



HAL
open science

Adaptation et évaluation d'un système d'anticipation de crues éclair sur des bassins de montagne non-jaugés

Dimitri Defrance

► **To cite this version:**

Dimitri Defrance. Adaptation et évaluation d'un système d'anticipation de crues éclair sur des bassins de montagne non-jaugés. Sciences de la Terre. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2014. Français. NNT : 2014PA066059 . tel-00997563

HAL Id: tel-00997563

<https://theses.hal.science/tel-00997563>

Submitted on 28 May 2014

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.



Université Pierre et Marie Curie

École Doctorale Géosciences et Ressources Naturelles et Environnement

Thèse de doctorat en hydrologie

**Adaptation et évaluation d'un système d'anticipation de
crues éclair sur des bassins de montagne non-jaugés**

Valorisation de relevés de dégâts

Par Dimitri Defrance

Thèse préparée à IRSTEA, Aix-en-Provence – UR Ouvrage Hydraulique, équipe Hydrologie

Soutenue le 17 mars 2014 devant le jury composé de :

M. GAUME Eric	IFSTTAR	Rapporteur
M. BOUVIER Christophe	IRD	Rapporteur
M. RIBSTEIN Pierre	Université Pierre et Marie Curie	Examineur
M. OUDIN Ludovic	Université Pierre et Marie Curie	Examineur
M. DOUVINET Johnny	Université d'Avignon	Examineur
M. ANDRÉASSIAN Vazken	IRSTEA	Directeur de thèse
M. JAVELLE Pierre	IRSTEA	Co-directeur de thèse
M. JANET Bruno	SCHAPI	Invité

Remerciements

Avant de clôturer définitivement mon doctorat, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé à sa réussite, tant sur le plan professionnel que personnel et qui m'ont permis de mener à bien ce premier projet professionnel.

Tout d'abord, je souhaite remercier Pierre Ribstein, Ludovic Oudin, Johnny Douvinet et Bruno Janet d'avoir accepté d'intégrer mon jury de thèse ainsi qu'Eric Gaume et Christophe Bouvier en tant que rapporteurs. Leurs remarques, très constructives, ont contribué à la correction des dernières coquilles du manuscrit. Pour arriver à ce résultat, les deux comités de thèse, composés de certains membres du jury et complétés par Olivier Payrastra et Roger Moussa, ont aiguillé efficacement mes recherches. Les différents courants présents ont abouti à la réalisation de mes travaux pluridisciplinaires.

Ce projet de thèse fût aussi une histoire de confiance, que m'ont accordée mes deux co-directeurs de thèse Pierre Javelle et Vazken Andréassian. Sans eux, toute cette aventure n'aurait pas été possible. La présence et la patience de Pierre ont été très décisives pour l'avancement, au quotidien, de mes recherches. Quant à Vazken, son recul et sa perspective globale sur les problématiques rencontrées ont réorienté à de maintes reprises la direction que devait prendre mes recherches. Plus particulièrement, je tiens à les remercier à titre personnel pour leur présence (physique ou épistolaire), leur soutien et leur compréhension qui m'ont été d'un grand réconfort dans les périodes les plus difficiles.

Pour la très bonne ambiance de travail rencontrée au sein des laboratoires IRSTEA d'Aix-en-Provence, je désire remercier toutes les personnes que j'ai côtoyées, au cours de ces trois longues années : Pierre, Patrick, Nathalie, Catherine, Philippe, Anthony, Stéphane, Angelica, Florine, Yoann (maintenant chez HYDRIS) et plus particulièrement Mathieu, mon collègue de bureau qui me connaît donc bien. Cette aventure professionnelle et personnelle ne s'est pas limitée au cadre du laboratoire. Que ce soit lors des journées doctorales, des stages de terrain ou des rencontres à IRSTEA à Antony, des liens d'amitié se sont tissés, ainsi que de riches souvenirs avec plusieurs doctorants : Pierre, Florent, François, Laure, Louise, Claire, Ugo...

Cette thèse n'aurait pu aboutir sans le soutien de ma famille et plus particulièrement de mes parents, de mes oncles et tantes et de mes beaux-parents. Je tiens à présenter mes remerciements les plus forts et les plus personnels à ma compagne Ann-Sophie, qui, au quotidien, s'est faite pour moi, plus qu'une oreille compréhensive et attentionnée, une muse me prodiguant motivation, courage et foi en mes recherches. Encore merci, d'autant plus que tu as aussi subi le pire avec ses six derniers mois, sans frémir et sans exacerber mes joies. Je te remercie du fond du cœur pour le temps que tu as consacré à la relecture et à la correction de mon manuscrit. Si j'ai réussi mon doctorat, c'est en grande partie grâce à toi.

Je n'oublie pas non plus, tous ceux et toutes celles, auxquelles je pense avec amitié et sympathie, mais que je n'ai pas nommés ici : un merci à vous pour votre participation à cette grande entreprise que fût ma thèse. Finalement, merci à toi, lecteur, qui vas consacrer plusieurs heures à la lecture de ce document !

Financeurs

Les travaux de cette thèse ont été réalisés dans le cadre du projet RHYTMME piloté par Météo-France et IRSTEA. Ce projet ainsi que la thèse ont été possibles grâce aux trois financeurs suivants :

	
<p>Région</p>  <p>Provence-Alpes-Côte d'Azur</p>	 <p>UNION EUROPÉENNE</p> <p>L'Europe s'engage en PACA avec le Fonds Européen de Développement Régional</p>
 <p><i>Liberté • Égalité • Fraternité</i> RÉPUBLIQUE FRANÇAISE</p>  <p>Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie</p>	

Résumé

En Europe, les crues éclair affectent principalement les régions méditerranéennes et montagneuses. Les bassins concernés sont le plus souvent de petite taille (inférieure à 100 km²), et non-jaugés, leur temps de concentration est très court. Anticiper ce type d'événements demeure un exercice ardu parsemé de multiples difficultés.

Développée initialement pour les régions méditerranéennes, la méthode AIGA (Adaptation d'Information Géographique pour l'Alerte en crue) a pour objectif d'estimer et de localiser en temps réel la dangerosité des crues, et de la qualifier en termes de périodes de retour. Elle se fonde sur un modèle hydrologique (GRD) et sur des cumuls de pluie fournis par le réseau de radars ARAMIS.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet commun à IRSTEA et Météo-France (projet RHYTMME) et ses deux objectifs sont :

- l'adaptation du modèle hydrologique de la méthode AIGA aux régions montagneuses, en tenant compte des caractéristiques de cet environnement ;
- l'évaluation du nouveau modèle sur des bassins de petite taille, qui sont réellement non-jaugés.

Pour atteindre le premier objectif, le modèle est complexifié (intégration d'un traitement de la neige), testé sur 118 bassins versants jaugés de la banque HYDRO des régions Rhône-Alpes et Provence-Alpes-Côte-D'azur, et régionalisé. Quant au second but, des relevés de dégâts, issus de la base de données des services de Restauration des Terrains en Montagne (RTM), sont utilisés afin d'évaluer le modèle sur 123 très petits bassins dans des conditions aussi proches que possible de la réalité du terrain.

Sur les bassins versants jaugés, en perfectionnant, au fur et à mesure, le modèle originel de la méthode AIGA, des gains de l'ordre de 40% sont obtenus sur le critère de Nash et Sutcliffe. Ces améliorations sont surtout significatives dans les régions montagneuses, et elles sont moins conséquentes en Méditerranée. Sur les bassins RTM, il est difficile de prouver les avantages du nouveau modèle du fait de l'absence de débits observés.

Afin de s'affranchir de ce problème, une méthode d'évaluation est développée, fondée sur des statistiques de contingence, illustrant la concomitance entre dégâts observés et dépassement de seuil des débits simulés. Il est proposé un graphe renseignant le taux de détection (POD) et le taux de succès (SR) pour différents seuils. Il constitue une approche multi-seuils qui permet de comparer des modèles entre eux, à l'instar des courbes de ROC. Cette technique montre bien de meilleures performances de la part du nouveau modèle développé à l'étape précédente. Cependant, ces performances peuvent encore être améliorées en procédant à une phase de calage intégrant directement l'information de dégâts. Cette ultime étape permet ainsi de palier aux limites de l'hydrologie classique.

La thèse met en évidence un problème d'évaluation des systèmes d'anticipation des crues : une évaluation sur bassins jaugés est une première étape nécessaire mais pas suffisante. En effet, les travaux illustrent le fait que les compromis opérés sur les grands bassins jaugés n'entraînent pas forcément de meilleures performances sur les petits bassins, sujets aux crues éclair.

Abstract

In Europe, flash floods primarily occur in the Mediterranean and mountainous areas. The concerned basins are often small and ungauged with a short lag time. Anticipating such events is a tricky task with many difficulties.

The AIGA method (Adaptation d'Information Géographique pour l'Alerte en crue), initially developed for the Mediterranean area, aims in real-time to locate floods and to evaluate their danger in terms of return periods. This method is based on a hydrological model and on the accumulation of rainfall estimated by ARAMIS radar network

This thesis is part of a common project between Irstea and Météo-France (RHYTMME project) with two objectives:

- the adaptation of the hydrological model of AIGA method to the mountainous areas, taking into account the environment characteristics ;
- the evaluation of the new model on small basins, which are actually ungauged.

To achieve the first objective, the model is complicated by the integration of a snow modelling on 118 basins from HYDRO database in Rhône-Alpes and Provence-Alpes-Côte-D'azur areas. Then the model is regionalized. The second objective is to use flood reports from the mountain area restoration services database (services de Restauration des Terrains en Montagne (RTM)). The model is evaluated with these reports on 123 very small basins under conditions as close to as possible the reality.

On the gauged catchment, the original model of the AIGA method is improved step by step. Nash and Sutcliffe criterion increases about 40% during this development phase. These improvements are mainly significant in mountainous areas and they are less consistent in the Mediterranean area. On the real ungauged catchments from the RTM services, proving the benefits of the new model is difficult because of the lack of observed flow data.

To overcome this problem, an evaluation method is developed, based on contingency statistics, illustrating the coincidence between observed damages and threshold crossing by simulated flows. A graphic with the probability of detection (POD) according to the success rate (SR) is introduced for different thresholds. Thereby, a multi-threshold approach is used to compare hydrological models like ROC-curves. With this technique we show best performances with the new model developed in the previous step. However, this performance can be further improved by a calibration integrating directly the damage information. This final step allows to overcome the limitations of classical hydrology.

An evaluation matter of the flash flood warning systems is highlighted by this thesis: an evaluation on gauged basins is a necessary first step but not sufficient. Indeed, the works illustrate that the decided compromises on the large gauged basins don't lead automatically to the best performances on the small basins occurring flash floods.

Sommaire

<u>CONTEXTE ET OBJECTIFS.....</u>	<u>1</u>
<u>CHAPITRE I : COMMENT ANTICIPER LES CRUES ECLAIR ?</u>	<u>7</u>
<u>CHAPITRE II : DONNEES UTILISEES</u>	<u>33</u>
<u>CHAPITRE III : PRESENTATION DES MODELES TESTES ET DE LA METHODOLOGIE</u>	<u>69</u>
<u>CHAPITRE IV : APPROCHE LOCALE : CALAGE ET EVALUATION DES VARIANTES ISSUES DE LA METHODE AIGA</u>	<u>93</u>
<u>CHAPITRE V : APPROCHE REGIONALE DE LA NOUVELLE VERSION DE LA METHODE AIGA</u>	<u>129</u>
<u>CHAPITRE VI : EVALUATION DES MODELES SUR DE VERITABLES BASSINS NON-JAUGES.....</u>	<u>159</u>
<u>CHAPITRE VII : CALAGE D'UN MODELE HYDROLOGIQUE DIRECTEMENT A L'AIDE DE DONNEES DE DEGATS</u>	<u>185</u>
<u>CONCLUSION GENERALE.....</u>	<u>207</u>
<u>LISTE DES ILLUSTRATIONS.....</u>	<u>211</u>
<u>LISTE DES TABLEAUX</u>	<u>217</u>
<u>ANNEXES</u>	<u>219</u>
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	<u>235</u>

Contenu des chapitres

CHAPITRE I : COMMENT ANTICIPER LES CRUES ECLAIR ? 7

1	LES CRUES ECLAIR.....	8
1.1	PAR DELA L'HYDROLOGIE, LA NECESSITE D'UNE APPROCHE PLURIDISCIPLINAIRE	8
1.2	TENTATIVES DE DEFINITION D'UNE CRUE ECLAIR.....	8
1.3	LES CRUES ECLAIR, A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT	10
1.4	LES CRUES ECLAIR, LES LIMITES DE L'HYDROLOGIE CLASSIQUE.....	14
1.5	DEFINITION DES CRUES ECLAIR RETENUES	15
2	ESTIMATION DES PRECIPITATIONS GENERANT DES CRUES ECLAIR.....	16
2.1	LES PLUVIOMETRES.....	16
2.2	LES RADARS.....	17
2.3	LA PREVISION DES PLUIES	21
3	PRESENTATION DE QUELQUES SYSTEMES OPERATIONNELS D'ANTICIPATION AUX CRUES	22
3.1	GENERALITE	22
3.2	DANS L'UNION EUROPEENNE.....	23
3.3	AUX ETATS-UNIS	24
3.4	EN FRANCE	25
4	EVALUATION DES MODELES EN NON-JAUGE.....	28
4.1	A L'AIDE DES BASSINS JAUGES	28
4.2	A L'AIDE DES RETOURS D'EXPERIENCES.....	29
4.3	A L'AIDE DE BASES DE DONNEES DE DEGATS	29
5	CONCLUSION	31

CHAPITRE II : DONNEES UTILISEES 33

1	ZONE D'ETUDE ET DONNEES UTILISEES.....	34
1.1	ZONE D'ETUDE.....	34
1.2	DONNEES PLUVIOMETRIQUES : COMEPHORE (1997 – 2006).....	35
1.3	DONNEES DE NEIGE ET DE TEMPERATURE ISSUES DE LA REANALYSE SAFRAN	36
1.4	DONNEES D'ETP CALCULEES PAR LA FORMULATION D'LOUDIN	37
1.5	DEUX BASES DE DONNEES DE BASSINS VERSANTS.....	38
2	ANALYSE DES DONNEES DE PLUIE, DE NEIGE, DE TEMPERATURE ET D'ETP	43
2.1	ANALYSE DE LA PLUIE	43
2.2	DONNEES DE NEIGE	45
2.3	DONNEES DE TEMPERATURE.....	46
2.4	DONNEES D'ETP.....	47
3	ANALYSE DES BASSINS HYDRO ET RTM	49
3.1	DETERMINATION DE SOUS-REGIONS SELON LES HYDRO-ECOREGIONS (HER).....	49
3.2	DESCRIPTION PHYSIQUE DES BASSINS VERSANTS	52
3.3	OCCUPATION DES SOLS.....	54
3.4	CARACTERISTIQUES HYDRO-CLIMATIQUES.....	55
4	CARACTERISATION DES EVENEMENTS PLUIE-DEBIT	60
4.1	CONSTITUTION DES EVENEMENTS PLUIE-DEBIT	60
4.2	NOMBRE D'EVENEMENTS.....	62
4.3	CUMUL ET INTENSITE DES EVENEMENTS	63
4.4	DESCRIPTION DES DEBITS ASSOCIES AUX EVENEMENTS DES BASSINS HYDRO	64
4.5	SAISONNALITE DES CRUES ET DES SIGNALEMENTS RTM.....	65
5	CONCLUSION	68

CHAPITRE III :	PRESENTATION DES MODELES TESTES ET DE LA METHODOLOGIE	69
1	PRESENTATION DE LA METHODE AIGA ACTUELLE	70
1.1	PRINCIPES.....	70
1.2	FONCTIONNEMENT DU MODELE EVENEMENTIEL HORAIRE GRD DE LA METHODE AIGA	70
1.3	INITIALISATION DU MODELE HORAIRE PAR LE MODULE DE PRODUCTION DE GR3J	74
2	ADAPTATION DE LA METHODE AIGA AUX ZONES DE MONTAGNES	78
2.1	COMMENT PRENDRE EN COMPTE LA NEIGE ?	78
2.2	COMMENT INITIALISER LE MODELE EVENEMENTIEL HORAIRE DE CRUE (GRD) ?.....	80
2.3	LES PRINCIPALES OPTIONS ETUDIEES	81
3	METHODOLOGIE APPLIQUEE DANS LA SUITE	83
3.1	APPROCHE LOCALE : CALAGE ET EVALUATION DES MODELES (ETAPE 2)	84
3.2	APPROCHE REGIONALE : TECHNIQUES DE REGIONALISATION (ETAPE 3)	88
3.3	ÉVALUATION A PARTIR D'UNE INFORMATION DE DEGATS (ETAPE 4).....	89
4	CONCLUSION	92
CHAPITRE IV :	APPROCHE LOCALE : CALAGE ET EVALUATION DES VARIANTES ISSUES DE LA METHODE AIGA	93

1	POURQUOI FAIRE EVOLUER LE MODELE HYDROLOGIQUE DE LA METHODE AIGA ACTUELLE ?	94
1.1	ANALYSE DES RESULTATS.....	94
1.2	ILLUSTRATION DES PROBLEMES.....	96
2	METHODE PROPOSEE.....	99
2.1	COUPLAGE DU MODELE D'INITIALISATION (GR4J) ET DU MODELE DE CRUES (GRD).....	99
2.2	PRISE EN COMPTE DE LA NEIGE AUX PAS DE TEMPS JOURNALIER ET HORAIRE	104
2.3	LES VARIANTES TESTEES	106
3	APPORT DE L'INITIALISATION	107
3.1	CALAGE DU MODELE JOURNALIER GR4J.....	107
3.2	CALAGE DU MODELE HORAIRE POUR LES VARIANTES 1 ET 2	108
4	APPORT DE LA NEIGE	112
4.1	SUR LE MODULE JOURNALIER GR4J	112
4.2	APPORT DE LA NEIGE SUR LE MODELE GRD (VARIANTES 3 ET 4)	113
4.3	ROBUSTESSE DES DIFFERENTES VERSIONS TESTEES.....	117
5	DISCUSSION AU SUJET DE LA VARIANTE RETENUE (4) ET SES POSSIBLES AMELIORATIONS	119
5.1	LIMITES DE LA VERSION RETENUE (VARIANTE 4).....	120
5.2	QUALITE DE LA PRISE EN COMPTE DE LA NEIGE.....	121
5.3	PRISE EN COMPTE DE LA VARIABILITE SPATIALE DE LA PLUIE	122
5.4	PRISE EN COMPTE DE L'HYDROGEOLOGIE.....	123
6	CONCLUSION	126

CHAPITRE V : APPROCHE REGIONALE DE LA NOUVELLE VERSION DE LA METHODE AIGA..... 129

1	ANALYSE DES PARAMETRES CALES.....	130
1.1	VARIATION SPATIALE DES PARAMETRES.....	130
1.2	REGRESSION ENTRE LES PARAMETRES ET LES DESCRIPTEURS GEOMORPHOLOGIQUES ET CLIMATIQUES.....	132
2	TECHNIQUES TESTEES DE REGIONALISATION POUR LA NOUVELLE VERSION DE LA METHODE AIGA.....	134
2.1	REGIONALISATION PAR LA MEDIANE.....	134
2.2	REGIONALISATION PAR VOISINAGE.....	137
2.3	TESTS DE CONTRAINTES SUR LES DONNEURS.....	142
2.4	REGIONALISATION RETENUE POUR LA NOUVELLE VERSION D’AIGA (VARIANTE 4).....	148
3	COMPARAISON DE LA NOUVELLE VERSION AVEC LES VARIANTES 1, 2 ET 3.....	151
4	COMPARAISON ENTRE LA VERSION INITIALE ET LA NOUVELLE VERSION DE LA METHODE AIGA.....	153
4.1	ANALYSE PAR SOUS-REGIONS.....	154
4.2	ANALYSE PAR SAISONS.....	155
5	CONCLUSION ET PISTES D’AMELIORATION.....	158

CHAPITRE VI : EVALUATION DES MODELES SUR DE VERITABLES BASSINS NON-JAUGES..... 159

1	EVALUATION DES MODELES SUR DES BASSINS NON-JAUGES.....	160
1.1	PRESENTATION DES DIFFERENTS TYPES DE BASE DE DONNEES.....	160
1.2	DETERMINATION D’UN SEUIL D’ALERTE A PARTIR DES RELEVES DE DEGATS.....	162
2	PROPOSITION D’UNE METHODE POUR EVALUER DES MODELES A PARTIR DE DONNEES DE DEGATS.....	163
2.1	UNE APPROCHE AVEC UN SEUIL PAR BASSIN.....	163
2.2	GENERALISATION DE L’APPROCHE SIMPLE SEUIL PAR UNE APPROCHE MULTI-SEUILS.....	166
3	APPLICATION SUR LES BASSINS RTM.....	171
3.1	MISE-EN-ŒUVRE.....	171
3.2	RESULTATS GENERAUX.....	172
3.3	RESULTATS SUR LES HER.....	174
4	DISCUSSION.....	176
4.1	LIMITES LIEES A NOTRE METHODE D’EVALUATION ET AUX DONNEES DE DEGATS.....	176
4.2	LIMITES LIEES A NOTRE MODELISATION ET AUX DONNEES DE PRECIPITATION.....	178
5	CONCLUSION.....	183

CHAPITRE VII : CALAGE D’UN MODELE HYDROLOGIQUE DIRECTEMENT A L’AIDE DE DONNEES DE DEGATS..... 185

1	SIMPLIFICATION ET CALAGE DU MODELE HYDROLOGIQUE.....	187
1.1	CHOIX DES STRUCTURES DE MODELES A TESTER.....	187
1.2	CALAGE DES PARAMETRES DU MODELE GR4J.....	190
1.3	TECHNIQUE DE CALAGE DES DEUX PARAMETRES DU MODELE GRD.....	190
2	RESULTATS ET DISCUSSION.....	192
2.1	ETUDES DES PARAMETRES REGIONAUX DU MODELE GRD A TRAVERS LES DIFFERENTES VARIANTES.....	192
2.2	RESULTATS DU MODELE GRD POUR LES DIFFERENTES VARIANTES.....	197
2.3	DISCUSSIONS SUR L’APPORT DU CALAGE DIRECTEMENT EFFECTUE SUR LES RTM.....	199
3	SYNTHESE ET PERSPECTIVE.....	203

Contexte et objectifs

Parmi les désastres naturels, les crues sont les plus dangereuses, que ce soit en termes de décès ou de dégâts. Sur la période 1980-2009, les crues sont responsables de près de 540 000 décès et de 360 000 blessés et ont affecté l'existence d'environ 2,8 milliards d'individus dans le monde (Doocy et al. 2013). Motivés par ce constat, l'UNESCO et l'AISH ont publié dès 1976 un catalogue répertoriant tous les types de crues (Herschly 2002). L'étude de Jonkman et Vrijling (2008), portant sur les crues s'étant produites entre 1975 et 2002, en différencie trois types : les crues éclair, les crues de rivières et les inondations pluviales.

Les plus meurtrières, proportionnellement au nombre de gens exposés, restent les crues éclairs. Nous pouvons citer, pour illustrer ce constat, les crues de l'Ouvèze en 1992 (37 décès et 4 disparus) (Wikipedia 2013a), l'Aude en 1999 (35 décès et un disparu) (Lefrou et al. 2000), et plus récemment la Nartuby en 2010 (26 décès et 1 non officiel) (Rouzeau et al. 2010). Toutes ces crues se sont déroulées sur de petits bassins versants (inférieure à 1000 km² et même à 100 km²), souvent en dehors des réseaux réglementaires surveillés par les autorités nationales (Rico et al. 2001; Gaume et Borga 2013).

Conscients des dangers encourus par les populations en relation avec ces événements exceptionnels, le gouvernement a transformé le paysage de la prévision des crues en 2003, avec l'instauration des Services de Prévision des Crues (SPC) et du Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI). Parallèlement à ces évolutions, plusieurs projets ont été menés afin d'améliorer les systèmes d'anticipations de crues. Notons par exemple le projet CRISTAL (<http://www.irstea.fr/la-recherche/unites-de-recherche/ohax/hydrologie/cristal/>) qui a élaboré un système d'anticipation de crues éclair, à l'aide des mesures de précipitations obtenues par les radars en bande X. Ou encore le projet européen IMPRINTS (<http://www.imprints-fp7.eu/>) qui s'est focalisé sur la réalisation d'une plateforme de prévision des crues éclair et des laves torrentielles à l'échelle européenne, en se basant sur les prévisions d'ensemble. Enfin plus récemment, le projet RHYTMME (<http://rhytmme.irstea.fr/>), dans lequel cette thèse s'inscrit, se focalise sur les risques naturels en montagnes, dont les crues rapides, au travers du développement d'un réseau de radars en bande X et d'une plateforme multiservices surveillant en temps réel les bassins versants non-jaugés.

Projet RHYTMME

Lancé par Météo-France et IRSTEA, le projet a pour but de mieux faire face aux risques hydrométéorologiques (Mériaux et al. 2011). Financé par l'Europe, le ministère du développement durable et le conseil régional de la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur, il a pour cadre cette région, et plus particulièrement les 3 départements montagneux (Alpes-de-Haute-Provence, Hautes-Alpes et Alpes-Maritimes). Ses principaux objectifs sont :

- de développer un réseau de radar propre aux Alpes du Sud et
- d'élaborer une plateforme en temps réel sur les risques naturels.

Dans le cadre de ce projet, trois radars ont donc été installés entre 2011 et 2013, venant appuyer un autre radar en bande X, installé lors d'un projet précédent (CRISTAL/HYDRIX) (Figure 1). Les radars en bande X ont été préférés aux radars classiques (en bande S et C) car ils sont de plus petite taille et nécessitent donc une infrastructure moins lourde.

La plateforme, en cours de développement, avertira les régions montagneuses des risques naturels (feux de forêt, avalanches, crues éclair, glissements de terrain, chutes de blocs et laves torrentielles). Météo-France se charge de la prévision des pluies et IRSTEA, de celle des aléas. La **méthode AIGA**, développée à Aix-en-Provence depuis une décennie, a été améliorée, au cours de cette thèse, afin de répondre aux défis soulevés par les crues éclair en montagne.

Pour évaluer cette plateforme, le projet s'est entouré d'un club-utilisateur qui relève les dégâts, testant ainsi la plateforme en temps réel. Cette démarche s'inspire à la fois de celle développée par HYDRATE et de l'élaboration d'une base de données de dégâts comme dans le projet SHAVE (Gourley et al. 2010; Defrance et al. 2012; Gourley et al. 2013; Javelle et al. 2013a).

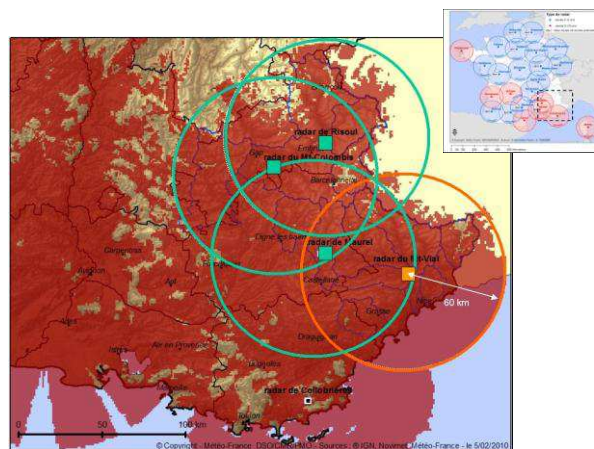


Figure 1 - Développement du réseau de radars en bande X de RHYTMME. En rouge, le radar HYDRIX du projet CRISTAL et en vert, ceux de RHYTMME.

La méthode AIGA

La méthode AIGA (« Adaptation d'Information Géographique pour l'Alerte en crue ») a été développée par IRSTEA, au centre d'Aix-en-Provence, depuis l'an 2000, pour anticiper la survenue de crues éclair sur les bassins non-jaugés (Lavabre et Gregoris 2006). Opérationnelle dans les Services de Prévision des Crues (SPC) de Méditerranée-Est, Grand Delta et Méditerranée-Ouest ainsi que dans la plateforme multirisque du projet RHYTMME, son objectif est de localiser les crues et d'évaluer leur dangerosité en termes de périodes de retour sur des bassins non-jaugés. Pour cela, elle s'appuie sur des précipitations, estimées en temps réel par le réseau de radars météorologiques de Météo-France. Un couplage entre un modèle hydrologique continu pour estimer l'humidité des sols et un modèle événementiel pour simuler les crues transforme les estimations de pluies en débits. Ceux-ci sont alors quantifiés en termes de périodes de retour (2, 10 et 50 ans) à l'aide des quantiles de crues de référence obtenus à l'aide d'un modèle stochastique (Figure 2).

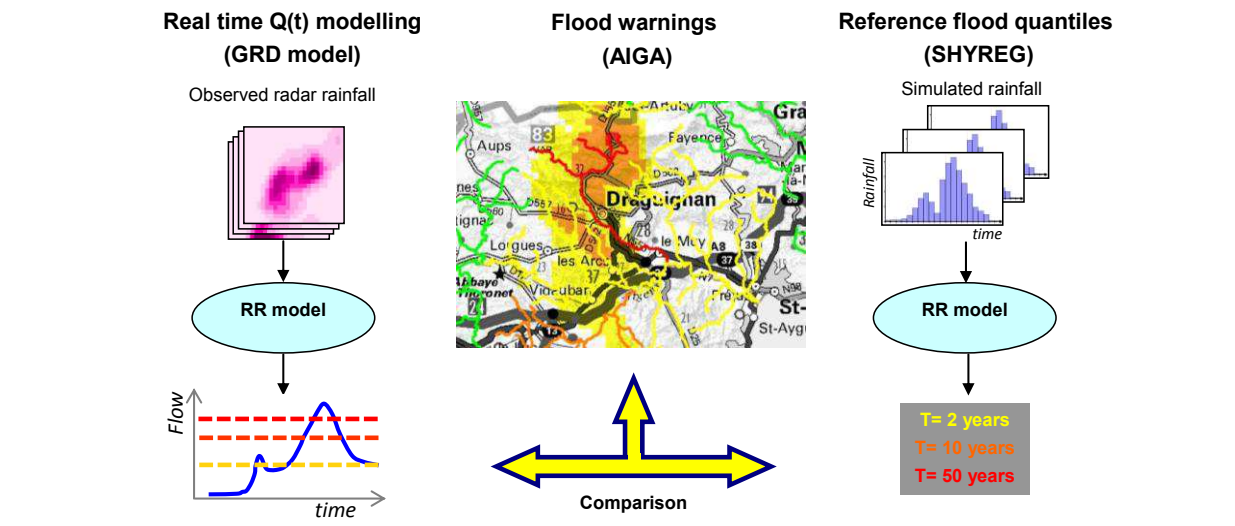


Figure 2 - Schéma de fonctionnement de la méthode AIGA, couplant un modèle de simulation en temps réel à un modèle stochastique fournissant les quantiles de référence. Les couleurs représentent la dangerosité selon les périodes de retour (2 ans : jaune, 10 ans : orange et 50 ans : rouge) (Javelle et al. accepté)

La méthode ayant été développée spécifiquement pour le pourtour méditerranéen et les bassins non-jaugés, son utilisation en zones montagneuses génère plusieurs difficultés. Tout d'abord, la région originelle autorise des simplifications sur le modèle, comme la non-prise en compte de la neige, ce qui ne serait pas le cas sur des bassins de montagne. Ensuite, l'élaboration et l'évaluation de cette méthode ont été réalisées sur des bassins versants jaugés d'une taille supérieure à ceux sujets aux crues éclair (classiquement inférieure à 100 km²). Découlant de ce constat, nous pouvons signaler les deux principaux problèmes à résoudre, qui sont aussi les objectifs de cette thèse :

- l'adaptation aux régions montagneuses ;
- l'évaluation sur de très petits bassins versants.

Objectifs de la thèse

Comme le précise Klemeš (1990), la complexité propre à l'hydrologie en montagne, fait d'elle l'ultime challenge en ce domaine. Sont en cause la difficulté d'accès, notamment lors des mesures, et la faible précision des mesures, à cause du terrain. Klemeš souligne par ailleurs la présence de phénomènes à ne pas sous-estimer, comme la neige qui joue un rôle prépondérant. De plus, peu de données débitométriques et pluviométriques sont disponibles, rendant le travail de l'hydrologue compliqué.

Partant de la méthode AIGA, disponible sur la plateforme du projet RHYTMME, il faut parvenir à adapter son modèle hydrologique au contexte montagneux et à ses difficultés. Tout en se satisfaisant de données de précipitations imparfaites, à cause du manque de pluviomètres en altitude et de la forte variabilité des pluies, nous devons complexifier le modèle en intégrant la neige et l'évaluer dans un milieu où peu de bassins disposent de données débitométriques. La thèse cherche à répondre à ces deux enjeux.

Le **premier objectif** est d'adapter AIGA aux zones montagneuses, en se focalisant sur le modèle hydrologique, et en ne s'intéressant ni à l'amélioration des quantiles, fournis par SHYREG, ni à celle des précipitations. Dans un premier temps, le modèle actuel est modifié, afin d'intégrer les phénomènes montagnards (la neige et sa fonte) et d'améliorer la simulation des débits. Puis, la régionalisation du modèle est effectuée pour fonctionner sur des bassins non-jaugés. A ce stade, il s'agit d'une évaluation en non-jaugé classique, qui considère les bassins jaugés comme étant des non-jaugés, ce qui implique de travailler sur de grands bassins et non les petits (entre 5 et 100 km²), qui sont sujets aux crues éclair.

En **second objectif**, il s'agit de développer une technique d'évaluation du modèle sur de véritables bassins versants non-jaugés. S'il est relativement facile d'estimer les performances d'un modèle hydrologique sur des bassins versants dont les débits sont renseignés, la tâche devient ardue sur de petits bassins de quelques km². Sur ces derniers, l'évaluation repose soit sur des relevés post-catastrophes (post-événements), à l'exemple de l'Aude (Gaume et al. 2004) ou de la Nartuby (Javelle et al. 2013b; Javelle et al. accepté), soit sur des bases de données de dégâts. Cette dernière technique est utilisée par plusieurs études. Citons par exemple celles de Calianno et al. (2013) utilisant la base de données « The Severe Hazards Analysis and Verification Experiment » (SHAVE) aux Etats-Unis, ou celles de Naulin et al. (2013) se basant sur les coupures de routes dans le département du Gard. Pour notre part, nous disposons d'une base de données de dégâts, fournie par les services de Restauration des Terrains en Montagne (RTM), seulement composée d'informations indirectes (dégâts). Ce second objectif constitue l'aspect original de cette thèse.

Afin de réaliser les deux objectifs de thèse, le manuscrit est divisé en 7 chapitres présentés ci-dessous.

Plan de thèse

Dans le **chapitre 1**, les crues éclair sont décryptées, en se focalisant sur les mécanismes de leur genèse et la description des bassins versants sur lesquels elles se produisent. Une fois cette information connue, nous présentons les outils nécessaires pour s'en prémunir, notamment les systèmes d'alerte de crues utilisés aux Etats-Unis et en Europe. C'est également dans ce chapitre que sont mis en évidence les problèmes d'évaluation des modèles hydrologiques sur les bassins non-jaugés. A la fin de ce chapitre, sont précisément définis le contexte de la thèse ainsi que les bases nécessaires aux travaux de recherche.

Ensuite, le **chapitre 2** présente le domaine d'étude de la thèse, constitué d'une part, des départements où fonctionne déjà la plateforme du projet RHYTMME et d'autre part, de départements supplémentaires formant un échantillon de bassins versants plus conséquent, s'étendant jusqu'en Haute-Savoie. Ce jeu de bassins versants jaugés, nécessaire à l'élaboration du modèle hydrologique, est présenté avec un second échantillon de bassins non-jaugés provenant de la base de données de dégâts des services de Restauration des Terrains en Montagnes (RTM). Ces deux échantillons sont ensuite caractérisés par des variables géomorphologiques et hydro-climatiques. Finalement, les données climatiques (précipitations, neige, ETP, etc.) essentielles au développement des nouveaux modèles sont décrites.

Le **chapitre 3** établit les bases du travail de recherche, en présentant le fonctionnement du modèle événementiel actuellement utilisé par la méthode AIGA, suivi du nouveau modèle hydrologique continu et un module de fonte de neige. Le premier permet de connaître en continu l'état des bassins versants (humidité et débits journaliers) et le second fournit la dynamique nivale, importante pour les bassins de montagne. Cette présentation s'achève par la proposition de quatre couplages, proposés durant la thèse, entre le modèle événementiel, le modèle continu et le module de fonte de neige. Le chapitre se clôt sur la méthodologie et la description des différentes étapes d'amélioration et d'évaluation, orchestrées pendant la thèse, pour obtenir le meilleur couplage possible.

Le **chapitre 4** est le point de départ des travaux, nous nous concentrons sur le premier objectif de la thèse (l'élaboration d'un meilleur modèle). Cette étape s'effectue sur des bassins jaugés, en calant localement les paramètres afin de sélectionner le meilleur modèle. Les différentes techniques de couplage sont précisées dans ce chapitre. L'analyse des résultats présente l'intérêt des divers modules employés et sélectionne le meilleur couplage, qui sera régionalisé par la suite. Durant ce chapitre, les pistes d'améliorations et les limites liées à la modélisation choisie sont également évoquées.

La seconde partie du premier objectif de la thèse est achevée dans le **chapitre 5**. Le meilleur couplage entre les modèles événementielles et continu de l'étape local est alors régionalisé. Pour obtenir les meilleures performances, différentes techniques sont testées, toujours sur l'échantillon de bassins jaugés considérés ici comme non-jaugés, afin de déterminer la meilleure méthode de régionalisation. Tout en discutant sur les limites de ce choix, les perspectives d'améliorations sont évoquées et les résultats du nouveau couplage sont comparés au couplage de la méthode AIGA actuellement utilisée.

Pour les deux derniers chapitres de la thèse, le second échantillon renfermant les véritables bassins non-jaugés est utilisé. En vue de réaliser le second objectif de la thèse, une méthode d'évaluation des modèles hydrologiques, à partir de relevés de dégâts, est développée dans le **chapitre 6**. Par la suite, nous confrontons pour la première fois le nouveau et l'ancien couplage sur de petits bassins sujets aux crues éclair, afin de confirmer les améliorations apportées lors du développement de la nouvelle version de la méthode AIGA.

Au dernier **chapitre 7**, les données de dégâts sont directement utilisées dans le calage du modèle, afin d'obtenir de meilleures performances en mode véritablement non jaugé et de ne plus dépendre uniquement des bassins jaugés. Ce chapitre se clôture sur la comparaison des performances et des gains de cette nouvelle méthode avec ceux d'un modèle régionalisé classiquement, sur la base de bassins jaugés. Nous terminons ce manuscrit en désignant les principaux problèmes du nouveau couplage et en présentant des pistes d'améliorations.

Chapitre I : Comment anticiper les crues éclair ?

Qu'est-ce qu'une crue éclair ?

Quels sont les systèmes d'anticipation de crues ?

Comment évaluer ces systèmes ?

