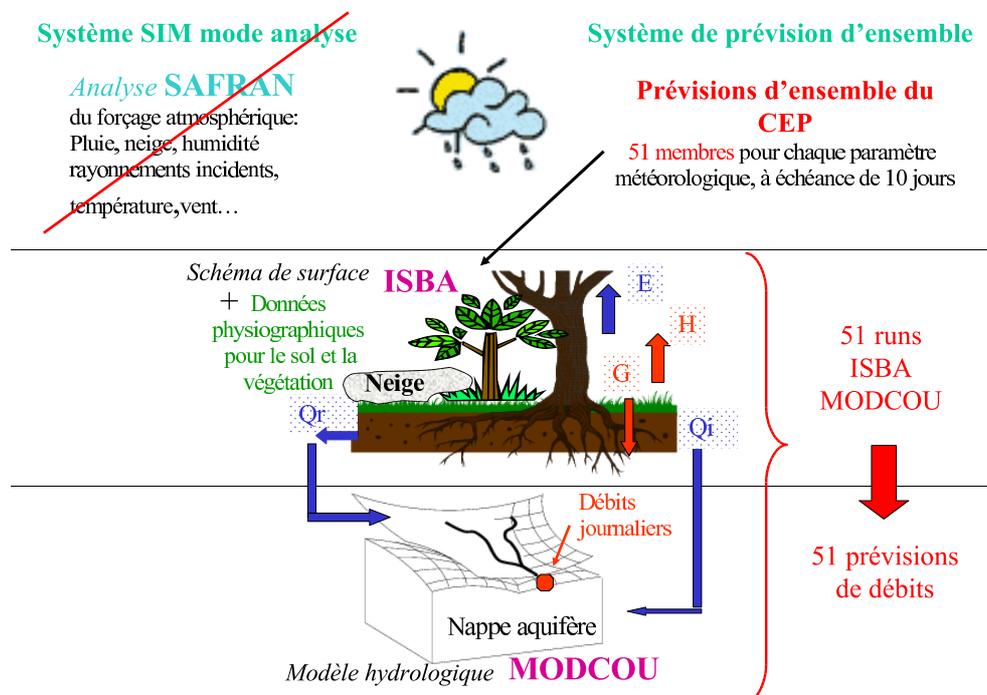


FIG. 2.1 – Principe de fonctionnement de la chaîne de prévision d'ensemble des débits basée sur SIM

Cette chaîne fonctionne quotidiennement, en temps réel, et de façon automatique.

Elle utilise les prévisions d'ensemble atmosphériques produites par le CEP sur le réseau de 00H 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 prédiction d'ensemble se fait en deux temps.

En ce qui concerne le modèle ISBA, le run opérationnel d'analyse quotidien nous donne l'initialisation nécessaire à la prédiction 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)).

En revanche, pour le modèle MODCOU, on ne dispose pas d'un tel run opérationnel (seul les modules SAFRAN et ISBA de SIM sont opérationnels).

J'ai donc développé une filière complémentaire de MODCOU analyse temps réel. Elle produit exactement le résultat que produirait un MODCOU opérationnel, et fournit l'initialisation pour la prédiction d'ensemble : contenu en eau des rivières, état des nappes aquifères.

Pour cette filière, j'ai mis en place l'extraction quotidienne du drainage et du ruissellement produits par ISBA opérationnel, qui alimentent MODCOU pour un run de 24 heures. **Cette filière automatique quotidienne 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.

2.2 Stratégie de mise en oeuvre

Lors de la mise en place de cette chaîne, il a été tout d'abord envisagé de travailler sur des situations passées intéressantes (en particulier des cas de grandes crues, mais aussi des périodes de fortes sécheresse).

Néanmoins, cette méthode nécessitait un travail conséquent de désarchivage des données de prédiction d'ensemble sur le serveur d'archive du CEP. Une estimation des coûts en terme de durée de traitement et de volume de données a rapidement montré la lourdeur de cette approche, ce qui nous a conduit à nous orienter vers une méthodologie différente.

En effet, la seconde solution, qui a été retenue, est non pas de travailler sur des situations passées, mais en temps réel.

J'ai donc développé un système de prédiction d'ensemble qui, en fonctionnant en temps réel, bénéficie de tous les moyens techniques déjà mis en oeuvre entre Météo-France et le Centre Européen dans le cadre de la prédiction météorologique. En effet, les données de prévisions d'ensemble météorologiques produites par le Centre Européen sont envoyées dès leur disponibilité dans la base de données interne à Météo-France, la BDAP (Base de Données Analysées et Prévues), via une liaison dédiée rapide. L'extraction des données dans la BDAP est ensuite plus aisée et rapide, ce qui diminue les lourdeurs techniques du système.

Les prévisions d'ensemble du Centre Européen étant conservées seulement 13 jours dans la BDAP, il a été nécessaire de mettre en place une filière quotidienne automatique d'extraction et de sauvegarde de ces données. Cette filière, qui constitue la première partie de la chaîne de prédiction d'ensemble, fonctionne depuis le 4 septembre 2004.

La mise en place de cette chaîne a demandé un gros travail technique. D'une part, c'est la première fois que le système SIM est utilisé à des fins de prédiction ensembliste, il a donc fallu mettre en place techniquement le couplage entre les prévisions météorologiques et les modèles ISBA et MODCOU, ainsi que le traitement des sorties. En outre, utiliser des prévisions d'ensemble -soit 51 fois plus de données et de temps de calcul qu'avec une prédiction déterministe- est un travail très lourd. Afin de rendre la chaîne de prédiction techniquement réalisable, j'ai dû effectuer diverses améliorations et adaptations, qui sont décrites dans les paragraphes suivants. Un effort important a aussi été fait sur le post-processing et la visualisation des données.

De plus, le travail en temps réel m'impose une supervision technique constante de la chaîne afin de garantir chaque jour sa bonne exécution et de ne pas interrompre son fonctionnement.

En effet, bien qu'en temps réel, cette chaîne n'est pas "opérationnelle". Ceci signifie que contrairement aux modèles opérationnels de Météo-France, elle ne bénéficie pas d'une supervision technique 24H sur 24 par les personnels des services informatiques et techniques de Météo-France.

En outre, elle ne bénéficie pas non plus d'un créneau réservé sur la partie du supercalculateur de Météo-France dédié à l'opérationnel. Elle est donc soumise aux aléas de charge de travail et de maintenance de la partie du calculateur réservée à la recherche, ce qui perturbe régulièrement son bon fonctionnement et entraîne parfois des retards de plusieurs jours dans son exécution, ou des relances aussi lourdes que coûteuses.

Et enfin, les sorties de la chaîne ne sont pas stockées dans les bases de données opérationnelles de Météo-France, il a donc fallu calibrer au plus juste le volume des sorties produites par la chaîne pour respecter les contraintes d'espace disque de la partie recherche de la machine d'archivage de Météo-France.

2.3 La désagrégation spatiale des prévisions d'ensemble du Centre Européen

2.3.1 Principe

Les prévisions d'ensemble produites par le CEP sont disponibles dans la BDAP sur une grille appelée 'EVENTAIL15', qui s'étend de l'Est des Etats-Unis jusqu'à l'Europe de l'Est (132W, 60E), sur l'hémisphère Nord (de 18N à 75N), avec une résolution de 1.5 degrés.

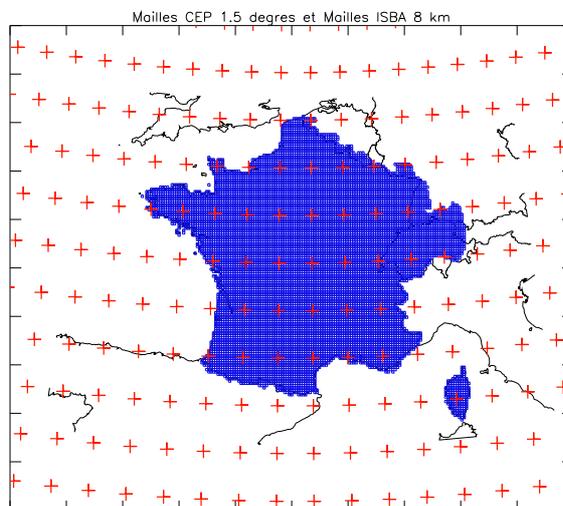


FIG. 2.2 – Mailles CEP (croix rouges) à 1.5 degrés et grille ISBA à 8 km (en bleu)

Du fait de cette faible résolution spatiale, les prévisions d'ensemble du CEP ne peuvent pas être utilisées directement dans les simulations d'ISBA et MODCOU. Il est nécessaire de mettre en place la désagrégation spatiale de ces données pour les adapter à la grille régulière de 8 km utilisée par ISBA (Figure 2.2), en particulier afin de **prendre en compte les effets du relief**. Ceci est fondamental pour la prévision d'ensemble des débits des bassins concernés.

En effet, le relief tel que pris en compte dans le système de prévision d'ensemble du CEPMMT est très lisse sur la France, en particulier les reliefs du massif central et des Vosges sont gommés, les reliefs des Pyrénées sont très lissés (avec une altitude maximale de l'ordre de 600 m), tout comme ceux des Alpes (altitude maximale d'environ 1300 m (figure 2.5)). Ceci conduit à une prévision des paramètres météorologiques de qualité relativement médiocre sur ces régions montagneuses.

Plusieurs autres systèmes de prédiction d'ensemble hydrologiques utilisant les prévisions d'ensemble météorologiques du CEPMMT n'effectuent pas cette interpolation verticale (expérience en Belgique [ROULIN and VANNITSEM 2005], système d'alerte européen EFAS [THIELEN and al. 2006]).

J'ai choisi une méthodologie de désagrégation simple, qui reste proche de la philosophie SAFRAN et qui conduit à des champs (en particulier de précipitations) de structure cohérente avec les données SAFRAN.

C'est pourquoi cette désagrégation spatiale fait intervenir les zones SYMPOSIUM, appelées aussi zones SAFRAN (figures 2.3 et 2.4). Ces zones, définies pour les besoins de la prédiction atmosphérique de Météo-France à l'échelle régionale et départementale, sont aussi les zones sur lesquelles le modèle SAFRAN réalise son analyse (partie II chapitre 1).

La première étape de la désagrégation spatiale consiste à interpoler les données CEP sur les zones SYMPOSIUM, et ce en fonction de l'inverse du carré de la distance entre les centres des mailles CEP et les centres des zones SYMPOSIUM (figure 2.3).

En plus des paramètres météorologiques, on effectue aussi cette interpolation pour l'altitude des mailles du CEP. On obtient ainsi un champ "d'altitude CEP", qui est l'altitude correspondant aux données CEP interpolées (figure 2.5).

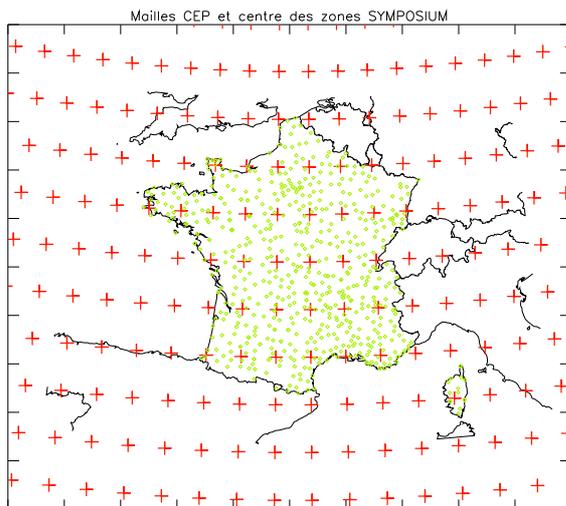


FIG. 2.3 – Mailles CEP (en rouge) et centres des zones SYMPOSIUM (en vert)

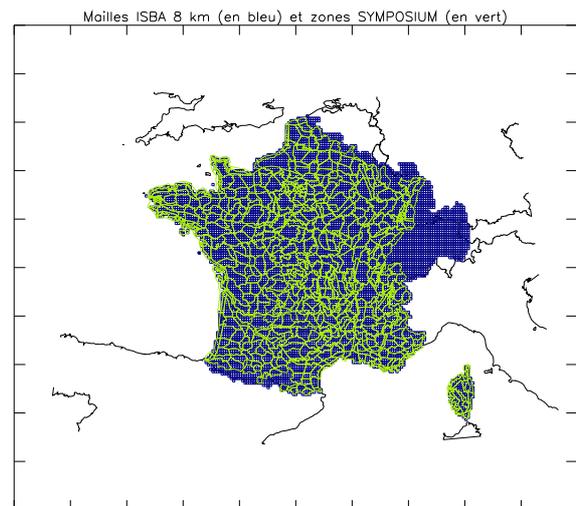


FIG. 2.4 – Mailles ISBA 8 km (en bleu) et zones SYMPOSIUM (en vert)

La seconde étape consiste à passer des zones SYMPOSIUM aux mailles de la grille régulière de 8 km utilisée par ISBA (figure 2.4), **en prenant en compte les effets de relief**.

La correspondance entre les mailles ISBA et les zones SYMPOSIUM est connue, ainsi que l'altitude des mailles ISBA (figure 2.6).

Pour prendre en compte les effets de reliefs, on utilise un gradient vertical uniforme (dans le temps et dans l'espace), qu'on applique pour chaque maille ISBA entre son altitude et l'altitude CEP de la zone SYMPOSIUM correspondante.

Les gradients verticaux utilisés sont ceux définis par [ETCHEVERS 2000]. Pour les précipitations, il correspond à une augmentation des précipitations de 2 mm/an pour une élévation de un mètre (comme dans SAFRAN, la répartition pluie-neige se fait à $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$). Pour la température, c'est le gradient adiabatique défini par l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) qui est utilisé, il vaut $-6.5 \text{ }^\circ\text{C}/1000\text{m}$.

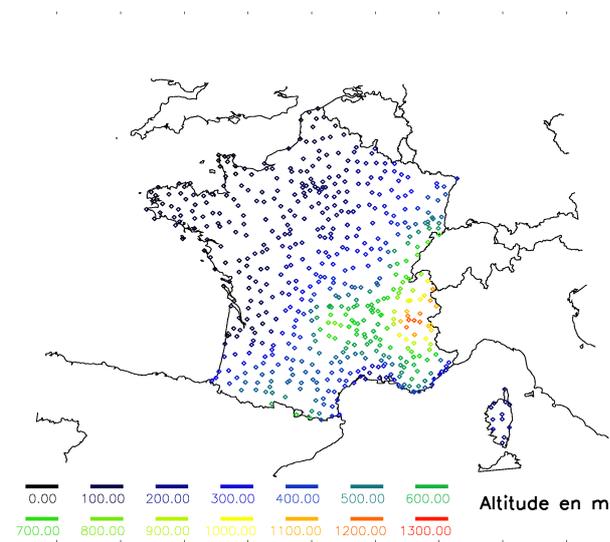


FIG. 2.5 – Altitude des mailles CEP (en m) interpolée sur le centre des zones SYMPOSIUM

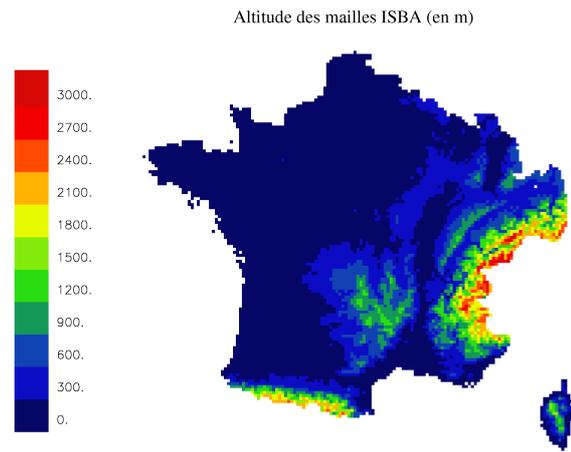


FIG. 2.6 – Altitude des mailles ISBA (en m)

Les figures 2.7, 2.8 et 2.9 présentent un exemple de cette désagrégation dans le cas des précipitations (cumuls de pluie prévus sur 10 jours (mm), prévision du 17 octobre 2004, run non-perturbé).

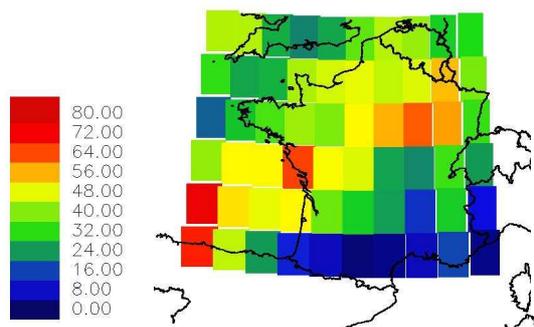


FIG. 2.7 – Sur les mailles du CEP

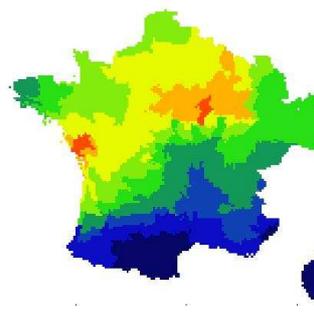


FIG. 2.8 – Sur les zones SYM- POSIUM

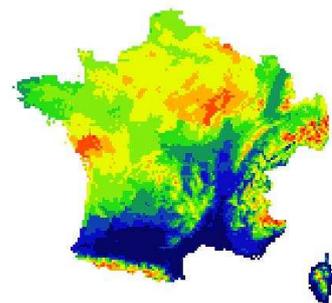


FIG. 2.9 – Sur les mailles ISBA

2.3.2 Les précipitations

2.3.2.1 Calibration sur la période septembre 2004 - juillet 2005

Les cartes des figures 2.10 et 2.11 montrent le cumul de précipitations (en mm) du 4 septembre 2004 au 31 juillet 2005, issu de SAFRAN d'une part, et prévu à 24h d'échéance en moyenne sur les 51 runs de l'ensemble.

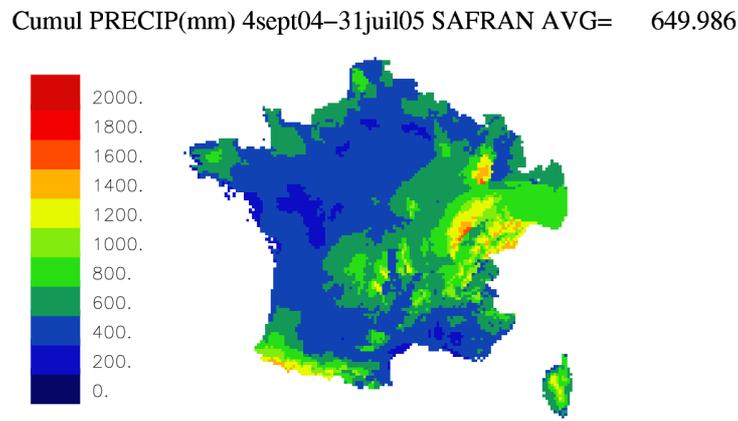


FIG. 2.10 – Cumul (en mm) de précipitations SAFRAN du 4 septembre 2004 au 31 juillet 2005

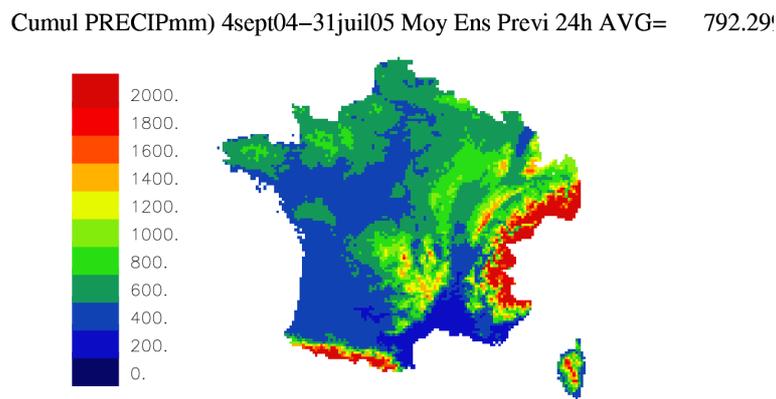


FIG. 2.11 – Cumul (mm) de précipitations de la moyenne de l'ensemble (à 24h) avec gradient=2

On constate que les structures de précipitations sont globalement bien placées géographiquement, néanmoins si les valeurs des cumuls en plaine sont correctes, en revanche en montagne les cumuls prévus sont beaucoup trop élevés. Ceci est vraisemblablement lié à l'utilisation du gradient d'altitude. En effet, dans ces zones montagneuses, les écarts d'altitude entre les mailles ISBA et l'altitude CEP interpolée sur les centres des zones SYMPOSIUM (et sur lesquels s'applique le gradient) peuvent être très importants (jusqu'à plus de 2000m) (cartes 2.5, 2.6 et 2.12). C'est pourquoi sur ces zones, une petite quantité de précipitations prévue par l'ensemble avant désagrégation, conduit à une très forte quantité de précipitations quand on applique le gradient d'altitude.

Le gradient utilisé (une augmentation des précipitations de 2 mm/an pour une élévation de un mètre) semble mal adapté puisqu'il produit des cumuls beaucoup trop forts sur les reliefs. Ce gradient a été défini par [ETCHEVERS 2000] dans une étude sur le bassin du Rhône. Une étude récente ([QUINTANA-SEGUI et al. 2007]) met en lumière un gradient réellement utilisé par SAFRAN de 0.35 (augmentation des précipitations de 0.35 mm/an pour une élévation de un mètre). D'autre part, dans SAFRAN, le gradient d'altitude de précipitations est utilisé pour intégrer les mesures de différentes stations à différentes altitudes à l'intérieur d'une même zone SYMPOSIUM, où les écarts sont beaucoup moins marqués que les différences d'altitude existant entre les mailles CEP et les mailles ISBA.

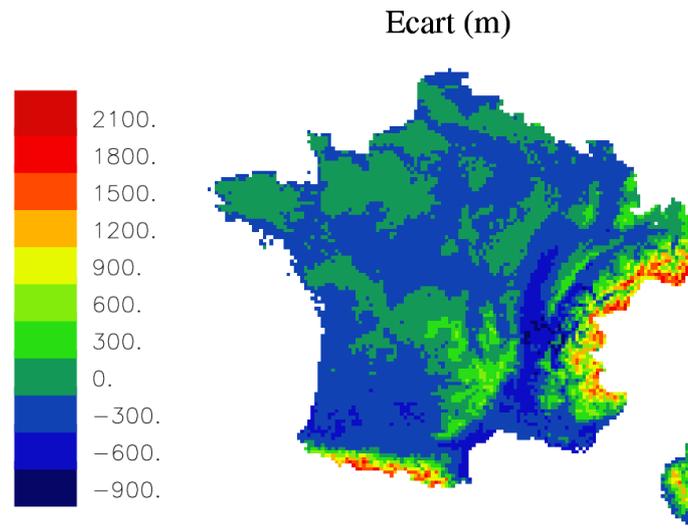


FIG. 2.12 – *Ecart en m entre l'altitude des mailles ISBA et l'altitude des mailles CEP interpolée sur les zones SYMPOSIUM*

J'ai donc testé diverses valeurs et adaptations du gradient pour remédier à cette situation :

- avec un gradient uniforme sur la France de 0.35 mm/an/m ;
- avec un gradient uniforme sur la France de 1 mm/an/m et une limitation de l'écart d'altitude à 1000m ;
- avec un "double gradient" : pour les zones SYMPOSIUM dans lesquelles l'altitude de toutes les mailles 8 km est inférieure à 800m , on applique un gradient de 2 mm/an/m , et ailleurs on applique un gradient de 0.7 mm/an/m ; tout en gardant la limitation de l'écart d'altitude à 1000m .

J'ai tracé un histogramme d'erreur entre le cumul SAFRAN sur la période et le cumul prévu à 24h par la moyenne de l'ensemble, sommé sur la période, en fonction de l'altitude, pour chaque cas de gradient (figure 2.13). Cette figure est complétée par un histogramme présentant la répartition des mailles ISBA en fonction de leur altitude (figure 2.14).

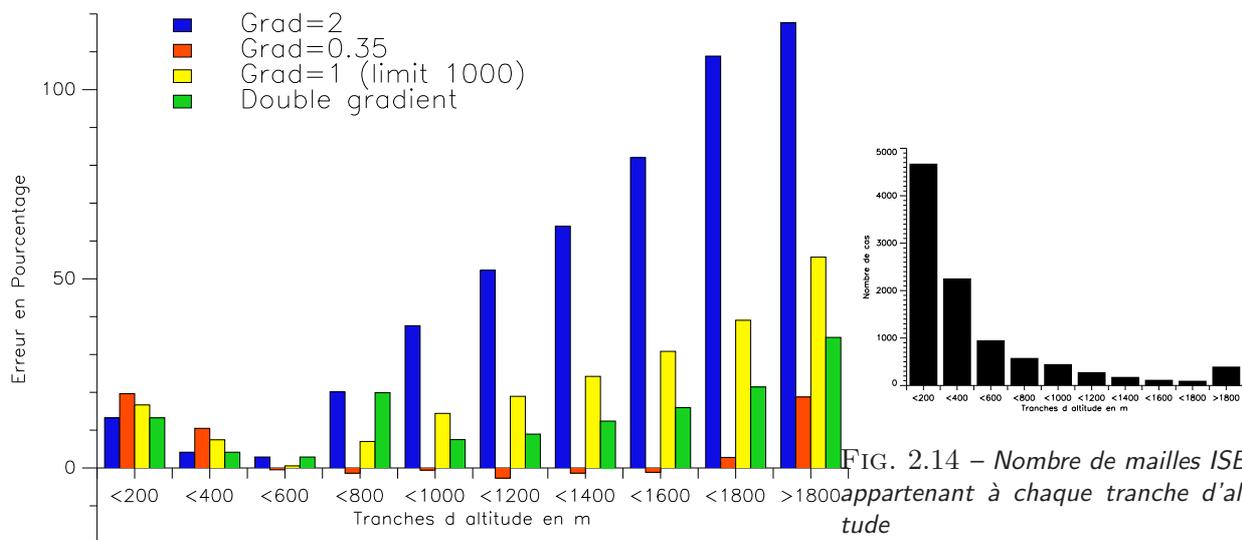


FIG. 2.13 – *Ecart en % entre le cumul SAFRAN et le cumul prévu par la moyenne de l'ensemble (sur la période 4 sept 2004- 31 juillet 2005), pour chaque configuration de gradient testée*

FIG. 2.14 – *Nombre de mailles ISBA appartenant à chaque tranche d'altitude*

Ce graphique montre que :

- Cas 1 : avec un gradient uniforme sur la France de 2 mm/an/m , on a une très forte erreur sur les reliefs, mais une erreur faible en plaine, comme le montrait déjà la carte 2.11 ;
- Cas 2 : avec un gradient uniforme sur la France de 0.35 mm/an/m , on réduit considérablement les erreurs en montagne, en revanche, dans les zones de plaine qui sont les plus nombreuses (comme le montre l'histogramme de la figure 2.14), on augmente l'erreur, ce qui n'est pas satisfaisant ;
- Cas 3 : avec un gradient uniforme sur la France de 1 mm/an/m et une limitation de l'écart d'altitude à 1000m, l'erreur sur les reliefs est réduite par rapport au cas initial d'un gradient de 2 mm/an/m , mais l'erreur en plaine est là encore augmentée ;
- Cas 4 : les résultats des cas 1, 2 et 3 nous ont conduit à définir le double gradient : dans les zones de plaines, on conserve le gradient de 2 mm/an/m afin d'avoir une erreur faible, et en montagne on réduit le gradient afin de diminuer l'erreur tout en conservant la limitation de l'écart d'altitude à 1000m. Cette configuration est donc un compromis entre le cas 1 d'une part et les cas 2 et 3 d'autre part, et conduit globalement au meilleur résultat.

La carte suivante montre le cumul de précipitations que l'on obtient avec ce double gradient : il est tout à fait comparable au cumul SAFRAN (figure 2.15, déjà présenté figure 2.10).

Cumul PRECIP(mm) 4sept04–31juil05 SAFRAN AVG= 649.986

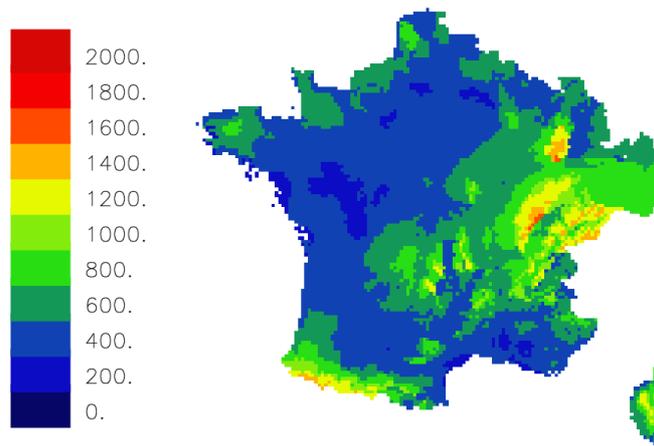


FIG. 2.15 – Cumul (en mm) de précipitations SAFRAN du 4 septembre 2004 au 31 juillet 2005

Cumul PRECIPmm) 4sept04–31juil05 Moy Ens Previ 24h AVG= 698.39:

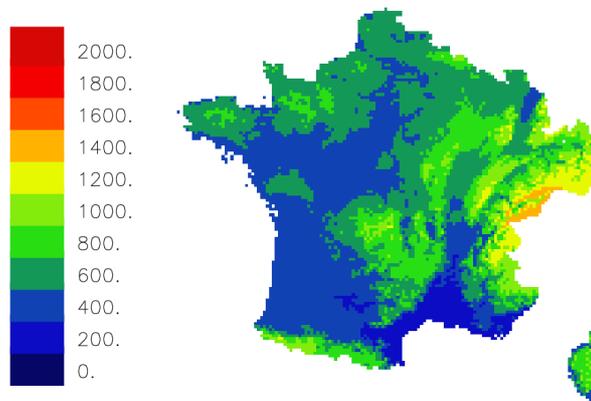


FIG. 2.16 – Cumul (mm) de précipitations de la moyenne de l'ensemble (à 24h de prévision) du 4 septembre 2004 au 31 juillet 2005 avec le double gradient

De plus, les figures 2.17 et 2.18 présentent deux résultats statistiques (en fonction de l'échéance) pour le cas initial du gradient de 2 mm/an/m , et pour le cas du double gradient.

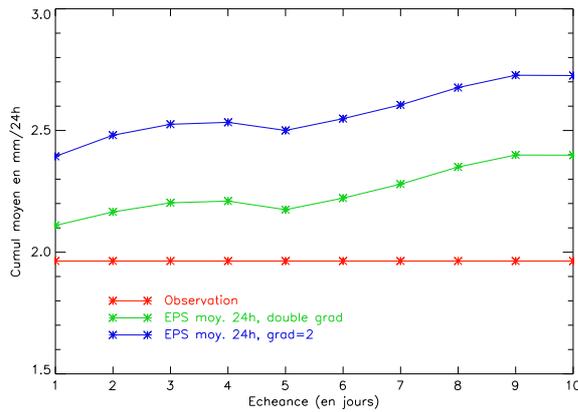


FIG. 2.17 – Cumul journalier moyen de précipitations, observé (analyse SAFRAN, en rouge) et prévu (par la moyenne de l'ensemble), en fonction de l'échéance, pour le cas initial du gradient de 2 mm/an/m (en bleu) et le cas du double gradient (en vert).

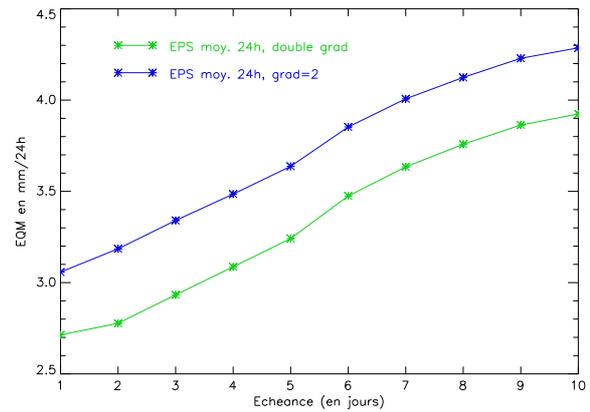


FIG. 2.18 – EQM (de la moyenne de l'ensemble, référence : analyse SAFRAN) pour le cumul journalier de précipitations, en fonction de l'échéance, pour le cas initial du gradient de 2 mm/an/m (en bleu) et le cas du double gradient (en vert).

La figure 2.17 montre que le biais moyen, dans le cas du double gradient, est de l'ordre de 0.1 à 0.2 mm/jour , jusqu'à l'échéance de 5 jours. A 10 jours, il atteint 0.4 mm/jour . Ce biais était deux fois plus fort dans le cas initial du gradient de 2 mm/an/m , et ce à toutes les échéances.

Sur la figure 2.18 on constate que l'EQM augmente avec l'échéance. Dans le cas du double gradient, il varie de 2.7 mm/jour à 1 jour d'échéance à 3.9 mm/jour à 10 jours d'échéance. Là encore, l'EQM du double gradient est beaucoup moins fort que dans le cas initial d'un gradient de 2 mm/an/m , dans ce cas initial l'EQM commence à 3.1 mm/jour et atteint 4.3 mm/jour .

Ces résultats montrent que la configuration où l'on utilise le double gradient conduit aux meilleurs résultats quand on s'intéresse à la France entière (plaines et montagnes). On choisit donc ce double gradient pour être utilisé dans les simulations :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{là où l'altitude ISBA est } < 800m & : \text{ gradient } = 2 \text{ mm/an/m} \\ \text{là où l'altitude ISBA est } \geq 800m & : \text{ gradient } = 0.7 \text{ mm/an/m} \end{array} \right.$$

avec une limitation de l'écart d'altitude ISBA-CEP(interpolée sur les zones SYMPOSIUM) à 1000m.

Apport de la méthode de désagrégation spatiale des prévisions d'ensemble de précipitation

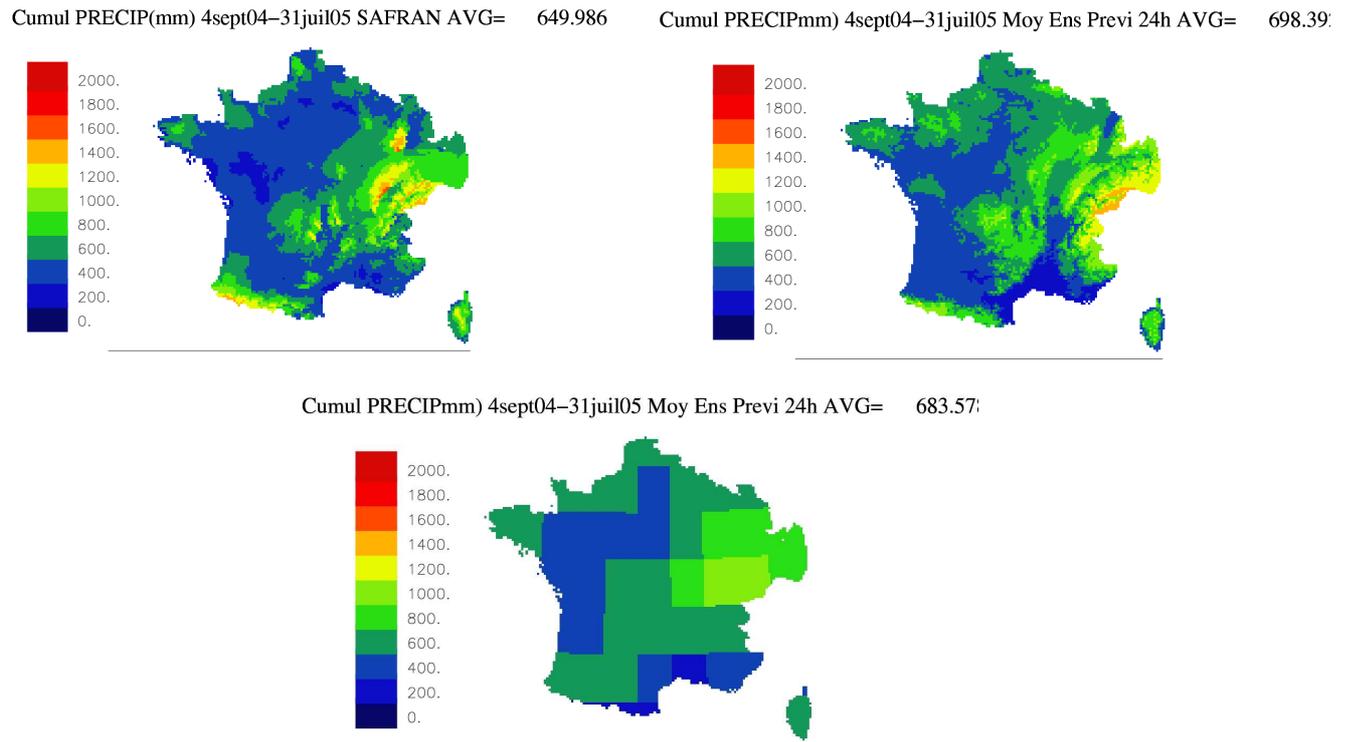


FIG. 2.19 – Cumuls (mm) de précipitations du 4 septembre 2004 au 31 juillet 2005. A gauche, Cumul de précipitations SAFRAN. Au droite, Cumul de précipitations de la moyenne de l'ensemble (à 24h) avec le double gradient. En bas, Cumul de précipitations de la moyenne de l'ensemble (à 24h) sans désagrégation, données 'brutes' du Centre Européen.

Les cartes de la figure 2.19 montrent que sur les zones de plaines, comme le bassin de la Seine par exemple, les données du CEP sont relativement peu modifiées par la procédure de désagrégation, étant donné le faible écart d'altitude entre les mailles CEP et les mailles ISBA. En revanche, sur les zones où le relief est plus marqué et plus hétérogène, les différences sont plus flagrantes, et laissent présager de la nécessité de la procédure de désagrégation pour la bonne prévision des débits des bassins de ces zones.

2.3.2.2 Test sur l'année hydrologique 2004/2005

La méthode de désagrégation spatiale des prévisions d'ensemble du CEP a été utilisée en continu dans la chaîne de prévision d'ensemble, après avoir été calibrée sur l'année 2004-2005.

Les figures 2.20 et 2.21 montrent le cumul de précipitations (mm) analysé par SAFRAN et prévu à 24h par la moyenne de l'ensemble pour l'année hydrologique 2005-2006 (du 1er août 2005 au 31 juillet 2006). L'écart (en %) entre ces deux cumuls est tracé sur la figure 2.22.

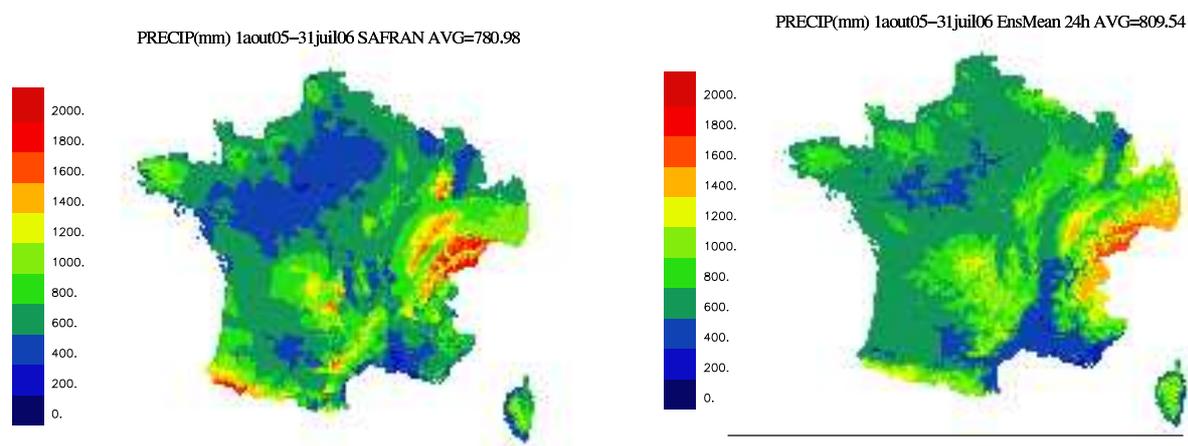


FIG. 2.20 – Cumul (en mm) de précipitations SAFRAN du 1er août 2005 au 31 juillet 2006

FIG. 2.21 – Cumul (mm) de précipitations de la moyenne de l'ensemble (à 24h) du 1er août 2005 au 31 juillet 2006 avec le double gradient

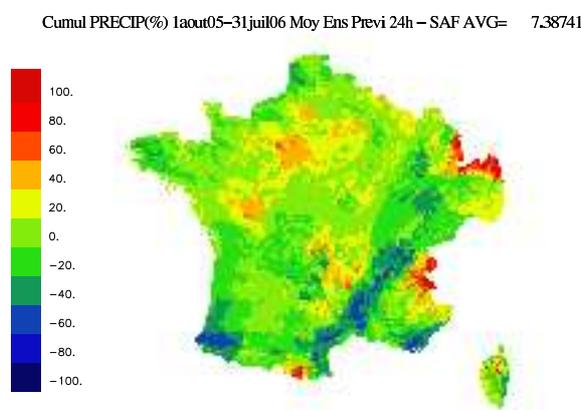


FIG. 2.22 – Ecart (%) entre le cumul de précipitations SAFRAN et le cumul de précipitations de la moyenne de l'ensemble (à 24h, avec le double gradient) du 1er août 2005 au 31 juillet 2006

On constate que comme pour l'année 2004-2005, la structure du champ de précipitations prévu est cohérente avec l'analyse SAFRAN, avec des ordres de grandeurs des cumuls tout à fait corrects. L'écart moyen sur la France entre l'analyse SAFRAN et la prévision 24h de la moyenne de l'ensemble atteint 7.38 %. C'est la configuration du double gradient qui a été utilisée. Elle conduit à des cumuls prévus en plaine relativement proches de l'analyse SAFRAN, avec des écarts en général de l'ordre de -20 à +20 %. En montagne, les cumuls prévus sont aussi globalement proches de l'analyse SAFRAN.

Néanmoins, comme c'était le cas pour l'année 2004-2005, on note quelques endroits particuliers où les écarts entre l'analyse SAFRAN et la prévision en moyenne de l'ensemble sont importants. Dans le Nord Est du domaine, cet écart est lié au fait que l'analyse SAFRAN produite est dégradée. En effet, dans cette zone d'intérêt uniquement hydrographique et située hors de France, il n'y a pas de réelle analyse SAFRAN, les champs météorologiques attribués aux zones SAFRAN de cette région sont les valeurs utilisées par les mailles les plus proches en distance et en topographie. De plus, dans les Alpes et la vallée du Rhône, on remarque l'existence d'un dipôle dans l'écart entre les cumuls analysés et prévus, lié à la position de la vallée du Rhône et à ses effets sur les précipitations. De même, il apparaît dans le cumul prévu un manque de précipitations sur les Cévennes et sur le pays Basque. Ceci montre les limites de la méthode dans la prise en compte des effets de reliefs, la mise en place d'un gradient d'altitude ne permet pas de reproduire entièrement les phénomènes d'accumulation des précipitations contre ces deux zones de relief, mal résolues dans le modèle CEP. De plus, cette méthode de prise en compte de la topographie ne peut pas à elle seule corriger entièrement les biais, puisqu'elle ne corrige pas l'erreur dans l'ensemble de prévision des pluies.

Malgré ces quelques points de différences, l'utilisation de la méthode de désagrégation spatiale calibrée avec 2 gradients conduit à l'obtention d'un cumul de précipitations désagrégé, prévu à 24h par la moyenne de l'ensemble, globalement proche et cohérent avec l'analyse SAFRAN.

2.3.3 Les autres paramètres

Seules les prévisions d'ensemble du CEPMMT de température et de précipitations sont disponibles dans la BDAP, les autres paramètres nécessaires à ISBA doivent en complément être désarchivés sur le serveur d'archive du CEP, ce qui est relativement coûteux.

Il s'est alors posé la question de la possibilité de limiter le travail d'archivage et de désagrégation spatiale aux seules précipitations et températures (les deux paramètres a priori les plus influents), et d'utiliser pour les autres paramètres une climatologie, ou une persistance par exemple.

Ceci est particulièrement important pour la faisabilité technique de la chaîne de prédiction d'ensemble des débits.

Cette question a fait l'objet d'un stage de 6 semaines de 3 Elèves Ingénieurs de l'Ecole Nationale de la Météorologie ([ALOT, LECHES and HAKAM 2005]).

Dans ce travail, cette idée a été testée, d'abord en un point, sur différentes périodes, puis en 2D sur l'ensemble de la France pour quelques cas. Il a ainsi été montré qu'il est possible d'utiliser uniquement les prévisions d'ensemble de température et de précipitations, et une climatologie pour les autres variables sans dégradation notable des performances (la persistance ou le run non perturbé ont aussi été envisagés). Néanmoins, il a fallu veiller à limiter la valeur de l'humidité issue de la climatologie à la valeur à saturation dépendant de la température issue des prévisions d'ensemble afin de limiter les incohérences. Avec cette méthode on obtient des résultats très proches de ceux issus d'un forçage ensembliste complet, et on réduit très notablement le volume de données manipulées et le temps de pré-processing.

2.4 Optimisation du temps de traitement et de calcul et du volume des entrées/sorties

La gestion du temps de calcul et des volumes de fichiers en entrée et sortie de la chaîne est un point particulièrement important, pour permettre la mise en oeuvre concrète de la chaîne.

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

[ALOT, LECHES and HAKAM 2005] ont montré que l'augmentation du pas de temps d'ISBA est possible sans détériorer les résultats, on utilise donc pour les prévisions d'ensemble un pas de temps de 20 minutes (au lieu de 5 minutes), 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 (3 heures 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.

2.5 Visualisation des sorties de la chaîne

Une des caractéristiques de la prévision d'ensemble est la richesse de l'information produite, en effet chaque jour la chaîne prévoit 51 scénarios de débits à échéance de 10 jours, pour environ 900 stations sur la France.

La question de la visualisation de l'information se pose alors pour tout centre producteur de prévision d'ensemble. Elle fait l'objet de nombreuses réflexions dans la communauté scientifique internationale, et était par exemple l'un des thèmes de travail du workshop CHR/OMM auquel j'ai participé (CHR-Workshop Expert Consultation "Ensemble Predictions and Uncertainties in Flood Forecasting", Berne, Suisse, 30-31 Mars 2006). Bien souvent, c'est l'utilisateur destinataire de la prévision qui détermine la forme la plus adaptée à ses besoins.

Pour la chaîne de prévision d'ensemble des débits, j'ai mis en place deux types de visualisations.

D'une part, pour une sélection de stations françaises parmi les 900 disponibles, les sorties 'brutes' de la chaîne sont tracées dans 3 graphiques.

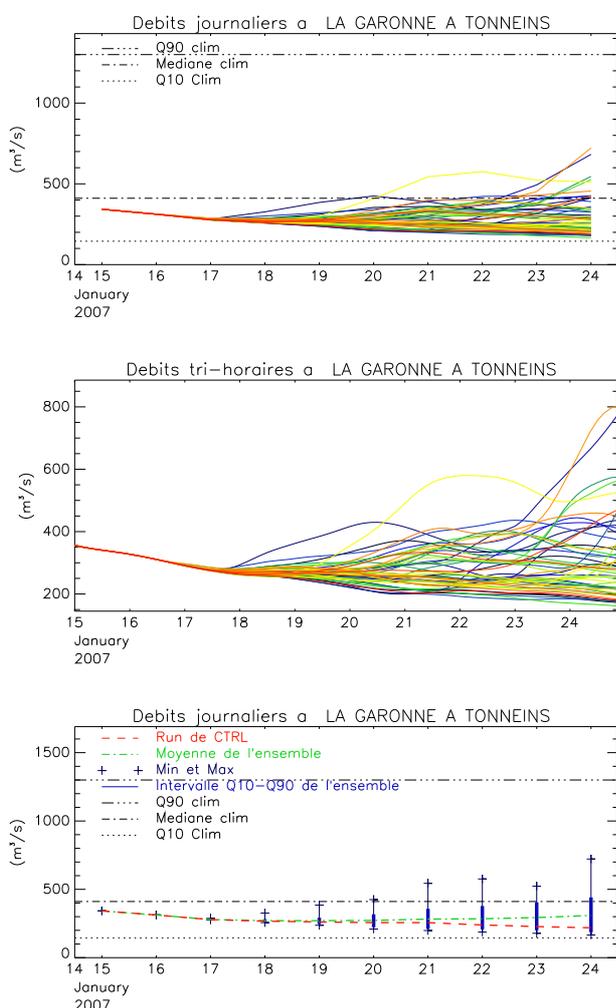


FIG. 2.23 – Débits d'ensemble prévus le 15 janvier 2007, pour la Garonne à Tonneins. (a) Débits journaliers (en haut); (b) Débits tri-horaires (au milieu); (c) Statistiques sur les débits journaliers (en bas).

D'autre part, cette présentation de l'information n'est pas nécessairement la plus adaptée pour d'éventuels utilisateurs (services de prévision des crues, sécurité civile par exemple).

C'est pourquoi j'ai développé un second type de visualisation qui permet une quantification probabiliste du risque. Cette visualisation s'inspire largement de celle développée au JRC (Joint Research Center) pour EFAS (European Flood Alert System, <http://efas.jrc.it/>) et présentée dans diverses conférences.

Le premier graphique (figure 2.23b) montre les 51 runs de débits prévus tri-horaires (tracé dit 'spaghettis').

Le second (figure 2.23a) présente les mêmes débits moyennés sur une journée, afin de permettre une comparaison avec les débits mesurés qui sont des débits journaliers.

Enfin, le dernier graphique (figure 2.23c) synthétise quelques informations statistiques concernant l'ensemble des débits journaliers prévus, à chaque échéance : la moyenne, les valeurs minimales et maximales, et l'intervalle dans lequel on trouve 80 % des valeurs prévues (intervalle q10-q90 de l'ensemble), et le run de contrôle. Ceci permet de qualifier le débit prévu en terme statistique.

Sur ces deux graphiques figurent aussi les q10-médiane-q90 climatologiques, c'est à dire calculés à partir des observations disponibles (parfois plusieurs décennies), et figurant dans la 'Banque de Données Hydro' gérée par le SCHAPI (Service Central Hydrométéorologique d'Aide à la Prévision des Inondations) du MEDD (Ministère de l'Environnement et du Développement Durable), ce qui permet de qualifier les débits prévus en rapport avec la climatologie du bassin.

Il s'agit d'un **tableau d'alerte pour les forts ou les faibles débits** (figure 2.24). Pour chaque station sélectionnée, on trace un tableau d'alerte de débit dépassant le seuil Q90 (climatologique) ainsi qu'un tableau d'alerte pour le débit restant inférieur au seuil Q10 (climatologique).

Dans ces tableaux, chaque ligne correspond à une date de prévision, et les colonnes non grisées aux échéances prévues. Dans chaque case, on remplit par la probabilité (en %) prévue que le débit soit supérieur au Q90 pour le risque crue, ou inférieur au Q10 pour le risque sécheresse. On associe également une couleur à chaque classe de probabilité.

Ces tableaux permettent une vue immédiate du risque de fort ou faible débit, avec la probabilité associée, et permettent également grâce à leur historique d'une vingtaine de jours de suivre si d'un jour à l'autre les prévisions se maintiennent ou non.

Ce genre de visualisation de l'information probabiliste semble une des plus adaptées, et des plus demandées, par les utilisateurs de ces prévisions.

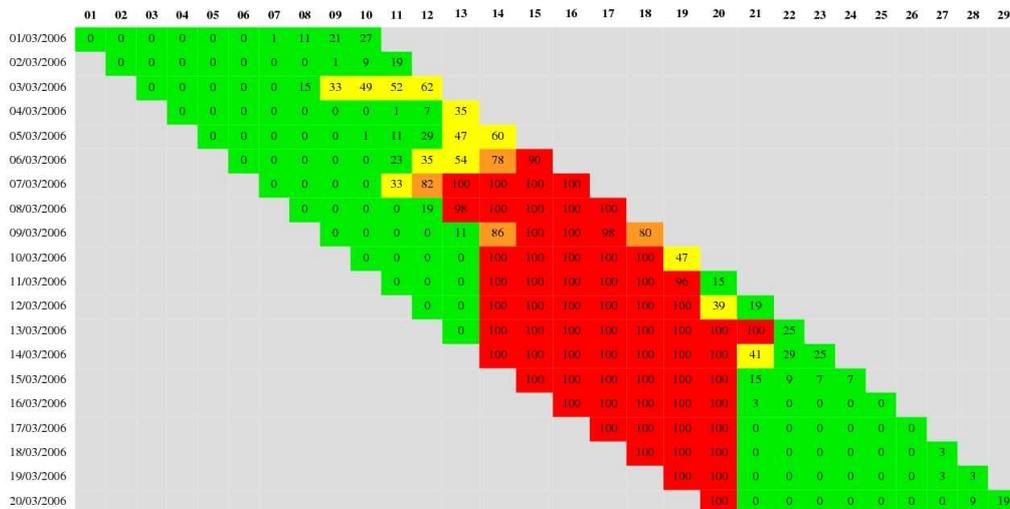


FIG. 2.24 – Tableau d'alerte pour la Seine à Paris, Mars 2006, pour le dépassement du seuil $700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Probabilité < 30 % : vert ; 30 %-70 % : jaune ; 70 %-90 % : orange, > 90 % : rouge.

L'ensemble des graphiques de visualisation des sorties de la chaîne, présentés ci-dessus, alimentent un site web que j'ai créé. Ce site web est un site web interne à Météo-France (intramet du CNRM), et permet aux personnes intéressées de suivre les prévisions d'ensemble de débits. Il est alimenté automatiquement chaque jour, et présente donc les prévisions les plus récentes. Seule une sélection de stations parmi les 900 disponibles a été choisie pour figurer dans le site, comme le montre la carte de la page d'accueil du site (figure 2.25).



FIG. 2.25 – Page d'accueil du site web interne Météo-France de visualisation des sorties de la chaîne de prévision d'ensemble.

De plus, afin de faciliter la consultation du site et d'alerter immédiatement le visiteur sur une situation à risque en un point de la France, j'ai également mis en ligne deux tableaux d'alerte qui présentent l'ensemble des stations du site, l'un pour le dépassement des forts débits (crues) et l'autre pour le non dépassement des bas débits (étiages). Pour chacun de ces tableaux, une ligne représente la dernière prévision disponible de chaque station, avec les 10 jours d'échéance en colonne.

2.6 Bilan

La chaîne de prédiction des débits fonctionne quotidiennement, de façon automatique, en temps réel, depuis le 4 septembre 2004, selon le schéma présenté par la figure 2.26. Depuis cette date, elle produit chaque jour un ensemble de 51 prévisions de débits à 10 jours d'échéance pour environ 900 stations sur l'ensemble de la France.

Le temps de calcul de la chaîne sur le ordinateur de Météo-France est d'environ 2 000 secondes CPU chaque jour, pour la prédiction d'ensemble des débits à 10 jours d'échéance des 900 stations en France. Le volume de données (brutes, hors visualisations graphiques) produites en sortie de la chaîne est d'environ par 400 Méga Octets par jour, soit environ 145 Giga Octets par an.

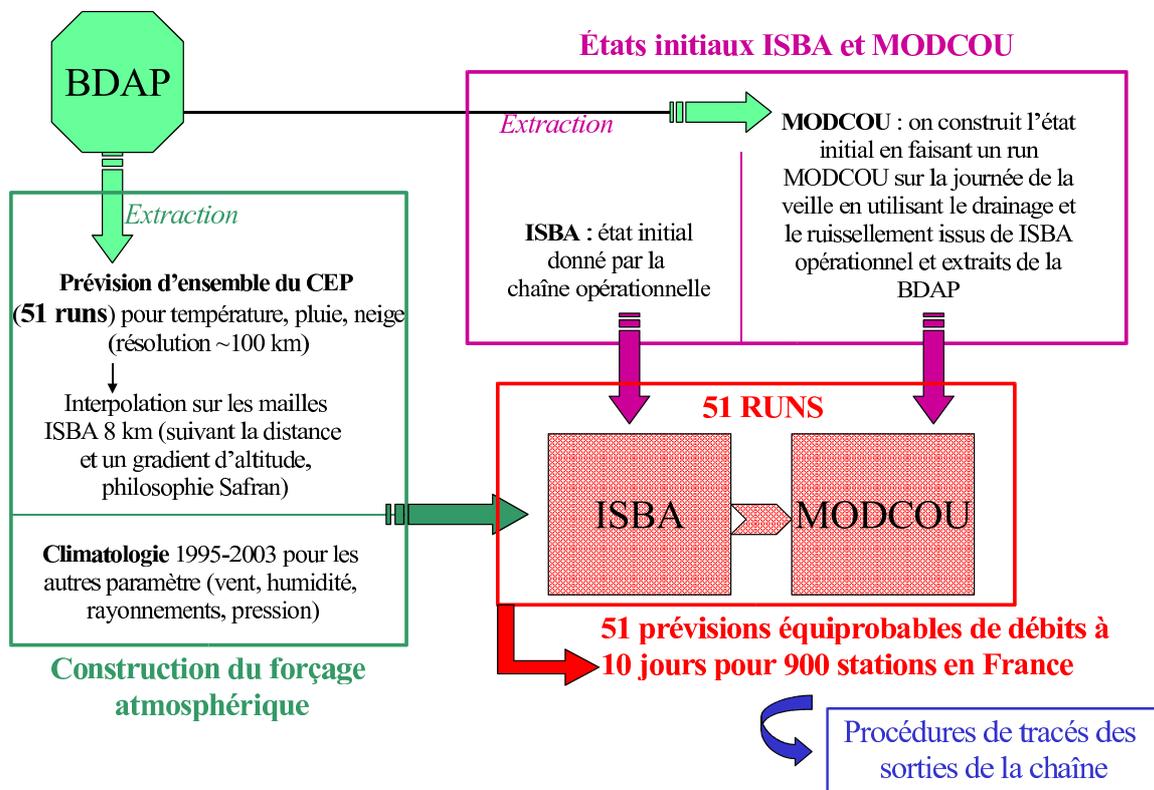


FIG. 2.26 – Schéma de fonctionnement de la chaîne automatique temps réel de prédiction d'ensemble des débits

Chapitre 3

Outils statistiques pour l'analyse des performances du système

3.1 La vérification des prévisions d'ensemble

Dans le cas de prévisions d'ensemble, la vérification est très différente de celle de prévisions déterministes.

En effet, dans le cas d'un système de prévision déterministe, la nature de l'objet prédit est identique à celle de l'objet utilisé pour la vérification. Par exemple, si on prévoit un débit de la Seine à Paris de $750 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, on peut directement vérifier l'exactitude ou non de la prévision par la valeur du débit observé, et quantifier l'erreur commise dans la prévision. Dans ce cadre déterministe, on dispose de vérifications ponctuelles donnant tout de suite une information précise sur la qualité de chacune des prévisions.

En revanche, dans le cas de systèmes de prévision probabilistes ou d'ensemble, d'un côté l'objet prévu est une probabilité d'occurrence d'un événement (ou un ensemble de valeurs possibles d'une variable), et de l'autre on dispose de l'observation de l'occurrence ou non de cet événement (ou de la valeur numérique observée de la variable). La nature des objets que l'on souhaite comparer est très différente et ne permet pas une vérification ponctuelle immédiate de la qualité des prévisions.

Dans ce cas, la seule manière de qualifier les performances d'un système de prévision probabiliste ou d'ensemble est statistique. Et ce n'est qu'après avoir accumulé un certain nombre de réalisations du système de prévision et d'observations que ces moyens statistiques peuvent être mis en oeuvre.

Divers ouvrages et articles traitent de la validation des systèmes de prévision probabilistes ou d'ensemble, comme [WILKS 1995], [EPSTEIN 1969], [HAMILL 2000] ou [ATGER 1999]. Ils proposent ou utilisent divers scores statistiques permettant de qualifier ce type de prévision. Pour la vérification du système de prévision d'ensemble des débits, les scores que j'ai utilisés sont parmi les plus largement répandus : Score de Brier (et sa décomposition en fiabilité et résolution) et Skill Score associé, Ranked Probability Score et Skill Score associé, diagrammes de Talagrand (ou de rang). Ces scores sont présentés en détail dans les paragraphes suivants.

Enfin, la vérification des systèmes de prévision d'ensemble se heurte souvent au problème de la taille de l'échantillon de vérification. En effet, les scores statistiques utilisés pour la vérification demandent de collecter un grand nombre de paires prévisions/observations. Etant donné les coûts souvent importants liés à ces systèmes de prévision, il n'est pas toujours aisé de disposer d'une série suffisamment longue pour la vérification. Il a été calculé de façon théorique dans [CANDILLE 2003] le nombre de réalisations nécessaires à la vérification, en fonction du nombre de membres de l'ensemble. Pour un ensemble de 10 membres, il faudrait en théorie plus de 5000 prévisions indépendantes pour une vérification correcte, et pour un ensemble de 50 membres, il en faudrait près de 45000. Dans la pratique, on n'obtient jamais de telles séries, néanmoins il est courant de valider les systèmes de prévision d'ensemble sur des échantillons allant de quelques mois à plusieurs années.

3.2 Analyse du comportement de la moyenne de l'ensemble et de l'ensemble autour de sa moyenne

Une première approche simple quand on cherche à valider un système de prédiction d'ensemble peut être de s'intéresser d'abord au comportement de la moyenne de l'ensemble ainsi qu'à la dispersion de l'ensemble autour de sa moyenne.

3.2.1 Score de la moyenne : EQM

L'écart quadratique moyen (EQM) représente l'erreur quadratique de la moyenne de l'ensemble vis à vis d'une référence (l'observation par exemple). Sa formule est la suivante :

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

où N est le nombre de cas, o_i l'observation, et m_i la moyenne des n membres de l'ensemble de prévisions.

On peut également remplacer dans la formule la moyenne de l'ensemble par le run de contrôle, et ce afin de comparer les performances de la moyenne de l'ensemble et du run de contrôle.

3.2.2 La dispersion de l'ensemble : S

La dispersion de l'ensemble représente l'écart moyen de ses membres par rapport à sa moyenne. On la calcule de la manière suivante :

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}$$

où n est le nombre de membres de l'ensemble, \bar{x} la moyenne de l'ensemble et x_k la prévision du membre k .

On compare souvent l'ordre de grandeur de la dispersion de l'ensemble avec celui de l'EQM. En effet, si ils sont comparables, cela signifie qu'en moyenne l'ensemble couvre une plage de valeurs adaptée à l'écart moyen entre la moyenne de l'ensemble et l'observation. En revanche, si la dispersion est d'un ordre de grandeur très supérieur à l'EQM, l'ensemble couvre une plage de valeurs largement plus grande que l'écart moyen entre la moyenne de l'ensemble et l'observation, la moyenne de l'ensemble ainsi que l'observation sont en moyenne "noyées" parmi la large palette des membres de l'ensemble, la dispersion est trop forte pour que l'ensemble apporte une prévision pertinente. Enfin, si la dispersion est trop faible, l'ensemble risque de ne pas assez englober la réalité.

3.3 Les scores statistiques probabilistes

3.3.1 Le Score de Brier (BS) et le Skill Score associé (BSS)

Ce score a été défini par [BRIER 1950]. C'est l'un des scores statistiques le plus largement utilisé dans la communauté des prévisions probabilistes.

Il permet de qualifier le comportement d'un système de prédiction face à un événement binaire de type dépassement de seuil. Des scores analogues ont été définis pour des événements multi-catégories (voir paragraphe 3.3.5), néanmoins le score de Brier reste très largement utilisé.

Ce score représente l'erreur quadratique moyenne entre la prévision de probabilité d'un événement y et les observations binaires correspondantes o . On utilise pour l'observation :

$$\begin{cases} o = 1 & \text{si l'événement a eu lieu;} \\ o = 0 & \text{si non.} \end{cases}$$

On utilise pour calculer le score de Brier n paires de prévisions/observations :

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

où y_k est la probabilité avec laquelle l'événement a été prévu.

Par exemple : On considère l'événement "le cumul de précipitations en 24h est supérieur à 5 mm". On dispose d'un ensemble de 51 prévisions, parmi lesquelles 37 donnent un cumul supérieur à 5 mm, et on observe un cumul de 7 mm. On a dans ce cas $y_k = 37/51$ et $o_k = 1$.

Le Score de Brier est compris entre 0 et 1. Il est orienté négativement, c'est à dire qu'on a $BS = 0$ pour des prévisions parfaites.

Note : le score tel qu'écrit ci-dessus n'est pas tout à fait celui défini par Brier en 1950, néanmoins c'est à cette formulation que le terme "score de Brier" ou "BS" se référera dans ce document. A l'origine, le score de Brier tient compte des deux aspects de l'événement binaire, l'événement complémentaire intervenant aussi dans la formule, c'est pourquoi le score tel que défini plus haut est parfois dénommé "Half Brier Score".

A partir du score de Brier, on définit aussi le Brier Skill Score :

$$BSS = 1 - \frac{BS}{BS_{ref}} \quad (-\infty \leq BSS \leq 1; \text{orienté positivement})$$

BS_{ref} est le score de Brier pour une expérience de référence. Le plus souvent, la référence est la climatologie. Ce Skill Score permet de comparer les qualités du système de prévision d'ensemble par rapport à cette référence.

3.3.2 Décomposition algébrique du score de Brier : fiabilité et résolution

Une décomposition algébrique du score de Brier a été proposée par [MURPHY 1973], elle permet de distinguer et de qualifier deux aspects importants de la performance des prévisions : la fiabilité et la résolution.

Pour procéder à cette décomposition, il est nécessaire de définir certains termes :

On distingue en I catégories les probabilités prévues, couvrant toutes les valeurs possibles de probabilité prévue y_i .

Exemple :

Dans le cas des prévisions d'ensemble du CEP, on aura $I = 52$ catégories :

- catégorie 1 : aucun run ne prévoit l'événement, $y_1 = 0$;
- catégorie 2 : 1 run sur 51 prévoit l'événement, $y_2 = 1/51$;
- ...
- catégorie 51 : 50 run sur 51 prévoient l'événement, $y_{51} = 50/51$;
- catégorie 52 : tous les runs prévoient l'événement, $y_{52} = 1$.

Comme pour le calcul du score de Brier, on utilise n paires observations/ensemble de prévision.

On définit N_i comme le nombre de fois où la probabilité d'occurrence y_i pour l'événement considéré est utilisée parmi ces n paires prévisions/observations sélectionnées pour la vérification.

Le nombre total n de paires prévisions/observations est simplement la somme de ces sous-ensembles :

$$n = \sum_{i=1}^I N_i$$

La distribution de probabilité est la fréquence relative :

$$p(y_i) = \frac{N_i}{n}$$

Pour chaque sous-ensemble, il existe une fréquence relative d'occurrence du phénomène considéré :

$$\text{fréquence relative d'occurrence dans la classe } i : \quad \bar{o}_i = p(o = 1 \mid y_i) = \frac{1}{N_i} \sum_{k \in N_i} o_k$$

avec toujours $\begin{cases} o_k = 1 & \text{si l'événement a eu lieu pour la } k^{\text{ième}} \text{ paire observation/ensemble de prédiction;} \\ o_k = 0 & \text{si non.} \end{cases}$

La somme ne se fait que sur les valeurs de k correspondant aux paires observations/prédiction pour lesquelles la prédiction valait y_i .

De même on a :

$$\text{fréquence globale d'occurrence :} \quad \bar{o} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n o_k$$

En utilisant les quantités précédemment définies, [MURPHY 1973] montre que l'on a :

$$\text{BS} = \underbrace{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^I N_i (y_i - \bar{o}_i)^2}_{\text{fiabilité}} - \underbrace{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^I N_i (\bar{o}_i - \bar{o})^2}_{\text{résolution}} + \underbrace{\bar{o}(1 - \bar{o})}_{\text{incertitude}}$$

la fiabilité : il s'agit de la moyenne pondérée des différences au carré entre les probabilités prévues y_i et les fréquences observées dans les différentes catégories.

Ce terme indique la capacité du système à prévoir des probabilités justes : en considérant un certain événement, sur une période donnée, si cet événement est prévu m fois avec une probabilité p , alors parmi ces m cas l'événement doit être observé avec une fréquence égale à p . La fiabilité est orientée négativement (comme le score de Brier), avec une valeur nulle pour une fiabilité parfaite ;

la résolution : il s'agit de la moyenne pondérée des différences au carré entre les fréquences relatives de l'événement dans chaque catégorie et la fréquence climatologique dans l'ensemble des données. Ce terme est orienté positivement.

Elle représente la capacité du système à séparer les classes de probabilité. Si les observations sont classées dans les catégories de telle sorte que, dans chaque catégorie, l'événement a une fréquence relative très différente de la fréquence globale, alors la résolution est forte, et l'information produite par la prédiction d'ensemble est pertinente et utile à son utilisateur. Si au contraire on a dans toutes les catégories (déterminées par les probabilités prévues) une fréquence relative proche de la fréquence globale, la résolution est faible, et l'information apportée par la prédiction d'ensemble est peu informative et peu utilisable.

Pour une fiabilité donnée, la résolution maximale correspond à la prédiction déterministe (seulement les probabilités 0 et 1 sont prévues), et la résolution minimale correspond à la climatologie (une seule probabilité est prévue) ;

l'incertitude : c'est la variance des observations.

Elle indique la difficulté intrinsèque à prévoir l'événement pendant la période d'étude. Elle est indépendante du système de prédiction.

3.3.3 Le diagramme d'attributs

Les différents termes de l'équation de décomposition du score de Brier peuvent s'interpréter géométriquement par la construction du diagramme d'attributs. Ce diagramme consiste au tracé des fréquences relatives observées de l'événement (les \bar{o}_i) en fonction des probabilités prévues (les y_i). Un exemple de ce diagramme est donné ci-après figure 3.1. Les chiffres indiqués entre parenthèse à côté de chaque point sont les valeurs des fréquences relatives ($p(y_i)$) d'utilisation des probabilités y_i dans l'échantillon global (*ie* le nombre de fois où chaque probabilité y_i est utilisée parmi toutes les prévisions de l'événement).

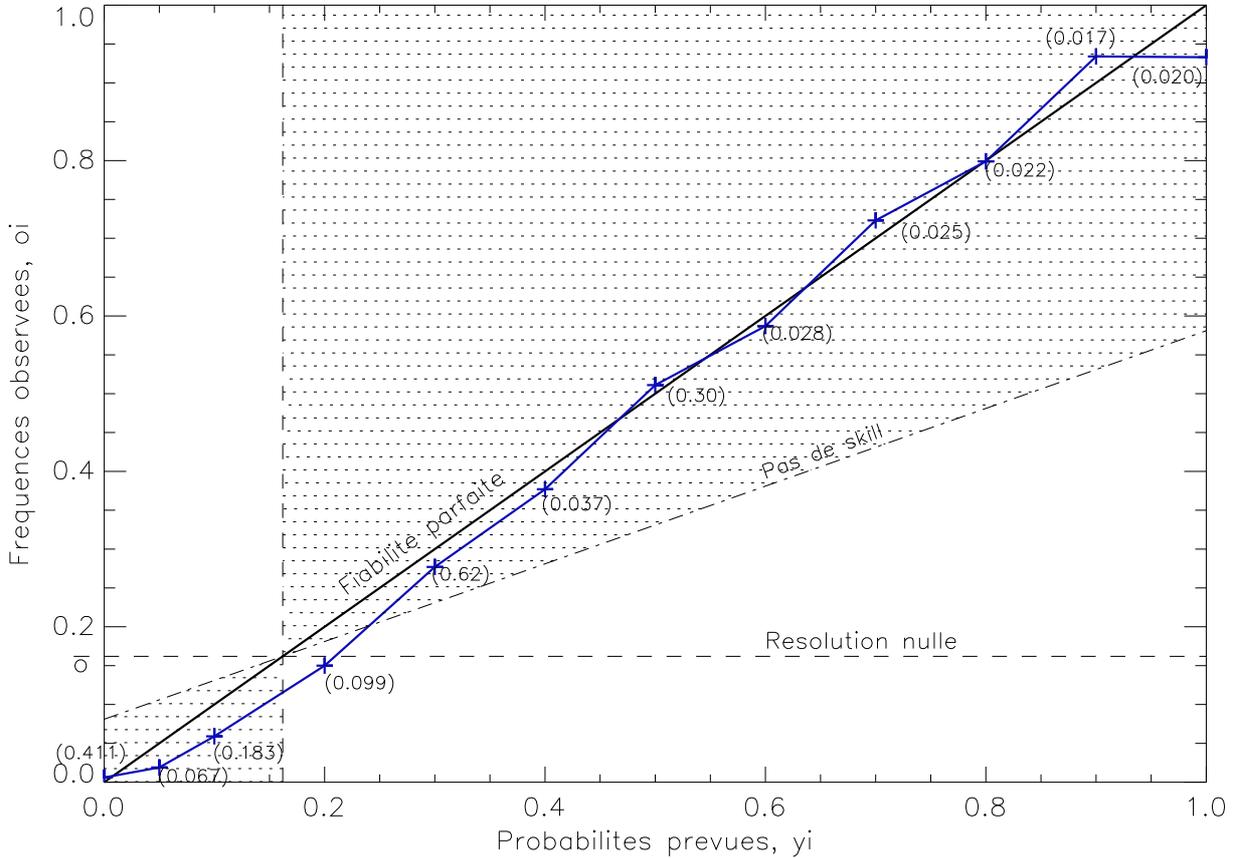


FIG. 3.1 – Diagramme d'attributs (exemple) [WILKS 1995]

Ce diagramme permet de visualiser les différents termes de la décomposition du score de Brier : la fiabilité, la résolution et l'incertitude.

Lorsque l'on a une prévision parfaitement fiable, les fréquences relatives dans chaque sous-ensemble \bar{o}_i sont égales aux valeurs des probabilités prévues y_i . Dans ce cas, les points tracés dans le diagramme d'attributs sont situés sur la diagonale ("Fiabilité parfaite"). La fiabilité d'un ensemble peut donc être interprétée géométriquement comme la moyenne pondérée des distances verticales entre les points et la diagonale. Dans l'exemple de diagramme de la figure 3.1, les points sont relativement proches de la diagonale, ce qui traduit une bonne fiabilité.

La résolution peut elle aussi être interprétée géométriquement sur le diagramme d'attributs. Les sous-ensembles pour lesquels la fréquence relative d'occurrence diffère de la fréquence globale d'occurrence de l'événement correspondent aux points qui sont situés à une grande distance verticale de la ligne appelée "résolution nulle" (qui est la droite $y = \bar{o} =$ fréquence globale d'occurrence = 0.162 dans cet exemple). La résolution est la moyenne pondérée des distances verticales entre cette ligne "résolution nulle" et les points. Cette distance verticale est grande pour des prévisions avec une forte résolution, c'est à dire une résolution qui contribue à un petit (donc bon) score de Brier. Dans le diagramme donné en exemple figure 3.1, on a une bonne résolution, et les prévisions qui contribuent le plus à cette bonne résolution sont ceux qui sont le plus éloignés de la fréquence globale d'occurrence de l'événement.

On peut également aboutir à une autre interprétation de l'incertitude grâce au diagramme d'attribut. On imagine le diagramme d'attributs qu'on tracerait pour une prévision qui serait la climatologie. Comme une seule valeur est prévue (la valeur de la climatologie), on n'a qu'un seul point ($I = 1$) sur le diagramme. Son abscisse est la valeur de la probabilité climatologique \bar{o} . Si l'échantillon est suffisamment grand, la fréquence relative d'occurrence du phénomène dans l'unique sous-ensemble tend vers la fréquence climatologique, l'ordonnée de l'unique point vaudra aussi \bar{o} . Ce point est donc situé à l'intersection des droites "Fiabilité parfaite" et "Résolution nulle". En ce point, la fiabilité est parfaite (elle vaut 0) et la résolution est la plus faible (elle vaut également 0). Etant donné la nullité de la fiabilité et de la résolution, le score de Brier pour la prévision climatologique vaut exactement l'incertitude.

Ceci a des conséquences dans l'expression du Skill Score de Brier BSS. En effet, en remplaçant dans la définition donnée plus haut $BS_{ref} = BS_{clim}$ par l'incertitude, on obtient :

$$BSS = \frac{\text{résolution} - \text{fiabilité}}{\text{incertitude}}$$

Puisque l'incertitude est toujours positive, le skill score sera le meilleur (c'est-à-dire le plus grand) pour des prévisions pour lesquelles la résolution est plus forte en valeur absolue que la fiabilité. Ceci implique que l'on peut déterminer pour chaque sous-ensemble si il contribue positivement ou négativement au skill score, selon sa position dans le diagramme d'attributs : ce sont les points qui sont situés plus près verticalement de la ligne "Fiabilité parfaite" que de la ligne "Résolution nulle". Cette condition définit la ligne "Pas de skill", et permet de délimiter une zone (grisée sur le diagramme) qui englobe les points correspondants aux sous-ensembles qui contribuent positivement au skill score.

3.3.4 Le diagramme de fiabilité

Pour représenter graphiquement la performance de la prévision probabiliste d'un événement binaire, on présente souvent une forme simplifiée du diagramme d'attributs : le diagramme de fiabilité ([WILKS 1995] et [HAMILL 1997]).

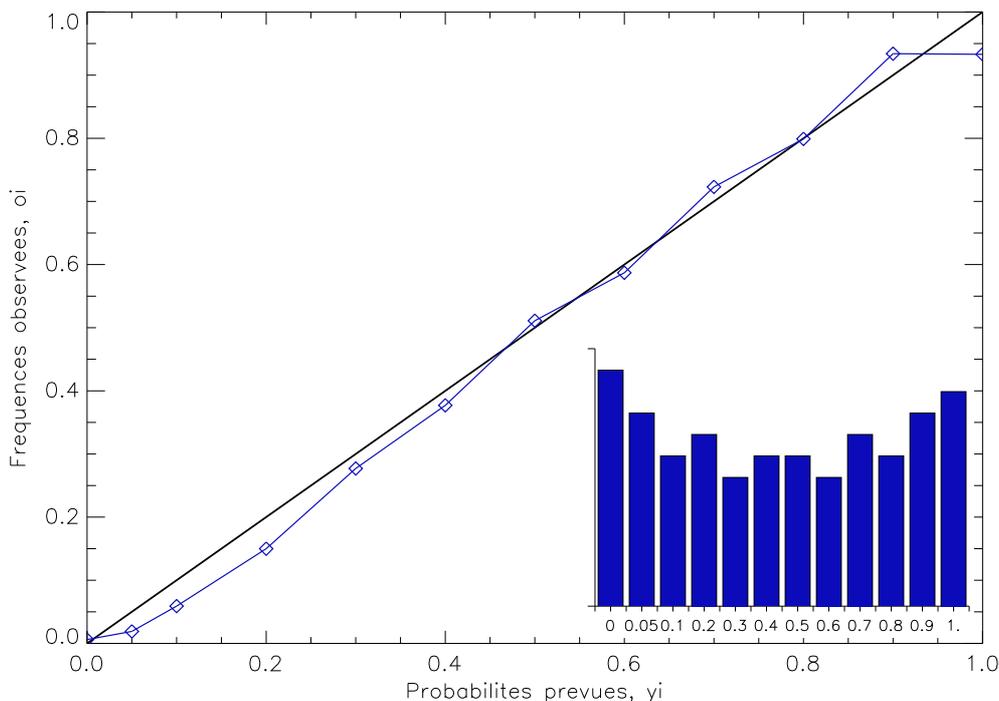


FIG. 3.2 – Diagramme de fiabilité (exemple), [WILKS 1995]

Le diagramme de fiabilité est simplement constitué du tracé des fréquences relatives observées de l'événement (les \bar{o}_i) en fonction des probabilités prévues (les y_i), ainsi que de la diagonale $y = x$,

complétés par un histogramme des fréquences d'utilisation de chaque valeur de probabilité y_i dans l'échantillon global de vérification (c'est-à-dire le nombre de fois où l'événement a été prévu avec la probabilité y_i).

Ce diagramme est moins chargé que le diagramme d'attributs, ce qui permet une meilleure mise en valeur de la fiabilité et des fréquences d'utilisation des probabilités.

3.3.5 Le Ranked Probability Score (RPS) et Skill Score associé (RPSS)

Le Ranked Probability Score (RPS) ([EPSTEIN 1969], [WILKS 1995]) est une extension du Score de Brier, moins couramment utilisé. Il permet d'envisager non plus un événement de type dépassement de seuil mais de qualifier les prévisions d'ensemble sur toute la gamme de valeur du paramètre considéré. Une des caractéristiques de ce score est d'être sensible à la distance, c'est-à-dire de donner un plus mauvais score aux prévisions les plus éloignées de l'observation. Ce score consiste en le calcul d'une erreur quadratique (avec la valeur 1 lorsque l'événement est observé, et 0 sinon), et utilise les probabilités prévues cumulées.

Pour définir ce score, on utilise les notations suivantes :

On considère que la prévision se répartit en J catégories. Par exemple, pour une prévision de température on pourrait avoir $J=3$ catégories : anomalie chaude, neutre, anomalie froid.

Pour chaque prévision d'ensemble, une probabilité prévue est associée à chaque catégorie : pour notre exemple on pourrait avoir $y_1 = 0.2$, $y_2 = 0.4$, $y_3 = 0.4$.

On construit également un vecteur de J composantes pour l'observation : on attribue la valeur 1 à la catégorie dans laquelle l'événement est observé, et 0 aux $J-1$ autres catégories. Par exemple, $o_1 = 0$, $o_2 = 0$, et $o_3 = 1$.

On note également pour la "prévision cumulée" et "l'observation cumulée" :

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

et

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

Y_m et O_m étant des fonctions cumulées de vecteurs de probabilités dont la somme des composantes doit par définition être égale à 1, on a $Y_J = 1$ et $O_J = 1$.

Le RPS est alors défini comme la somme des écarts quadratiques des différentes composantes de prévision cumulée et d'observation cumulée :

$$RPS = \sum_{m=1}^J (Y_m - O_m)^2$$

Soit en utilisant les composantes des vecteurs de prévision et d'observations y_j et o_j :

$$RPS = \sum_{m=1}^J \left[\left(\sum_{j=1}^m y_j \right) - \left(\sum_{j=1}^m o_j \right) \right]^2$$

Une prévision parfaite attribuerait la probabilité 1 à la seule catégorie correspondant à l'événement, ce qui conduirait à des vecteurs de prévision et d'observation identiques, et à un $RPS = 0$. Les prévisions imparfaites ont quant à elles des RPS positifs.

L'équation donnée ci-dessus permet seulement de calculer le RPS d'une seule paire prévision d'ensemble-observation. Pour un nombre n de prévisions, le RPS global est simplement la moyenne des RPS individuels :

$$\overline{RPS} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n RPS_k$$

De même que dans le cas du score de Brier, on peut définir un Skill Score associé au RPS :

$$RPSS = 1 - \frac{\overline{RPS}}{RPS_{ref}} \quad (- \infty \leq RPSS \leq 1; \text{orienté positivement})$$

La référence est souvent la climatologie.

3.3.6 Diagramme de Talagrand ou diagramme de rang

Principe

Les diagrammes de Talagrand (ou de rang) sont obtenus en comptant le rang de la vérification (souvent une observation) parmi les valeurs de l'ensemble des prévisions classées par ordre croissant, et ce de façon répétitive pour tous les couples vérification/ensemble ([HAMILL 2000], [HAMILL and COLUCCI 1997] et [HAMILL and COLUCCI 1998]).

Interprétation

Idéalement, une propriété souhaitée pour un ensemble est la fiabilité des prévisions : c'est à dire que si l'ensemble prévoit une probabilité p pour un phénomène un nombre m de fois, le phénomène doit réellement avoir cette fréquence d'occurrence parmi les m cas. Cette caractéristique de fiabilité revient à admettre que l'ensemble des valeurs prévues et la vérification peuvent être considérée comme des échantillons aléatoire de la même distribution de probabilité. Ceci implique que lorsque l'on place dans un vecteur de taille $n + 1$ les n valeurs de l'ensemble et la vérification classées par ordre croissant, il est équiprobable de trouver la vérification à chacune des $n + 1$ places possibles.

En comptant le rang de la vérification pour un certain nombre de cas indépendants, on doit donc obtenir un histogramme du nombre de cas pour chaque rang plat (figure 3.3).

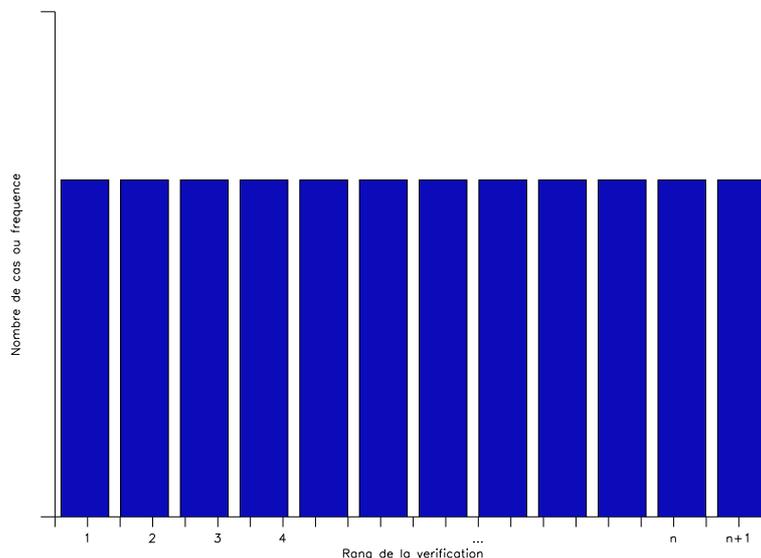


FIG. 3.3 – Diagramme de rang dans le cas de prévisions parfaitement fiables

Dans le cas général, l'histogramme de rang permet de qualifier certaines propriétés de l'ensemble.

Quand l'ensemble est issu d'une distribution qui manque de variabilité, on obtient un diagramme en U. A l'inverse, un excès de variabilité se traduit par une surpopulation des rangs médians. Un biais positif (négatif) conduit à une surpopulation des rangs extrêmes à gauche (droite) du diagramme (forme en L (J)).

Cependant, l'histogramme de rang ne permet pas de qualifier la résolution, il doit donc être associé à d'autres outils de vérifications tels le score de Brier ou les diagrammes d'attributs et de fiabilité pour obtenir une vue plus complète de la qualité de l'ensemble.

Néanmoins, l'interprétation des diagrammes de rang n'est pas forcément aussi aisée ([HAMILL 2000]). Un diagramme plat n'est par exemple pas nécessairement une garantie de fiabilité, tout comme un diagramme en U qu'on associe en général à un manque de dispersion peut parfois être signe d'un biais conditionnel, et ce par exemple à cause de problèmes d'échantillonnage dans la sélection des paires vérification/ensemble utilisées pour la construction du diagramme. De plus, la plupart des centres opérationnels ne produisent pas des ensembles qui sont issus aléatoirement de la même distribution que la réalité, mais utilisent certaines conditions ou hypothèses. Ainsi, le CEP utilise la méthode des vecteurs singuliers, qui force l'ensemble dans les directions de plus forte croissance des perturbations. Ceci constitue en quelque sorte un échantillonnage non-aléatoire dans lequel les extrêmes sont sélectionnés plus souvent que le centre de la distribution. Dans de telles conditions, l'interprétation des diagrammes de rang n'est pas toujours claire ([HAMILL 2000]).

Cas particulier : Détermination du rang quand la vérification est exactement égale à un ou plusieurs membres de l'ensemble (par exemple pas de précipitations prévues ni observées). Dans ce cas, il n'est pas possible de classer directement la vérification et les membres de l'ensemble par ordre croissant. Il existe une méthode développée par [HAMILL and COLUCCI 1997]. On commence par classer les éventuels membres de l'ensemble dont la valeur est strictement inférieure à la vérification. Ensuite, on compte le nombre M de membres égaux à la vérification. On applique une perturbation aléatoire à ces M membres et à la vérification, ce qui permet de classer la vérification perturbée parmi les M membres perturbés. On peut donc achever le classement de la totalité de l'ensemble, et déterminer le rang global de la vérification.

3.4 Taux de succès, fausses alarmes, non prévisions, courbes ROC

De façon similaire au cas d'une prévision déterministe, on peut définir pour un ensemble de prévision des taux de fausses alarmes, de non prévision, de bonnes prévisions et de succès. Pour cela, il faut choisir la façon de déterminer si l'événement pour lequel on souhaite calculer ces taux, a été prévu ou non par l'ensemble. On définit alors un pourcentage minimum P de membres de l'ensemble devant prévoir l'événement, pour le considérer comme prévu. Par exemple, on peut considérer que l'événement a été prévu si $P = 90\%$ des membres de l'ensemble l'ont prévu, ou 70% , ou encore 50% . On construit alors une table de contingence du type :

Événement	Observé	Non observé
Prévu	a	b
Non prévu	c	d

On définit :

- le taux de bonnes prévisions :

$$\text{taux de bonnes prévisions} = \frac{a + d}{a + b + c + d}$$

- le taux de succès ou taux de réussite : c'est une restriction du taux de bonnes prévisions qui ne tient pas compte de l'absence d'occurrence de l'événement, sur tous les cas où l'événement s'est produit, on compte le nombre de fois où il a été prévu :

$$\text{taux de succès} = \frac{a}{a + c}$$

- le taux de non prévision : sur tous les cas où l'événement s'est produit, on compte le nombre de fois où il n'a pas été prévu

$$\text{taux de non prévision} = \frac{c}{a + c}$$

- le taux de fausses alarmes : sur tous les cas où l'événement ne s'est pas produit, on compte le nombre de fois où il avait été (faussement) prévu :

$$\text{taux de fausses alarmes} = \frac{b}{b + d}$$

Dans le cas d'événements rares, le nombre de cas où l'événement ne s'est pas produit peut être très grand, et cette définition du taux de fausses alarmes peut conduire à 'noyer' les fausses alarmes.

On définit alors un pseudo-taux de fausses alarmes : on compte parmi tous les cas où l'on a prévu le phénomène, le nombre de fois où il ne s'est pas produit :

$$\text{p-taux de fausses alarmes} = \frac{b}{a + b}$$

Pour les événements rares, cette façon de faire le calcul est plus sévère, mais on obtient une information plus utile dans l'optique d'amélioration du système de prévision. C'est cette définition qui sera utilisée dans ce travail.

Les calculs des taux de réussite et des taux de fausses alarmes peuvent être rassemblés dans le tracé des courbes de ROC ([MARZBAN 2004]). Il s'agit de tracer les couples (taux de réussite, taux de fausses alarmes) obtenus pour différentes valeurs du pourcentage P (tracé du taux de réussite en fonction du taux de fausses alarmes) (exemple : figure 3.4).

Plus les courbes sont proches du coin haut gauche (fausses alarmes=0, réussite=1), plus l'ensemble est performant. De plus, ces courbes permettent une comparaison avec le modèle déterministe. En effet, on peut ajouter à la courbe ROC le taux de fausses alarmes et le taux de réussite du modèle déterministe, et si le point obtenu est sous la courbe, le modèle déterministe est moins performant que l'ensemble (et inversement).

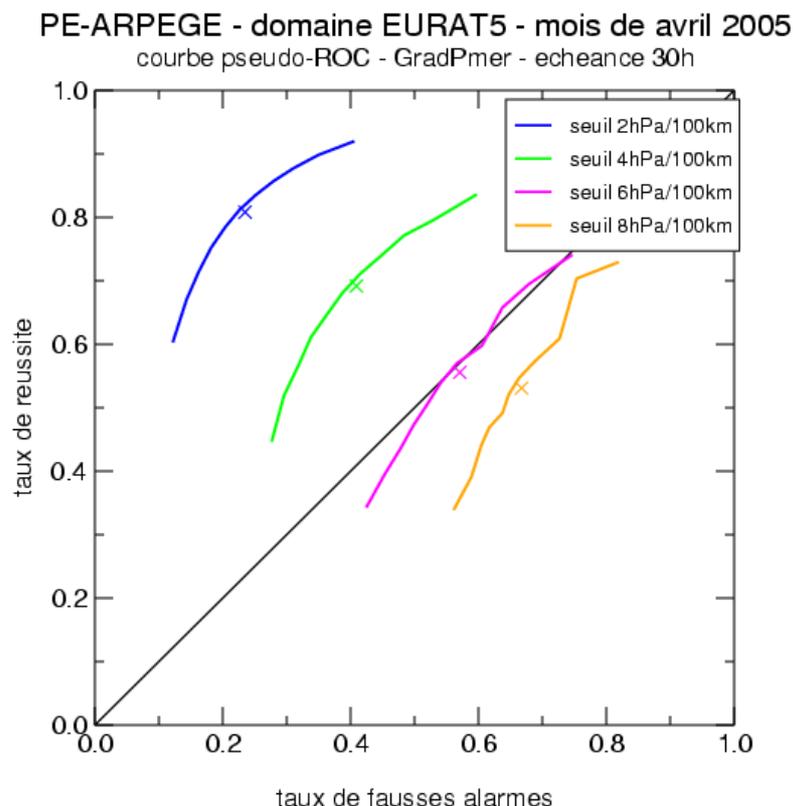


FIG. 3.4 – Courbe de ROC obtenue par la prévision d'ensemble ARPEGE, au mois d'avril 2005, pour le paramètre de gradient de pression au niveau de la mer, à échéance 30h, pour différents seuils ; les croix correspondent aux performances du modèle déterministe ARPEGE ; source : Météo-France, <http://previsibilite.meteo.fr/>

Chapitre 4

Analyse statistique de la qualité des prévisions d'ensemble de précipitations du CEP désagrégées

Comme première étape de la validation statistique des performances du système de prévision d'ensemble des débits, j'ai réalisé une analyse statistique des données d'entrée du système que sont les prévisions d'ensemble du CEP désagrégées (la méthode de désagrégation spatiale est décrite au chapitre 2). La période retenue pour cette première étude couvre près d'un an, du 4 septembre 2004 au 31 juillet 2005. La référence pour cette validation est l'analyse SAFRAN sur la même période. Les outils statistiques utilisés sont ceux décrits au chapitre 3.

Dans un premier temps, l'analyse est faite pour l'ensemble de la France (paragraphe 4.1), ensuite, des résultats détaillés par grandes régions françaises sont présentés (paragraphe 4.2).

4.1 Analyse statistique des prévisions d'ensemble de précipitations du CEP désagrégées sur la France

4.1.1 Scores de la moyenne de l'ensemble

Les figures 4.1 à 4.3 montrent l'évolution sur la période des cumuls journaliers de précipitations (en moyenne sur la France), issus de SAFRAN d'une part et prévus à chacune des 10 échéances d'autre part (par la moyenne de l'ensemble).

Sur chacun de ces graphiques, le cumul SAFRAN est représenté en pointillés rouge, et les cumuls prévus en traits plein, la couleur étant fonction de l'échéance. Les cumuls prévus à 1 jour d'échéance sont tracés en bleu, à 4 jours en vert, à 7 jours en jaune, et à 10 jours en rouge.

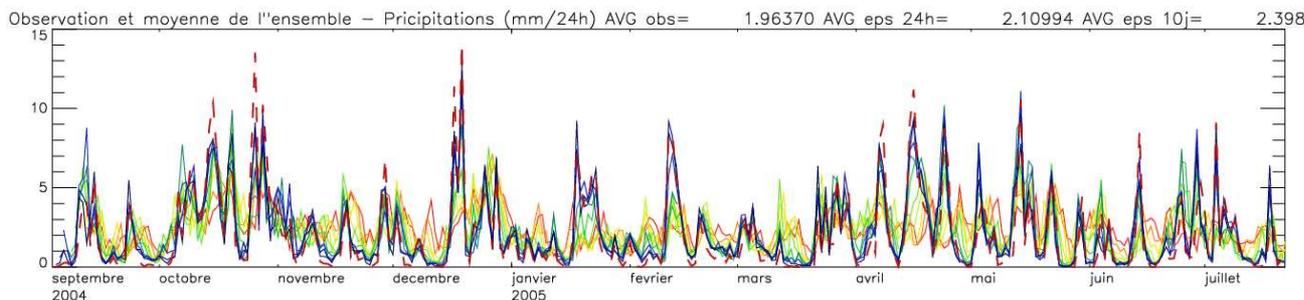


FIG. 4.1 – Evolution du cumul journalier de précipitations, issus de SAFRAN et prévus (en moyenne de l'ensemble) pour les 10 échéances;

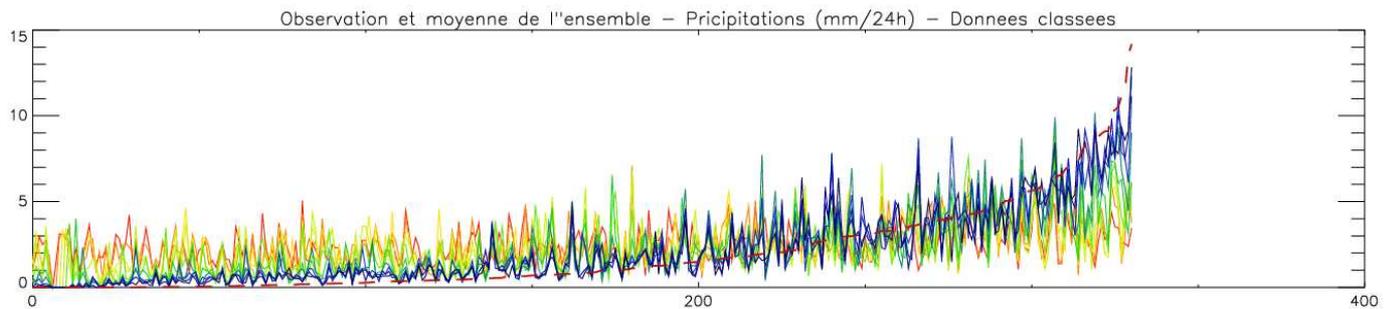


FIG. 4.2 – Cumuls journaliers de précipitations, issus de SAFRAN et prévus (en moyenne de l'ensemble) pour les 10 échéances, classés par valeurs croissantes des cumuls SAFRAN ;

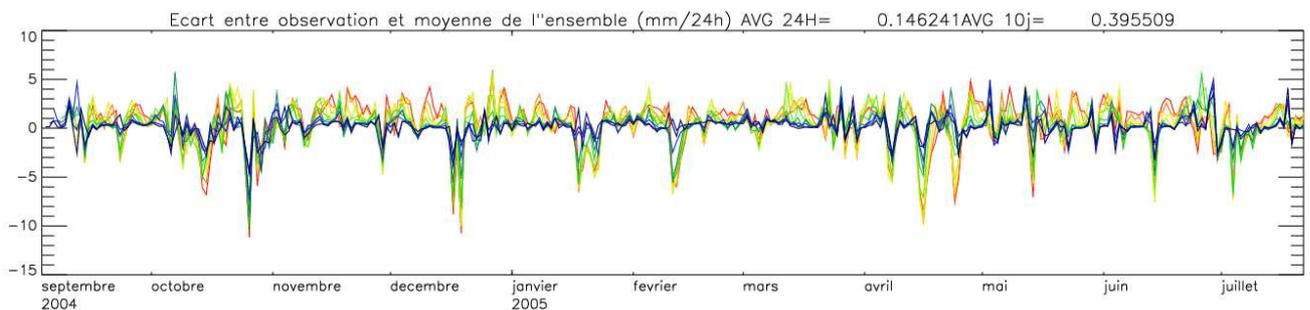


FIG. 4.3 – Evolution de l'écart journalier en $mm/24h$ entre SAFRAN et moyenne de l'ensemble de cumul journalier de précipitations.

On constate sur la figure 4.1 que les cumuls analysés par SAFRAN et prévus par la moyenne de l'ensemble sont assez proches à 24 heures, avec une moyenne sur la période de $1.96mm/24h$ pour SAFRAN et $2.11mm/24h$ pour l'ensemble, soit 7.7% d'écart. En revanche, l'écart augmente avec l'échéance de la prévision, pour arriver à échéance de 10 jours à un écart moyen sur la période de 22.1 % ($2.398mm/24h$ prévus par la moyenne de l'ensemble).

La figure 4.2 montre qu'on a une sur-estimation des faibles précipitations, plus marquée quand l'échéance est grande. Ceci s'explique par le fait que dans les situations faiblement pluvieuses, il y a fréquemment des membres de l'ensemble plus 'extrêmes' qui prévoient de plus fortes précipitations. A l'inverse, les fortes précipitations sont plutôt sous-estimée, d'autant plus que l'échéance est grande.

Le figure 4.3 montre l'évolution sur la période de l'écart entre analyse SAFRAN et moyenne de l'ensemble. Cet écart varie de $-10 mm/24h$ à $5 mm/24h$, les fortes valeurs (en valeur absolues) sont liées aux fortes précipitations. On ne constate pas de cycle temporel, ce qui est vraisemblablement lié au caractère atypique de la période d'étude, l'hiver 2004/2005 ayant été très sec par rapport à la climatologie, et le cycle annuel de précipitations habituellement constaté étant moins marqué en 2004/2005.

Les figures 4.4 et 4.5 présentent l'évolution de l'EQM de la moyenne de l'ensemble sur la période, ainsi que l'EQM calculé pour le run de contrôle (qui est la simulation non perturbée), aux 10 échéances, la référence étant l'analyse SAFRAN.

L'EQM moyen sur la période (pour la moyenne de l'ensemble) varie de $2.7 mm/24h$ à 1 jour d'échéance à $3.9 mm/24h$ à 10 jours d'échéance. On ne constate pas de cycle saisonnier marqué, ce qui est peut être encore une fois lié à la spécificité de la période d'étude, avec un hiver 2004/2005 très sec.

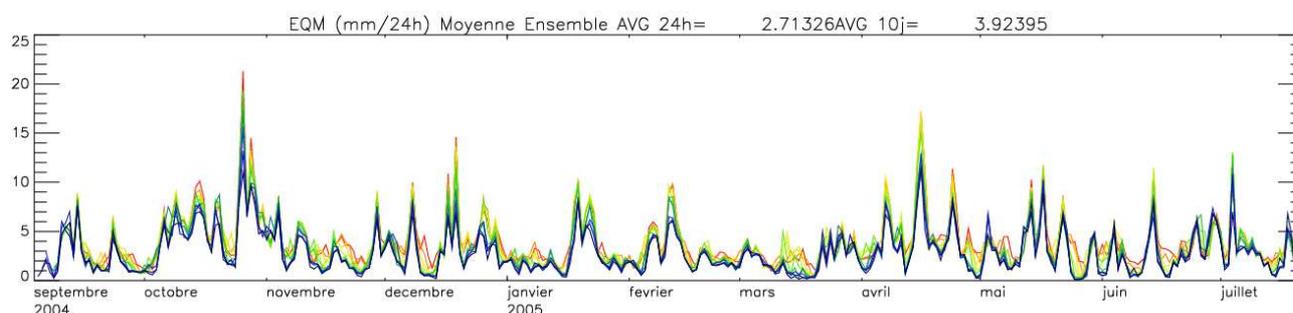


FIG. 4.4 – EQM du cumul journalier de précipitations entre la moyenne de l'ensemble et l'analyse SAFRAN (mm/24h)

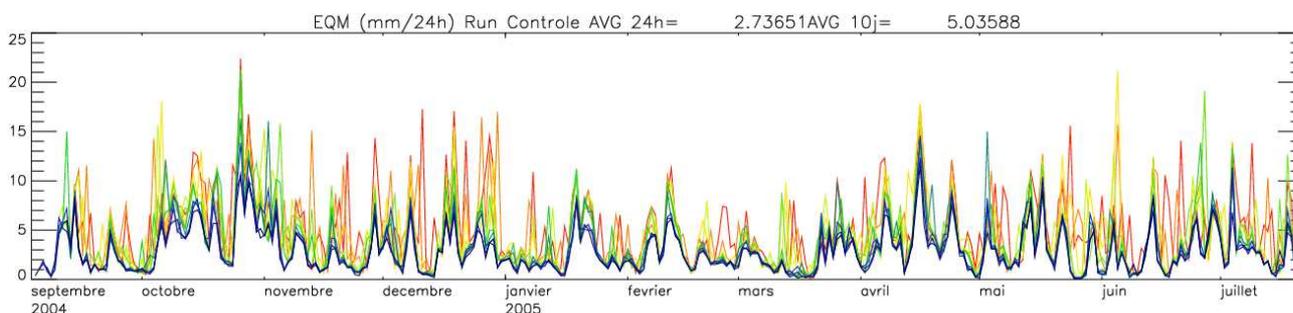


FIG. 4.5 – EQM du cumul journalier de précipitations entre le run de contrôle et l'analyse SAFRAN (mm/24h)

Comme le montre le tableau 4.1, à 1 jour d'échéance, les performances du run de contrôle et celles de la moyenne de l'ensemble sont comparables en terme d'EQM. En revanche, pour les échéances plus lointaines, l'EQM est nettement meilleur pour la moyenne de l'ensemble, on atteint 5.04 mm/24h pour le run de contrôle à 10 jours.

Echéance	Moyenne Ensemble	RUN CONTROLE	Différence (ME - CTRL)
1 J	2.71	2.73	-0.02
2 J	2.77	2.81	-0.04
3 J	2.93	3.07	-0.14
4 J	3.08	3.29	-0.21
5 J	3.24	3.61	-0.37
6 J	3.47	3.92	-0.45
7 J	3.63	4.19	-0.56
8 J	3.75	4.40	-0.65
9 J	3.86	4.75	-0.89
10 J	3.92	5.03	-1.11

TAB. 4.1 – EQM (en mm/24h) pour la moyenne de l'ensemble et pour le run de contrôle, différence entre l'EQM de la moyenne de l'ensemble et l'EQM du run de contrôle, en moyenne sur la période 4 sept 2004-31 juillet 2005

L'évolution de la dispersion au cours de la période est présentée figure 4.6, et sa valeur moyenne sur la période en fonction de l'échéance est donnée dans le tableau 4.2.

On constate que la dispersion est globalement de même ordre de grandeur que l'EQM. Néanmoins, elle est relativement faible aux premières échéances (1 et 2 jours). Elle augmente fortement dans les premiers jours : 44 % d'augmentation entre 1 jour et 2 jours, 29 % entre 2 et 3 jours. Ensuite, sa croissance reste modérée avec l'échéance, avec par exemple seulement 3 % entre 9 jours et 10 jours (tableau 4.2).

Ceci est lié à la nature même des prévisions d'ensemble du CEP, dont l'objectif est plutôt la prévision à moyenne échéance.

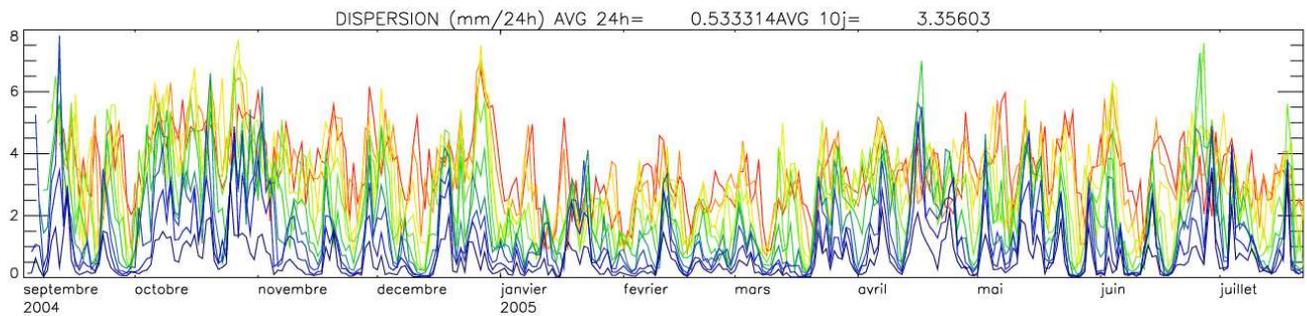


FIG. 4.6 – Dispersion du cumul journalier de précipitations ($mm/24h$) des prévisions d'ensemble désagrégées

Echéance	Dispersion moyenne	Augmentation par rapport à l'échéance précédente
1 J	0.53	
2 J	0.96	44.3 %
3 J	1.35	29.1 %
4 J	1.67	19.3 %
5 J	2.00	16.4 %
6 J	2.42	17.1 %
7 J	2.76	12.6 %
8 J	3.04	9.00 %
9 J	3.25	6.51 %
10 J	3.36	3.22 %

TAB. 4.2 – Dispersion ($mm/24h$) en moyenne sur la période, en fonction de l'échéance, et taux d'augmentation de la dispersion d'une échéance à la suivante

Enfin, on ne note pas de cycle saisonnier dans la dispersion, sans doute encore en raison du caractère atypique de la période d'étude.

4.1.2 Score de Brier - Fiabilité - Résolution

Le score de Brier permet de qualifier le comportement du système de prévision d'ensemble face à des événements binaires, de type dépassement de seuils. Ici, il a été calculé pour des dépassements de seuils de cumuls de précipitations (en moyenne sur la France) en 24h : 1, 5, 10 et 20 $mm/24h$. Les scores obtenus à chaque échéance sont tracés sur la figure 4.7.

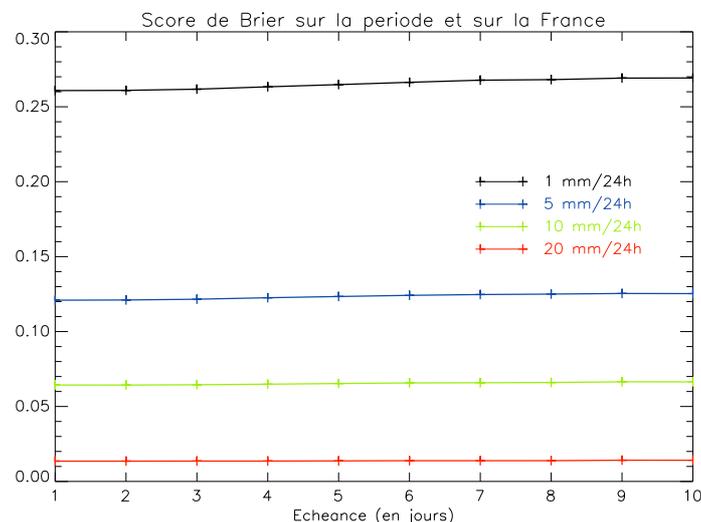


FIG. 4.7 – Score de Brier sur la période et sur la France

Pour chacun des seuils, les scores obtenus restent dans des plages de valeur tout à fait conformes à celles obtenues généralement par les prévisions d'ensemble du CEP non désagrégées et par les prévisions d'ensemble ARPEGE produites à Météo-France.

De plus, on note une légère augmentation du score avec l'échéance, ce qui indique une détérioration de la prévision aux échéances les plus lointaines. Ce sont en outre les seuils les plus élevés qui obtiennent les meilleurs scores, néanmoins il convient de prendre ces scores avec précautions en raison des problèmes d'échantillonnage qui y sont liés.

Le score de Brier peut se décomposer en la somme de trois termes : la fiabilité, la résolution et l'incertitude (Brier = fiabilité - résolution + incertitude) (voir chapitre 3). Les graphiques de la figure 4.8 présentent cette décomposition pour chaque échéance et pour les 4 seuils 1, 5, 10 et 20 mm/24h.

On constate que pour chacun des seuils, le terme d'incertitude (qui est indépendant du système de prévision et traduit la difficulté intrinsèque à prévoir l'événement sur la période d'étude) est prépondérant par rapport à la fiabilité et la résolution. Pour le seuil 20 mm/24h, il est même presque égal au score de Brier.

La fiabilité (que l'on souhaite la plus faible possible, pour minimiser le score de Brier) reste relativement faible et stable avec l'échéance, et ce pour chaque seuil, avec néanmoins une petite tendance à une valeur légèrement plus élevée dans les premières échéances.

La résolution (que l'on souhaite grande en valeur absolue) présente une nette tendance à diminuer avec l'échéance, quel que soit le seuil, ce qui montre que la qualité de l'ensemble décroît avec l'échéance.