Le 15 juin 2010, un violent orage éclate sur la Nartuby et le Réal, des affluents de l'Argens, provoquant une crue soudaine et violente où sont dénombrées 26 victimes et une non-officielle. Lors de l'événement, des cumuls de pluie supérieurs à 300 mm ont été observés sur des superficies de 100 km², avec un maximum ponctuel de 456 mm à Lorgues (83) (Martin 2010).

Un épisode tout aussi catastrophique avait eu lieu le 6 juillet 1827 à Draguignan. Les crues éclair ne sont donc pas un phénomène récent, ni exceptionnel. Les monographies et études sont nombreuses sur ce sujet (par exemple Gaume et al. 2004; Ruiz-Villanueva et al. 2012; Yamakoshi et al. 2012). Par contre, à cause du développement économique et social bouleversant l'occupation des sols (Marchi et al. 2010; Hapuarachchi et al. 2011), de plus en plus de personnes sont touchées par ce type d'événement.

Pour se prémunir face à ces phénomènes, plusieurs systèmes d'anticipation des crues ont été développés comme la FFG aux Etats-Unis et Vigicrue en France. Cependant, le plus souvent, ces systèmes ne couvrent que les cours d'eau importants, peu sujets aux crues éclair.

Dans ce chapitre, nous abordons d'abord les enjeux sociétaux des crues éclair et leur nécessaire étude pluridisciplinaire. Puis, nous tentons de définir ces crues pour les étudier à l'échelle de l'Europe et du bassin versant. Enfin, nous nous intéressons aux limites de l'hydrologie classique vis-à-vis des crues éclair. Cette partie se conclut sur une tentative de définition de la crue éclair.

Ensuite, sont abordées les difficultés liées aux mesures des précipitations, ainsi que l'anticipation qu'elles permettent. La modélisation hydrologique et quelques exemples de systèmes d'anticipation de crues employés actuellement dans le monde sont présentés. Finalement les techniques existantes pour évaluer les modèles hydrologiques sur des bassins non-jaugés sont présentées.

1 Les crues éclair

1.1 Par delà l'hydrologie, la nécessité d'une approche pluridisciplinaire

Les enjeux humains, économiques et scientifiques des crues éclair dépassent le champ thématique de l'hydrologie et concernent plusieurs disciplines. Les scientifiques scrutent leurs caractéristiques exceptionnelles et tentent de les prévoir, les économistes examinent les pertes subies et les sociologues et psychologues se penchent sur la réaction des victimes et leurs traumatismes. Alors que les hydrologues recherchent à améliorer les modèles et les outils de mesure pour mieux prévoir ces événements, les historiens et les sociologues analysent le risque comme une « construction sociale ». Certains auteurs tentent, au sein d'une approche pluridisciplinaire, d'associer l'analyse de la génération d'une crue éclair à celle des réactions humaines (Creutin et al. 2013; Ruin et al. 2013).

Pour étudier les crues éclair, on ne peut pas faire abstraction du facteur humain : « Une catastrophe naturelle se produisant où il n'y a personne n'est pas un désastre » (Creutin et al. 2013). Développer des outils d'anticipation permet de minimiser le risque humain et matériel, mais pas d'empêcher l'augmentation du débit d'une rivière. De plus, il est inconcevable de protéger toutes les populations à l'aide de digues (Creutin et al. 2009). Par exemple, en 2002, lors de la crue du Gard, la moitié des décès a eu lieu dans des bassins de moins de 10 km², sur des routes secondaires et dans des campings (Ruin et al. 2008). Un système d'anticipation doit donc permettre aux autorités d'avoir assez de temps pour évacuer et mettre à l'abri les habitants. Pour estimer ce délai, l'hydrologue intègre d'une part des recherches sociologiques portant sur les réactions des communautés et des individus pendant les catastrophes naturelles (Ruin et al. 2008; Creutin et al. 2013; Ruin et al. 2013) et d'autre part, le temps de réaction du bassin versant.

Pour connaître ce temps de réaction et développer un système d'anticipation de crues éclair adéquat, il faut donc commencer par définir ce qu'est une crue éclair. Ses mécanismes de genèse ainsi que les bassins versants où elle se déroule sont dès lors le point de départ des travaux relatés dans ce manuscrit.

1.2 Tentatives de définition d'une crue éclair

1.2.1 Par l'UNESCO

Ce phénomène est défini, à l'échelle mondiale en 1974 par l'AISH – UNESCO-WMO : «*Ce sont des crues dont l'apparition est soudaine, souvent difficilement prévisible, de temps de montée rapide et de débit spécifique relativement important. Ces crues éclair sont donc généralement liées à des épisodes pluvieux intenses et se manifestent souvent sur des bassins de taille modérée.*» (relevé dans Gaume 2002). Cette vague définition est notamment complétée par des travaux réalisés au sein du projet HYDRATE (<http://www.hydrate.tesaf.unipd.it/>). Différentes définitions à caractère « opérationnel » ont également été développées et sont présentés dans les paragraphes suivants.

1.2.2 Par le National Weather Service

Le National Weather Service, service gouvernemental américain chargé de la recherche sur les phénomènes atmosphériques et la prévision des crues définit ainsi les crues éclair :

« Un débit rapide et extrême de hautes eaux dans une région normalement sèche, ou une augmentation rapide du niveau de l'eau dans un torrent ou un ruisseau supérieur à un niveau de crue prédéterminé commençant dans les 6 heures suivant l'événement déclencheur (pluies intenses, rupture de digue ou de barrage, embâcle de glace) » (Gourley et al. 2011).

Ce seuil de 6h détermine quels services du NWS prennent en charge l'événement : en dessous du seuil, une alerte locale est lancée par les « Weather Forecast Offices » (services de la météorologie) et au-dessus, les River Forecast Centers (équivalents des Services de Prévision des Crues) sont responsables du suivi.

1.2.3 Par le SCHAPI

En France, le SCHAPI différencie deux types de crues au temps de réponse très courts. Premièrement, il y a la crue éclair qui se produit sur les bassins versants en moins de 2 heures comme cela se produit sur le Gardon d'Anduze. Pour des temps de réponses plus long, le SCHAPI utilise le terme de crue soudaine qui se définit comme suit :

« Des crues survenant sur des bassins versants dont le temps de réponse se situe entre 2 heures (délai en deçà duquel seuls des dispositifs locaux très spécifiques permettent une anticipation) et une demi-douzaine d'heures (délai au-delà duquel on entre dans le champ de la prévision des crues classique) » (Ministère de l'Écologie 2011)

Par la suite dans cette thèse, nous ne feront pas de discernements entre crues éclair et soudaine. Nous utiliserons pour les deux phénomènes l'appellation « crue éclair » étant plus proche du mot utilisé en anglais par la communauté scientifique : « Flash flood ».

Comme le montrent les deux exemples ci-dessus, l'organisation des services administratifs et les systèmes d'alerte utilisés orientent la définition d'une crue éclair sans inclure les caractéristiques spécifiques des bassins versants ni leur localisation. Ces deux informations sont cependant essentielles pour obtenir une bonne modélisation hydrologique. Cette autre approche de la définition est présentée ci-dessous à travers une analyse à l'échelle du continent européen, mais également à l'échelle du bassin, afin de parvenir à définir de la manière la plus précise possible les crues éclair.

1.3 Les crues éclair, à l'échelle du bassin versant

L'étude des crues éclair à échelle plus fine, le bassin versant, a été réalisée par plusieurs groupes de chercheurs. Le projet HYDRATE, composé de 17 équipes de chercheurs européens ainsi que de trois partenaires des Etats-Unis, du Japon et d'Afrique du Sud, synthétise une bonne partie de tous ces travaux. Sur une base de 578 crues européennes, ont pu être déterminées certaines caractéristiques communes aux crues éclair (Gaume et al. 2009; Marchi et al. 2010; Borga et al. 2011; Creutin et al. 2013; Gaume et Borga 2013).

1.3.1 Caractéristiques

Débits de pointe

Les crues éclair sont exceptionnelles en termes de débit. Quand on calcule le rapport entre le débit moyen annuel et le volume total écoulé en crue, ces valeurs sont beaucoup plus élevées que pour d'autres types de crues (Merz et Blöschl 2003).

Les débits spécifiques des crues éclair peuvent atteindre des valeurs élevées à cause des conditions climatiques et de la superficie réduite des bassins versants touchés par les orages. La taille du bassin augmentant, l'abattement des pluies croît et les phénomènes hydrauliques changent. La Figure 3 compile différents travaux de recherches sur les crues éclair, dont le projet HYDRATE et la crue du 15 juin 2010 dans le département du Var (Gaume et Borga 2013). Le résultat montre que les débits spécifiques les plus élevés sont atteints par les bassins les plus petits. À l'échelle européenne (Figure 4) les débits spécifiques les plus forts se retrouvent en Espagne, en Italie et dans le sud de la France.

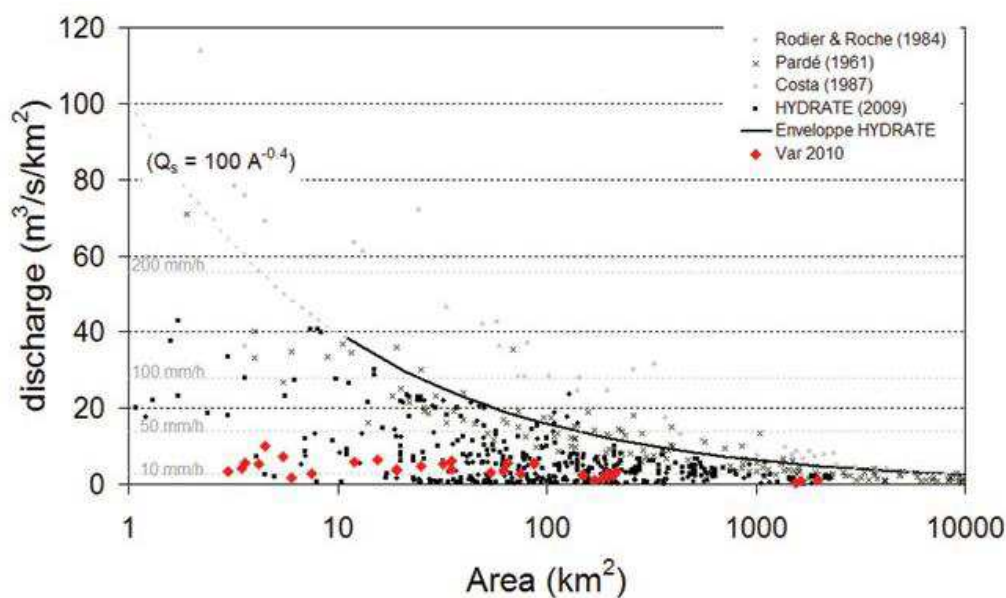


Figure 3 - Inventaire des débits de crues éclair exceptionnelles répertoriées dans le cadre du projet HYDRATE, avec la courbe enveloppe correspondante, et ceux atteints lors de la crue éclair de l'Argens et de ses affluents (juin 2010), en fonction de la taille des bassins versants (d'après Gaume et Borga 2013).

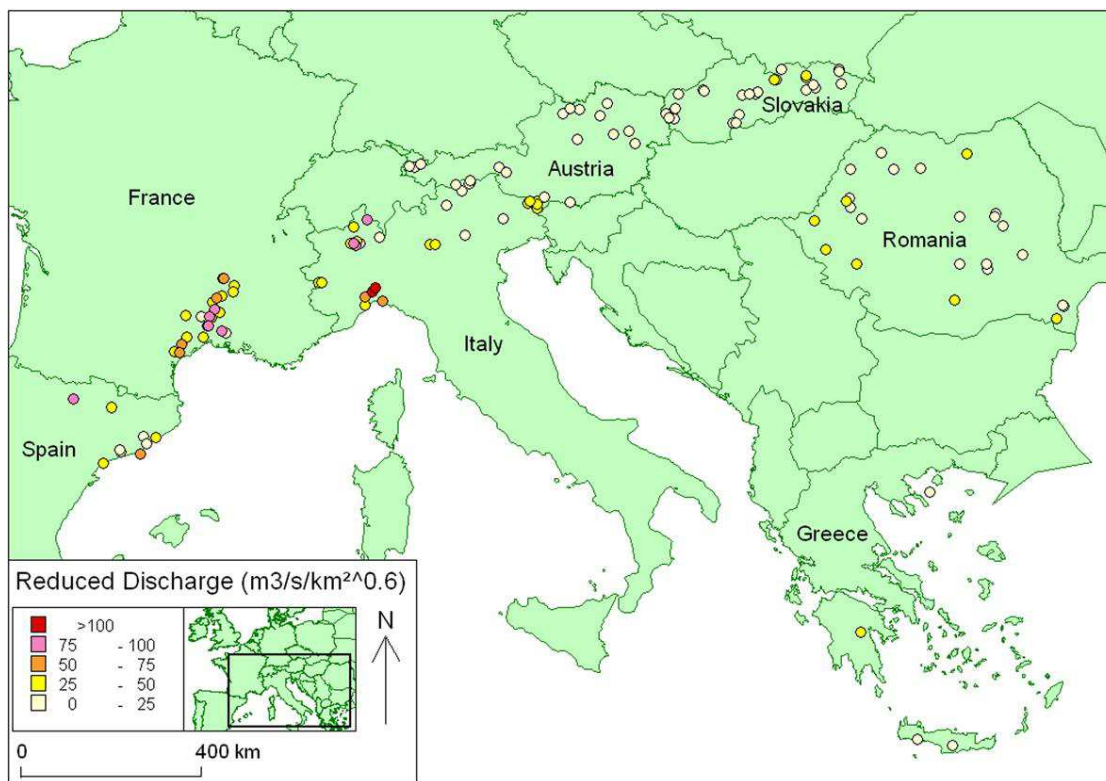


Figure 4 - Carte des débits spécifiques des crues éclair en Europe. (Gaume et Borga 2013)

Le temps de réponse

Le temps de réponse est une des caractéristiques des bassins versants et se définit comme étant le temps qu'il faut pour que la pluie arrive à l'exutoire. Il s'obtient en calculant le temps écoulé entre l'intensité maximale de l'averse et le débit maximum de la crue. Diverses études essaient de déterminer quel est le temps de réponse d'une crue éclair. Celui-ci varie de quelques minutes à quelques heures suivant les auteurs (Merz et Blöschl 2003; Creutin et al. 2009; Marchi et al. 2010; Gourley et al. 2011). Il dépend de la taille des bassins : de quelques minutes pour un bassin d'un kilomètre carré à plusieurs heures pour des bassins de quelques centaines de kilomètres carrés. Cependant, à partir d'une certaine superficie (350 km² chez Marchi, Borga et al.(2010) et 260 km² chez Davis (1998) (Hapuarachchi et al. 2011)), il y a une cassure dans la courbe reliant la superficie et le temps de réponse, qui augmente alors beaucoup plus vite à partir de cette limite. Ce changement de comportement est dû au fait, qu'à partir de cette taille, les débits de la crue éclair sont supérieurs au débit toléré par le chenal de la rivière, provoquant ainsi des inondations de plaines. Celles-ci ralentissent dès lors la propagation de la crue, ce qui explique la montée plus rapide du temps de réponse.

Le temps de réponse est donc, pour les plus petits bassins, relativement courts ce qui implique d'obtenir des systèmes d'anticipation de crues éclair très réactifs. De tels systèmes se fondent sur des modèles hydrologiques pluie-débit, ou sur de simples alertes sur la pluie, utilisant soit l'estimation des pluies en temps réel soit des scénarios de pluies. Ces points seront abordés dans la section 2 de ce chapitre.

1.3.2 Les causes

Quand l'échantillon de crues éclair du projet HYDRATE est analysée, nous remarquons que tous les bassins concernés se situent dans une zone relativement montagneuse aux pentes non-négligeables (pouvant atteindre 0.1 [taux de relief obtenu à l'aide de la différence entre l'altitude maximum et minimum du bassin divisé par la longueur du chenal] (Marchi et al. 2010)). Le relief a en effet une influence sur les crues éclair au travers de deux mécanismes :

- En Autriche, Merz and Blöschl (2003) montrent que la génération d'orages dépend du climat et du relief. La présence de montagnes provoque un mouvement ascendant d'air chaud et humide qui rencontre l'air froid en altitude, ce qui déclenche alors un phénomène convectif assez puissant pour provoquer de fortes précipitations. Ce phénomène est auto-entretenu et peut rester plusieurs heures sur place.
- Les pentes favorisent une concentration rapide des écoulements responsables des débits de pointe élevés et d'un temps de réponse court.

Le développement géographique de ce type d'orage reste cependant relativement restreint. Il peut soit être isolé, limité à quelques kilomètres carrés, soit appartenir à un système convectif plus complexe de moyenne échelle (MCS, Mesoscale Convective System), couvrant une superficie de l'ordre de 1000 km² (Borga et al. 2008). Les MCS produisent des orages très variables dans le temps et dans l'espace (Creutin et al. 2009). Les cumuls et l'intensité des pluies peuvent donc être importants pour la genèse des crues éclair, la configuration du bassin versant amplifiant le phénomène.

Le cumul de l'événement

Les cumuls de pluie des orages peuvent être une des causes de la crue éclair. Cependant, contrairement à ce que l'on pourrait penser, le coefficient d'écoulement, pour une crue éclair, reste relativement faible. Dans la plupart des crues éclairs, l'eau s'est majoritairement infiltrée dans le sol. Ce n'est que lors d'événements de longue durée en région méditerranéenne, que ce coefficient peut atteindre des valeurs de 90% ; la capacité de stockage du bassin versant étant tout de même finie et se saturant petit à petit (Gaume et Borga 2013). Le volume d'eau produit pendant l'épisode orageux peut ainsi représenter jusqu'à 20% des pluies annuelles sur des bassins méditerranéens, entraînant des débits considérables (Marchi et al. 2010).

D'autres phénomènes que le cumul total de l'événement influencent donc la génération de crues éclair, tels que l'intensité de la pluie, la géomorphologie du bassin, et l'humidité des sols avant la crue qui peut se traduire par la présence d'un débit de base (Merz et Blöschl 2003; Marchi et al. 2010; Gaume et Borga 2013).

L'intensité des pluies

L'intensité des pluies a un rôle important lors de crues éclair. Une fois que l'intensité est supérieure à la capacité d'infiltration horaire du sol, l'eau ne peut plus que ruisseler et directement alimenter la crue.

La géomorphologie

Concernant la géomorphologie, un travail de laboratoire signale, quand les sols ne sont pas saturés, que les fortes pentes diminuent la capacité d'infiltration du sol et influencent le débit. Quand les sols sont saturés, la pente n'a plus qu'un effet négligeable sur l'infiltration et la capacité d'écoulement du bassin versant (Nassif et Wilson 1975).

Lors de l'étude de la crue du 23 août 2003 dans l'est des Alpes italiennes, Borga et al. (2007) montrent que d'autres facteurs que les précipitations pluviales influencent les crues éclair. Les caractéristiques géologiques de la région (type de roches, altération, fracture) expliqueraient la survenue de la crue. Gaume and Borga (2013) généralisent : pour les bassins karstiques ou avec un sous-sol fortement altéré, c'est le stockage de l'eau et l'écoulement souterrain qui déterminent principalement la réaction des bassins versants végétalisés. Par exemple, lors des crues du Gard en 2002, les bassins à fortes pentes, avec un substratum granitique et schisteux, fracturé et altéré, facilitant l'infiltration, ont réagi plus lentement que certains bassins situés sur des collines marno-calcaires.

L'humidité des sols et la neige

L'humidité des sols est un des processus aggravants. Un sol humide se sature plus vite, augmentant la possibilité de crues éclairs comme le montrent, par exemple, les études de Javelle et al. (2010b) et de Norbiato et al. (2008). Les travaux de Merz and Blöschl (2003) en Autriche prouvent que la fonte des neiges, une à deux semaines avant une crue éclair, a un rôle aussi influant que l'humidité des sols. Finalement, la présence de neige peut diminuer temporairement la capacité d'infiltration des sols et favoriser les écoulements.

Les débits de pointe de crues et le temps de réponse du bassin dépendent donc de l'intensité et du cumul des orages, des conditions climatiques antérieures (antécédents hydro-climatiques) mais également de la configuration des bassins versants.

1.3.3 Le cas des laves torrentielles

En plus d'avoir des temps de réponses courts et des débits de pointe importants, certains petits bassins versants aux pentes fortes, subissent des laves torrentielles. Ces dernières se produisent lors d'intempéries, suite à une quantité non-négligeable de sédiments mobilisables par le courant. Dans certains cas, la crue éclair se transforme en lave torrentielle, suite à une forte érosion due aux pluies. La concentration en sédiments augmente et peut atteindre 50% du volume ruisselé (Bertrand et al. 2013). Ce chargement en sédiments transforme la cinétique de l'événement dont les pics de « crue » sont supérieurs à ceux des crues éclairs sans présence de sédiments (Bertrand et al. 2013). Différentes études prouvent qu'il est possible de déterminer a priori quels sont les bassins sujets aux laves torrentielles parmi ceux subissant des crues éclairs, à l'aide de la pente et de

l'indice de Melton¹ (tenant compte de la rhéologie). Certains bassins de montagnes peuvent, pendant les crues éclair, être plus ou moins chargés en sédiment suivant les événements. Cela implique des mécanismes d'écoulement différents et nuit au fonctionnement du modèle hydrologique pluie-débit ne prenant pas en compte la présence de sédiments.

Les modèles hydrologiques développés dans cette thèse ne prendront pas en compte la présence de sédiments et se limiteront aux spécificités des crues éclair, définies dans la section 1.3, d'une part des bassins versants (superficie, pente) et d'autre part des crues éclair (débits spécifiques élevés, temps de réponse court, influence des états d'humidité des sols,...). En effet, la prise en compte de ces phénomènes nécessite le développement de modules spécifiques analysant la stabilité des roches, en complément des modèles hydrologiques (Lepore et al. 2013; Tao et Barros 2013b).

1.4 Les crues éclair, les limites de l'hydrologie classique

De par leur nature et leur localisation sur de petits bassins versants, les crues éclair sont difficilement observables par les réseaux de mesures classiques, soit car ils sont présents seulement sur les rivières principales, soit que ces phénomènes sont rarement observés (Creutin et Borga 2003). Ces petits bassins, souvent en tête de réseau et hors des tronçons réglementaires nationaux sont généralement non-jaugés. Un bassin versant non-jaugé est défini par l'AISH² comme étant « un bassin versant avec des enregistrements inadaptés (en termes de quantité ou de qualité) d'observations hydrologiques pour permettre un calcul de variables hydrologiques à une échelle spatiale ou temporelle appropriée et avec une précision acceptable pour des applications pratiques. » (Sivapalan et al. 2003)

La majorité des bassins versants dans le monde sont dans ce cas de figure. Malgré l'évolution des réseaux, l'AISH signale, cependant, que dans certains pays, le réseau de mesure est en déclin, augmentant ainsi le nombre de bassins versants non-jaugés (Sivapalan et al. 2003). Pour les pays dits développés, ayant des réseaux de mesures importants, les rivières non-jaugées restent majoritaires. Par exemple, en France, sur 120 000 km de cours d'eau de plus de 1 m de large, seulement 20800 km étaient surveillés réglementairement en 2011 (22000 en 2013) par l'Etat (réseau SCHAPI/SPC) (Ministère de l'Écologie 2011). En analysant la superficie des bassins versants jaugés disponibles dans la banque HYDRO pour toute la France, il apparaît que sur près de 3500 bassins, 2450 ont une superficie inférieure à 1000 km², représentant 54% du territoire, 1025 bassins sont inférieurs à 100 km² et seulement 150 inférieures à 10 km². Les bassins jaugés sont donc rarement de petits bassins sujets aux crues éclair, ce qui rend compliqué l'étude du phénomène. Consciente de ces problèmes, l'AISH a ouvert la décennie « Predictions in Ungauged Basins » (PUB) (2003-2012) pour améliorer les connaissances sur les problématiques de l'hydrologie en contexte non-jaugé (Sivapalan et al. 2003).

La description précise des crues éclair permet de savoir qu'elles se produisent dans des conditions hydro-climatiques particulières sur de petits bassins versants, le plus souvent

¹ Indice de Melton : rapport entre le ratio de relief et la surface du bassin versant

² AISH : Association Internationale des Sciences Hydrologiques

non-jaugés. De plus quand ceux-ci sont jaugés, les données en crue sont souvent erronées (hors des courbes de tarage). Tout ceci rend difficile l'élaboration de systèmes d'anticipation de crues, nécessaires pourtant pour éviter des catastrophes. Ces systèmes existent cependant pour les bassins non-jaugés et s'appuient sur des mesures de précipitations récoltées en temps réel ou des scénarios de pluie. Leur fonctionnement, de la mesure des précipitations jusqu'à l'émission de l'alerte hydrologique, est abordé dans la section suivante.

1.5 Définition des crues éclair retenues

Les crues éclair sont des crues caractérisées par un temps de réponse inférieur à 6 heures et des débits spécifiques élevés. Elles se produisent sur des bassins versants de moins de 1000 km². Elles sont la conséquence d'orages qui peuvent s'avérer très intenses et de caractéristiques géomorphologiques favorisant une concentration rapide des écoulements. Pour pouvoir éviter les catastrophes liées à ce type de crues, des systèmes d'anticipation de crues doivent être mis en place en prenant en compte le fait que très peu de données sont disponibles pour leur développement ainsi que pour corriger d'éventuelle prévision à l'aide de données obtenues en temps réel.

Plusieurs travaux sur les processus générateurs de crues viennent compléter la définition de 1974 de l'AISH. La crue éclair est un phénomène provoqué par des pluies de courte durée (de l'ordre de 90 minutes), très intenses et principalement d'origine convective. Ces orages convectifs sont d'origine orographique et ont un développement surfacique limité, de l'ordre de 30 km². Le déplacement des précipitations est également restreint à cause du relief, ce qui amplifie localement le cumul de pluie. De ce fait, les bassins versants sujets aux crues éclair ont une taille inférieure à 1000 km² et un temps de réponse de quelques minutes à quelques heures. Localement, les pluies intenses dépassent la capacité d'infiltration directement liée à l'humidité et aux propriétés hydrauliques du sol. L'étude des phénomènes sur des bassins non-jaugés est nécessaire car les crues éclair apparaissent plus souvent sur ce type de bassin.

L'étude descriptive des crues éclair montre aussi l'extrême variabilité des configurations provoquant des ruissellements intenses. De façon qualitative nous entrevoyons les facteurs pouvant favoriser les crues éclairs (des petits bassins, plutôt pentus, soumis à des pluies extrêmes, parfois associées à des états de saturation, sur des bassins à géologie particulière...) mais de façon quantitative ces relations entre l'intensité de la crue et les facteurs déclencheurs sont loin d'être facilement déterminées. Les différentes études citées présentent des valeurs très variables autour d'ordre de grandeur. Cette extrême inconstance observée laisse entrevoir les difficultés auxquelles est confronté l'hydrologue pour estimer l'évolution des débits dans un cours d'eau.

2 Estimation des précipitations générant des crues éclair

Les orages générateurs de crues éclair étant très localisés, estimer leurs précipitations implique de bonnes résolutions temporelles et spatiales : ainsi Borga et al. (2008) estiment qu'une précision de 15 minutes et de 20-35 km² est nécessaire pour des bassins versants de 50 km². Pour ces événements, les pluviomètres ne sont pas adaptés. Leur champ d'application se porte sur des bassins d'une superficie minimale de 100 km², subissant des précipitations provoquées par des systèmes de fronts ou des phénomènes convectifs de moyenne échelle (MCS) (Figure 5). Dans le cas des orages plus petits, composés d'une cellule convective, il est souhaitable d'employer des mesures radar.

Dans la pratique, ces deux sources d'information (pluviomètres et données radars) sont souvent combinées afin de tirer le meilleur profit de ces deux sources de mesures complémentaires.

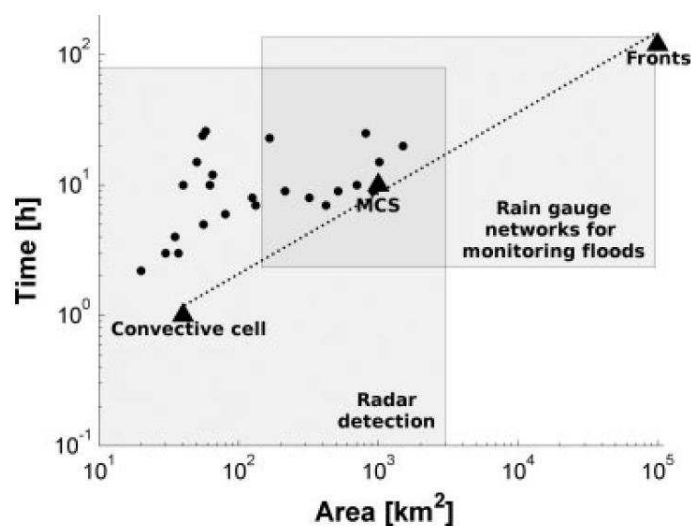


Figure 5 Durée d'épisodes orageux en fonction de leur déploiement surfacique. Les carrés représentent les champs d'utilisation des radars et des pluviomètres (Borga et al. 2008).

2.1 Les pluviomètres

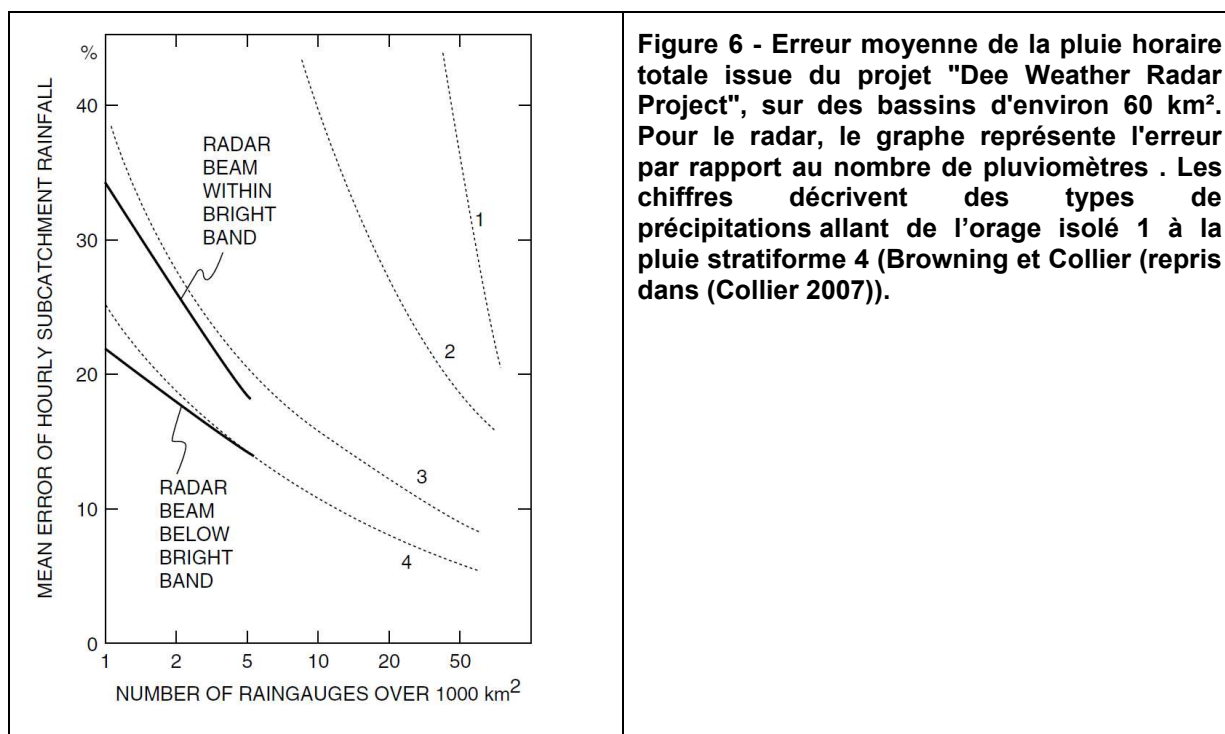
Les pluviomètres fournissent la donnée de pluie la plus précise mais seulement à l'endroit de la mesure. De ce fait, la connaissance spatiale de la pluie nécessite une extrapolation des mesures faites sur quelques centimètres carrés (Collier 2007; Liechti et al. 2013), ce qui pose un problème de représentativité lorsque la variabilité spatiale des précipitations est forte, comme c'est le cas des orages générateurs de crues éclair (Liechti et al. 2013).

Les pluies localisées sont souvent des sources d'erreurs plus ou moins importantes, suivant qu'elles proviennent de précipitations stratiformes ou d'orages isolés (Browning et Collier (repris dans (Collier 2007)). Une étude britannique (Figure 6) a démontré que, malgré une densité élevée de pluviomètres (>50 sur 1000 km²), l'erreur reste conséquente, dans le cas d'orages très isolés, ce qui est très problématique pour l'hydrologue. De plus, la précision de la représentation spatiale décroît à mesure que les pluviomètres sont moins

nombreux. Cette erreur a cependant une influence différente que l'on soit sur des grands ou des petits bassins ; ces derniers étant plus sensibles aux incertitudes provenant de l'estimation des pluies obtenue par les pluviomètres (Arnaud et al. 2011).

Les crues éclair pouvant se dérouler dans des zones avec des reliefs prononcés, il faut ajouter aux problèmes précédemment énoncés, des difficultés, décrites par les thèses de Gottardi (2009) et de Valéry (2010), quant à l'estimation des pluies en montagne par les pluviomètres en raison :

- du manque de données provenant des postes pluviographiques. Dès 2000 m, ils sont inexistant ;
- de l'existence d'un gradient altitudinal sur les pluies, plus négligeable lors d'orages ;
- de la forte variabilité des pluies ;
- de l'impact non-négligeable de la neige sur les mesures ;
- de l'influence des types de temps sur les pluies.



2.2 Les radars

Pour pallier les problèmes de l'utilisation des pluviomètres, un nouveau type de mesures est présenté dans ce paragraphe. Cette deuxième méthode conventionnelle d'estimation des précipitations se fonde sur la mesure radar, ancienne, mais dont l'utilisation à des fins hydrologiques, en France, est bien plus récente ; dans les Cévennes, les études sur les crues éclair intégrant la technologie des radars, datent de 1997 (Andrieu et al. 1997; Creutin et al. 1997).

Cette technologie offre une meilleure information spatiale et temporelle des précipitations, surtout à pas de temps fin, en comblant les lacunes des réseaux de

pluviomètres au sol (Borga 2002). Cependant, cette mesure indirecte (via la réflectivité) reste imprécise pour l'estimation des cumuls de précipitations, posant des problèmes de sous-estimation, que n'ont pas les pluviomètres, malgré le recalibrage des radars à l'aide des réseaux au sol. Ces problèmes sont analysés dans de nombreuses études (Tabary et al. 2007; Diss 2009; Hapuarachchi et al. 2011; Tao et Barros 2013a). Ces sous-estimations deviennent vraiment significatives lors d'orages convectifs, où des extinctions du signal peuvent se produire. La présence de masque (orographique ou anthropique) rend également la mesure obsolète dans certains cas.

Si des progrès manifestes ont été accomplis, tels que l'intégration des mesures au sol pour corriger des biais ou l'utilisation de différents types de radars (selon leurs longueurs d'onde ou la bipolarisation), la comparaison avec le réseau au sol témoigne toujours de divergences (Bachoc et al. 2011). De plus, les techniques de corrections peuvent dépendre du nombre de pluviomètres disponibles, limitant ainsi ce procédé aux zones couvertes par un réseau dense (Tao et Barros 2013a). Son fonctionnement complexe et les problèmes inhérents à la technologie sont décrits dans la partie suivante, ainsi que les trois types de radars météorologiques déployés par les réseaux nationaux, auxquels sont associés les type de phénomènes pour lesquels ils sont prioritairement développés (pluie stratiforme, orage...).

2.2.1 Fonctionnement

Le radar météorologique fonctionne comme tout autre radar : une onde électromagnétique est émise puis absorbée, diffusée et réfléchi par les hydrométéores (Figure 7). La partie rétrodiffusée (appelée réflectivité, notée Z) vers le radar est alors mesurée, correspondant à la somme des contributions de chaque hydrométéore et transformée en un volume d'eau (R) suivant une loi ($Z=200 R^{1.6}$, Marshall Palmer) (Collier 2007; Diss et al. 2009). Afin d'estimer la quantité d'eau totale, le radar effectue plusieurs tours complets avec des angles d'élévation différents compris entre 0° et 5° . Par exemple pour le radar de Collobrières (Var) les valeurs s'échelonnent entre 0.4° et 3.6° . Pour diminuer les erreurs au préalable, la détection d'échos fixes (réflexions liées au sol et aux bâtiments) est calculée ainsi que les profils de l'atmosphère pour estimer l'atténuation du signal (Tabary 2007).

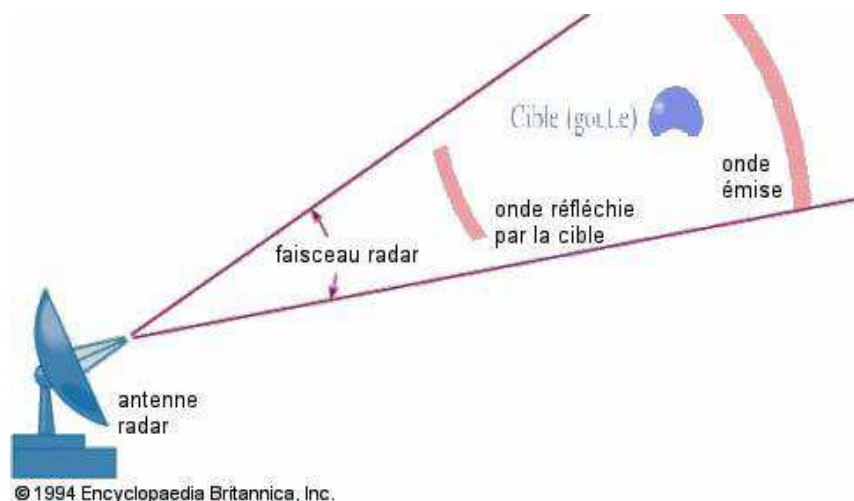


Figure 7 - Fonctionnement d'un radar météorologique (source : *Encyclopedia Britannica*).

Pour perfectionner l'estimation de la lame d'eau, certains radars ont recours à la technologie dite Doppler, améliorant ainsi la connaissance de la vitesse des hydrométéores, tandis que d'autres sont polarimétriques. Depuis 20 ans, ces radars émettent et reçoivent des ondes polarisées horizontalement et verticalement, améliorant ainsi la compréhension de certaines caractéristiques physiques des milieux traversés, qu'il s'agisse de différencier le sol des hydrométéores, de déterminer la phase liquide ou solide de ces derniers ou d'identifier les régions où les ondes sont atténuées... (Collier 2007; Diss et al. 2009).