Enfin, lorsque l'on compare l'ensemble de prévision et la climatologie (en terme de Skill Score de Brier), l'ensemble est meilleur que la climatologie quand la résolution est plus grande en valeur absolue que la fiabilité (chapitre 3). C'est les cas ici pour les seuils 5, 10 et 20 mm/24h, quelle que soit l'échéance (sauf à 10 jours pour les seuils 5 et 20 mm/24h).

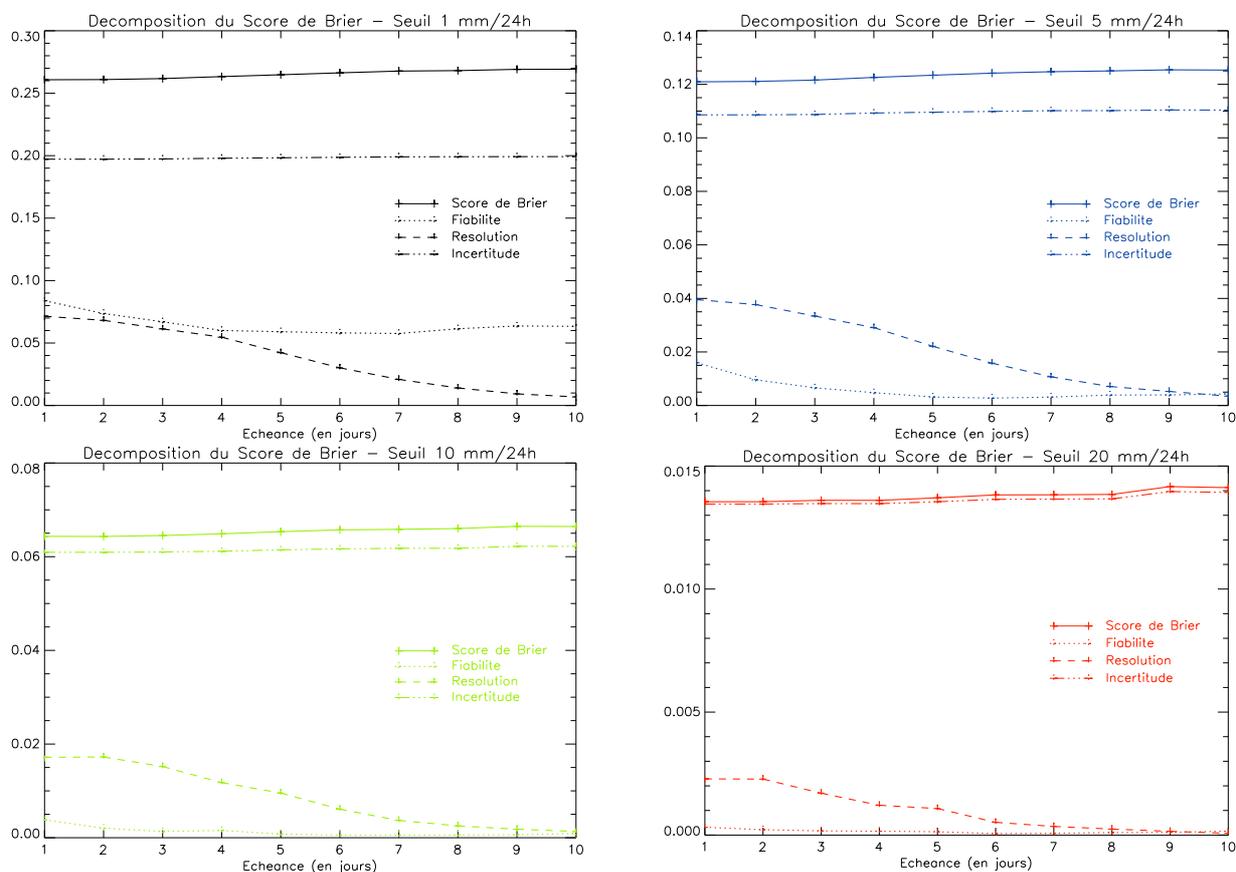


FIG. 4.8 – Décomposition du score de Brier en fiabilité, résolution et incertitude, pour les seuils 1, 5, 10 et 20 mm/24h, pour chaque échéance

4.1.3 Diagrammes de fiabilité

Les graphiques de la figure 4.9 présentent les diagrammes de fiabilité (colonne de gauche), pour les seuils 1, 5, 10 et 20 $mm/24h$, pour une échéance de 1 jour (en haut), 5 jours (au milieu) et 10 jours (en bas). Dans la colonne de droite, les histogrammes qui accompagnent les diagrammes de fiabilité présentent la fréquence d'utilisation de chaque classe de probabilité, pour chaque seuil et chaque échéance. Une fiabilité parfaite se traduirait par une courbe sur la diagonale, une courbe au-dessus (dessous) de la diagonale traduit une sous(sur)-estimation de la probabilité.

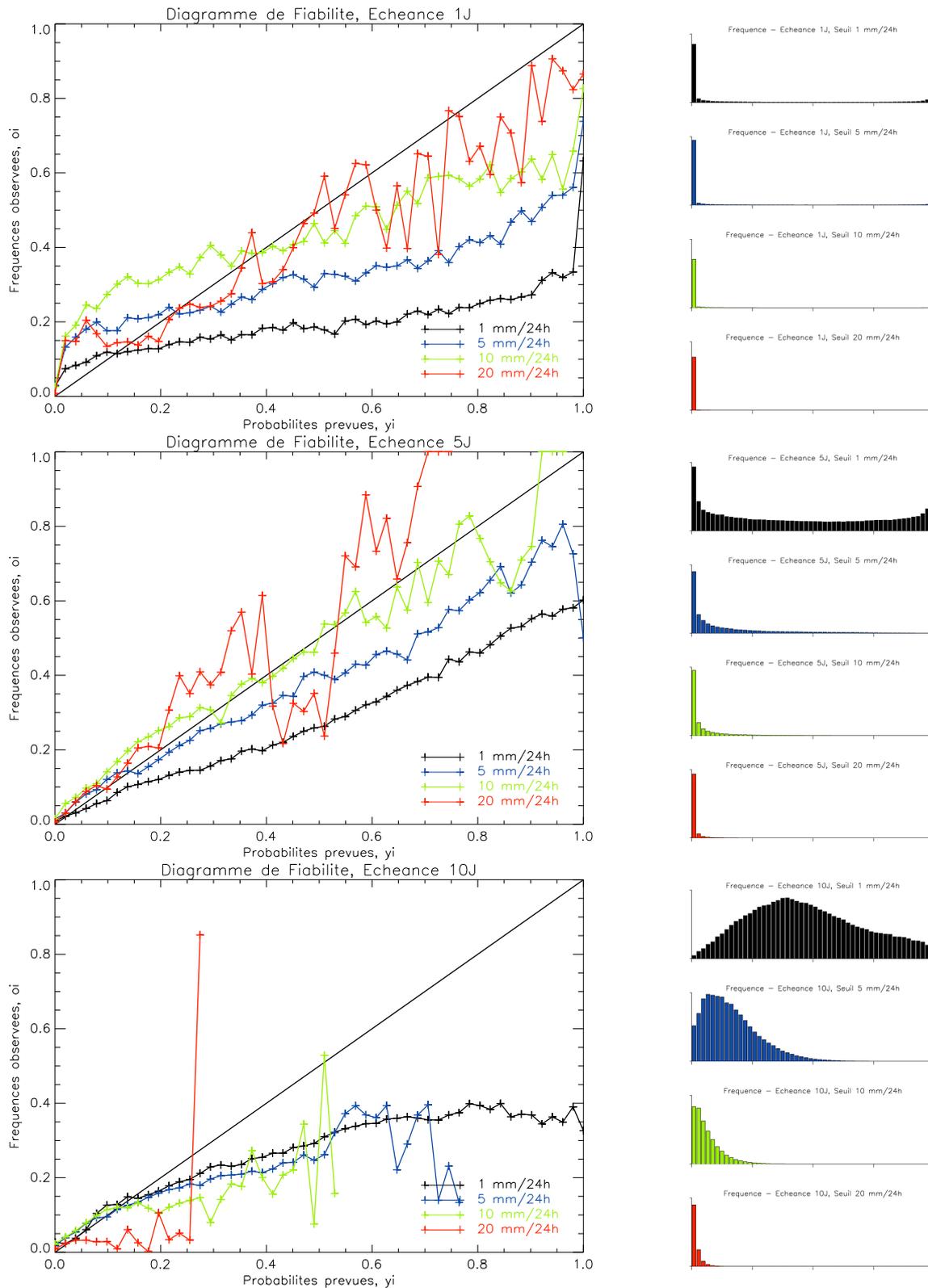


FIG. 4.9 – Diagrammes de fiabilité pour les seuils 1, 5, 10 et 20 $mm/24h$, et pour les échéances de 1, 5 et 10 jours

Le tracé de ces diagrammes de fiabilité se heurte à des problèmes d'échantillonnage, en effet pendant la période d'étude les cas de prévision comme les cas d'occurrence de dépassement des seuils sont relativement rares, en particulier pour les seuils élevés. Aux échéances 1 jour et 5 jours, le seuil $20 \text{ mm}/24\text{h}$ est le plus affecté par ce problème, les diagrammes restent relativement lisibles pour les autres seuils. Néanmoins, il faut les interpréter avec prudence en raison de ce problème d'échantillonnage. A 10 jours d'échéance, le diagramme de fiabilité devient difficile à tracer.

A une échéance de 1 jour, l'histogramme des fréquences (à droite) montre que seules les faibles probabilités semblent utilisées (pour $1 \text{ mm}/24\text{h}$, la probabilité maximale est aussi beaucoup utilisée, mais pas les probabilités intermédiaires), ce qui semble traduire une faible résolution. On constate sur ce diagramme qu'on a tendance à une sous-estimation des faibles probabilités, et à une sur-estimation pour les fortes probabilités.

A 5 jours d'échéance, les résultats semblent meilleurs qu'à 1 jour, avec des courbes qui sont plus proches de la diagonale, ce qui traduit une meilleure fiabilité. Ceci est vraisemblablement lié à la nature des prévisions d'ensemble du CEPMMT, faites pour la moyenne échéance. On a toujours une sur-estimation des fortes probabilités, mais la sous-estimation des faibles probabilités est très atténuée. De plus, les histogrammes de fréquences montrent que l'ensemble utilise une gamme de probabilités un peu plus large. On retrouve ici le caractère moyenne échéance de la prévision d'ensemble du CEP.

Enfin, à 10 jours d'échéance, on a une bonne fiabilité pour les faibles probabilités, excepté pour le plus grand seuil de cumul de précipitations, le reste du diagramme est plus difficile à interpréter en raison des limitations dues à l'échantillonnage.

4.1.4 Taux de réussite, de fausses alarmes, de non prévisions

De même que pour le score de Brier, on s'intéresse ici à des événements de type "dépassement de seuils" de cumul journalier de précipitations.

Afin de construire des tables de contingences et de calculer ces taux (voir chapitre 3), on retient trois valeurs de pourcentage des membres de l'ensemble devant prévoir l'événement pour qu'il soit considéré comme prévu : 90 %, 70 %, et 50 %. En raison de l'échantillonnage, il arrive que l'événement n'ait pas été prévu ou pas observé, les taux (non calculables) ne sont alors pas tracés dans les graphiques.

On synthétise les résultats dans les graphiques suivants, figures 4.10 à 4.13. Chaque graphique concerne un événement, et présente les taux de fausses alarmes et de non prévision, pour les trois pourcentages.

Les deux premiers graphiques (figures 4.10 et 4.11) présentent les résultats des précipitations journalières par maille (la maille ISBA de 8 km correspond à la résolution spatiale moyenne du réseau de pluie), les événements considérés sont du type : le cumul de précipitations en 24h d'une maille donnée pour une certaine date et prévu à 3 jours d'échéance est supérieur à 5 mm. Le nombre de cas total utilisé pour construire la table de contingence est relativement important, c'est le nombre de jours de la période d'étude multiplié par le nombre de mailles (9892 mailles). Néanmoins, malgré ce grand nombre de cas, il est difficile de produire des résultats concernant les fortes précipitations, qui sont très rares sur la période considérée.

Dans le cas d'une faible précipitations (inférieures à $1 \text{ mm}/\text{jour}$ par maille), la figure 4.10 montre que la prévision d'ensemble présente un taux très faible de fausses alarmes. En effet, il vaut environ 5 % le premier jour de prévision, il atteint 20 % à deux jours d'échéance, puis il reste en dessous de 25 % jusqu'à 10 jours, et ce pour les 3 pourcentages considérés. Le taux de non prévisions est plus élevé, si pour le premier jour il reste entre 30 et 40 %, ensuite il varie fortement selon le pourcentage de membres de l'ensemble considérés. Il augmente jusqu'à 95 % à 10 jours d'échéance pour le pourcentage 90 %, il atteint 70 % pour le pourcentage 70 %, et il reste inférieur à 40 % pour le pourcentage 50 %. Néanmoins, ce graphique traduit une capacité importante et valorisable

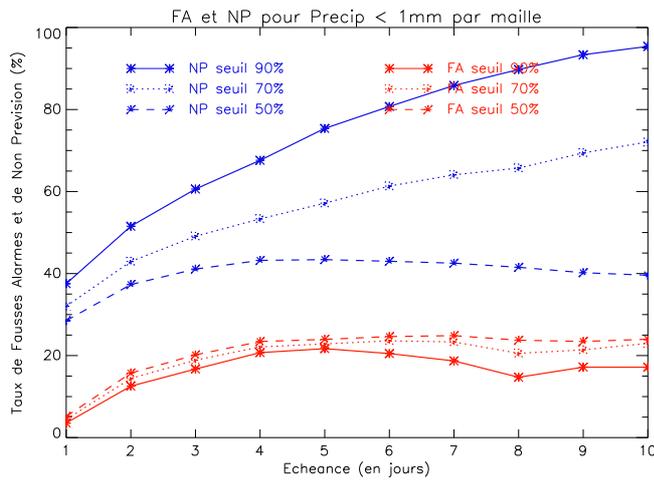


FIG. 4.10 – *Fausses alarmes et non prévisions pour des précipitations journalières inférieures à 1 mm/jour, par maille ISBA.*

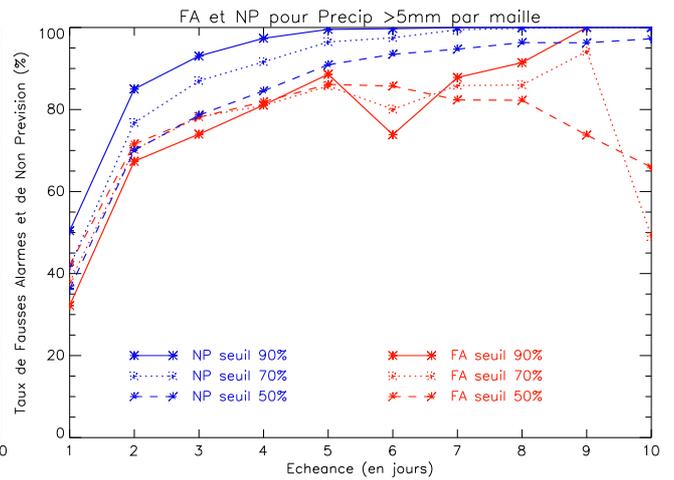


FIG. 4.11 – *Fausses alarmes et non prévisions pour des précipitations journalières supérieures à 5 mm/jour, par maille ISBA.*

de l'ensemble pour la prédiction des faibles débits et de la durée des étiages, avec un taux de fausses alarmes très faible.

En ce qui concerne les fortes précipitations, la rareté de ce type d'événement pendant la période d'étude conduit à des résultats vraisemblablement marqués par ces limitations d'échantillon. La figure 4.11 présente les résultats obtenus pour un seuil de précipitations de 5 mm/jour. Les caractéristiques de l'ensemble sont moins bonnes, en effet si les taux de fausses alarmes et de non prévisions sont voisins de 40 % à la première échéance, ils augmentent ensuite rapidement pour atteindre des valeurs assez élevées. Ceci est vraisemblablement lié d'une part à la tendance de l'ensemble à sous-estimer les fortes pluies, surtout à longue échéance, et d'autre part à la particularité de la période d'étude, très sèche, et pour laquelle le calcul des scores des fortes précipitations est limité par des problèmes d'échantillonnage (le seuil 5 mm/jour est une valeur assez extrême sur cette période d'étude, pour laquelle la moyenne se situe aux alentours de 2 mm/jour).

Pour compléter ces résultats par maille, j'ai également calculé les taux de fausses alarmes et de non prévisions pour des événements de dépassement de seuils en moyenne sur la France. Le nombre de cas total utilisé ici pour construire la table de contingence est simplement le nombre de jours de la période d'étude, ce qui conduit à des limitations liées à la taille de cet échantillon, avec très peu d'événements de fortes précipitations. Il est difficile de calculer ces taux pour des seuils de précipitations dépassant quelques mm/jour.

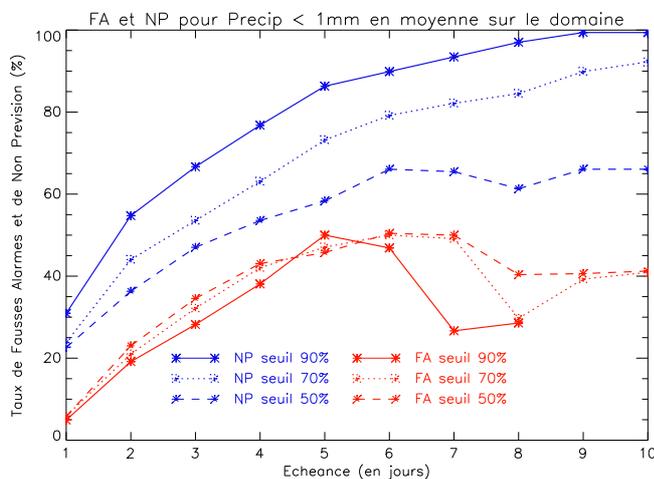


FIG. 4.12 – *Fausses alarmes et non prévisions pour des précipitations journalières en moyenne sur la France inférieures à 1 mm/jour.*

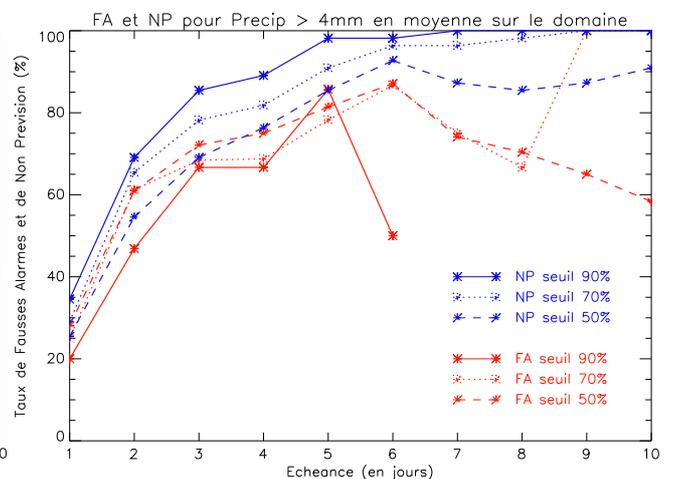


FIG. 4.13 – *Fausses alarmes et non prévisions pour des précipitations journalières supérieures à 4 mm en moyenne.*

Pour les faibles précipitations, la figure 4.12 montre que l'ensemble est capable de prévoir ce type d'événement avec un taux de fausses alarmes relativement faible. En effet, ce taux est d'environ 5 % à 1 jour d'échéance, 20 % à 2 jours, et son maximum est d'environ 45 %, et ce pour les trois pourcentages de membres de l'ensemble considérés. Les taux de non prévisions est un peu plus élevé et variable avec le pourcentage de membres, comme c'était le cas pour l'étude par mailles. Néanmoins, cette capacité de l'ensemble pour la prévision des faibles précipitations est tout à fait notable, et intéressante en vue de la prévision des étiages et de leur durée.

4.2 Analyse statistique des prévisions d'ensemble de précipitations du CEP désagrégées pour différentes grandes régions françaises

Les scores statistiques précédemment utilisés sur la France ont aussi été calculés sur plusieurs grandes régions françaises, afin de qualifier le comportement du système de prévision d'ensemble en fonction de la région. La carte suivante montre le découpage qui a été mis en place (issu de [HABETS et al. 2007]) :

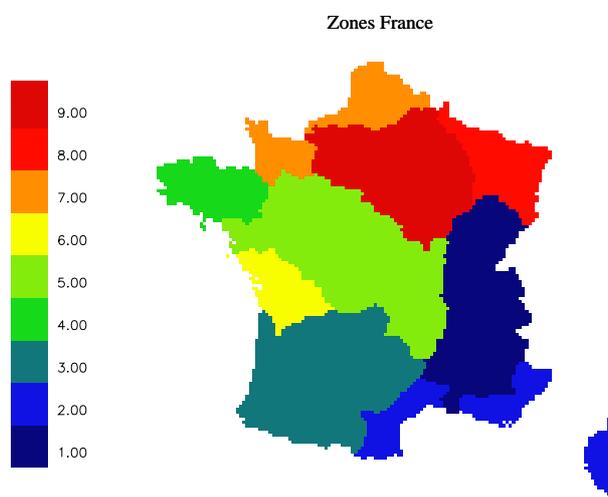


FIG. 4.14 – Zonage sur la France utilisé pour l'étude statistique par grandes régions françaises [HABETS et al. 2007]

La France est divisée en 9 régions qui correspondent pour certaines à de grands bassins versants :

- bassin 1 : le Rhône
- bassin 2 : le Sud Est méditerranéen
- bassin 3 : l'Adour Garonne
- bassin 4 : la Bretagne
- bassin 5 : la Loire
- bassin 6 : la Charente
- bassin 7 : le Nord et la Normandie
- bassin 8 : le Nord Est
- bassin 9 : la Seine.

Connaître le comportement des prévisions d'ensemble de précipitations désagrégées sur ces régions permettra de mieux comprendre les prévisions d'ensemble de débits pour les différents fleuves et rivières de France.

4.2.1 Scores de la moyenne de l'ensemble

Les figures 4.15 et 4.16 présentent pour chaque région l'EQM et la dispersion en fonction de l'échéance (EQM et dispersion du cumul journalier de précipitations, avec l'analyse SAFRAN

comme référence).

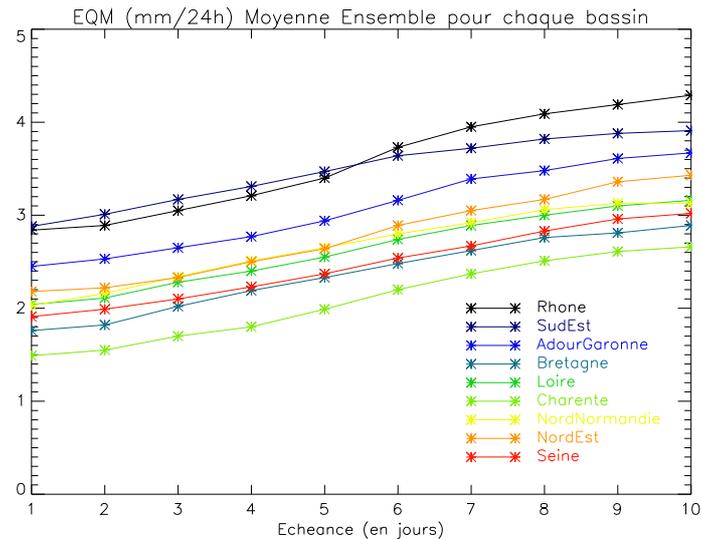


FIG. 4.15 – EQM ($mm/24h$) du cumul journalier de précipitations de la moyenne de l'ensemble (par rapport à l'analyse SAFRAN), en fonction de l'échéance de la prédiction

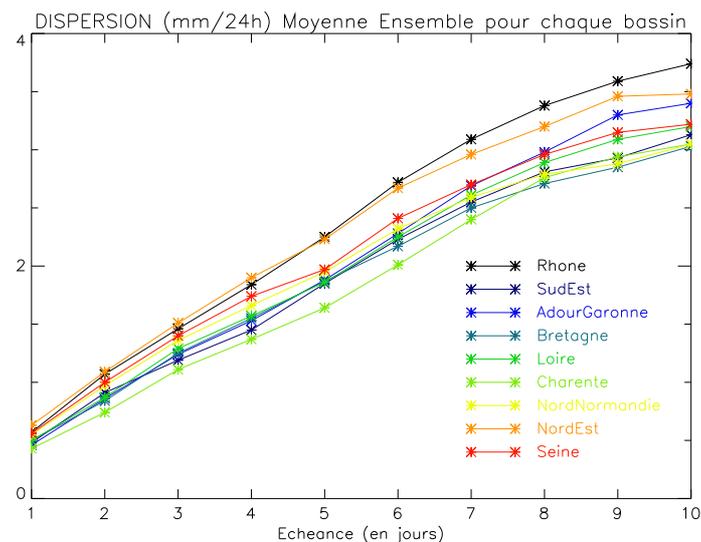


FIG. 4.16 – Dispersion ($mm/24h$) de l'ensemble de prédiction de cumul journalier de précipitations en fonction de l'échéance de la prédiction

L'EQM varie presque du simple au double en fonction de la région. A un jour d'échéance, il s'échelonne de $1.5 mm/24h$ à $2.9 mm/24h$, et à 10 jours il varie de $2.6 mm/24h$ à $4.3 mm/24h$. Ce sont les régions du sud de la France qui ont les plus mauvais (grands) EQM : le Rhône, le Sud Est et dans une moindre mesure l'Adour Garonne. Le bassin de la Charente a un EQM nettement meilleur (plus faible) que les autres régions, à toutes les échéances. Les régions de la Bretagne, de la Seine et de la Loire ont également un EQM parmi les plus faibles.

La dispersion est pour toutes les régions du même ordre de grandeur que l'EQM. Comme c'était déjà le cas en moyenne sur la France, la dispersion de chaque région est relativement faible pour les premiers jours de prévisions. Elle est globalement plus forte pour les bassins du Rhône et du Nord Est, avec $0.6 mm/24h$ à un jour d'échéance et $3.5 mm/24h$ à 10 jours. Les dispersions des autres régions sont assez proches, avec néanmoins une dispersion plus faible pour le bassin de la Charente des échéances 1 à 7 jours.

4.2.2 Score de Brier - Fiabilité - Résolution

Les scores de Brier ont été calculés pour chaque région, pour des événements de dépassement de seuil de cumul journalier de précipitations, de 1 à 10 jours d'échéance. Les seuils de cumuls journaliers choisis sont $1\text{ mm}/24h$, $5\text{ mm}/24h$, $10\text{ mm}/24h$ et $20\text{ mm}/24h$, en moyenne sur chaque région.

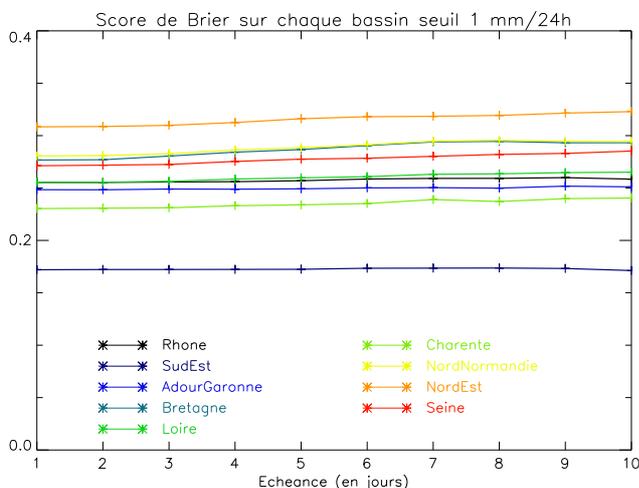


FIG. 4.17 – Score de Brier pour chaque région en fonction de l'échéance, pour le dépassement du seuil $1\text{ mm}/24h$;

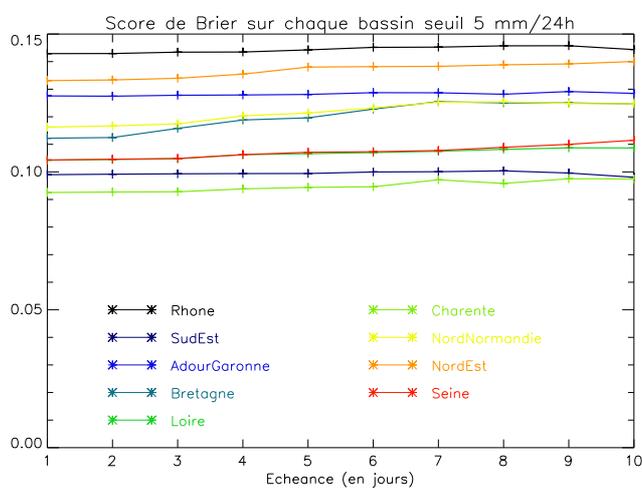


FIG. 4.18 – Score de Brier pour chaque région en fonction de l'échéance, pour le dépassement du seuil $5\text{ mm}/24h$;

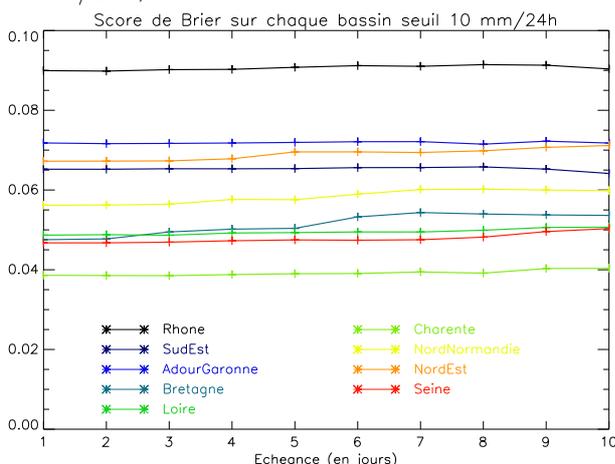


FIG. 4.19 – Score de Brier pour chaque région en fonction de l'échéance, pour le dépassement du seuil $10\text{ mm}/24h$;

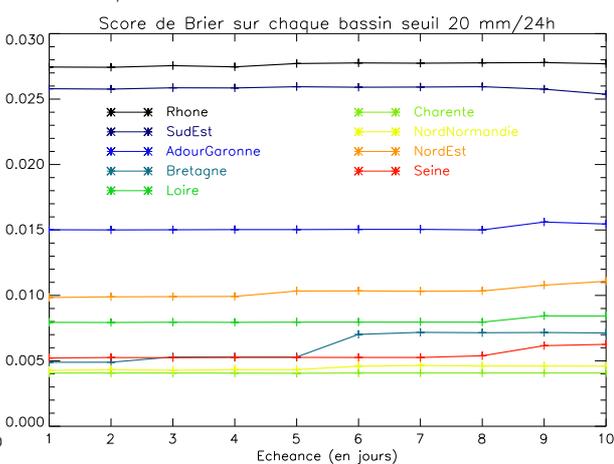


FIG. 4.20 – Score de Brier pour chaque région en fonction de l'échéance, pour le dépassement du seuil $20\text{ mm}/24h$;

Les scores de Brier obtenus par région sont relativement proches des scores obtenus sur l'ensemble de la France : environ 0.26 pour $1\text{ mm}/24h$, 0.12 pour $5\text{ mm}/24h$, 0.06 pour $10\text{ mm}/24h$ et 0.015 pour $20\text{ mm}/24h$. Ils sont là encore meilleurs (plus faibles) pour les plus grands seuils de précipitations.

Selon le seuil de précipitations, ce ne sont pas toujours les mêmes régions qui obtiennent les meilleurs (plus faibles) scores de Brier. Néanmoins, les bassins de la Charente, du Sud Est et de la Seine ont globalement des scores de Brier parmi les meilleurs (sauf pour le Sud Est pour le seuil $20\text{ mm}/24h$), et les régions du Rhône, du Nord Est et de l'Adour Garonne ont des scores parmi les moins bons.

En décomposant pour chaque bassin le score de Brier en fiabilité, résolution et incertitude, comme on l'a fait pour la France, on peut en particulier déterminer si la prévision d'ensemble apporte plus d'informations que la climatologie (c'est le cas si la résolution est plus grande en valeur absolue que la fiabilité, voir chapitre 3). Le tableau 4.3 présente pour chaque région et rappelle pour la France l'échéance de prévision jusqu'à laquelle l'ensemble est plus informatif que la clima-

tologie, pour le dépassement de trois seuils de précipitations journalières : 5 mm/24h, 10 mm/24h et 20 mm/24h.

Bassin	5 mm/24h	10 mm/24h	20 mm/24h
Rhône	10J	10J	9J
Sud Est	10J	10J	9J
Adour Garonne	10J	10J	5J
Bretagne	9J	7J	6J
Loire	7J	10J	9J
Charente	7J	7J	6J
Nord Normandie	8J	8J	6J
Nord Est	9J	10J	9J
Seine	7J	8J	6J
France entière	9J	10J	9J

TAB. 4.3 – Pour chaque région et pour chaque seuil de cumul de précipitations, échéance jusqu'à laquelle la prévision d'ensemble est plus informative que la climatologie.

Pour tous les seuils, les résultats sont relativement satisfaisants. L'ensemble est plus informatif que la climatologie pour des échéances qui vont de 6 à 10 jours. Sur la Loire, la Charente et la Seine, cette échéance est un peu plus courte que pour les autres bassins. Pour le Rhône ou le Nord Est, cette échéance limite est plus lointaine, de 9 à 10 jours selon les seuils. Sur l'ensemble de la France, la prévision d'ensemble est une meilleure prévision que la climatologie jusqu'à 9 ou 10 jours d'échéance, selon les seuils.

4.2.3 Diagrammes de fiabilité

Les diagrammes de fiabilité et les histogrammes de fréquence ont été tracés pour chaque région, pour chaque seuil de cumul journalier de précipitations (1, 5, 10 et 20 mm/24h), et pour chaque échéance de prévision de 1 à 10 jours.

Les figures 4.21 à 4.24 présentent les résultats obtenus pour le bassin du Rhône (en haut) et pour le bassin de la Seine (en bas). A gauche se trouvent les diagrammes de fiabilité, à droite les histogrammes de fréquence, pour les seuils 1, 5, 10 et 20 mm/24h, pour une échéance de 5 jours.

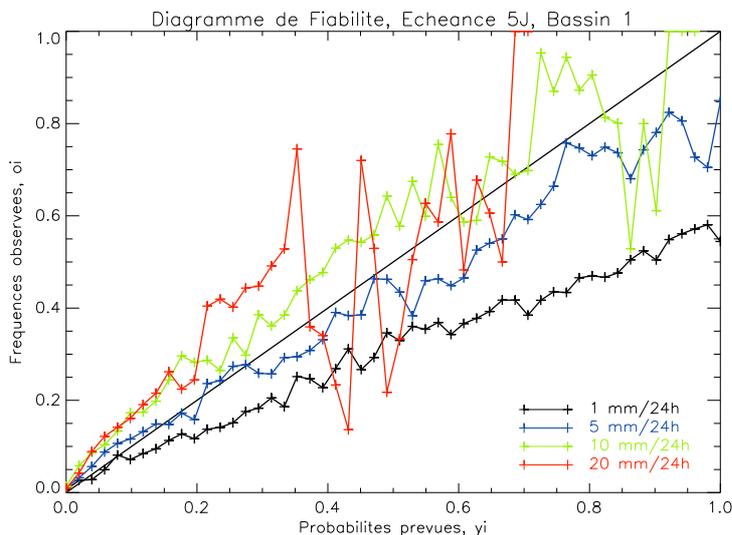


FIG. 4.21 – Diagramme de fiabilité pour le bassin du Rhône

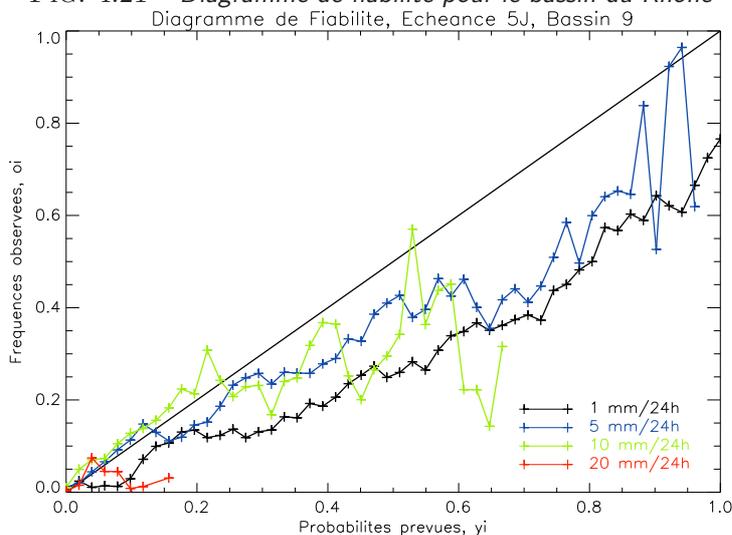


FIG. 4.23 – Diagramme de fiabilité pour le bassin de la Seine

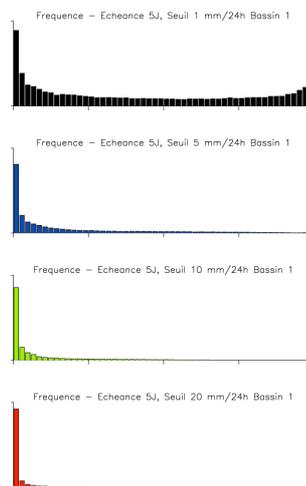


FIG. 4.22 – Diagrammes de fréquences pour le bassin du Rhône

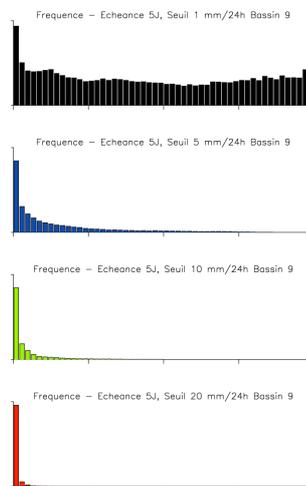


FIG. 4.24 – Diagrammes de fréquences pour le bassin de la Seine

Comme c'était le cas pour les tracés sur la France, le tracé des diagrammes de fiabilité se heurte à des problèmes d'échantillonnage, les fortes probabilités n'étant que peu utilisées, en particulier pour les plus grands seuils de précipitations, ce qui traduit également une résolution insuffisante. Ceci conduit à des limitations dans les tracés qui ne sont parfois pas complets, comme c'est le cas ici par exemple pour le bassin du Rhône.

Néanmoins, on constate aussi bien pour le Rhône que pour la Seine, que les courbes suivent relativement bien la diagonale pour les plus faibles probabilités, ce qui traduit une fiabilité correcte pour ces faibles probabilités. En revanche, quand on va vers les plus fortes probabilités, les courbes semblent s'éloigner de la diagonale, la fiabilité diminue. On a alors tendance à avoir des courbes sous la diagonale, ce qui traduit une sur-estimation des fortes probabilités.

4.2.4 Taux de réussite, de fausses alarmes, de non prévisions

Les taux de fausses alarmes et de non prévision ont été calculés pour chaque région, pour les trois pourcentages (90 %, 70 %, et 50 %) définissant la prévision ou non de l'événement de type "dépassement de seuil" (voir chapitre 3), et pour plusieurs seuils de cumul journalier de précipitations.

Sur les figures 4.25 à 4.28 sont présentés les résultats pour un cumul restant inférieur au seuil 1 mm/24h. Les taux de fausses alarmes et de non prévision sont tracés pour chaque région en fonction de l'échéance.

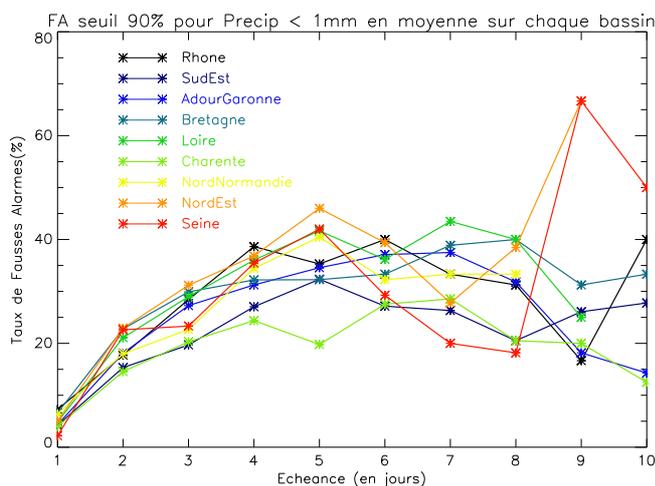


FIG. 4.25 – Taux de fausses alarmes (%), pour le pourcentage 90 %

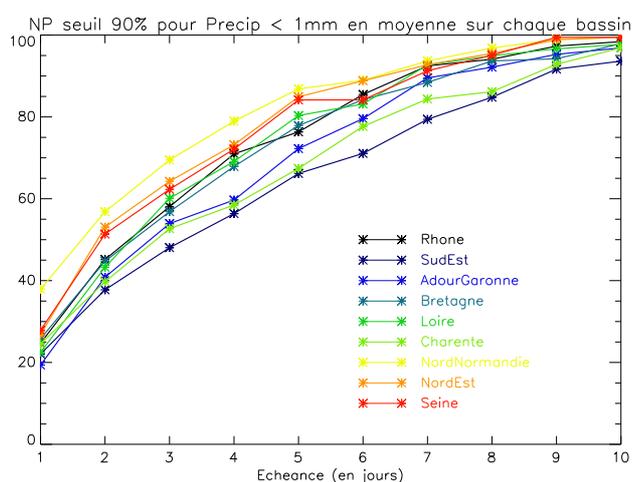


FIG. 4.26 – Taux de non prévision (%), pour le pourcentage 90 %

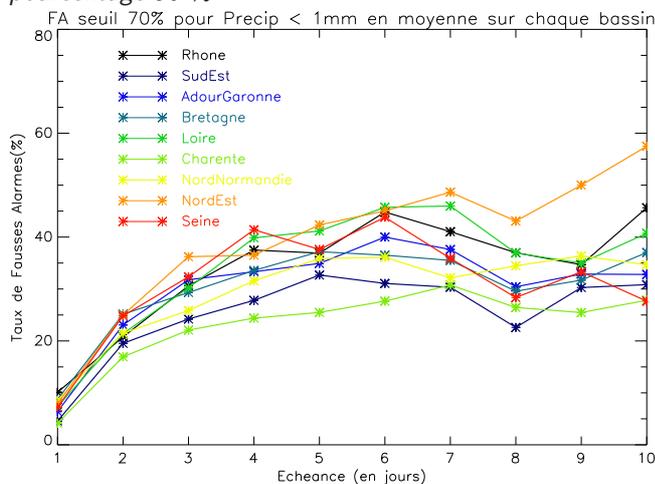


FIG. 4.27 – Taux de fausses alarmes (%), pour le pourcentage 70 %

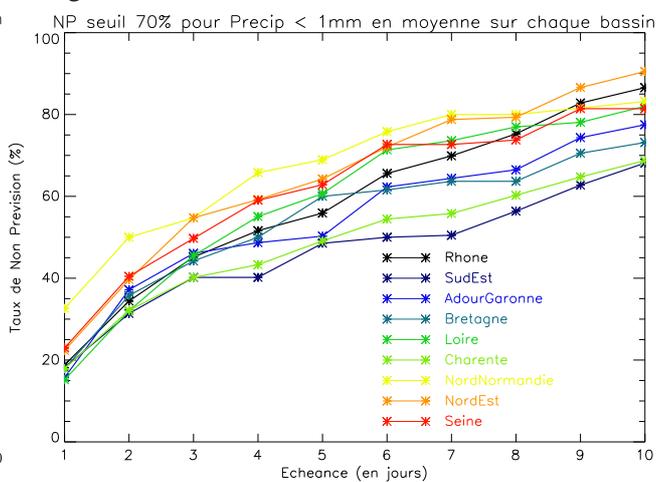


FIG. 4.28 – Taux de non prévision (%), pour le pourcentage 70 %

Les taux de fausses alarmes et de non prévisions de chaque région sont globalement proches des résultats obtenus sur la France.

En ce qui concerne les taux de fausses alarmes, les résultats sont très semblables, que l'on considère le pourcentage 90 % ou le pourcentage 70 %.

Les taux de fausses alarmes sont très faibles aux premières échéances, ils s'échelonnent de quelques pourcents à 1 jour d'échéance jusqu'à environ 20 % à deux jours. A 10 jours d'échéance, ils valent au minimum 20 % (bassin de la Charente), en moyenne environ 30 à 40 %, et au maximum environ 50 % (bassin du Nord Est).

On constate également que le bassin de la Charente et le bassin du Sud Est se distinguent par leur taux de fausses alarmes un peu plus faible que pour le reste des bassins. A l'inverse, la région du Nord Est a un taux souvent parmi les plus forts.

De plus, les taux de non prévision sont eux aussi assez proches pour les deux pourcentages 70

et 90%. A 1 ou 2 jours d'échéance, les taux de non prévision sont similaires et relativement faibles (environ 18 à 35 %). Néanmoins, on peut noter, pour les échéances les plus lointaines, des taux sensiblement plus élevés, quand on considère le pourcentage 90 %, avec à 10 jours un taux de non prévisions variant de 90 à 100 % suivant le bassin, contre 70 à 90 % avec le pourcentage 70 %. Même si les taux sont proches pour toutes les régions, on note quand même que les bassins du Sud Est et de la Charente ont les taux de non prévision les plus faibles, et à l'inverse ce sont les régions de Nord Normandie, Nord Est et Seine qui ont les taux les plus forts.

Ces quatre graphiques montrent que pour l'ensemble des régions de France, comme c'était aussi le cas en moyenne sur la France, la prévision d'ensemble présente des qualités tout à fait intéressantes pour les épisodes sans pluie et les sécheresses. En effet, même si le taux de non prévision est relativement élevé, en particulier à longue échéance, le taux de fausses alarmes est lui tout à fait limité, ce qui produit une information utilisable et valorisable pour divers utilisateurs (gestion de la ressource en eau, industries, etc.).

Enfin, étant donné le caractère particulièrement sec de la période d'étude, il est difficile de calculer des taux de fausses alarmes, non prévisions, etc. significatifs pour des événements de dépassement de seuils de fortes précipitations en moyenne sur les régions françaises.

4.3 Conclusion

Cette analyse statistique des prévisions d'ensemble de précipitation du CEP désagrégées met en évidence plusieurs caractéristiques particulièrement notables.

D'une part, 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. Néanmoins, l'ensemble tend à la sur estimation des faibles pluies, et à la sous estimation des événements de fortes pluies. Ces particularités seront utiles pour comprendre et analyser les prévisions d'ensemble de débits. De plus, la prévision d'ensemble constitue une meilleure prévision que la climatologie jusqu'aux dernières échéances.

On note toutefois une faiblesse dans la dispersion des membres de l'ensemble aux premières échéances (jusqu'à environ 2 jours). Ceci est lié à la nature des prévisions d'ensembles de précipitations produites par le CEP, dont l'objectif est bien plus la moyenne échéance (à partir de 3 jours environ) que les premières heures de prévision. Là encore, cette caractéristique est notable pour l'analyse des prévisions de débit.

Au vu de la période d'étude particulièrement sèche, il est relativement difficile de qualifier le comportement de l'ensemble pour les événements de fortes pluies. Néanmoins, l'ensemble est capable d'apporter une information pertinente pour les cas de faibles précipitations et de sécheresse, avec en particulier très peu de fausses alarmes sur les périodes sans pluies.

Les résultats statistiques obtenus pour 9 grandes régions françaises sont relativement proches, aucun bassin ne se distingue très clairement. Le bassin du Rhône et le Sud-Est de la France ont plusieurs scores un peu moins bons que sur les autres bassins. A l'inverse, plusieurs résultats statistiques sont meilleurs pour les bassins de la Seine, de la Loire, et de la Charente, que dans les autres régions.

Cette étude met en évidence des limites dans la méthode de désagrégation spatiale des précipitations, qui reste relativement simple, et qui pourrait être affinée. De plus, cette méthode n'agit pas sur les caractéristiques statistiques de l'ensemble, néanmoins il existe des outils qui permettent d'améliorer la fiabilité et la résolution, et qu'il serait envisageable d'appliquer aux prévisions d'ensemble de précipitations du CEP.

Enfin, il est très souhaitable de poursuivre cette étude statistique sur une période plus pluvieuse. L'année 2005/2006 est aussi sèche que l'année 2004/2005 utilisée pour cette étude, et les résultats statistiques obtenus pour ces deux années sont très comparables. La chaîne de prévision d'ensemble continuant à fonctionner en temps réel, il sera intéressant de compléter cette analyse avec les résultats statistiques de l'année 2006/2007. Néanmoins, il se pose alors le problème de l'influence des améliorations apportées régulièrement au système de prévision d'ensemble (en particulier, l'augmentation de la résolution en février 2006) sur l'évolution des résultats statistiques.

Chapitre 5

Analyse statistique de la qualité des prévisions d'ensemble de débit

La chaîne de prévision d'ensemble des débits fonctionne depuis septembre 2004. Après plusieurs mois de simulation continue, je disposais de suffisamment de données pour réaliser une étude statistique des performances du système (étude faite sur la période du 4 septembre 2004 au 31 juillet 2005).

De même que pour l'analyse des précipitations du CEP désagrégées (chapitre 4), les scores utilisés sont ceux définis dans le chapitre 3. L'analyse a été réalisée individuellement pour chacune des 900 stations simulées. Les résultats sont d'abord présentés en détails pour plusieurs grandes stations, puis une synthèse sur la France est effectuée.

Dans cette étude statistique, la référence qui est utilisée pour le calcul des scores n'est pas le débit observé, mais le run SIM de référence (run SIM analyse, qui utilise les observations météorologiques).

En effet, dans cette étude, l'intérêt de travailler en "modèle parfait" permet de qualifier uniquement les performances de l'ensemble. En ne comparant pas directement les prévisions d'ensemble aux débits observés, on s'affranchit des défauts de modélisation (par exemple, les effets anthropiques, comme l'effet des barrages ou encore des pompages dans les rivières, qu'on retrouve dans les observations mais pas dans les prévisions), qui pourraient "bruiter" les scores statistiques et rendre leur interprétation délicate. Ces défauts de modélisation peuvent se faire sentir à deux niveaux : d'une part, ils induisent parfois des écarts entre le débit initial observé et issu de la chaîne analyse (qui initialise la prévision d'ensemble), et d'autre part, ils influent sur l'évolution du débit prévu par rapport au débit observé. **Cette étude statistique permet donc de s'intéresser uniquement à la qualité de la prévision d'ensemble de débit, par rapport au débit analysé.**

5.1 Scores de la moyenne, caractéristiques de l'ensemble

Les figures 5.1 à 5.4 présentent le comportement des prévisions d'ensemble de débit sur la totalité de la période, pour quatre grandes stations françaises : la Seine à Paris, la Loire à Nantes, la Garonne à Tonneins, le Rhône à Beaucaire. Il est à noter que depuis la réalisation de cette étude, une amélioration a été effectuée sur le zonage SAFRAN dans les Pyrénées, ce qui conduit à une simulation (et vraisemblablement conduirait à des prévisions d'ensemble) des débits de la Garonne et des rivières de la région de meilleure qualité par rapport aux observations.

Ces figures mettent en relief la particularité de la période d'étude, avec des débits plus faibles que la climatologie et pas de crue notable (sauf un événement sur le Rhône en 2004). Cette caractéristique de la période d'étude limite la robustesse et la pertinence de l'étude statistique de la capacité du système à prévoir les forts débits, étant donné leur rareté. Cependant, elle nous offre la possibilité de caractériser l'ensemble pour la prévision des faibles débits et des étiages et de leur durée. Ce type d'information sur les étiages peut être tout aussi importante que la prévision

de crues pour de nombreux services de gestion des eaux (barrages, agences de bassin) ainsi que différentes industries (centrales nucléaires, agriculture, etc.).

On constate sur ces graphiques que pour ces quatre stations, le débit est globalement bien reproduit par la moyenne de l'ensemble, dans une moindre mesure pour la Garonne. Par exemple, la hausse de débit de la Seine et de la Loire de fin décembre 2005 est bien prévue en moyenne de l'ensemble. En revanche, on constate une période au mois de mars 2005 pendant laquelle les prévisions tendent à s'éloigner plus de l'analyse aux longues échéances, pour les quatre stations.

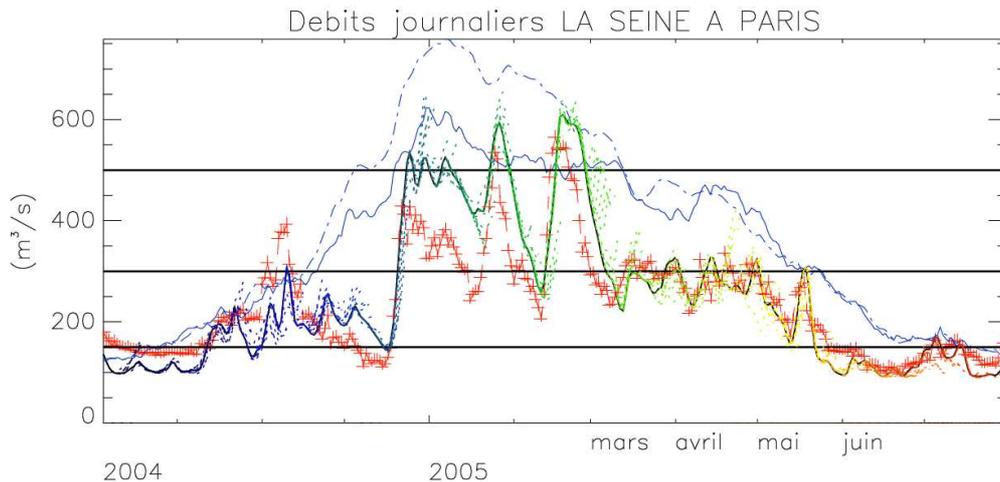


FIG. 5.1 – Débits du 4 sept 2004 au 31 juil 2005 pour la Seine à Paris. Croix rouges : observations; Trait noir continu : analyse SIM; Traits pointillés : chaque jour, moyenne de l'ensemble à 10 jours; Traits bleus pointillés : climatologie observée et climatologie SIM 1981-2004; Traits horizontaux noirs : valeur des seuils utilisés pour l'analyse statistique.

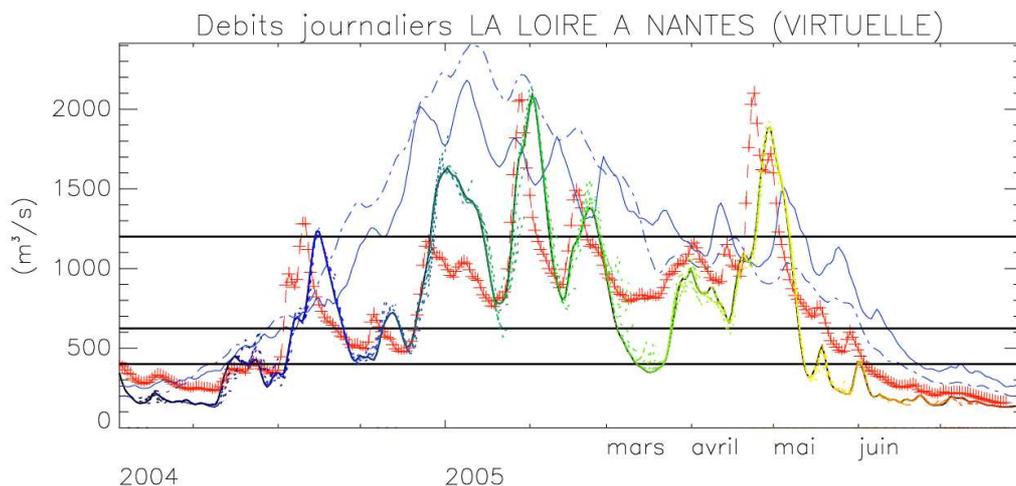


FIG. 5.2 – Débits du 4 sept 2004 au 31 juil 2005 pour la Loire à Nantes. Croix rouges : observations; Trait noir continu : analyse SIM; Traits pointillés : chaque jour, moyenne de l'ensemble à 10 jours; Traits bleus pointillés : climatologie observée et climatologie SIM 1981-2004; Traits horizontaux noirs : valeur des seuils utilisés pour l'analyse statistique.

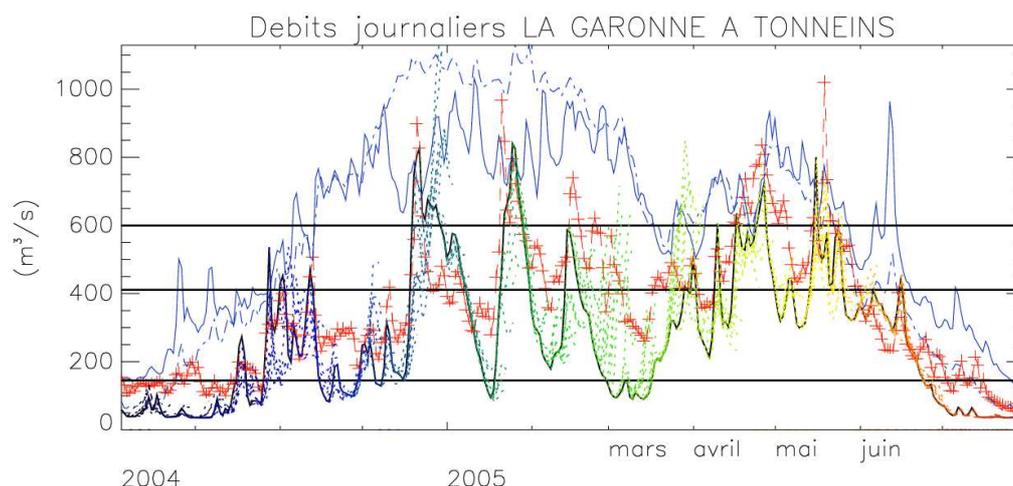


FIG. 5.3 – Débits du 4 sept 2004 au 31 juil 2005 pour la Garonne à Tonneins. Croix rouges : observations; Trait noir continu : analyse SIM; Traits pointillés : chaque jour, moyenne de l'ensemble à 10 jours; Traits bleus pointillés : climatologie observée et climatologie SIM 1981-2004; Traits horizontaux noirs : valeur des seuils utilisés pour l'analyse statistique.

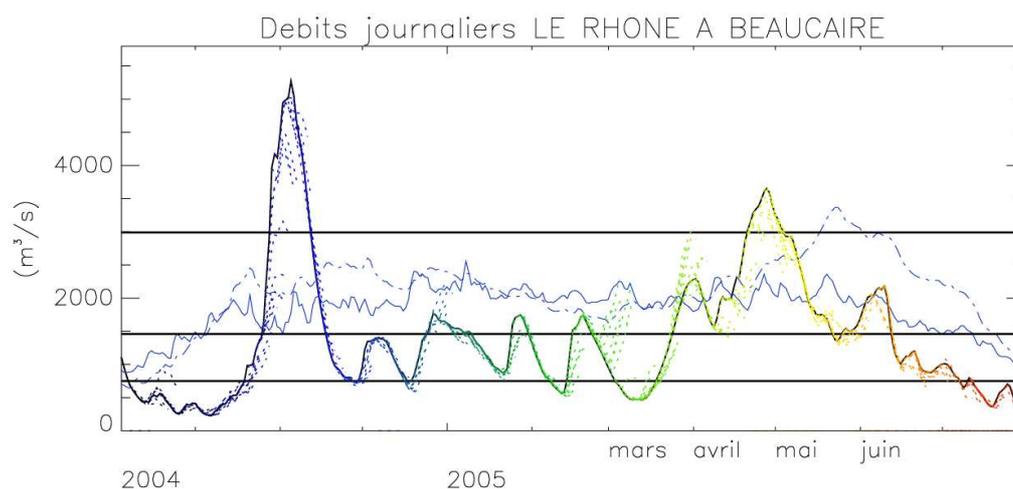


FIG. 5.4 – Débits du 4 sept 2004 au 31 juil 2005 pour le Rhône à Beaucaire. Croix rouges : observations; Trait noir continu : analyse SIM; Traits pointillés : chaque jour, moyenne de l'ensemble à 10 jours; Traits bleus pointillés : climatologie observée et climatologie SIM 1981-2004; Traits horizontaux noirs : valeur des seuils utilisés pour l'analyse statistique.

Les graphiques de la figure 5.5 donnent une vue plus précise des écarts entre la prévision et la simulation SIM de référence.

Sur chacun de ces graphiques, les écarts relatifs en % sont tracés avec une couleur en fonction de l'échéance. Les écarts concernant la prévision à 1 jour d'échéance sont tracés en bleu, à 4 jours en vert, à 7 jours en jaune, et à 10 jours en rouge.

On constate que pour la Loire, la Garonne et le Rhône, l'écart est le plus fort pendant le mois de Mars 2005, surtout aux dernières échéances, avec des écarts qui peuvent être importants. Pendant le reste de la période, ils sont plus limités, surtout aux premières échéances. En particulier, pour la Seine à Paris, l'écart dépasse rarement les +/- 20 %, et seulement à longue échéance.

On ne constate pas de cycle temporel dans ces écarts, peut être en raison de la faiblesse du cycle annuel de précipitations et de débit de cette année.

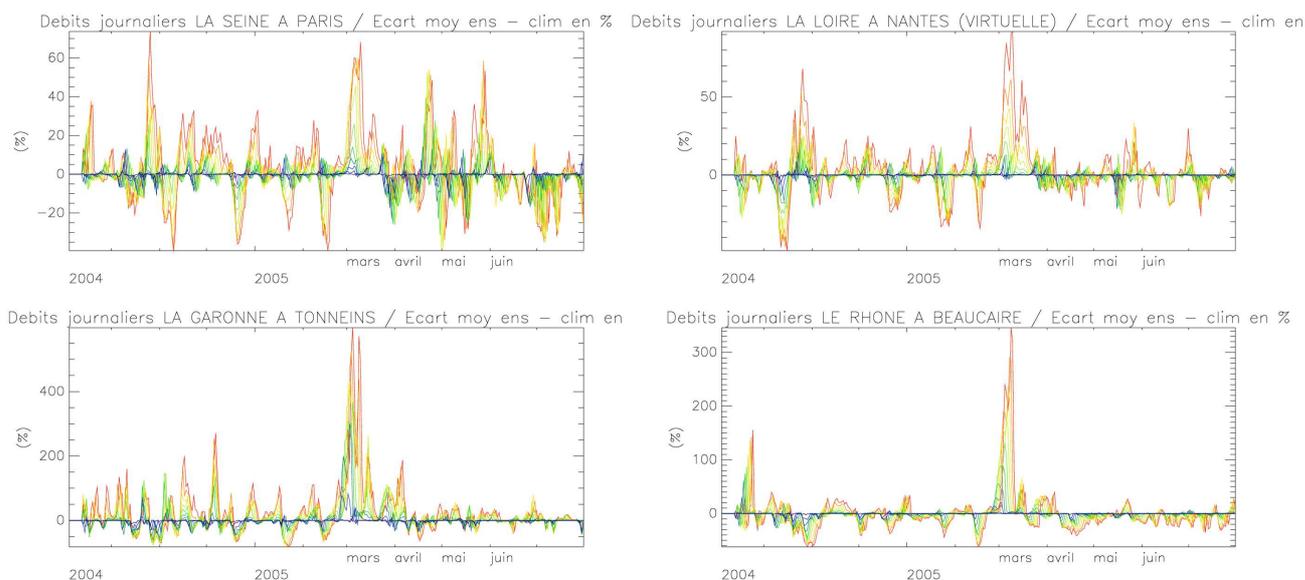


FIG. 5.5 – *Ecart (%) entre la moyenne de l'ensemble et l'analyse SIM, du 4 sept 2004 au 31 juillet 2005. La couleur est fonction de l'échéance : prévision à 1 jour d'échéance : bleu, 4 jours : vert, 7 jours : jaune, et 10 jours : rouge. En haut : la Seine à Paris (gauche) et la Loire à Nantes (droite), en bas : la Garonne à Tonneins (gauche) et le Rhône à Beaucaire (droite).*

Le tableau 5.1 récapitule les écarts (absolus) entre le débit analysé par SIM et la moyenne de l'ensemble aux diverses échéances, en moyenne sur la période d'étude, pour chacune des quatre stations.

Ecart absolu moyen normalisé (%)	Seine Paris	Loire Nantes	Garonne Tonneins	Rhône Beaucaire
1J	0.17	0.08	0.96	0.10
2J	0.76	0.26	3.00	0.86
3J	1.74	0.78	7.89	2.18
4J	2.72	1.61	13.84	3.85
5J	3.83	2.72	18.31	6.21
6J	5.28	4.28	24.57	8.80
7J	7.32	5.69	31.29	11.96
8J	9.60	6.95	35.47	15.61
9J	11.63	8.88	40.92	18.55
10J	13.69	12.05	46.76	21.16

TAB. 5.1 – *Tableau des écarts normalisés (%) absolus moyens sur la période, pour chaque échéance, pour la Seine à Paris, la Loire à Nantes, la Garonne à Tonneins et le Rhône à Beaucaire.*

Pour la Seine et la Loire, les écarts sont assez semblables. A un jour d'échéance, ils sont très faibles, ils restent en dessous de 5 % jusqu'à 6 jours d'échéance, et atteignent au maximum à 10 jours d'échéance respectivement 13.69 et 12.05 %. Ceci montre que la moyenne de l'ensemble est capable de prévoir très correctement les débits de ces deux stations.

Pour la Garonne et le Rhône, les écarts sont un peu plus importants. Même s'ils partent eux aussi de valeurs très faibles aux premières échéances, ils augmentent plus rapidement. On dépasse les 5 % dès 3 jours pour la Garonne et 5 jours pour le Rhône, et on atteint à 10 jours d'échéance respectivement 46.76 et 21.16 %. Ceci peut être expliqué en partie par le fait que ces deux bassins comportent des zones montagneuses, pour lesquelles malgré la méthode de désagrégation spatiale des précipitations prévues, le modèle du CEPMMT ne reproduit pas de façon suffisamment précise la localisation et l'intensité des précipitations. Néanmoins, ces écarts en particulier pour le Rhône restent encore relativement acceptables.

Enfin, les graphiques 5.6 à 5.7 présentent pour chacune des 4 stations l'Ecart Quadratique Moyen (EQM) de la moyenne de l'ensemble et du run non perturbé, ainsi que la dispersion de l'ensemble, en moyenne sur la période d'étude, pour chaque échéance.

On note que l'EQM de la moyenne de l'ensemble et du run non perturbé sont très proches pour la Loire et le Rhône. En revanche, pour la Seine et la Garonne, l'EQM de la moyenne de l'ensemble est nettement plus faible que celui du run non perturbé, en particulier en fin d'échéance, ce qui montre que la moyenne de l'ensemble constitue une meilleure prévision que le run non perturbé.

Les EQM de la moyenne de l'ensemble pour chacune des stations sont très faibles pour les 2 premiers jours de prévision. En effet, l'EQM est calculé en utilisant comme référence l'analyse SIM qui a initialisé la prévision. Or, pour ces grands bassins, les débits des premières heures de simulation sont très fortement contraints par l'état initial. Il est donc assez normal de constater que les débits prévus par l'ensemble ainsi que sa moyenne restent relativement proches de l'analyse SIM ces 2 premiers jours, et conduisent à des EQM relativement faibles. A plus longue échéance, les EQM sont plus importants, mais restent globalement raisonnables.

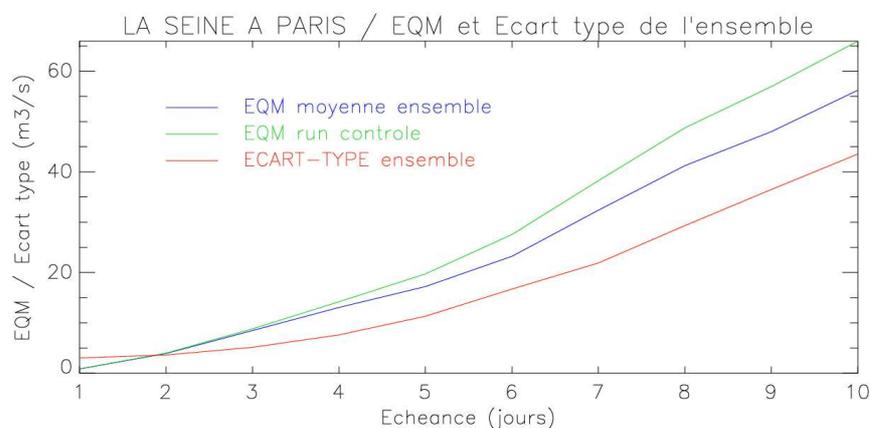


FIG. 5.6 – La Seine à Paris. Ecart quadratique Moyen (EQM) de la moyenne de l'ensemble et du run de contrôle, la référence est l'analyse SIM, en moyenne du 4 sept 2004 au 31 juillet 2005, pour chaque échéance. Dispersion de l'ensemble en moyenne du 4 sept 2004 au 31 juillet 2005, pour chaque échéance.

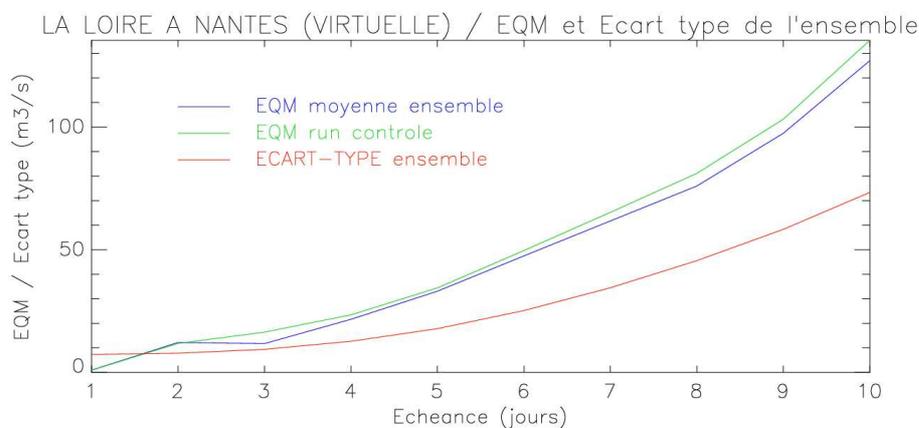


FIG. 5.7 – La Loire à Nantes. Ecart quadratique Moyen (EQM) de la moyenne de l'ensemble et du run de contrôle, la référence est l'analyse SIM, en moyenne du 4 sept 2004 au 31 juillet 2005, pour chaque échéance. Dispersion de l'ensemble en moyenne du 4 sept 2004 au 31 juillet 2005, pour chaque échéance.

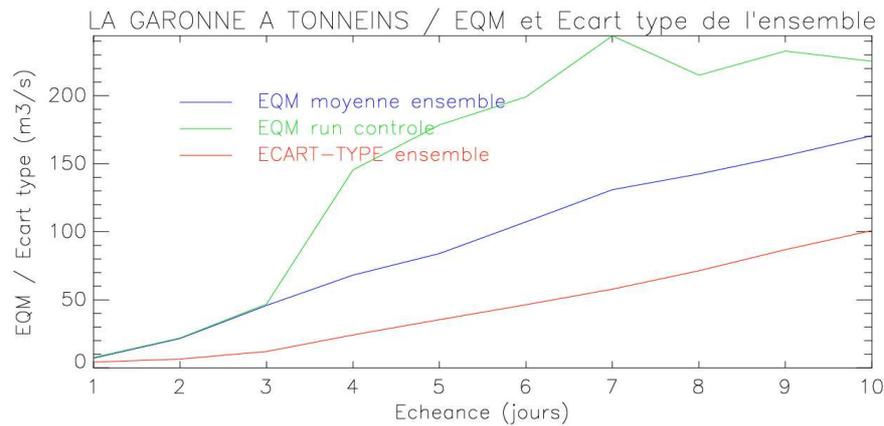


FIG. 5.8 – La Garonne à Tonneins. Ecart quadratique Moyen (EQM) de la moyenne de l'ensemble et du run de contrôle, la référence est l'analyse SIM, en moyenne du 4 sept 2004 au 31 juillet 2005, pour chaque échéance. Dispersion de l'ensemble en moyenne du 4 sept 2004 au 31 juillet 2005, pour chaque échéance.

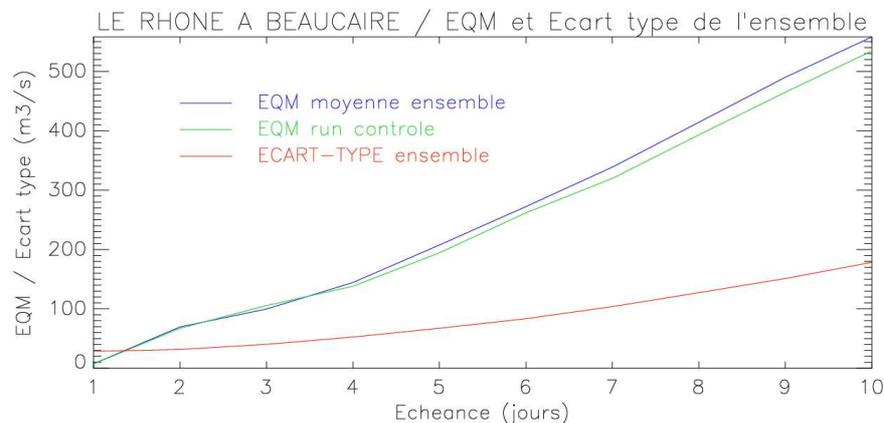


FIG. 5.9 – Le Rhône à Beaucaire. Ecart quadratique Moyen (EQM) de la moyenne de l'ensemble et du run de contrôle, la référence est l'analyse SIM, en moyenne du 4 sept 2004 au 31 juillet 2005, pour chaque échéance. Dispersion de l'ensemble en moyenne du 4 sept 2004 au 31 juillet 2005, pour chaque échéance.

Dans le cas de la Seine, la dispersion de l'ensemble (l'écart moyen entre ses membres) est d'un ordre de grandeur comparable à l'EQM de la moyenne de l'ensemble. En revanche, dans les autres cas, elle est d'un ordre de grandeur plus petit, en particulier pour le Rhône (5 fois plus faible à 10 jours).

De plus, aux premières échéances, la dispersion est très faible pour chacune des stations. Cette caractéristique provient vraisemblablement en grande partie du manque de dispersion constaté dans les prévisions d'ensemble de précipitations du CEP désagrégées.

Relation entre la dispersion dans les précipitations et la dispersion dans les débits

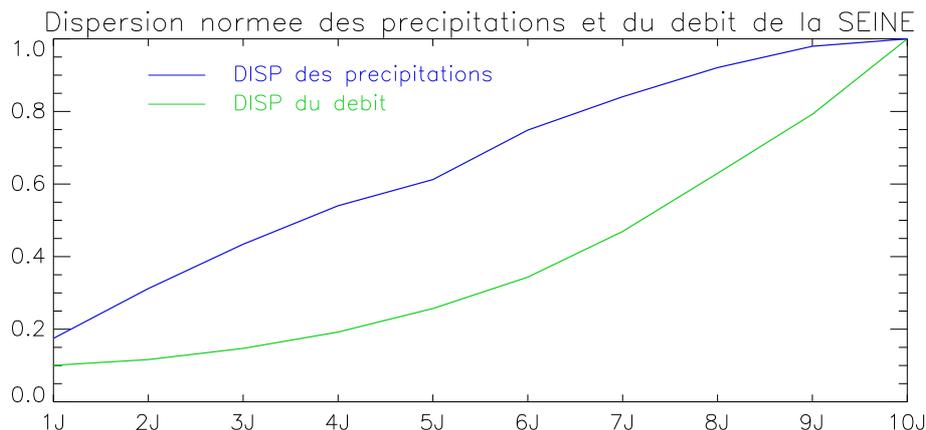


FIG. 5.10 – Dispersion (normée par son maximum) de l'ensemble de prévision de précipitations du CEP désagrégées en moyenne sur le bassin de la Seine, et dispersion (normée par son maximum) de l'ensemble de prévision de débit de la Seine à Poses, en fonction de l'échéance

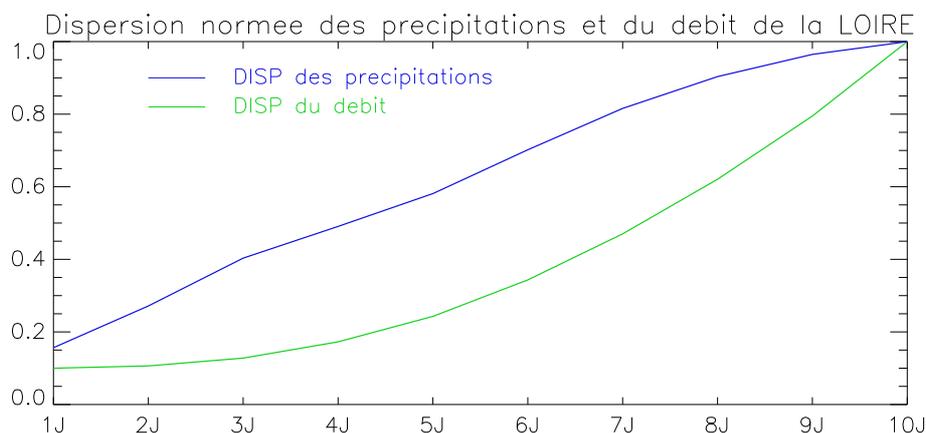


FIG. 5.11 – Dispersion (normée par son maximum) de l'ensemble de prévision de précipitations du CEP désagrégées en moyenne sur le bassin de la Loire, et dispersion (normée par son maximum) de l'ensemble de prévision de débit de la Loire à Nantes, en fonction de l'échéance

Les graphiques des figures 5.10 et 5.11 présentent les dispersions dans les précipitations et dans les débits, en fonction de l'échéance, pour la Seine et la Loire. Sur ces deux bassins, on constate que l'augmentation de la dispersion du débit jusqu'à son maximum est beaucoup plus lente que celle des précipitations.

En effet, les débits de la Loire et de la Seine des premières heures sont très fortement contraints par l'état initial. Compte tenu de l'hydrologie de ces bassins, la réponse aux précipitations est assez lente, ce qui explique pourquoi la dispersion des débits n'augmente que peu dans les 3 premiers jours (à 3 jours, elle atteint environ 15 % de son maximum, contre 45 % pour la dispersion des précipitations). Pour atteindre 50 % du maximum de dispersion, il faut environ 5 jours à l'ensemble de précipitations, et entre 7 et 8 jours pour l'ensemble de débit.

Ceci montre que pour certains bassins, en particulier les grands bassins, où la réponse hydrologique est lente, la relative faiblesse de la dispersion dans l'ensemble de précipitations les premiers jours de prévision est accentuée par le fonctionnement hydrologique du système, qui conduit à une dispersion d'autant plus faible et qui augmente lentement. Ceci renforce l'intérêt d'un système de prévision à 10 jours d'échéance pour les grands bassins.

5.2 Diagrammes de Talagrand / de Rang

Les figures 5.12 et 5.13 présentent les diagrammes de Talagrand pour la Seine à Paris, la Loire à Nantes, la Garonne à Tonneins et le Rhône à Beaucaire. J'ai tracé un diagramme par jour d'échéance pour chaque station, ce sont les résultats obtenus pour un jour, cinq jours et dix jours qui sont montrés dans les figures 5.12 et 5.13.

Ces diagrammes sont obtenus en considérant chaque jour les 51 valeurs de débit prévu par l'ensemble ainsi que le débit de référence (l'analyse SIM), et en classant ces 52 valeurs par ordre croissant. On compte ensuite la position de la référence (le rang) parmi ces 52 valeurs. En répétant cette opération sur tous les jours de la période d'étude, on obtient un histogramme du nombre de fois où chaque rang est utilisé.

Ce graphique permet de donner des informations sur l'ensemble, et en particulier sur sa fiabilité. En effet, pour un ensemble parfaitement fiable on obtiendrait un diagramme plat, avec le même nombre d'utilisation de chaque rang. Une forme en U (surpopulation des extrêmes) traduit souvent un manque de dispersion, et une forme en J ou en L (surpopulation d'une des deux extrêmes) induit un biais (chapitre 3).

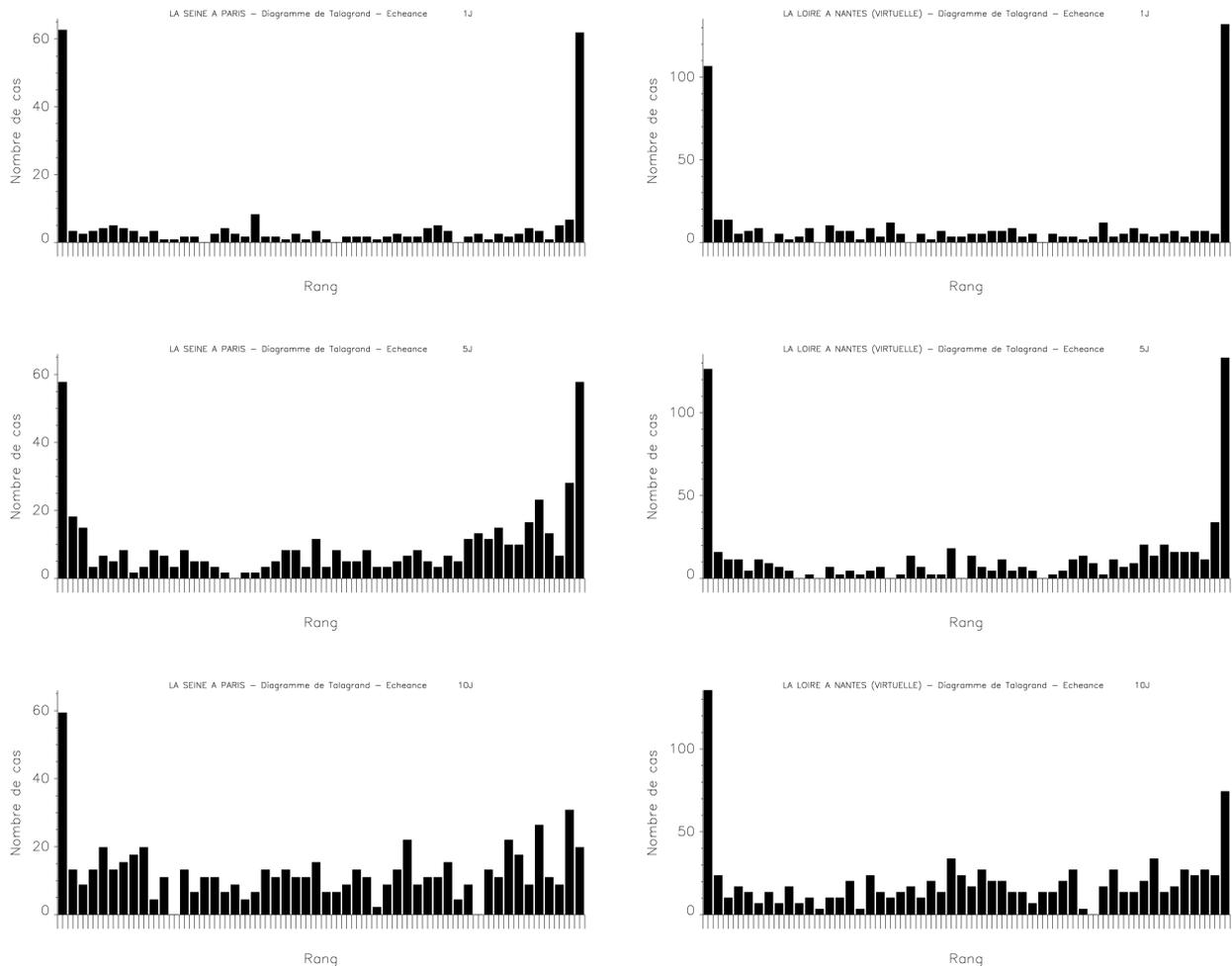


FIG. 5.12 – Diagramme de Talagrand / de rang pour la Seine à Paris (gauche) et la Loire à Nantes (droite), pour les échéances 1 jour (en haut), 5 jours (au milieu) et 10 jours (en bas)

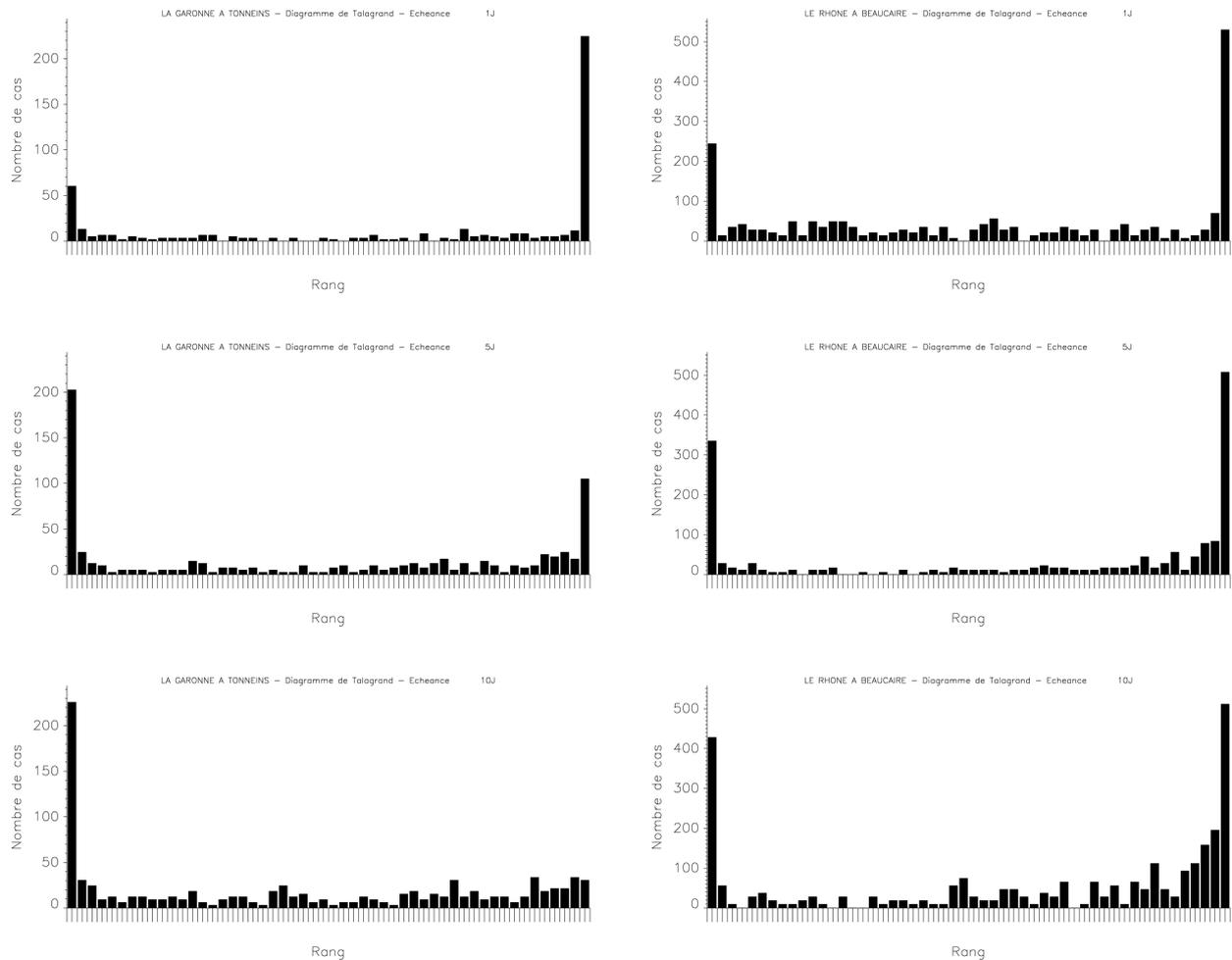


FIG. 5.13 – Diagramme de Talagrand / de rang pour la Garonne à Tonneins (gauche) et le Rhône à Beaucaire (droite), pour les échéances 1 jour (en haut), 5 jours (au milieu) et 10 jours (en bas)

Pour les quatre stations tracées, on constate que pour 1 jour d'échéance, les diagrammes de Talagrand ont tous clairement une forme en U. Ceci traduit un manque de dispersion de l'ensemble, comme cela a déjà été constaté sur l'écart-type. Ceci s'explique au moins en partie par le manque de dispersion aux premières échéances des prévisions d'ensemble de précipitations du CEP désagrégées, qui sont construites pour avoir une dispersion maximale au bout de 48h seulement. De plus, pour ces 4 grands bassins, l'état initial, qui est le même pour les 51 runs de prévision, impose une contrainte forte sur l'évolution du débit dans les premières heures, ce qui peut conduire à une réduction de la dispersion qui existait dans les précipitations quand on s'intéresse aux débits.

Avec l'augmentation de l'échéance, on constate dans les 4 cas que les rangs intermédiaires sont plus peuplés. Pour la Seine à Paris et pour la Garonne à Tonneins, on obtient à 10 jours une forme en L, avec une relative surpopulation du premier rang (le débit analysé par SIM est inférieur à tous les membres de l'ensemble), ce qui semble traduire un biais positif dans les prévisions. Pour la Loire à Nantes, à 10 jours d'échéance, on retrouve une tendance à ce biais avec une surpopulation du premier rang, combinée avec une surpopulation, moins marquée, du dernier rang, ce qui semble indiquer que le manque de dispersion perdure jusqu'à la fin de la prévision. Ce manque de dispersion apparaît également sur le Rhône à Beaucaire pour toutes les échéances.

5.3 Score de Brier et Skill Score associé - Fiabilité - Résolution

Le score de Brier permet de qualifier le comportement de l'ensemble face à un événement binaire, de type dépassement de seuil. Le Skill Score de Brier permet une comparaison des performances de la prédiction d'ensemble par rapport à une référence, souvent la climatologie, toujours pour des événements binaires (chapitre 3).

Dans cette étude, j'ai voulu analyser les performances du système pour les faibles et les forts débits.

C'est pourquoi, j'ai calculé les score de Brier et les Skill Score de Brier pour des événements de dépassement de seuils de forts débits, pour deux valeurs de débits (pour la Seine à Paris par exemple, j'utilise les seuils $500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et $300 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), ainsi que pour des événements de non dépassement d'une faible valeur de débit (pour la Seine à Paris, $100 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$).

De plus, j'ai calculé deux Skill Score de Brier pour chacun des trois seuils considérés, en prenant comme référence d'une part la climatologie SIM 1981-2004, d'autre part la climatologie des débits observés de 1981 à 2004.

5.3.1 Résultats pour quelques grandes stations

Pour ces stations, j'ai choisi les 3 valeurs de seuils les plus adaptées à la période d'étude, particulièrement sèche. C'est pourquoi les seuils choisis pour les événements de dépassement de forts débits peuvent sembler relativement peu élevés. Au vu des valeurs de débit observées et prévues sur la période d'étude, il est difficile de calculer des scores de Brier et des Skill Score de Brier pour des seuils plus élevés.

Comme le montrent les figures 5.14 à 5.17, les scores de Brier obtenus sont bons pour les quatre stations, avec des faibles valeurs, surtout aux premières échéances. Ces scores augmentent avec l'échéance, pour atteindre à 10 jours environ 0.10 à 0.15. Ces valeurs sont comparables à celles obtenues dans diverses études sur les prévisions d'ensemble de précipitations et sur leur utilisation pour produire des prévisions d'ensemble de débits, aussi bien dans le cas du CEP ([ROULIN and VANNITSEM 2005], [CHESSA and LALAURETTE 2001]) ou du NCEP ([HAMILL and COLUCCI 1998], [HAMILL and COLUCCI 1998], [ECKEL 1998]).

En outre, les scores obtenus pour le non dépassement de faibles valeurs de débits sont proches de ceux obtenus pour le dépassement des forts seuils de débit, les plus grand scores (les moins bons) sont en général obtenus pour le dépassement du seuil le plus élevé (sauf pour la Loire). Ceci montre que l'ensemble est capable de prévoir les forts débits aussi bien que les faibles débits.

Les Skill Scores de Brier permettent de comparer les performances du système de prédiction d'ensemble par rapport à la climatologie. Dans les 4 cas, ces Skill Scores sont positifs, pour les 3 seuils et à toutes les échéances. Ceci montre que l'ensemble est toujours une meilleure prédiction que la climatologie.

De plus, les valeurs atteintes par ces Skill Scores de Brier sont assez élevées (proches de 1). En effet, pour la Seine à Paris, le Skill Score reste toujours supérieur à 0.7. La diminution des Skill Score avec l'échéance est moins marquée sur la Seine que sur les trois autres bassins, néanmoins le Skill Score diminue au minimum à 0.6 pour la Loire à Nantes, 0.5 pour la Garonne à Tonneins, et 0.45 pour le Rhône à Beaucaire, à 10 jours d'échéance.

Les valeurs obtenues pour chacun des seuils sont assez homogènes, avec toutefois un Skill Score relativement plus faible pour la Loire à Nantes pour les faibles débits. Les Skill Scores sont également globalement très proches, que la référence soit la climatologie SIM 1981-2004 ou la climatologie observée 1981-2004.

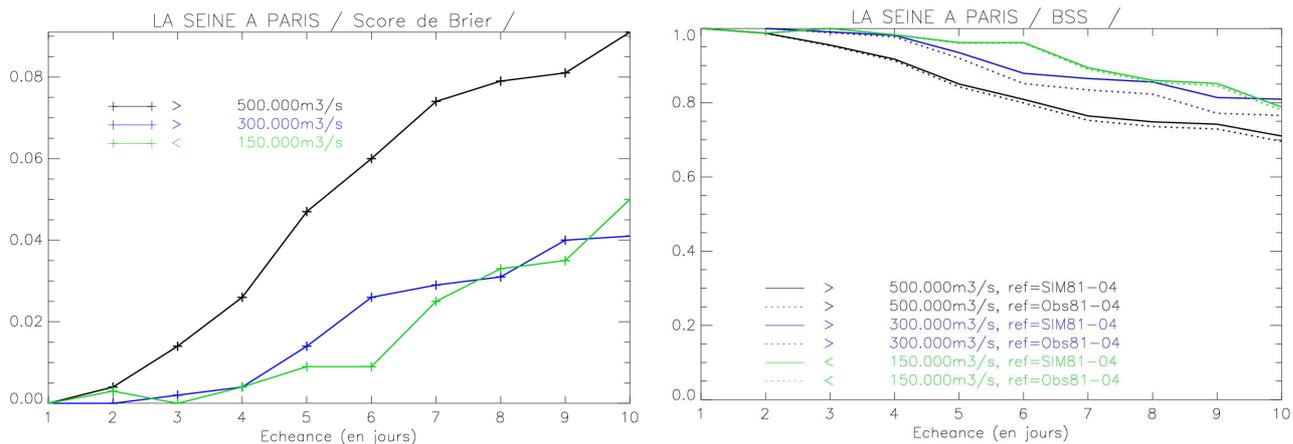


FIG. 5.14 – Score de Brier (gauche) et Skill Score de Brier (droite) pour la Seine à Paris, pour chaque échéance, pour 3 seuils de débit

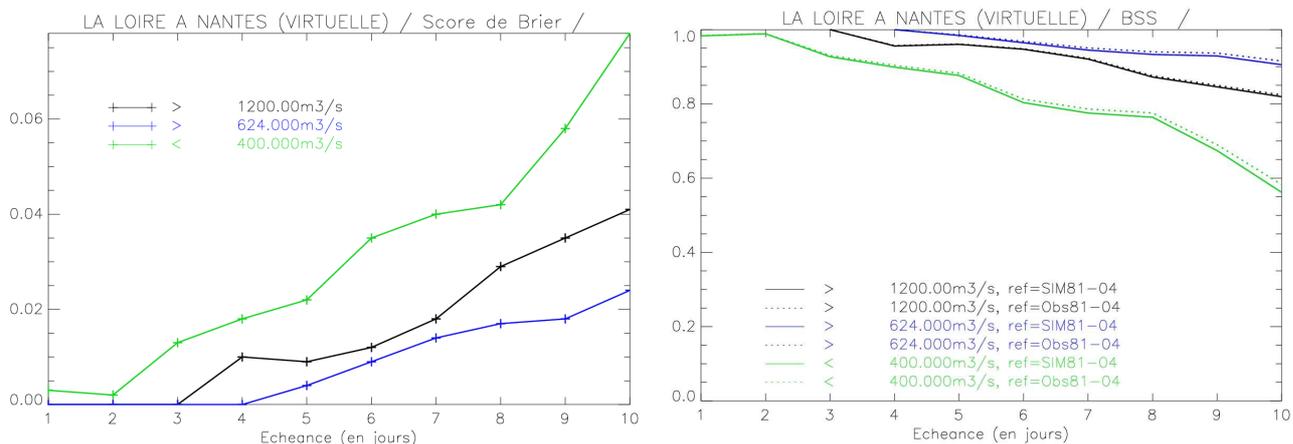


FIG. 5.15 – Score de Brier (gauche) et Skill Score de Brier (droite) pour la Loire à Nantes, pour chaque échéance, pour 3 seuils de débit

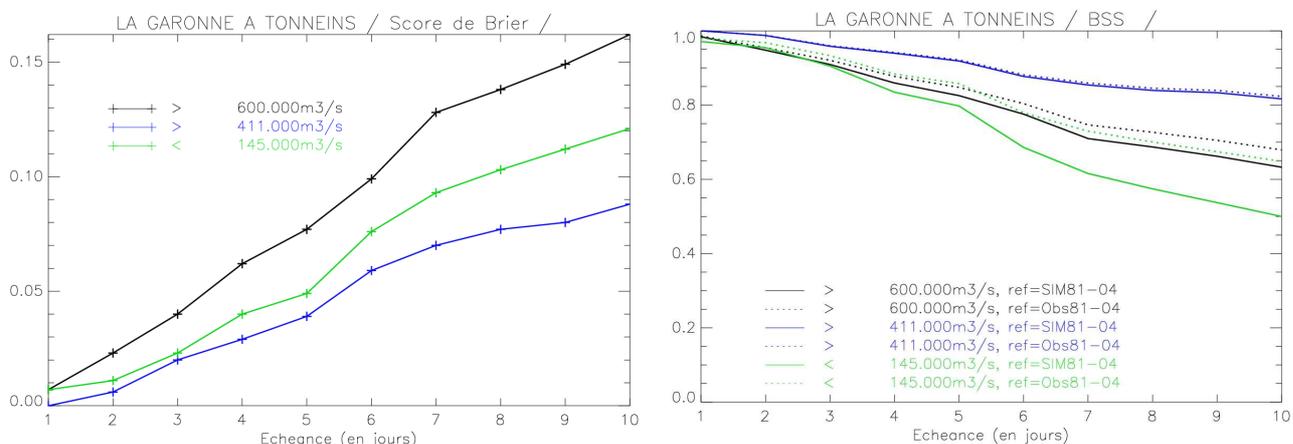


FIG. 5.16 – Score de Brier (gauche) et Skill Score de Brier (droite) pour la Garonne à Tonneins, pour chaque échéance, pour 3 seuils de débit

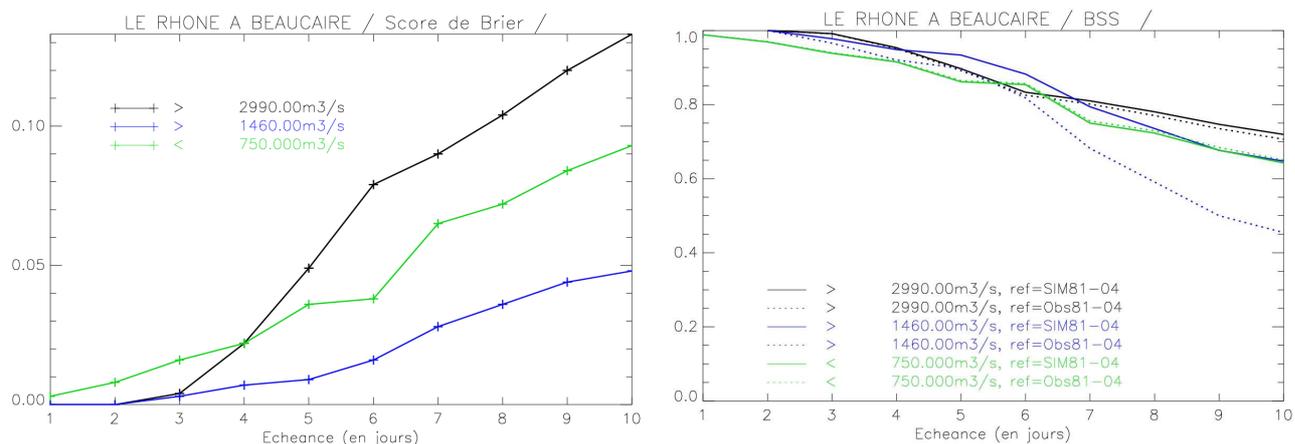


FIG. 5.17 – Score de Brier (gauche) et Skill Score de Brier (droite) pour le Rhône à Beaucaire, pour chaque échéance, pour 3 seuils de débit

Les figures 5.18 à 5.21 présentent la décomposition du score de Brier en fiabilité, résolution et incertitude, pour les quatre stations, pour le dépassement du seuil le plus élevé et le non dépassement du faible seuil.

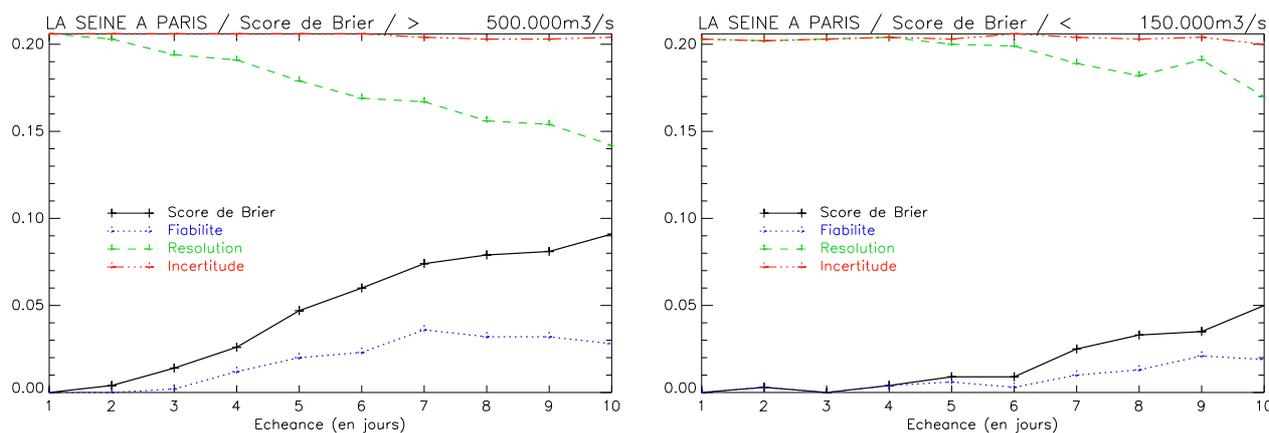


FIG. 5.18 – Décomposition du score de Brier pour la Seine à Paris, pour chaque échéance, pour 2 seuils de débit

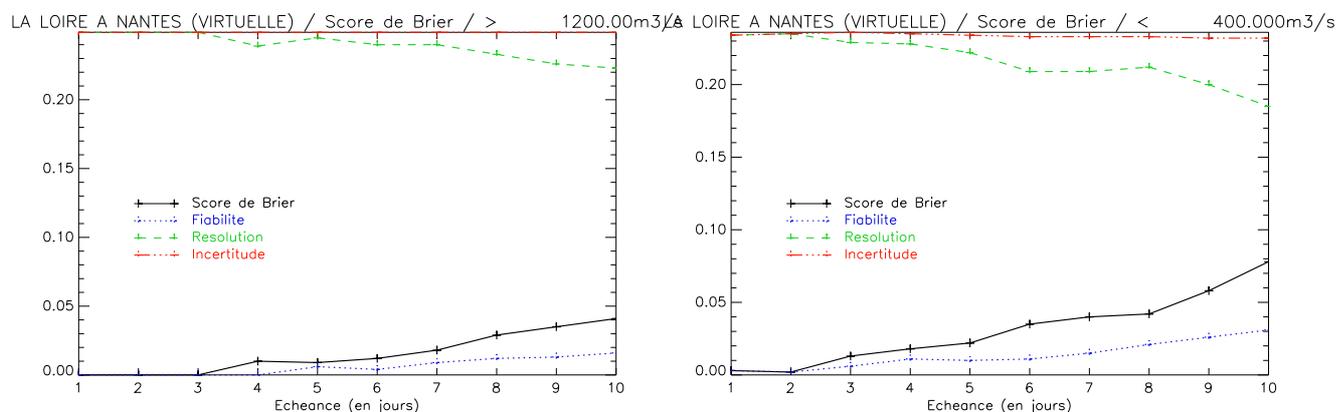


FIG. 5.19 – Décomposition du score de Brier pour la Loire à Nantes, pour chaque échéance, pour 2 seuils de débit

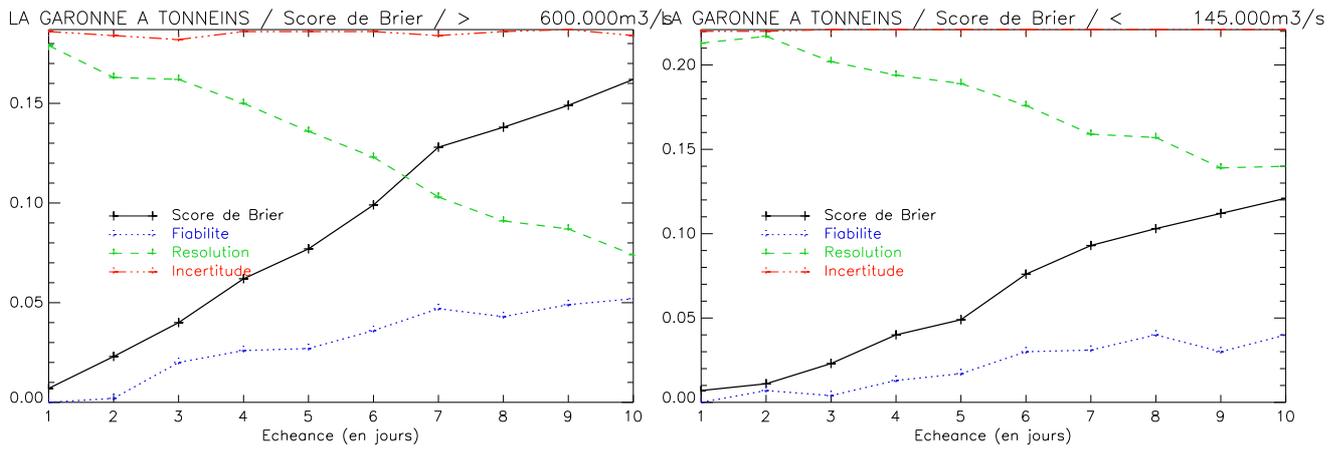


FIG. 5.20 – Décomposition du score de Brier pour la Garonne à Tonneins, pour chaque échéance, pour 2 seuils de débit

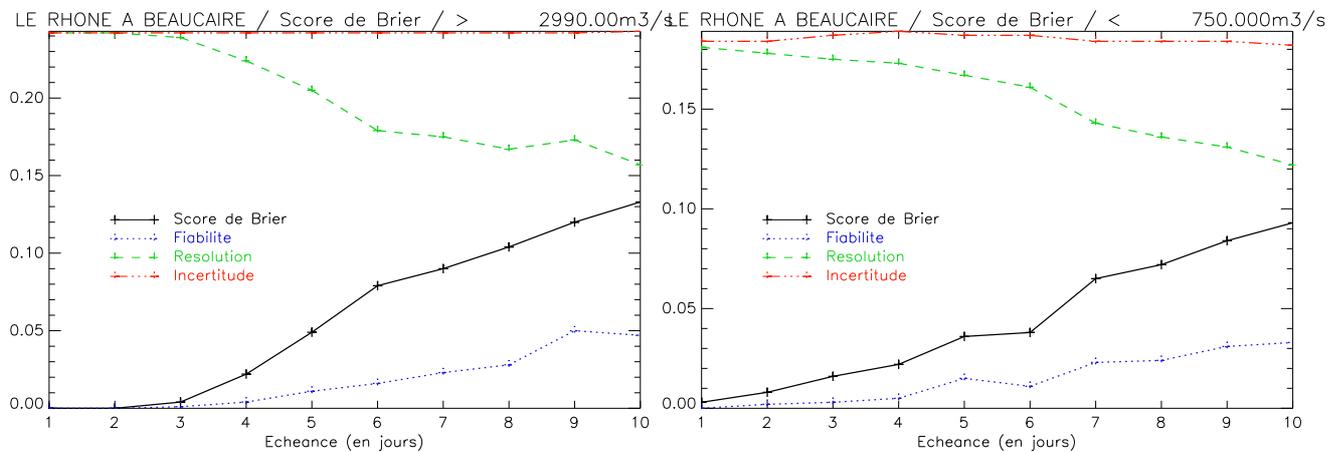


FIG. 5.21 – Décomposition du score de Brier pour le Rhône à Beaucaire, pour chaque échéance, pour 2 seuils de débit

Pour les quatre stations et dans le cas des forts débits comme dans le cas des faibles débits, les caractéristiques générales des composantes du score de Brier sont similaires. Aux premières échéances (un ou deux jours), la résolution est forte, et presque égale à l'incertitude. Le score de Brier est alors une mesure de la fiabilité, qui est relativement faible. Avec l'augmentation de l'échéance, la fiabilité et la résolution se dégrade. La fiabilité, que l'on souhaite faible en valeur absolue, augmente, et la résolution, que l'on souhaite forte en valeur absolue, diminue. Ceci montre que la qualité de la prévision d'ensemble diminue avec l'échéance.

De plus, dans tous les cas et à toutes les échéances, la résolution est plus forte en valeur absolue que la fiabilité, ce qui montre que l'ensemble constitue une meilleure prévision des événements considérés que la climatologie.

5.3.2 Résultats sur la France

Les Scores de Brier et les Skill Scores associés ont été calculés pour environ 900 stations en France. Pour chaque station, les valeurs de débit utilisées pour le dépassement de forts débits et le non dépassement de faibles débits ont été calculées de la façon suivante : pour chaque station, on détermine parmi les valeurs du débit analysé par SIM sur la période d'étude le 90ème percentile (q90), le 50ième (médiane, q50) et le 10ème (q10). On s'intéresse alors aux dépassement de ce q50 et q90, et au non dépassement du q10.

Les résultats obtenus pour l'ensemble des stations sont synthétisés dans les graphiques suivants (figures 5.22 et 5.23).

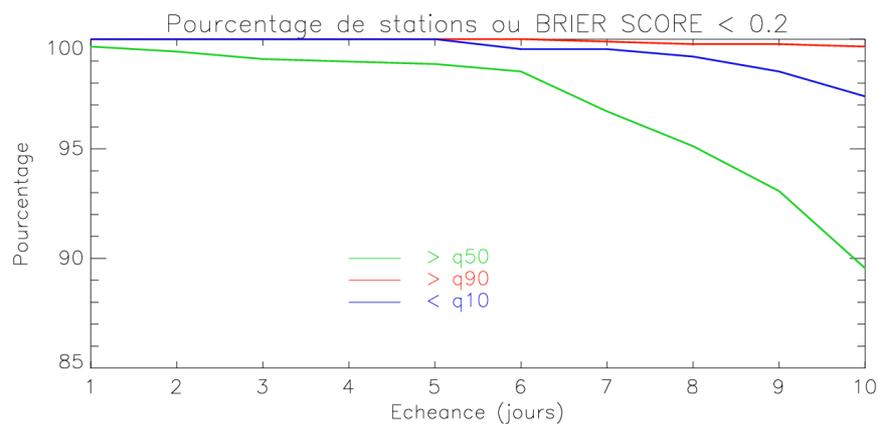


FIG. 5.22 – Pourcentage de stations parmi 900 en France pour lesquelles le Score de Brier est inférieur à 0.2, pour chaque échéance, pour 3 seuils de débit.