Malgré les améliorations acquises par la technologie Doppler et la polarimétrisation, la mesure de la réflectivité demeure complexe et potentiellement porteuse d'erreurs, qui se traduisent par une mauvaise estimation de la pluie, et peuvent notamment découler :

- de problèmes de bande brillante et de neige, liés à des tirs de radar en altitude ou à certaines saisons ;
- de difficultés sur la calibration de la mesure Z ;
- d'erreurs sur la loi Z-R, pouvant être recalée avec des mesures au sol ;
- de la forte atténuation du signal ;
- des échos fixes et au sol (bâtiments, éoliennes, etc.) ;
- des masques orographiques (Andrieu et al. 1997; Borga 2002; Diss 2009; Tao et Barros 2013a).

2.2.2 Types de radar et leurs avantages

En météorologie, les réseaux nationaux sont couverts par trois types de radars (Tableau 1), qui se différencient par leur utilisation, leur longueur d'onde et leur rayon d'action. Plus la longueur d'onde est petite, plus elle s'atténue rapidement, rendant difficile l'identification d'événements météorologiques tels que les pluies intenses. *A contrario*, plus elle est grande, plus le diamètre de l'antenne est important, occasionnant des coûts supplémentaires lors de la construction. Selon la région d'installation et le coût, le type de radar privilégié diffère. Le rayon d'action des radars, employés à des fins hydrologiques, est compris entre 60 et 120 km. De plus, une bonne couverture de l'ensemble du pays, ne peut se faire sans un réseau dense (Llasat et al. 2009).

De ces trois types, les radars en bande C sont utilisés pour détecter les pluies stratiformes, dans un rayon de 100 à 120 km. L'intégration des mesures polarimétriques a démontré qu'ils ne peuvent estimer correctement les orages convectifs, étant plus sujet à l'atténuation que les radars en bande S. Ces radars sont majoritaires au sein des réseaux européens et canadiens (Parent du Chatelet 2003).

Les radars en bande S sont plus adaptés aux pluies intenses et à la détection des tornades, sur une région d'action similaire à celle des radars en bande C. Leur longueur d'onde est comprise entre 7.5 cm et 15 cm, ce qui nécessite des antennes de 6 m de diamètre. Ces radars sont fort utilisés aux Etats-Unis (NEXRAD) et, doublement polarisés, améliorent la précision des données de précipitations (Tao et Barros 2013a).

Les radars en bande X, dernière génération de radars, se caractérisent par de courtes longueurs d'ondes, entre 2.5 et 3.75 cm. Le diamètre des antennes étant moindre (moins de 2 m), l'installation est d'autant plus aisée en montagne. Les améliorations d'algorithmes, comme ZPHI®, les rendent opérationnels pour la détection de pluies intenses. Malgré tout, leur rayon d'action reste compris entre 60 et 80 km car ils sont sujets à de fortes atténuations, supérieures aux radars en bandes C et S (Diss et al. 2009).

Tableau 1 - Caractéristiques des divers types de radars. (Diss 2009; Breil 2013)

Type de radar	Longueur d'onde	Diamètre de l'antenne	Utilisation	Rayon d'action
Bande C	3.75-7.5 cm		Pluie stratiforme	100-120 km
Bande S	7,5-15 cm	6 m	Orages	100-120 km
Bande X	2.5-3.75 cm	1,5 m	Montagnes/orages	60-80 km

Réseau français : ARAMIS

Composé de 24 radars (13, en 1995), le réseau ARAMIS couvre la quasi totalité du territoire français, à l'exception des Alpes (Parent du Chatelet 2003). Tous ses radars intègrent la technologie Doppler et 9 d'entre eux sont polarimétriques. Ils sont majoritairement en bande S dans le sud, à cause des orages, et en bande C dans les autres régions, pour les pluies stratiformes.

Des logiciels du type LTHE VISHYDRO, permettent la sélection d'emplacement optimum pour les radars, afin de limiter au maximum les erreurs liées aux échos du sol et aux masques orographiques. Cependant, cette couverture ne tient pas compte des masques anthropogéniques et de l'évolution de l'occupation des sols (Faure et al. 2005).

Pour obtenir les lames d'eau radar, voici les principales étapes (Tabary 2007):

- Identification dynamique des échos fixes ;
- Correction du masque partiel ;
- Utilisation d'une relation Z-R unique, valable pour tous les radars et pour toutes les saisons ;
- Correction du profil vertical de réflectivité (PVR) ;
- Combinaison linéaire des mesures aux différentes élévations ;
- Calibration dynamique de la lame d'eau avec les observations sols.

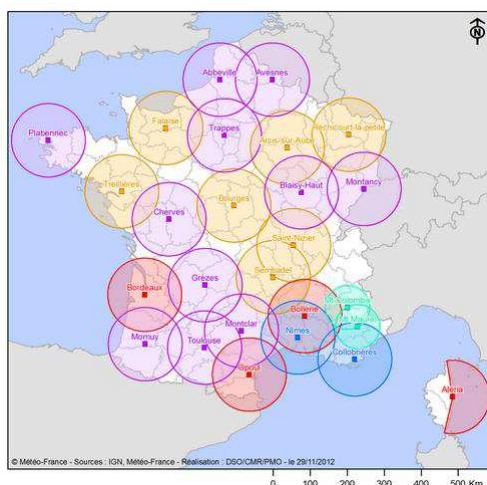


Figure 8 - Réseau ARAMIS au 29 novembre 2012 avec les 24 radars du réseau ARAMIS et les 2 radars en bande X, en test, de RHYTMME (Météo-France 2013a).

2.3 La prévision des pluies

Du fait de la grande rapidité des crues éclair décrite précédemment, disposer également de prévision de pluie, en plus d'observations, est un atout précieux pour mieux anticiper ce type de phénomène. Deux catégories de prévisions des pluies sont distinguées (Collier 2007; Blöschl 2008) :

- la courte échéance (nowcasting) concerne les pluies à venir dans les 6h ;
- la moyenne et longue échéance (forecasting) englobe les prévisions allant au-delà de 6h et jusqu'à plusieurs jours.

Actuellement, seules les prévisions de pluie à courte échéance ont une résolution spatio-temporelle compatible avec les phénomènes de crues éclair. La courte échéance fournit des prévisions pluviométriques précises, afin de parvenir à une amélioration de l'anticipation, grâce à plusieurs techniques de prévision : simple extrapolation des images radars, ou bien des couplages entre les données radar et les modèles de prévisions météorologiques numériques.

Pour la moyenne et longue échéance, il faut tenir compte de l'incertitude croissante avec le délai de prévision et surtout de la plus faible résolution spatio-temporelle. Ces phénomènes handicapent dès lors la modélisation hydrologique.

Pour prendre en compte les sources d'incertitudes, provenant de l'évolution de l'atmosphère et des conditions initiales, la technique probabiliste des ensembles fournit plusieurs scénarios de pluies futurs équiprobables augmentant ainsi le délai de prévision (jusqu'à 10-15 jours) et la précision (Palmer et al. 2002; Ramos et al. 2008). En France, les prévisions d'ensemble ARPEGE (PEARP) fournissent des lames d'eau probabilistes d'une résolution de 8X8 km², sur un délai maximal de 60h (Randrianasolo et al. 2011). Cette résolution spatiale paraît trop faible pour la problématique des crues éclair. Des améliorations sont à attendre avec la fourniture prochaine (2014), par Météo-France, de prévisions d'ensembles issues du modèle AROME (AROME-PE) avec une résolution de 1,3X1,3 km².

D'après Randrianasolo (2012), les études, reliant la problématique des petits bassins non-jaugés et de la prévision d'ensemble, étaient inexistantes lors de la réalisation de sa thèse, ce qui en fait une approche originale. A cause du peu d'études disponibles sur le sujet et de la précision requise pour traiter de la problématique des crues éclair, les travaux de cette thèse se focalisent sur le développement et l'évaluation de modèles hydrologiques sur des bassins versants non-jaugés, à l'aide des précipitations radars et non à partir de la prévision d'ensemble. Cette dernière est toutefois utilisée dans plusieurs systèmes d'anticipations de crues opérationnels, dont certains sont présentés par la suite.

3 Présentation de quelques systèmes opérationnels d'anticipation aux crues

3.1 Généralité

Les systèmes d'anticipation aux crues ont deux missions, à long et à court terme: le premier d'améliorer les préparatifs précédant la crue (tels que la fermeture des stations de métro, l'envoi de sacs de sables, etc.), le second de quantifier le niveau d'alerte pour aider les autorités locales à gérer la situation de crise (Blöschl 2008). Pour réaliser ces deux missions, deux systèmes complémentaires sont utilisables (Figure 9) :

- L'alerte précoce (vigilance) (« *early-warning* »), lancée plus de 24h en amont, peu précise en termes d'intensité et de localisation, la précision diminuant avec les délais de prévisions ;
- L'alerte et la prévision à courte échéance utilise des modèles pluie-débit plus précis que les prévisions d'ensemble.

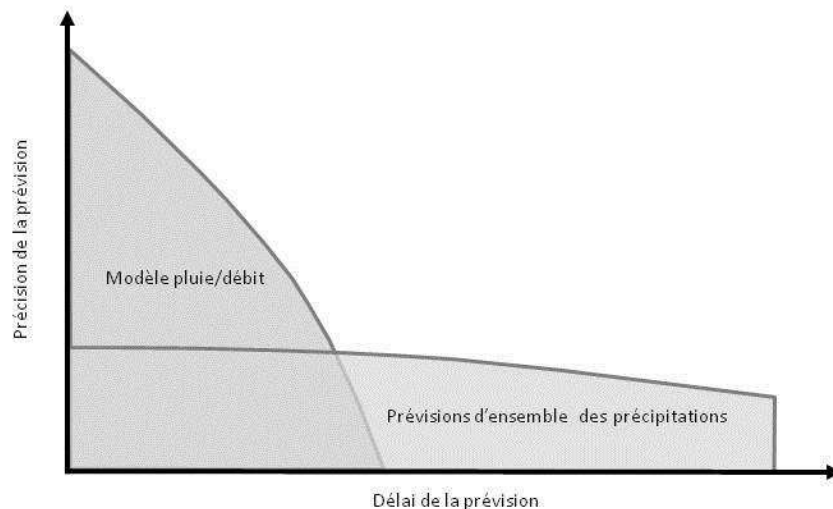


Figure 9 – Précision de l'alerte en fonction du moment où elle est émise (adapté à partir de Blöschl 2008).

Les modèles hydrologiques, employés traditionnellement pour anticiper, sont souvent calés à l'aide de chroniques de pluie et de débits observées, afin d'améliorer leur prévision en diminuant leurs biais (Collier 2007). La phase de calage est donc essentielle à l'élaboration des systèmes de crues, mais dans certains cas, c'est la possibilité d'assimilation des débits en temps réel qui améliore les performances du modèle (Blöschl 2008; Berthet et al. 2009). Pour les crues éclair, celles-ci se produisant généralement sur de petits bassins versants non-jaugés, il n'est pas possible d'utiliser un modèle hydrologique calé localement à l'aide de débits observés ni d'actualiser les données du modèle en temps réel.

Les paragraphes qui suivent présentent quelques systèmes opérationnels d'alerte. Tous ne s'appliquent pas spécifiquement aux crues éclair.

3.2 Dans l'Union européenne

3.2.1 Compilation des vigilances des centres météorologiques nationaux

Les organismes de météorologie mettent en commun leurs alertes météorologiques (dont le risque d'inondation), afin d'établir une carte européenne des vigilances, analogue au système utilisé par Météo-France, avec 4 niveaux d'alerte (vert, jaune, orange et rouge). Celui-ci (Figure 10) offre une vue d'ensemble des alertes dispersées sur l'Union européenne, essentielle à la gestion des rivières transfrontalières (en termes de cohérence et d'anticipation). La précision est cependant assez faible car les vigilances s'appliquent à des parties de pays (comme les départements) ce qui peut s'avérer trop faible pour une alerte de crue éclair.

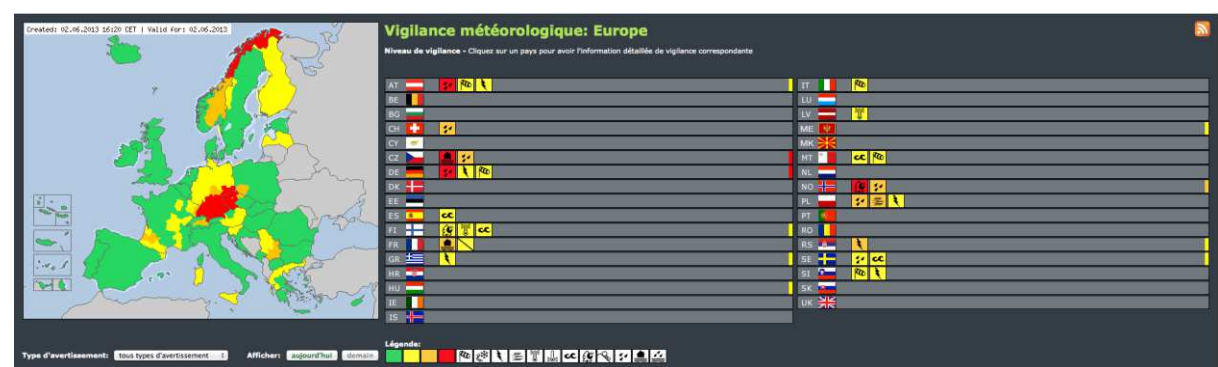


Figure 10 - Alertes météorologiques au niveau européen, compilées à partir des systèmes météorologiques nationaux. En date du 2 juin 2013, 16h20. (Source : <http://www.meteoalarm.eu/>)

3.2.2 Système d'alerte de la commission européenne : EFAS

Le système européen se compose, indépendamment de la composition de la carte des vigilances nationales (présentée au paragraphe précédent), d'un système central d'alerte aux crues et aux pluies, utilisant la technologie des ensembles. Actuellement, la veille s'effectue uniquement sur des bassins jaugés transnationaux mais dans l'avenir, elle devrait être adaptée aux bassins non-jaugés.

Ce système européen de vigilance, *European Flood Alert System* (EFAS) (<http://www.efas.eu/>), a été développé en 2003, suite aux crues transfrontalières de l'Elbe et du Danube. Il lance des alertes lorsque des seuils sont dépassés, avec des délais de prévisions allant de 3 à 10 jours pour les principaux cours d'eau d'Europe. Les bassins de la Loire, de la Seine, du Rhône et de la Garonne font partie du projet EFAS, dont le SCHAPI est partenaire (Ramos, Thielen et al. 2008). Ce système utilise le modèle hydrologique LISFLOOD qui fournit des prévisions de débits, à l'aide d'une méthode probabiliste décrivant et quantifiant les incertitudes dans l'anticipation des crues.

LISFLOOD, modèle distribué à l'échelle de 5 km, exploite un environnement SIG. Il doit être alimenté par des données d'entrée telles que la température, le vent et l'occupation des sols (CORINE Land Cover). En intégrant plusieurs processus, dont l'interception de la pluie par la végétation ou la neige, le modèle simule les débits à partir

des précipitations, obtenues par les 51 prévisions probabilistes du CEPMMT (Feyen et al. 2007; Ramos et al. 2008; Ramos et al. 2009). L'alerte de crue est lancée lorsque ces débits atteignent et dépassent des seuils critiques : sévère (possibilité très forte d'inondation), haut (possibilité forte d'inondation, avec dépassement probable du débit de plein bord), moyen (importante augmentation du débit sans inondation attendue) et faible (augmentation du débit sans inondation). Les seuils sont calculés sur la base de simulations opérées sur 14 années de données météorologiques observées.

Actuellement, EFAS fonctionne de manière opérationnelle uniquement sur des bassins jaugés. Plusieurs projets et études ont été réalisés afin de mieux prévenir les crues éclair sur des bassins non-jaugés. Il y a tout d'abord le projet IMPRINTS (<http://www.imprints-fp7.eu/>) qui a élaboré une plateforme d'aide à la décision lors d'événements extrêmes. Pour les crues éclairs, le modèle EFAS a été appliqué sur des petits bassins méditerranéens avec des rejeux d'événements passés. Ensuite, citons les études de Younis et al. (2008), sur le massif des Cévennes, et Alfieri et al.(2012), en Suisse, qui ont appliqué le modèle LISFLOOD sur des petits bassins de montagnes. Les premiers ont montré l'intérêt d'utiliser ce modèle pour émettre des alertes lors de crues éclair sur des bassins non-jaugés. Quant au second, ils ont testé l'intérêt d'y ajouter une prévision d'ensemble sur pour le même type de bassins. L'utilisation de cette prévision météorologique n'est pas encore évidente pour les petits bassins versants à cause du manque de précision qui décroît rapidement avec le délai de prévision. Cependant, elle offre déjà une information importante pour préparer les interventions sur le terrain.

Parallèlement à l'application de EFAS sur les bassins non-jaugés, l'Union européenne développe aussi un indicateur s'appuyant sur la pluie, dénommé EPIC, qui qualifie, grâce à une prévision d'ensemble, la pluie obtenue d'une manière probabiliste, en termes de périodes de retour, avec un délai de plusieurs jours. Il est testé dans le projet IMPRINTS (Thielen-del Pozo 2012).

3.3 Aux Etats-Unis

Aux Etats-Unis, le *National Weather Service*, partie du *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), s'occupe des alertes aux crues éclair, mais pas seulement. Il est divisé en 4 régions administratives et 13 *River Forecast Center* englobant au total 122 bureaux locaux de prévision.

Chaque jour, le modèle Sacramento estime l'humidité des sols. A l'origine, ce modèle était global et conceptuel, mais il a évolué pour devenir à base physique et distribué. Une étude a démontré que cette dernière version est meilleure et certains *River Forecast Center* adoptent déjà ce nouveau système (Reed et al. 2007; Cosgrove et al. 2009). Tenant compte de cette information, les volumes de pluies pouvant produire un débordement du cours d'eau sont calculés sur plusieurs pas de temps (1, 3, 6,12 et 24h). Ils donnent alors la limite à ne pas dépasser par les précipitations, appelée « Flash Flood Guidance » (FFG). Le seuil de débordement est obtenu, soit par la géomorphologie pour la totalité des Etats-Unis (Carpenter et al. 1999), soit par les statistiques pour les endroits où des débits observés sont disponibles (Georgakakos 2006). Durant la journée, les seuils limites des pluies sont comparés aux pluies estimées, par le réseau national de radars polarisés en bande S, et aux

prévisions de précipitations. Ces dernières fournissent une lame d'eau précise au kilomètre carré, sur un pas de temps de 5 minutes. Des scénarios de pluies peuvent également être exploités. Quand les précipitations dépassent la FFG, une crue éclair est alors imminente, mais l'heure n'est pas spécifiée exactement.

Il existe également un système d'alerte « Automated Flood Warning Systems », basé sur la pluie, qui émet une alerte en cas de fortes pluies, en se basant sur un réseau de pluviomètres. (Tao et Barros 2013a) .

3.4 En France

En France, pour les crues éclair et soudaine sur les bassins non surveillés réglementairement, seul le récent système d'alerte APIC est actuellement utilisé. Ce système est basé sur les pluies et compare les précipitations en temps réel, sur plusieurs durées de cumul, avec des seuils de référence (Ministère de l'Écologie 2011). Une fois qu'une alerte est détectée sur une commune, le maire est averti par SMS.

Des crues éclairs peuvent également se produire sur les 20800 km de tronçons réglementaires où des modèles hydrologiques peuvent être utilisés ainsi que des références historiques ou des abaques avec l'expertise des agents des Services de Prévision des Crues (SPC). Contrairement à l'Union Européenne ou aux Etats-Unis, les modèles hydrologiques ne sont pas identiques d'un SPC à l'autre et chacun d'entre eux dispose d'outils différents, dont voici quelques exemples :

- GRP, développé dans les laboratoires IRSTEA d'Antony, qui est un modèle global et conceptuel fonctionnant en continu et implanté dans la plateforme VIGIE (Javelle et al. 2008);
- la chaîne SIM (SAFRAN, ISBA, MODCOU), mise à disposition du SCHAPI par Météo-France, qui offre une prévision probabiliste (ensemble) des précipitations jusqu'au débit sur 900 rivières jaugés en France (Ramos et al. 2008; de Saint-Aubin et Viel 2009; Martin et al. 2009);
- la plateforme ATHYS (<http://www.athys-soft.org>) qui procure une approche distribuée, en permettant à l'utilisateur d'associer une fonction de production et une de routage, qu'il choisit parmi plusieurs possibilités, afin d'obtenir un modèle hydrologique (Tramblay et al. 2011) ;
- MARINE, un modèle hydrologique parcimonieux à base physique, qui s'appuie principalement sur la pente, les directions d'écoulements et des approximations des équations de Saint-Venant (Roux et al. 2011).

Pour les bassins non-jaugés, la méthode AIGA (« Adaptation d'Information Géographique pour l'Alerte en crue ») est développée au centre IRSTEA d'Aix-en-Provence, depuis l'an 2000, pour modéliser les crues en non-jaugé (Lavabre et Gregoris 2006). Opérationnelle dans les SPC de Méditerranée-Ouest, Grand Delta et Méditerranée-Est ainsi que dans la plateforme multirisque du projet RHYTMME. A terme ce système sera utilisé au niveau national.

Son objectif est de localiser les crues et d'évaluer l'aléa en termes de périodes de retour. Pour cela, elle s'appuie sur des données de précipitation, une modélisation hydrologique et des quantiles de crues de référence (Figure 11). Pour AIGA, les radars fournissent une lame d'eau par quart d'heure (15 minutes), avec une résolution d'un kilomètre carré. Celle-ci est utilisée dans un modèle hydrologique conceptuel distribué et événementiel, simulant en temps réel des débits horaires tous les quarts d'heures, grâce aux quatre dernières lames d'eau radar disponibles. Un modèle continu journalier fournit, quant à lui, une estimation de l'état des sols, permettant d'initialiser le modèle horaire. Les débits horaires sont comparés aux débits de référence du bassin (périodes de retour de 2, 10 et 50 ans). Les quantiles de crues sont obtenus, pour tout point du territoire, à l'aide de la méthode SHYREG couplant un générateur stochastique de précipitations, fournissant de longues chroniques, à un modèle hydrologique. Son fonctionnement est décrit plus précisément au cours du chapitre 3, lors de l'élaboration de la méthodologie de thèse.

Avec seulement la France, les Etats-Unis et l'Union européenne, la multiplicité des méthodes existantes pour l'anticipation des crues éclair sur des bassins non-jaugés a été illustrée. Cependant, en hydrologie, pour évaluer les modèles, il est nécessaire d'utiliser des données de débits observés, pour les comparer aux simulations des modèles. Pour chacune des méthodes présentées, il faut donc avoir recourt à des techniques d'évaluations spécifiques pour l'application aux bassins non-jaugés, détaillées par la suite.

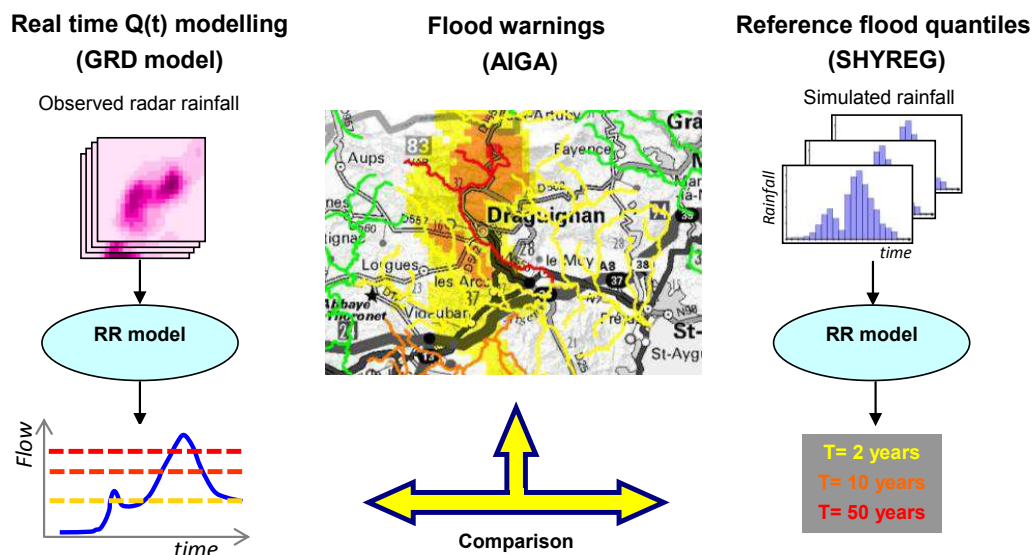


Figure 11 - Schémas de fonctionnement de la méthode AIGA, couplant un modèle de simulation en temps réel à un modèle stochastique, fournissant les quantiles de référence. Les couleurs représentent la dangerosité selon les périodes de retour (2 ans : jaune, 10 ans : orange et 50 ans : rouge) (Javelle et al. accepté)

Dans le cadre de la prévision des crues, sur des bassins non jaugés, il n'existe pas de système unique (Tableau 2).

L'Union Européenne privilégie une approche probabiliste pour son modèle hydrologique à base physique qui fonctionne en continu. Certains projets, comme IMPRINTS, tentent d'adapter ce modèle aux petits bassins versants soumis aux crues éclair. 4 seuils de dépassements quantifient la dangerosité de la crue.

Aux Etats-Unis, la prévision des crues éclair emploie un modèle physique événementiel et distribué, qui, une ou plusieurs fois par jour, calcule un seuil de pluie critique (FFG) pour plusieurs durées de cumuls de pluie qui, selon le résultat, déclenche ou non une alerte. Ensuite, des scénarios ou des observations de pluies sont testés durant la journée. L'unique seuil, une fois dépassé, alerte d'un danger imminent.

En France, la méthode AIGA, contrairement aux deux autres, est un modèle conceptuel n'utilisant, comme données d'entrée, que des pluies radars, et non des scénarios. Ce modèle distribué et événementiel, utilisé pour les bassins non-jaugés, fournit une information toutes les 15 minutes, permettant de prévoir quand les seuils ont été dépassés. Elle utilise 3 seuils d'alerte, fournis par une méthode statistique.

Ces 3 systèmes disposent de méthodes d'alerte aux pluies intenses, opérationnelles ou en développement.

Tableau 2 - Synthèse des 3 systèmes d'alerte aux crues pour les bassins non-jaugés.

NOM	Pays	Modèles	Seuils	Pas de temps	Pluies
EFAS	UE	Physique	4	3h	Scénarios
FFG	USA	Physique	1	Pas applicable	Radar bande S et scénarios
AIGA	France	Conceptuel	3	15 min	Radar C et S

4 Evaluation des modèles en non-jaugé

L'évaluation d'un modèle hydrologique consiste à comparer les débits simulés aux débits observés. Applicable aux bassins jaugés, cette technique l'est-elle sur les petits bassins non-jaugés sujets aux crues éclair ? Ces dernières se produisant rarement sur les réseaux surveillés par les services de prévision de crues, et sur des zones très restreintes, le nombre d'événements disponible est trop limité pour évaluer efficacement les modèles hydrologiques. (Creutin et Borga 2003)

Pour évaluer correctement un système d'alerte, il faut tester plusieurs éléments : sa capacité à détecter les crues observées doit évidemment être la meilleure possible. Mais, trop de fausses alertes décrédibilise un système d'alertes. Par exemple, si une alerte est émise quotidiennement, toutes les crues seront sûrement détectées, mais nombre d'entre elles seront fausses. Un compromis est à trouver entre la quantité de bonnes alertes et celle des fausses. La littérature suggère plusieurs techniques d'évaluation des systèmes d'avertissement, sur des bassins non-jaugés, présentées ci-dessous. Seulement, celle relative aux bassins jaugés et celle valorisant une base de données de dégâts historiques seront utilisés pour la suite des travaux. La technique des relevés de dégâts post-événements, mise en évidence par le projet HYDRATE, ne servira pas à l'évaluation des développements de cette thèse. Cette technique a déjà été utilisé pour évaluer la méthode AIGA, lors de l'événement de Draguignan en juin 2010.

4.1 A l'aide des bassins jaugés

La première méthode, la plus utilisée, consiste à considérer comme non-jaugé, un bassin versant jaugé. Le modèle hydrologique n'est pas calé sur ce bassin et les données de débits observés permettent d'évaluer la méthode. Les chroniques observées sont comparées à celles simulées par le modèle, permettant ainsi de faire la meilleure évaluation possible.

Cependant, comme les bassins versants jaugés de moins de 100 km² sont très peu nombreux, l'évaluation se réalise le plus souvent sur de vastes bassins versants. Il est donc difficile d'évaluer ainsi les petits bassins versants soumis aux crues éclair et les éventuels problèmes de descente d'échelle sont ignorés.

Pour remédier à ce problème, les travaux de (Rojas-Serna et al. 2006; Seibert et Beven 2009) suggèrent de réaliser des jaugeages volants. Ceux-ci consistent à mesurer le débit épisodiquement sur un cours d'eau. Pourtant, prendre des mesures au cœur d'une crue semble délicat, déjà à cause de la difficulté à connaître le moment du pic de crue, et en plus, les hydrologues doivent disposer d'assez de temps pour parvenir sur place, comme l'a soulevé Roche (1975). Une autre solution est de densément instrumentaliser plusieurs petits bassins versants, aux caractéristiques différentes (BVRE), afin d'analyser très précisément les performances des modèles comme Draix, le Réal Collobrier ou l'Orgeval.

Si cette technique d'évaluation est nécessaire dans le développement d'un modèle hydrologique, elle n'est pas suffisante car elle ne permet pas d'estimer le comportement du modèle sur de petits bassins versants de quelques kilomètres carrés. Il faut donc compléter la démarche en utilisant d'autres techniques comme les retours d'expériences.

4.2 A l'aide des retours d'expériences

Les relevés post-événements permettent aussi de valider des modèles opérationnels. Grâce aux sorties sur le terrain, il est possible d'accumuler un maximum de données. Le projet HYDRATE encourage l'emploi de ces relevés dans l'évaluation des modèles sur des bassins non-jaugés et décrit les techniques à utiliser. L'équipe Hydrologie d'Irstea (Aix-en-Provence) a adopté une telle démarche pour évaluer la méthode AIGA.

Le projet HYMEX, dont le principe est identique à celui d'HYDRATE, a constitué une base de données portant sur les crues des régions méditerranéennes, entre 1980 et 2010, en compilant plusieurs bases européennes de données de dégâts en Europe, dont celle d'HYDRATE. Cependant, il ne s'intéresse pas seulement aux crues éclair, mais à la totalité du cycle de l'eau sur la région : l'échelle temporelle est comprise de l'événement jusqu'à la saison, les systèmes atmosphère-terre-océan sont couplés (Llasat et al. 2013).

Les procédures de relevés de terrain proviennent du projet européen HYDRATE (Gaume et Borga 2013). Sur ce sujet, la littérature est abondante et les méthodes d'analyses et de relevés sont relativement identiques (Gaume et al. 2004; Borga et al. 2007; Bonnifait et al. 2009; Javelle et al. 2010a; Zanon et al. 2010; Ruiz-Villanueva et al. 2012; Yamakoshi et al. 2012). Les principales étapes de l'analyse sont les suivantes :

- Les relevés de laisses de crues et des ponts en charge permettent d'estimer les débits de pointe (Gaume et al. 2004) ;
- Des mesures topographiques estiment aussi les débits, cette fois par l'hydraulique (Hapuarachchi et al. 2011) ;
- Des enquêtes de proximité auprès des habitants retracent la chronique de l'événement (Ruin et al. 2013) ;
- Des analyses, sur la qualité de la lame d'eau enregistrée, sont opérées en comparant, par exemple, les données provenant des pluviomètres et des radars (Borga et al. 2007) ;
- Une modélisation hydrologique des cours d'eau est comparée, par la suite, aux débits déterminés sur le terrain (Javelle et al. accepté).

L'avantage est ici de pouvoir travailler et évaluer les modèles utilisés, ainsi que l'influence des problèmes d'estimation des précipitations, sur de petits bassins versants non-jaugés. Mais cela ne représente que quelques crues, et même si le potentiel du modèle peut être évalué pour l'alerte des crues, l'évaluation des fausses alertes reste impossible (alertes modélisées mais non observées). Ces fausses alertes sont toutefois quantifiables à l'aide d'une dernière technique d'évaluation consistant à utiliser des bases de données de relevés de terrains permettant de connaître les réactions du modèle quand aucun dégât n'est observé.

4.3 A l'aide de bases de données de dégâts

Des bases de données de relevés de terrain ou de dégâts sont aussi utilisées pour évaluer les modèles employés sur les bassins versants non-jaugés. Plusieurs équipes travaillent à la valorisation de ces informations, que ce soit les coupures de routes dans le Gard, la base de données événementiel des terrains de restauration en montagne (RTM), la

base Prim-net du Ministère du développement durable, qui relève les événements ayant causé des décès ou dont les dégâts ont été supérieurs à 3 millions d'euros ; ou encore la « Severe Hazards Analysis and Verification Experiment » (SHAVE) aux Etats-Unis (Versini et al. 2009; Gourley et al. 2010; Defrance et al. 2011; Llasat et al. 2013).

L'avantage est de permettre aux modèles de disposer d'un grand nombre d'événements avec leur localisation, pour être bien évalués. De plus, les différents relevés peuvent être catégorisés selon leur dangerosité, hiérarchisant ainsi les différents événements dans le cas de SHAVE (Calianno et al. 2013). Finalement, à chaque lieu peut être déterminé un seuil d'exposition, reliant ainsi un débit estimé à un dommage potentiel, indépendamment de la résilience et de la vulnérabilité, en plus de la période de retour (Payrastre et al. 2011; Versini 2012; Naulin et al. 2013).

Les hydrologues ne peuvent se contenter d'une seule évaluation par modèle limité sur les bassins jaugés. Dans la littérature, l'évaluation la plus courante consiste à utiliser les bassins jaugés. Même si le comportement du modèle est observé sur de longues séries de débits, l'effet de taille des bassins, lié au faible nombre de petits bassins jaugés (<100 km²), n'est pas étudié, rendant cette technique insuffisante pour l'étude des crues éclair. En s'appuyant sur des retours d'expérience sur les crues extrêmes, le modèle est évalué en mode opérationnel sur des bassins ciblés (sujet aux crues éclair), offrant ainsi une analyse à la fois des sources d'erreurs et des perspectives d'amélioration. L'évaluation la plus prometteuse, quoique rarement utilisée, reste celle utilisant des bases de données de dégâts comme les RTM ou SHAVE.

Lors de cette thèse, la technique classique d'évaluation à l'aide des bassins jaugés sera complétée par l'utilisation d'une base de données de dégâts afin d'obtenir une seconde évaluation sur de petits bassins versants sujets aux crues éclair. Conformément aux objectifs de la thèse, il y aura donc deux évaluations complémentaires afin de déterminer le meilleur système d'anticipation de crues éclair.

5 Conclusion

Après avoir décrit les caractéristiques des crues éclair, ce chapitre a mis en évidence les défis posés par leur anticipation. Ces crues, très localisées, le plus souvent en zone de relief, remettent en question les techniques classiques de météorologie et d'hydrologie. Une localisation précise et un pas de temps fin sont requis, le temps de réaction d'un petit bassin versant, durant une crue éclair, s'échelonnant de quelques minutes à quelques heures seulement.

Certains épisodes orageux ont un développement surfacique d'une trentaine de km², qui limite l'utilisation des réseaux de pluviomètres seuls, qui manquent déjà cruellement en altitude. Différentes techniques de mesures existent : les radars et les satellites. Cependant, seule la technologie radar semble actuellement utilisable dans un contexte opérationnel, disposant d'une résolution précise de l'ordre du kilomètre carré, et d'un pas de temps fin d'un minimum de 5 minutes. Le principal problème des radars traditionnels étant sa taille, de nouvelles technologies ont été développées, telles que le radar en bande X, permettant un déploiement de la technologie radar en montagne. Une partie du projet RHYTMME s'y attelle en visant l'entière couverture des Alpes du Sud.

Dans le but de toujours améliorer l'anticipation, les scénarios de pluie demeurent une perspective non négligeable. Des projets, comme IMPRINTS sur les crues éclairs, ont parfait les prévisions de pluies, basées sur la technique des prévisions météorologiques d'ensemble. Les précipitations convectives restent toutefois difficiles à prédire et leur déplacement difficilement modélisable. Cette thèse n'a donc pas intégré cette technologie, même si celle-ci semble être un facteur d'amélioration non-négligeable de l'anticipation des crues éclairs.

Des difficultés restent à surmonter dans la modélisation des crues éclairs. Les bassins étant très petits et situés en dehors des réseaux de mesure hydrométrique, le travail de l'hydrologue se cantonne donc aux bassins non-jaugés. Le manque de données de débits, surtout pendant les crues, ne facilite pas le déploiement de modèles hydrologiques précis, se corrigeant en cours d'événement, en assimilant des données débitométriques mesurées. A tout cela s'ajoute les défis posés par la montagne, tels que les fortes pentes, la présence de neige et de sa fonte. Dans certains cas, la forte érosion provoque aussi des laves torrentielles. Les processus d'écoulements hydrologiques sont dès lors fortement modifiés.

Toutes ces caractéristiques bouleversent les méthodes d'évaluation des systèmes d'anticipation des crues. Le recensement de crues exceptionnelles par des études précises sur le terrain, comme le propose HYDRATE ou les procédures REX (retour d'expérience) en France, est précieux pour l'évaluation en site non-jaugé. Cependant, cette méthode n'intègre ni les petites crues, ni la part des fausses alertes émises par le système. L'émergence de bases de données de dégâts (SHAVES ou les RTM) forment sans aucun doute le futur de l'hydrologie en non-jaugé. Loin d'être parfaites, ces bases de données permettent toutefois d'évaluer d'une manière continue les systèmes d'anticipation, en termes de bonnes et de fausses alertes.

Cette description précise du contexte des crues éclair a donc permis de fixer le point de départ de cette thèse et de mettre en exergue les difficultés propres à la disponibilité des données nécessaires à l'élaboration et à l'évaluation de modèles hydrologiques.

Chapitre II : Données utilisées

Quelles données hydro-climatiques seraient nécessaires et disponibles pour l'amélioration de la méthode AIGA ?

Quelles sont les caractéristiques hydro-climatiques et physiques de la région et des bassins versants?

Comment se caractérisent les événements ?

Afin de réaliser les deux objectifs de thèses, plusieurs sources de données ont été nécessaires. D'abord, afin d'adapter la méthode AIGA aux zones montagneuses, il a fallu déterminer les données météorologiques dont nous avons besoin : précipitations, neige, température,... Ensuite, pour accomplir le second objectif, concernant l'évaluation sur de petits bassins non-jaugés réels à l'aide de relevés de dégâts, un jeu de bassins versants spécifiques a été déterminé. Au final, deux jeux de bassins versants sont utilisés pour cette thèse. Le premier est composé de bassins jaugés avec des données de débits pour améliorer la méthode AIGA. Le second est obtenu à l'aide d'une base de données de dégâts disponible sur les départements des Alpes du Sud.

Toutes ces données, présentées dans ce chapitre, sont issues de différentes sources. Cette diversité conduit à un travail préliminaire de traitement de données afin d'obtenir des formats identiques, facilement exploitables pour les travaux de recherches. Toutes les données indispensables obtenues, après ce prétraitement, sont présentées dans ce chapitre.