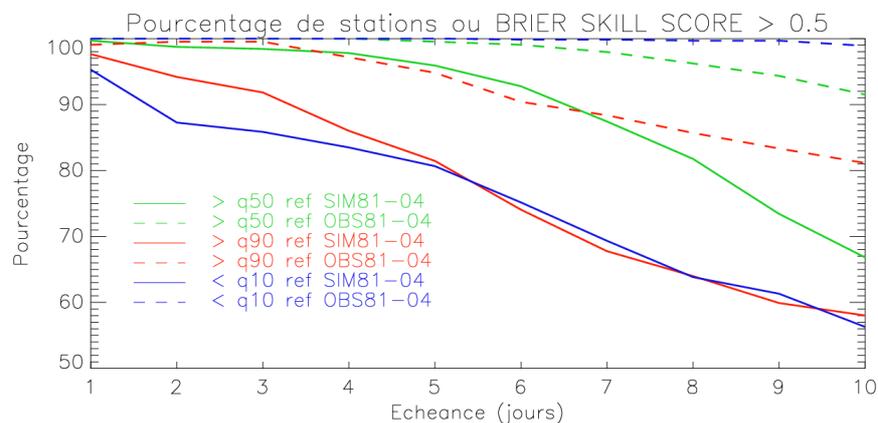


FIG. 5.23 – Pourcentage de stations parmi 900 en France pour lesquelles le Skill Score de Brier est supérieur à 0.5, pour chaque échéance, pour 3 seuils de débit.

La figure 5.22 présente pour chaque échéance le pourcentage de station parmi 900 pour lesquelles le Score de Brier est inférieur à 0.2, pour les 3 seuils de débit.

Ce pourcentage est très élevé pour les 3 seuils et à toutes les échéances. Il est stable et très proche de 100 % jusqu'à 6 jours d'échéance pour les 3 seuils, ensuite il commence à décroître, en particulier pour le dépassement du q50, moins pour le non dépassement du q10, et très peu pour le dépassement du q90.

Ceci montre qu'une très large majorité des stations obtiennent des scores de Brier satisfaisants, aussi bien pour les forts débits que pour les faibles débits.

La figure 5.23 présente pour chaque échéance le pourcentage de station parmi 900 pour lesquelles le Skill Score de Brier est supérieur à 0.5, pour les 3 seuils de débit.

On constate d'abord que les résultats sont relativement différents si la référence est la climatologie SIM 1981-2004 ou la climatologie observée 1981-2004. Ceci est dû au fait que pour certaines stations, en raison de certains défauts de modélisation ou de non prise en compte de certains effets (en particulier anthropiques), la simulation SIM est relativement différente de l'observation (et par suite les climatologies SIM ou observées sont très différentes), d'où des Skill Score de Brier différents.

Les Skill Scores de Brier sont globalement meilleurs quand on prend comme climatologie la climatologie observée.

En effet, ceci s'explique par la cohérence qui existe entre la climatologie SIM 1981-2004, le run SIM de référence sur la période d'étude, et les prévisions d'ensemble, qui sont entachées des défauts de modélisation et de non prise en compte des effets anthropiques, ce qui n'est pas le cas pour la climatologie 1981-2004 observée. La climatologie observée est donc plus différente du run SIM de référence que la climatologie SIM, c'est pourquoi l'apport de la prévision d'ensemble par rapport à la climatologie observée (et donc le Skill Score de Brier) est plus fort que l'apport de la prévision d'ensemble par rapport à la climatologie SIM 1981-2004.

De plus, moins de 1 % des stations ont un Skill Score de Brier négatif (ie pour lesquelles les prévisions d'ensemble constituent une moins bonne prévision que la climatologie), et ce à toutes les échéances et pour tous les seuils, sauf dans le cas du dépassement du q90, quand on compare à la climatologie SIM 1981-2004, ce pourcentage atteint 4 % à 7 jours et 9 % à 10 jours.

La figure 5.23 montre qu'une grande partie des stations ont un Skill Score de Brier supérieur à 0.5. A 1 jour d'échéance, elles sont plus de 95 %, à 5 jours plus de 80 %, et à 10 jours plus de 55 %, pour les 3 seuils et les deux climatologies utilisées.

La figure 5.24 montre la répartition des Skill Score de Brier en fonction de la surface du bassin, pour trois échéances : 1, 5 et 10 jours, et pour le dépassement du q50, du q90, et le non-dépassement du q10. On note que pour les 3 seuils, les Skill Scores de Brier sont globalement plus proches de 1 pour les grandes stations, les plus petits Skill Scores étant généralement associés aux plus petites stations, ce qui est surtout remarquable à 1 jour, et un peu moins marqué à 5 et 10 jours.

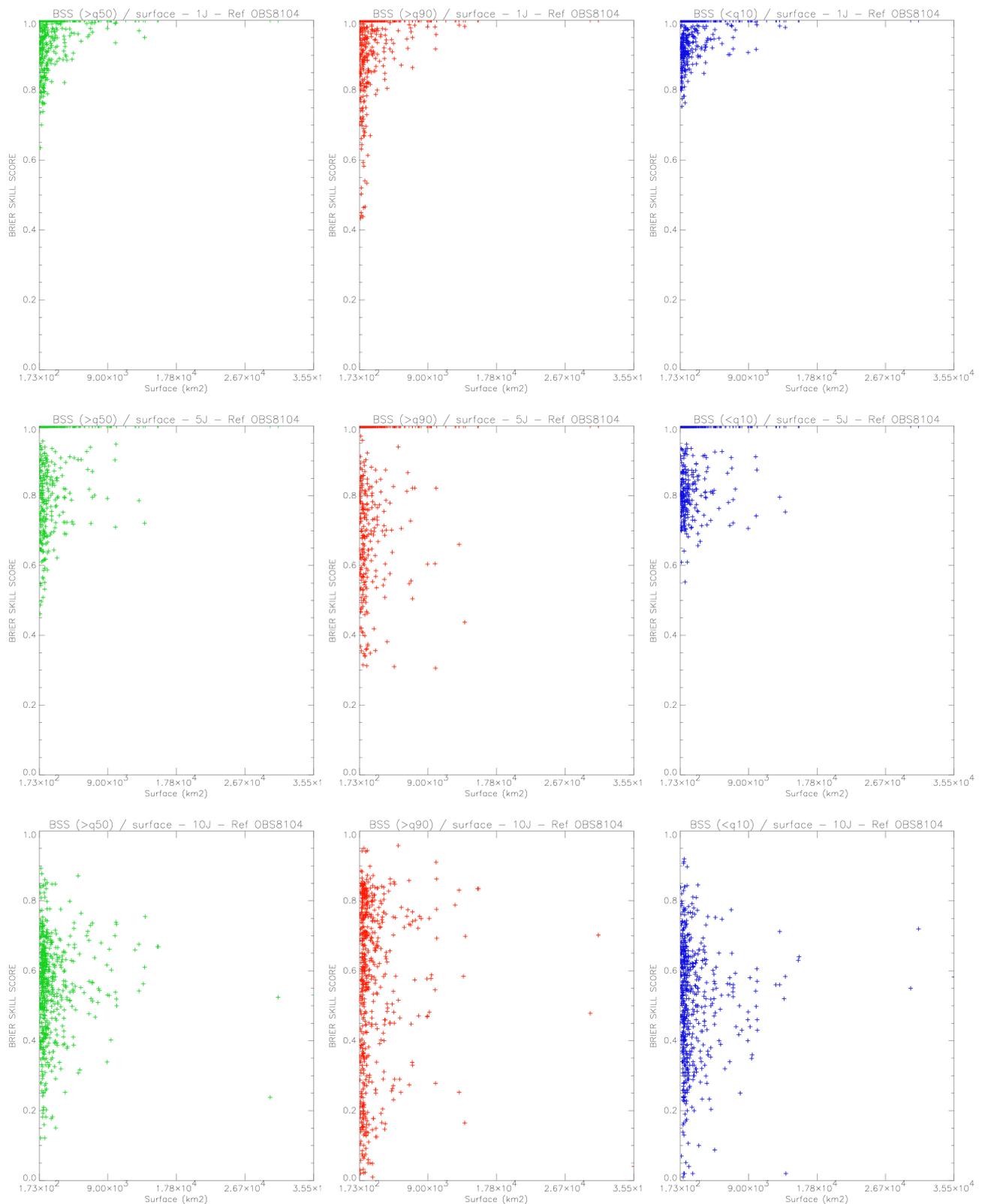


FIG. 5.24 – Skill Scores de Brier pour l'ensemble des 900 stations en France, en fonction de la surface des bassins (km^2). En haut, échéance 1 jour, au centre 5 jours, en bas 10 jours. A gauche, pour le dépassement du q_{50} des débits analysés par SIM sur la période d'étude, au centre pour le dépassement du q_{90} , à droite pour le non-dépassement du q_{10} .

5.4 Taux de succès, de fausses alarmes, de non prévisions - Courbes ROC

De même que pour les Scores et Skill Score de Brier, le calcul du taux de succès et de fausses alarmes permet de qualifier le système de prévision d'ensemble face à un événement binaire, de type dépassement de seuil.

Afin de qualifier aussi bien les prévisions de fort débit que de faible débit, j'ai calculé ces taux pour le dépassement de deux valeurs de fort débit, et pour le non dépassement d'un seuil de faible débit.

5.4.1 Résultats pour quelques grandes stations

Les graphiques suivants présentent les résultats obtenus pour quatre grandes stations, déjà présentées précédemment : la Seine à Paris, la Loire à Nantes, la Garonne à Tonneins, et le Rhône à Beaucaire. Les seuils utilisés sont les mêmes que pour les scores de Brier, ils sont pour chaque station adaptés à la période d'étude.

Pour les quatre stations, les résultats sont globalement très bons, aussi bien pour les forts débits que pour les faibles débits, avec des taux de détection élevés, et des taux de fausses alarmes et de non détection relativement faibles, dans une moindre mesure pour la Garonne.

On note de plus que le pourcentage de membres de l'ensemble influe notablement sur les scores obtenus. Le seuil 90 % est le plus "exigeant" pour la prévision d'un événement, c'est pourquoi le taux de succès associé à ce pourcentage est généralement le plus faible (pour les quatre stations, à toutes les échéances), et le taux de non prévision le plus fort. En revanche, ce pourcentage conduit au taux de fausses alarmes le moins élevé. C'est l'inverse pour le pourcentage 50 %, avec un taux de fausses alarmes plus fort, compensé par un meilleur taux de succès et un plus faible taux de non détection.

Ces graphiques peuvent donc permettre à un utilisateur du système de prévision d'ensemble de débits de mettre en place un système de décision, en considérant le pourcentage de membres de l'ensemble le plus efficace selon les coûts et conséquences des fausses alarmes et des non détections.

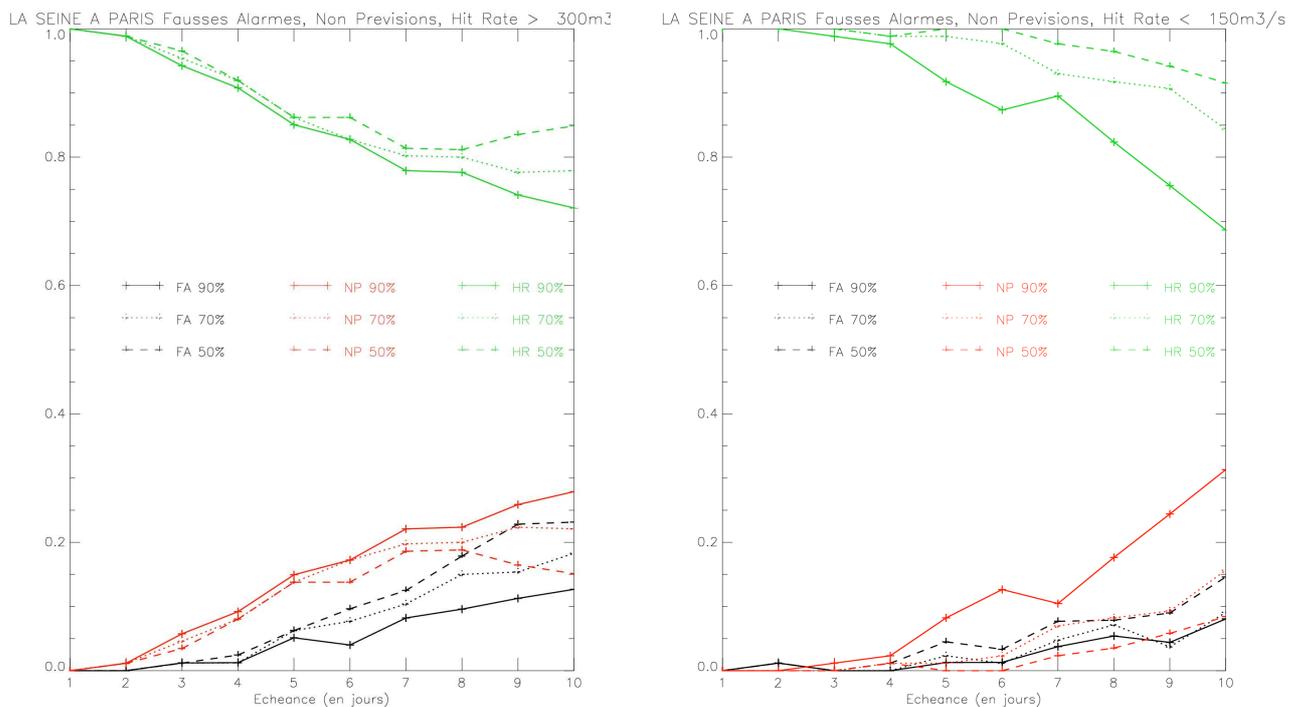


FIG. 5.25 – Taux de succès, de fausses alarmes, de non détections, pour la Seine à Paris, en fonction de l'échéance, et pour trois pourcentages de membres de l'ensemble nécessaires pour considérer l'événement comme prévu. A gauche, pour le dépassement du seuil $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, à droite pour le non dépassement du seuil $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

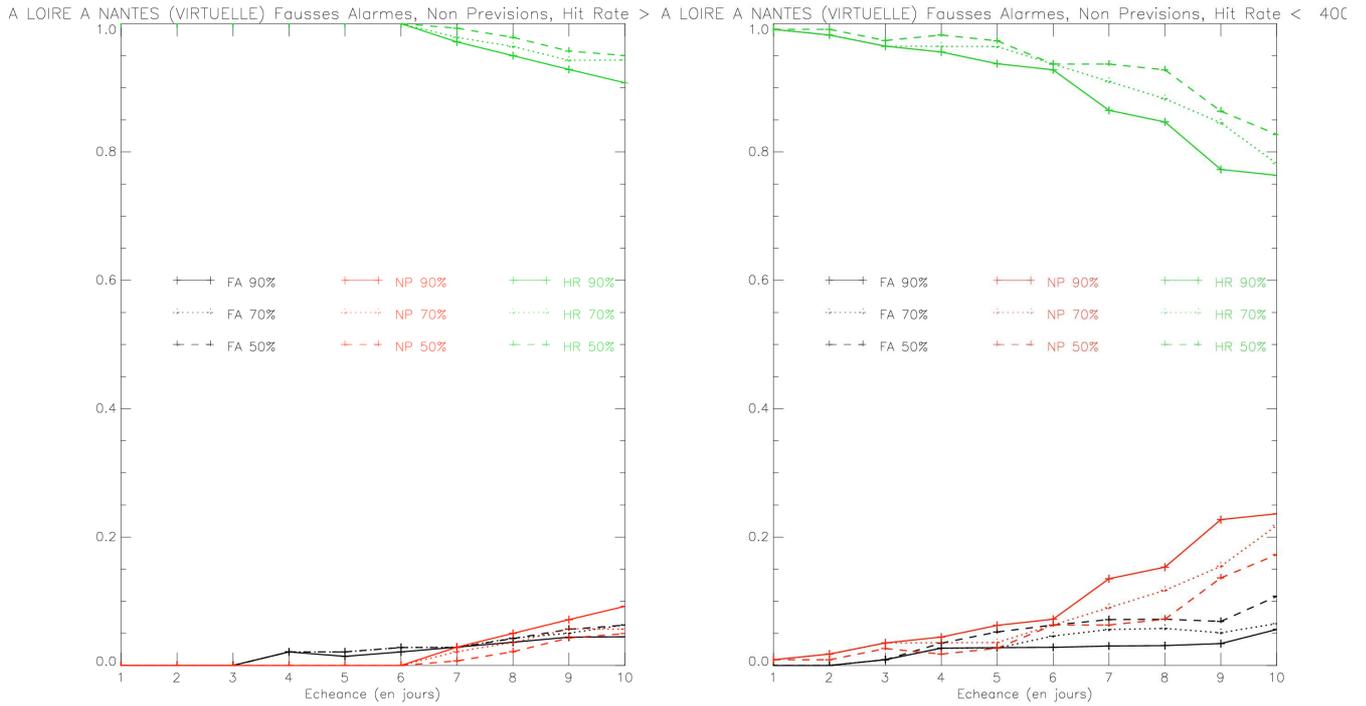


FIG. 5.26 – Taux de succès, de fausses alarmes, de non détections, pour la Loire à Nantes, en fonction de l'échéance, et pour trois pourcentages de membres de l'ensemble nécessaires pour considérer l'événement comme prévu. A gauche, pour le dépassement du seuil $624 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, à droite pour le non dépassement du seuil $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

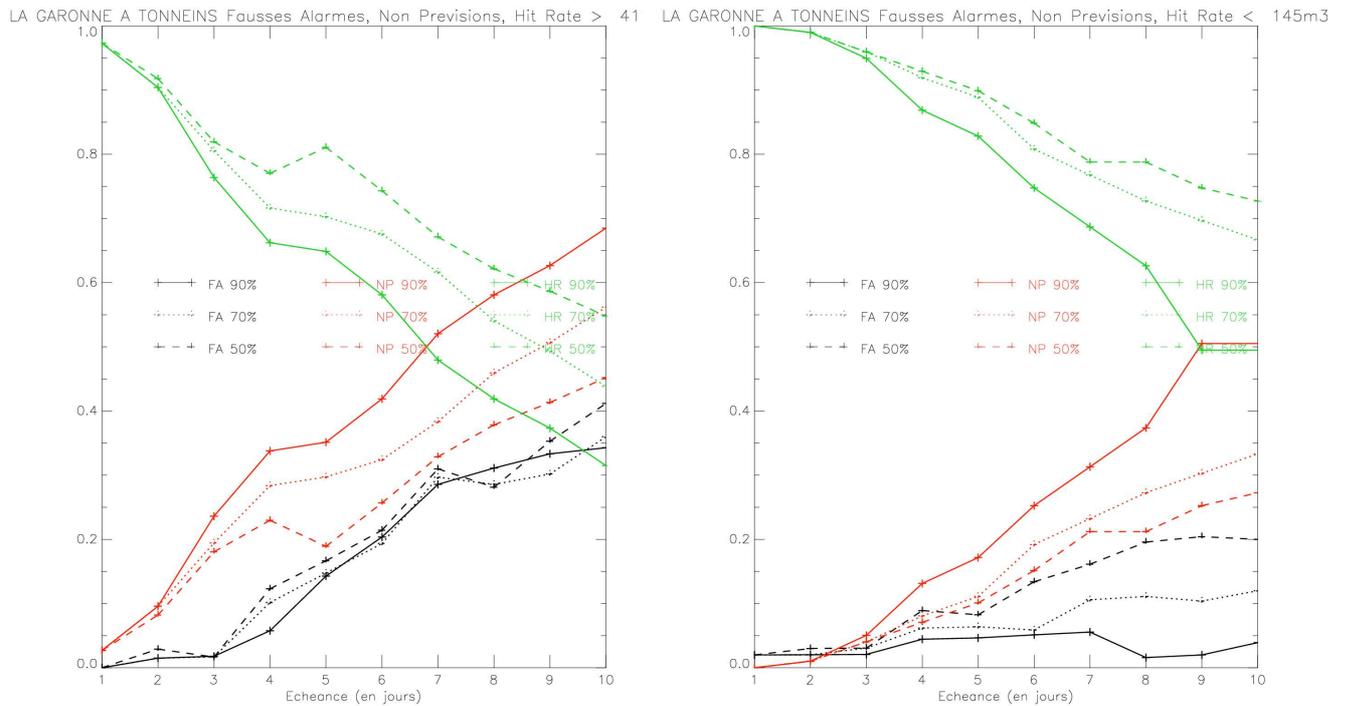


FIG. 5.27 – Taux de succès, de fausses alarmes, de non détections, pour la Garonne à Tonneins, en fonction de l'échéance, et pour trois pourcentages de membres de l'ensemble nécessaires pour considérer l'événement comme prévu. A gauche, pour le dépassement du seuil $410 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, à droite pour le non dépassement du seuil $145 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

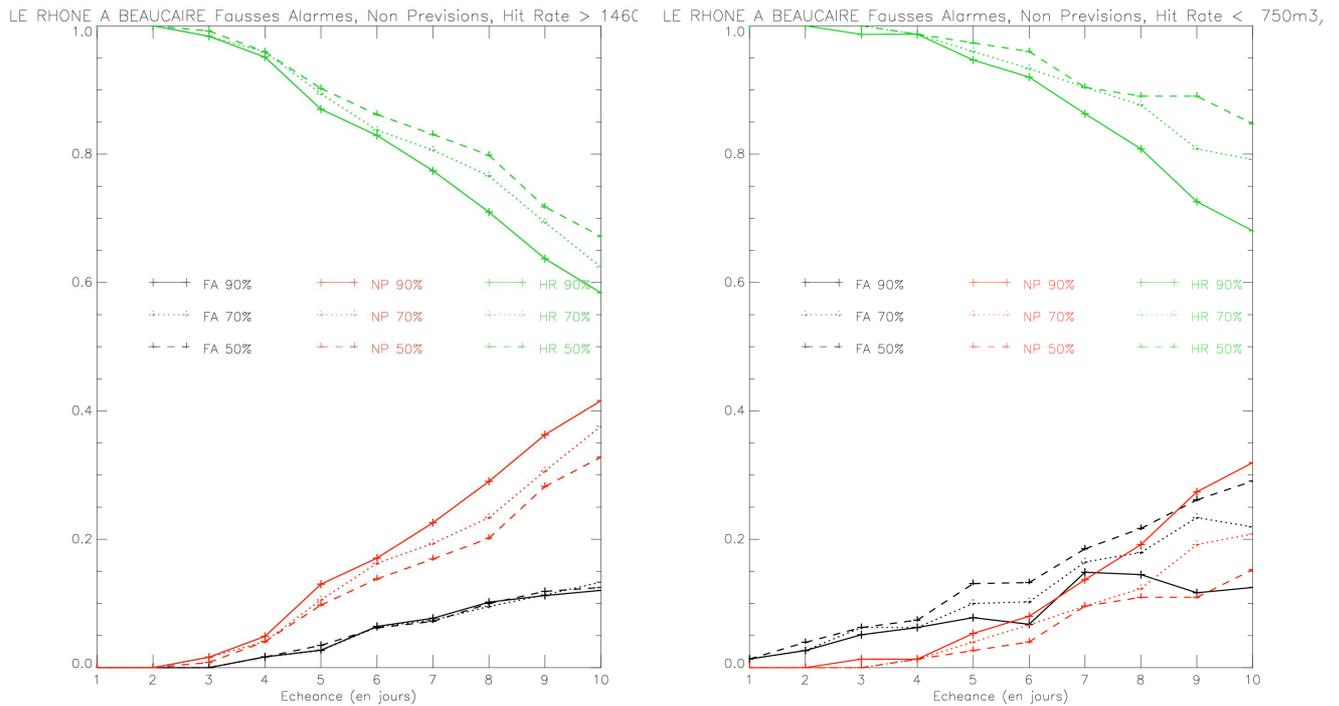


FIG. 5.28 – Taux de succès, de fausses alarmes, de non détections, pour le Rhône à Beaucaire, en fonction de l'échéance, et pour trois pourcentages de membres de l'ensemble nécessaires pour considérer l'événement comme prévu. A gauche, pour le dépassement du seuil $1460 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, à droite pour le non dépassement du seuil $750 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Pour la Seine à Paris, les scores obtenus par le système de prévisions d'ensemble sont très bons, aussi bien pour le dépassement du seuil $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ que pour le non dépassement du seuil $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. On peut noter en particulier un taux de fausses alarmes très faible, spécialement pour le non dépassement du seuil $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. En effet, ce taux reste inférieur à 10 % jusqu'à 9 jours d'échéance, et atteint seulement 15 % à 10 jours.

Cette caractéristique, combinée à un taux de succès très correct, montre une bonne capacité du système pour la prévision des étiages de la Seine.

Cette caractéristique est également valable pour la Loire à Nantes, avec de très bons résultats aussi bien pour le dépassement du seuil $624 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ que pour le non dépassement du seuil $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Les résultats obtenus pour la Garonne à Tonneins et le Rhône à Beaucaire sont plus contrastés, en particulier pour la Garonne.

Pour la Garonne à Tonneins, le taux de succès descend en dessous de 60 % à partir d'environ 7 jours d'échéance, à 10 jours d'échéance il atteint toutefois 55 % pour le pourcentage 50 %, ce qui reste correct, et 32 % pour le pourcentage 90 %. Le taux de fausses alarmes est plus élevé que pour les autres stations, néanmoins il reste relativement correct, en dessous de 20 % jusqu'à 6 jours d'échéance, il atteint environ 35 % à 10 jours.

Courbes de ROC

Les figures 5.29 à 5.32 présentent les courbes de ROC obtenues pour la Seine à Paris, la Loire à Nantes, la Garonne à Tonneins et le Rhône à Beaucaire.

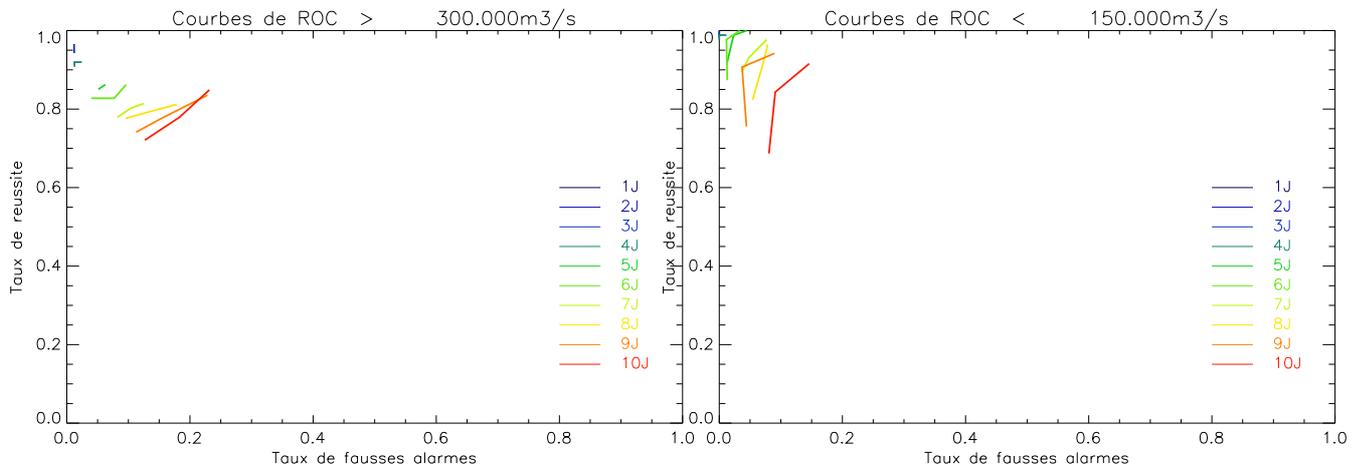


FIG. 5.29 – Courbes de ROC pour la Seine à Paris, pour les 10 échéances

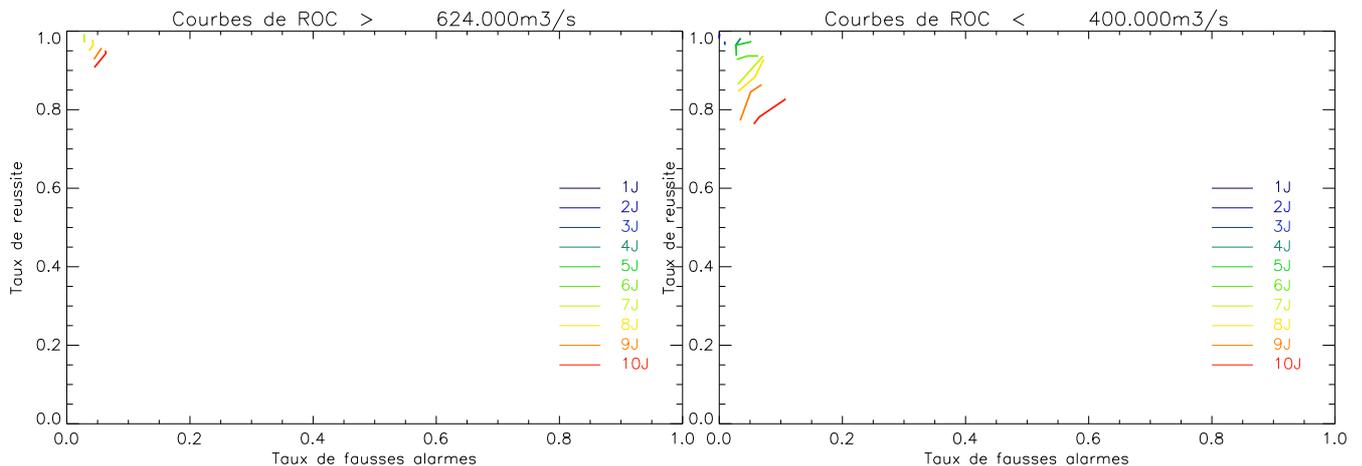


FIG. 5.30 – Courbes de ROC pour la Loire à Nantes, pour les 10 échéances

Ces figures constituent une présentation différente des résultats exposés dans le paragraphe précédent, qui est largement utilisée dans le domaine de la prédiction d'ensemble (chapitre 3).

Elle permet de visualiser facilement les caractéristiques du système de prédiction d'ensemble en matière de fausses alarmes et de taux de succès.

On retrouve sur ces courbes les bons résultats de la Seine à Paris et de la Loire à Nantes (figures 5.29 et 5.30), avec des courbes qui sont proches du coin en haut à gauche (bon taux de réussite, faible taux de fausses alarmes), avec toutefois une détérioration sensible des performances de l'ensemble avec l'échéance.

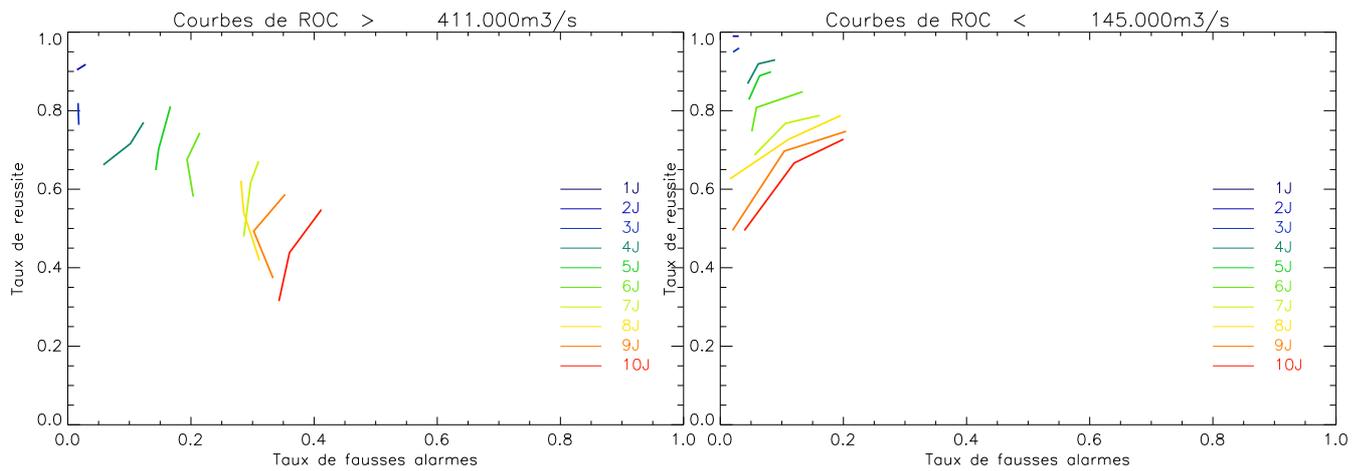


FIG. 5.31 – Courbes de ROC pour la Garonne à Tonneins, pour les 10 échéances

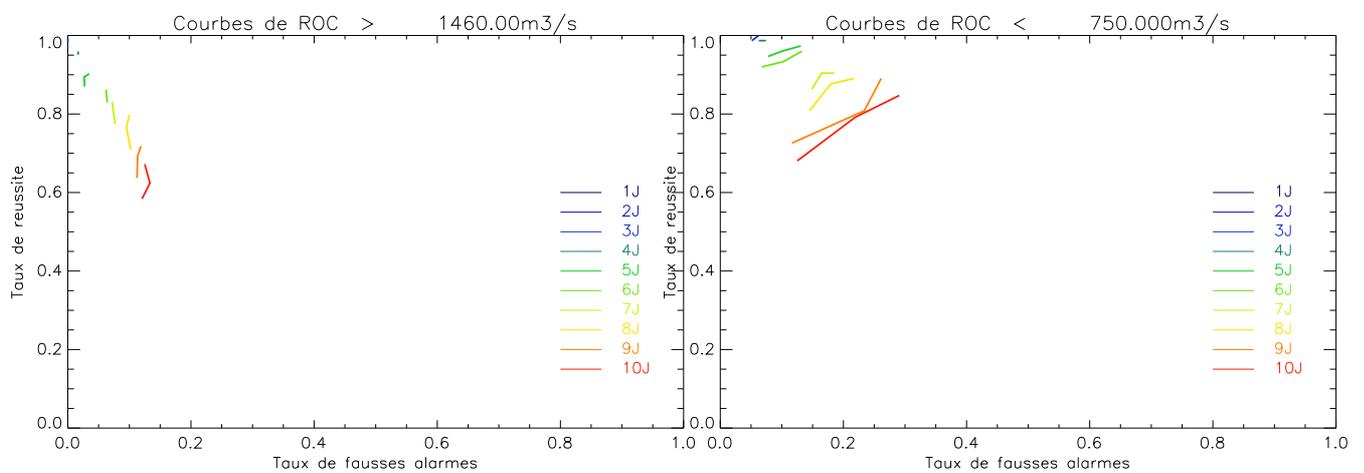


FIG. 5.32 – Courbes de ROC pour le Rhône à Beaucaire, pour les 10 échéances

On retrouve également sur les courbes de ROC les résultats plus contrastés obtenus par la Garonne à Tonneins (figure 5.31), avec des courbes qui s'éloignent de la zone de performances optimales (en haut à gauche), en particulier pour le dépassement du seuil de fort débit.

Les courbes de ROC obtenues pour le Rhône à Beaucaire (figure 5.32) sont assez similaires à celles obtenues pour la Seine et la Garonne, avec des courbes relativement proches du coin en haut à gauche, surtout aux premières échéances.

5.4.2 Résultats sur la France

La figure 5.33 présente les taux de succès, de fausses alarmes et de non détection moyens pour l'ensemble des 900 stations françaises, pour le dépassement du q50 des débits analysés par SIM sur la période d'étude.

Les résultats obtenus pour le dépassement du q90 (non présentés) ont des caractéristiques globales similaires au cas du dépassement du q50, avec toutefois des valeurs numériques sensiblement moins bonnes.

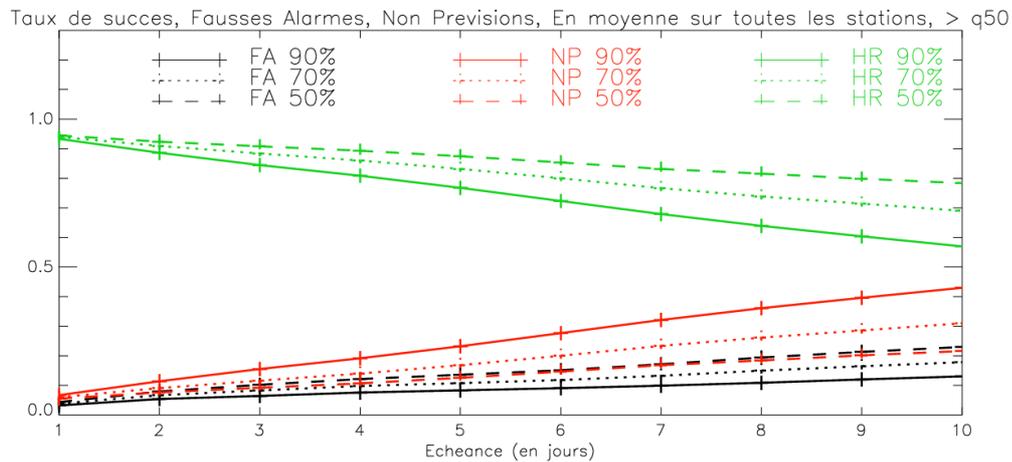


FIG. 5.33 – Taux de succès, de fausses alarmes, de non détection, à chaque échéance, en moyenne sur les 900 stations en France, pour le dépassement du q50 des débits analysés par SIM de septembre 2004 à juillet 2005.

On note que les taux de succès moyens sur l'ensemble des stations ont des valeurs élevées, d'environ 95 % au premier jour d'échéance, et 60 à 80 % à 10 jours d'échéance. Les taux de fausses alarmes sont relativement faibles, environ 5 % à 1 jour d'échéance, jusqu'à environ 20 % à 10 jours. Néanmoins, ces scores constituent une moyenne sur l'ensemble des stations, information qu'il est intéressant de compléter avec une mesure de la répartition des valeurs obtenues par les 900 stations.

Une information sur cette répartition des valeurs des taux de succès et de fausses alarmes obtenues par les stations françaises est présentée par les figures 5.34 et 5.35.

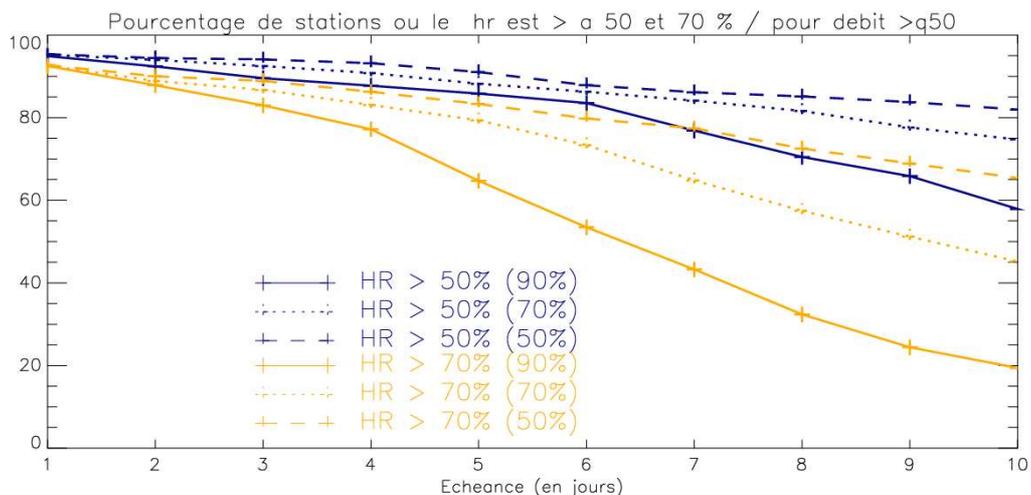


FIG. 5.34 – Pourcentage de stations pour lesquelles le taux de détection de dépassement du seuil q50 est supérieur à 50 % et à 70 %, en fonction de l'échéance, pour les trois pourcentages de membres de l'ensemble.

La figure 5.34 présente le pourcentage de stations pour lesquelles le taux de succès est supérieur à 50 et 70 %, en fonction de l'échéance, pour le dépassement de la valeur q_{50} des débits analysés par le run SIM de référence sur la période.

On note que le taux de succès dépasse les 50 % pour plus de 80 % des stations jusqu'à 6 jours d'échéance, à 10 jours c'est le cas pour 60 à 80 % des stations (selon le pourcentage de membres de l'ensemble considérés). Le pourcentage de stations pour lesquelles le taux de succès dépasse 70 % dépend fortement du pourcentage de membres de l'ensemble utilisé. Pour le pourcentage de membres de l'ensemble le plus favorable (50 %), le pourcentage de stations avec un taux de succès supérieur à 70 % ne descend pas en dessous de 65 %, valeur atteinte à 10 jours d'échéance. En revanche, pour le pourcentage de membres de l'ensemble le moins favorable (90 %), cette fraction de stations, si elle commence à environ 95 % à 1 jour d'échéance, descend à 20 % seulement à 10 jours.

Le taux de fausses alarmes est quant à lui inférieur à 50 et même 30 % pour plus de 70 % des stations, à toutes les échéances et pour les trois pourcentages de membres de l'ensemble (figure 5.35).

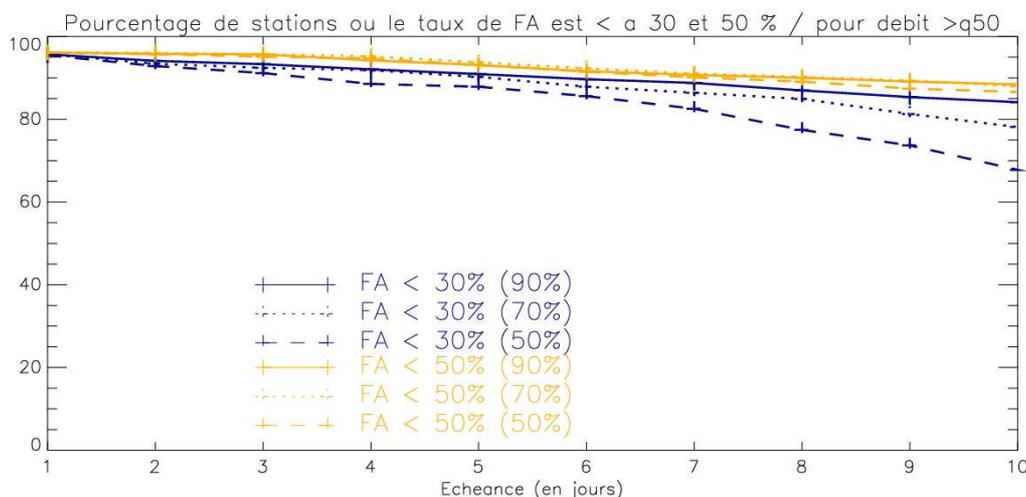


FIG. 5.35 – Pourcentage de stations pour lesquelles le taux de fausses alarmes de dépassement du seuil q_{50} est inférieur à 30 % et à 50 %, en fonction de l'échéance, pour les trois pourcentages de membres de l'ensemble.

La prévision d'ensemble d'un dépassement du q_{50} des débits de la période est donc très correcte pour une grande majorité des stations françaises, avec en particulier un taux de fausses alarmes souvent faible.

Les figures 5.36 à 5.38 présentent les résultats obtenus pour le non dépassement du seuil q_{10} des débits analysés par le run SIM de référence sur la période.

En moyenne (figure 5.36), les taux de succès ont des valeurs correctes. A un jour d'échéance, ils valent pour les trois pourcentages de membres de l'ensemble plus de 90 %. A 10 jours, ils s'échelonnent de 45 à 79 %. Les taux de fausses alarmes restent très faibles, moins de 10 % jusqu'à 10 jours d'échéance quand on considère 90 % des membres de l'ensemble, et au maximum 20 % pour les autres cas.

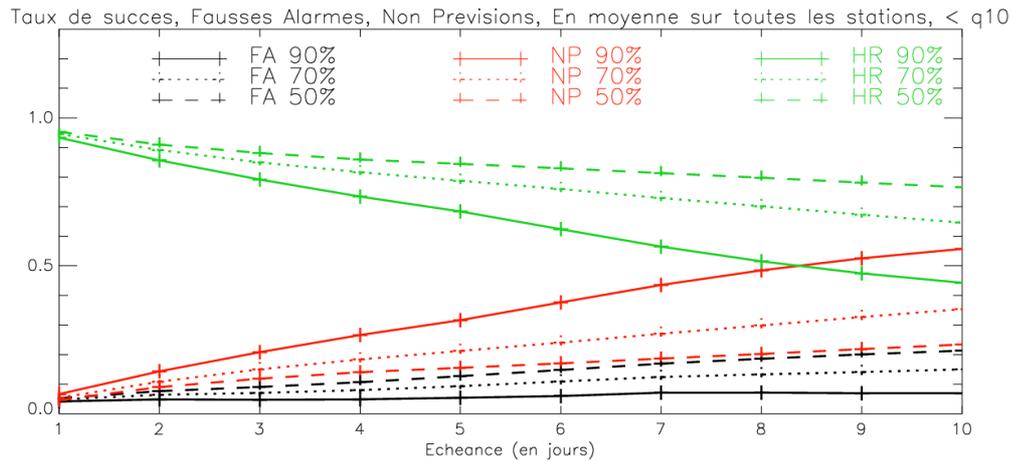


FIG. 5.36 – Taux de succès, de fausses alarmes, de non détection, à chaque échéance, en moyenne sur les 900 stations en France, pour le non dépassement du q10 des débits analysés par SIM de septembre 2004 à juillet 2005.

La répartition des valeurs des taux de succès et de fausses alarmes obtenues par les stations françaises pour le non dépassement du seuil q10 est présentée par les figures 5.37 et 5.38.

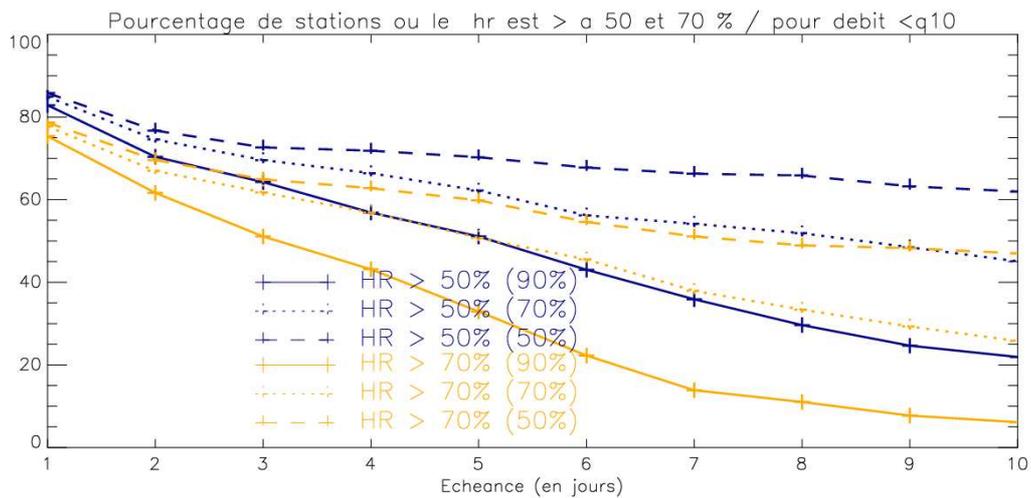


FIG. 5.37 – Pourcentage de stations pour lesquelles le taux de détection de non dépassement du seuil q10 est supérieur à 50 % et à 70 %, en fonction de l'échéance, pour les trois pourcentages de membres de l'ensemble.

Les résultats obtenus pour le non dépassement du q10 sont comparables à ceux obtenus pour le dépassement du q50.

En particulier, les pourcentages de stations pour lesquelles le taux de fausses alarmes est inférieur à 30 et 50 % (figure 5.38) sont relativement élevés. En effet, à 1 jour d'échéance environ 90 % des stations ont un taux de fausses alarmes inférieur à 30 %, jusqu'à 6 jours elles sont plus de 70 %, et à 10 jours d'échéance elles sont environ 55 % (selon le pourcentage de membres de l'ensemble considéré).

Ces graphiques montrent que l'ensemble est capable de produire de bonnes prévisions des faibles débits et de leur durée pour une majorité de stations, avec en particulier un taux de fausses alarmes très faibles, ce qui peut rendre ces prévisions d'ensemble utiles et informatives à des fins de gestion des eaux (barrages, industries, agricultures).

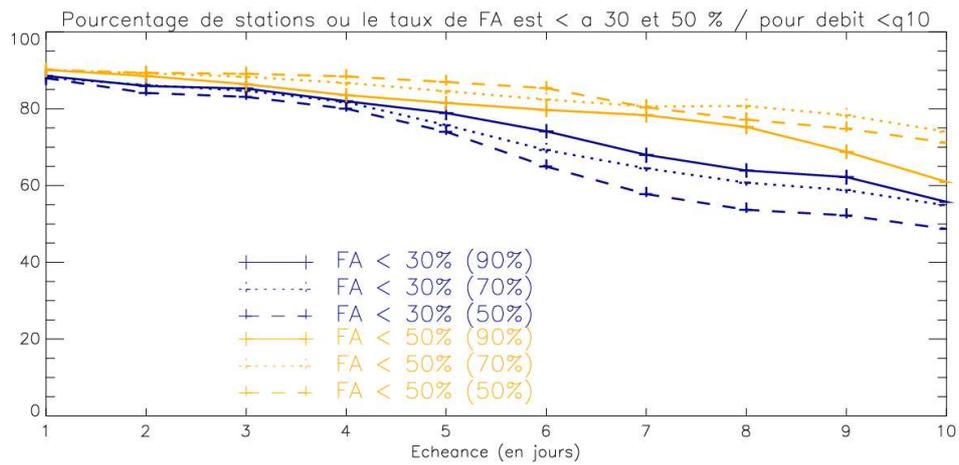


FIG. 5.38 – Pourcentage de stations pour lesquelles le taux de fausses alarmes de non dépassement du seuil q_{10} est inférieur à 30 % et à 50 %, en fonction de l'échéance, pour les trois pourcentages de membres de l'ensemble.

5.5 Ranked Probability Score et Skill Score associé

Le Ranked Probability Score (RPS) est une généralisation du score de Brier, qui permet de s'intéresser non plus à un événement binaire de type dépassement de seuil, mais à toute la gamme de valeurs prises par les prévisions d'ensemble de débits et par le run SIM de référence.

Pour calculer le Ranked Probability Score, il faut diviser la plage des valeurs de débit possibles en un certain nombre d'intervalles. J'ai utilisés 10 intervalles, délimités par les valeurs des déciles calculés grâce aux valeurs du débit analysé sur la période d'étude. Afin de calculer le Ranked Probability Score, on s'intéresse à la probabilité que le débit prévu appartienne à chaque intervalle, et on détermine aussi dans quel intervalle se trouve la vérification (le débit analysé par SIM) (les détails du calcul du RPS sont exposés dans le chapitre 3).

5.5.1 Résultats pour quelques grandes stations

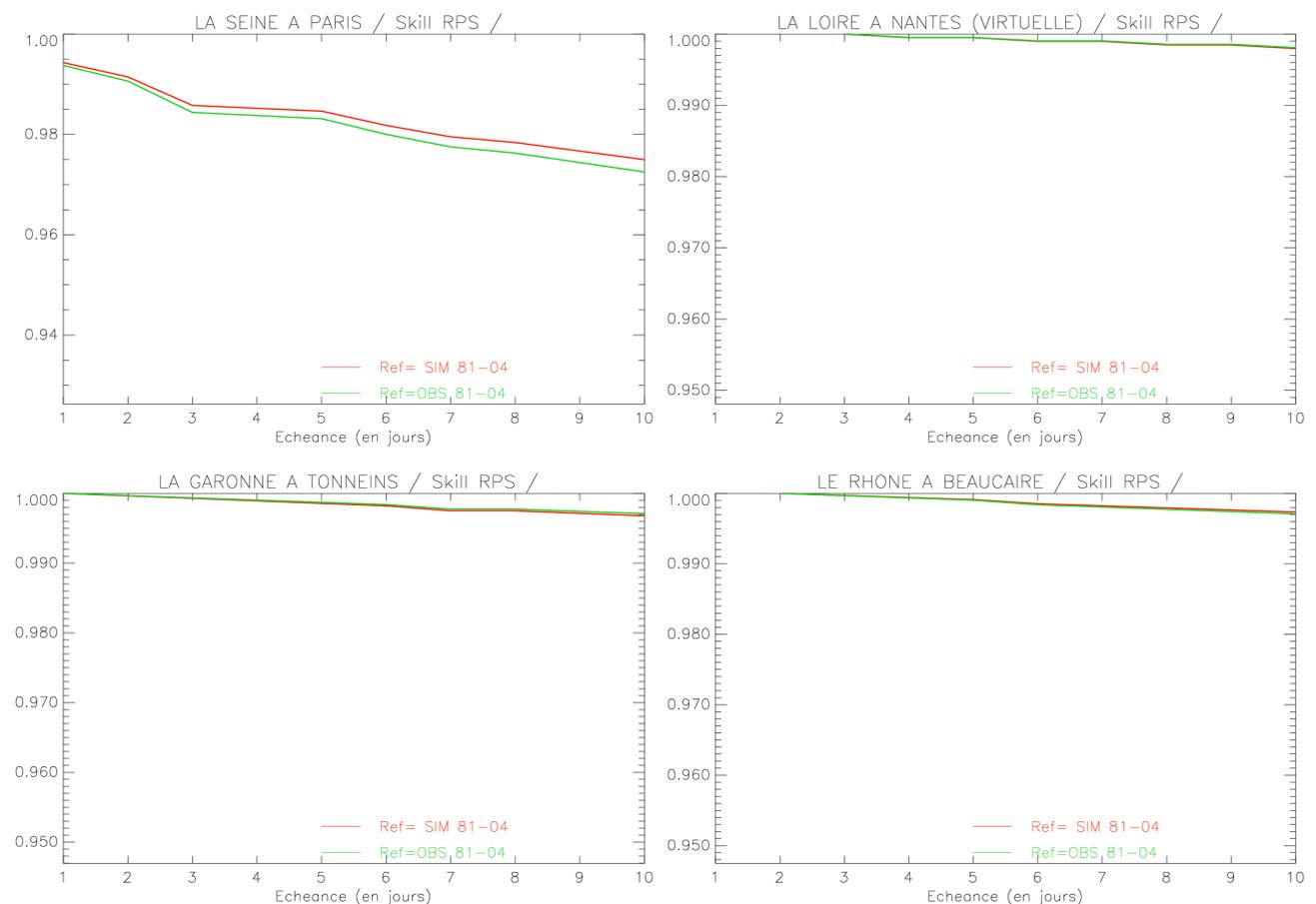


FIG. 5.39 – Ranked Probability Skill Score (RPSS) pour la Seine à Paris, la Loire à Nantes, la Garonne à Tonneins, et le Rhône à Beaucaire, en fonction de l'échéance, calculé avec la climatologie SIM 1981-2004 et la climatologie observée 1981-2004.

Les RPSS obtenus pour les quatre stations sont très proches de 1, ce qui indique que les prévisions d'ensemble de débits constituent une meilleure prévision que la climatologie (observée ou analysée par SIM). Les RPSS diminuent sensiblement avec l'échéance, ce qui indique une dégradation de la qualité de la prévision d'ensemble par rapport à la climatologie.

5.5.2 Résultats sur la France

Les graphiques de la figure 5.40 présentent les RPSS obtenus par les 900 stations françaises, en fonction de la surface du bassin, pour 1, 5 et 10 jours d'échéance.

Les RPSS sont globalement plus proches de 1 pour les grandes stations, les plus faibles valeurs de RPSS étant plutôt associées aux plus petites stations. On constate également une détérioration des RPSS avec l'échéance, avec un nuage de points qui se déplace vers le bas quand l'échéance augmente.