1 Zone d'étude et données utilisées

Sont respectivement évoqués les points suivants : la description de la zone d'étude, les données météorologiques disponibles et sélectionnées, et l'élaboration des deux jeux de données de bassins versants (la première à partir des données débitométriques de la banque Hydro, la seconde à partir de la base de dégâts des RTM).

2 Analyse des données climatiques : pluie, neige, température et ETP

Cette partie est consacrée à l'analyse minutieuse des données climatiques d'entrées : pluviométrie, nivologie, température et évapotranspiration potentielle (ETP).

3 Analyse des bassins HYDRO et RTM

Les deux échantillons de bassins versants, sont décrits selon leurs caractéristiques physiques et hydro-climatiques ainsi que selon leur occupation du sol.

4 Caractéristiques des événements

Les événements sont déterminés à l'aide du seuil de 10 mm et sont analysés dans cette partie. Les données de débits sont critiquées et triées afin de diminuer le risque d'erreur pouvant impacter les performances des modèles. Enfin, l'analyse de la saisonnalité des crues et des signalements RTM est réalisée.

1 Zone d'étude et données utilisées

1.1 Zone d'étude

Le développement d'un modèle requiert en général un grand nombre de données, météorologiques et débitmétriques, avec des chroniques relativement longues (plusieurs années). Dans le cas des bassins non-jaugés, il faut faire face à une absence de données, qui sont à remplacer par d'autres informations, comme les débits fournis par les bassins des alentours. Dans ce contexte, la régionalisation de modèles hydrologiques est d'autant meilleure que le nombre de bassins, pour caler le modèle, est élevé. Une étude sur plusieurs bassins permet en outre de s'affranchir en partie des erreurs liées aux données. Le fait de disposer d'un large échantillon limite ainsi l'impact des erreurs présentes sur un bassin, améliorant l'évaluation globale du modèle (Andréassian et al. 2009).

La zone d'étude s'étend sur 10 départements du sud-est de la France (Figure 12), dont les 3 départements couverts par le projet RHYTMME (cadre rouge), auxquels ont été ajoutés les départements des Bouches-du-Rhône, du Vaucluse et du Var (cadre bleu) ainsi que tous les affluents et sous-affluents de la rive gauche du Rhône, correspondant aux départements de la Drôme, de l'Isère, de la Savoie et de la Haute-Savoie (Figure 12 en bleu & Figure 13). En intégrant la rive gauche du Rhône à cette zone, une vaste région montagneuse dotée de plusieurs massifs (dont le Mont-Blanc, le Vercors et la Chartreuse) est alors prise en compte, permettant d'augmenter le nombre de bassins versants subissant des précipitations neigeuses. De plus, cette rive s'avère aussi une limite hydrologique plus pertinente, comparée aux départements : les cours d'eau ne respectant pas les délimitations administratives. La zone d'étude s'étend donc de la Méditerranée jusqu'au lac Léman, et du Rhône jusqu'à la frontière Italo-suisse. Les altitudes varient de quelques mètres, sur la côte, jusqu'aux 4806 mètres du Mont-Blanc. La délimitation de la zone d'étude influence le choix des données à utiliser pour cette thèse, car celles-ci doivent être disponibles pour la zone entière.

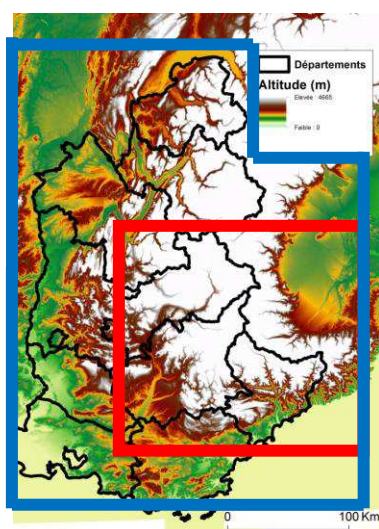


Figure 12 – Zone d'étude encadrée en bleu, et en rouge, la zone RHYTMME.

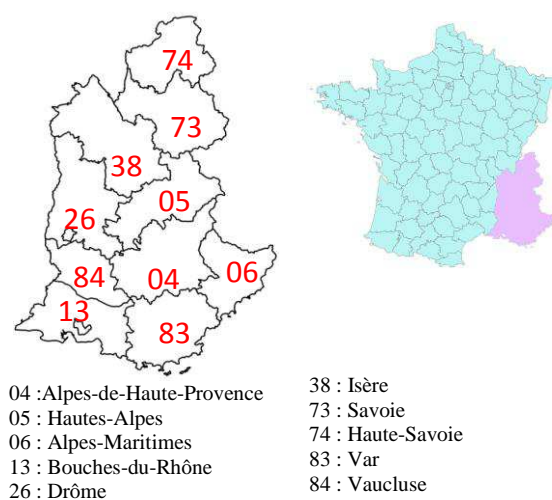


Figure 13 – Numérotation des départements de la zone d'étude.

1.2 Données pluviométriques : COMEPHORE (1997 – 2006)

Ce sont les précipitations qui sont responsables des crues éclair sur les bassins versants de quelques kilomètres carrés. Il faut donc de longues chroniques de données de pluie précise pour développer des modèles hydrologiques. Sachant que ce sont les mesures radar qui semblent être les plus adaptées pour estimer les cumuls liés aux orages, ce sont les lames d'eau COMEPHORE qui ont été choisies dans le cadre de cette thèse pour développer un système d'anticipation de crues éclair. Cette mesure des précipitations est obtenue d'une part, à partir des algorithmes de traitement du signal radar les plus récents de Météo-France sur les anciennes données de réflectivité radar du réseau ARAMIS entre 1997 et 2006, et d'autre part, des lames d'eau de pluviomètres interpolés par krigeage, afin d'obtenir la meilleure lame d'eau possible (Tabary et al. 2012). Il s'agit donc d'un mélange entre une donnée radar et une donnée issue de pluviomètres interpolés. La pluie est dès lors disponible au pas de temps horaire et sur une période de 10 ans (1997-2006). D'une précision d'1km², elle couvre entièrement la France, correspondant ainsi aux exigences de la modélisation hydrologique des crues éclair. De plus, chaque lame d'eau horaire bénéficie d'un code qualité, les lames d'eau n'étant homogène, ni dans le temps ni dans l'espace, à cause de l'évolution des réseaux de mesures (pluviomètres et radars) (Gottardi 2009; Hingray et al. 2012).

Dans la zone d'étude, quelques rares régions sont couvertes par des radars (Bollène, et Collobrières, à partir de 2003 [carte du chapitre 1]), la majorité du territoire ne disposant que de pluviomètres. Les difficultés orographiques sont donc à intégrer ; à l'absence de correction altitudinale, pour les Alpes, s'ajoute la raréfaction des pluviomètres avec l'altitude (Gottardi 2009; Perret et al. 2012). Les hydrométéores (pluie, neige, grêle) n'étant pas différenciés, la lame d'eau correspond à la fois à la pluie liquide et à la neige et les pluviomètres n'étant pas chauffés, la neige n'est en général pas mesurée (sans compter les très fortes sous-estimations liées à la sous-captation). Quant aux autres lames d'eau possibles, elles ne satisfont pas à toutes les exigences. Ce sont :

- Les radars en bande X, les plus précis en zone montagneuse, mais dont les données disponibles ne remontent qu'à 3 ans.
- La réanalyse SPAZM³, qui intègre l'altitude, mais dont le pas de temps est journalier.
- La réanalyse SAFRAN, développée pour la montagne, mais dont la maille est de 64 km².

Le choix de la lame d'eau COMEPHORE est donc plus approprié pour le développement d'un modèle hydrologique en zone de montagne. Cependant ce choix est loin d'être parfait et ne garantit pas une bonne connaissance sur les précipitations sur les bassins versants utilisés dans la suite de cette thèse (section 1.5.4). Pour estimer l'eau liquide génératrice de crues, il est nécessaire de lui adjoindre des données supplémentaires : une estimation des chutes de neige, de la fonte, ainsi que de l'évapotranspiration potentielle (ETP), influençant l'humidité des sols, facteur déterminant dans la genèse des crues éclair.

³ Pluies spatialisées par EDF en tenant compte de la montagne, issues de la thèse de Gottardi, F. (2009).

1.3 Données de neige et de température issues de la réanalyse SAFRAN

Pour connaître la neige au pas de temps horaire ainsi que l'impact de la fonte, des données de *neige* et de *température* et le ratio pluie/neige sont obtenus par la réanalyse SAFRAN au pas de temps horaire. La résolution spatiale de ces données est de 64 km², couvrant la période 1997-2006. Ces deux mesures sont essentielles pour déterminer l'influence de la neige sur le bilan hydrologique des bassins versants, à travers des modules neige de type degré-jour (présenté au chapitre suivant). Contrairement à la donnée COMEPHORE évoluant avec le temps, le nombre de données observées et utilisées chaque jour par la méthode SAFRAN (précipitations, température, vent, humidité et couverture nuageuse) demeure relativement stable entre 1997 et 2006, garantissant des données de sorties homogènes dans le temps (Vidal et al. 2010). La donnée de température est également utile pour déterminer l'ETP, calculée à partir de la formulation d'Oudin.

La réanalyse SAFRAN

La réanalyse SAFRAN, développée à l'origine pour prévenir du risque d'avalanches, est donc adaptée aux zones montagneuses. Comme le montre la Figure 14, cette méthode se fonde à la fois sur des observations au sol mais aussi sur les conditions météorologiques à grande échelle, calculées à l'aide du modèle météorologique Arpege. Elle permet d'obtenir au pas de temps horaire des grilles de variables météorologiques : radiation, neige, vent, pluie...

La France a été découpée en 615 zones, de moins de 1000 km² (zones « symposium »), régions homogènes où le gradient climatique horizontal est négligeable, surtout pour les précipitations. Le gradient altitudinal est cependant pris en compte, les mesures étant effectuées sur plusieurs altitudes (à un intervalle de 300 m). Afin d'améliorer la qualité des variables de sorties, les observations des zones symposiums adjacentes peuvent être prises en compte (Quintana-Seguí et al. 2008). Une description complète de la méthode SAFRAN est donnée par Quintana-Seguí, 2008 et Vidal en 2010.

Chaque jour, un contrôle des données est opéré entre le modèle et les observations. Concernant les données d'humidité, de température, de vitesse du vent, de couverture nuageuse et de radiation, le modèle météorologique calcule des profils verticaux toutes les 6h, qu'il affine grâce aux mesures au sol. Toutes ces mesures sont ensuite interpolées, au pas de temps horaire, fournissant ainsi un bilan de radiation (visible et infrarouge) horaire.

La correction des précipitations est, quant à elle, réalisée sur un pas de temps de 24h, en utilisant les précipitations journalières enregistrées entre 0600 UTC et 0600 UTC le lendemain. Afin de convertir ces dernières au pas de temps horaire, 4 phases sont à suivre. Il s'agit de déterminer

- L'heure où l'isotherme 0° est le plus élevé ;
- L'altitude de transition, où la neige devient pluie, basée sur l'heure précédente et le profil de température ;
- Le ratio pluie/neige journalier à partir des observations au sol ;
- L'humidité relative horaire, sous la contrainte du ratio pluie/neige journalier.

Toutes les données obtenues, au sein des zones symposium, sont ensuite attribuées sur des grilles de 64 km² tenant compte de l'altitude de la maille, en utilisant les profils verticaux précédemment calculés.

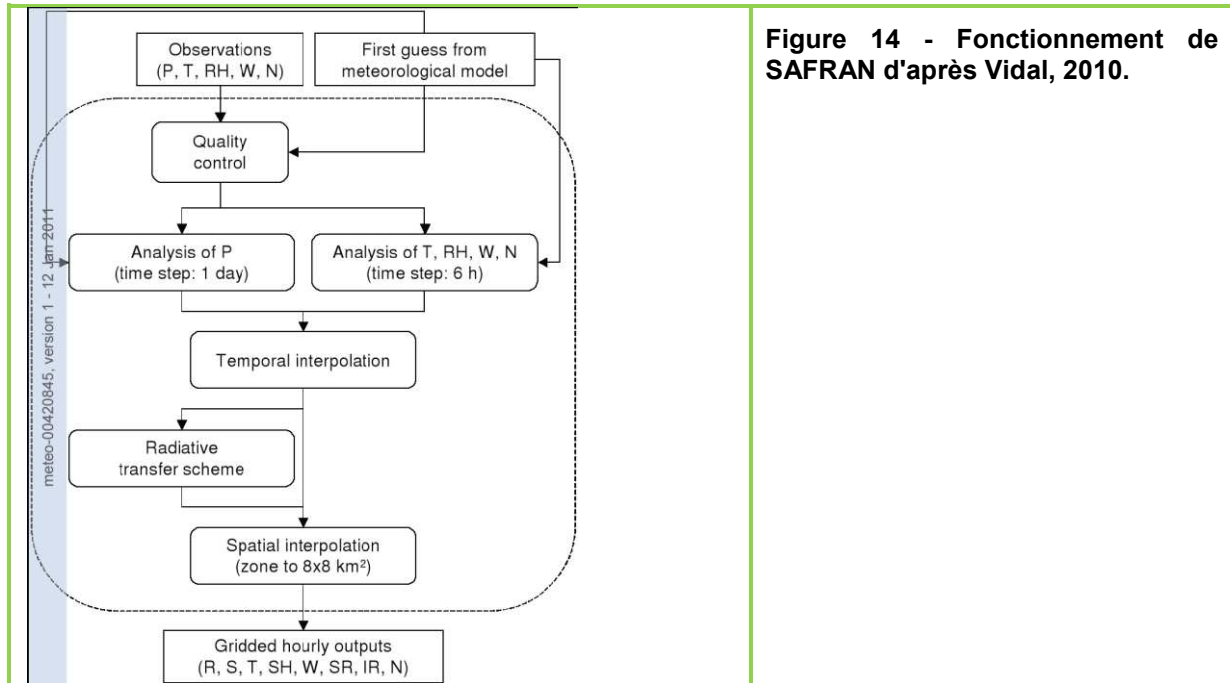


Figure 14 - Fonctionnement de SAFRAN d'après Vidal, 2010.

1.4 Données d'ETP calculées par la formulation d'Oudin

Parmi les données météorologiques nécessaires à la modélisation hydrologique, il ne reste à évoquer que l'évapotranspiration potentielle journalière jouant un rôle important sur l'humidité des sols, au même titre que les précipitations. Elle est calculée à partir des données de température SAFRAN, selon la formule d'Oudin (Oudin et al. 2005).

La formulation de l'ETP par Oudin a pour principal avantage de requérir seulement des données de températures. Elle se compose de 2 équations (1 & 2) liant la température moyenne de la journée (T_a) en °C et les constantes :

- R_e pour les radiations extra-terrestres en $\text{MJ m}^2\text{j}^{-1}$;
- λ pour la chaleur latente en MJ kg^{-1} ;
- ρ pour la masse volumique de l'eau.

$$ETP = \frac{R_e T_a + 5}{\lambda \rho \cdot 100} \quad (\text{si } T_a + 5 > 0) \quad (1)$$

$$ETP = 0 \quad (\text{si } T_a + 5 < 0) \quad (2)$$

Notons que l'utilisation d'autres formules pour calculer l'ETP n'a que très peu de conséquences sur les résultats des modèles hydrologiques du type GR4J, étant relativement insensibles au changement de formule (Oudin 2006).

L'ensemble des données climatiques nécessaires à la modélisation hydrologique (pluie, neige, température et ETP) a ainsi été présenté et il faut maintenant s'intéresser à la partie hydrologique, à travers les deux jeux de données de différents bassins versants: le premier jeu fournissant des mesures de débits et le second des relevés de dégâts.

1.5 Deux bases de données de bassins versants

Comme cela a été mentionné dans les objectifs de thèse, l'évaluation des modèles hydrologiques s'effectue en deux temps : d'abord de manière « classique » sur des bassins jaugés et ensuite de façon plus originale, à l'aide de relevés de dégâts fournis par les services de Restauration de Terrain en Montagne (RTM). A ces deux modèles d'évaluation, correspondent deux jeux de données présentés ci-après.

1.5.1 Premier échantillon pour le calage et la validation aux stations hydrométriques : HYDRO

Ce premier échantillon est constitué par les bassins versants disposant de données débitmétriques, nécessaires à la phase de développement des modèles durant la thèse. Ces bassins sont désignés par ce raccourci de « bassins HYDRO ».

En France, le ministère du développement durable met à disposition une base de données hydrométriques : la banque HYDRO (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>). Celle-ci contient des mesures de débits, aux pas de temps variables, de 3 500 stations (dont 2 400 sont actuellement en service), fournies notamment par les DREAL et EDF.

La sélection du premier échantillon s'opère sur plusieurs critères, tels que la taille des bassins versants, la longueur de la chronique de débits et la présence de barrages.

Taille des bassins versants

Nous avons choisi de travailler sur des bassins HYDRO dont la surface varie entre 5 km² et 1000 km², pour les raisons suivantes.

- La représentation des bassins versants est inexacte sur de petites superficies (erreur induite par le modèle numérique de terrain, mauvaise localisation de l'exutoire ou de la source) (borne inférieure).
- La mauvaise connaissance spatiale de la pluie (pour une maille d'un km²) impacte plus fortement les petits bassins versants. En effet, un décalage d'un km aura toujours un plus grand impact sur un bassin de cinq km² que sur un bassin de 100 km² (borne inférieure).
- Les crues éclairs se produisent sur des bassins plutôt petits et en montagne ce qui élimine les très grands bassins avec une superficie supérieure à 1000 km² (borne supérieure).

Longueur de chronique

Une chronique d'un minimum de six ans, pour chaque bassin, garantit une plus grande diversité dans les précipitations annuelles, avec des années sèches et humides, ainsi qu'une longueur suffisante pour caler et valider le modèle. Cette décision se justifie pour les raisons suivantes :

- Plus le modèle est parcimonieux, plus la durée de la chronique peut être brève (Perrin et al. 2007) ;
- Pour la modélisation horaire, des études antérieures suggèrent qu’une période de calage, allant d’un à quatre ans, améliore les performances d’un modèle GR horaire. (Mathevet 2005)
- Le choix de la période de calage influence les résultats du modèle, selon que celle-ci soit sèche ou humide (Coron et al. 2012).

Cours d’eau influencés et présence de barrages

Seulement les bassins dont moins de 10% de la superficie est influencée par une installation hydraulique ont été sélectionnés, les modèles hydrologiques (GR) utilisés dans cette thèse étant développés pour des cours d’eau non influencés par l’activité humaine. Le pourcentage de la superficie du bassin contrôlé par la présence d’un barrage a été calculé par Caruso (2012 note technique) à l’aide d’un traitement SIG.

La sélection des bassins versants de la banque HYDRO s’opère sur les trois critères résumés dans ce tableau et au final, **118 bassins** ont été retenus sur la zone d’étude. A cette première base vient s’ajouter celle fondée sur les relevés de dégâts, dans la section suivante. Par la suite, les deux bases sont présentées et situées sur la zone d’étude.

Tableau 3 - Critères de sélection de l’échantillon

Superficie	Durée de la chronique	Superficie influencée
5 km ² <BV<1000 km ²	Durée > 6 ans	Surface < 10 %

1.5.2 Second échantillon pour la validation à l’aide de relevés de dégâts : RTM

Un second échantillon de bassins versants non-jaugés est élaboré à partir de bassins disposant de relevés de dégâts. Ces derniers sont collectés par les services de Restauration des Terrains en Montagne (RTM), recensant les catastrophes naturelles actuelles et passées, puis archivés sur le site <http://rtm-onf.ifn.fr>. Pour plus d’aisance, ces bassins sont indiqués par la suite « bassins RTM ».

Dans les années 1860, les services RTM sont fondés pour lutter contre l’érosion et régulariser le régime des eaux, par le reboisement des montagnes ainsi que par l’aménagement des torrents. Pour cela, les services RTM ont collecté beaucoup d’informations relatives aux crues en montagne. Ses missions évoluant, ils se chargent désormais de la prévention de tous les risques naturels en montagne (inondations, crues, glissements de terrain, avalanches, etc.). Actuellement, 11 départements français disposent d’un service RTM, dont trois sont partenaires du projet RHYTMME (Alpes-de-Haute-Provence, Hautes-Alpes et Alpes-Maritimes).

Chaque incident est répertorié, localisé sur un emplacement, appelé site (rive de cours d’eau, ravine, portion de tronçon de rivière, etc.), identifié par un numéro unique et associé à un risque naturel précis. Les renseignements ayant trait à l’incident proviennent de sources diverses et complémentaires : l’expertise effectuée par un agent RTM, la presse ainsi que des témoignages.

A ce jour, la base de données RTM détient des informations sur plus de 30 000 signalements, ainsi que sur plus de 19 000 ouvrages de protection contre les risques naturels. La quantité et le contenu de ces données varient d'un département à l'autre, à l'image des services y officiant. On peut trouver dans ces bases RTM : le numéro du site avec sa localisation, la date de l'incident, les communes touchées, des commentaires, voire le nombre de personnes décédées et blessées ainsi que les dégâts constatés.

Dans notre étude, seulement les signalements relatifs aux crues et aux inondations ont été pris en compte. Nous avons décidé de ne pas sélectionner les sites avec des glissements de terrain ou des laves torrentielles qui ne sont pas pris en compte dans nos modèles hydrologiques (chapitre 3). De plus, les informations quant à la présence de dégâts et de victimes n'est pas exploitée. Seul le fait que le signalement soit dans la base de données est utilisé, l'exhaustivité de l'information dégâts et victimes étant loin d'être garantie. Cette réserve est justifiée à cause des différentes sources utilisées par les RTM pour remplir la base de données. Les bases RTM, pour les 3 départements associés au projet RHYTMME, sur la période 1997 – 2006, ont répertorié 578 événements (crues et inondations) répartis sur 405 sites. Soit :

- 163 dégâts sur 113 sites dans les Alpes de Haute-Provence (04),
- 220 dégâts sur 342 sites dans les Hautes-Alpes (05),
- et 195 dégâts sur 139 sites dans les Alpes-Maritimes (06).

Au préalable, chaque site a été associé à son bassin versant, afin de pouvoir utiliser ces données à des fins hydrologiques (disponible en annexe A) et au final, **123 bassins** sont sélectionnés (Ecrepont 2012). Il est à noter que pour certains sites RTM, il n'est pas possible de définir de bassins versants :

- soit la superficie est inférieure à 5 km², surface en dessous de laquelle le contour des bassins n'a pas été effectué.
- soit le site est localisé simultanément sur plusieurs bassins versants.

1.5.3 Constitution des deux jeux de bassins

Les 118 bassins HYDRO sont présentés en noir sur la carte (Figure 15) avec les 123 bassins RTM sélectionnés (en rouge).

La majorité des bassins versants HYDRO sont soit des affluents du Rhône, soit des bassins côtiers bordant la Méditerranée. Très peu sont présents en zone montagneuse. Les bassins RTM se situent majoritairement là où il existe peu de stations HYDRO (Hautes-Alpes (05) et les Alpes-Maritimes (06)), les Alpes de Hautes-Provenances (04) faisant à nouveau exception. De fait, une vingtaine de bassins RTM sont emboîtés dans des bassins HYDRO, et 5 d'entre eux peuvent être considérés comme des bassins jaugés car le bassin RTM correspond au bassin HYDRO.

Lors de cette première partie du chapitre 2, la zone d'étude et les données hydro-climatiques nécessaires aux travaux de cette thèse ont été définies. Afin d'obtenir une information complémentaire pour le développement des modèles hydrologiques, les données climatiques puis les données hydro-climatiques sont décrites plus précisément à l'échelle des bassins versants, sur les deux échantillons.

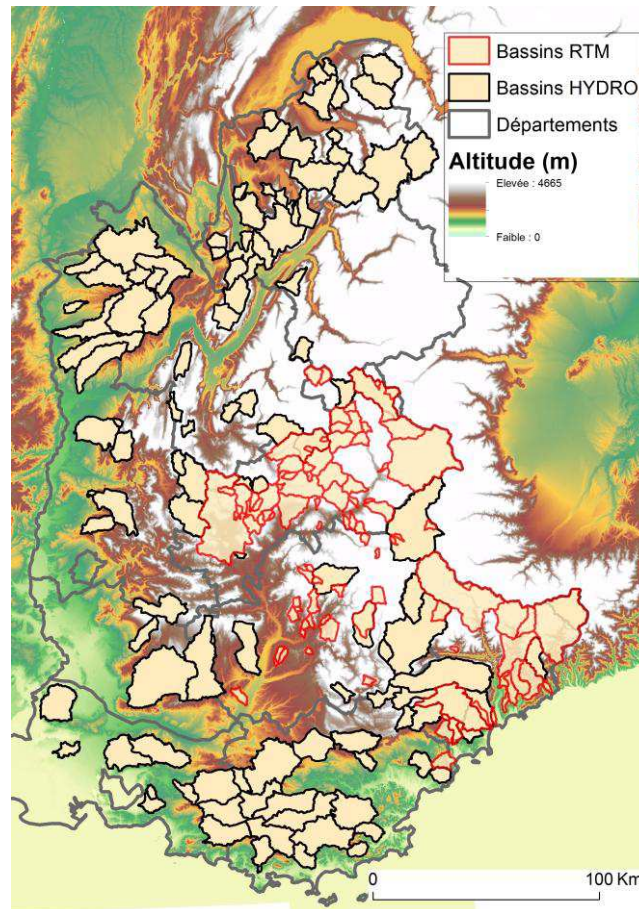


Figure 15 - Localisation des 118 bassins HYDRO (noir) et des 123 bassins RTM (rouge).

1.5.4 Couverture pluviométrique sur la zone d'étude

Comme cela a déjà été énoncé, la lame d'eau COMEPHORE n'est pas parfaite et certains bassins versants sont mal couverts. De ce fait, la méconnaissance des précipitations pourra influencer les résultats obtenus dans cette thèse. Sur la Figure 16, la portée des radars et la position des pluviomètres sont présentés afin de mieux appréhender le problème de l'estimation des précipitations pour les 118 bassins HYDRO et les 123 bassins RTM. Pour les bassins versants le long du Rhône et sur la côte méditerranéenne, la couverture est assurée par les radars et un réseau dense de pluviomètres. Cependant pour les bassins montagnards, la couverture radar est inexistante et certains ne comportent pas de pluviomètres. Pour ces bassins, la connaissance des précipitations pourra poser certains problèmes.

Au moment de la réalisation de cette dernière, il n'était pas possible d'utiliser la lame d'eau radar en bande X développée par Météo-France dans le cadre du projet RHYTMME qui améliorera la qualité des estimations radar dans les Alpes du Sud. Il a donc fallu utiliser les lames d'eau COMEPHORE tout en gardant à l'esprit que pour la modélisation hydrologique la qualité de la donnée d'entrée pourra pénaliser nos résultats.

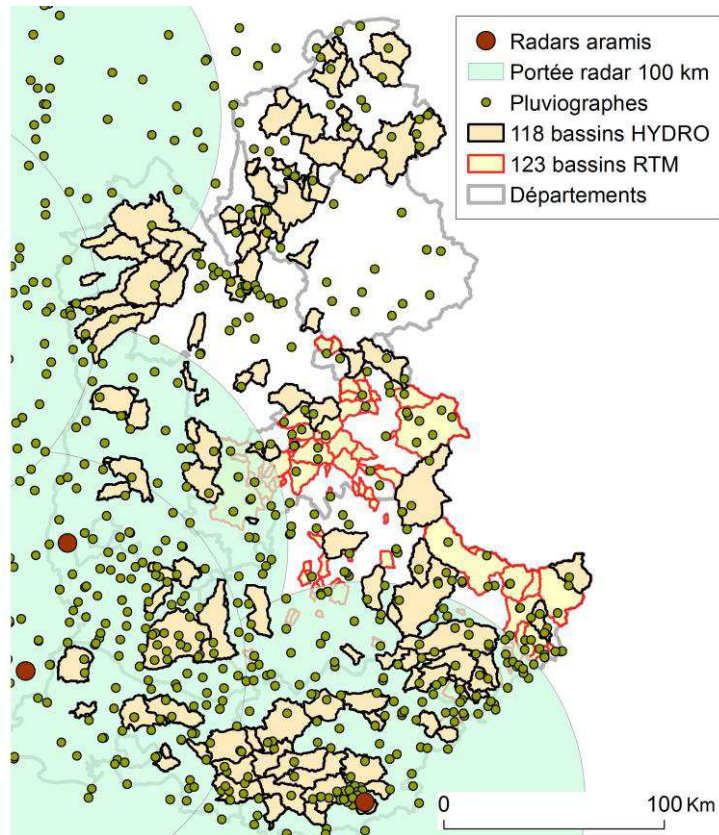


Figure 16 – Couverture pluviométrique des 118 bassins HYDRO (noir) et des 123 bassins RTM (rouge).

- La zone d'étude s'étend de la Méditerranée au lac Léman, à l'Est du Rhône.

- Les sources de données des quatre variables climatiques proviennent de :

- COMEPHORE : pour les pluies au pas de temps horaire (1997-2006), à la maille de 1 km².
- SAFRAN : pour la neige (dont ratio pluie/neige), la température, l'ETP (calculée par la formule d'Oudin), à la maille de 64 km².

- Deux échantillons de bassins versants sont étudiés :

- 118 bassins versants de la banque HYDRO, dont la superficie est comprise entre 5 et 1000 km² (pour le calage et validation des modèles hydrologiques).
- 123 bassins versants non-jaugés, issus de la base de données des RTM, disposant d'au moins une date de signalement de dégâts (pour la seconde validation des modèles).

2 Analyse des données de pluie, de neige, de température et d'ETP

2.1 Analyse de la pluie

Afin de mieux discuter les résultats issus des travaux de cette thèse, les données de pluie sont analysées les premières car elles ont un rôle capital dans le fonctionnement des modèles hydrologiques. Les cumuls de précipitations annuelles entre 1997 et 2006, obtenus par COMEPHORE, présentent un gradient Nord – Sud (Figure 17-A). Conséquence de la présence de fronts océaniques et de l'altitude (Alpes), les précipitations sont d'au moins 1000mm (vert clair) dans le nord avec des cumuls supérieurs à 1400 mm en montagne. Dans le sud, plus particulièrement dans les Bouches-du-Rhône, les précipitations sont inférieures à 600 mm d'eau par an (bleu foncé). La présence de reliefs explique l'augmentation des précipitations dans le sud, comme dans le Var au niveau des massifs de la Sainte-Baume et des Maures, ou dans les Alpes Maritimes dont les cumuls se situent entre 600 mm et 1000 mm (bleu gris).

En comparant la pluie issue de COMEPHORE à celle de SAFRAN (Figure 17-B), une sous-estimation de l'ordre de 10%, par COMEPHORE, est décelable en zone de montagne pour COMEPHORE. Elle est visible grâce à la présence de taches orange et rouges avec la lame d'eau SAFRAN qui ne sont pas présentes avec la lame d'eau COMEPHORE. Cette différence s'explique par la non-prise en compte de l'altitude dans l'élaboration de la lame d'eau COMEPHORE. Celle-ci est, cependant, préférée dans la suite de la thèse car elle offre une résolution plus fine, d'un kilomètre carré, comparée aux 64 km² de SAFRAN.

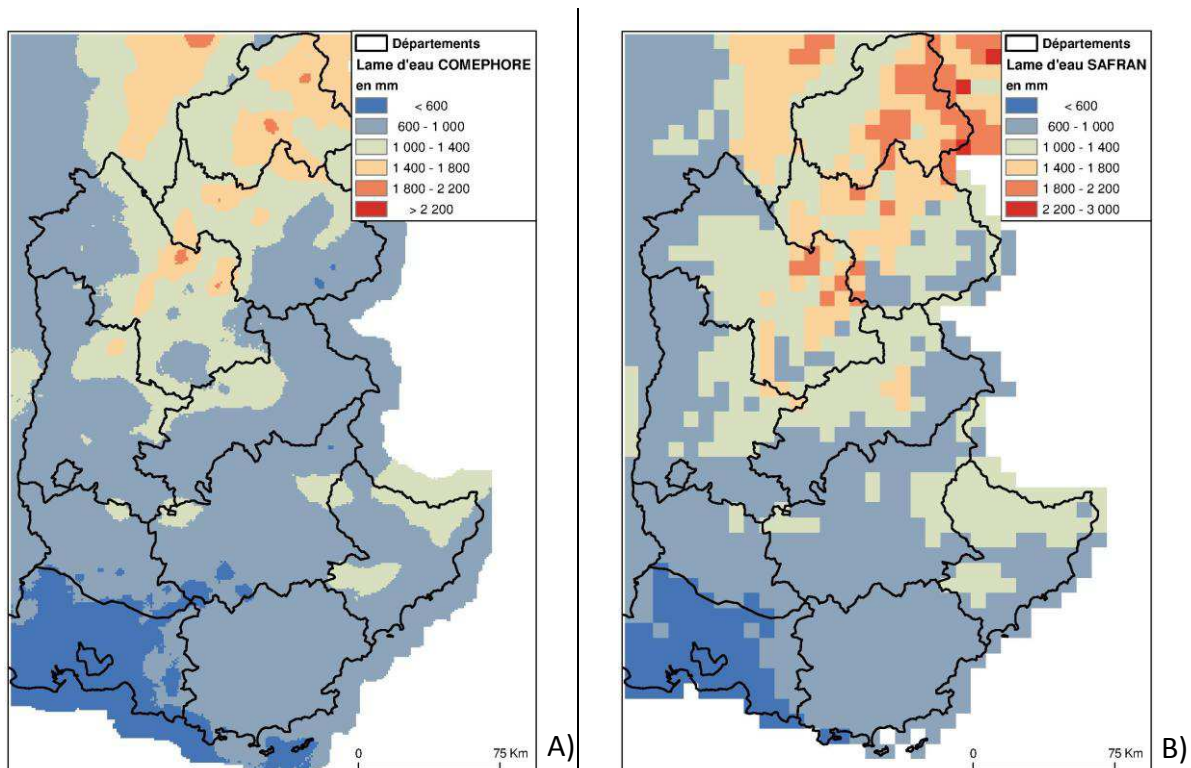


Figure 17 – (A) Cumul des précipitations annuelles selon COMEPHORE. (B) Cumul des précipitations annuelles selon SAFRAN, obtenu en additionnant la neige et la pluie, afin d'obtenir une pluie totale comparable à celle de COMEPHORE.

Le rapport, comparant les périodes allant de 1997 à 2001 et de 2002 à 2006 (Figure 18-A), signale l'absence d'homogénéité des précipitations : tous les massifs montagneux ont reçu au moins 10% de cumul de précipitations annuelles en plus (en rouge clair), allant jusqu'à 75% sur certaines parties, entre 1997 et 2001 (rouge foncé). Alors que le Var semble également avoir connu une période plus humide, les vallées du Rhône et de la Durance conservent les mêmes cumuls.

Cette variation s'explique en partie par plusieurs années sèches, à partir de 2000, dont l'année 2003 est bien représentative, mais aussi par l'évolution de l'instrumentalisation (pluviomètres et radar). En comparant les mêmes périodes, mais à partir des données de précipitations totales (neige et pluie) de SAFRAN, plus homogènes dans le temps (Figure 18-B), ces constatations demeurent identiques. Cependant, ces différences très marquées le sont moins (+30%) et en plus petit nombre, SAFRAN opérant un lissage des lames d'eau (64km²). Concernant le Var, la variation observée sur COMEPHORE, n'est pas reprise par SAFRAN, l'installation du radar de Collobrières (en 2003) ayant influencé la qualité de la lame d'eau.

Dans cette comparaison des périodes 1997-2001 et 2002-2006, la variation de la qualité de la lame d'eau n'a qu'un effet limité, comparé aux variations climatiques ; la première période étant la plus pluvieuse. Cette dissymétrie n'est pas à négliger dans l'analyse des résultats obtenus par le split-sample test, présenté au chapitre 3 (Klemes 1986). La pluie n'étant pas la seule donnée d'entrée nécessaire en montagne, l'analyse se poursuit avec les cumuls de neige sur les dix années mais également sur les sous-périodes de 5 ans.

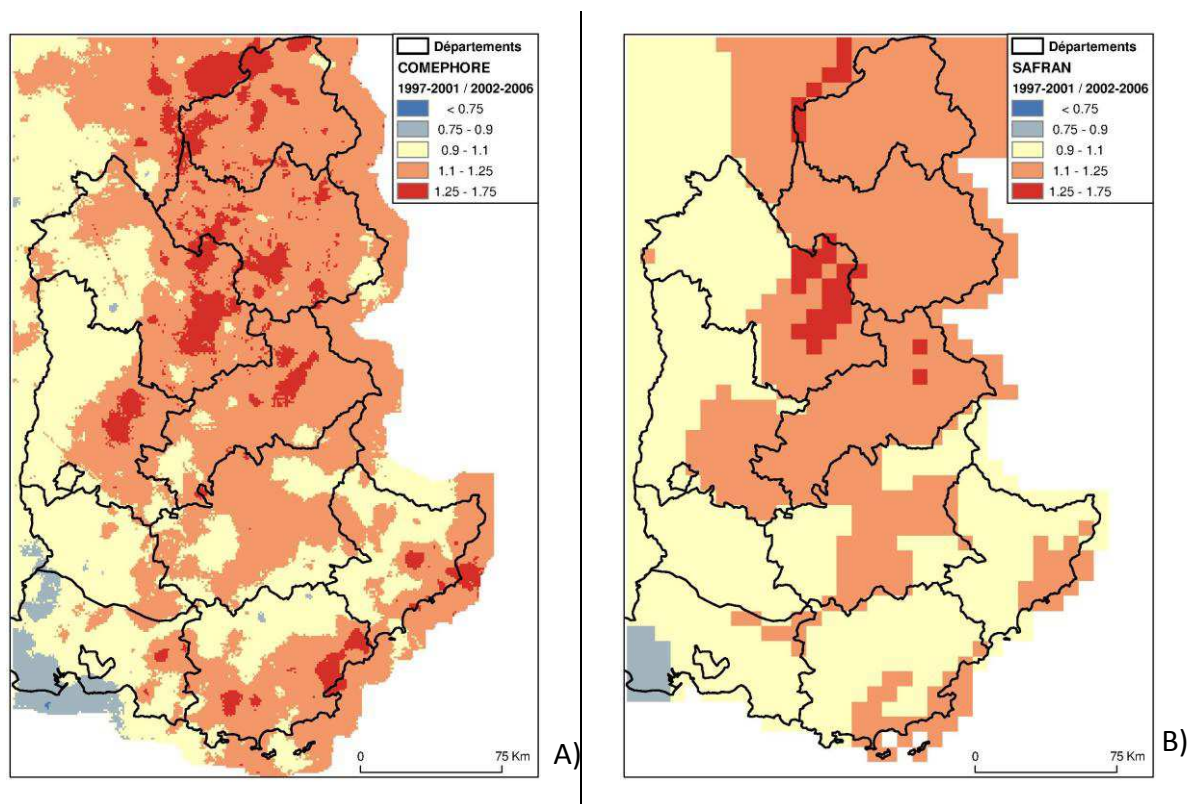


Figure 18 - Rapport entre les cumuls de la période 1997-2001 et ceux de la période 2002-2006. (A) COMEPHORE (B) Pluie totale SAFRAN.

2.2 Données de neige

La part neigeuse des précipitations annuelles est analysée grâce aux moyennes annuelles de pluie et de neige de SAFRAN (Figure 19-A). Elle est de 20 à 30% pour les zones de moyenne montagne : Hautes-Alpes, Isère, Savoie et Haute-Savoie. Pour ces deux derniers départements, cette part neigeuse atteint au moins 30%, voir 50% dans le cas du massif du Mont-Blanc (orange & rouge). Elle est inférieure à 10% dans la vallée du Rhône et sur la côte Méditerranéenne.

A l'instar des précipitations, les chutes de neiges annuelles ne sont pas homogènes dans le temps (Figure 19-B). Tous les massifs montagneux ont connu des déficits de précipitations sur la période 2002-2006. Les zones de très haute altitude, sont les plus touchées, les déficits étant compris entre 250 et 450 mm d'équivalent en eau. Afin de compléter l'analyse en montagne, l'évolution des températures est expliquée dans la section suivante pour quantifier la fonte des neiges.

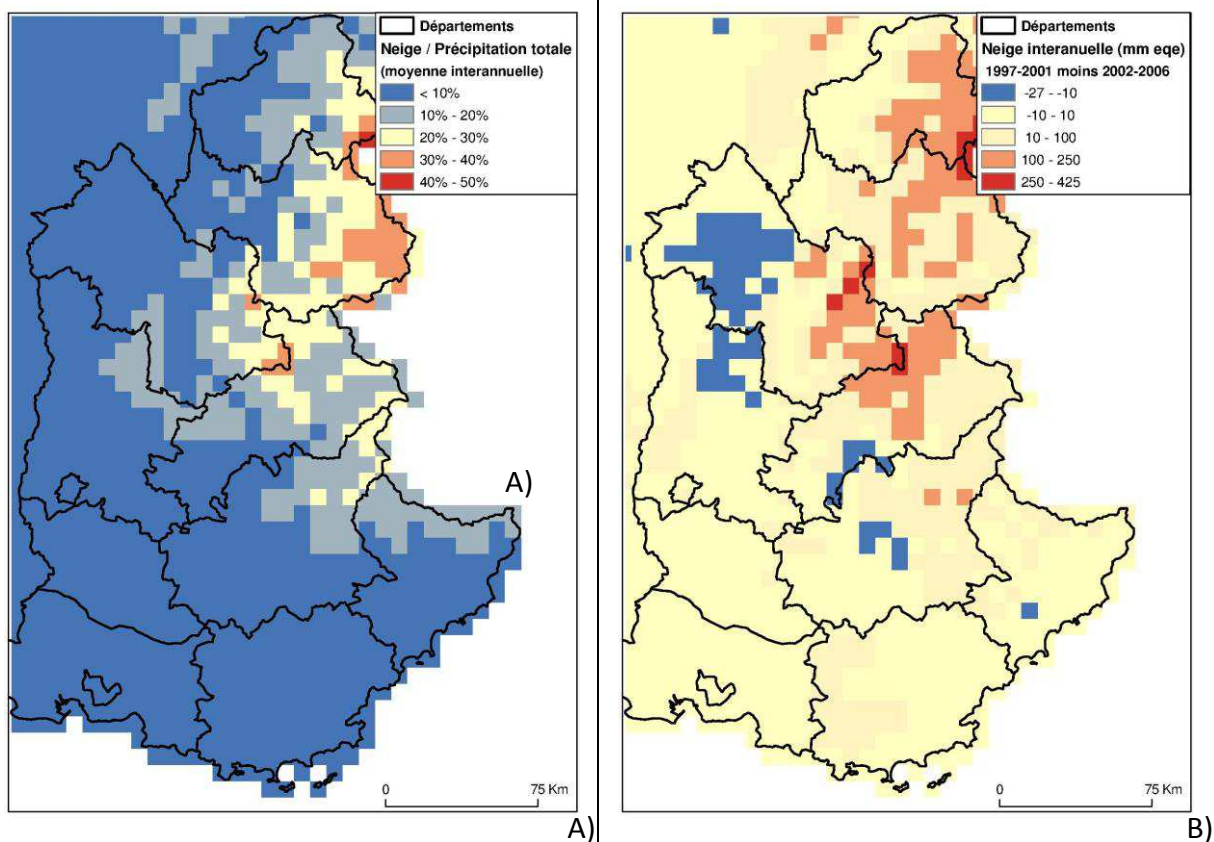


Figure 19 - Part de la neige dans les précipitations annuelles (A). Différence de neige moyenne annuelle entre les 5 premières années et les 5 dernières (B). Les valeurs sont exprimées en mm équivalent eau; les fortes valeurs indiquent une seconde période moins neigeuse sur les massifs (rouge).

2.3 Données de température

Les températures annuelles moyennes s'échelonnent (Figure 20-A), de 10°C à 15°C, pour la vallée du Rhône et les départements côtiers (orange et rouge), de 0 à 5°C pour la haute montagne (bleu-clair), avec un minimum de -4,5°C sur le Mont-Blanc (bleu-foncé), en passant entre 5 et 10°C en moyenne montagne (jaune).

Pendant la période 2002-2006, la plus chaude, ont été enregistrées des variations de la température moyenne de l'ordre de 0.5° par rapport à 1997-2001 (bleu gris sur la Figure 20-B). Cette variation atteint plus d'un degré dans le Nord des Alpes-Maritimes et des Alpes de Hautes-Provence ainsi que dans certaines agglomérations, telles que Grenoble et la vallée de Chamonix (bleu-foncé). A l'opposé, la vallée de la Durance connaît une diminution de 0.1 à 0.75°C de sa température moyenne annuelle (orange & rouge).

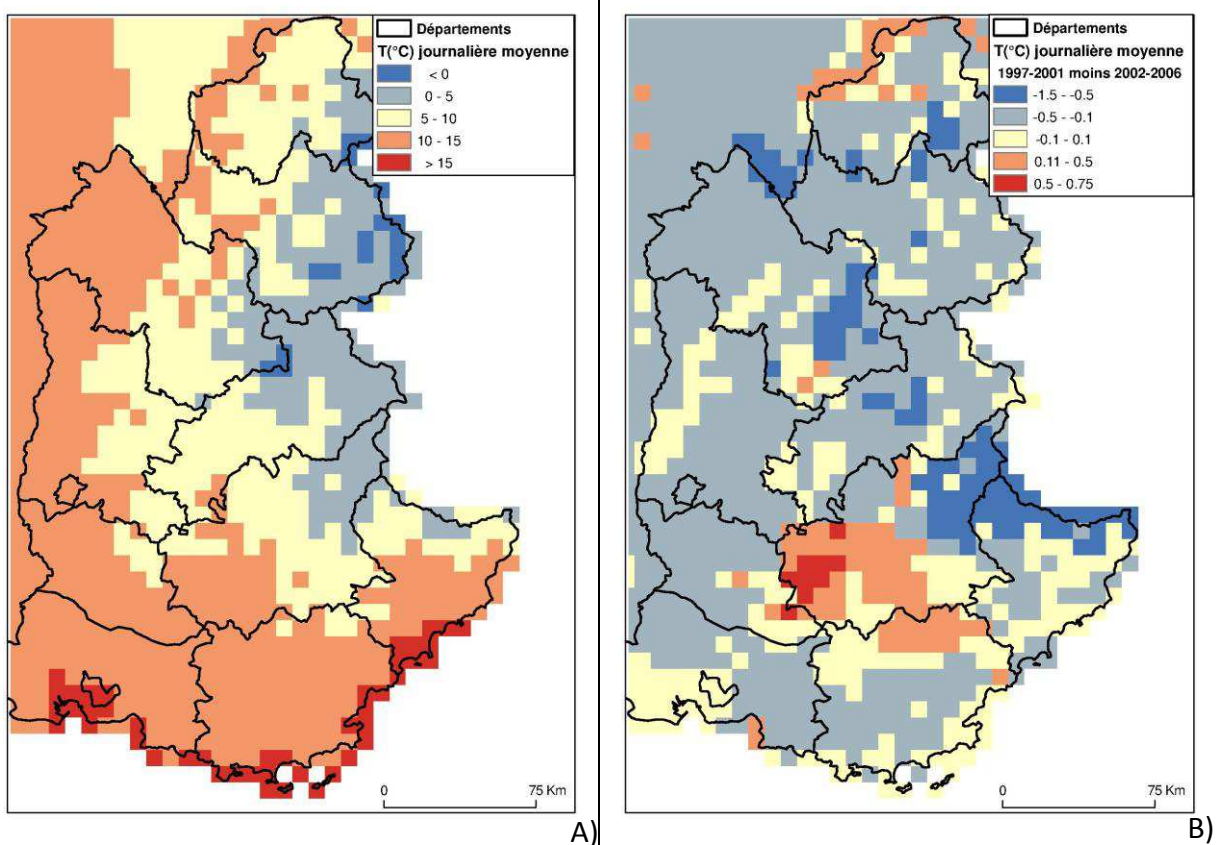


Figure 20 – Analyse de la température moyenne annuelle : moyenne sur 10 ans (A) ; différence de température entre les 5 premières années et les 5 dernières avec en bleu une température plus chaude pour 2002-2006 et en rouge l'inverse (B).

2.4 Données d'ETP

Sur le pourtour Méditerranéen et la vallée du Rhône, l'ETP moyenne annuelle est la plus forte, ses valeurs étant supérieures à 800 mm/an (maximum 923 mm/an) (Figure 21). Elle baisse légèrement en s'éloignant de ces régions, tout en restant supérieure à 600 mm/an. En moyenne montagne, ses valeurs atteignent les 400 mm/an. L'altitude étant un important facteur de diminution, ses valeurs les plus faibles, comprises entre 200 et 400 mm/an, sont enregistrées en haute montagne (Savoie, Haute-Savoie et Hautes-Alpes).

L'ETP varie très peu d'une année sur l'autre, comme l'indiquent plusieurs études, dont (Paturel et al. 1995). Une comparaison des cinq années les plus « froides » (1997-2001) aux cinq années les plus chaudes (2002-2006) n'a conduit qu'à une différence maximale inférieure à 10% sur la zone d'étude (carte non présentée).

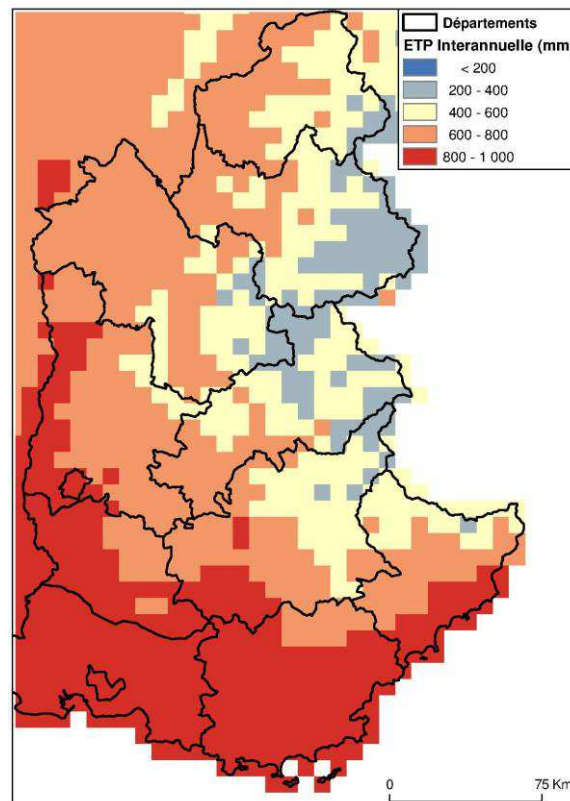


Figure 21 - Evapotranspiration potentielle annuelle (ETP), sur la période 1997-2006, calculée à partir de la température SAFRAN et de la formule d'Oudin.

Pluie (COMEPHORE) :

- Gradient nord-sud et gradient altitudinal, avec sous-estimation des pluies en altitude
- Période 1997-2001 plus humide que 2002-2006

Pourcentage de neige par rapport aux précipitations annuelles :

- Période 1997-2001 plus neigeuse que celle de 2002-2007
- Plus de 20% de neige sur l'ensemble des précipitations en montagne, voire plus de 30% en haute montagne

Température :

- Grande variabilité de la température sur la zone d'étude : moyenne de 15°C pour la Méditerranée et de -4.5°C pour les zones les plus élevées.
- Période 1997-2001 la plus froide avec une variation de l'ordre d'un demi-degré ; variation maximale en montagne de l'ordre d'un degré
- Exception de la Durance avec une période 2002-2006 légèrement plus froide

ETP :

- Gradients nord-sud et altitudinal
- Peu de variation sur les 10 ans

3 Analyse des bassins HYDRO et RTM

Afin de mieux caractériser les bassins versants HYDRO et RTM, définis au paragraphe 1.5, ces derniers sont analysés dans cette partie selon :

- leur emplacement par rapport aux hydro-écorégions (HER),
- leurs caractéristiques physiques,
- leur occupation des sols,
- leurs caractéristiques hydro-climatiques et saisonnières.

Analyse des résultats

Afin de simplifier la lecture des graphiques à venir, sont expliqués ici les 2 graphiques, qui, durant tout le manuscrit, présentent les caractéristiques des bassins versants et les résultats obtenus pendant la thèse.

La Figure 22-A est une boîte à moustaches : les moustaches renseignent les déciles de 10% et 90%. Les bords de la boîte délimitent le 1^{er} quantile (25%) et le 3^{ème} quantile (75%), la ligne noire en gras indique, quant à elle, la médiane et la croix rouge, la moyenne.

La Figure 22-B informe sur la distribution des résultats, sous la forme d'un graphique de fréquence cumulée, en fonction de la variable analysée. Les points noirs représentent les valeurs à 10%, 50% et 90%.

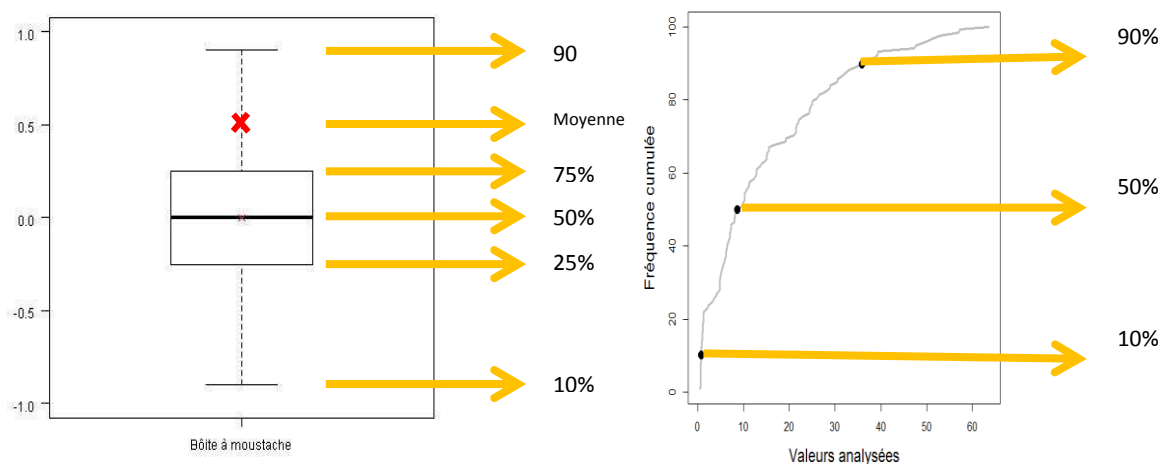


Figure 22 – (A) Représentation des distributions sous forme d'une boîte à moustache ; (B) représentation des distributions sous forme de fréquences cumulées.

3.1 Détermination de sous-régions selon les hydro-écorégions (HER)

Afin d'analyser plus finement les futurs résultats présentés dans cette thèse et aussi pour améliorer la régionalisation de nos modèles hydrologiques (chapitre 5), le découpage en hydro-écorégion a été utilisé. Ces sous-régions sont issus d'un projet de détermination d'hydro-écorégions réalisé par IRSTEA dans le cadre de la directive cadre européenne sur

l'eau (Directive 2000/60CE), visant l'amélioration, pour 2015, de l'état écologique des rivières. (Wasson et al. 2001)

Afin d'établir un diagnostic des cours d'eau, ce projet a défini les descripteurs permettant de comprendre les différents processus influençant les cours d'eau, dont la physique de l'eau. L'hydro-écorégion regroupe les régions spatialement homogènes au regard de la géologie, de la structure géomorphologique (relief) et du climat.

Deux découpages par entités homogènes existent : l'un comportant 22 sous-régions et l'autre 120. Afin d'assurer, à chaque sous-région, un nombre représentatif de bassins, le découpage en 22 hydro-écorégions est préféré. Il décompose la zone d'étude comme suit : Alpes Internes (jaune), Jura et Préalpes du Nord (rouge), Méditerranée (bleu), Préalpes du Sud (gris) (Figure 23).

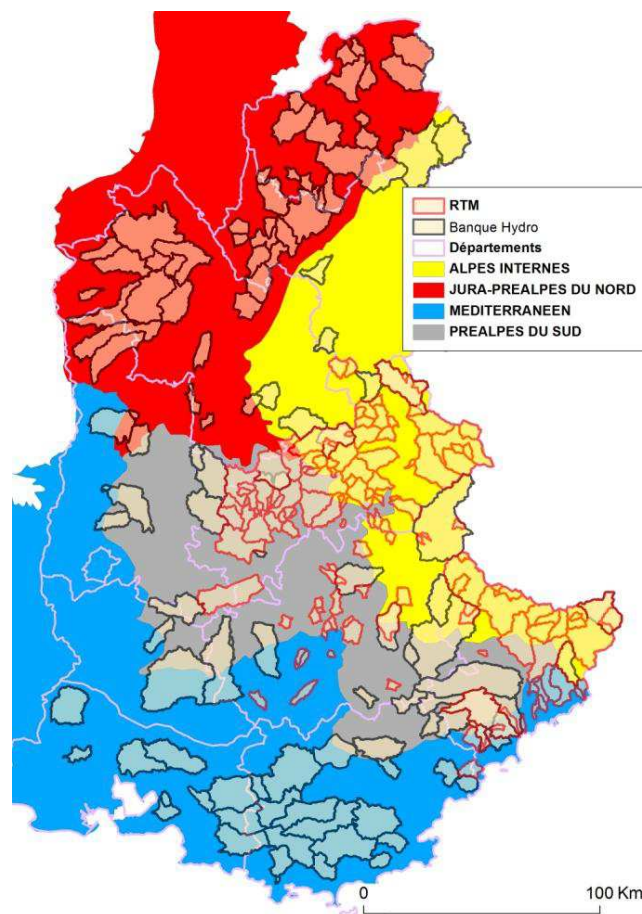


Figure 23 - Présentation des 4 hydro-écorégions et répartition des bassins HYDRO et RTM.

Sur les 118 bassins HYDRO (Figure 24-A), 48 se situent dans les Alpes-du Nord, 32, en Méditerranée, 24 dans les Préalpes du Sud et 14 dans les Alpes Internes. Pour les 123 bassins RTM (Figure 24-B), 63 sont localisés dans les Alpes Internes, 20, en Méditerranée et 40, dans les Préalpes du Sud. La répartition des deux échantillons au sein des HER n'est donc pas identique.

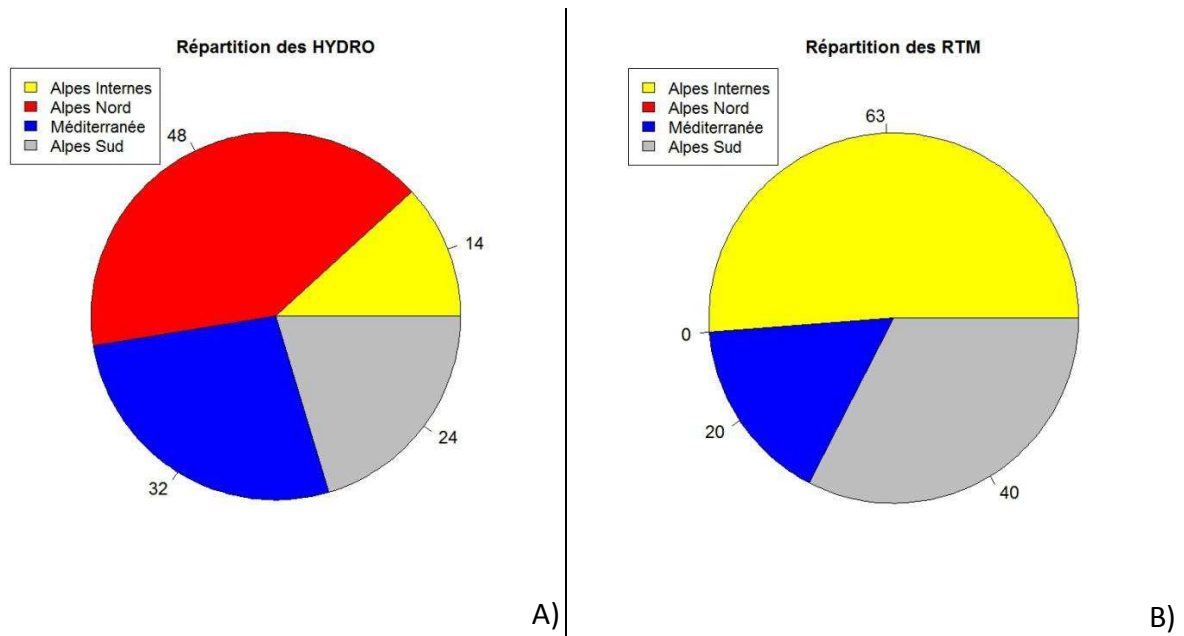


Figure 24 – Nombre de bassins versants par hydro-écorégion : A) HYDRO et B) RTM.

En 10 ans, sur les 123 bassins RTM, 179 signalements ont été rapportés : 97 dans les Alpes Internes, soit plus de la moitié, 50 dans les Préalpes du Sud et 32 sur la partie Méditerranée (Figure 25). La moyenne obtenue par bassin versant est de 1,45 signalement, oscillant entre 1,25 pour les Préalpes du Sud et 1,6 pour la Méditerranée.

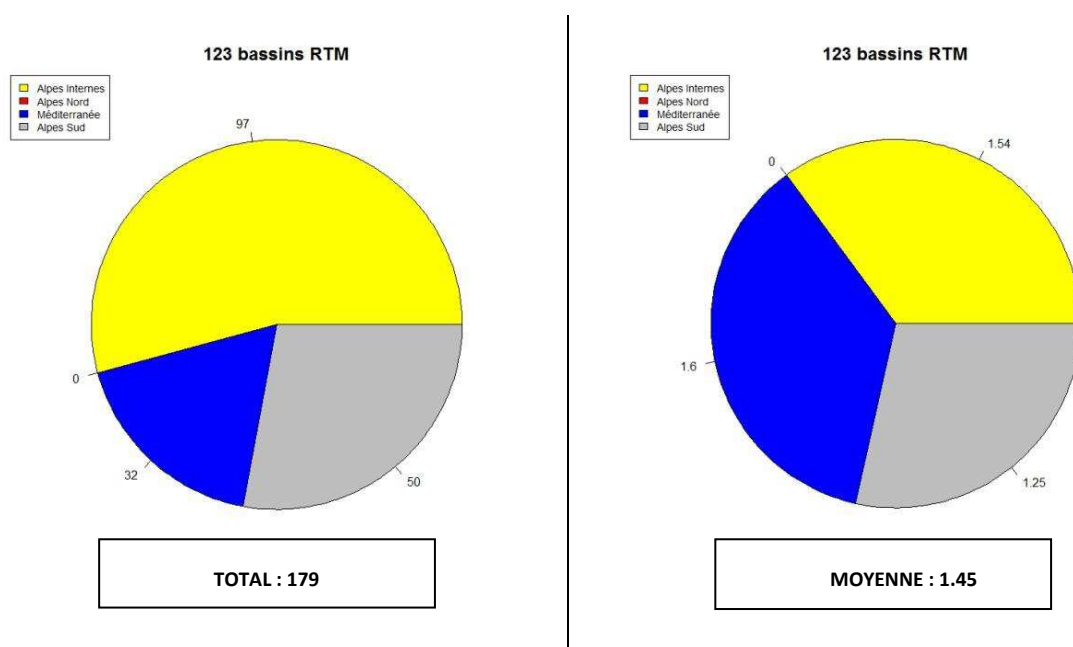


Figure 25 - Nombre de signalements RTM par hydro-écorégions. A gauche, le nombre total, à droite, le nombre par bassin.

3.2 Description physique des bassins versants

Travaillant sur les crues éclair, des contraintes sur la superficie des bassins versants ont été fixées afin d'élaborer nos deux échantillons (HYDRO et RTM). La superficie des bassins versants est donc comprise entre 5 km² et 850 km², les bassins HYDRO (en gris) étant plus grands que les bassins RTM (en pointillés). Ils ont respectivement des médianes de 110 km² et de 21 km² (Figure 26-A). Ainsi, les 10% des plus petits bassins HYDRO égalent la superficie médiane des RTM, soit 28 km². Alors que les 10% les plus élevés des bassins HYDRO et RTM atteignent entre 300 et 220 km². De faibles différences existent entre les 4 sous-régions HER (Figure 26-A-2). D'une part, les bassins des Alpes du Nord sont légèrement plus grands, d'autre part, les Alpes Internes et les Préalpes du Sud accusent une médiane et un 3^{ème} quartile plus faibles.

Les médianes des deux échantillons (Figure 26-B-1) sont situées à une altitude médiane relativement élevée, soit 650 m pour les bassins HYDRO et 1500 m, pour les bassins RTM, ce qui influence fortement leur climat. La petitesse des bassins RTM explique des altitudes médianes plus élevées, avec un 9^{ème} centile d'une altitude médiane de 2300 m. Les bassins des Alpes Internes (dont le massif du Mont-Blanc) sont les plus élevés, leur médiane plafonnant à près de 2000 m. La boîte-à-moustache (Figure 26-B-2) regroupant les deux échantillons (241 bassins) signale une forte variation altitudinale qui est un handicap dans l'élaboration d'un modèle hydrologique unique, à cause de la diversité des phénomènes liés à l'altitude. Le modèle ne sera que meilleur s'il parvient à ne pas dégrader les résultats obtenus en plaine, tout en améliorant les résultats en altitude.

Les pentes, sous le vocable de ratio de relief, sont définies comme étant la différence entre le point le plus haut et le plus bas du bassin, divisée par la longueur du tronçon hydrologique principal. Ce ratio de relief a des valeurs comprises entre 0 et 0.2 avec une valeur médiane de 0.09 pour les bassins RTM, soit deux fois plus élevée que celle des bassins HYDRO, comparables à celles de l'étude de Marchi, Borga et al. (2010) (Figure 26-C-1).

Cette description physique se conclut sur le calcul de la pente en fonction de la surface (Figure 26-D-1&2). Des bassins HYDRO (noir) et RTM (blanc), ces derniers sont les plus petits et aussi les plus pentus, avec des valeurs communes (pente entre 0.05 et 0.1 et surface entre 20 et 200 km²). Une analyse identique, mais opérée sur les HER, se termine sur des résultats similaires à l'étude de Marchi, Borga et al. (2010). Quelle que soit leur taille, les bassins des Alpes internes sont fort pentus (jaune), alors que les pentes des Préalpes du Sud décroissent plus vite avec l'altitude (gris). Quant aux bassins Méditerranéens (bleu), leurs pentes deviennent faibles lorsque les bassins sont grands. Les Alpes du Nord (rouge) renferment une grande variété de bassins (vallée du Rhône et zone montagneuse), ce qui se traduit par un éparpillement de points sur le graphique.

Comme présenté dans l'analyse précédente, les descripteurs de surface et de pente des bassins RTM sont comparables à ceux de Marchi, Borga et al. (2010). Ceci confirme que la zone d'étude est bien sujette aux crues éclair, ses caractéristiques physiques étant comparables à ce que nous trouvons dans la littérature.

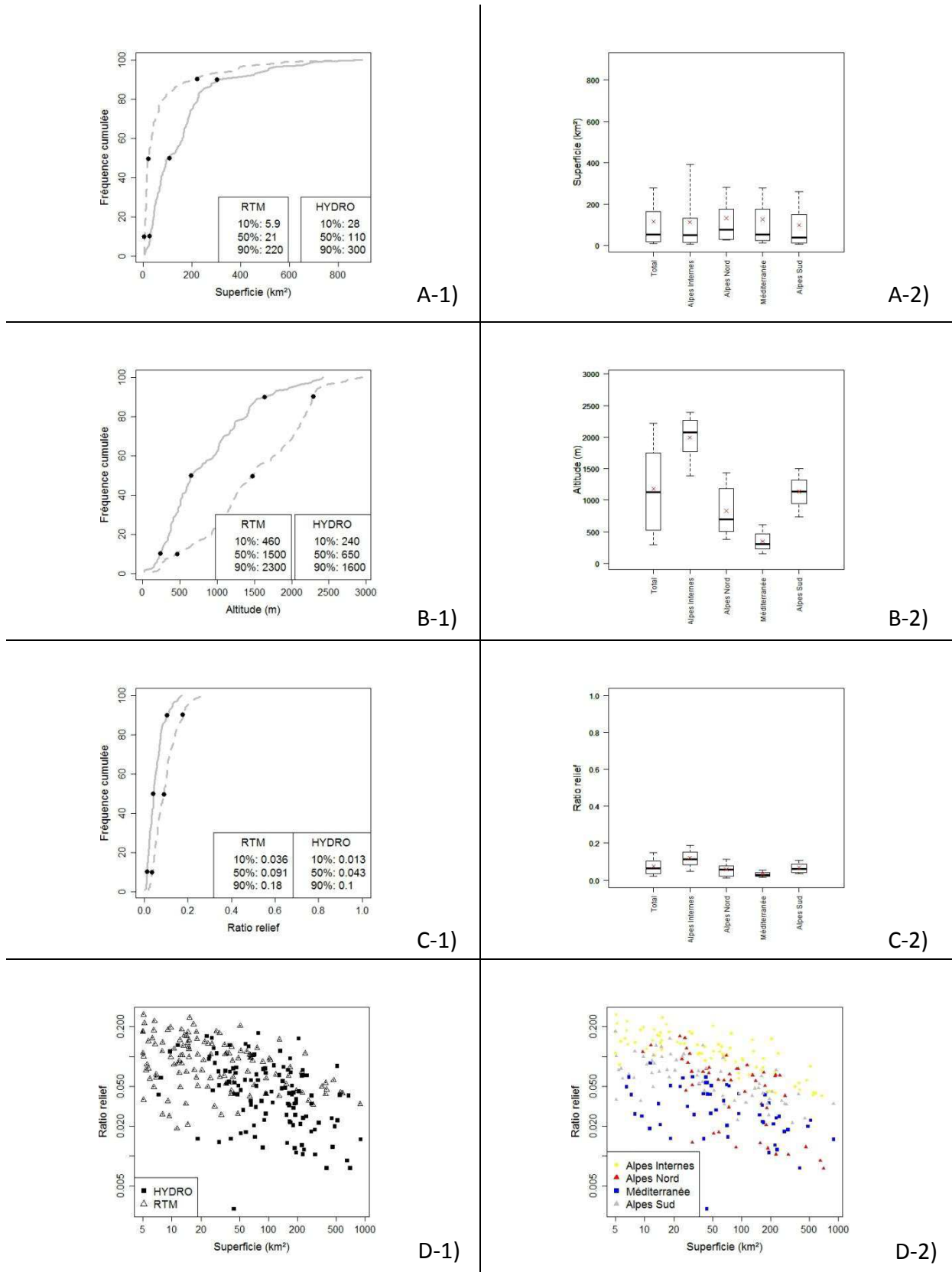


Figure 26 – Description physique des 241 bassins. Pour les graphiques de distribution à gauche, les RTM sont en pointillés et les HYDRO, en traits plein ; et à droite, la répartition en HER. (A) superficie en km² ; (B) altitude en m ; (C) ratio de relief (m/m) ; (D) ratio de relief en fonction de la surface : 1) RTM (triangles) et HYDRO (carrés) ; 2) par HER (HYDRO et RTM).

3.3 Occupation des sols

L'occupation des sols est renseignée par la base de données CORINE Land Cover, fruit d'un projet piloté par l'agence européenne de l'environnement, dont il existe trois versions (1990, 2000 et 2006) (Wikipedia 2013b). Cette tâche est effectuée, en France, par le service de l'Observation et des Statistiques du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD) du Ministère de l'écologie et du développement durable.

L'occupation des sols est qualifiée selon trois niveaux d'information. Mais pour la présentation des 241 bassins sélectionnés, seul le premier niveau, le moins précis, est utilisé avec ses 5 classes, que sont :

1. Les territoires artificialisés,
2. Les territoires agricoles,
3. Les forêts et milieux semi-naturels (Forêts, zones arbustives, glaciers, roches nues, etc.),
4. Les zones humides,
5. Les surfaces en eau.

Les bassins versants (HYDRO et RTM) sont très peu artificialisés (Figure 27-A-1) avec pour seule exception notable, 10% des bassins versants localisés en région Méditerranée qui sont occupés à hauteur d'un minimum de 20% (Figure 27-A-2).

Les terres agricoles occupent une superficie modeste des bassins HYDRO, leur médiane étant de 16% (Figure 27-B-1). Alors que leur occupation est maximale dans les Alpes du Nord et, dans une moindre mesure, sur la Méditerranée, les médianes atteignant respectivement 40% et 20% (Figure 27-B-2).

Les zones forestières et semi-naturelles (Figure 27-C-1) recouvrent en majorité les bassins versants, les médianes étant de 96% pour les bassins RTM et de 80%, pour les bassins HYDRO. Les valeurs les plus élevées sont atteintes par les bassins des Alpes Internes et des Préalpes du Sud, avec des 3^e quartiles respectivement de 90% et 80%.

Concernant les autres classes d'occupation, zones humides et surfaces en eau, le pourcentage d'occupation est nul. Les bassins versants étudiés étant peu urbanisés, l'agriculture et surtout les espaces naturels occupent l'essentiel des sols. Les Alpes Internes et les Préalpes du Sud sont particulièrement peu altérées par les activités humaines.

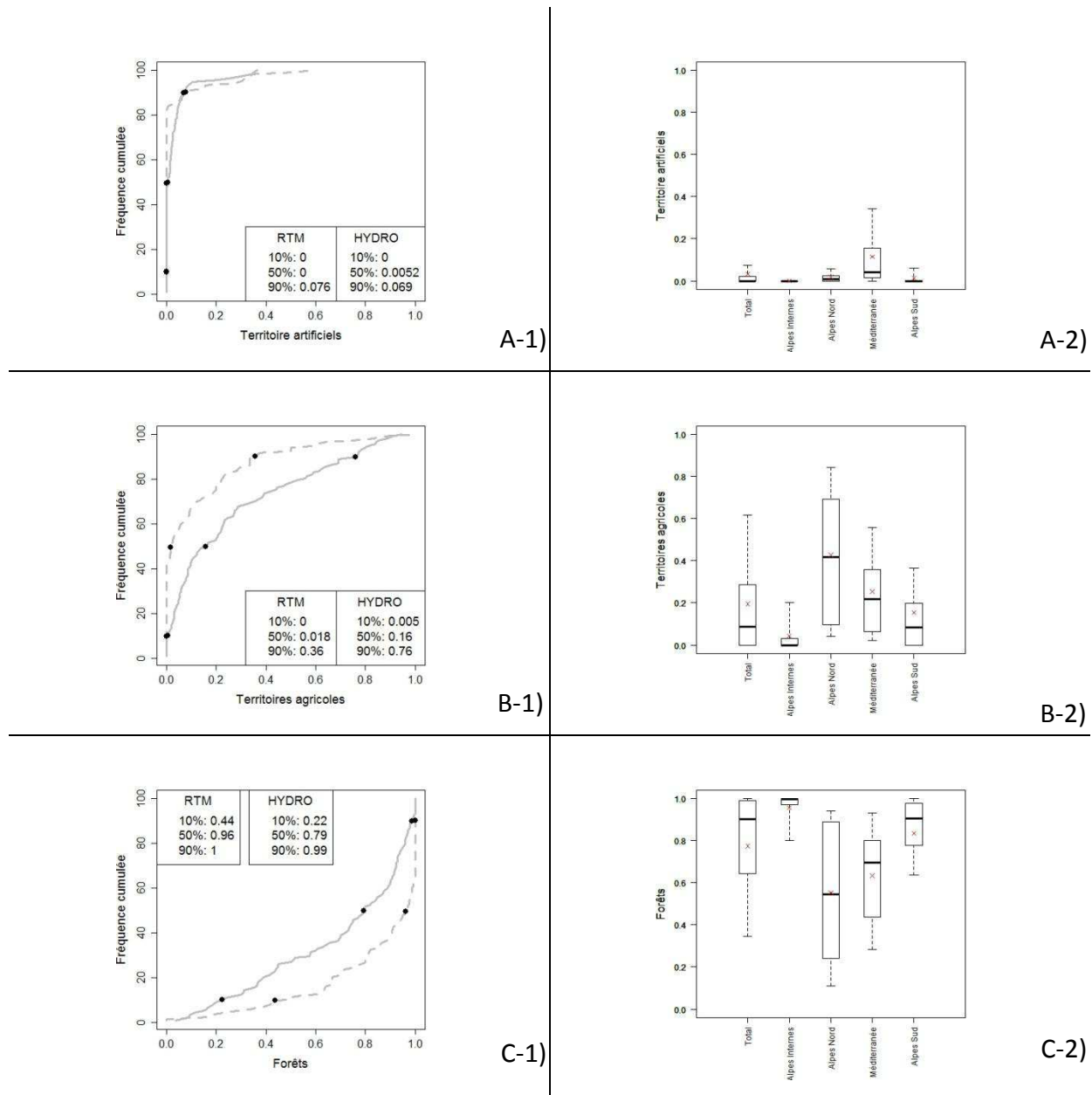


Figure 27 – Occupation des sols des bassins versants HYDRO (trait plein) et RTM (pointillés) (à gauche) et échantillon complet en fonction des HER (à droite). (A) territoires artificiels ; (B) terrains agricoles et (C) zones de forêts et semi-naturelles.

3.4 Caractéristiques hydro-climatiques

A l’instar des caractéristiques physiques, les bassins versants des deux échantillons ont également des caractéristiques hydro-climatiques contrastées. Celles-ci sont importantes pour orienter le choix des améliorations à apporter à la méthode AIGA. Elles permettront de mieux analyser les performances des modèles développés pendant cette thèse. L’analyse commence par la présentation des 118 bassins versants HYDRO sur le graphique de Le Turc-Bodyko et se poursuit sur les deux échantillons, avec les données climatiques à l’échelle des bassins versants. Celles-ci sont les mêmes que celles décrites précédemment : précipitation, neige, ETP, température.