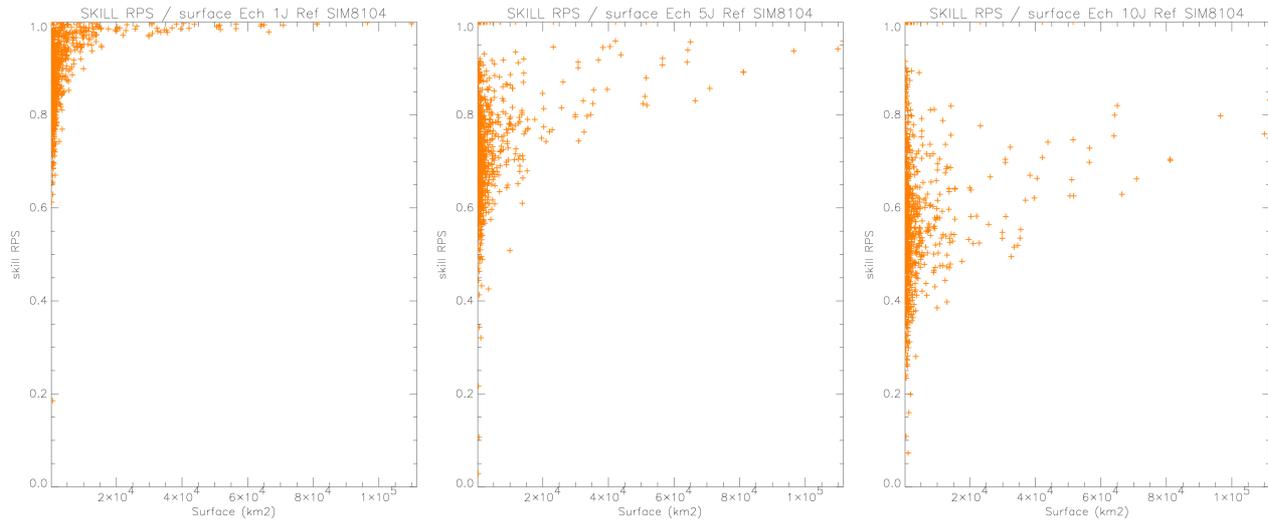


FIG. 5.40 – RPSS en fonction de la surface du bassin, pour environ 900 stations en France. A gauche : échéance 1 jour, au centre : échéance 5 jours, à droite : échéance 10 jours.

5.6 Conclusion

L'analyse statistique des performances du système de prédiction d'ensemble des débits sur la période septembre 2004 - juillet 2005 a mis en évidence plusieurs caractéristiques.

Pour les quatre grandes stations présentées en détails dans cette étude (Seine à Paris, Loire à Nantes, Garonne à Tonneins, Rhône à Beaucaire), la moyenne de l'ensemble est capable de reproduire correctement les débits analysés sur la période. L'EQM est 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 apparaître une faiblesse notable dans la dispersion de l'ensemble, en particulier aux premières échéances. Ceci est lié en grande partie aux prévisions d'ensemble de précipitations elles mêmes, en effet, elles sont produites à des fins de prédiction à moyenne échéance, et non à courte échéance, et sont optimisées pour avoir une dispersion maximale à 48 heures d'échéance seulement. Ensuite, les diagrammes ont une forme plus plate, ce qui indique que la fiabilité augmente, surtout pour la Seine et la Loire. Ailleurs, le manque de dispersion reste plus 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 suffisamment forte au début de la prédiction. On peut aussi penser que 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, le seul élément perturbé est les prévisions de précipitation et de température. Une prise en compte des incertitudes dans l'état initial ou dans la modélisation hydrologique par exemple permettrait peut être d'obtenir une dispersion plus grande dans l'ensemble des débits prévus.

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

Il apparaît également que l'ensemble est capable de produire de bonnes prévisions des faibles débits, dans cette situation les scores obtenus sont bons (Brier Score, RPS et Skill Scores associés). En particulier, le taux de fausses alarmes associé à ce type d'événement 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 inexistence dans l'échantillon utilisé pour la vérification.

Chapitre 6

Etude d'événements particuliers

6.1 Introduction

La période utilisée pour l'étude statistique des performances du système de prévision d'ensemble des débits (de septembre 2004 à juillet 2005) ayant été très sèche et ne présentant pas de crue significative, il est délicat de conclure quant aux capacités du système pour la prévision des fortes crues.

Il est alors intéressant de compléter cette analyse statistique par l'analyse de quelques cas de grandes crues du passé récent. Ceci ne permettra pas de qualifier les capacités du système pour les crues en général, mais ces exemples permettront de visualiser les sorties du système et l'utilisation qui peut être faite de cette information au jour le jour dans les situations de crue.

Le premier épisode présenté est le cas de la crue de la Seine de Mars 2001. Ce type d'événement est le but principal du système de prévision d'ensemble des débits, qui vise tout particulièrement la prévision à longue échéance des débits des grands bassins français. Sur ces bassins, sujets à des crues lentes et de grande ampleur, une prévision à échéance de 10 jours permet d'obtenir une information qu'on ne peut pas prévoir par la connaissance des débits amonts. A Paris en particulier, dans la crainte d'une crue d'une ampleur extrême comme celle de 1910, l'anticipation de ces événements est cruciale pour une bonne mise en place des procédures de sécurité (mise en sécurité des transports souterrains, voies sur berge, déplacement des services de l'Etat, ...).

Le second cas particulier présenté est la crue du Rhône de Décembre 2003. Cet épisode est relativement différent du précédent, car même s'il a touché une très grande région, sa durée est beaucoup plus courte, quelques jours seulement, avec un épisode de très fortes précipitations convectives, qui a conduit à des débits exceptionnellement forts, avec une durée de retour de débit du Rhône à Beaucaire estimée à plus de 100 ans.

Enfin, la dernière partie de ce chapitre est consacrée à des événements ayant eu lieu en septembre et octobre 2006, dans plusieurs régions de France, en particulier dans le Sud Est. Ces crues rapides ne sont pas le principal objectif de ce système de prévision d'ensemble, qui n'est pas le système le plus adapté à ce type d'événement, et ce pour plusieurs raisons : d'une part, les modèles ISBA et MODCOU sont à améliorer en ce qui concerne la simulation des crues rapides dans le Sud-Est (partition drainage/ruissellement d'ISBA, pas de temps relativement long (3 heures) de MODCOU, ...). De plus, les prévisions d'ensemble du CEP sont produites avec une faible résolution, en tenant compte d'un relief assez lisse sur la France et en particulier sur le sud-est, et un pas de temps de 6h, ce n'est donc pas un système qui vise la prévision des phénomènes convectifs locaux typiques de ces régions. Néanmoins, l'étude de ces cas particuliers est intéressante et permet de voir l'apport ainsi que les limites et améliorations possibles du système pour ces événements.

6.2 Etude de la crue de la Seine de mars 2001

La crue de la Seine qui a eu lieu en mars 2001 est l'une des plus importantes de ces 10 dernières années. Avec un débit journalier dépassant les $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, elle a une durée de retour de l'ordre de 10 ans. C'est un événement typique du bassin de la Seine, d'une durée relativement longue, de l'ordre du mois, avec un cumul de précipitations relativement important tombant sur un sol déjà humide, sur l'ensemble du bassin, avec des ondes de crues se propageant sur plusieurs affluents de la Seine (partie III chapitre 5).

La figure 6.1 présente les débits journaliers de la Seine à Paris (observés, issus de la chaîne SIM analyse et prévus par l'ensemble, chaque jour, avec 10 jours d'échéance, une couleur par jour de prévision) en mars et avril 2001. Les prévisions de chaque jour sont détaillées figure 6.2 à 6.17.

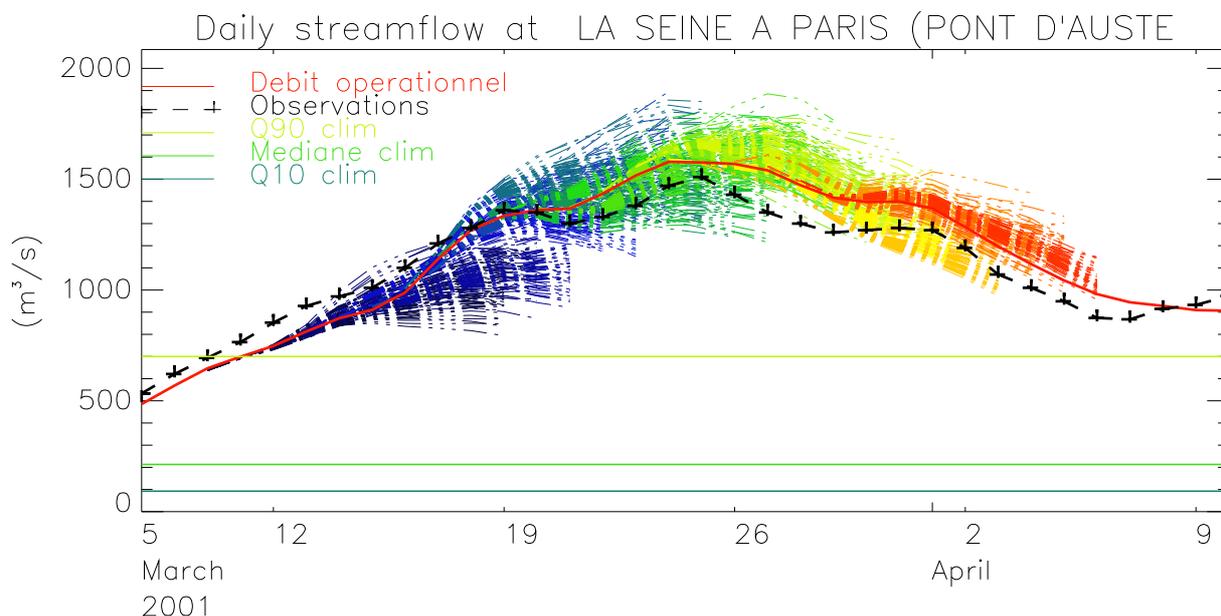


FIG. 6.1 – Débit journalier de la Seine à Paris lors de la crue de Mars 2001

On constate tout d'abord que cet événement est très bien reproduit par SIM, avec un débit analysé très proche du débit observé (la simulation de cette crue a obtenu une efficacité de 0.936 et un rapport des lames d'eau de 0.970, partie III chapitre 5). De plus, le débit initial analysé au 5 mars est très proche du débit observé à cette même date.

D'autre part, les prévisions d'ensemble semblent très cohérentes avec le débit analysé par SIM et les observations. Si le premier run présenté (10 mars 2001) ne semble pas aller vers une hausse importante du débit, à partir du 11 mars les prévisions reproduisent bien la montée du débit. Les plages de débits prévues par les runs successifs de prévision d'ensemble sont proches du débit analysé et du débit observé.

De plus, la date du pic de crue ainsi que du début de la décroissance du débit sont bien vues par les prévisions (dans les observations et l'analyse, ceci a lieu le 24-25 mars), et ce à longue échéance. En effet, dès le run du 16 mars, la prévision ne semble plus faire augmenter le débit, ce qui devient très clair dans le run du 19 mars, et se confirme dans les runs suivants.

La phase de décrue est également bien vue par les prévisions.

Dans cet exemple, la prévision d'ensemble permet de détecter cette forte crue avec une longue échéance. La prévision d'ensemble conduit à une prévision réaliste en terme d'intensité et de temporalité de la crue, qui pourrait être tout à fait utile à des fins de pré-alerte puis d'alerte. En particulier, le système prévoit bien le moment du pic de crue ainsi que la décrue.

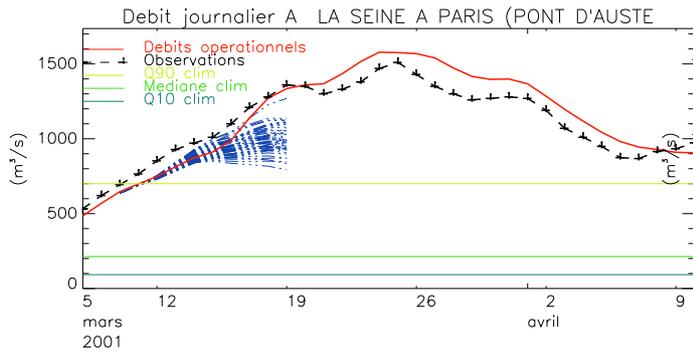


FIG. 6.2 – Prédiction du 10 mars 2001

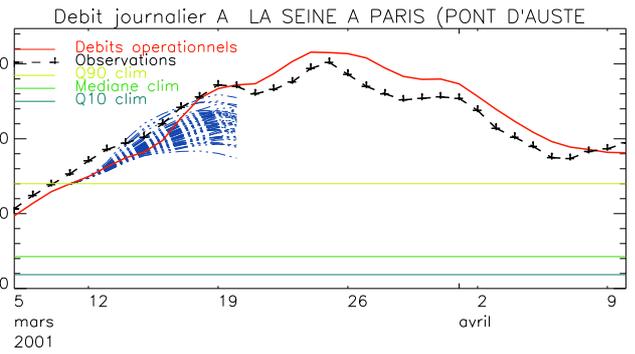


FIG. 6.3 – Prédiction du 11 mars 2001

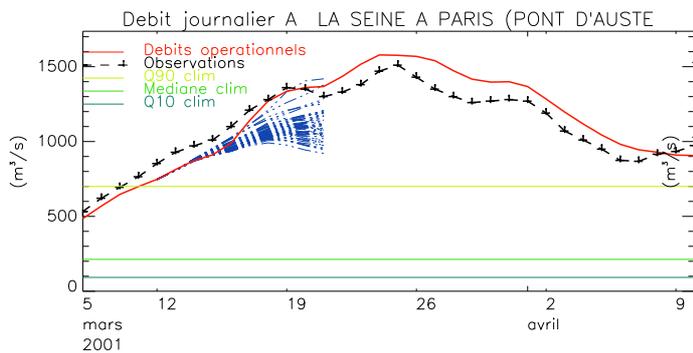


FIG. 6.4 – Prédiction du 12 mars 2001

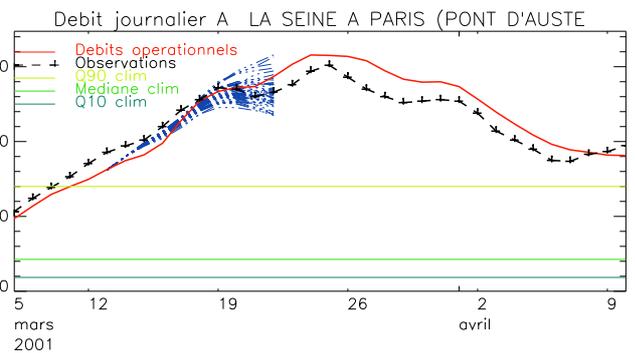


FIG. 6.5 – Prédiction du 13 mars 2001

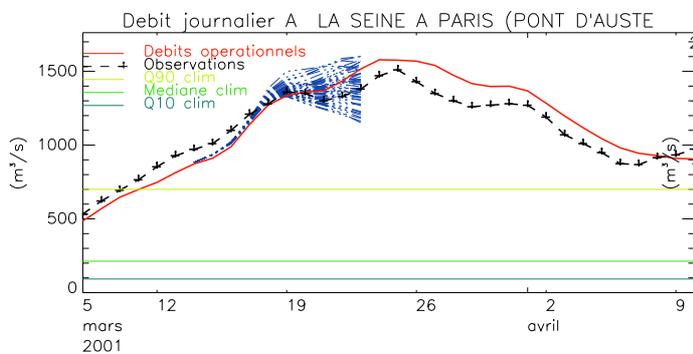


FIG. 6.6 – Prédiction du 14 mars 2001

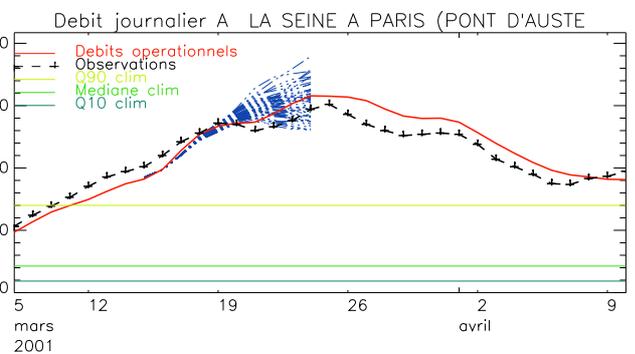


FIG. 6.7 – Prédiction du 15 mars 2001

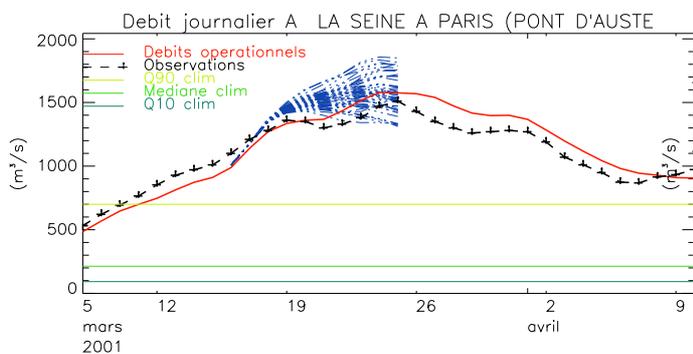


FIG. 6.8 – Prédiction du 16 mars 2001

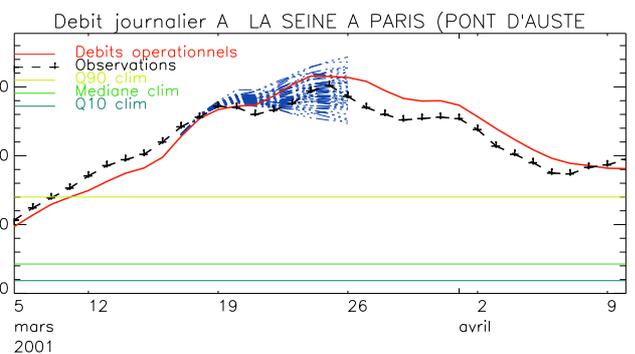


FIG. 6.9 – Prédiction du 17 mars 2001

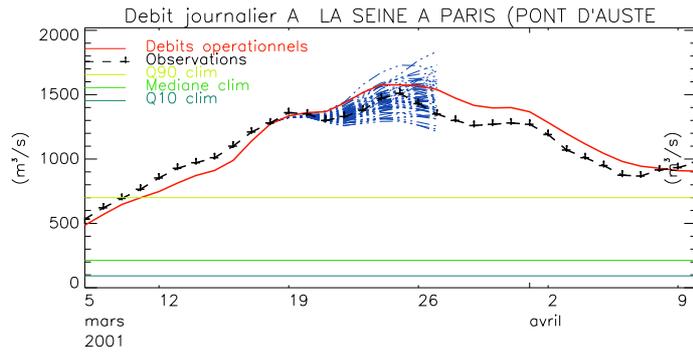


FIG. 6.10 – Prédiction du 18 mars 2001

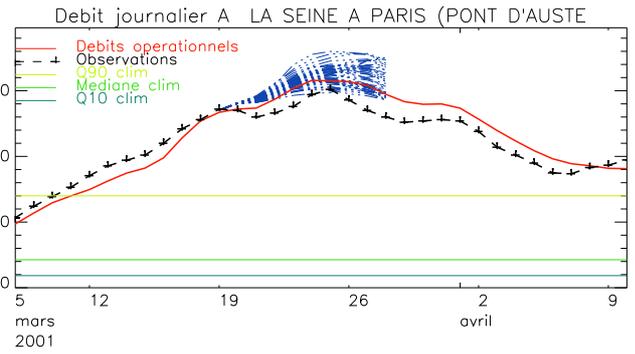


FIG. 6.11 – Prédiction du 19 mars 2001

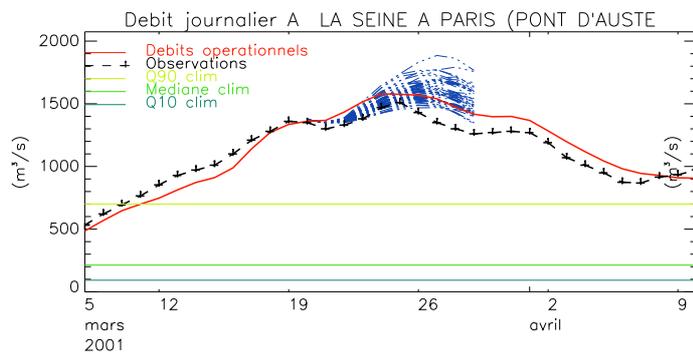


FIG. 6.12 – Prédiction du 20 mars 2001

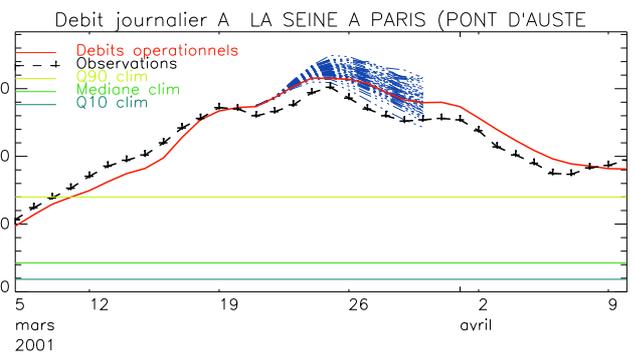


FIG. 6.13 – Prédiction du 21 mars 2001

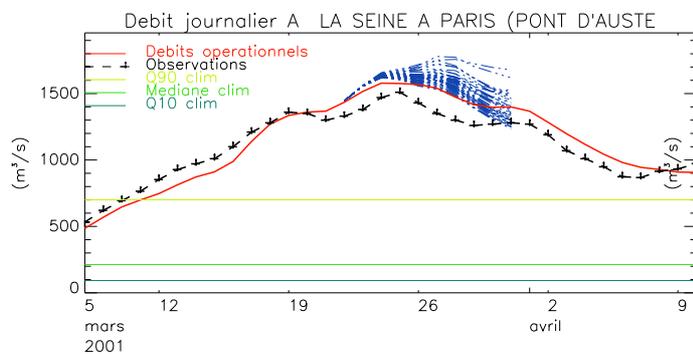


FIG. 6.14 – Prédiction du 22 mars 2001

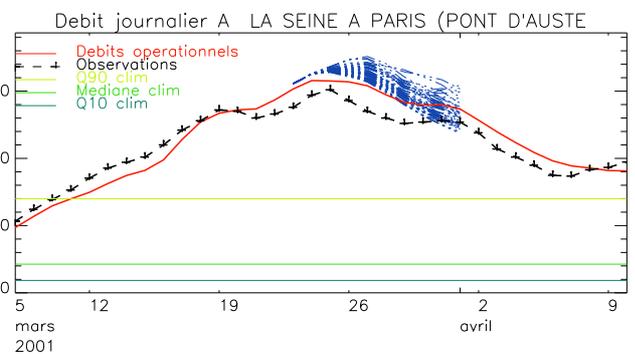


FIG. 6.15 – Prédiction du 23 mars 2001

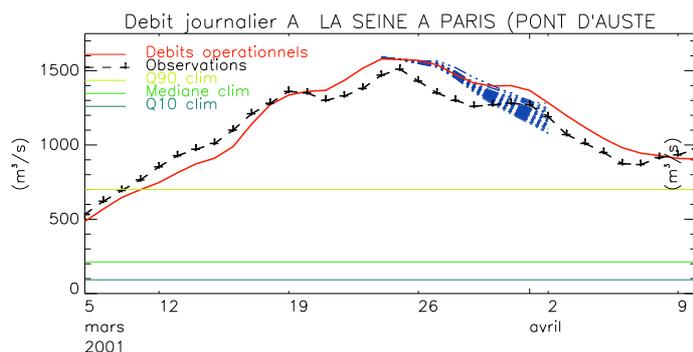


FIG. 6.16 – Prédiction du 24 mars 2001

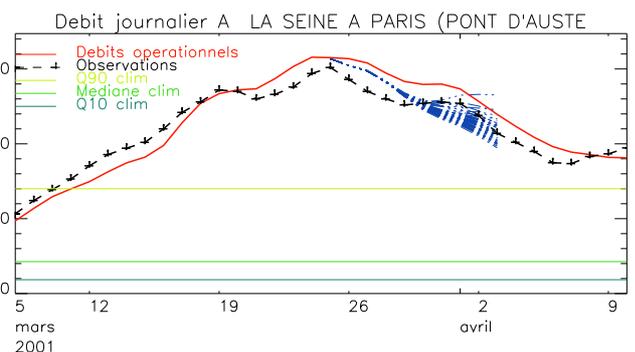


FIG. 6.17 – Prédiction du 25 mars 2001

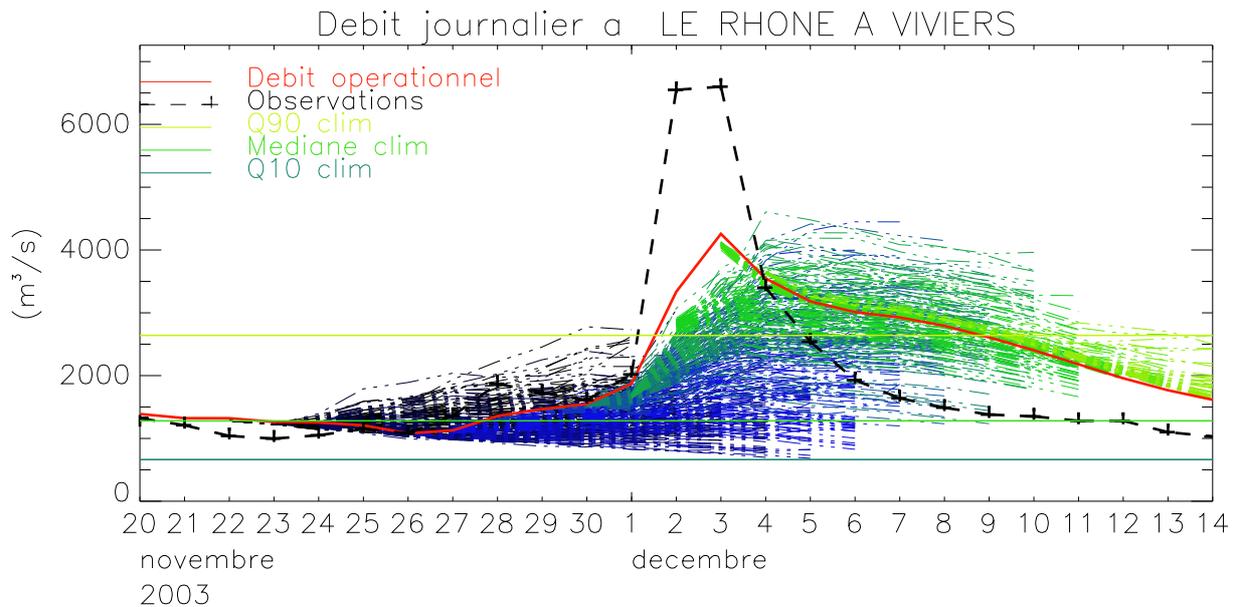


FIG. 6.19 – Débit journalier du Rhône à Viviers lors de la crue de Décembre 2003

L'analyse a posteriori par SIM de la crue du Rhône de 2003 a été étudiée ([MARTIN 2005]) afin d'expliquer les différences notables entre le débit simulé par SIM et le débit observé à Viviers (figure 6.19). Le système SIM ne simule pas de manière satisfaisante les crues rapides, avec un pic de crue qui est sous estimé, mais des débits trop élevés pour les jours suivant le pic. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ce comportement. Les précipitations analysées par SAFRAN semblent légèrement sous estimées, néanmoins la production totale d'eau d'ISBA sur la période est acceptable. La partition drainage/ruissellement semble également en cause (trop peu de ruissellement, drainage trop lent). De plus, le routage de MODCOU explique sans doute lui aussi les carences de la simulation de la crue du Rhône, en effet il a été calibré sur l'ensemble du bassin et pour toutes les situations, c'est pourquoi sur un épisode de crue touchant une partie du bassin, il n'est pas optimal. Un système de routage qui tiendrait compte de la vitesse de l'eau en rivière en fonction du débit améliorerait très vraisemblablement les résultats.

La simulation par SIM de la crue du Rhône de 2003 est donc sensible à plusieurs paramétrisations des processus physiques. Néanmoins, les valeurs atteintes par le débit simulé (jusqu'à $4200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à Viviers et $7600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à Beaucaire, figure 6.32) sont tout à fait exceptionnelles dans la climatologie du bassin.

Les prévisions d'ensemble des débits du Rhône à Viviers présentent plusieurs caractéristiques notables.

On constate que les premiers runs (du 22 novembre au 27 novembre, figures 6.20 à 6.25) semblent sous estimer la crue, avec des débits qui n'ont pas tendance à beaucoup augmenter. Ce n'est qu'à partir du 28 novembre (figure 6.26) qu'un pourcentage non négligeable de membres de l'ensemble prévoient un dépassement du Q90. Même si le pic de crue semble en retard dans les prévisions, les valeurs maximales prévues sont tout à fait de l'ordre du maximum simulé par SIM, ce qui montre que l'ensemble est capable d'aller vers des événements très extrêmes.

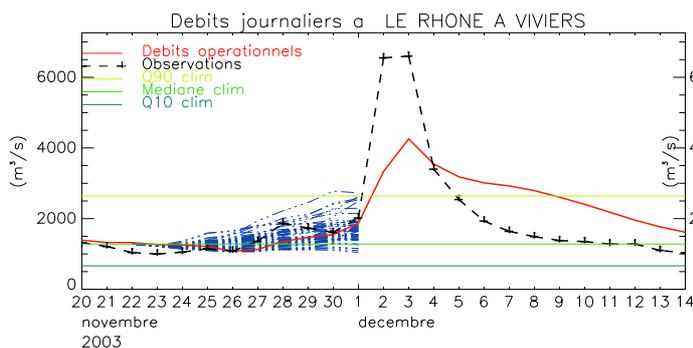


FIG. 6.20 – Prévission du 22 novembre 2003

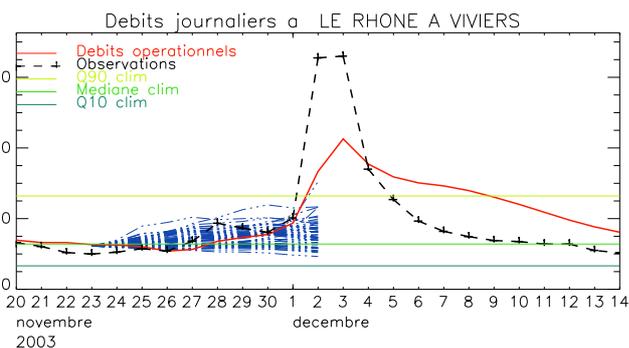


FIG. 6.21 – Prévission du 23 novembre 2003

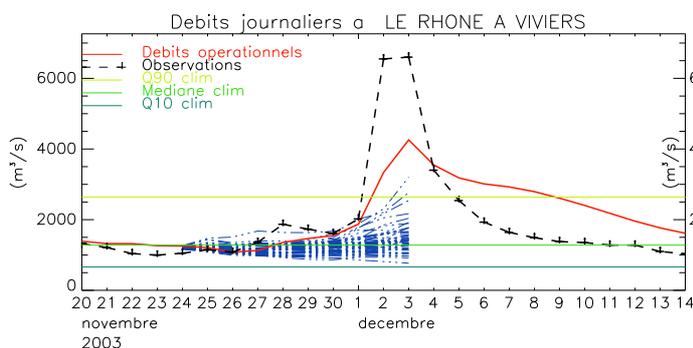


FIG. 6.22 – Prévission du 24 novembre 2003

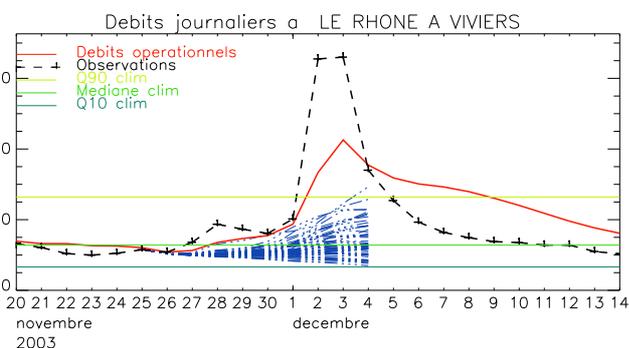


FIG. 6.23 – Prévission du 25 novembre 2003

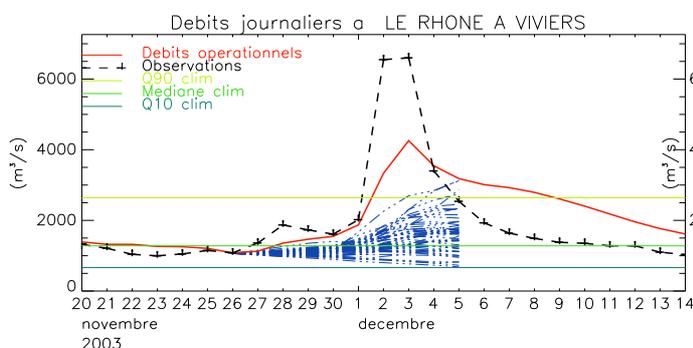


FIG. 6.24 – Prévission du 26 novembre 2003

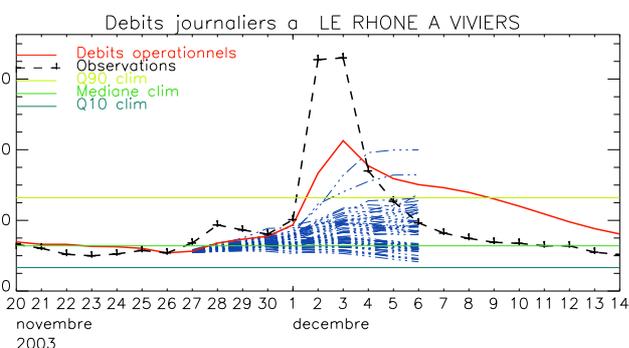


FIG. 6.25 – Prévission du 27 novembre 2003

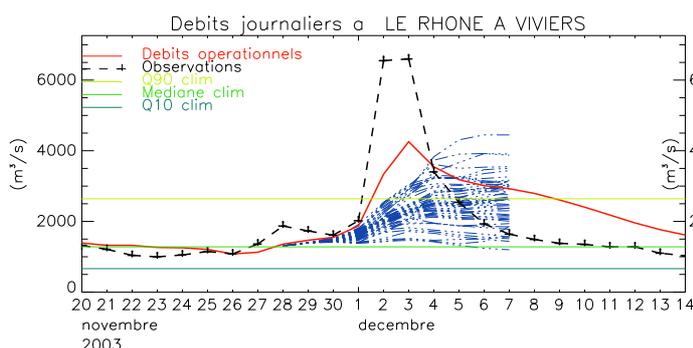


FIG. 6.26 – Prévission du 28 novembre 2003

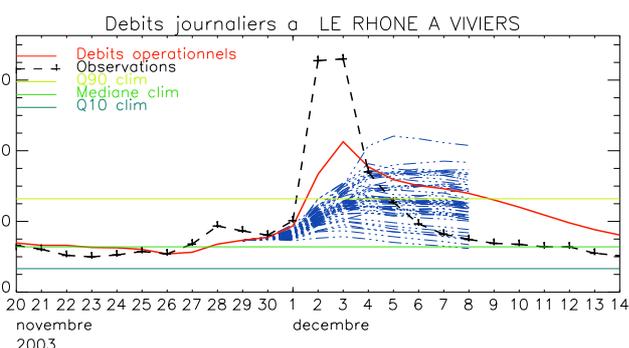


FIG. 6.27 – Prévission du 29 novembre 2003

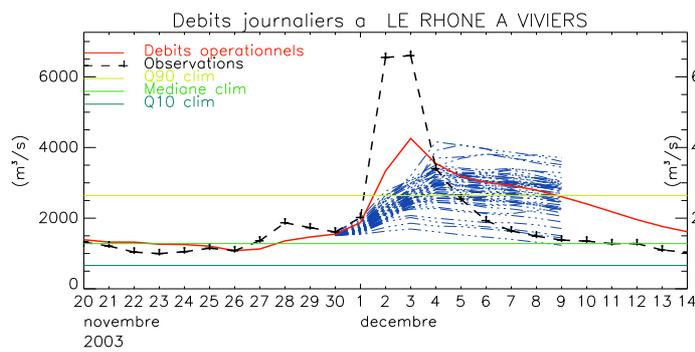


FIG. 6.28 – Prédiction du 30 novembre 2003

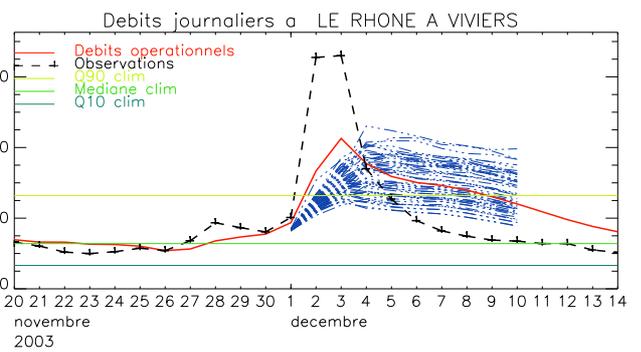


FIG. 6.29 – Prédiction du 1 décembre 2003

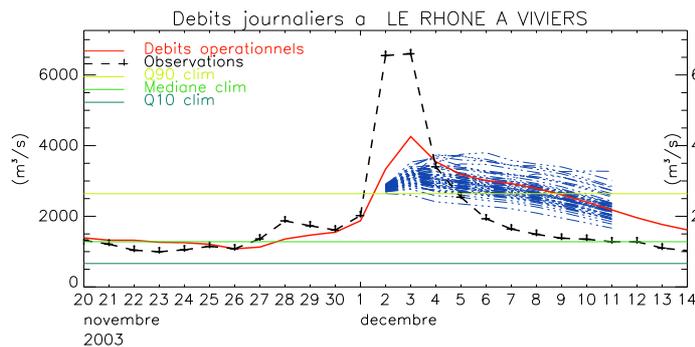


FIG. 6.30 – Prédiction du 2 décembre 2003

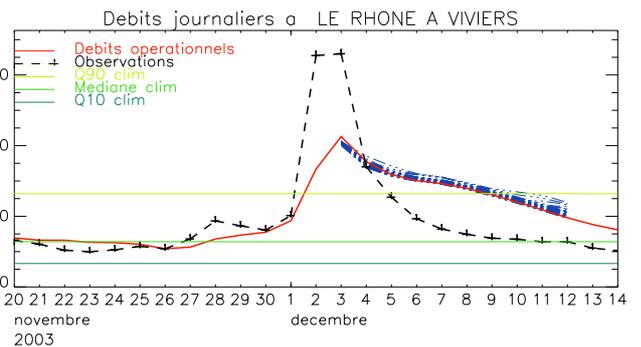


FIG. 6.31 – Prédiction du 3 décembre 2003

6.3.2 Le Rhône à Beaucaire

La figure 6.19 présente les débits journaliers du Rhône à Beaucaire (observés, issus de la chaîne SIM analyse et prévus par l'ensemble, chaque jour, avec 10 jours d'échéance, une couleur par jour de prévision) en novembre et décembre 2003. Les prévisions de chaque jour sont détaillées figure 6.33 à 6.44.

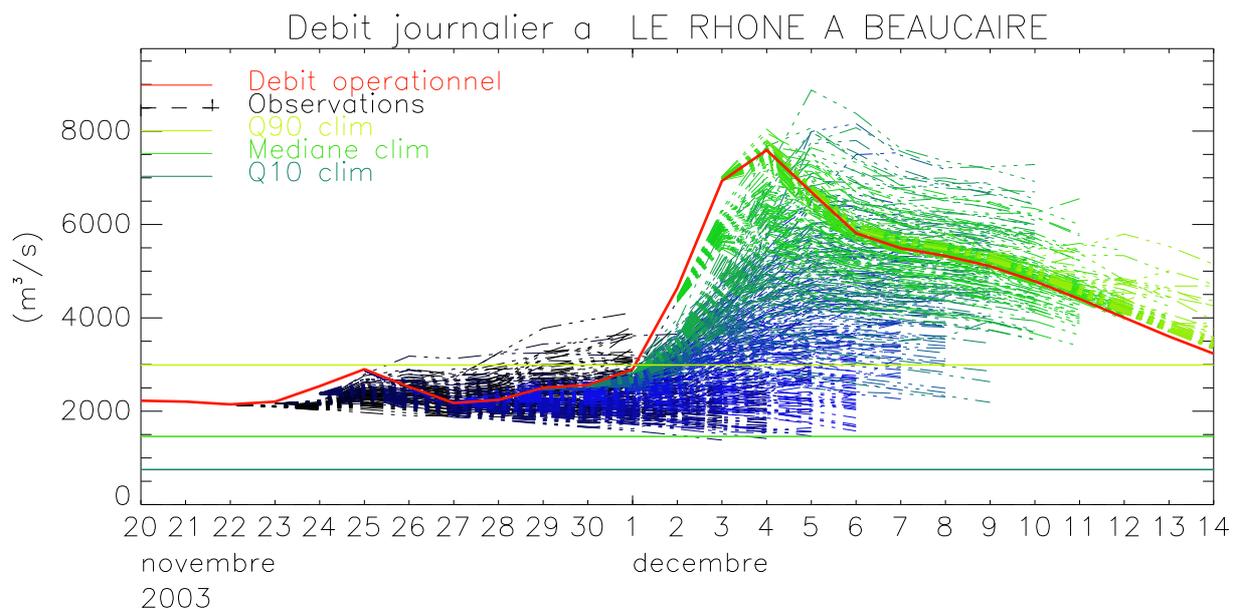


FIG. 6.32 – Débit journalier du Rhône à Beaucaire lors de la crue de Décembre 2003

Tout comme à Viviers, les premières prévisions d'ensemble de débit à Beaucaire ne vont pas vers une forte hausse de débit. A partir du 26 novembre (figure 6.37), on voit apparaître une tendance à la hausse qui se confirme dans les runs des jours suivants. A partir du run du 28 novembre

(figure 6.39), une fraction importante de membres de l'ensemble dépassent la valeur du Q99 (près de $5500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). De même qu'à Viviers, les valeurs maximales atteintes par les débits d'ensemble prévus sont extrêmement élevées, et compatibles avec le maximum simulé par SIM.

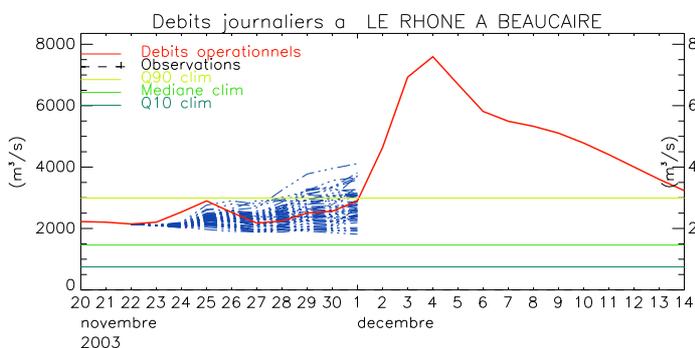


FIG. 6.33 – Prévion du 22 novembre 2003

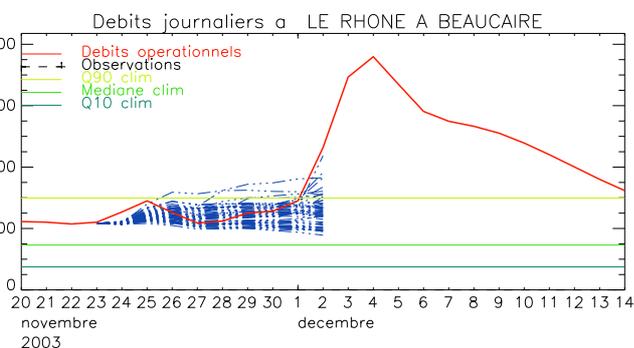


FIG. 6.34 – Prévion du 23 novembre 2003

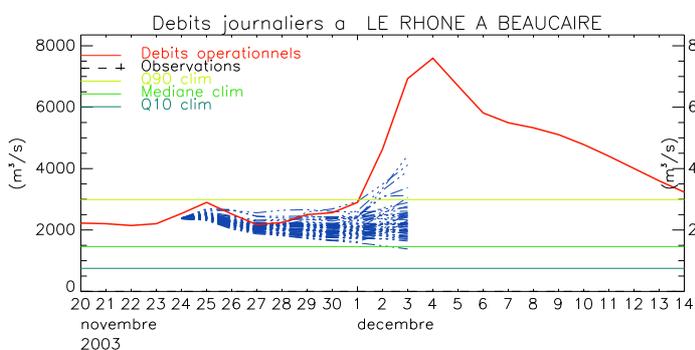


FIG. 6.35 – Prévion du 24 novembre 2003

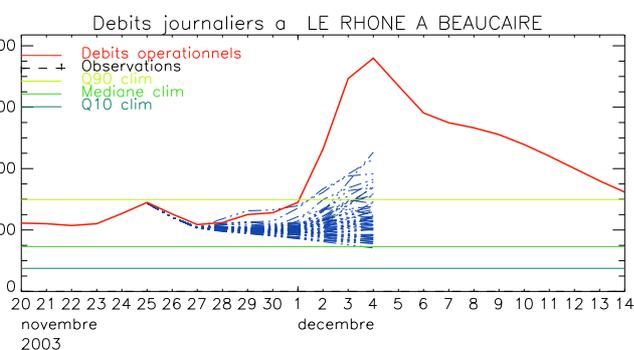


FIG. 6.36 – Prévion du 25 novembre 2003

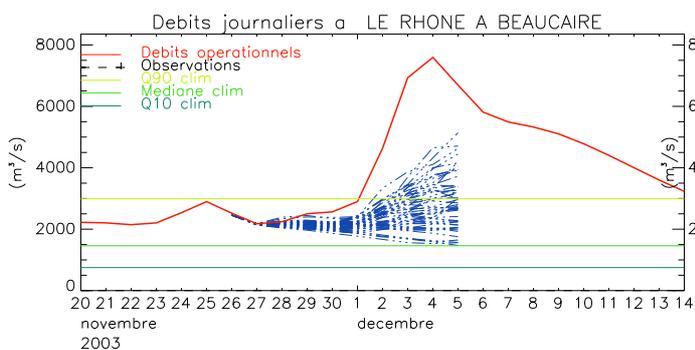


FIG. 6.37 – Prévion du 26 novembre 2003

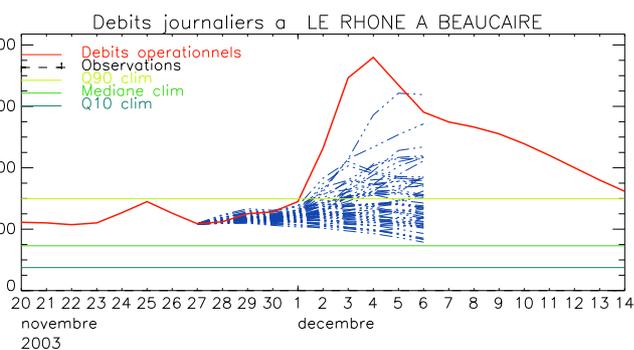


FIG. 6.38 – Prévion du 27 novembre 2003

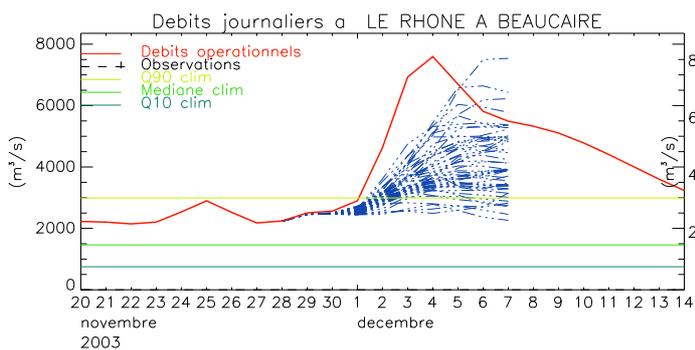


FIG. 6.39 – Prévion du 28 novembre 2003

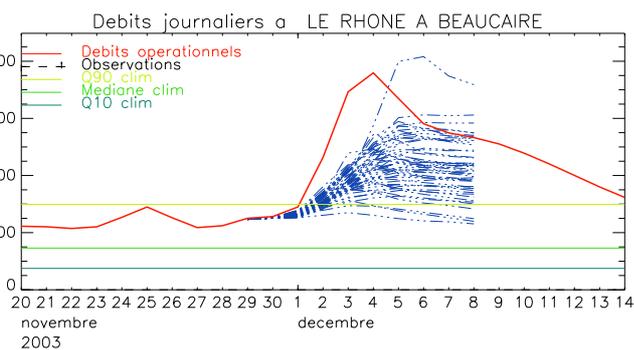


FIG. 6.40 – Prévion du 29 novembre 2003

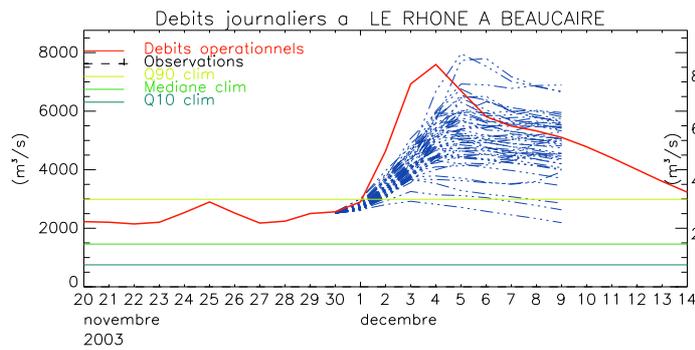


FIG. 6.41 – Prédiction du 30 novembre 2003

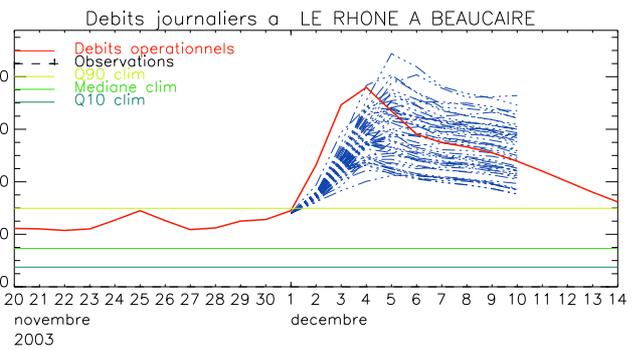


FIG. 6.42 – Prédiction du 1 décembre 2003

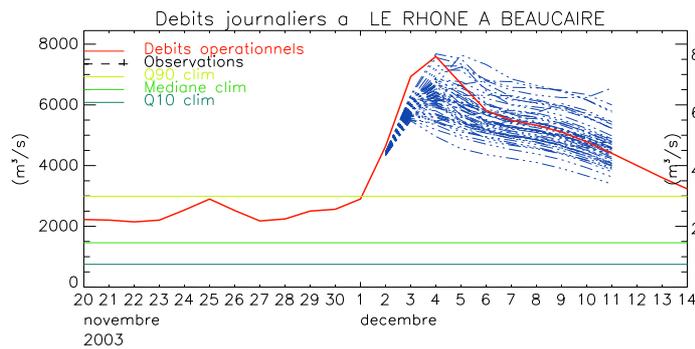


FIG. 6.43 – Prédiction du 2 décembre 2003

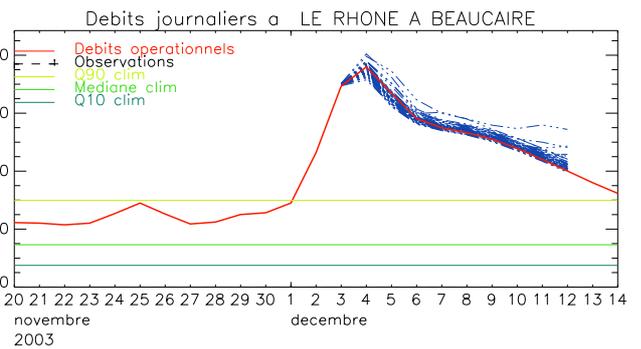


FIG. 6.44 – Prédiction du 3 décembre 2003

La dispersion de l'ensemble de débits prévus, en particulier pour les derniers runs avant la crue (30 novembre, 1er décembre), semble relativement importante. Ceci s'explique au moins en partie par la dispersion qui existe dans les prévisions d'ensemble de précipitations. En effet, si plusieurs membres ont tendance à sous-estimer les cumuls de précipitations, certains sont capables de produire des cumuls relativement élevés, mais qui ne sont pas forcément bien placés géographiquement, comme c'est le cas sur les figures 6.45 à 6.47, ce qui contribue à la dispersion de l'ensemble de débits prévus.

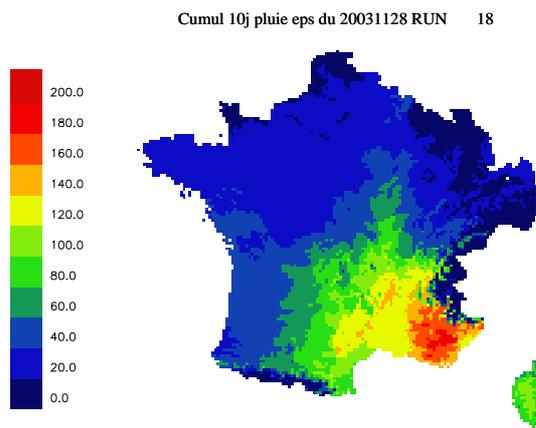


FIG. 6.45 – Cumul de précipitations (mm) du 28 novembre au 8 décembre 2003, prévision d'ensemble du 28 novembre, run numéro 18

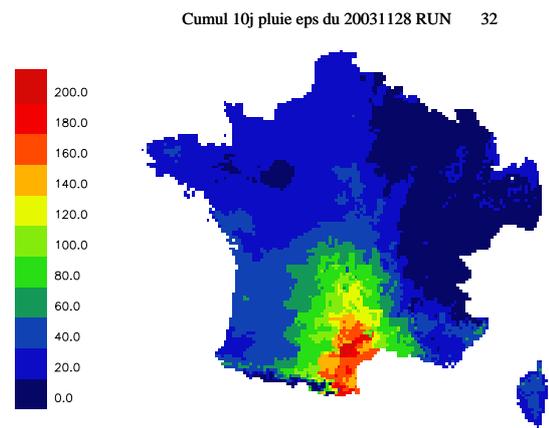


FIG. 6.46 – Cumul de précipitations (mm) du 28 novembre au 8 décembre 2003, prévision d'ensemble du 28 novembre, run numéro 32

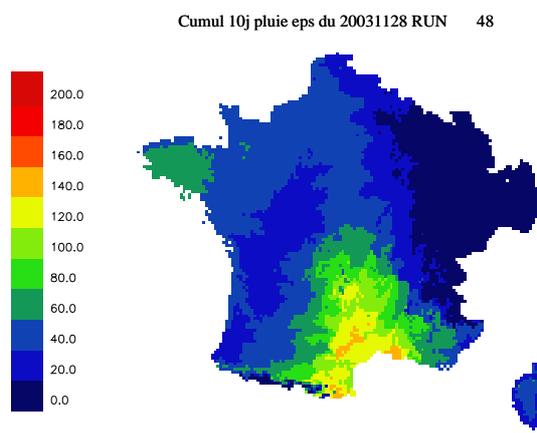


FIG. 6.47 – Cumul de précipitations (mm) du 28 novembre au 8 décembre 2003, prévision d'ensemble du 28 novembre, run numéro 48

Bilan de la simulation de la crue du Rhône de 2003

Les prévisions d'ensemble de débit du Rhône lors de la crue exceptionnelle de décembre 2003 montrent qu'à partir d'environ 7 jours d'échéance, l'ensemble prévoit une hausse du débit. Même si cette hausse est un peu sous-estimée à 5, 6 jours d'échéance, et que le pic de crue semble décalé d'un jour par rapport à l'analyse SIM, le débit maximal prévu par l'ensemble est exceptionnellement élevé et tout à fait cohérent avec le débit maximal analysé par SIM.

Cet exemple montre que le système de prévision d'ensemble de débit (et bien sûr le système de prévision d'ensemble météorologique du CEPMMT) est capable d'aller vers des événements très extrêmes, et est capable de prévoir des débits correspondant à des crues plus que centennales.