Sur la Figure 28, est représenté le graphique de Le Turc-Budyko (Andréassian et Perrin 2012) avec les 118 bassins versants de l'échantillon HYDRO. Le rapport débit sur précipitation (Q/P) est représenté en ordonné avec la valeur remarquable 1 (trait bleu-ciel): les bassins situés au-dessus de cette valeur subissent soit une sous-estimation des pluies soit un apport d'eau souterraine. La courbe orange représente une limite de bilan d'énergie ($Q=P-E$). Sous cette courbe, les bassins ont soit une perte d'eau souterraine soit une surestimation des précipitations. Les deux courbes (orange et bleue) délimitent donc un domaine où les bassins n'ont normalement pas d'échange avec l'extérieur ni d'erreurs sur l'estimation des précipitations. Cependant, ces deux problèmes peuvent se compenser et faire apparaître le bassin versant dans le domaine de validité (Andréassian et Perrin 2012).

Ce graphique met en évidence que certains bassins connaissent une sous-estimation de la pluie, supérieure à la courbe bleue (ou un apport souterrain) dans les Alpes Internes, alors que pour d'autres (surtout dans les Alpes du Nord) il s'agit d'une surestimation de la pluie (ou une perte souterraine). De plus, les différences entre les quatre hydro-écorégions sont remarquables. La zone Méditerranée (en bleu) se situe en bas à gauche, ce qui signifie que les précipitations sont faibles par rapport à l'ETP et que la majorité des précipitations s'évaporent et ne s'écoulent pas dans les cours d'eau (Q/P faible). Les Préalpes du Sud (en gris) sont proches de la Méditerranée, mais le rapport $P/E0$ est légèrement plus élevé, signifiant que les bassins de cette HER reçoivent plus de précipitations et ont une ETP plus faible, en relation avec leur altitude plus élevée que celle des bassins méditerranéens. Les Alpes du Nord (en rouge) se caractérisent par une forte variabilité des régimes hydrologiques, avec des rapports $P/E0$ s'étalant de 1 à 3,5 et un rapport Q/P majoritairement proche de 0,5. Finalement, les bassins des Alpes Internes ont des précipitations plus élevées, avec des rapports $P/E0$ de l'ordre de 2 et des débits plus élevés, dont les plus fortes valeurs du rapport Q/P sont semblables à celles de certains bassins des Alpes du Nord.

Dans notre échantillon HYDRO, il y a donc des régimes très variés entre les HER. De plus, l'hydrogéologie influence les régimes de certains bassins, qui subissent soit des apports souterrains (surtout les Alpes du Nord) soit des pertes. Ces deux constatations peuvent également être liées à la connaissance des précipitations, qui, dans le premier cas, sont surestimées et dans le second, sous-estimées. Ce fait est fréquent en haute-montagne où il n'y a ni radar, ni pluviomètres. Afin de comparer les échantillons HYDRO et RTM, l'analyse se poursuit avec les descripteurs climatiques ci-dessous.

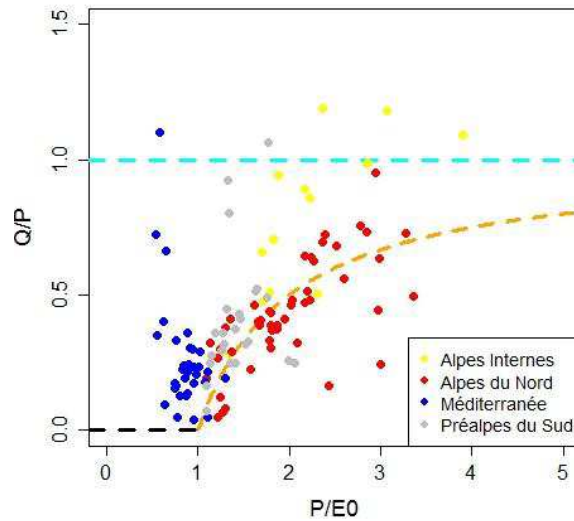


Figure 28 – Graphique de Le Turc-Bodyko représentant le rapport débit/précipitation (Q/P adimensionnel) en fonction du rapport précipitation/évapotranspiration potentielle (P/E0). Les points représentent les 118 bassins HYDRO et la couleur la HER associée à leur localisation.

L'analyse pluviométrique (à retrouver à la partie 2.1) a démontré l'existence d'un gradient Nord-Sud, ainsi que des précipitations augmentant avec l'altitude. Ceci est perceptible sur les bassins HYDRO, recevant entre 500 et 2000 mm/an, et sur les bassins RTM, entre 600 et 1400 mm/an (Figure 29-A-1). Les cumuls, beaucoup plus élevés (médiane 1200 mm/an) dans les Alpes du Nord (où il n'y a que des bassins HYDRO), expliquent la différence de cumuls entre les deux échantillons (Figure 29-A-2).

Majoritairement localisés en zones montagneuses (Alpes Internes), les bassins RTM reçoivent, sur plus de 50% d'entre eux, au moins 25% de leur précipitation annuelle sous forme neigeuse (Figure 29-B-1/2) ; la sous-région la plus neigeuse étant les Alpes internes, avec une médiane à 40%. Au contraire, les bassins HYDRO sont moins concernés par la neige : 50% d'entre eux recueillent moins de 10% de précipitations neigeuses. Le défi, pour développer un modèle hydrologique, est ici d'intégrer la neige, dont la présence ou l'absence varie fortement d'une région à l'autre, tout en conservant des résultats non dégradés, dans les régions sans événement neigeux.

L'évapotranspiration potentielle est calculée à partir de la température journalière dans la formule d'Oudin (Oudin et al. 2005). De ce fait, les observations entre l'ETP et la température sont identiques (Figure 29-C et Figure 29-D). L'ETP est plus forte sur les bassins HYDRO (médiane de 690 mm/an) que sur les bassins RTM (médiane de 560 mm/an) (Figure 29-D-1). Cela s'explique dans la répartition géographique des bassins versants, l'ETP étant plus faible en altitude. Ainsi, les ETP les plus faibles s'observent dans les Alpes internes (médiane de 450 mm/an), et les plus fortes, en Méditerranée (médiane de 850 mm/an) (Figure 29-D-2), les Préalpes du Sud et les Alpes du Nord se situant entre ces deux extrêmes.

Les caractéristiques hydro-climatiques achèvent la description précise des bassins versants. L'analyse des données nécessaires à la modélisation se poursuit par les événements de crues, dans la dernière partie de ce chapitre.

Différences entre les HER liées à l'altitude:

- Précipitations importantes en montagne avec une part conséquente de neige
- Débits annuels plus importants
- T° et ETP
- Pente

Différences entre les bassins HYDRO et les RTM :

- Superficie plus importante pour les bassins HYDRO
- Altitude des bassins RTM plus élevée

Caractéristiques physiques des bassins :

- Similaire à d'autres études sur les crues éclair (Marchi et al. 2010)

Occupation des sols :

- Bassins majoritairement occupés par des territoires naturels
- Urbanisation négligeable

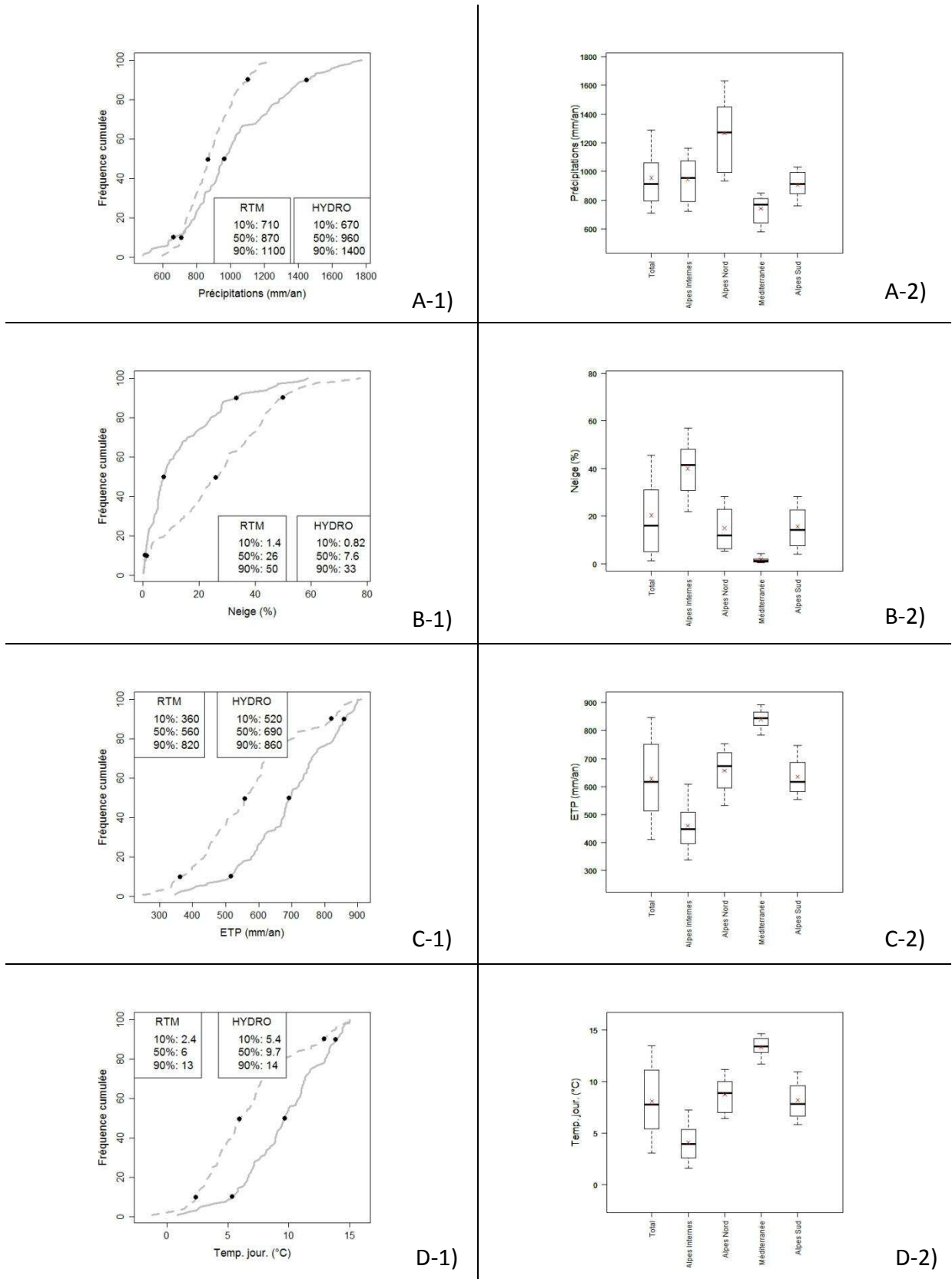


Figure 29 – Description hydro-climatique des 241 bassins versants. Pour les graphiques à gauche, les RTM sont en pointillés gris et les HYDRO en trait plein gris. A gauche, les distributions et à droite, la répartition en HER. (A) Précipitations annuelles COMEPHORE en mm ; (B) Pourcentage de la part neigeuse sur les précipitations annuelles ; (C) ETP annuelle en mm ; (D) Température journalière moyenne (°C).

4 Caractérisation des événements pluie-débit

La méthode AIGA, présentée au chapitre 1 (section 3.4), est composée d'un modèle événementiel pour reproduire les débits pendant les crues. Cette technique de modélisation implique de déterminer des événements pluie-débit pour adapter la méthode AIGA aux zones de montagne afin de répondre au premier objectif de cette thèse. A partir des 10 ans de données radar COMEPHORE et des deux échantillons de bassins versants (HYDRO et RTM), les événements sont déterminés d'une manière automatisée à l'aide d'un seuil de pluie de bassin journalière fixé à 10 mm/jour (4.1). Sur l'ensemble des 118 bassins HYDRO, 26000 événements sont obtenus ainsi que 26000 autres événements pour les 123 bassins RTM. Tous ces événements (52000) sont ensuite étudiés en fonction du nombre d'événements par bassin (4.2), de l'intensité des pluies (4.3), de l'importance des débits pour les bassins HYDRO (4.4) et finalement de la saisonnalité des crues et des signalements de dégâts (4.5).

4.1 Constitution des événements pluie-débit

Dans la méthode AIGA opérationnelle, utilisée par les services de prévision de crues, la modélisation est réalisée d'une manière continue par un modèle hydrologique événementiel. Il faut donc tous les jours déterminer si un événement est en cours depuis la veille ou si nous avons à faire à un nouvel événement ce qui implique la réinitialisation du modèle événementiel. Le début et la fin des événements sont alors définis automatiquement en fonction d'un seuil de pluie :

- Si la pluie journalière de la veille est supérieure à 10 mm, le modèle ne se réinitialise pas, il est au cœur d'un événement ;
- Si elle est inférieure à 10 mm, il s'initialise.

Sur la Figure 30, afin d'approcher ce découpage en événements à partir des données de pluies continues COMEPHORE, les chroniques de dix années de pluie journalière de bassins sont analysées et comparées au seuil de 10 mm. Sur chaque bassin, un événement commence lorsque la pluie journalière dépasse les 10 mm (1^{er} bâtonnet bleu clair). Il s'arrête à la fin de la journée où la pluie est repassée sous le seuil (bâtonnet vert). Dit autrement, le modèle est réinitialisé tous les jours sauf quand les précipitations journalières sont supérieures à 10 mm. Un événement est donc associé à une date et un bassin donné et une durée, ce qui signifie qu'à une même date plusieurs bassins peuvent subir une pluie supérieure à 10 mm. Ainsi, plusieurs événements peuvent être déterminés pour une même date de départ et éventuellement de fin. Dans cette thèse, est désigné comme événement un couple date-bassin.

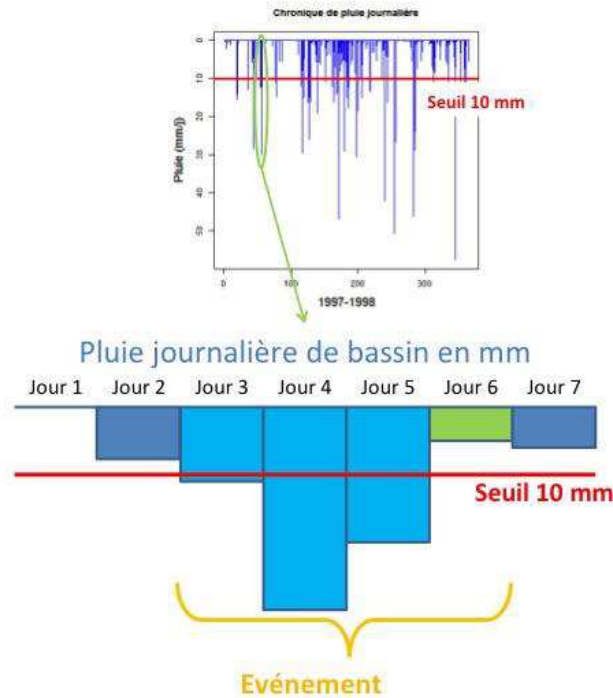


Figure 30 – Chronique de la pluie de bassin journalière et exemple de définition d'un événement, représenté par l'accolade orange, pour un seuil de 10mm (rouge).

Pour les bassins HYDRO, une critique automatique des débits est faite afin de ne conserver que les événements dont les données de débits ont une qualité satisfaisante pour la modélisation. S'appuyer sur un grand nombre de bassins versants, pour une période de dix ans, empêche toute analyse manuelle des débits, cependant, des données de qualité sont essentielles au développement de modèles hydrologiques ainsi qu'à l'identification des points faibles de ceux-ci (Andréassian et al. 2009). La présence de quelques données suspectes n'influence que légèrement le résultat, au regard de la taille de l'échantillon. A toutes fins de garantir un niveau de qualité acceptable, les données de débits doivent respecter certaines conditions.

Les données débitmétriques des 118 bassins HYDRO utilisées sont des chroniques de débits instantanés (pas de temps variables) qui sont transformées en chroniques de débits au pas de temps horaire. L'enregistrement des débits est néanmoins contrôlé à plusieurs étapes, d'abord à partir des outils mis à disposition par la banque HYDRO pour un contrôle sur la qualité de la donnée et ensuite par des filtres automatiques mis en place dans cette thèse. La sélection des événements s'est donc faite au travers de plusieurs critères.

D'abord, à partir de la banque HYDRO, le critère de validité assure de l'état de l'enregistrement. Est-il bon (9), bien reconstitué (8), douteux (5), ou inconnu (0) ? Il n'a pas été employé ici, car il ne semblait pas perspicace, des données contenant des lacunes pouvant être qualifiées de bonnes. Toujours à partir des outils de la banque HYDRO, la présence ou l'absence de lacunes, dans la chronique, ont été prises en compte. Ainsi, au cours d'un événement, si une lacune est signalée par la banque HYDRO, l'événement n'est pas retenu.

Aux critères de la banque HYDRO, insuffisants pour trier les chroniques de débits, ont été adjoints deux critères, appliqués à chaque événement.

- Pour chaque crue, à l'absence de lacunes, s'ajoute l'obligation d'avoir 5 points de mesures valides au minimum, dont 3 points de mesures pendant l'événement, 1 avant et 1 après. En disposant d'un minimum de points, il est possible de reconstituer un hydrogramme de crue rudimentaire avec une pointe de crue.
- De plus, la chronique ne peut être valable, si la valeur du débit est identique sur toute la durée de l'événement ; ce qui provient d'un problème d'enregistrement. Afin de détecter automatiquement ces chroniques indésirables, le débit minimal doit différer de son maximum.

Par ce filtrage automatique, des couples date-bassins (les événements) aux débits douteux ont été supprimés, et permet d'arriver à la sélection de l'ordre de 26000 événements, pour les bassins HYDRO. Cette quantité rend difficile tout test visuel, qui n'a donc pas été effectué.

Pour les deux échantillons de bassins versants (HYDRO et RTM), 52000 événements (couple date-bassin) sont ainsi déterminés : 26000 pour chaque échantillon. Pour les RTM, ils sont définis exclusivement à partir du seuil de pluie de 10 mm / jour. Pour les HYDRO, en plus de ce seuil, une critique des débits élimine les événements (couple date-bassin) où les débits sont d'une qualité non satisfaisante. Ces événements sont par la suite analysés en fonction de leur nombre par bassin, du cumul et de l'intensité des pluies et des débits (restreint à l'échantillon HYDRO), et finalement de leur saisonnalité.

4.2 Nombre d'événements

Chaque bassin versant dispose de 70 à 388 événements (couple date-bassin) (Figure 31), la médiane étant à 200, quel que soit l'échantillon de bassins. Cependant, les bassins HYDRO ont une plus forte variabilité : les centiles à 10% et à 90% indiquant, respectivement, 110 et 350 événements, comparés, pour les mêmes centiles, aux 160 et 250 événements des bassins RTM. Cet écart trouve son origine dans la HER des Alpes du Nord, qui ne dispose que de bassins HYDRO, dont la médiane est supérieure à 300 événements, à cause du type de précipitations de cette région, principalement associées à des dépressions océaniques. Dans les trois régions, les événements sont légèrement plus nombreux dans les bassins RTM que dans les bassins HYDRO. Alors que les Alpes internes et les Préalpes du Sud ont une médiane aux alentours de 200 événements, la Méditerranée est fortement déficitaire, sa médiane étant à environ 150 événements, et dispose d'une variabilité plus faible que les autres HER. Cette constatation est due au fait que les événements sont élaborés à partir d'un seuil fixe de 10 mm/jour pour l'ensemble de la zone d'étude. Une sélection à partir d'un quantile de pluie aurait conduit à des nombres similaires d'événements par région.

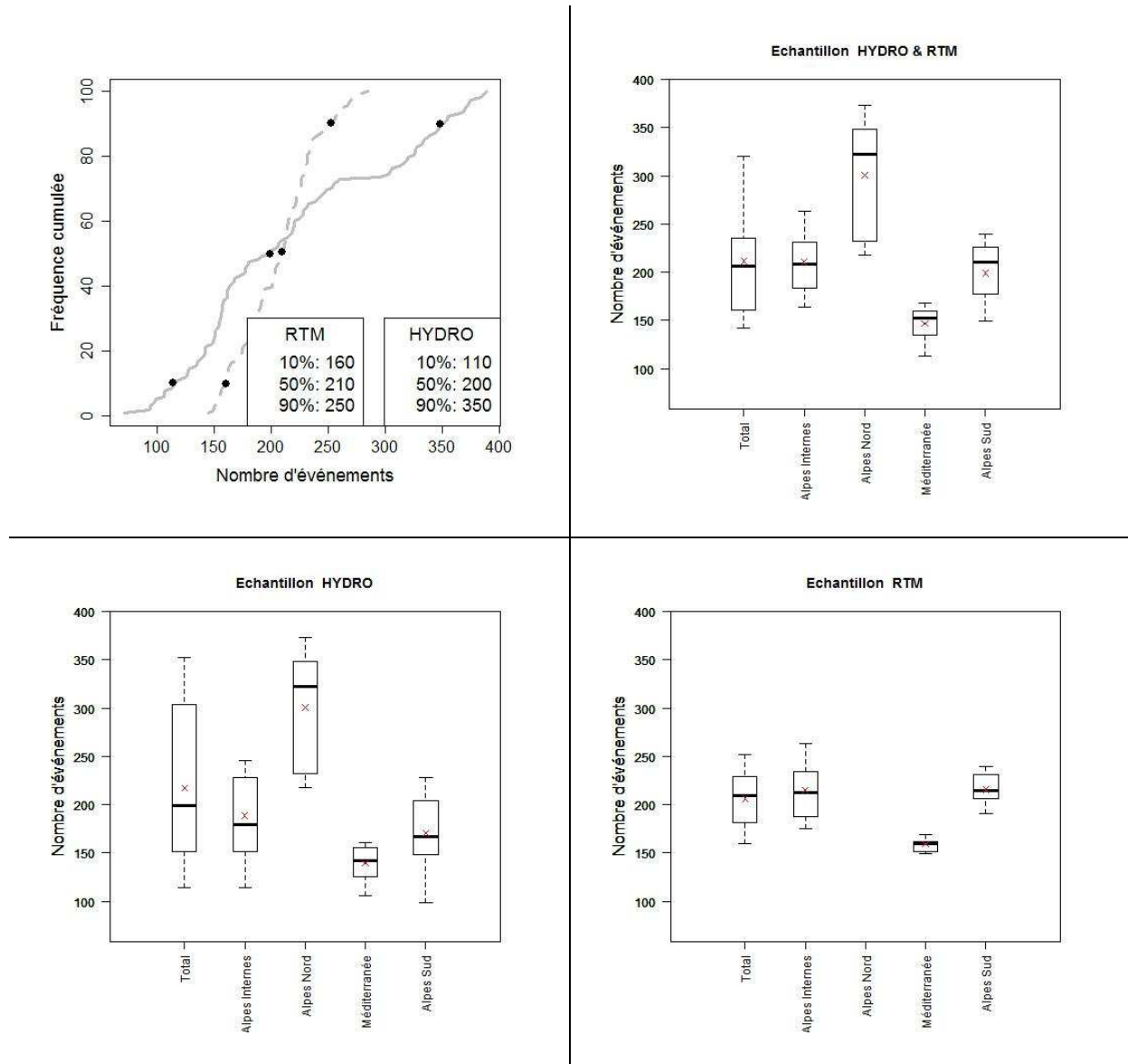


Figure 31 - Nombre d'événements pluviographiques

4.3 Cumul et intensité des événements

Les bassins HYDRO et RTM partagent un même cumul des précipitations, avec une médiane d'environ 25 mm par événement (Figure 32, au-dessus) ; les 10% des événements les plus pluvieux culminant à plus de 60 mm. L'analyse par HER montre les mêmes résultats, si l'on excepte la Méditerranée dont la moyenne est légèrement plus élevée.

L'analyse des intensités maximales journalières, lors des événements, est identique à celle des cumuls de précipitations. Les 10% des pluies journalières les plus intenses sont de l'ordre de 40 mm/jour (Figure 32). La Méditerranée présente ici encore des résultats légèrement supérieurs.

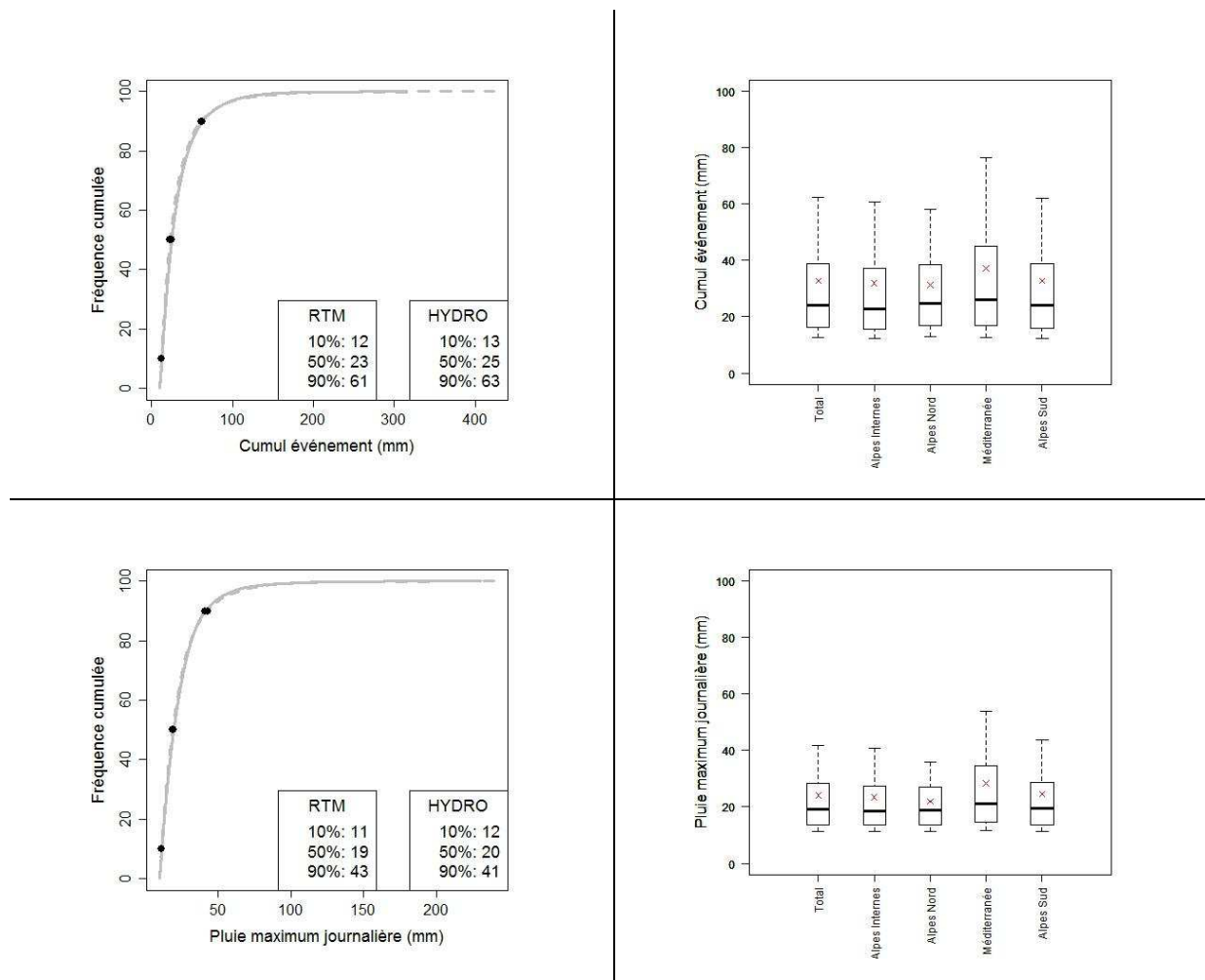


Figure 32 – Le graphique de gauche présente la distribution des deux échantillons et le graphique de droite, la représentation de l'échantillon total par HER. Au-dessus, le cumul des précipitations par événement ; en dessous, l'intensité par événement.

4.4 Description des débits associés aux événements des bassins HYDRO

Pour chaque événement, le débit initial et le débit maximum sont analysés. Afin de s'affranchir d'éventuels biais liés à la superficie, dans la comparaison des bassins entre eux, tous les débits sont transformés en débits pseudo-spécifiques (exposant 0,8):

$$\text{Debit}_{\text{spécifique}} = \frac{\text{Debit}}{\text{superficie}^{0.8}} \text{ en m}^3/\text{s}/\text{km}^2 \cdot 0.8 \quad (3)$$

Du fait d'un découpage réalisé sur la pluie, pour des bassins aux temps de réponses plus élevés, la fin de la crue peut ne pas être prise en compte dans l'événement pluie-bassin. Cependant, comme pour 90% des bassins HYDRO, la superficie est inférieure à 300 km², le temps de réponse est de l'ordre de quelques heures et ce phénomène reste limité. Dans la majorité des cas, l'événement déterminé sur la pluie comprend l'intégralité de la crue.

Sur la Figure 33, sont présentés les débits pseudo-spécifiques initiaux des événements pour les 118 bassins HYDRO, à gauche et les débits pseudo-spécifiques maximums, à droite. Les sous-régions HER sont fortement contrastées entre elles. Dans les

Alpes internes, les débits initiaux sont importants, correspondant à un écoulement annuel conséquent, sans doute lié au stockage neigeux et aux précipitations plus fortes, dans le nord et en montagne. A l'inverse, la région Méditerranée a des valeurs de débits initiaux proches de $0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2^{0.8}$. Les deux autres HER présentent des caractéristiques entre ces deux extrêmes. De telles différences devront être prises en compte lors de l'amélioration de la méthode AIGA.

Pour les débits maximums, les plus forts débits sont rencontrés dans les Alpes Internes et les Alpes du Nord. Le seuil de pluie de la sélection des événements étant relativement faible, beaucoup d'événements ne produisent pas de crues éclair, ce qui explique des valeurs faibles pour les médianes de chaque sous-région (trait noir épais). Cependant, des événements plus importants sont aussi présents parmi les 26000 événements, ce qui perceptible par les moyennes des débits maximums (croix rouge) qui sont fortement supérieures aux médianes.

Pour résumer sur les bassins HYDRO, les débits des événements sont contrastés entre les sous-régions HER, avec des débits initiaux forts dans les Alpes Internes et faibles en Méditerranée, ainsi que des débits maximums plus élevés en montagne. De plus, au vu de la distribution (médiane/moyenne) des débits maximums, certains événements sont plus « extrêmes » que la majorité des événements déterminés à partir du seuil de 10 mm/jour sur la pluie, et une analyse par saison de ces crues est pertinente.

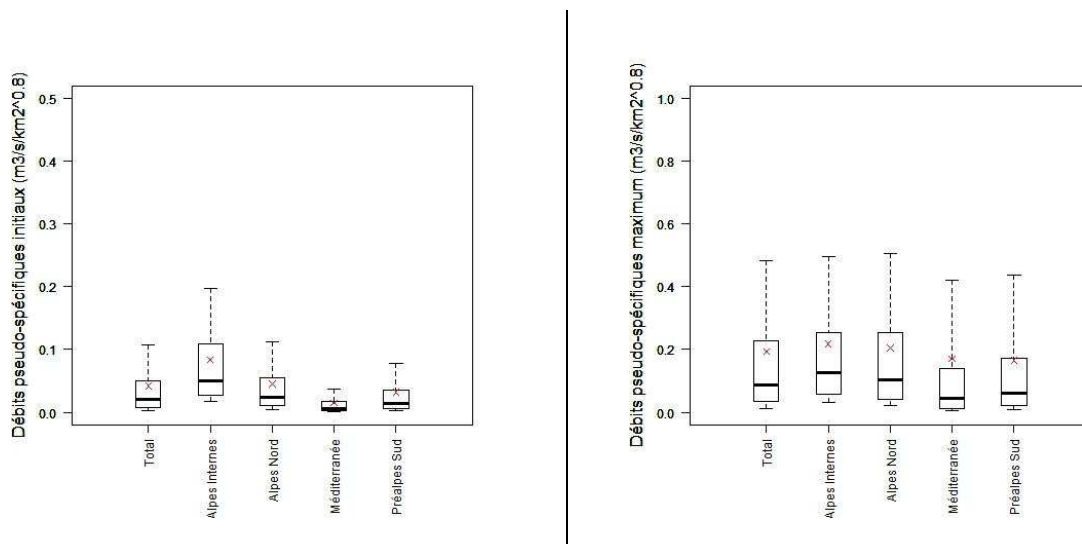


Figure 33 – Analyse des débits sur l'échantillon HYDRO complet (118 bassins) et par sous-région HER. A gauche sont présentés les débits pseudo-spécifiques initiaux pour tous les événements ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2^{0.8}$) et à droite, les débits pseudo-spécifiques maximums ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2^{0.8}$) durant les mêmes événements.

4.5 Saisonnalité des crues et des signalements RTM

Pour étudier la saisonnalité des crues, un seuil de **dépassement de 2 ans**, résultant des travaux de (Carpenter et al. 1999) a été choisi. Sur les bassins HYDRO (Figure 34), la moitié (50%) des crues se déroulent en automne, 30%, en hiver, 10%, au printemps et 10%, en été. Quant aux bassins RTM, 75% des signalements sont enregistrés en automne et 25%, en été. Il n'y a que six signalements sur les 179 qui sont renseignés en hiver et au printemps. L'automne s'impose comme la saison privilégiée des crues et des signalements RTM.

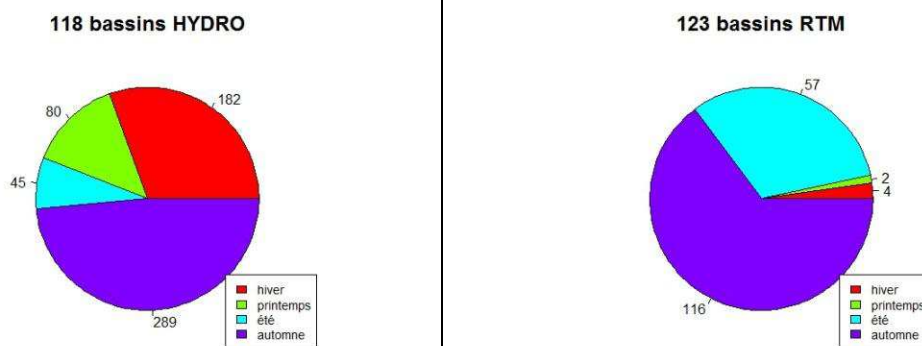


Figure 34 – Saisonnalité des crues (> 2 ans « expérimental ») (à gauche) et des signalements RTM (à droite).

En regardant du sud vers le nord, il apparaît que les hydro-écorégions n’ont pas leurs crues et leurs signalements aux mêmes saisons (Figure 35). En Méditerranée, la moitié des crues se déroulent en automne, l’autre moitié, en hiver. Cette double saison de crues n’est pas liée à une cause climatique mais plutôt à la localisation des bassins versants dans cette vaste région, qui englobe le sud de la vallée du Rhône et la côte jusqu’à la frontière italienne. Dans les Préalpes du Sud, 75% des crues surviennent en automne et 20%, en hiver. Dans les Alpes internes, la moitié des crues est automnale, 30% sont déclenchées par les orages de montagne en été, et les 20% restant sont liées à des phénomènes de fonte au printemps et à des passages de fronts océaniques l’hiver. Quant aux Alpes du Nord, une HER fortement hétérogène regroupant le nord de la vallée du Rhône et des massifs montagneux, les crues sévissent pareillement sur toute l’année, quoi qu’un peu moins l’été.

La variabilité sud-nord est plus faible pour les signalements RTM. Dans les HER Méditerranée et Préalpes du Sud, plus de 75% des signalements sont enregistrés l’automne. Contrairement aux crues, les signalements l’été sont ici négligeables. Dans les Alpes internes, la moitié des signalements est observée en automne, l’autre moitié, en été.

Caractéristiques des événements pluvieux:

- Nombre plus élevé pour les bassins RTM
- Nombre maximum pour les Alpes du Nord et minimum pour la Méditerranée
- Intensité et cumul légèrement plus importants pour la Méditerranée

Débits pendant les événements :

- Débits initiaux importants pour les Alpes internes et les Alpes du Nord
- Débits maximums les plus élevés atteints par les Alpes internes
- Différence entre les deux débits plus accentuée pour la Méditerranée

Saisonnalité des crues et des signalements:

- Périodes différentes pour les HER
- Différence entre les crues et les signalements au sein d’une même HER
- Automne, saison prépondérante pour toutes les HER avec un minimum de 30% des crues et des signalements.

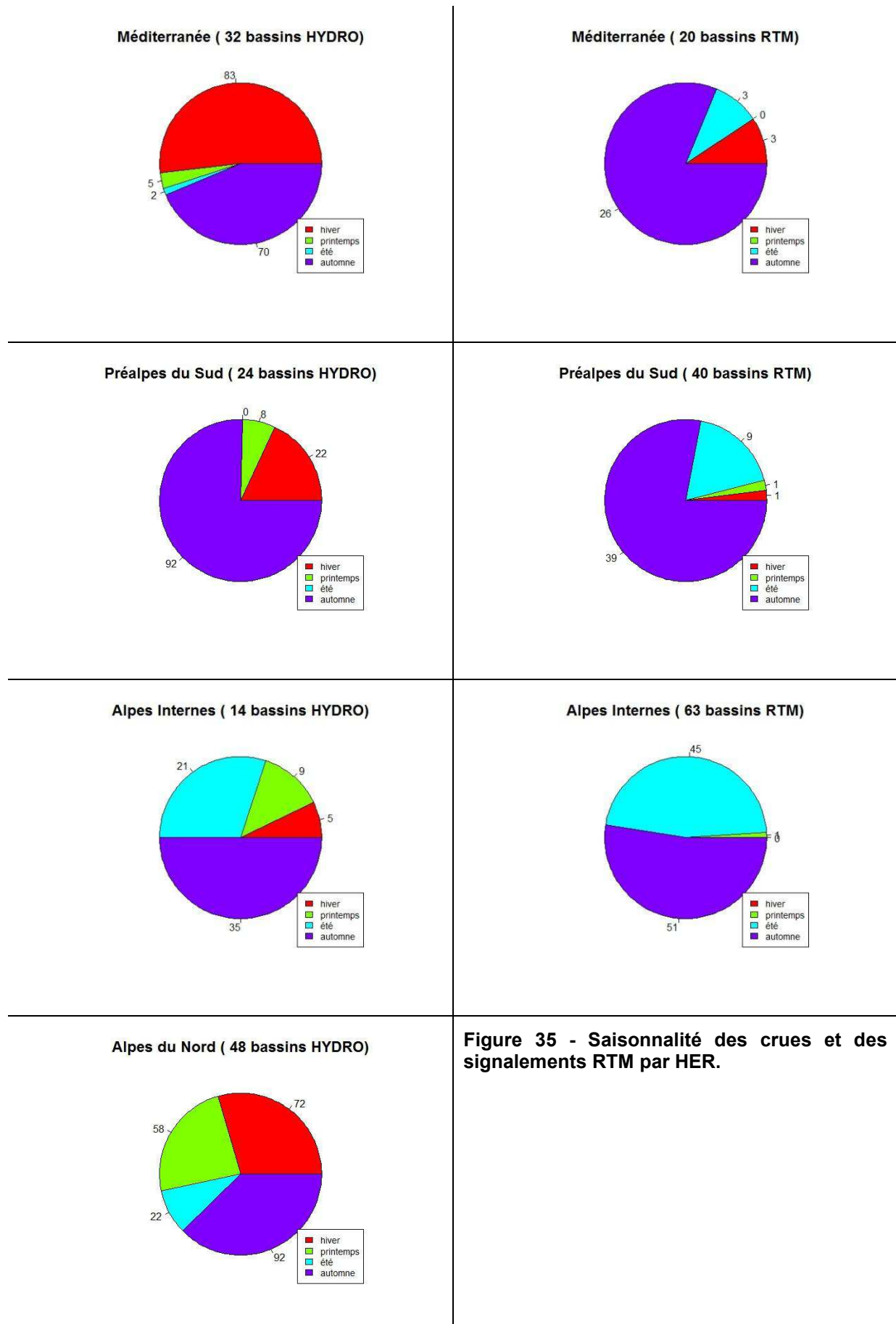


Figure 35 - Saisonnalité des crues et des signalements RTM par HER.

5 Conclusion

L'existence de forts contrastes climatiques, sur une zone d'étude de seulement 10 départements, offre de grandes opportunités pour le développement d'un système d'alerte aux crues adapté à la montagne, les modèles pouvant bénéficier de contextes de test très variés.

Deux échantillons de bassins sont sélectionnés minutieusement. L'un est composé de bassins issus de la banque HYDRO avec des données de débits et l'autre a été obtenu à partir des sites où des relevés de dégâts ont été effectués par les Services de Restauration des Terrains de Montagne (RTM). Les deux seront employés pour l'adaptation de la méthode AIGA aux zones de montagnes (premier objectif de la thèse). Si certaines caractéristiques semblent identiques dans les deux échantillons (comme les précipitations), la taille et l'altitude médiane demeurent des facteurs déterminants pour expliquer les différences physiques (la pente) et hydro-climatiques (la neige). Ces différences sont importantes pour la suite des travaux ainsi que la réalisation du second objectif de thèse. Ce dernier, pour rappel, a pour but d'évaluer les modèles élaborés dans cette thèse sur des bassins proches de ceux où se produisent les crues éclair. Les détails quant à l'utilisation des deux échantillons seront déterminés dès le prochain chapitre de la thèse.

La comparaison des sous-régions entre elles a dévoilé les contrastes existants entre les bassins versants, en termes de localisation, de débits, de précipitations et de neige. Développée pour la région Méditerranée, la méthode AIGA va être améliorée afin de s'adapter aux différents régimes hydrologiques et processus de génération de crues liés à la fonte des neiges et à des précipitations d'origines diverses tels que les orages ou les fronts océaniques.

Cette première étape d'inventorisation des données disponibles sur la région a permis de fixer les bases des travaux de thèse à poursuivre, dont le développement de la méthodologie choisie pour l'amélioration de la méthode AIGA, présenté dans le chapitre suivant.

Chapitre III : Présentation des modèles testés et de la méthodologie

Comment fonctionne la méthode AIGA ?

Comment adapter cette méthode aux zones de montagnes ?

Quelle est la méthodologie employée durant cette thèse ?

Cette thèse s'inscrit dans le projet RHYTMME, couvrant les Alpes du sud, dont les deux principaux objectifs sont l'amélioration de l'estimation des précipitations et le développement d'une plateforme de services d'alerte en temps réel. La thèse contribue à la modernisation de cette dernière, en développant et améliorant le système d'anticipation de crues. Pour y parvenir, la thèse poursuit deux objectifs :

- le **premier** est d'adapter la méthode AIGA aux zones montagneuses, en se focalisant sur le modèle hydrologique, et en ne s'intéressant ni à l'amélioration des quantiles, fournis par SHYREG, ni à celle des précipitations ;
- le **second** est de développer une technique d'évaluation du modèle, sur de véritables bassins versants non-jaugés par l'intermédiaire de relevés de dégâts.

Ce chapitre établit les bases du travail de recherche ainsi que toute la procédure suivie dans la thèse. Il commence par présenter le fonctionnement de la méthode AIGA actuelle, fondée sur une modélisation événementielle horaire et une journalière continue. Cette méthode, avec ses points faibles, est le point de départ des travaux. Les adaptations à y apporter sont ensuite évoquées à travers de nouveaux modèles. De nouveaux couplages entre les modèles horaire et journalier sont proposés ainsi que l'ajout éventuel de la prise en compte de la neige. Pour clore ce chapitre, la méthodologie complète, qui est poursuivie pendant le reste du manuscrit, est mise en place. Son objectif est d'améliorer et d'évaluer le nouveau système d'anticipation qui devra remplacer la méthode AIGA actuelle dans les zones montagneuses.

1 Présentation de la méthode AIGA actuelle

1.1 Principes

L'objectif de la thèse est d'améliorer le système d'alerte de crues utilisé actuellement dans la plateforme opérationnelle du projet RHYTMME. Ce système repose sur la méthode AIGA qui a été développée au départ pour les régions du pourtour méditerranéen. Cette méthode repose sur deux modèles hydrologiques. Le premier modèle fonctionne de manière événementielle au pas de temps horaire, afin de simuler les crues (appelé GRD). Le second fonctionne au pas de temps journalier en continu, pour fournir une information sur l'état du système entre les crues et pour initialiser le modèle de crue horaire (GRD), appelé par la suite module de production de GR3J.

Dans cette partie, nous présentons le fonctionnement du modèle événementiel horaire actuellement utilisé dans la méthode AIGA (GRD) dans la section 1.2, ainsi que son initialisation par le module de production du modèle continu GR3J (1.3). Finalement, le fonctionnement complet des deux modèles (GRD et GR3J) de la méthode AIGA est décrit, accompagné de leurs points faibles. Afin d'apporter des solutions à ces derniers et de répondre au premier objectif de la thèse, la partie 2 de ce chapitre présente les améliorations envisagées, afin de déterminer de nouveaux couplages entre le modèle événementiel horaire et le modèle continu journalier, pour la suite des travaux de la thèse.

1.2 Fonctionnement du modèle événementiel horaire GRD de la méthode AIGA

Le modèle hydrologique horaire événementiel et distribué (GRD) de la méthode AIGA s'inspire d'un modèle hydrologique conceptuel dérivé du modèle GR3J (global), développé dans les laboratoires IRSTEA d'Antony (Edijatno et Michel 1989) et simplifié dans ceux d'Aix-en-Provence (Arnaud 1997; Arnaud 2005; Arnaud et Fine 2006). Lui sont associées les hypothèses suivantes (Fouchier 2010):

- La part neigeuse des précipitations reste faible en période de crue ;
- L'évapotranspiration est négligeable pendant un événement de crue (ETP=0) ;
- L'hydrogéologie n'influence pas l'écoulement du bassin versant ;
- Le laminage de crue n'est pas pris en compte.

Afin de mieux considérer l'hétérogénéité des précipitations et du bassin versant, le bassin est discrétisé en mailles carrées d'1 km², chacune ayant un petit module GR à deux réservoirs (A_{hor} et B_{hor}) (Figure 36).

Sur chaque pixel, précédant le modèle, un hydrogramme unitaire répartit la pluie sur deux pas de temps (70% sur le premier - 30% sur le second, équation 4), afin de lisser les précipitations courtes et intenses, sans apporter de modifications, lors de précipitations constantes et plus longues (Arnaud et Fine 2006).

$$P(t) = 0.7Pb(t) + 0.3 Pb(t - 1) \quad \text{pour } t > 1 \quad (4)$$

Avec P : pluie résultante de l'hydrogramme unitaire

Pb : pluie-brut observée sur le pas de temps t ou $t-1$.

Le premier réservoir, dit de production, transforme une part de la pluie en lame d'eau ruisselante, selon son niveau de remplissage, représentant ainsi l'effet de saturation des sols. Cette lame d'eau ruisselante est dirigée vers le second réservoir. Celui-ci, dit de routage, se vidange en fonction de son niveau de remplissage. En est ainsi déduit le débit (Q_r), contribution élémentaire au niveau d'un pixel. Sur chaque pixel est donc disponible un débit horaire élémentaire.

Une fois les débits unitaires obtenus (Q_r), ils sont additionnés à l'exutoire (Q_{bv}), sans décalage entre eux, afin d'anticiper au maximum la crue (Figure 36). Ainsi, sans étalement dans le temps, les pixels les plus éloignés de l'exutoire sont à la même distance que les plus proches. Le débit se concentre rapidement à l'exutoire et la pointe de crue est obtenue plus rapidement.

Événementiel, le modèle ne simule que les événements où se déroule une crue. Cela implique de connaître les états initiaux de remplissage des réservoirs. La technique d'initialisation des deux réservoirs est présentée dans la section (1.3), juste après les détails de fonctionnement des réservoirs de production et de routage.

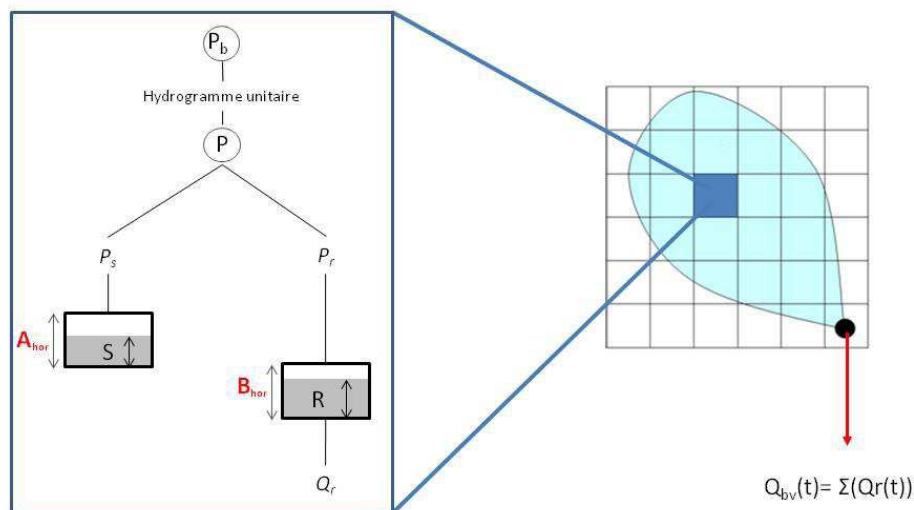


Figure 36 - Structure du modèle horaire unitaire GRD

Réservoir de production

A chaque pas de temps (t), le réservoir de production renseigne sur la quantité de pluie routée (P_r), participant à la genèse de la crue, et sur la quantité de pluie stockée (P_s), remplissant le réservoir, à partir de la pluie résultante P (équation 5).

$$P_r = P - P_s \quad (5)$$

Avec P_r = la pluie routée (mm),

P = la pluie résultante (mm),

P_s = la pluie stockée (mm).

La pluie stockée (P_s) est calculée à partir de la pluie résultante, de l'état de remplissage du réservoir au début du pas de temps et de la taille du réservoir (équation 6).

$$\Delta S = S_2 - S_1 = A_{hor} \cdot \tanh(P/A_{hor}) \left[\frac{1 - \left(S_1/A_{hor} \right)^2}{1 + \left(S_1/A_{hor} \right) \tanh(P/A_{hor})} \right] = P_s \quad (6)$$

$$\tanh(x) = \frac{(e^{2x} - 1)}{(e^{2x} + 1)}$$

Avec A_{hor} = taille du réservoir de production (mm),

S_1 & S_2 = le remplissage du réservoir, respectivement au début et à la fin du pas de temps (mm),

P = la pluie résultante (mm) et

P_s = la pluie stockée (mm).

La part de pluie stockée (P_s) dans le réservoir de production, découlant de la pluie résultante (P_r), dépend de l'intensité et du remplissage initial du réservoir (Figure 37). Cette figure, inspirée des travaux de Perrin et al. (2003), indique que pour une pluie valant 10% de la taille du réservoir (triangle vide), si le réservoir est vide, 100% de la pluie est stockée. En remplissant le réservoir, la part de la pluie stockée diminue d'abord faiblement puis la baisse s'accroît quand le réservoir est presque plein (à droite sur la figure). Pour une pluie valant le taux de remplissage du réservoir ($P/A=1$, croix), si le réservoir est vide, 80% de la pluie est stockée. La part stockée évolue de manière quasi linéaire avec le remplissage. Finalement une pluie forte, valant deux fois la capacité du réservoir (carré noir), n'est stockée qu'à 50%, lorsque le réservoir est vide. Cette part évolue linéairement avec le remplissage du réservoir.

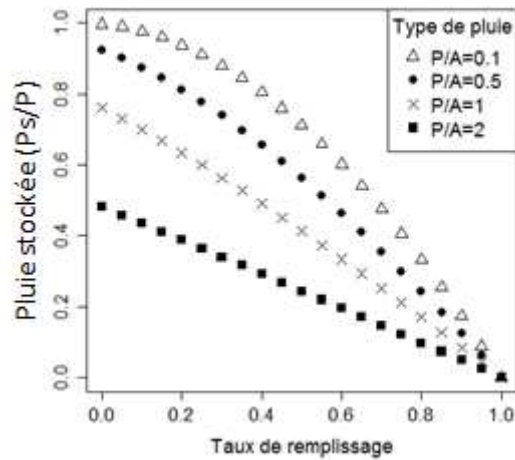


Figure 37 – Part de la pluie résultante (P_r), qui est stockée (P_s) dans le réservoir de production en fonction de l'intensité (pictogramme) et du taux de remplissage (abscisse).

Par hypothèse, la taille du réservoir de production (A_{hor}) a été fixée à l'aide de la pluviométrie journalière centennale, discrétisée au pixel d'1 km² (Javelle 2009)⁴. La taille au pixel est représentée sur la Figure 40. Pour éviter des réservoirs trop petits, et donc un modèle trop réactif, une borne inférieure a été fixée à 200 mm. La capacité maximale de tous les réservoirs de la zone d'étude, à l'exception de ceux du Massif des Maures (Var), mesure alors entre 225 et 250 mm. Les plus fortes valeurs, entre 250 et 300 mm, ont été observées dans les Alpes Maritimes.

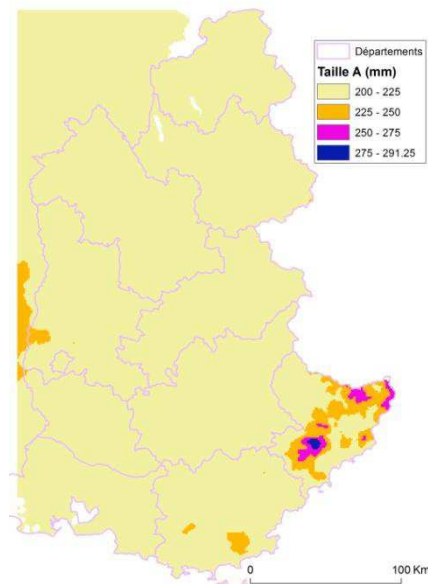


Figure 38 - Taille du réservoir A_{hor} . La taille est définie avec un seuil minimum de 200 mm et un maximum d'environ 300 mm dans les Alpes-Maritimes.

⁴ Cette pluie est obtenue à l'aide de la méthode SHYREG, basée sur un générateur de pluie stochastique permettant la simulation de longues chroniques.

Réservoir de routage

Le réservoir de routage reçoit la pluie (P_r), reste de ce qui n'a pas été absorbé par le réservoir précédent. Le débit simulé au pas de temps (t) correspond à la différence de remplissage entre le début et la fin du pas de temps. Cette vidange est obtenue à partir des équations suivantes (7, 8 & 9) :

$$R_0 = \max(0.3 B, R + P_r) \quad (7)$$

$$Q_r = \max(0, R_0 - (R_0^{-4} - B^{-4})^{-\frac{1}{4}} - 0,0006 \times B) \quad (8)$$

$$R = R_0 - Q_r \quad (9)$$

Le remplissage du début (R_0) correspond à celui de la fin du pas de temps précédent (R) ainsi qu'à l'apport de la pluie routée (P_r) (équation 7). Ensuite, le débit est calculé par la deuxième équation, selon la taille du réservoir (B). Le facteur de correction $0,0006 \times B$ mm s'explique par le fait qu'un débit nul correspond à un remplissage de 30%, afin que le modèle soit réactif dès le début de l'événement (équation 8) (Arnaud 2005). Enfin, le taux de remplissage est actualisé, en soustrayant le débit (équation 9).

La taille du réservoir de routage influence l'étalement de la crue dans le temps et non son volume. Un petit réservoir (B) provoque une montée de crue rapide, la rétention d'eau dans le réservoir étant minimale. A l'inverse, un très grand réservoir (B) entraîne un écoulement diffus dans le temps, avec des débits de pointes plus faibles. Pour obtenir les meilleurs résultats, en termes de reproduction des débits de pointes sur des bassins versants de l'ordre du km^2 , divers travaux au sein du laboratoire ont défini une valeur médiane de 50 mm (Arnaud 2005; Arnaud et Fine 2006; Arnaud 2007). Cette valeur est alors fixée pour une modélisation à la maille kilométrique.

1.3 Initialisation du modèle horaire par le module de production de GR3J

La modélisation événementielle est contrainte par l'initialisation du modèle avant chaque événement. Elle ne peut en effet récupérer les états de remplissage des réservoirs à partir du pas de temps précédent, contrairement à la modélisation continue. Les deux réservoirs sont donc initialisés sur une estimation de l'état d'humidité des sols et du débit initial. Cette initialisation est effectuée à partir d'une modélisation continue journalière.

Réservoir de production

En région méditerranéenne, des pluies identiques sur un même bassin versant ne provoquent pas nécessairement des crues éclair. Si le sol est saturé en eau, une crue se produira, un sol sec quant à lui favorisera l'infiltration par rapport au ruissellement. Le premier cas est typique de l'automne et le second de l'été. Sur la Figure 39, ce phénomène est reproduit par le modèle événementiel, qui adopte un comportement différent selon l'état initial de remplissage du réservoir de production : plus il est plein, plus le modèle réagit par une pointe de crue élevée (courbe orange), et inversement, s'il est vide, sa pointe de crue est très basse (courbe verte).

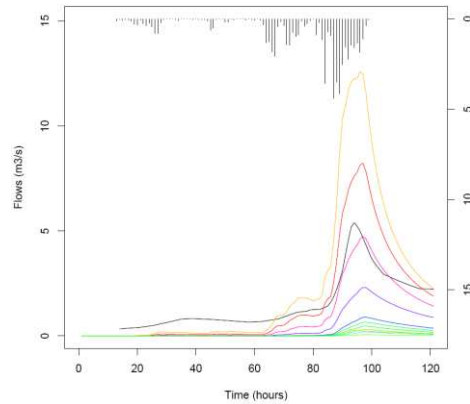


Figure 39 - Hydrogramme d'un bassin versant avec différents débits simulés à partir de différents taux initiaux de remplissage du réservoir A. Les débits les plus faibles correspondent à des réservoirs moins remplis (teintes vertes) et la courbe orange à un réservoir rempli dès le démarrage. La courbe noir représente le débit observé.

Pour obtenir la meilleure initialisation du réservoir de production (taux de remplissage initial), un autre modèle simule en continu et au pas de temps journalier l'évolution du taux de remplissage du réservoir de production, à l'échelle du pixel (Javelle et al. 2010b). Ce modèle se compose du seul réservoir, qui prend en compte les précipitations (P_n) et l'évapotranspiration journalière (E_n) (équation 10), sans hydrogramme unitaire en amont. Il est issu du modèle GR3J et sera désigné, par la suite, sous le terme GR3J.

$$\Delta S = A_{GR3J} \cdot \tanh(P_n/A_{GR3J}) \left[\frac{1 - \left(S_1/A_{GR3J} \right)^2}{1 + \left(S_1/A_{GR3J} \right) \tanh(P_n/A_{GR3J})} \right] - A_{GR3J} \cdot \tanh(E_n/A_{GR3J}) \left[\frac{2 \left(S_1/A_{GR3J} \right) + \left(S_1/A_{GR3J} \right)^2}{1 + \left(S_1/A_{GR3J} \right) \tanh(E_n/A_{GR3J})} \right] \quad (10)$$

$$\tanh(x) = \frac{(e^{2x} - 1)}{(e^{2x} + 1)}$$

Avec A_{GR3J} = taille du réservoir de production (mm),

P_n = la pluie nette = max(0, Pluie-ETP) (mm),

E_n = l'ETP nette = max(0,ETP- Pluie).

Après que l'ETP ait neutralisé la pluie, et si la pluie lui est supérieure, le réservoir se remplit selon le premier terme de l'équation définissant l'ETP. Mais, en cas d'absence de précipitations, le réservoir se vide selon le second terme de cette équation. La chronique sur la Figure 40, ainsi obtenue en moyennant les valeurs des pixels pour le bassin versant de l'Argens à Châteauvert, indique l'évolution ayant eu lieu au cours de l'année et d'une année sur l'autre. Ainsi, le réservoir est plus saturé en hiver, avec des valeurs supérieures à 80%, et plus sec en été, avec des valeurs de saturation aux environs de 10%. La canicule de 2003 est visible sur la chronique, représentée par le taux de remplissage le plus faible de la décennie.

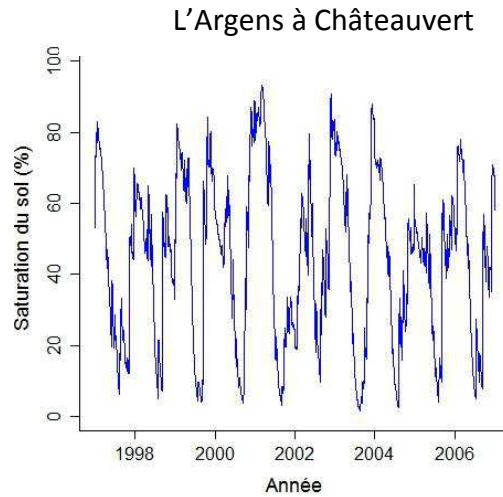


Figure 40 - Chronique de l'estimation de l'humidité des sols par le modèle GR3J, entre le 01/01/1997 et le 31/12/2006, pour l'Argens à Châteauvert (Var).

Des travaux portant sur l'initialisation du modèle horaire ont conclu que l'utilisation de la valeur journalière, sans aucune correction, n'était pas optimale (Arnaud 2009; Javelle 2009; Javelle et al. 2010b). Dès lors, la valeur initiale $((S/A)_{h_init})$ est calculée à partir du taux de remplissage du modèle journalier $((S/A)_{GR3J(j-1)})$ et d'un paramètre statistique provenant de la régionalisation de la méthode SHYREG $((S/A)_{stat})$ (équation 11):

$$\left(\frac{S}{A}\right)_{h_init} = a * (S/A)_{GR3J(j-1)} + b * (S/A)_{stat} + c \quad (\text{Javelle et al. 2010b}) \quad (11)$$

Avec: $a= 0.52$

$b= 0.38$

$c= -0.17$

Réservoir de routage

L'initialisation du premier réservoir étant réalisée, il faut maintenant s'intéresser à l'initialisation du réservoir de routage du modèle événementiel horaire (GRD). Les bassins méditerranéens se caractérisent par des débits initiaux négligeables, comparés aux débits

des crues (analyse complète au Chapitre 2). Les crues automnales faisant suite à une période d'étiage, où les débits sont proches de 0 m³/s, le débit initial est donc fixé à 0 mm (Arnaud 2007). Cette contrainte, additionnée à la structure du modèle GRD, implique de fixer un remplissage du réservoir B d'une manière arbitraire, afin que le modèle soit assez réactif. Des travaux sur des petits bassins en France métropolitaine, en Suisse et en Martinique ont conclu qu'un remplissage de 30% est un bon compromis, correspondant à un débit nul (Arnaud 2005).

Le modèle distribué et événementiel horaire (GRD) utilisé dans la méthode AIGA et développé pour l'alerte de crues en milieu méditerranéen, a impliqué certains choix quant à sa paramétrisation et à son initialisation, afin de maximiser la reproduction de la pointe de crue et son anticipation. Il est composé de deux paramètres fixés, que sont la taille des réservoirs. Les conditions initiales du réservoir de production varient avec le temps et sont obtenues grâce à un modèle continu. La condition du réservoir de routage est fixée à 30% (Tableau 4).

Tableau 4 - Paramètres et conditions initiales du modèle événementiel.

	Réservoir A	Réservoir B
Taille	$A_{hor} = \max(200 \text{ mm}, PJ100)$	50 mm
Initialisation	$(S/A)_{h_{init}}$	30%

2 Adaptation de la méthode AIGA aux zones de montagnes

Afin de réaliser le premier objectif de la thèse en adaptant la méthode AIGA, présentée ci-dessus, aux zones de montagnes, plusieurs modifications sont apportées au couplage entre le modèle événementiel horaire (GRD) et le continu journalier (GR3J). Les régions montagneuses étant soumises aux précipitations neigeuses, la prise en compte de ce phénomène doit être réalisée afin d'améliorer l'initialisation de GRD (2.1). De plus, la zone d'étude étant fort différente de la région historique de l'utilisation de la méthode AIGA, l'initialisation du modèle de crue horaire par le modèle journalier est améliorée et s'effectue alors sur le réservoir de production et le réservoir de routage (2.2).

La structure de la méthode AIGA est ainsi préservée. Elle repose sur une modélisation horaire pour les crues et une modélisation journalière pour l'initialisation. En plus de la version initiale, quatre variantes sont finalement présentées en intégrant la neige dans la modélisation.

2.1 Comment prendre en compte la neige ?

Afin d'adapter la méthode AIGA à la prévision de crues en montagne, la neige doit être prise en considération et cela pour deux raisons. D'abord, les précipitations sous forme neigeuse n'atteignent pas immédiatement le cours d'eau, mais sont contenues temporairement sous forme de neige, dans des quantités parfois non négligeables (Valéry 2010; Folton et Arnaud Soumis). Enfin, principalement au printemps, la fonte des neiges contribue au débit des cours d'eau, participant parfois à la survenue de crues (Chapitre 1) (Merz et Blöschl 2003).

Les hydrologues prennent généralement en compte les précipitations sous forme neigeuse (stockage et fonte) dans le bilan hydrologique en s'appuyant sur la connaissance de la température de l'air. Mais, entre -1°C et $+3^{\circ}\text{C}$, les précipitations sont de nature incertaine, aussi bien solide que liquide (Valéry 2010). Musy (2004) suggère alors trois techniques permettant d'évaluer la couverture neigeuse, qui sont :

- De procéder à une identification à l'aide de photos aériennes et de satellites. Mais, malgré l'augmentation de la précision de la mesure MODIS, la présence de nuages ainsi que les 16 jours séparant chaque visite du satellite LANDSAT7 sont de tels inconvénients, qu'ils empêchent l'emploi de ces solutions dans le cadre des systèmes d'alerte aux crues.
- De la mesurer grâce à des stations. Ici, les inconvénients sont la faible densité du réseau utilisable en temps réel, le réseau Nivôse de France ne comporte que 28 stations sur l'ensemble des massifs -Alpes, Pyrénées et Corse – (Météo-France 2013b), ainsi que la cohabitation de systèmes de mesures différents, à l'échelle nationale, à laquelle s'ajoute la diminution de postes (Gottardi 2009).
- De la mesurer, indirectement, en passant par une modélisation qui recourt à des modèles physiques ou conceptuels degrés-jour et des mesures, telles que la radiation, l'humidité de l'air et la température (Quintana-Seguí et al. 2008; Valéry 2010). L'inconvénient est, pour cette dernière méthode, d'introduire des valeurs de neiges faussées à cause de la modélisation.

Une fois la quantité de neige connue, encore faut-il, pour l'hydrologue, déterminer l'apport de sa fonte au bassin versant. Soit il réalise un bilan énergétique et de masse, méthode nécessitant maintes mesures, soit il modélise, à l'aide d'un modèle degrés-jour, pour lequel la température est le processus dominant de la fonte. Les travaux de (Hock 2003), synthétisés par Valéry (2010), démontrent que les résultats du modèle degrés-jour sont probants, malgré sa simplicité ; ce modèle s'appuie seulement sur la température, en entrée, et sur un seuil de température à partir duquel la neige fond. Ce seuil est intuitivement fixé à 0° mais il peut être d'une autre valeur (cas du modèle MORDOR). Cette méthode est la plus adaptée à une utilisation en milieu non-jaugé.

Modèle de fonte fondé sur une modélisation degrés-jour

Pour modéliser la neige, le modèle se doit d'être simple, robuste et utilisable en temps réel sur des bassins non-jaugés. Dans un premier temps, l'utilisation du module degrés-jour Cemaneige (Valéry 2010) a été envisagée. Demandant des données de précipitations et de températures spatialisées précises, il lui a été préféré un module de fonte de neige fondé sur une approche degrés-jour. Celui de la méthode LOIEAU a donc été choisi. La méthode LOIEAU, développée par l'équipe Hydrologie d'IRSTEA sur Aix-en-Provence, sur la base des modèles GR, est employée dans le calcul de la ressource en eau sur les bassins versants. Le module de fonte de la neige fonctionne avec les données journalières de températures et de neige, provenant de la méthode SAFRAN (voir Chapitre 2), spatialisées sur des mailles de 64 km². La simulation de fonte est donc distribuée et peut être prise en compte à l'échelle du bassin versant, en prenant la moyenne des valeurs des mailles disponibles sur le bassin.

Le module de fonte, avec ces deux données d'entrée, simule, sur un pas de temps journalier, l'évolution du stock de neige et sa fonte (*Fonte* en mm), déterminée par l'équation suivante (12) :

$$Fonte = C_{fonte} * (T - TEC) * ((T - TEC)/T_0)^{0.5} \text{ (Folton et Arnaud Soumis)} \quad (12)$$

$$\text{Avec : } C_{fonte} = 1$$

T = température moyenne du jour en degré Celsius

$$TEC = 0^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 1^\circ\text{C}$$

Les valeurs des paramètres ont été obtenues lors de la régionalisation du modèle LOIEAU, à l'échelle de la France, à partir de 20 ans de chroniques SAFRAN. Ici, seule la température moyenne journalière doit être renseignée, ce qui convient parfaitement à la modélisation en non-jaugé. Cette donnée est disponible sur notre domaine d'étude à partir de la réanalyse SAFRAN et a été présentée dans le chapitre 2, section 1.3.

2.2 Comment initialiser le modèle événementiel horaire de crue (GRD) ?

Les travaux de Norbiato et al. (2008) et Nikolopoulos et al. (2011) montrent que l'humidité des sols influence les crues éclair et que sa connaissance conditionne de manière forte l'obtention de bonnes performances des systèmes d'anticipation de crues. Pour connaître les états initiaux des modèles événementiels, plusieurs techniques existent pour estimer l'humidité des sols, dont la prise en compte des précipitations antérieures à l'aide d'un indice de précipitation, la mesure directe de l'humidité des sols (par satellite) ou la modélisation conceptuelle journalière prenant en compte l'ETP et les précipitations. D'après l'étude comparative de Tramblay et al. (2012), c'est cette dernière technique qui apporte les meilleures performances. Cette solution est actuellement utilisée dans la méthode AIGA.

Cependant, la modélisation événementielle est délicate car elle est fortement dépendante de son initialisation. Berthet et al. (2009) ont prouvé qu'une modélisation continue, n'ayant dès lors pas besoin d'être initialisée, conduit à de meilleurs résultats qu'une approche événementielle. Cependant, l'utilisation, sur les 15 jours précédant l'événement, d'un modèle journalier permet d'obtenir les états initiaux du modèle événementiel et conduit à des résultats similaires à ceux de la modélisation continue.

Nous avons vu que dans la méthode AIGA, le réservoir de production du modèle GRD est initialisé par une modélisation continue, intégrant les pluies et l'ETP journalière (cf 1.3) (Javelle et al. 2010b). Pour ce qui est du réservoir de routage, comme il a été expliqué auparavant, le débit initial est nul au début de l'événement. Si cette méthode semble adaptée au contexte méditerranéen, dans le cas des régions montagneuses, le débit initial doit être pris en compte. Une analyse isotopique, réalisée sur des bassins semi-arides aux USA, confirme ce constat en précisant que le pré-événement contribue plus que l'épisode orageux en lui-même à la survenue de crues éclair en montagne (Desilets et al. 2008). Il faut donc initialiser à la fois le réservoir de production du modèle horaire GRD mais également son réservoir de routage, qui ne doit plus être fixé pour chaque événement à 30%.

Le contexte montagnard et les problématiques des bassins non-jaugés imposent leurs conditions quant au choix du modèle hydrologique estimant les états initiaux du modèle horaire GRD. Ce dernier se doit, en effet, d'être utilisable avec peu de données d'entrées, d'être robuste, parcimonieux, afin que son calage et sa régionalisation soient facilités, et enfin, il se doit de permettre l'ajout de modules externes tels que la neige.

GR4J

Le modèle GR4J d'IRSTEA (Perrin, 2010) répond à ces trois conditions, et sera étudié dans la thèse pour remplacer le modèle GR3J et simuler les états initiaux du modèle horaire GRD. Modèle continu global journalier, il se compose de deux réservoirs et possède quatre paramètres à caler (Figure 41) :

A_{cont} : taille du réservoir de production

B_{cont} : taille du réservoir de routage

C : temps de base de l'hydrogramme unitaire

D : paramètre d'échanges souterrains

Il a déjà été régionalisé afin d'être utilisé sur des bassins non-jaugés et obtient des performances correctes, comparées à celles d'autres modèles de même type (MORDOR) (Oudin et al. 2008). De la même famille que le modèle GRD, sa formulation des équations leur est semblable, facilitant ainsi sa mise en œuvre.

Son fonctionnement est simple et ne nécessite, une fois calé, que des données de précipitations (P) et d'évapotranspiration (E). Ces deux données remplissent et vident le premier réservoir, dit de production, permettant d'obtenir un état d'humidité du bassin en continu. A ce réservoir est associé un hydrogramme unitaire (SH1) et un réservoir de routage de taille B_{cont} pour reproduire l'écoulement lent ainsi qu'un demi-hydrogramme unitaire pour simuler l'écoulement rapide (SH2). Finalement, une fonction d'échange avec l'extérieur (D) permet de prendre en compte l'hydrogéologie. Le fonctionnement détaillé du modèle est disponible en annexe B.

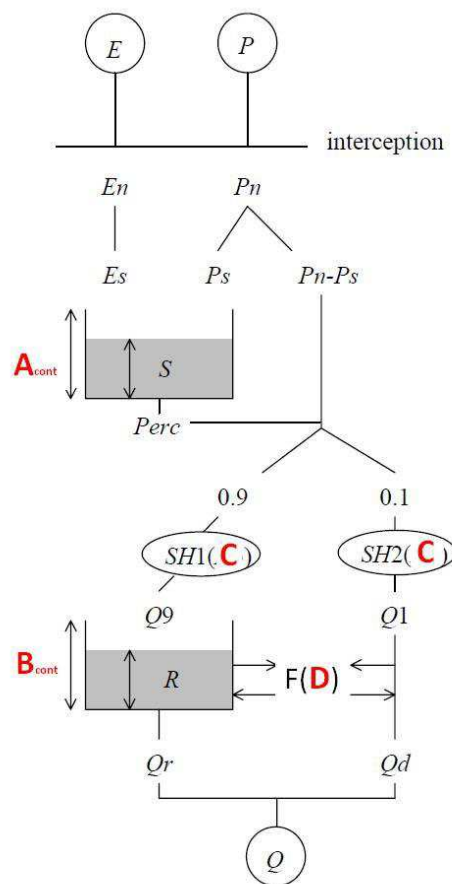


Figure 41 - Schéma de fonctionnement du modèle GR4J de Perrin (2010).

2.3 Les principales options étudiées

Les modèles présentés dans le Tableau 5 et employés au cours des différents stades de la méthodologie (partie suivante), sont élaborés à partir des modèles choisis pour l'amélioration de la méthode AIGA (version initiale). Pour la modélisation horaire événementielle, comme pour la version initiale, il s'agit de GRD. Pour la modélisation

continue nécessaire à l'initialisation de GRD, le modèle GR4J sera utilisé. Finalement, pour prendre en compte la fonte des neiges, le module neige degré-jour sera ajouté au modèle GR4J. La méthodologie propre aux couplages est définie dans le Chapitre 4, relatif à l'approche locale du calage et à l'évaluation des couplages retenus.

Il a été choisi de travailler avec des modèles globaux afin d'augmenter les possibilités de tests grâce à un plus faible temps de calcul ainsi qu'à l'utilisation de donnée dont la résolution (SAFRAN, 64 km²) est plus faible que la taille de certains bassins. Des travaux postérieurs à cette thèse devront à partir des résultats obtenus, travailler sur la distribution des couplages. Le premier couplage, dénommé variante 1, provient de la méthode AIGA, sans aucune modification, si ce n'est que les modèles sont globaux et que son réservoir de production est initialisé par GR4J en lieu et place de GR3J. Son débit initial vaut 0 m³/s, impliquant un taux de remplissage du réservoir de routage de GRD de 30%. Les autres variantes sont soit couplées, soit non couplées au module neige et au modèle GR4J. C'est le cas de la variante 2, plus complexe, disposant d'un débit initial pour chaque événement calculé à partir du débit simulé journalier de la veille par GR4J (précision au chapitre 4, 2.1.1, page 99) et des dernières variantes (3 et 4), intégrant le module neige degré-jour au pas de temps journalier. Une première comparaison entre modèles globaux et distribués sera élaborée. Tous les détails seront présentés dans le chapitre 4.

Tableau 5 – Version initiale de la méthode AIGA et des quatre variantes utilisées pour cette thèse, composée à partir du modèle événementiel horaire (GRD), des modèles continus journaliers (GR3J et GR4J) et du module neige (degré-jour).

	Modèle journalier pour l'initialisation	Module neige	Modèle horaire pour la simulation de crues
Initiale/AIGA	GR3J	Non	GRD
Variante 1	GR4J	Non	GRD
Variante 2	GR4J	Non	GRD
Variante 3	GR4J	Oui	GRD
Variante 4	GR4J	Oui	GRD

A partir des contraintes (projet RHYTMME) et des choix sur la modélisation à mettre en place, deux modèles hydrologiques et un module neige ont été sélectionnés pour le reste du manuscrit :

- le modèle événementiel horaire GRD, utilisé par la méthode AIGA actuelle et provenant de la plateforme RHYTMME, calcule les débits;
- le module neige degré-jour régionalisé simule la fonte au pas de temps journalier ;
- le modèle continu journalier GR4J initialise le modèle horaire.

La multiplicité des cas d'initialisations possibles entre GRD, GR4J et le module neige a permis de déterminer quatre variantes basées sur le fonctionnement de la version initiale de la méthode AIGA (GRD et GR3J) qui sert de point de départ et de comparaison pour les travaux de cette thèse.

3 Méthodologie appliquée dans la suite

Dans la première partie de ce chapitre, les différents modèles disponibles, pour améliorer la méthode AIGA actuelle, ont été présentés ainsi que les quatre couplages envisagés (variantes 1, 2, 3 et 4). Afin de répondre aux deux objectifs de la thèse, la méthodologie est présentée ci-dessous.