6.4 Etude des épisodes de crue de Septembre-Octobre 2006

6.4.1 Evénement des 14-15 septembre 2006 - Sud Est

Situation météorologique

Carte de vigilance météorologique du jeudi 14 septembre 2006

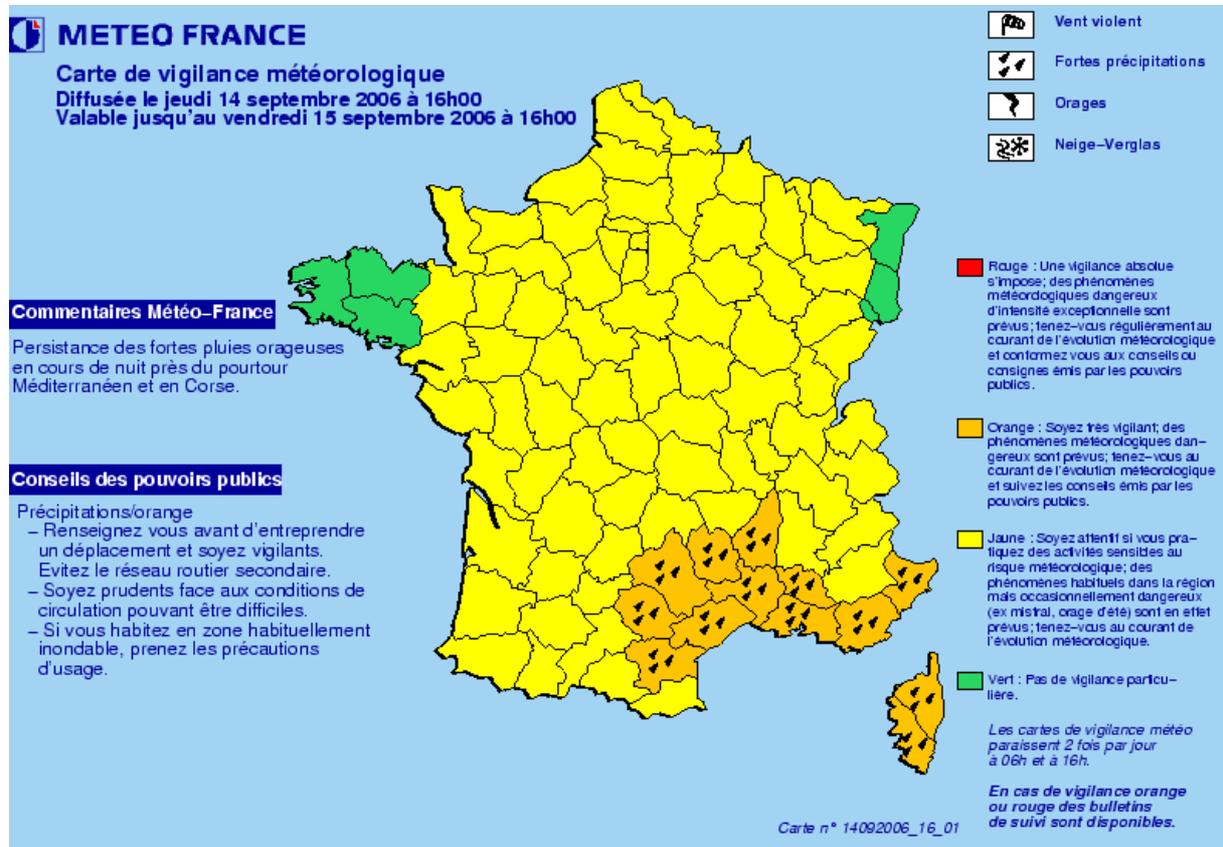


FIG. 6.48 – Carte de vigilance météorologique du 14/09/2006

Extrait du bulletin (DIR SE) associé (jeudi 14 septembre 2006)

Bulletin régional de suivi d'Aix-en-Provence

Numéro : 1409SE07 Carte de référence : 14092006_16_01

Bulletin émis le jeudi 14 septembre 2006 à 19h59

Type d'événement : fortes précipitations et orages

1- Localisation et période :

Lieux concernés par l'événement : Aude, Gard, Hérault, Lozère, Alpes Maritimes, Bouches du Rhône, Var, Vaucluse, Corse du sud, Haute Corse

Début d'événement : en cours

Fin d'événement : vendredi 15 septembre 2006 à 12h00

2- Description :

Situation actuelle :

Des précipitations se produisent actuellement sur le Roussillon et le Languedoc. Ces précipitations prennent un caractère marqué et orageux sur l'est de l'Hérault, les Cévennes et la Lozère.

En Corse les pluies de la journée de jeudi ont été très intenses et localisées sur la côte orientale. Après une courte accalmie de nouvelles pluies orageuses commencent à toucher à nouveau la côte orientale.

Evolution prévue de l'événement :

Sur l'Aude et le Languedoc, les précipitations vont s'intensifier et des orages violents éclateront dans la nuit de jeudi à vendredi. Ces orages toucheront les zones de plaine et de littoral et sont accompagnés d'une forte activité électrique et de violentes rafales de vent et des pluies intenses. Il est attendu sur ce nouvel épisode depuis jeudi après-midi un cumul de précipitations de l'ordre de 100 à 120 mm mais on peut atteindre par endroits 200 mm. Ces précipitations viennent s'ajouter aux précipitations déjà tombées.

Sur le Vaucluse, les Bouches du Rhône, le Var et les Alpes Maritimes, l'aggravation pluvio-orageuse se produit dans la nuit de jeudi à vendredi et vendredi matin. Ces orages sont violents accompagnés d'une forte activité électrique, de fortes rafales de vent et des pluies intenses. Il est attendu sur ce nouvel épisode une lame d'eau supplémentaire de 80 à 100 mm localement 150 mm.

En Corse, les pluies orageuses se maintiennent une partie de la nuit de jeudi à vendredi. L'activité électrique et les rafales de vent sont fortes avec encore des pluies intenses. Le cumul de précipitations supplémentaires est de 80 à 100 mm localement 150 mm. En 24 heures, sur l'épisode, les cumuls deviendront très importants sur la façade orientale : 300 à 400 mm, ponctuellement 500 mm dans la région de Solenzara.

Compte tenu de ce contexte, on s'attend à des conditions de ruissellement très actives et à des problèmes hydrologiques majeurs.

Situation hydrologique

Bulletin national de vigilance crue (SCHAPI) du jeudi 14 septembre 2006

BULLETIN NATIONAL D'INFORMATION

ORIGINE : SCHAPI

Carte de référence : 14092006_20

Bulletin émis le : 14/09/2006 à 21 :20 :14

Prochain bulletin le : 15/09/2006 à 10 :00 :00

Etat maximal de la vigilance sur la France : orange

Fait(s) nouveau(x) :

Passage en vigilance orange de l'Hérault amont (34).

Passage en jaune du Célé, affluent du Lot (46).

Qualification de la situation :

Phénomène hydrologique significatif mais pas exceptionnel pour la saison.

Liste des cours d'eau en vigilance crue orange ou rouge :

Cèze (30)

Gardon d'Anduze (30)

Gardon d'Alès (30)

Vidourle (30)

Hérault amont (34)

Commentaire général sur la situation nationale actuelle :

Après une accalmie dans la journée du jeudi 14 septembre, les pluies ont repris depuis 18h.

Aucune réaction hydrologique significative n'est actuellement observée.

Evolution prévue :

Les pluies attendues dans la nuit du jeudi 14 au vendredi 15 devraient concerner principalement les départements de l'Aveyron, du Tarn, du Lot, du Tarn-et-Garonne, de l'Ardèche, ainsi que de la région Languedoc Roussillon dans sa totalité.

Sur ces régions, les cumuls attendus jusqu'à demain midi sont de l'ordre de 100 à 120 mm, localement 200 mm.

Compte tenu de l'état de saturation des sols, ces précipitations pourraient provoquer des élévations importantes du niveau des cours d'eau.

Situation hydrologique détaillée :

Sur l'Hérault, l'état de saturation du sol est tel que les précipitations attendues dans la nuit sont de nature à provoquer une réaction rapide et significative mais pas exceptionnelle sur l'amont du bassin. Plus à l'aval, la crue devrait s'étaler, ne justifiant pas de vigilance orange.

Sur la Cèze, le Gardon d'Alès et d'Anduze et le Vidourle, les précipitations attendues justifient leur maintien en vigilance orange.

D'autres tronçons sont en situation de vigilance jaune. Les réactions hydrologiques prévues sont moindres sur ces cours d'eau, mais ils nécessitent néanmoins une attention particulière.

Carte nationale de vigilance crue (SCHAPI) du jeudi 14 septembre 2006



FIG. 6.49 – Carte de vigilance crue du 14/09/2006

Prévision d'ensemble des débits

Cours d'eau en vigilance crue orange : La Cèze à Chusclan

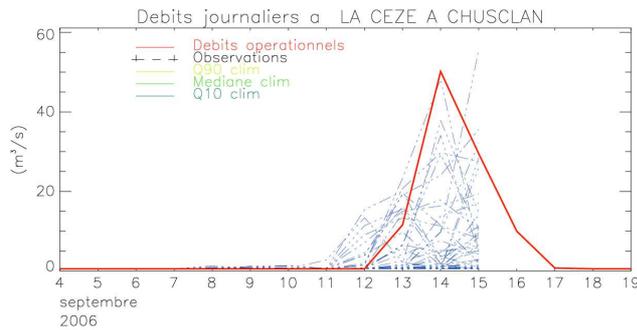


FIG. 6.50 – Prévision du 6 septembre 2006

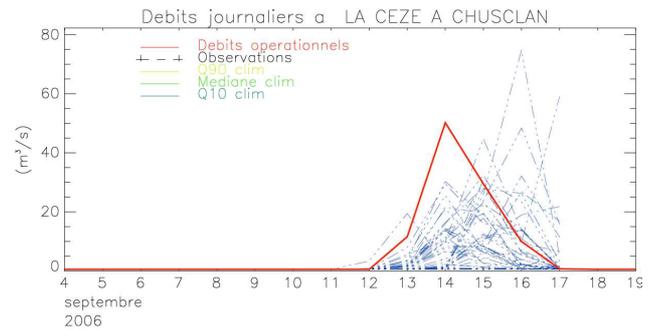


FIG. 6.51 – Prévision du 8 septembre 2006

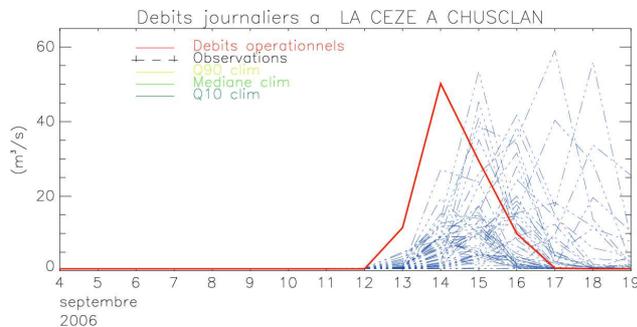


FIG. 6.52 – Prévision du 10 septembre 2006

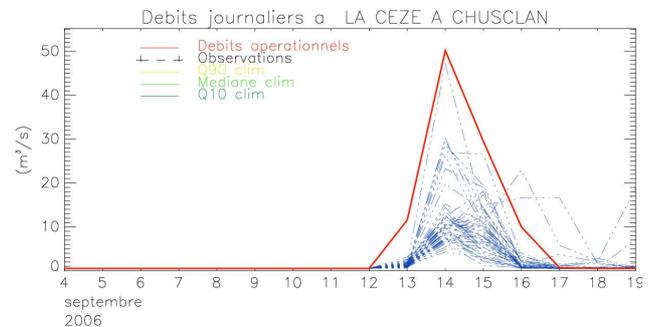


FIG. 6.53 – Prévision du 12 septembre 2006

Les figures 6.50 à 6.53 présentent plusieurs prévisions d'ensemble de débit de la Cèze, cours d'eau pour lequel le SCHAPI a déclenché la vigilance crue orange. A 10 jours d'échéance (prévision d'ensemble du 6 septembre, figure 6.50), la prévision fait déjà apparaître une hausse de débit. Malgré le fait que la date du pic de crue prévu par les différents runs varie d'un jour ou deux, et que son intensité semble sous-estimée, une information sur un risque de crue dès 10 jours d'échéance est une information très utile, par exemple pour déclencher une pré-alerte. Dans les échéances suivantes (figures 6.51, 6.52 et 6.53), la prévision de la crue se confirme, avec néanmoins encore une incertitude sur le jour du maximum et son intensité.

Les prévisions d'ensemble du débit du Gardon d'Anduze (figures 6.54 à 6.57), également mis en vigilance crue orange, présentent les mêmes caractéristiques que celle de la Cèze, avec toutefois une sous estimation un peu plus marquée. Néanmoins, la détection d'un risque de crue dès 10 jours d'échéance est particulièrement encourageante.

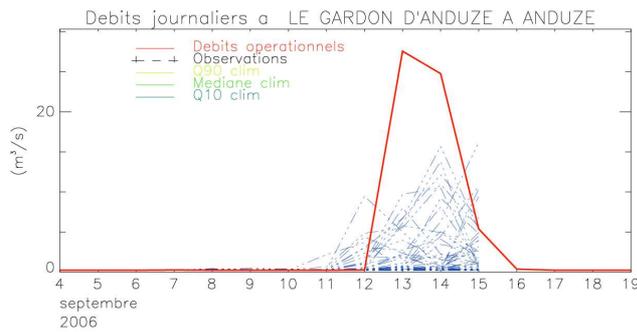
Cours d'eau en vigilance crue orange : Le Gardon d'Anduze

FIG. 6.54 – Prédiction du 6 septembre 2006

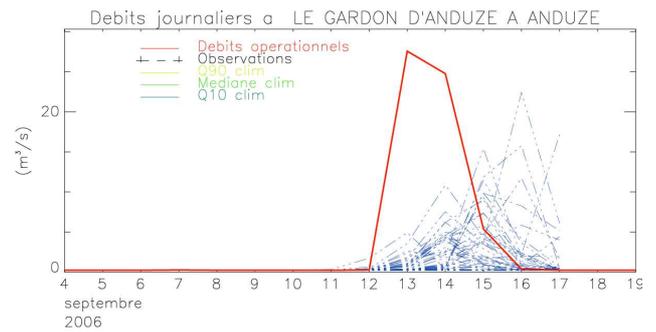


FIG. 6.55 – Prédiction du 8 septembre 2006

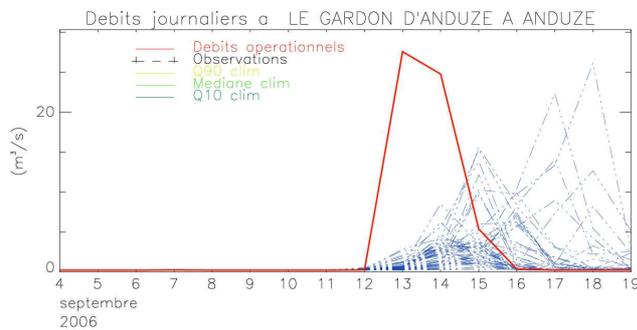


FIG. 6.56 – Prédiction du 10 septembre 2006

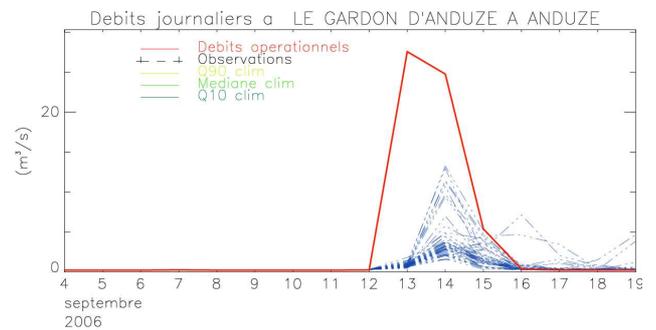


FIG. 6.57 – Prédiction du 12 septembre 2006

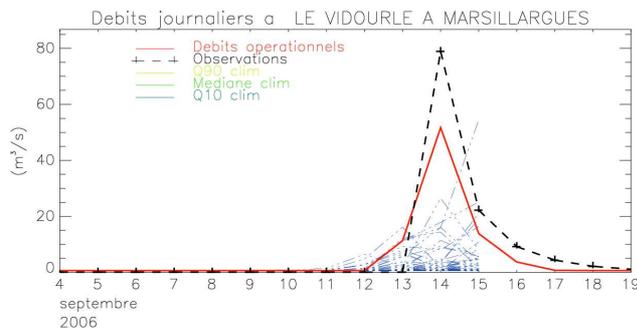
Cours d'eau en vigilance crue orange : Le Vidourle à Marsillargues

FIG. 6.58 – Prédiction du 6 septembre 2006

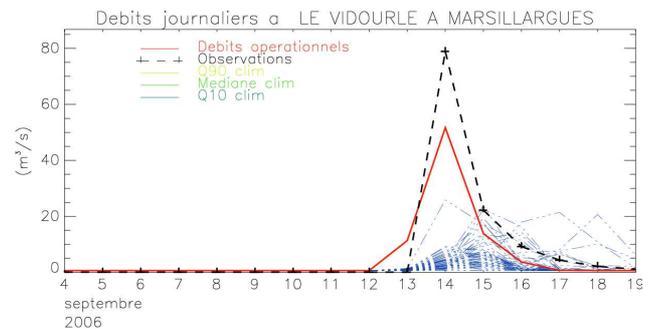


FIG. 6.59 – Prédiction du 11 septembre 2006

Les figures 6.58 à 6.63 présentent des prévisions d'ensemble de débit pour le Vidourle (en vigilance crue orange), l'Hérault et le Gard. On constate pour ces cours d'eau que dès les prévisions du 6 septembre, l'ensemble fait apparaître une hausse du débit. Même si cette crue prévue semble sous estimée et parfois décalée dans le temps, une détection aussi précoce est très intéressante à des fins de veille et de pré-alerte.

Cours d'eau en vigilance crue orange : L'Hérault à Gignac

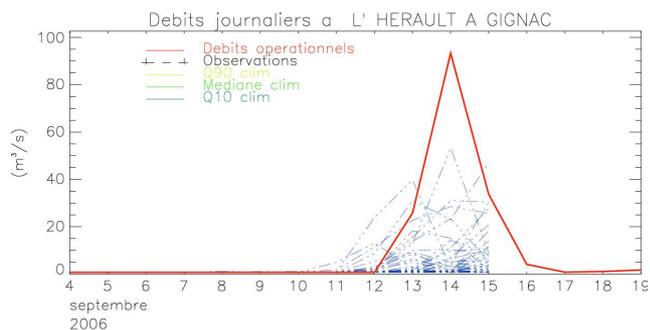


FIG. 6.60 – Prévission du 6 septembre 2006

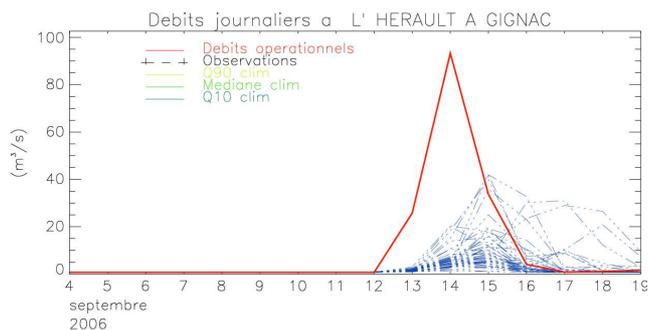


FIG. 6.61 – Prévission du 11 septembre 2006

Autres cours d'eau : Le Gard à Sanilhac-Sagriès

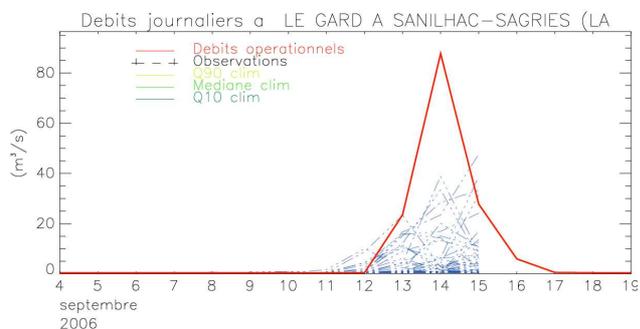


FIG. 6.62 – Prévission du 6 septembre 2006

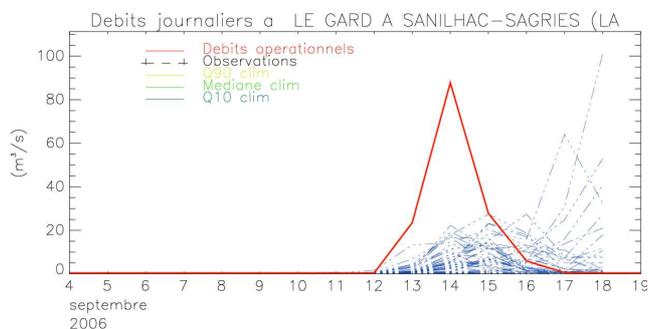


FIG. 6.63 – Prévission du 9 septembre 2006

Autres cours d'eau : L'Ouvèze à Vaison-La-Romaine

Enfin, les figures 6.64 et 6.65 présentent les prévisions de débit de l'Ouvèze. On retrouve sur cette rivière une détection précoce du risque de crue, et ici les prévisions de débit ne semblent pas sous estimée, avec un ensemble de débit prévu qui englobe le débit analysé par SIM.

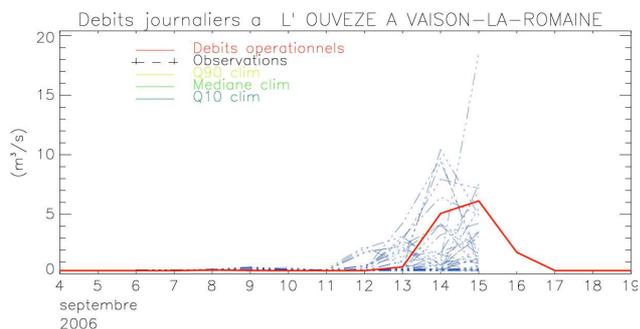


FIG. 6.64 – Prévission du 6 septembre 2006

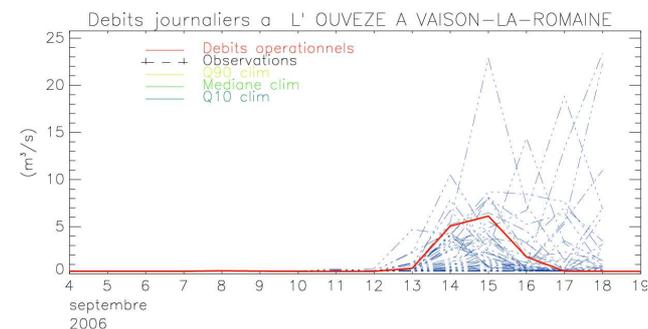


FIG. 6.65 – Prévission du 9 septembre 2006

6.4.2 Événement des 23-25 septembre 2006 - Sud Est

Situation météorologique

Carte de vigilance météorologique du jeudi 14 septembre 2006

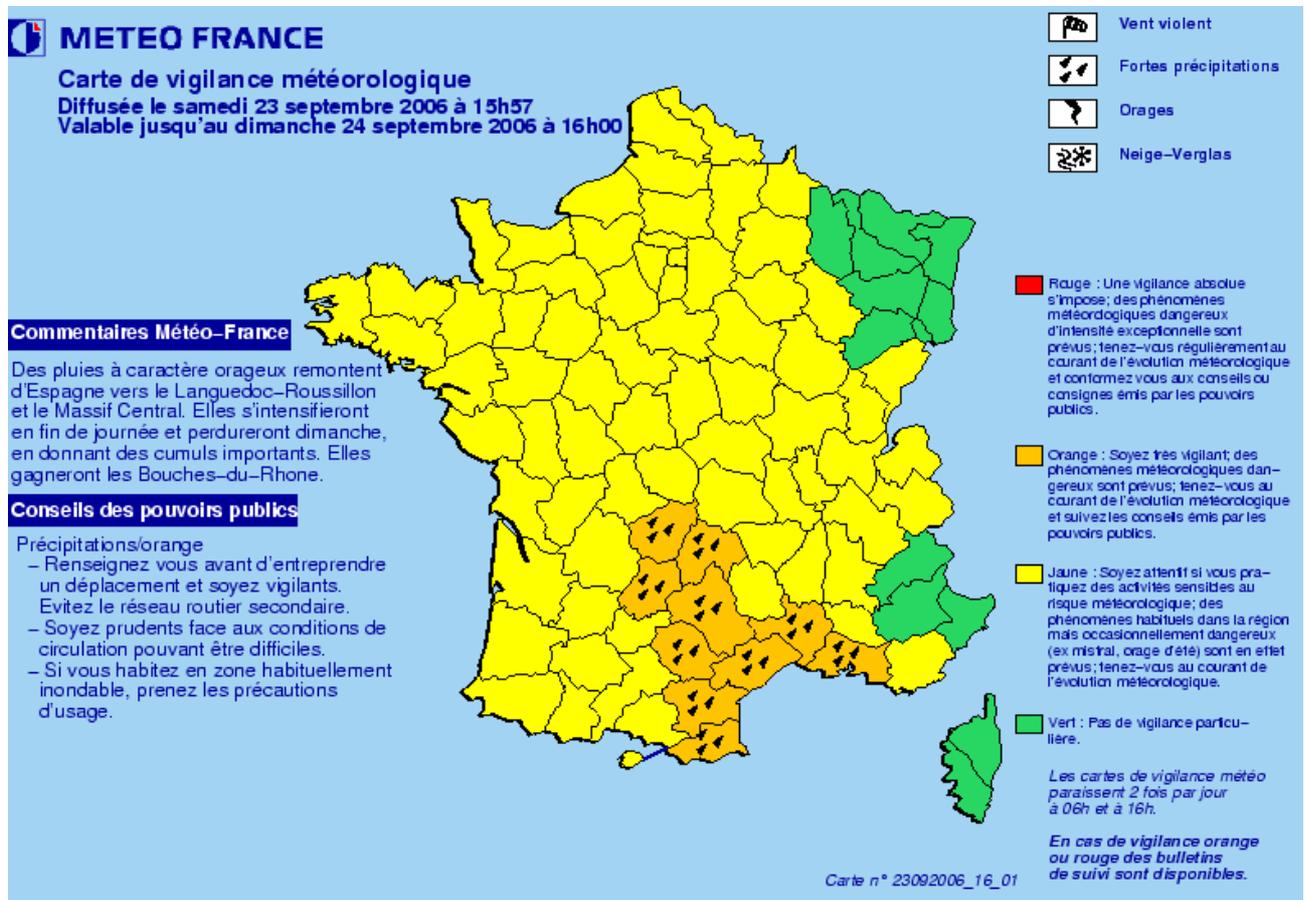


FIG. 6.66 – Carte de vigilance météorologique du 23/09/2006

Extrait du bulletin associé (23 septembre 2006)

CENTRE NATIONAL DE PREVISION

TOULOUSE

Bulletin national de suivi

Numéro : 2309DP03 Carte de référence : 23092006_16_01

Bulletin émis samedi 23 septembre 2006 à 15h58

Type d'événement : Fortes précipitations

1 - Localisation et période :

Lieux concernés par l'événement : Aude, Aveyron, Bouches-du-Rhône, Cantal, Corrèze, Gard, Hérault, Lot, Pyrénées-Orientales, Tarn

Début d'événement : en cours

Fin d'événement : lundi 25 septembre à 00H00

2 - Description :

Situation actuelle :

Des pluies remontent rapidement des Pyrénées vers le Massif Central et le Languedoc. Elles n'ont pas forcément un caractère continu mais elles donnent localement des intensités d'une dizaine de mm à l'heure, avec parfois quelques impacts orageux.

Evolution prévue de l'événement et données chiffrées :

Les pluies vont s'intensifier en fin de journée de samedi et surtout en cours de nuit prochaine, sur l'ouest du Languedoc, le Roussillon ainsi que sur l'Aveyron, la Corrèze, le Lot et le Tarn.

En matinée de dimanche, elles commenceront à se décaler vers l'est. Elles faibliront d'abord par le Lot et la Corrèze, puis plus lentement du Cantal au Roussillon. Elles s'attarderont sur le Languedoc, et elles gagneront les Bouches-du-Rhône.

On attend en 24h des cumuls généralement de 50 à 80mm en plaine, 100 à 150mm sur le relief exposé et localement sous orage y compris en plaine, et jusqu'à 200 voire 250mm localement sur la totalité de l'épisode sur le Languedoc.

Des cumuls locaux de plus de 80mm en 2 ou 3 heures sont possibles.

Ces pluies viendront se rajouter aux pluies déjà tombées depuis vendredi, sur le Massif Central (40 à 60mm, et localement 80 à 100m).

Vent fort de sud à sud-est sur les hauteurs du Massif Central.

3 - Qualification de l'événement :

Episode se produisant 2 à 3 fois par an et nécessitant une vigilance particulière vu la possibilité de forts cumuls de précipitation localement.

Situation hydrologique

Carte nationale de vigilance crue (SCHAPI) du lundi 25 septembre 2006



FIG. 6.67 – Carte de vigilance crue du 25/09/2006

Bulletin national de vigilance crue (SCHAPI) du lundi 25 septembre 2006

BULLETIN NATIONAL D'INFORMATION

ORIGINE : SCHAPI

Carte de référence : 25092006_10

Bulletin émis le : 25/09/2006 à 09:53:48

Prochain bulletin le : 25/09/2006 à 16:00:00

Etat maximal de vigilance sur la France : Orange

Fait(s) nouveau(x) :

Maintien de niveaux très élevés sur le Var amont (04, 06).

Hausse rapide sur le Var aval (06).

Qualification de la situation :

Situation orageuse sur la région PACA, particulièrement sur le bassin du Var.

Liste des cours d'eau en vigilance crue orange ou rouge :

Var amont (04, 06)

Commentaire général sur la situation nationale actuelle :

Le bassin du Var amont (04, 06) a reçu des cumuls de précipitations de l'ordre de 70 à 100 mm en 6 heures, entraînant une montée très significative du fleuve. Sur l'Huveaune (13, 83), les cumuls de la nuit (30 à 40 mm en 24h) provoquent des réactions modérées.

Les crues de niveau de vigilance jaune en cours sur les bassins du Tarn et de l'Hérault se propagent vers l'aval.

Evolution prévue :

L'activité orageuse se poursuit sur le bassin du Var. D'après Météo France, les cumuls attendus peuvent atteindre localement 70 à 100 mm d'ici la soirée.

Ceci justifie le maintien en vigilance orange du Var amont (04, 06).

Sur l'Huveaune, des pluies d'intensité modérée sont prévues par Météo-France jusqu'en milieu d'après-midi. Les réactions restent faibles.

Situation hydrologique détaillée :

De fortes pluies affectent actuellement le haut bassin du Var. Un pic a été atteint à 8h sur le Var amont (2,5 m à Entrevaux). L'aval du Var est monté pour l'instant de 60 cm au pont de la Manda, à une dizaine de kilomètres en amont de Nice. Cette montée va se poursuivre mais devrait rester en-deçà des seuils dommageables.

De nouvelles pluies orageuses sont attendues dans les prochaines heures sur l'ensemble du bassin. Les niveaux du Var vont rester élevés.

A 9 heures, sur les bassins cévenols, les différents pics de crue se situent sur l'Hérault entre Gignac et Canet (département 34), sur le Tarn à la limite des départements de l'Aveyron et du Tarn .

Ailleurs (Gardons et Orb), les crues se propagent sans débordements et ne nécessitent plus le maintien en vigilance jaune.

Prévision d'ensemble des débits

Cours d'eau en vigilance crue orange : Le Var amont à Entrevaux



FIG. 6.68 – Prévision du 17 septembre 2006



FIG. 6.69 – Prévision du 20 septembre 2006

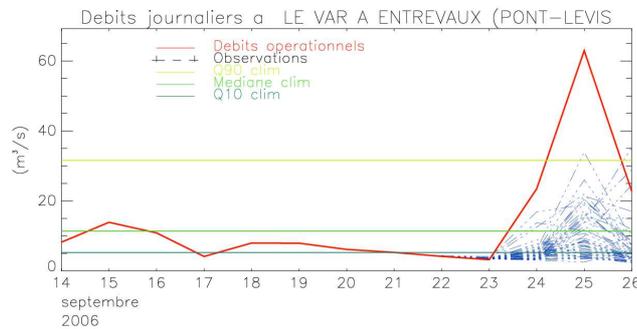


FIG. 6.70 – Prévision du 22 septembre 2006

Les figures 6.68 à 6.70 présentent les débits du Var amont, placé par le SCHAPI en vigilance crue orange. Dès la prévision du 17 septembre, l'ensemble fait apparaître une hausse sensible du débit. Même si la crue est sous estimée dans les trois prévisions (peu de membres de l'ensemble atteignent le Q90, alors que le débit analysé par SIM le dépasse), la précocité de sa détection est intéressante par exemple pour la pré-alerte.

Sur le Var aval (figures 6.71 à 6.73), on retrouve les mêmes caractéristiques.

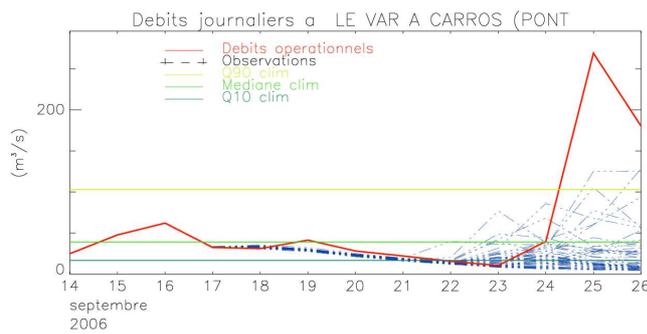
Le Var aval à Carros (Pont de la Manda)

FIG. 6.71 – Prédiction du 17 septembre 2006

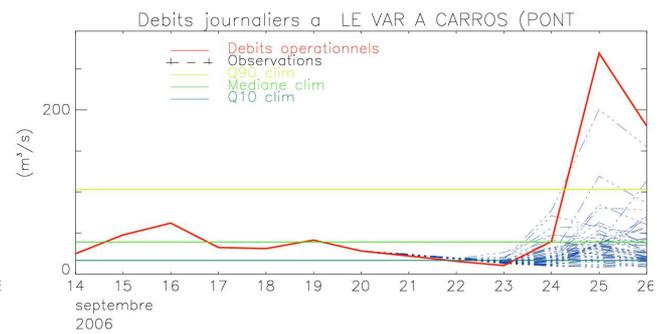


FIG. 6.72 – Prédiction du 20 septembre 2006

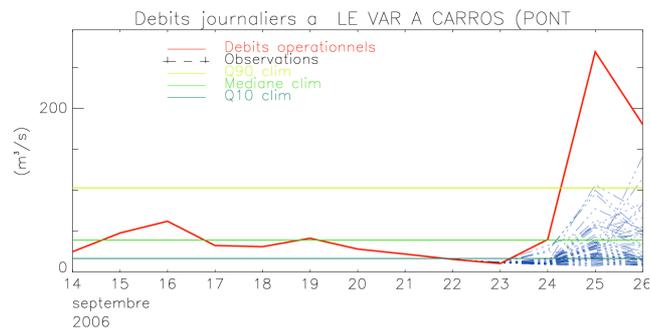


FIG. 6.73 – Prédiction du 22 septembre 2006

L'Huveaune à Aubagne

Les figures 6.74 et 6.75 présentent les prévisions d'ensemble de débit de l'Huveaune. A longue échéance (prédiction du 17 septembre, figure 6.74), le risque de crue apparaît déjà, même si son intensité et sa date semblent variables d'un run à l'autre. A plus courte échéance (prédiction du 22 septembre, figure 6.75), la prévision de la crue se confirme, avec une date affinée et une intensité qui semble plus conforme aux valeurs du débit analysé par SIM.

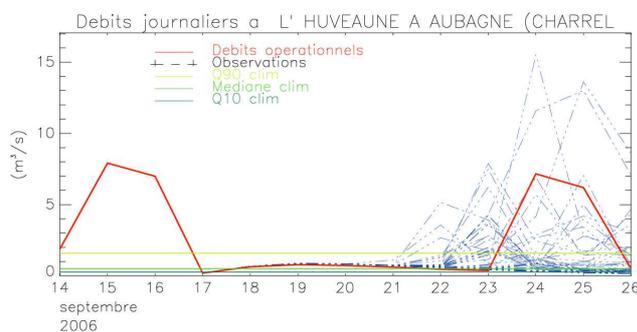


FIG. 6.74 – Prédiction du 17 septembre 2006

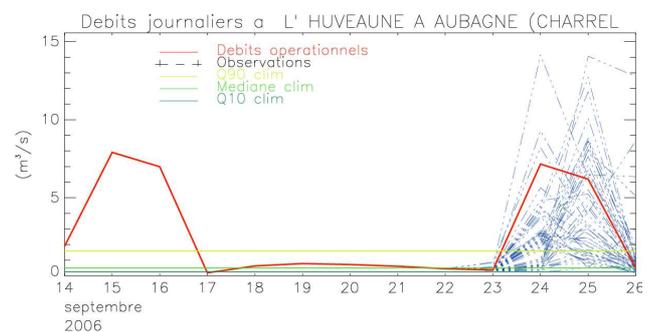


FIG. 6.75 – Prédiction du 22 septembre 2006

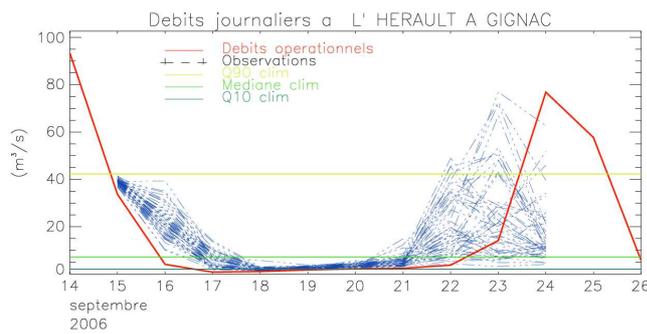
L'Hérault à Gignac

FIG. 6.76 – Prédiction du 15 septembre 2006

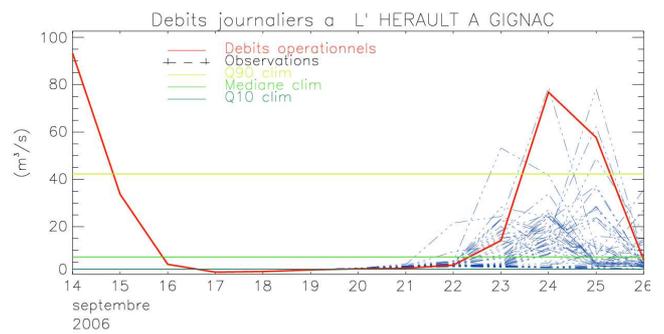


FIG. 6.77 – Prédiction du 18 septembre 2006

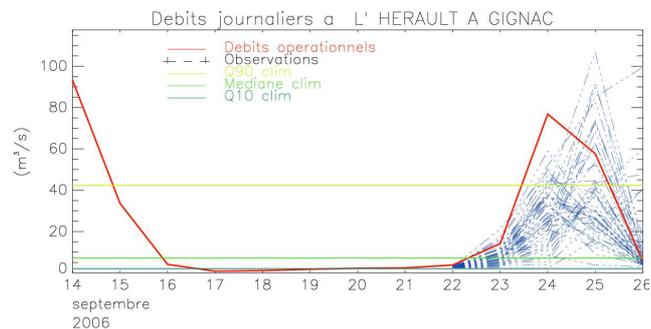


FIG. 6.78 – Prédiction du 22 septembre 2006

Enfin, sur l'Hérault, la figure 6.76 montre que même si la crue précédente (14-15 septembre 2006) n'est pas encore complètement terminée (le débit est encore en décroissance), l'ensemble est capable de prévoir déjà la crue suivante. Même si la date du pic de crue semble décalée d'un ou deux jours et son intensité légèrement sous-estimée, cette information est tout à fait valorisable, à des fins de mise en veille ou de pré-alerte. Dans les jours suivants (figures 6.77 et 6.78) la prévision de la crue se confirme, avec une date et une intensité plus cohérentes avec l'analyse SIM.

6.4.3 Bilan des événements de septembre 2006 dans le Sud Est

Pour les deux événements de précipitations intenses et de crues rapides ayant touché les bassins du Sud Est de la France en septembre 2006, les prévisions d'ensemble de débit présentent plusieurs caractéristiques notables : dès 10 jours d'échéance, l'ensemble est capable de détecter le risque de crue, et prévoit des hausses de débit. Même si à cette échéance ces hausses sont souvent sous-estimées, et le pic de crue parfois décalées d'un ou deux jours, cette information est tout à fait utilisable, à des fins de mise en veille, de pré-alerte, et pourrait par exemple permettre de décider l'utilisation d'autres outils de prévision adaptés aux bassins concernés. Ensuite, à des échéances plus courtes, le pic de crue est généralement mieux placé dans le temps, et la sous-estimation disparaît sur plusieurs cours d'eau.

6.4.4 Événement des 3-4 octobre 2006 - Nord Est

Situation météorologique

Carte de vigilance météorologique du mardi 3 octobre 2006

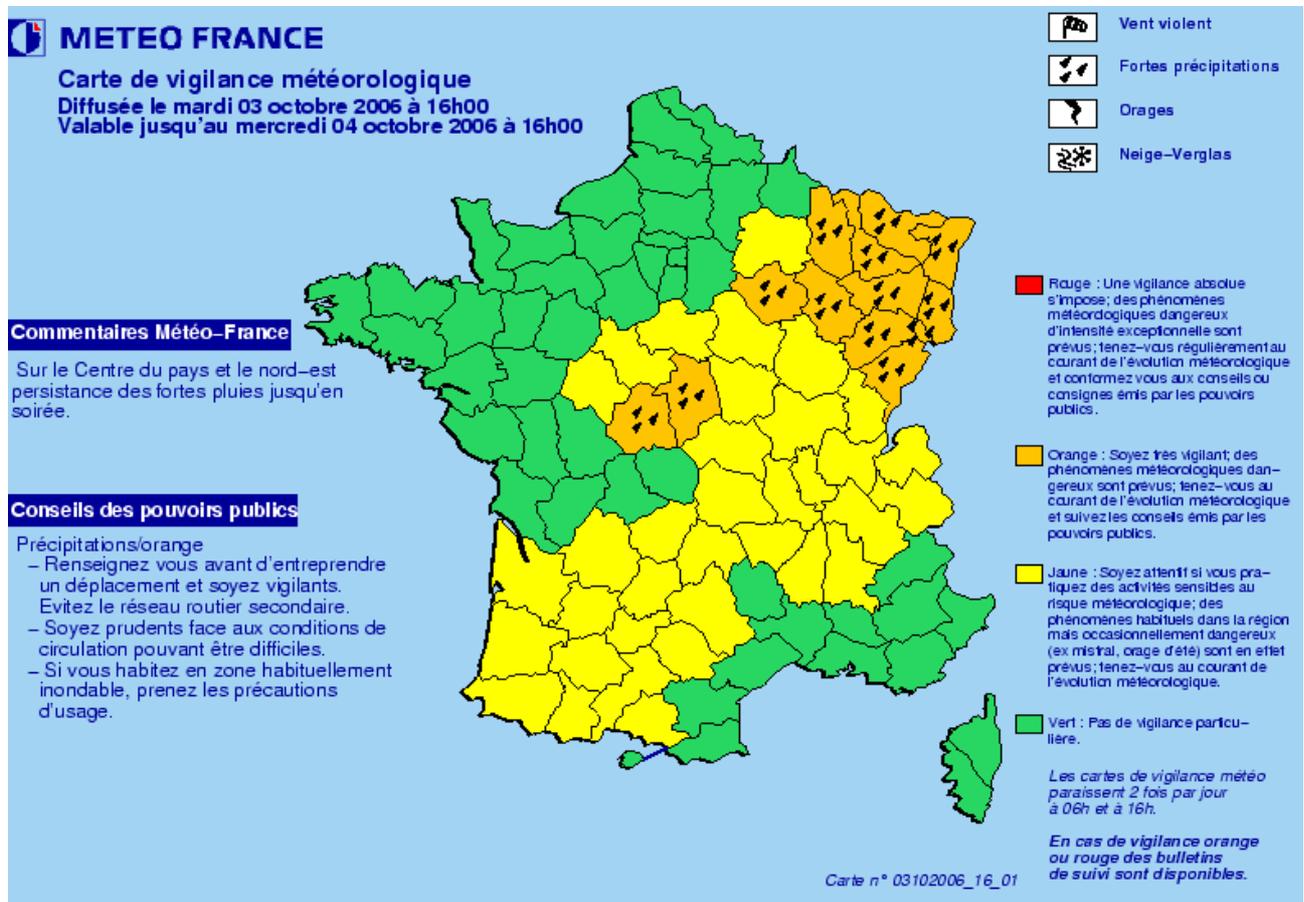


FIG. 6.79 – Carte de vigilance météorologique du 3/10/2006

Extrait du bulletin associé (3 octobre 2006)

Bulletin national de suivi

Numéro : 0310DP06 Carte de référence : 03102006_16_01

Bulletin émis mardi 3 octobre 2006 à 16h02

Type d'événement : Fortes précipitations

1 - Localisation et période :

Lieux concernés par l'événement : ALSACE, LORRAINE, Aube, Cher, Doubs, Indre, Haute-Marne, Haute-Saône, Territoire-de-Belfort

Début d'événement : en cours

Fin d'événement : mercredi 4 octobre à 00H00

2 - Description :

Situation actuelle :

Sur le nord-est du pays et le sud de la région Centre il continue à

pleuvoir. On a déjà relevé depuis hier soir des cumuls généralement compris entre 30 et 50 mm avec des pointes supérieures à 80 mm sur le massif des Vosges.

Evolution prévue de l'événement et données chiffrées :

Confirmation de la prévision précédente.

Ces pluies temporairement soutenues vont se poursuivre jusqu'en fin d'après-midi. On attend encore des cumuls de l'ordre de 10 à 25 mm ponctuellement 30 mm d'ici la fin de l'épisode.

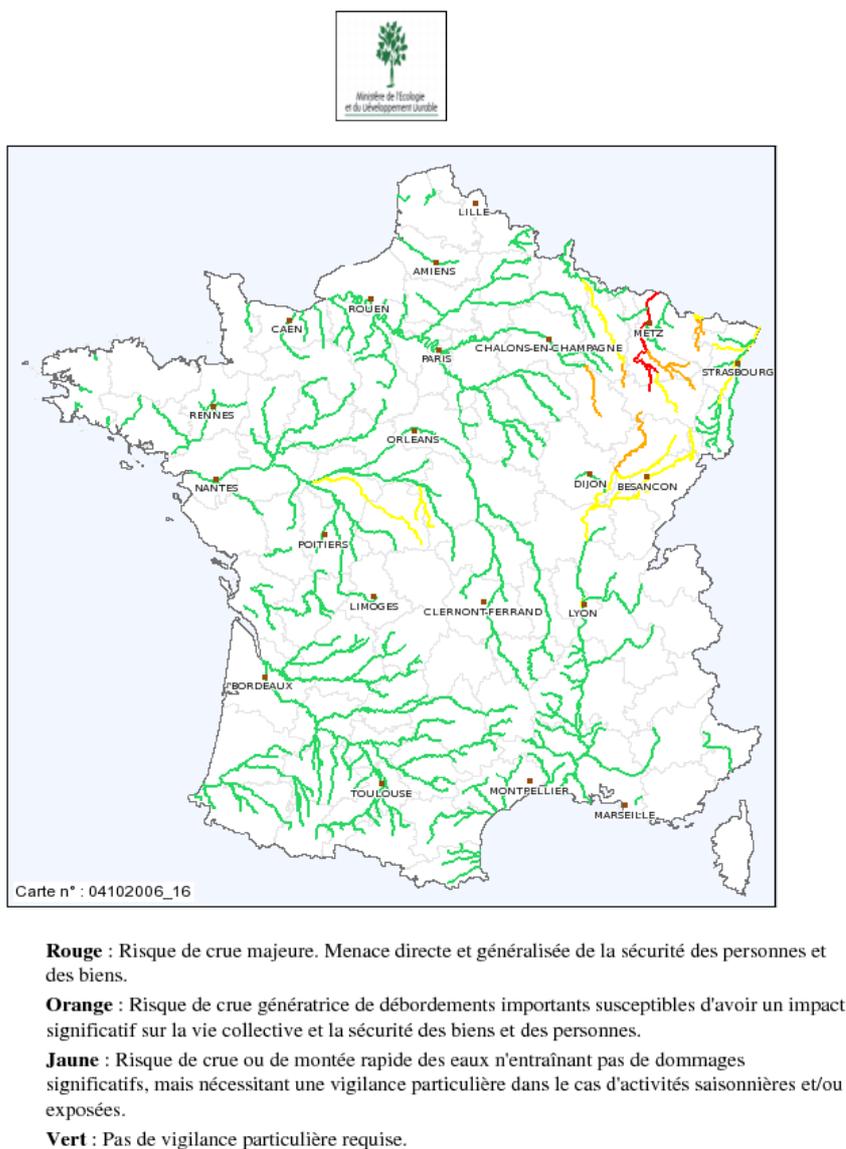
L'amélioration arrivera par l'ouest. L'épisode de vigilance orange sur la région Centre devrait se terminer en fin d'après-midi. Sur les départements du nord-est l'amélioration sera plus tardive en soirée.

3 - Qualification de l'événement :

Episode pluvieux nécessitant un suivi particulier du fait de sa durée et de son intensité.

Situation hydrologique

Carte nationale de vigilance crue (SCHAPI) du mercredi 4 octobre 2006 à 16H



1

FIG. 6.80 – Carte de vigilance crue du 4/10/2006 à 16H

Bulletin national de vigilance crue (SCHAPI) du mercredi 4 octobre 2006 à 16H

BULLETIN NATIONAL D'INFORMATION

ORIGINE : SCHAPI

Carte de référence : 04102006_16

Bulletin émis le : 04/10/2006 à 15:51:16

Prochain bulletin le : 05/10/2006 à 10:00:00
Etat maximal de vigilance sur la France : Rouge

Fait(s) nouveau(x) :

Passage en vigilance de niveau rouge du tronçon Moselle aval.
Passage en vigilance jaune des troçons Saône entre Ognon et Doubs, l'Ognon en aval de la Linotte et la Saône à Lyon.

Qualification de la situation :

Crue en cours ou prévue de niveau cinquantennal sur la Moselle médiane (54) et la Moselle aval au niveau de la confluence avec la Meurthe (54)
Crue en cours sur la Meurthe aval avec une période de retour proche de 30 ans.
Crues importantes sur l'amont de la Meuse et de la Marne ainsi que sur la Sarre.
Crue décennale sur l'amont de la Saône.

Liste des cours d'eau en vigilance crue orange ou rouge :

Vigilance rouge : Moselle médiane (54), Moselle aval (54)
Vigilance orange : Meurthe amont - Vezouze- Mortagne, Meurthe aval (54), Meuse (88, 55), Saône amont (88, 70), Marne amont (52), Sarre (57, 67).

Commentaire général sur la situation nationale actuelle :

Décrue en cours sur tous les bassins amont concernés (Meurthe, Moselle, Sarre, Meuse, Saône, Marne).

Propagation des ondes de crue vers l'aval.

Secteurs les plus préoccupants pour cet après-midi:

Propagation de niveau de vigilance rouge sur la Moselle médiane, entre Toul et Custines.

Propagation de niveau orange entre Damelevières et Nancy sur la Meurthe, entre Neufchâteau et Maxey sur la Meuse.

Crues importantes sur les autres bassins en vigilance orange, mais avec des conséquences moindres.

Evolution prévue :

Pas de nouvelles pluies significatives prévues par Météo-France pour les prochaines 24 heures.

La décrue se confirme sur l'amont des bassins.

Propagation des ondes de crues sur les zones aval avec une tendance à l'atténuation sur la Saône, la Marne, la Sarre et la Meuse.

Pour la soirée de mercredi, la situation reste préoccupante sur la Moselle médiane et sur la confluence Moselle-Meurthe.

Durant la nuit de mercredi à jeudi, poursuite de la crue s'amortissant en progressant vers Metz.

Situation hydrologique détaillée :

Meurthe : Le pic de crue se situe actuellement entre Damelevières et Malzéville (Nancy). Importantes perturbations en cours dans le secteur. Le pic devrait atteindre Nancy en fin d'après-midi avec des niveaux supérieurs à la crue de décembre 2001.

Moselle : le pic se situe au niveau de Toul. atteinte du pic sur Custines en soirée avec concomitance des pics entre la Meurthe et la Moselle, justifiant le passage en roue sur ce secteur. Durant la nuit de mercredi à jeudi, poursuite de la propagation de la crue s'amortissant en progressant vers Metz. Le pic est attendu à Metz demain en début de matinée.

Meuse : Crue importante sur le secteur amont. Pic atteint à Neufchâteau (88) à la mi-journée.

Propagation vers l'aval avec un pic prévu à Maxey en début de soirée avec des niveaux encore importants justifiant le maintien d'une vigilance de niveau orange. Durant la nuit prochaine poursuite de la propagation avec débordements locaux, mais atténuation progressive.

Sarre : Début de décrue sur l'amont du bassin. Sur la Sarre moyenne, hausse en cours avec débordements importants.

Saône : Pic atteint à Cendrecourt. Poursuite de la propagation cet après-midi avec atténuation progressive.

Marne : Pic atteint à Chaumont. Poursuite de la propagation vers Joinville, le pic étant attendu dans la nuit de mercredi à jeudi et restant au niveau de la vigilance orange. Plus à l'aval, dans le département de la Marne, les ouvrages devraient fortement amortir l'onde de crue.

Prédiction d'ensemble des débits

Durant cet épisode, le niveau de vigilance crue rouge a pour la première fois été déclenché par le SCHAPI depuis la mise en place du système de vigilance crue. C'est sur la Moselle que cette vigilance crue rouge a été activée, avec une crue à Custines d'une durée de retour de l'ordre de 20 ans (source : Direction Régionale de l'Environnement de Lorraine).

Cours d'eau en vigilance crue rouge : la Moselle à Toul

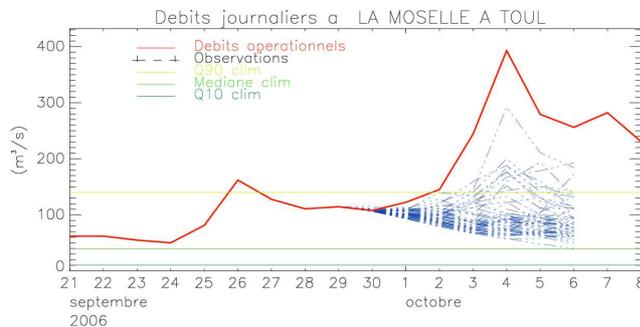


FIG. 6.81 – Prédiction du 27 septembre 2006

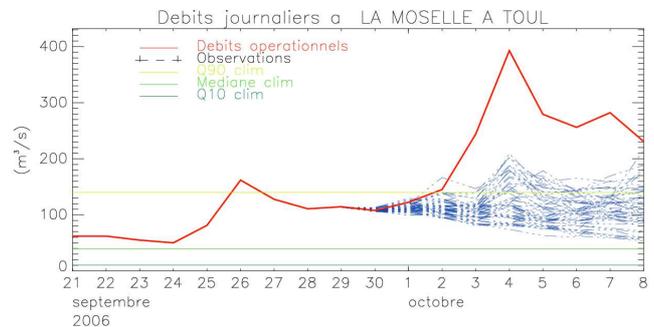


FIG. 6.82 – Prédiction du 29 septembre 2006

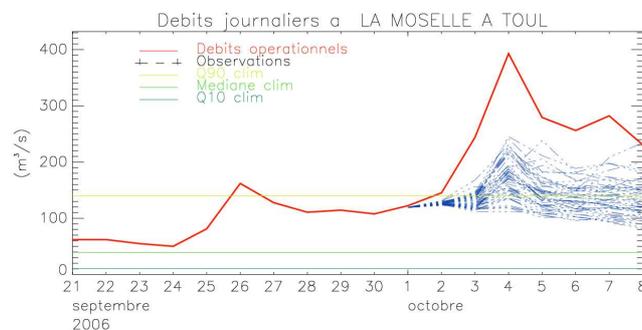


FIG. 6.83 – Prédiction du 1 octobre 2006

Les figures 6.81 à 6.83 présentent les prévisions d'ensemble de débit de la Moselle à Toul des 27 septembre, 29 septembre et 1er octobre 2006. Dans ces trois prévisions, on constate que l'intensité de la crue est sous estimée par l'ensemble. En effet, même si de nombreux runs dépassent le Q90, ce qui laisse tout de même présager une crue de grande ampleur, aucun n'atteint le niveau du débit analysé par SIM.

Il en est de même pour la Moselle à Custines (figures 6.84 à 6.86), où le risque de crue semble apparaître, mais avec une sous estimation de l'intensité de la crue.

Cours d'eau en vigilance crue rouge : la Moselle à Custines

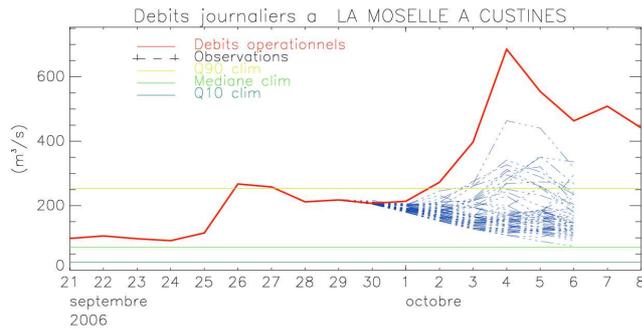


FIG. 6.84 – Prévision du 27 septembre 2006

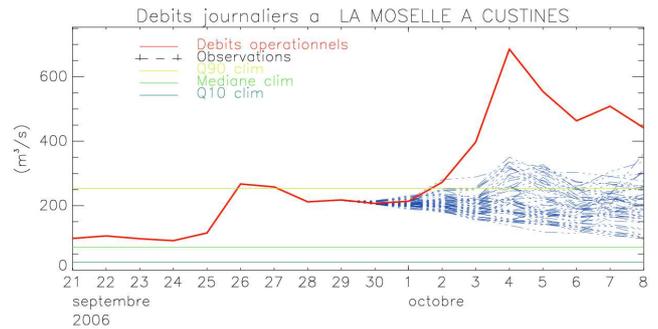


FIG. 6.85 – Prévision du 29 septembre 2006

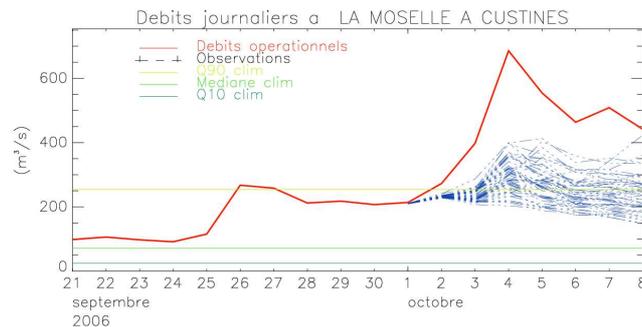


FIG. 6.86 – Prévision du 1 octobre 2006

Cours d'eau en vigilance crue orange : la Vezouze à Luneville

Pour la Vezouze, on note également que l'ensemble, même si il prévoit un risque de crue (plusieurs runs dépassent le Q90), ne produit pas des débits aussi élevés que ceux analysés par SIM.

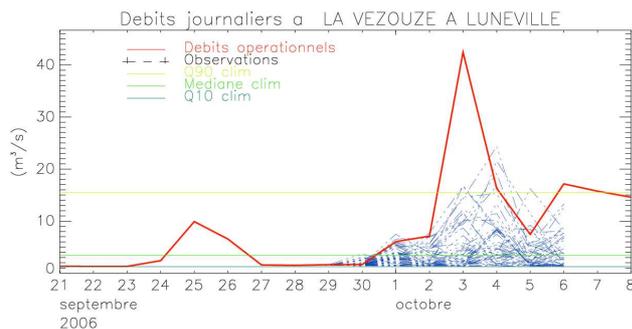


FIG. 6.87 – Prévision du 27 septembre 2006

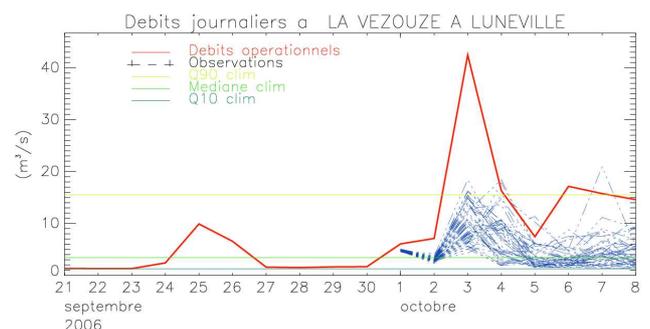


FIG. 6.88 – Prévision du 1er octobre 2006

Cours d'eau en vigilance crue orange : la Meurthe à Damelevières

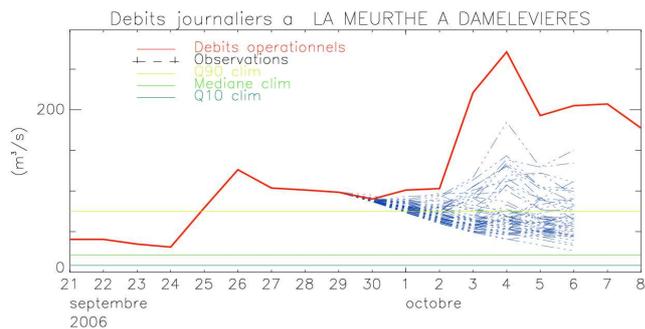


FIG. 6.89 – Prédiction du 27 septembre 2006

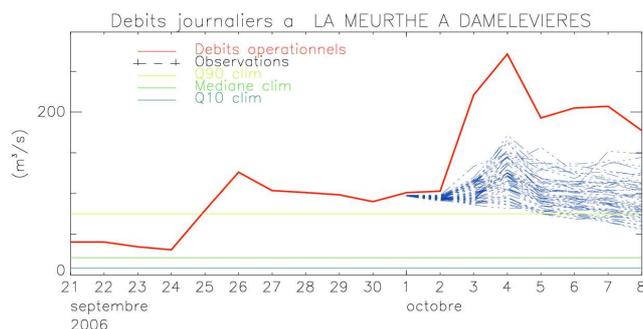


FIG. 6.90 – Prédiction du 1er octobre 2006

Cours d'eau en vigilance crue orange : la Meurthe à Malzéville (Nancy)

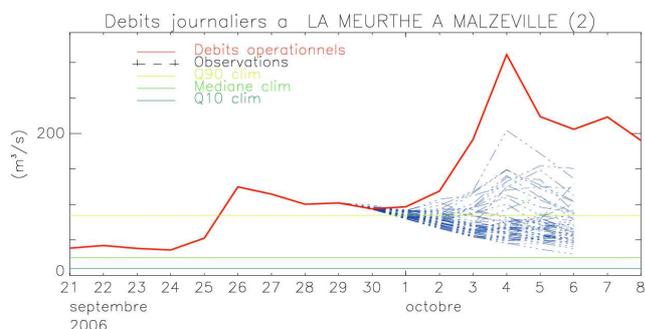


FIG. 6.91 – Prédiction du 27 septembre 2006

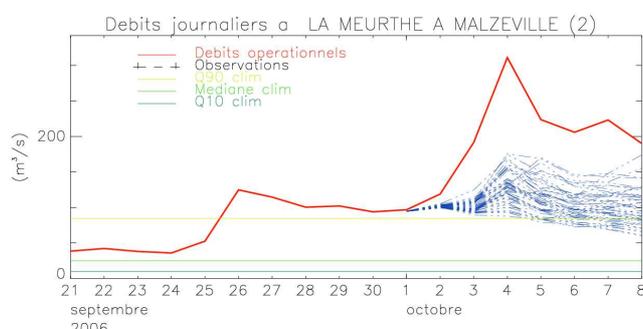


FIG. 6.92 – Prédiction du 1er octobre 2006

Les débits de la Meurthe présentent les mêmes caractéristiques que ceux de la Moselle et de la Vezouze, même si certains runs prévoient une hausse du débit, on note une sous estimation de l'intensité de la crue.

Cours d'eau en vigilance crue orange : la Meuse à Domrémy

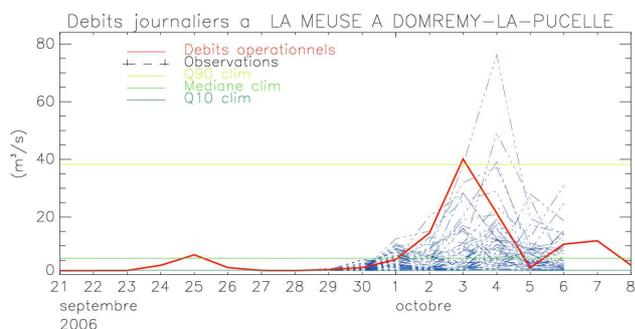


FIG. 6.93 – Prédiction du 27 septembre 2006

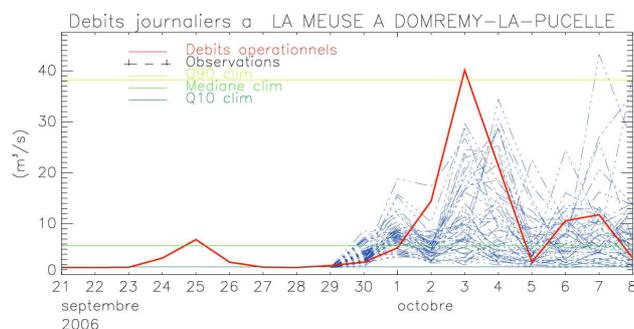


FIG. 6.94 – Prédiction du 29 septembre 2006

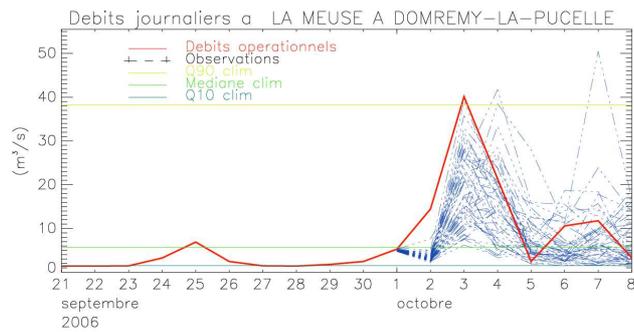


FIG. 6.95 – Préviation du 1 octobre 2006

Les figures 6.93 à 6.95 présentent les prévisions d'ensemble de débit de la Meuse des 27 septembre, 29 septembre et 1er octobre 2006. Dès le 27 septembre, la prévision fait apparaître la crue. Son intensité semble un peu sous-estimée dans le run du 27 septembre, en revanche ensuite elle est plus conforme aux valeurs prises par le débit analysé par SIM.

Cours d'eau en vigilance crue orange : la Marne à Marnay-sur-Marne (Marne amont)

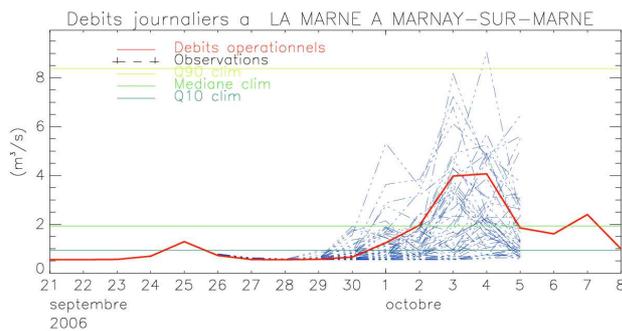


FIG. 6.96 – Préviation du 26 septembre 2006

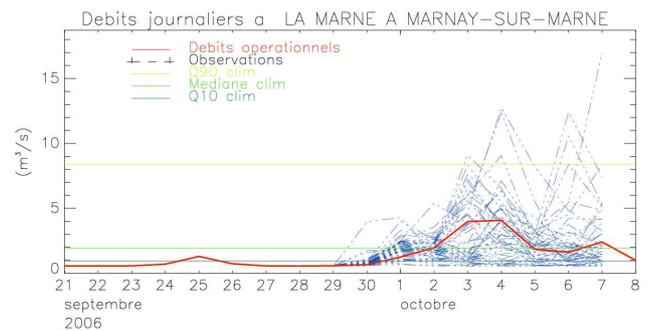


FIG. 6.97 – Préviation du 28 septembre 2006

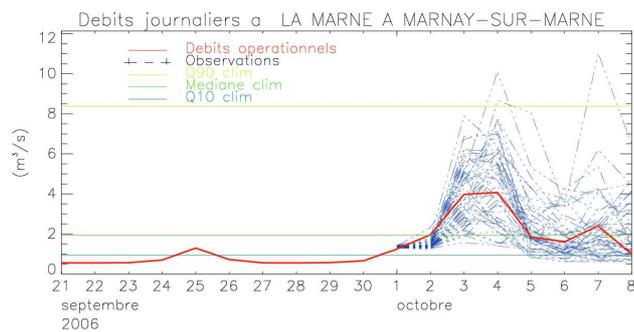


FIG. 6.98 – Préviation du 1 octobre 2006

Pour le bassin de la Marne (figures 6.96 à 6.98), le risque de crue apparaît dès les premiers runs, à 10 jours d'échéance, par exemple à 9 jours (préviation du 26 septembre 2006, figure 6.96). Sur ce bassin, l'intensité prévue de la crue semble cohérente avec le débit analysé par SIM, avec toutefois une dispersion assez forte.

Bilan

Il n'est pas possible sur un seul exemple de prévision d'ensemble d'un événement de conclure quant à la qualité de l'ensemble, ni d'affirmer que la prévision a été bonne ou non.

Néanmoins, l'étude de cet exemple est informatif, et permet de voir que les prévisions d'ensemble de débit de plusieurs des bassins touchés par l'événement semblent avoir été sous estimées par rapport au run SIM, en particulier pour les bassins en vigilance crue rouge. La prévision d'ensemble des débits aurait pu par exemple conduire (à tort) à ne pas déclencher un tel niveau de vigilance, ce qui permet de penser que dans ce cas, la prévision n'a pas été suffisamment pertinente.

Cinquième partie

Conclusions Générales et Perspectives

Mon travail de thèse avait pour thème la modélisation hydro-météorologique, axée sur les grands bassins, et orientée vers la prévision des débits.

Ce thème de recherche est depuis de nombreuses années développé au Centre National de la Recherche Météorologique (CNRM) de Météo-France, avec la mise en place et la validation du système couplé hydro-météorologique SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM). Dans cette chaîne SIM, le système SAFRAN fournit une analyse du forçage atmosphérique, le schéma de surface ISBA calcule les bilans d'eau et d'énergie, et le modèle hydrologique distribué MODCOU assure les transferts hydrologiques de surface et souterrains, ainsi que les échanges entre les nappes et les rivières.

La chaîne SIM a bénéficié de nombreux travaux, qui ont conduit à sa calibration et à sa validation, sur deux grands bassins versants français : le Rhône ([HABETS 1998], [ETCHEVERS 2000]) et l'Adour-Garonne ([MOREL 2002]). Ces études ont mis en évidence la capacité de SIM à reproduire les bilans d'eau et d'énergie, et à simuler les débits des rivières de ces bassins. En particulier, ces deux bassins sont fortement influencés par la composante nivale, qui a pu être étudiée en détails. La chaîne SIM a pu simuler l'évolution du manteau neigeux des Alpes et des Pyrénées de façon tout à fait satisfaisante.

Dans la première partie de mon travail de thèse, j'ai pu compléter cette phase d'étude de SIM par grand bassin, avec la mise en place et la validation de la chaîne SIM sur le bassin de la Seine.

Contrairement aux bassins précédemment étudiés, la composante nivale y est absente, en revanche le bassin de la Seine est le bassin français le plus urbanisé. Pour la première fois dans une modélisation d'un grand bassin, les zones urbaines ont été traitées explicitement grâce à l'utilisation du schéma de ville TEB. Même si l'impact de l'intégration de TEB au système est globalement faible à l'échelle du bassin entier, il est beaucoup plus fort sur certains sous-bassins très urbanisés, où l'adjonction de TEB conduit à des bilans d'eau et d'énergie plus réalistes, et améliore la simulation des débits.

Le bassin de la Seine est en outre caractérisé par la forte influence de plusieurs grandes nappes aquifères. J'ai donc intégré à la modélisation du bassin de la Seine une description détaillée des nappes aquifères, établie par [GOMEZ 2002] au Centre de Géosciences de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (CG/ENSMP).

J'ai réalisé une simulation de 17 ans, qui a mis en évidence une bonne capacité de SIM pour la simulation des débits du bassin de la Seine. Les scores statistiques obtenus sur une grande majorité de stations sont bons, en particulier pour celles correspondant aux plus grands bassins. De plus, SIM permet l'évaluation de l'évolution de la quantité d'eau dans les nappes aquifères, et met en évidence les années déficitaires où le souterrain perd de l'eau, et les années excédentaires où les nappes se rechargent.

Enfin, lors de cette étude, j'ai en particulier analysé le comportement de la chaîne SIM lors de plusieurs épisodes de crue de la Seine à Paris. SIM s'est montré capable de reproduire le débit durant ces épisodes de façon précise, tant en terme d'intensité que de phasage temporel de ces crues, ce qui se traduit par des scores statistiques très satisfaisants. Néanmoins, deux épisodes parmi les neuf étudiés sont un peu moins bien reproduits par SIM, les causes en sont encore assez mal connues. Malgré cette relative faiblesse, la chaîne SIM est un bon outil pour la simulation des crues lentes telles que celles de la Seine à Paris.

De plus, j'ai pu montrer le rôle crucial joué par le souterrain pendant les périodes de crue. En effet, en stockant une partie de l'eau précipitée, il permet d'atténuer très significativement l'intensité du pic de crue. Plus généralement, l'analyse de la simulation SIM a permis de quantifier la quantité d'eau emmagasinée par le souterrain en hiver, et restituée aux rivières en été, avec 80 à 100 % du débit d'étiage fourni par les nappes.

Les principaux résultats obtenus lors de cette étude du bassin de la Seine ont été publiés dans *Journal of Geophysical Research* [ROUSSET et al. 2004].

La chaîne SIM s'est donc montrée très capable de simuler les débits du bassin de la Seine, et en particulier les crues lentes de la Seine, ce qui conduit à la perspective d'utiliser SIM à des fins de prévision hydrologique.

A la suite de ces travaux de validation de SIM par grand bassin versant, il a été décidé d'étendre le système à l'ensemble de la France, dans le but de simuler les débits de l'ensemble des bassins français. La chaîne SIM-France a donc été mise en place fin 2003. Elle a fait l'objet d'une validation détaillée par [HABETS et al. 2007].

De plus, la chaîne SIM-France est maintenant en partie exploitée de façon opérationnelle, en temps réel, en mode analyse, à Météo-France. La chaîne SIM temps réel permet de suivre l'évolution des composantes des bilans d'eau et d'énergie sur la France, en particulier elle permet le monitoring de l'humidité des sols sur la France. Ses applications sont multiples. En particulier, une expérimentation est menée au SCHAPI (Service Central Hydro-météorologique d'Aide à la Prévision des Inondations) dans le but d'utiliser les sorties SIM pour la construction d'un indice de risque de crue. De plus, Météo-France contribue à l'élaboration du BSH (Bulletin de Suivi Hydrologique) du MEDD (Ministère de l'Environnement et du Développement Durable), en alimentant les rubriques "eau du sol" et "manteau neigeux" avec les données de la chaîne SIM.

Fort de cette longue expérience en hydro-météorologie avec la chaîne SIM, Météo-France a décidé de se tourner vers le thème de recherche innovant qu'est la prévision d'ensemble des débits. La recherche sur les prévisions d'ensemble en hydrologie commence à se développer dans la communauté scientifique internationale, avec par exemple la mise en place de plusieurs projets internationaux. Elle répond à une demande de plus en plus forte en terme d'anticipation des événements hydrologiques extrêmes (crues ou sécheresses). La production de prévisions d'ensemble hydrologiques présente plusieurs atouts majeurs. D'une part, leur caractère probabiliste permet de quantifier l'incertitude qui entoure la prévision. D'autre part, les prévisions d'ensemble permettent d'aller à des échelles de temps pour lesquelles la déduction du débit attendu par la mesure des débits amont n'est pas possible.

Dans ce contexte, j'ai mis en place une chaîne de prévision d'ensemble des débits, basée sur la chaîne SIM, qui fonctionne quotidiennement en temps réel. Dans cette chaîne, les prévisions d'ensemble atmosphériques produites par le CEPMMT (Centre Européen de Prévision à Moyen Terme) forcent les modèles ISBA et MODCOU, et permettent de produire 51 prévisions de débit à 10 jours d'échéance pour 907 stations en France.

Du fait de la faible résolution spatiale (environ 80 km) des prévisions d'ensemble du CEPMMT, j'ai mis en place un système de désagrégation spatiale, qui adapte ces prévisions à la grille ISBA (8 km). Cette procédure, basée sur la philosophie SAFRAN, permet de prendre en compte les effets du relief sur les variables atmosphériques.

J'ai également effectué diverses optimisations de la chaîne de prévision d'ensemble des débits, en terme de ressources nécessaires : temps de calcul, post-processing, volume de données. Ce travail d'optimisation était primordial, en raison de la complexité technique et de la lourdeur que représente la mise en place de cette chaîne. Un effort important a également été fait dans l'accès aux sorties de la chaîne, qui sont disponibles dès leur production sur un site web (interne à Météo-France) que j'ai créé.

Après cette importante phase de mise en place de la chaîne, je me suis attachée à évaluer ses performances. La vérification d'un système de prévision probabiliste doit se faire à l'aide d'outils statistiques, après avoir collecté une longue série de paires prévision/observation. J'ai réalisé une étude statistique des performances du système sur près d'un an de prévision (septembre 2004-juillet 2005).

Pour commencer, j'ai d'abord analysé les prévisions d'ensemble de précipitation du CEP désagrégées.

Cette étude a mise en évidence plusieurs caractéristiques de la prévision d'ensemble de précipitations. Tout d'abord, il faut noter que l'ensemble désagrégé constitue une meilleure prévision que la climatologie, à toutes les échéances, pour la prévision de dépassement de toute une gamme de cumuls journaliers, ainsi que pour la prévision des faibles précipitations, et obtient de bons scores statis-

tiques. En particulier, le taux de fausses alarmes des prévisions de périodes sans pluie est très faible, ce qui montre un bon potentiel de la chaîne pour la prévision des sécheresses et des étiages

Toutefois, il apparaît une tendance à la sur-estimation des faibles précipitations, et une sous-estimation des fortes précipitations (rares sur la période d'étude). De plus, la dispersion de l'ensemble de précipitations désagrégées est relativement faible aux premières échéances, ce qui est lié au fait que le système de prévision d'ensemble du CEPMMT est destiné et calibré pour la moyenne échéance (à partir de 3, 4 jours).

Enfin, certains scores sont sensiblement meilleurs sur des régions comme la Seine, la Charente, et la Loire. A l'inverse, le Sud Est de la France et le bassin du Rhône obtiennent des résultats statistiques légèrement moins bons. Néanmoins, ces différences restent limitées, et aucune région française ne se distingue très clairement du point de vue des résultats statistiques.

Ensuite, l'analyse statistique a porté sur la qualité des prévisions d'ensemble de débit. Afin de qualifier uniquement les performances de la prévision d'ensemble, et de s'affranchir des éventuels défauts de modélisation (comme par exemple la non prise en compte des effets anthropiques), les prévisions d'ensemble de débit sont comparées au run SIM analyse.

L'ensemble obtient de bons scores statistiques, comme le Brier Skill Score ou le Ranked Probability Skill Score qui sont proches de 1, avec une diminution avec l'échéance. La fiabilité et la résolution de l'ensemble subissent elles aussi une dégradation avec l'échéance. Il est remarquable de noter en particulier que l'ensemble conduit à des taux de fausses alarmes très faibles des étiages, ce qui est une qualité tout à fait intéressante et valorisable. Il est difficile d'extrapoler les résultats de cette étude pour les très forts débits, au vu de la sécheresse marquée qui caractérise la période d'étude. Enfin, on retrouve dans les prévisions d'ensemble de débit la faiblesse de la dispersion pour les premiers jours d'échéance, qui est en partie liée aux prévisions de précipitations, et accentuée par le comportement hydrologique des bassins, pour lesquels on a parfois un temps de réponse aux pluies assez long et une forte influence de l'état initial. Ceci renforce la nécessité pour ces bassins de prévisions dont l'échéance dépasse la durée pendant laquelle le débit peut assez bien être estimé grâce à la connaissance des débits amonts, comme la Seine par exemple.

Pour compléter cette étude statistique, pour laquelle la période d'étude a été très sèche, j'ai analysé plusieurs cas de grandes crues du passé récent. Cette analyse n'a pas pour objectif de conclure quant à la capacité générale de l'ensemble à prévoir les crues, elle permet de s'intéresser au comportement de l'ensemble lors de ces épisodes, et d'envisager l'utilisation qui pourrait être faite des prévisions d'ensemble en temps réel.

Les crues que l'on souhaite principalement prévoir grâce la chaîne de prévision d'ensemble des débits sont les crues lentes des grands bassins du nord de la France, telles que celles que connaît la Seine. La prévision d'ensemble de la crue (décennale) de la Seine de mars 2001 montre une détection précoce, dès 10 jours d'échéance, du risque de crue majeure. Elle fournit une prévision réaliste de l'intensité et de la date du pic de crue, ainsi que de la décrue, et montre le potentiel de ce système de prévision, en particulier pour la pré-alerte puis d'alerte.

La crue du Rhône de décembre 2003 (estimée centennale à Beaucaire) fait apparaître la capacité de l'ensemble d'aller vers des débits très extrêmes. En effet, l'ensemble prévoit dès 6 ou 7 jours d'échéance des débits particulièrement élevés, et cohérents avec l'analyse SIM.

Même si la chaîne de prévision d'ensemble n'est pas principalement destinée à la prévision des crues rapides des bassins du sud-est, et n'est vraisemblablement pas l'outil le plus adapté dans ce cas, l'analyse de deux épisodes ayant eu lieu en septembre 2006 sur le Var et l'Hérault révèle plusieurs caractéristiques notables. La prévision d'ensemble s'est montré capable de prévoir un risque de crue dès 10 jours d'échéance. Même si l'intensité de la crue et sa date exacte semblent entachés d'incertitude (marquée à 10 jours, et qui diminue avec les échéances), ces prévisions peuvent être très utiles pour de la mise en veille ou de la pré-alerte, et pourraient par exemple permettre de décider l'utilisation d'autres outils de prévisions spécialement adaptés aux bassins concernés.

Enfin, la prévision d'ensemble de débit lors de l'événement d'octobre 2006 qui a eu lieu dans le nord-est montre les limites du système, avec des débits prévus beaucoup plus faibles que le run SIM analyse.

Ce travail de thèse a été l'occasion pour Météo-France de s'orienter sur un thème de recherche innovant et en plein développement, et d'initier la production de prévisions d'ensemble hydrologiques. De nombreuses perspectives sont ouvertes quant à l'amélioration et aux évolutions de la chaîne de prévision d'ensemble des débits.

D'une part, la chaîne SIM poursuit son évolution. Des études sont en cours notamment sur la modélisation de la nappe de la Somme, ou encore sur l'implémentation dans MODCOU d'un système de routage en rivière dans lequel la vitesse du courant n'est plus une constante mais est reliée au débit. Ces progrès seront à répercuter dans la chaîne de prévision d'ensemble afin d'améliorer la qualité des prévisions de débit.

De plus, il sera intéressant de poursuivre la validation statistique du système pour des périodes plus pluvieuses. L'année 2005/2006 a été aussi sèche que 2004/2005 (et conduit à des résultats statistiques équivalents), il sera utile d'étendre la validation à l'année 2006/2007.

La chaîne de prévision elle-même peut être améliorée, et ce dans plusieurs directions.

Tout d'abord, il est important d'aller vers la comparaison des débits prévus aux observations, au lieu du run SIM analyse. Pour ce faire, il faut améliorer l'état initial hydrologique, en particulier le débit initial, qui est le débit analysé par SIM, et qui est parfois assez différent de l'observation. Pour cela, une étude est en cours au CNRM pour la mise en place d'un système d'assimilation de données hydrologiques (hauteur de nappes, débits).

De plus, pour s'intéresser à la prévision à courte et moyenne échéance des débits de bassins plus petits, une seconde chaîne de prévision est mise en place au CNRM, dans laquelle ISBA et MODCOU sont forcés par les prévisions d'ensemble atmosphériques PEARP (Prévision d'Ensemble ARPege) de Météo-France (11 membres, à échéance de 60 heures, et disponible à la résolution 0.25°). L'analyse des prévisions produites par cette chaîne est actuellement en cours.

Plusieurs améliorations peuvent également être apportées au système dans sa construction. La méthode de désagrégation spatiale des précipitations ne modifie pas les caractéristiques de l'ensemble (fiabilité, résolution), ce point pourrait être amélioré. De plus, le seul élément perturbé dans cette chaîne est le forçage atmosphérique. De ce fait, il est possible que toute la variabilité du système hydro-météorologique ne soit pas représentée. Il serait intéressant de compléter le système par exemple par des perturbations de l'état initial hydrologique ou encore des paramétrisations physiques des modèles.

Cette chaîne de prévision d'ensemble des débits est un bon moyen de valoriser les progrès réalisés en matière de prévision d'ensemble météorologique. Il serait intéressant de valider notre approche par rapport au système EFAS (European Flood Alert System) de la Communauté Européenne, les deux systèmes s'appuyant sur les mêmes prévisions d'ensemble atmosphériques.

Enfin, d'autres études d'un cadre plus large peuvent s'inspirer de l'approche développée dans ce travail. Par exemple, dans le cadre de la régionalisation du changement climatique et des études d'impact, il est envisagé de travailler sur la production de prévisions saisonnières hydrologiques, en couplant ISBA et MODCOU à des prévisions saisonnières atmosphériques. Ce travail, en cours d'initiation à Météo-France, vise à prévoir à l'échelle de plusieurs mois l'évolution de la ressource en eau (en particulier, la désaturation des sols et les étiages), des débits, et du manteau neigeux.

Bibliographie

- [ALOT, LECHES and HAKAM 2005] **(1)** *Etude préliminaire à la mise en place d'une prévision d'ensemble des débits*
ALOT C., LECHES G. and M. HAKAM
Ecole Nationale de la Météorologie, Projet modélisation, 2005
- [ANDRE et al. 1986] **(2)** *HAPEX-MOBILHY, a hydrologic atmospheric pilot experiment for the study of water budget and evaporation flux at the climatic scale*
ANDRE J.C., GOUTORBE J.P. and A. PERRIER
Bull. Am. Meteorol. Soc., 1986, 67, 138-144
- [ARCOS 2004] **(3)** *Variabilité inter-annuelle de la végétation et impact sur l'hydrologie des grands bassins versants français*
ARCOS Denis
ENM, Rapport de stage de fin d'études numéro 962, Juin 2004
- [ATGER 1999] **(4)** *The Skill of Ensemble Prediction Systems*
ATGER Frédéric
Monthly Weather Review, September 1999 Volume 27, pp. 1941-1953
- [ATGER 2002] **(5)** *Spatial and Interannual Variability of the Reliability of Ensemble-Based Probabilistic Forecasts : Consequences for Calibration*
ATGER Frédéric
Monthly Weather Review, August 2003 Volume 131, pp. 1509-1523
- [BARKMEIJER et al. 1999] **(6)** *3D-Var Hessian singular vectors and their potential use in the ECMWF Ensemble Prediction System.*
Barkmeijer, J., Buizza R. and Palmer T.N., 1999
Quart. J. Roy. Meteor. Soc.125, Part B 2333-2351.
- [BOONE et al. 1998] **(7)** *Inclusion of a third soil layer in a land-surface scheme using the force-restore method*
Aaron A. BOONE, J.C. CALVET, and J. NOILHAN
J. Applied Meteorology, 38
- [BOONE 2000] **(8)** *Modélisation des processus hydrologiques dans le schéma de surface ISBA : Inclusion d'un réservoir hydrologique, du gel et modélisation de la neige*
Aaron A. BOONE
Thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2000
- [BOONE et al. 2000] **(9)** *The influence of the inclusion of soil freezing on simulations by a soil-vegetation-atmosphere transfer scheme*
Aaron A. BOONE, V. MASSON, T. MEYERS and J. NOILHAN
Journal of Hydrometeorology, 39, 1544-1569
- [BOONE and ETCHEVERS 2001] **(10)** *An intercomparison of three snow schemes of varying complexity coupled to the same land-surface model : local-scale evaluation at an alpine site*
Aaron A. BOONE and Pierre ETCHEVERS
J. of Hydrometeorology, 2, 374-394
- [BONNE et al. 2004] **(11)** *The Rhone-Aggregation Land Surface Scheme Intercomparison Project : an overview*
BOONE A., CALVET J.C. and J. NOILHAN
J. Clim., 2004, 17(1), 187-208

- [BOURKE et al. 2004] **(12)** *Performance of the ECMWF and the BoM Ensemble Prediction Systems in the Southern Hemisphere*
BOURKE W., R. BUIZZA, N. NAUGHTON
Monthly Weather Review, 2004, Volume 132, pp. 2338-2357
- [BOWLING et al. 2001] **(13)** *Simulation of high latitude hydrological processes in the Thorne-Kalix basin : PILPS Phase-2(e), 1 : Experiment description and summary intercomparison*
BOWLING L. et al.
Global Planet. Change, 2001, 38, 1-30
- [BRADLEY et al. 2004] **(14)** *Distributions-Oriented Verification of Ensemble Streamflow Predictions*
BRADLEY Allen A., SCHWARTZ Stuart S., HASHINO Tempei
Journal of Hydrometeorology, June 2004 Volume 5, pp. 532-545
- [BRIER 1950] **(15)** *Verification of forecasts expressed in terms of probability*
BRIER Glenn W.
Monthly Weather Review, Jan. 1950, Volume 78, No 1, pp. 1-3
- [BUIZZA and PALMER 1995] **(16)** *The singular vector structure of the atmosphere global circulation.*
Buizza, R. and T.N. Palmer
J. Atmos. Sci., 1995, 52, 1434-1456.
- [BUIZZA et al. 1999] **(17)** *Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system.*
Buizza R., M. Miller, and T. N. Palmer, 1999
Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 125, 2887-2908
- [CABALLERO and NOILHAN 2003] **(18)** *Etude de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin Adour-Garonne*
Technical report, CNRM. Note de centre.
- [CALVET et al. 1998] **(19)** *An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites*
CALVET J.-C., NOILHAN J., ROUJEAN J.-L., BESSEMOULIN P., CABELGUENNE M., OLIOSO A., and J.-P. WIGNERON
Agri. Forest Meteor., 1998, 92, 73-95
- [CALVET et al. 2001] **(20)** *Modelling CO₂-enrichment effects using an interactive vegetation SVAT scheme*
CALVET J.-C. and J.-F. SOUSSANA
Agri. Forest Meteor., 2001, 108, 129-152
- [CANDILLE 2003] **(21)** *Validation des systèmes de prévisions météorologiques probabilistes*
CANDILLE Guillem
Thèse, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 2003
- [CHESSA and LALAURETTE 2001] **(22)** *Verification of ECMWF Ensemble Prediction System Forecasts : A Study of Large-Scale Patterns*
CHESSA Piero A., LALAURETTE François
WEATHER AND FORECASTING, October 2001 Volume 16, pp. 611-619
- [CLAPP and HORNBERGER 1978] **(23)** *Empirical equations for some hydraulic properties*
CLAPP R.B., HORNBERGER G.M.
Water Resou. Res., 14, 601-604
- [CLARK and HAY 2004] **(24)** *Use of Medium-Range Numerical Weather Prediction Model Output to Produce Forecast of Streamflow*
CLARK Martyn P., HAY Lauren E.
Journal of Hydrometeorology, February 2004 Volume 5, pp. 15-32
- [DEARDORFF 1977] **(25)** *A parametrization of ground-surface moisture content for use in atmosphere prediction model*
DEARDORFF J.W.
J. Appl. Meteor., 16, 1182-1185

- [DEARDORFF 1978] **(26)** *Efficient prediction of ground temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation*
DEARDORFF J.W.
J. Geophys. Res., 83, 1889-1903
- [DURAND et al. 1993] **(27)** *A meteorological estimation of relevant parameters for snow schemes used with atmospheric models*
Y. DURAND, E. BRUN, L. MERINDOL, G. GUYOMARC'H, B. LESAFFRE and E. MARTIN
Annals of Glaciology, 18, 65-71
- [DURAND 1995] **(28)** *Analyse des principaux paramètres météorologiques de surface sur les massifs lapins et d'autres zones climatiquement homogènes*
Y. DURAND
Technical report 1-2, Météo-France. Note scientifique et technique SAFRAN, CEN, Grenoble
- [ECMWF 2005] **(29)** *User Guide to ECMWF forecasts products 4.0*
July 2005, available at <http://www.ecmwf.int>
- [ECKEL 1998] **(30)** *Calibrated Probabilistic Quantitative Precipitation Forecasts Based on the MRF Ensemble*
ECKEL Frederick Anthony, Thesis, March 1998
- [EPSTEIN 1969] **(31)** *A Scoring System for Probability Forecasts of Ranked Categories*
Epstein, Edward S.
Journal of Applied Meteorology, Vol 8, No6, Dec 1969, pp. 985-987
- [ETCHEVERS 2000] **(32)** *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.*
Pierre ETCHEVERS
Thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2000
- [ETCHEVERS 2001] **(33)** *Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone Basin from 1981 to 1994* P. Echevers, C. Golaz, F. Habets Journal of Hydrology, 224, 60-85, 2001
- [ETCHEVERS et al. 2002 (a)] **(34)** *Impact of a climate change on the Rhone river catchment hydrology.*
Etchevers, P., C. Golaz, F. Habets, and J. Noilhan
J. of Geophys. Res., vol 107, n D16, ACL 6-1 to 6-18 , 2002.
- [ETCHEVERS et al. 2002 (b)] **(35)** *SnowMiP, 2002 : An intercomparison of snow models : first results.*
Etchevers P., Martin E., Brown R., Fierz C. Lejeune Y., Bazile E., Boone A., Dai Y-J, Essery R., Fernandez A., Gusev Y., Jordan R., Koren V., Kowalczyk E., Nasonova R., Pyles D., Schlosser A., B.Shmakin A., Smirnova T. G., Strasser U., Verseghy D., Yamazaki T., Yang Z.-L.
Proceedings of the International Snow Science Workshop, Penticton, Canada, 29 sep-4oct 2002
- [ETCHEVERS et al. 2004] **(36)** *Validation of the surface energy budget simulated by several snow models.*
Etchevers, Martin, Brown, Fierz, Lejeune, Bazile, Boone, Dai, Essery, Fernandez, Gusev, Jordan, Koren, Kowalczyk, Nasonova, Pyles, Schlosser, Shmakin, Smirnova, Strasser, Verseghy, Yamazaki and Yang, 2004.
Annals of Glaciology, 38, pp 150-158
- [FRANZ et al. 2003] **(37)** *Verification of National Weather Service Ensemble Streamflow Predictions for Water Supply Forecasting in the Colorado River Basin*
FRANZ Kristie J., HARTMANN Holly C., SOROOSHIAN Soroosh, BALES Roger
Journal of Hydrometeorology, December 2003 Volume 4, pp. 1105-1118
- [GOLAZ 1999] **(38)** *Modélisation hydrologique à l'échelle régionale appliquée au bassin du Rhône. Comparaison de deux modes de calcul des bilans hydriques de surface et étude de sensibilité à une perturbation des forçages climatiques.*

- Golaz C., 1999
Thèse de Doctorat , Ecole de Doctorat des Mines de Paris.
- [GOMEZ 2002] **(39)** *Modélisation intégrée du transfert de nitrate à l'échelle régionale dans un système hydrologique. Application au bassin de la Seine*
Eric GOMEZ
Thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2002
- [GUENVER and PERRAT 2003] **(40)** *Mise en place du maillage hydrographique sur la France et son application pour une simulation des débits sur le bassin versant de la Loire*
GUENVER Bleunwenn, PERRAT Emilie
Ecole Nationale de la Météorologie, Rapport de stage de fin d'études numéro 910a, 2003
- [HABETS 1998] **(41)** *Modélisation du cycle continental de l'eau à l'échelle régionale : application aux bassins versants de l'Adour et du Rhône*
HABETS F.
Thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1998
- [HABETS 1999a] **(42)** *The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model, applied to the HAPEX-MOBILHY area : Part 1 model and data base*
Habets F., Noilhan J., GOLAZ C., Goutorbe J.P., Lacarrere P., Leblois E., Ledoux E., Martin E., Otlle C., Vidal-Madjar D.
J. Hydrol., 217, 75-96, 1999
- [HABETS 1999b] **(43)** *The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model, applied to the HAPEX-MOBILHY area : Part 2 simulation of streamflows and annual water budget*
Habets F., Noilhan J., GOLAZ C., Goutorbe J.P., Lacarrere P., Leblois E., Ledoux E., Martin E., Otlle C., Vidal-Madjar D.
J. Hydrol., 217, 97-118, 1999
- [HABETS et al. 1999] **(44)** *Simulation of the water budget and the river flows of the Rhône basin*
Habets F., Etchevers P., Golaz C., Leblois E., Ledoux E., Martin E., Noilhan J. and C. Otlle
Journal of Geophysic Research, 104, 31145-31172
- [HABETS and SAULNIER 2001] **(45)** *Subgrid runoff parametrisation*
Habets F. and J.M. Saulnier
Physics and Chemistry of th Earth (B), 26, (5-6), 455-459
- [HABETS et al. 2004] **(46)** *On the utility of operationnal precipitation forecasts to served as input for streamflow forecasting*
Habets F., LeMoigne P. and J. Noilhan
Journal of Hydrology 293 (2004) 270-288
- [HABETS et al. 2007] **(47)** *The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France*
HABETS F., BOONE A., CHAMPEAU J.L., ETCHEVERS P., LEBLOIS E., LEDOUX E., LE MOIGNE P., MARTIN E., MOREL S., NOILHAN J., QUINTANA SEGUI P., ROUSSET REGIMBEAU F., and P. VIENNOT
Submitted to Journal of Geophysical Research, Jan. 2007
- [HAMILL and COLUCCI 1997] **(48)** *Verification of Eta-RSM Short-Range Ensemble Forecasts*
HAMILL Thomas M, COLUCCI Stephen J.
Monthly Weather Review, June 1997 Volume 125, pp. 1312-1327
- [HAMILL 1997] **(49)** *Reliability Diagrams for Multycategory Probabilistic Forecasts*
HAMILL Thomas M.
Weather and Forecasting, December 1997 Volume 12, pp. 736-741
- [HAMILL and COLUCCI 1998] **(50)** *Evaluation of Eta-RSM Ensemble Probabilistic Precipitation Forecasts*
HAMILL Thomas M, COLUCCI Stephen J.
Monthly Weather Review, March 1998 Volume 126, pp. 711-724
- [HAMILL 2000] **(51)** *Interpretation of Rank Histograms for Verifying Ensemble Forecasts*
HAMILL Thomas M.
Monthly Weather Review, March 2001 Volume 129, pp. 550-560

- [HENDERSON-SELLERS et al. 1993] **(52)** *The Project for Intercomparison of Land Surface Parametrization Schemes (PILPS)*
 HENDERSON-SELLERS A., Z.L. Yang, and R.E. DICKINSON
 Bull. Amer. Meteorol. Soc., 1993, 74, 1335-1349
- [HERSBACH 2000] **(53)** *Decomposition of the Continuous Ranked Probability Score for Ensemble Prediction Systems*
 HERSBACH Hans
 Weather and Forecasting, 2000, Volume 15, pp.559-570
- [HOU et al. 2001] **(54)** *Objective Verification of the SAMEX'98 Ensemble Forecasts*
 HOU Dingchen, Eugenia KALNAY, Kelvin K. DROEGEMEIER
 Monthly Weather Review, 2001, Volume 129, pp. 73-91
- [JARVIS 1976] **(55)** *The interpretation of variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field*
 JARVIS P.G.
 Philos. Trans. R. Soc. London, 273, 593-610
- [KHARIN et al. 2003] **(56)** *On the ROC Score of Probability Forecasts*
 KHARIN Viatcheslav V., and Francis W. ZWIERS
 Journal of Climate, 2003, Volume 16, pp4145-4150
- [LEDOUX et al. 1984] **(57)** *Proposition d'un modèle couplé pour la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique*
 E. LEDOUX, G. GIRARD, J.P. VILLENEUVE
 La Houille Blanche, No.1/2-1984
- [LEDOUX 2003] **(58)** *Modèles mathématiques en hydrogéologie*
 E. LEDOUX
 Cours - Centre d'Informatique Géologique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2003
- [LEMOIGNE 2002] **(59)** *Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN*
 Note de centre GMME, Météo-France
- [LEMONSU 2002] **(60)** *Simulation of a summer urban breeze over Paris*
 A. LEMONSU, V. MASSON
 Boundary-Layer Meteorology, 104 :463-490
- [LEMONSU et al. 2003 -a] **(61)** *Modeling the Surface Energy Balance of the Core of an Old Mediterranean City : Marseille*
 A. Lemonsu, C. S. B. Grimmond, and V. Masson
 Journal of Applied Meteorology, Volume 43, Issue 2 (February 2004) pp. 312-327
- [LEMONSU et al. 2003 -b] **(62)** *Hydrological Validation of the TEB Scheme on a Suburban Catchment*
 A. LEMONSU, V. MASSON, E.BERTHIER
 Journal of Hydrology, Soumis
- [LEWIS 2005] **(63)** *Roots of Ensemble Forecasting*
 LEWIS John M.
 Monthly Weather Review, 2005, Volume 133, pp. 1865-1885
- [LINDSTROM et al. 1997] **(64)** *Development and test of the distributed BHV-96 model*
 LINDSTROM G., JOHANSSON B., PERSSON M., GARDELIN M. and S. BERGSTROM
 Journal of Hydrology 1997, 201, 272-288
- [LINDSTROM 2006] **(65)** *Evaluation of ensemble streamflow forecasting at SMHI*
 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 Warnig; available at <http://www.chr-khr.org/>

- [LORENZ 1963] **(66)** *Deterministic non-periodic flows*
Lorenz, E. N.
J. Atmosph. Sciences, 20, 1963, p. 130-141.
- [MARTIN 1988] **(67)** *Etude expérimentale des flux de chaleur au dessus de la neige*
E. MARTIN
Technical report, Université Scientifique et Médicale de Grenoble. Rapport de DEA.
- [MARTIN 2005] **(68)** *Comportement de SIM lors de la crue du Rhône des 3 et 4 décembre 2003*
MARTIN Eric, Florence HABETS, Fabienne ROUSSET, Sophie MOREL, Pere QUINTANA-SEGUI
Document Météo-France, 27 octobre 2005
- [MARZBAN 2004] **(69)** *The ROC Curve and the Area under It as Performance Measures*
MARZBAN Caren
Weather and Forecasting, 2004, Volume 19, pp 1106-1114
- [MASSON 1999] **(70)** *A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models*
V.MASSON
Boundary-Layer Meteorology, No.94, p357-397, 2000
- [MASSON et al. 2001] **(71)** *A global database of land surface parameters at 1km resolution in meteorological and climate models*
Valery MASSON, Jean-Louis CHAMPEAUX, Fabrice CHAUVIN, Christelle MERIGUET, Roselyne LACAZE
submitted to Journal of Climate
- [MOLTENI et al. 1996] **(72)** *The ECMWF Ensemble Prediction System : methodology and validation.*
Molteni, F., Buizza, R. , Palmer, T. N. and Petroliajgis, T.
Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1996, 122, 73-119.
- [MOREL 2002] **(73)** *Modélisation à l'échelle régionale des bilans énergétique et hydrique de surface et des débits ; application au bassin Adour-Garonne*
Sophie MOREL
Thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2002
- [MURPHY and EPSTEIN 1967] **(74)** *Verification of Probabilistic Predictions : A Brief review*
MURPHY, Allan H. and Edward S. EPSTEIN
Journal of Applied Meteorology, Volume 6, No 5, Oct 1967, pp. 748-755
- [MURPHY 1969] **(75)** *On the Ranked Probability Score*
MURPHY, Allan H.
Journal of Applied Meteorology, Volume 8, No 6, Dec 1969, pp. 988-989
- [MURPHY 1971] **(76)** *A Note on The Ranked Probability Score*
MURPHY, Allan H.
Journal of Applied Meteorology, Volume 10, Feb 1971, pp. 155-156
- [MURPHY 1973] **(77)** *A new vector partition of the probability score*
MURPHY Allan H.
Journal of Applied Meteorology, 1973 Volume 12, pp. 595-600
- [NASH and SUTCLIFFE 1970] **(78)** *River flow forecasting through conceptual models, 1, A discussion of principles*
NASH J.E. and J.V. SUTCLIFFE
Journal of Hydrology, 1970, 10, 282-290
- [NOBRE 1996] **(79)** *The Large-Scale Biosphere Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA) : Concise experimental plan*
NOBRE C.
LBA Sci. Plann. Group, Winand Staring Center for Integrated Land, Soil and Water Res., Wageningen, Netherlands
- [NOILHAN and PLANTON 1988] **(80)** *A Simple Parametrization of Land Surface Processes for Meteorological Models*

- J.NOILHAN, S. PLANTON
 Monthly Weather Review, Vol.117, March 1989, p536-549
- [NOILHAN and MAHFOUF 1995] **(81)** *The ISBA land surface parametrisation scheme*
 J.NOILHAN, J-F MAHFOUF
 Global and Planetary Change 13 (1996) p145-159
- [NOILHAN and LACARRERE 1995] **(82)** *GCM Grid-Scale Evaporation from Mesoscale Modeling*
 J.NOILHAN, P. LACARRERE
 Journal Of Climate, Vol.8, No.2, Fevrier 1995, p206-223
- [OTTLE et al. 2001] **(83)** *Hydro meteorological modelling of the Rhone basin : general presentation and objectives.*
 Ottlé, C., P. Etchevers, C. Golaz, F. Habets, J. Noilhan, E. Martin, E. Ledoux, E. Leblois, E. Sauquet, N. Amraoui, E. Artinian, J.L. Champeaux, C. Guérin, P. Lacarrère, P. le Moigne, G.M. Saulnier, D. Thiéry, D. Vidal-Madjar and S. Voirin, 2001
 Physics and Chemistry of the Earth (B), vol 26, n 5-6, pp 443-453.
- [POINCARÉ 1908] **(84)** *Science et Méthode*
 POINCARÉ H.
 Edition Ernest Flammarion, Paris, 1908
- [QUINTANA-SEGUI et al. 2007] **(85)** *Analysis of near surface atmospheric variables : Validation of the SAFRAN analysis over France*
 P. QUINTANA-SEGUI, P. LEMOIGNE, Y. DURAND, E. MARTIN, F. HABETS, M. BAILLON, C. CANELLAS, L. FRANCHISTEGUY, S. MOREL
 Journal of Applied Meteorology and Climatology, en révision
- [RAZAFINDRAKOTO 2004] **(86)** *Evaluation de la chaîne opérationnelle SAFRAN-ISBA-MODCOU appliquée à l'ensemble des grands bassins français*
 ENM, Rapport de stage de fin d'études numéro 946
- [RITTER and GELEYN 1992] **(87)** *A comprehensive radiation scheme for numerical prediction models with potential applications in climate radiations*
 B. RITTER and J.F. GELEYN
 Monthly Weather Review, 120 (2)
- [ROULIN and VANNITSEM 2005] **(88)** *Skill of Medium-Range Hydrological Ensemble Predictions*
 ROULIN Emmanuel, VANNITSEM Stéphane
 Journal of Hydrometeorology, 2005 Volume 6, pp. 729-744
- [ROUSSET 2003] **(89)** *Récapitulatif sur les maillages utilisés par le système couplé SAFRAN-ISBA-MODCOU*
 ROUSSET F.
 Météo-France, Document Interne, Novembre 2003.
- [ROUSSET et al. 2004] **(90)** *Hydrometeorological modeling of the Seine basin using the SAFRAN-ISBA-MODCOU system*
 ROUSSET F., HABETS F., GOMEZ E., LE MOIGNE P., MOREL S., NOILHAN J. and E. LEDOUX
 Journal of Geophysical Research, 109, D14105, doi :10.1029/2003JD004403, 2004
- [ROUSSET 2004] **(91)** *Modélisation hydro-météorologique du bassin de la Seine à l'aide du modèle SAFRAN-ISBA-MODCOU*
 ROUSSET F.
 Revue Arc-en-ciel de l'Association des Anciens de la Météorologie, 2/2004, numéro 144
- [ROUSSET REGIMBEAU et al. 2007] **(92)** *Ensemble Streamflow Forecasts over France*
 Fabienne ROUSSET REGIMBEAU, Florence HABETS, Eric MARTIN, Joël NOILHAN
 ECWMF Newsletter No 111 Spring 2007
- [SCHAAKE 2006] **(93)** *Hydrologic Ensemble Prediction : Past, Present and Opportunities for the Future*
 SCHAAKE John
 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 Warnig; available at <http://www.chr-khr.org/>

- [SCHLOSSER et al. 2000] **(94)** *Simulations of a boreal grassland hydrology at Valdai, Russia : PILPS Phase-2(d)*
SCHLOSSER C.A., SLATER G.A., ROBOCK A., PITMAN A.J., VINNIKOV K.Y., HENDERSON-SELLERS A., SPERENSKAYA N.A., MITCHELL K., and the PILPS-2(d) contributors
Mon. Weather Review, 2000, 128, 301-321
- [SELLERS et al. 1997] **(95)** *BOREAS in 1997 : Experiment overview, scientific results and future directions*
SELLERS J.P. et al.
Journal of Geophysical Research, 102(D24), 28, 731-770
- [THIELEN and al. 2006] **(96)** *Added Value of Ensemble prediction system products for medium-range flood forecasting on European scale*
Thielen J., Bartholmes J., Ramos M.H., Kalas M., Van der Knijff J. and A. De Roo
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 Warnig; available at <http://www.chr-khr.org/>
- [TOTH and KALNAY 1993] **(97)** *Ensemble Forecasting at the NMC : The generation of perturbations.*
Toth, Z., and E. Kalnay
Bull. Amer. Meteorol. Soc., 1993, 74, 2317-2330.
- [TOTH and KALNAY 1997] **(98)** *Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method.*
Toth, Z., and E. Kalnay
Mon. Wea. Rev, 1997, 125, 3297-3319.
- [TRACTON and KALNAY 1993] **(99)** *Ensemble forecasting at NMC : Operational implementation.*
Tracton, M. S. and E. Kalnay
Wea. Forecasting, 1993, 8, 379-398.
- [UNDEN 2006] **(100)** *Global EPS systems - Principles, use and limitations*
UNDEN Per
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 Warnig; available at <http://www.chr-khr.org/>
- [VOIRIN et al. 2001] **(101)** *Interactive vegetation modeling at a regional scale : application to the Adour basin*
Voirin, S., J.-C. Calvet, F. Habets and J. Noilhan
Phys. Chem. Earth (B), Vol. 26, No. 5-6, pp. 479-484, 2001.
- [WANDISHIN et al. 2001] **(102)** *Evaluation of a Short-Range Multimodel Ensemble System*
WANDISHIN Matthew S., Steven L. MULLEN, David J. STRENSRUD, Harold E. BROOKS
Monthly Weather Review, 2001, Volume 129, pp. 729-747
- [WILKS 1995] **(103)** *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences : An Introduction*
WILKS D. S.
Academic Press, 1995, 467 pp.
- [WILSON et al. 1999] **(104)** *A Strategy for Verification of Weather Element Forecasts from an Ensemble Prediction System*

WILSON, Laurence J., William R. BURROWS, Andreas LAZINGER
Monthly Weather Review, 1999, Volume 127, pp. 956-970

[WOOD et al. 1998] **(105)** *The Project for Intercomparison of Land-Surface Parametrization Schemes (PILPS) Phase-2(c) Red-Arkansas river experiment : I. Experiment description and summary intercomparisons*

WOOD E.F. et al.

Global Planet. Change, 1998, 19, 115-135