Pour rappel, le premier objectif de la thèse vise à adapter la méthode AIGA aux zones montagneuses où se produisent des phénomènes différents de ceux agissant sur les bassins méditerranéens, comme la neige. La méthode doit donc pouvoir anticiper correctement les crues éclair sur de petits bassins montagneux. Le second objectif, qui est traité à travers la méthodologie, consiste à pouvoir évaluer la nouvelle version de la méthode AIGA sur de véritables bassins non-jaugés. Sur ces derniers, aucune donnée de débit n'est disponible, empêchant donc une évaluation plus classique, basée sur la comparaison entre les débits observés et simulés.

Pour répondre aux deux objectifs de la thèse, la méthodologie visant à l'amélioration d'AIGA se divise en quatre parties (Figure 42). La première étape, relative à l'élaboration d'événements pluie-débit pour le modèle horaire événementiel d'AIGA, a été réalisée précédemment au chapitre 2 (section 4). Il s'agit d'un pré-requis nécessaire au développement de la méthode AIGA. Les étapes 2 et 3 s'attèlent à répondre au premier objectif en faisant évoluer le fonctionnement de la méthode AIGA actuelle et en la régionalisant. La dernière étape (4) s'attaque à l'objectif relatif à l'évaluation du modèle hydrologique sur des bassins réellement non-jaugés, en se fondant sur des données de dégâts issues de la base de données des services RTM (chapitre 2, section 1.5.2).

Dans une première étape (1) (notée **LOCAL**), les modèles sont testés sur des bassins versants ayant des données débitométriques : les paramètres sont calés pour chaque bassin versant et la performance du modèle est évaluée sur le même bassin. Dans cette partie sont déterminées les techniques de couplages entre les modules GRD, LOIEAU et GR4J.

Afin que les variantes de la méthode initiale s'adaptent à des bassins non-jaugés, elles sont régionalisées dans une deuxième étape (notée **REGIONAL**) : les paramètres sont calés sur un ou plusieurs bassins donneur(s), et ensuite « transférés » sur un bassin cible dont les données débitométriques permettent d'évaluer le modèle. Pour les phases LOCAL et REGIONAL, le jeu de bassins versants, identique, est fourni avec des données de débits. La variante régionalisée la plus adaptée est désignée à la fin de cette phase.

Les études du projet HYDRATE, présentées au Chapitre 1 (Marchi et al. 2010), ont prouvé que les bassins propices aux crues éclair différent des bassins disposant de données de débits. Dans la quatrième et dernière étape, le modèle est évalué une seconde fois (notée **VRAI NON-JAUGE**), sur un jeu de bassins non-jaugés, dont sont renseignés seulement les dégâts. Cette démarche permet d'approcher les conditions opérationnelles d'utilisation du modèle. Elle est très peu répandue en hydrologie, et n'est donc pas le sujet de beaucoup d'articles.

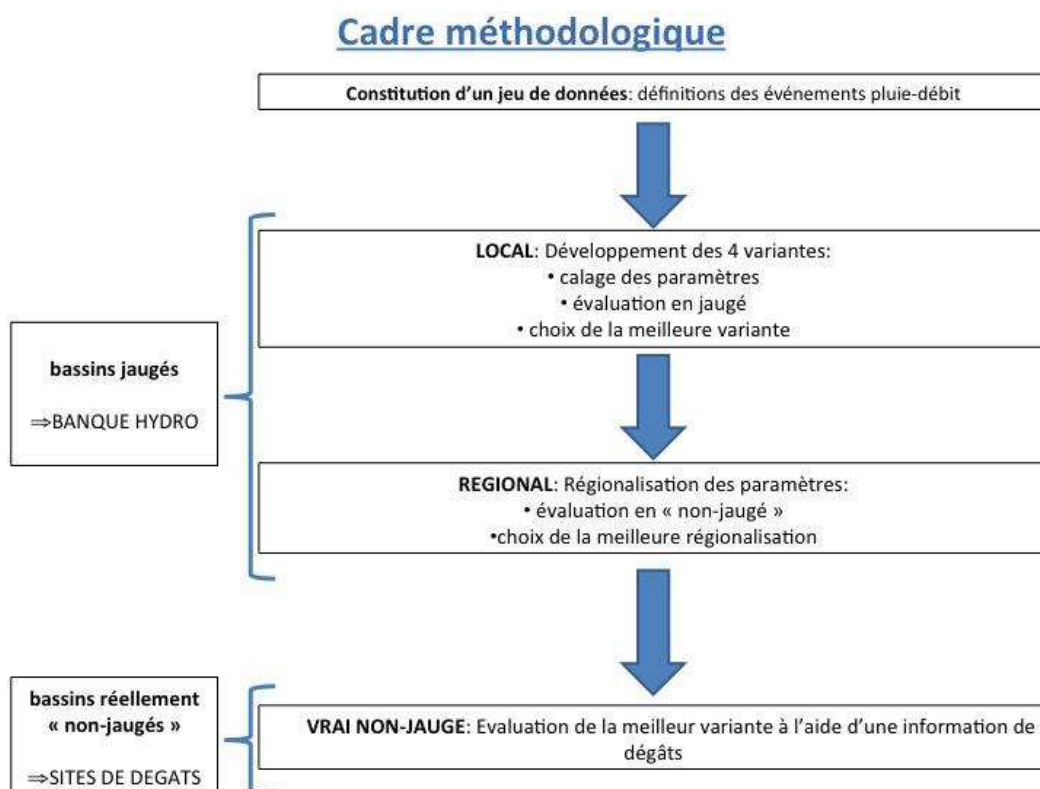


Figure 42 – Présentation du cadre méthodologique général poursuivi pendant les travaux de thèse.

3.1 Approche locale : calage et évaluation des modèles (Etape 2)

Cette première étape de calage et de validation en local permet de mettre en place et d'évaluer la version initiale de la méthode AIGA et certaines variantes (1, 2, 3, 4), à travers divers couplages, entre GRD, GR4J et le module neige degré-jour. Importante, cette phase offre l'opportunité de mieux comprendre les phénomènes se déroulant sur chaque bassin versant, et ainsi d'adapter au mieux les modèles. La technique du Split-Sample Test est ici employée (section 3.1.1). Pendant cette phase de calage, les paramètres de chaque bassin sont optimisés, à l'aide des données météorologiques et de débits, selon deux méthodes, présentées dans la section 3.1.2. Enfin, deux critères numériques adaptés à l'hydrologie de crues ont été choisis pour réaliser ce travail et sont décrits dans la section 3.1.3.

3.1.1 Le Split-Sample test (calage – validation)

L'évaluation des modèles est cruciale pour connaître les performances du modèle, dans un contexte opérationnel. Le Split-Sample Test, discuté par Klemes (1986), est une des techniques les plus répandues pour développer un modèle hydrologique calé localement : la période de données est divisée en deux parties, sur l'une est effectué le calage, et sur l'autre, l'évaluation (ou validation). En plus des performances en validation, est aussi examinée la robustesse du modèle, c'est-à-dire sa capacité à conserver les mêmes performances sur la période d'apprentissage et la période d'évaluation.

Cette méthodologie calage/validation repose sur l'hypothèse que le bassin versant reste stationnaire d'un point de vue de l'évolution du climat et de l'environnement (occupation des sols, endiguement, etc.) (De Marsily 1994). Dans sa phase de calage, le modèle doit apprendre les caractéristiques du comportement du bassin, liées à sa géomorphologie et au climat, afin de mieux les reproduire lors de sa validation.

Pour chaque bassin, la période a été divisée en deux sous-périodes égales. Aucune analyse, relative à la sensibilité des paramètres en rapport avec la longueur de la période de calage, n'a été opérée, cette phase n'étant qu'une transition, précédant la phase de régionalisation, où la totalité de la période est employée pour le calage.

1. Période de calage

La période de calage du modèle continu journalier (GR4J) est constituée d'une première année de mise en route des paramètres, qui les rend indépendants de leurs valeurs initiales, et de cinq années de calage (P1). Elle est longue, comparée à celles d'autres études, où seulement une année suffit (Perrin 2000; Mathevet 2005). Pour le modèle horaire événementiel, aucune période de mise en route n'est nécessaire car il s'initialise à l'aide du modèle continu journalier. Son calage s'effectue sur les événements pluvieux se déroulant pendant la période de calage du modèle journalier.

2. Période de validation

Cette période réunit les 5 années non-utilisées pour la phase de calage (P2) : des années complètes dans le cas du modèle continu, et des événements détectés, dans celui du modèle événementiel.

3. Procédure inverse

Pour tester la robustesse du modèle, la procédure est inversée : le calage est opéré sur la période 2 et la validation, sur la période 1. Dans ce cas, l'année de mise en route chevauche la dernière année d'évaluation des 5 ans ; aucun travail durant la thèse n'est effectué pour considérer l'impact de cette double utilisation d'une année.

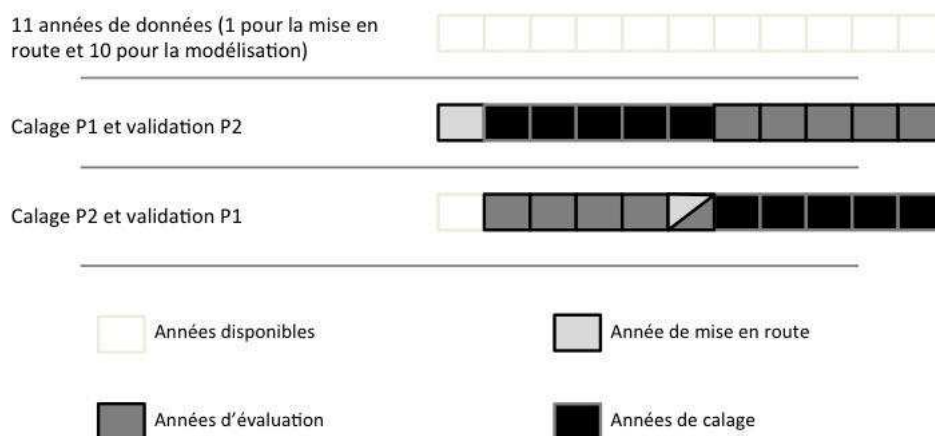


Figure 44 - Procédure de calage-validation avec division de la période en deux sous-périodes, afin d'utiliser le Split-Sample Test (Klemes 1986).

3.1.2 Optimisation des paramètres

Les paramètres des modèles hydrologiques, dits conceptuels, n'ont pas de signification physique directe. Ces derniers doivent être calés, pour représenter au mieux le bassin versant pour lequel le modèle simule les débits. La recherche du meilleur vecteur de paramètres est opérée par une fonction automatique d'optimisation des valeurs ou manuellement, afin d'obtenir les meilleures performances. Celles-ci sont estimées grâce à une fonction-objectif, qui est ici basée sur le critère Nash et Sutcliffe (1970), présentée dans la section 3.1.3.

L'optimisation automatique des paramètres est une procédure classique en modélisation hydrologique, mais elle peut s'avérer complexe et présenter plusieurs problèmes, comme en témoignent de nombreuses études (Duan et al. 1992; Perrin 2000; Collier 2007; Hingray et al. 2009). Ces difficultés concernent notamment :

- l'équifinalité des paramètres, c'est-à-dire que plusieurs vecteurs produisent les mêmes performances, les paramètres se compensant entre eux ;
- la faible sensibilité de la fonction-objectif à la modification de certains paramètres ;
- les optimums locaux (ou secondaires) ne donnent pas la meilleure performance.

L'optimisation des 4 paramètres, du modèle GR4J, est réalisée par la méthode pas-à-pas, présentée au Chapitre 4 (Michel 1989 dans (Edijatno 1991)). Cet algorithme d'optimisation recherche itérativement le jeu de paramètres optimums, en se fixant sur un point de départ. Cette méthode est « locale », par opposition aux méthodes dites « globales », qui elles parcourent l'espace entier de paramètres (Duan et al. 1992).

Les paramètres, du modèle GRD, sont calés, dans cette thèse, grâce à un test de sensibilité. Cette méthode, préconisée par Hingray et al. (2009), s'explique par l'interdépendance des paramètres qui rend compliquée l'optimisation automatique (Fouchier 2010). Elle a pour avantage d'offrir la possibilité de parcourir tout l'espace de paramètres, évitant certains obstacles, tels que les optimums locaux. Cependant, cette technique, gourmande en ressources informatiques, n'est applicable qu'avec un nombre réduit de paramètres. Le temps de calcul s'amplifie selon la précision de l'exploration de l'espace des paramètres et le nombre de paramètres à caler. Des précisions sur la méthode sont apportées dans le Chapitre 4, lors du calage du modèle GRD.

3.1.3 Critères

Lors des phases de calage et de validation, l'hydrologue s'appuie sur des critères, répartis en deux groupes. D'abord, les critères graphiques, où sont comparés visuellement les courbes des débits observés de ceux simulés, dont les inconvénients sont leur subjectivité et leur dépendance à l'analyste (Perrin 2000).

Enfin, les critères numériques, qui sont abondants, comme le prouve HydroTest, proposant 20 critères d'évaluation pour les modèles hydrologiques (Dawson et al. 2007). Il s'avère très difficile pour un modèle, de satisfaire à tous ces critères simultanément, sachant qu'il est une simplification de la réalité, conçu pour répondre à des objectifs bien

déterminés. Par exemple, il est difficile de modéliser correctement les crues et les étiages simultanément.

Deux critères ont été sélectionnés pour comparer plusieurs modèles entre eux, sur plusieurs bassins versants, qui sont :

- un critère modifié, basé sur le critère de Nash et Sutcliffe, et habituel en hydrologie ;
- les trois critères de contingence (CSI/POD/SR), spécialement adaptés pour apprécier la pertinence des systèmes d'alerte en crues, et ne nécessitant pas nécessairement de chroniques hydrologiques observées, présentés à l'étape 4.

Le critère de Nash et Sutcliffe (modifié) opère sur les étapes de calage des paramètres et sur l'évaluation des modèles, aux phases LOCAL et REGIONAL (Nash et Sutcliffe 1970). Ce critère numérique calcule l'écart entre les débits observés (Q_{obs}) et ceux calculés (Q_{sim}), sur toute la chronique, et le compare à un écart de référence, obtenu entre le débit observé et sa moyenne (équation 13) Les valeurs sont comprises entre $-\infty$ et 100.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} * 100 \quad (13)$$

Ce critère n'est donc pas borné négativement, pénalisant les bons résultats lorsqu'ils sont trop mauvais dans l'ensemble. Pour que le critère moyen (sur un grand nombre de bassins) soit moins influencé par ces résultats extrêmes, il a été borné entre -100 et 100 (C2M) ; la relation entre NS et C2M (équation 14) se définit comme énoncée dans (Mathevet et al. 2006):

$$C2M = \frac{NS}{2 - NS} \quad (14)$$

L'utilisation d'un critère, comparant les chroniques, est délicate pour les modèles événementiels. Pour caler ou évaluer ces derniers, le critère peut soit être calculé pour chaque crue indépendamment, soit sur toutes les crues simultanément. Dans le premier cas, la médiane (ou moyenne) des performances de toutes les crues est calculée pour chaque bassin. Si ce procédé est facile à mettre en œuvre, il a pour principal défaut de considérer également tous les événements (faibles ou forts). De plus, les forts débits sont prépondérants dans le calcul du critère, lors de l'utilisation du C2M sur des chroniques continues de débits sans aucune transformation.

La seconde technique consiste à calculer un critère unique par bassin. Le C2M est calculé en une seule fois, sur une chronique pseudo-continue (Figure 43), les débits observés entre les événements n'étant pas intégrés au calcul ; seuls sont utilisées les données observées (noir) et calculées (rouge) pendant les événements. Ce second critère, dénommé Nash Pseudo-Continu (NPC), a été retenu. Les paramètres du modèle événementiel sont donc, dans la suite des travaux de cette thèse, calés en une seule fois sur l'ensemble des crues pour chaque bassin, comme pour un modèle continu.

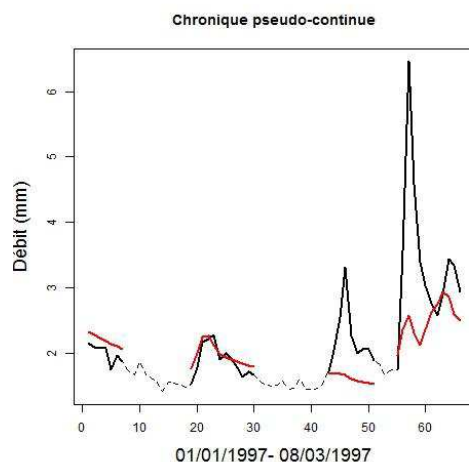


Figure 43 - Calcul d'un critère de Nash sur des chroniques pseudo-continues, lors de l'évaluation d'un modèle événementiel, pour chaque bassin (NPC).

3.2 Approche régionale : techniques de régionalisation (Etape 3)

Sur des bassins non-jaugés, les modèles sont, au préalable, calés par des données débitmétriques. Depuis les années 1970, les hydrologues définissent des bassins donneurs, munis de paramètres optimaux, qui sont transférés aux bassins non-jaugés (Figure 44).

La technique de régionalisation la plus simple, utilisée dans AIGA, consiste à recourir aux valeurs médianes (moyennes) des paramètres calés, sur tous les bassins d'une région hydrologique (Javelle et al. 2010b).

Une variante subdivise la région en sous-régions homogènes, par exemple selon des variables géologiques ou climatiques, et exploite une technique de classifications soit descendantes, par exemple pour la détermination des hydro-écorégions (Wasson et al. 2001), soit ascendantes, pour la définition des types de régimes hydrologiques (Sauquet 2006). Ensuite, les paramètres sont définis en sélectionnant la médiane (moyenne) au sein de la sous-région.

Mais l'utilisation des régressions demeure la technique la plus répandue. Des relations sont établies entre des descripteurs physiques et climatiques d'une part, et les paramètres optimisés du modèle d'autre part (Oudin et al. 2008; Organde et al. 2013). Ces régressions peuvent être simples ou multiples.

La proximité spatiale, technique de régionalisation ancienne, se fonde sur l'hypothèse que les caractéristiques climatiques et physiques sont relativement homogènes au sein d'une région cernant le bassin versant. Le bassin voisin géographiquement semble alors être un bon donneur (Oudin et al. 2008).

La dernière technique relevée dans la littérature s'appuie sur la ressemblance des bassins versants. Généralisation de la proximité géographique, elle tient compte des particularités physiques ou climatiques (Oudin et al. 2008). A l'image de la technique des régressions, l'existence d'une relation entre les paramètres et les descripteurs physiques constitue l'hypothèse principale.

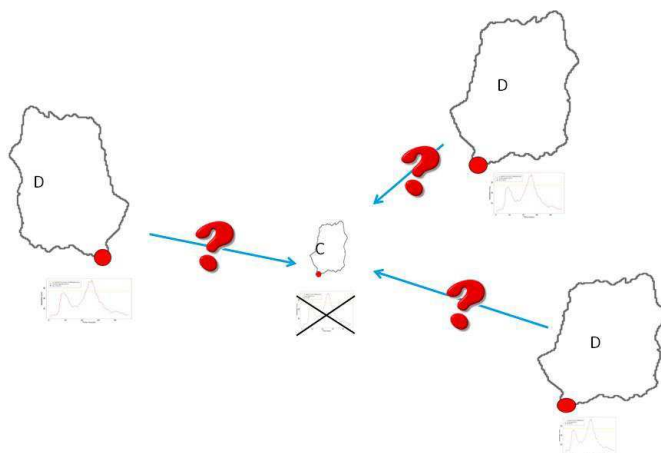


Figure 44 - Schématisation de la régionalisation.

Au cours de cette deuxième phase méthodologique, l'optimisation des paramètres des quatre modèles testés ainsi que leur évaluation s'effectuent sur la totalité de la période d'étude. Les cinq techniques de régionalisation sont examinées et contraintes, afin d'obtenir les meilleures performances. Dans cette partie, sont quantifiés les bénéfices de ces améliorations, qui sont comparés aux résultats de la méthode utilisée en opérationnel dans la méthode AIGA (Initiale). En plus, il est vérifié si cette régionalisation ne supprime pas les avantages obtenus par les couplages élaborés localement et ayant permis de déterminer quatre variantes (1, 2, 3 et 4) à partir de la version originelle. Finalement, la meilleure variante régionalisée est conservée et concourt dans la seconde validation en « vrai non-jaugé ».

Tableau 6 - Différents cas de régionalisation utilisés dans la partie REGIONAL de la thèse.

Méthode AIGA	MEDIANE	SS-REGIONS	REGRESSION	PROXIMITE	RESSEMBLANCE
Initiale	X				
Nouvelle : variantes (1, 2, 3, ou 4)	X	X	X	X	X

3.3 Évaluation à partir d'une information de dégâts (Etape 4)

Un des éléments original de cette thèse consiste à évaluer les performances des modèles sur des bassins réellement non-jaugés, à l'aide d'information sur les dégâts, avec des caractéristiques proches de ceux subissant les crues éclair. L'évaluation est réalisée à l'aide de statistiques de contingences comptabilisant les relevés de dégâts et les dépassements d'un seuil d'alerte, toute la difficulté résidant dans la définition de ce dernier (Figure 45).

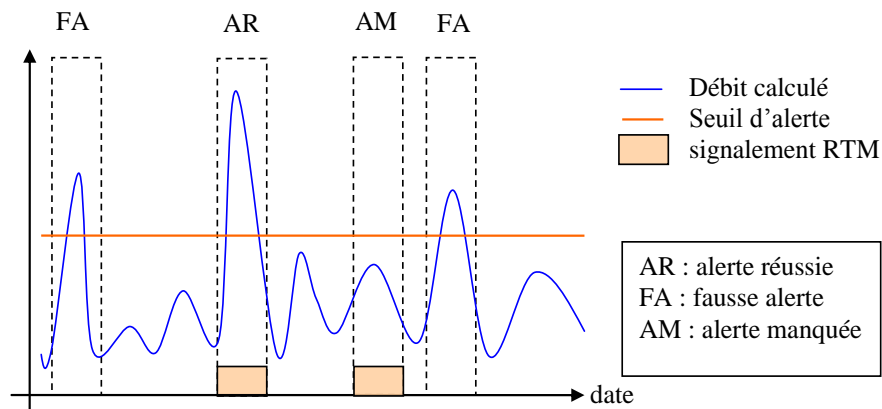


Figure 45 - Cas possible de comparaison d'un modèle hydrologique et d'une base de données de dégâts.

La comparaison des débits calculés et des dégâts impose une évaluation portant sur des dépassements de seuils, plutôt que sur la qualité de la chronique. A partir d'un tableau de contingence, sont calculés les critères CSI-POD-SR. Ces critères sont présents dans d'autres domaines liés aux risques naturels, tels que les ouragans (Schaefer 1990). En hydrologie, ils qualifient aussi les modèles événementiels d'alerte aux crues (Norbiato et al. 2008; Montesarchio et al. 2009; Javelle et al. 2010b).

Dans le tableau de contingence, présenté ci-dessous (Tableau 7), les alertes observées ou non observées dans la réalité sont représentées en abscisse, et les alertes calculées ou non par le modèle, en ordonnée. On entend par « alerte observée », le signalement d'un dégât, et par « alerte simulée » le dépassement d'un débit seuil, par le débit calculé du modèle. La comparaison de ces alertes, de natures différentes, sera discutée plus loin. La valeur AR désigne les alertes correctes, à la fois observées et calculées, alors que NC indique les non-alertes calculées et non observées. Ces deux valeurs expriment les bons résultats du modèle. Au contraire, AM représente les alertes manquées par le modèle, pourtant observées. Il s'agit du pire scénario pour le modèle, qui peut conduire aussi à des catastrophes sur le terrain. Quant au FA, il correspond aux fausses alertes du modèle, celles calculées mais qui n'ont pas eu lieu. Ce mauvais résultat a moins de conséquences pour un service de prévision de crues, mais ne doit pas être trop élevé sous peine de décrédibiliser les alertes émises.

Tableau 7 - Tableau de contingence des signalements de dégâts (abscisse) et des débits calculés (ordonnée).

		SIGNALEMENT RTM (observation)	
		OUI	NON
DEPASSEMENT DE SEUIL (modèle)	OUI	AR	FA
	NON	AM	NC

Pour ces quatre valeurs, des indices sont déterminés pour évaluer la qualité du modèle. En prévision des crues, de tels indices existent, permettant de mieux contrôler la calibration du modèle et la valeur des résultats obtenus. Ils quantifient aussi les dépassements de seuils, donc les crues, et découlent d'une table de contingence. Ce sont le « Probability Of Detection » (POD), le "Success Rate" (SR) et le « Critical Success Index » (CSI) (Norbiato et al. 2008) :

$$POD = \frac{\Sigma AR}{\Sigma AR + \Sigma AM} \quad SR = \frac{\Sigma AR}{\Sigma AR + \Sigma FA} \quad CSI = \frac{\Sigma AR}{\Sigma AR + \Sigma AM + \Sigma FA}$$

Avec AR : le nombre de bonnes alertes

AM : le nombre d'alertes manquées

FA : le nombre de fausses alertes

Tous les indices sont bornés entre 0 et 1 ; 1 étant la valeur optimale. Le POD désigne le nombre d'alertes bien simulées (AR) sur l'ensemble des alertes observées (AR+AM) ; une valeur de 0.5 signifie que la moitié des alertes est correctement détectée. Le SR informe sur les alertes du modèle en divisant le nombre de bonnes alertes par la totalité des alertes simulées (AR+FA) ; un résultat de 0.5 indiquant que la moitié des alertes produites par le modèle est fausse. Le CSI se compose du POD et du SR, renseignant sur la qualité générale du modèle. Sur une échelle hiérarchique, cet indice se situe en première place, devant le POD et pour finir, le SR.

Si ces indices sont largement employés dans l'évaluation des systèmes d'alerte en contexte non-jaugé, ils présentent malgré tout plusieurs faiblesses dont :

- L'absence de prise en compte de l'anticipation. Si l'alerte calculée se produit après la crue observée, elle est comptabilisée comme correcte. Pour un opérationnel, l'alerte ne sera plus utile. Cependant la précision temporelle des relevés de dégâts est journalière et le modèle est horaire, il n'est donc pas possible de calculer l'anticipation ;
- Le dépassement de seuil par rapport à un unique seuil. Si le modèle simule une crue décennale, alors qu'une biennale est observée, l'alerte est définie comme étant bonne ;
- L'analyse par contingence implique de disposer d'un échantillon d'alertes observées relativement important, pour ne pas subir des effets de classes.

La démarche complète est décrite précisément dans les chapitres 6 et 7 de ce manuscrit.

4 Conclusion

Les particularités des bassins versants sujets aux crues éclair et l'outil d'anticipation, actuellement utilisé dans la plateforme du projet RHYTMME, ont conduit à proposer pour cette thèse deux objectifs principaux :

- L'amélioration du modèle AIGA en tenant compte des spécificités de la montagne ;
- La nécessité de développer une technique d'évaluation des modèles, adaptée à de petits bassins non-jaugés, reposant sur des données de dégâts.

Le fonctionnement de la méthode AIGA se fonde d'une part, sur une modélisation événementielle horaire simulant les crues et d'autre part, sur une modélisation continue estimant les conditions initiales. Cependant, sans remettre en cause la technique reposant sur les deux modèles (événementiel et continu), il a fallu y apporter quelques modifications afin de l'adapter à la zone de montagnes. Il a donc été décidé d'ajouter une modélisation journalière plus complète, afin de fournir un débit initial avant la crue, et un module de neige. Ce dernier doit, en outre, être capable d'améliorer l'estimation de l'humidité des sols en simulant correctement le stockage de l'eau sous forme neigeuse ainsi que la fonte. Il en résulte qu'en plus de la méthode AIGA actuelle, quatre variantes ont été élaborées et seront détaillées et testées dans le chapitre suivant. Elles s'appuient sur le modèle événementiel horaire GRD, le modèle continu journalier GR4J et un modèle de fonte de neige degrés-jour, développé par l'équipe hydrologie du centre IRSTEA d'Aix-en-Provence.

Afin de répondre au mieux aux deux objectifs de la thèse, la méthodologie poursuivie pendant le reste de la thèse a été précisément expliquée. Elle se divise en quatre phases distinctes. La première a été terminée au chapitre précédent avec l'élaboration des événements, phase capitale pour le modèle événementiel. La deuxième permettra de répondre partiellement au premier objectif de la thèse en déterminant la meilleure des variantes parmi les quatre couplages proposés. Afin de s'affranchir des problèmes liés à la régionalisation, cet étape sera élaborée sur l'échantillon des bassins HYDRO en local, c'est-à-dire que les paramètres des modèles seront calés à l'aide des données de débits disponibles sur le bassin où il est utilisé (Approche locale, Chapitre 4). La troisième étape clôturera le premier objectif de la thèse en régionalisant, sur l'échantillon des bassins HYDRO, le meilleur couplage choisi à l'étape précédente (Approche régionale, Chapitre 5). Le premier objectif de la thèse sera ainsi accompli. Finalement, la quatrième et dernière étape consistera à utiliser les données de dégâts pour évaluer le nouveau couplage régionalisé, sur des bassins réellement non-jaugés. Cette ultime phase permettra de répondre au second objectif de la thèse (Evaluation à partir de données de dégâts, Chapitre 6 et 7).

Les données disponibles (chapitre 2) et le cadre méthodologique (chapitre 3) étant décrits précisément, les travaux de la thèse, propres à l'adaptation de la méthode AIGA aux zones de montagnes, peuvent démarrer par l'approche locale, dans le chapitre suivant.

Chapitre IV : Approche locale : calage et évaluation des variantes issues de la méthode AIGA

Quelles sont les performances de la méthode AIGA ?

Comment prendre en compte l'humidité des sols et le débit initial précédant la crue?

Comment la neige influence-t-elles les performances des modèles ?

L'objectif de la thèse est de développer un système d'anticipation des crues éclair, fondé sur un modèle hydrologique adapté aux zones montagneuses. Ce chapitre tente de résoudre la première partie de cet objectif et s'inscrit dans la deuxième étape de la méthodologie présentée au deuxième chapitre. Cette dernière a démontré l'importance de la phase de développement local, où le modèle est calé et évalué sur le même bassin. Cette étape a pour perspectives la clarification des « processus » prédominants de la modélisation horaire et la définition du meilleur modèle d'anticipation des crues éclair.

L'influence de la méthode d'initialisation sur le modèle horaire GRD et de la prise en compte de la neige est étudiée à travers la version initiale, exploitée actuellement par la méthode AIGA et quatre nouvelles variantes. Pour ces cinq versions testées, il y a un modèle journalier qui fonctionne en continu pour initialiser un modèle horaire, qui n'est utilisé que pour simuler les événements de crues. Les quatre variantes présentent toutefois des initialisations différentes :

- variante 1 : le réservoir de production du modèle GRD est initialisé à partir du modèle continu GR4J. Le réservoir de routage a un remplissage de 30% correspondant à un débit nul, comme dans la version initiale ;
- variante 2 : l'initialisation du modèle GRD de la variante 1 est complétée par la prise en compte du débit initial précédent l'événement de la crue et correspond au débit simulé par le modèle GR4J ;
- variante 3 : la prise en compte de la neige est réalisée au pas de temps journalier pour améliorer l'initialisation du modèle GRD de la variante 2 ;
- variante 4 : l'initialisation de GRD reste identique à celle de la variante 3 et seule la pluie est prise en compte par le modèle horaire GRD, la part solide étant soustraite des précipitations.

D'abord, les performances et les limites de la version initiale, actuellement utilisée dans la méthode AIGA, sont illustrées avec des exemples de crues. Dans la deuxième partie, les différents couplages entre les modules horaire et journalier sont exposés, ainsi que les paramètres à caler et la technique pour le faire. Cette partie s'achève avec la prise en compte de la neige (module neige). Après l'approfondissement de la méthodologie, les résultats sont discutés, d'abord sans, (section 3) puis avec la neige (section 4). La fin de cette section aborde la question de la robustesse. Finalement le chapitre se clôture sur la variante, qui sera régionalisée dans le chapitre suivant (Etape 3 dans la méthodologie), et sur ses faiblesses.

1 Pourquoi faire évoluer le modèle hydrologique de la méthode AIGA actuelle ?

Préambule : la modèle initial de cette thèse est la version en développement de la méthode AIGA. Elle est le point de départ des variantes développées durant cette thèse. Notons que cette version s'approche de la version opérationnelle de la plateforme de RHYTMME.

Pour adapter le modèle GRD (Tableau 8) à la zone de montagnes et aux bassins non-jaugés, l'analyse de ses performances permet d'identifier ses faiblesses en région montagneuse, à l'aide de l'échantillon de 118 bassins, constitué à partir de la banque HYDRO. Ce modèle ayant été calé lors d'études antérieures (Javelle et al. 2010b) avec des données différentes de celles utilisées dans cette thèse, l'ensemble des dix années de précipitations COMEPHORE a servi à l'évaluation de la capacité, du modèle à reproduire des hydrogrammes observés (analyse basée sur les valeurs du Nash pseudo-continu : NPC). Dans cette première partie du chapitre 4, le modèle est régionalisé contrairement aux variantes testées dans le reste du chapitre.

Pour rappel, le modèle distribué nécessite seulement une initialisation de son réservoir de production, selon la règle reliant son taux de remplissage initial $(S/A)_{h_{init}}$ ⁵ à l'indice fourni par un modèle continu journalier (SAJ); son débit initial vaut 0 mm et un remplissage de 30% est imposé au réservoir de routage (Chapitre 3).

Tableau 8 - Caractéristiques de la version initiale, modèle utilisé dans la méthode AIGA.

	Initialisation (Jour) Suivi en continu			Crues (horaire) Simulation événementielle		
	Modèle	Module neige	Indice de suivi	Modèle	Différence Pluie/Neige	Initialisation 1 : $(S/A)_{h_{init}}$ 2 : R0/B
Initial	GR3J	Non	1 : $(S/A)_{j-1}$	GRD distribué	NON	1 : $fact(S/A)$ (formule régionale) 2 : 30%

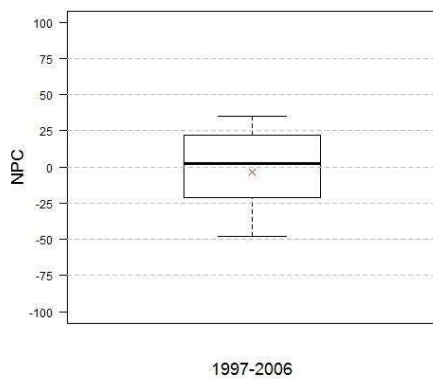
1.1 Analyse des résultats

La Figure 46 présente les résultats de GRD régionalisé, obtenus pour les 118 bassins versants HYDRO. Ceux-ci indiquent l'inadaptation du modèle à l'échantillon de bassins versants, en termes de NPC (Figure 46-A). La valeur du Nash Pseudo-continu (NPC)

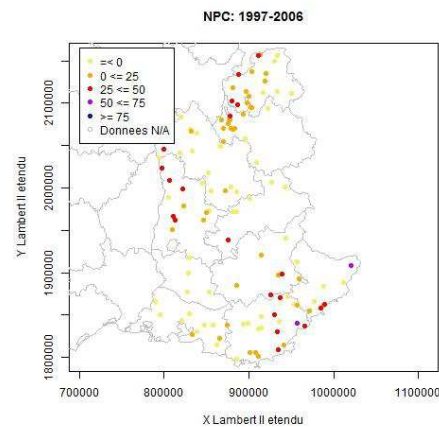
⁵ Equation (8) reliant le taux de remplissage journalier au taux horaire initial Chapitre 3, section 1.3
page 81

supérieure à 50% est atteinte par moins de 10% des 118 bassins. De plus, presque la moitié des bassins dispose d'un NPC négatif, ce qui signifie que le modèle naïf, correspondant à la moyenne des débits, est meilleur. Ce résultat s'explique par le fait que le modèle GRD a été calé à l'aide des pointes de crues et que son but n'est pas de reproduire les chroniques entières, mais le débit maximum avec la meilleure anticipation possible. Notons également que les données de précipitations utilisées pour le calage étaient différentes de celles utilisées dans cette thèse, ce qui influence également le résultat.

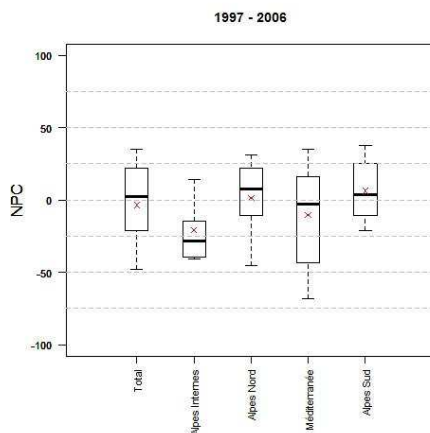
L'analyse détaillée et approfondie de ces résultats (Figure 46-B & C) montre que seuls deux bassins ont des valeurs dépassant 50%. Elle permet de distinguer les zones disposant des meilleurs résultats en NPC : pour la HER des Alpes du Nord, le long du Rhône, les résultats, même s'ils restent faibles, sont globalement meilleurs, se situant, pour la Haute-Savoie entre 0 et 25% et pour la Drôme, entre 25 et 50%. Les Préalpes du Sud, sur les sous-bassins de la Durance, obtiennent des résultats similaires. Au contraire, les résultats des Alpes Internes sont beaucoup plus faibles que les autres, à cause notamment de la qualité de la lame d'eau ainsi que de la présence de neige. Dans la HER Méditerranée, la variabilité est forte, les résultats sont corrects sur les affluents du Rhône (Drôme) devenant médiocres en se rapprochant de la mer. Ce dernier fait est cependant surprenant car le modèle a été conçu spécialement pour cette région. Toutefois, rappelons qu'il n'a pas été développé pour reproduire la forme de la crue, mais pour reproduire au mieux la pointe de crue et déclencher des alertes dès le dépassement d'un certain seuil de débit.



A)



B)



C)

Figure 46 – Présentation des résultats de la méthode AIGA en NPC : A) résultat général ; B) cartographie des résultats ; C) répartition en HER ;

1.2 Illustration des problèmes

Quatre bassins versants aux caractéristiques différentes, pris dans chacune des hydro-écorégions, permettent d'identifier les faiblesses du modèle GRD. Sur la Figure 47, en analysant les chroniques pseudo-continues, dont les événements sont mis bout à bout, le modèle dévoile ses limites. A gauche, la chronique du bassin de l'Argens (Y5032010) montre un modèle trop réactif : 13 débits simulés dépassent le seuil de retour de 10 ans, au lieu d'un seul attendu en moyenne. De plus, les plus forts débits calculés ne correspondent pas toujours aux observés. Une des explications concerne l'élaboration de la règle d'initialisation entre le modèle d'initialisation continu (journalier) et le modèle événementiel de crues (horaire). Celle-ci a été calée à l'aide de cumuls de précipitations qui, en moyenne, sont inférieurs à ceux obtenus à l'aide de COMEPHORE. De ce fait, un certain « forçage » de l'initialisation conduit à une surestimation des débits simulés.

Le second graphique présente le cas de la Severaisse, dans les Alpes Internes, dont les simulations sous-estiment les débits, par rapport à ceux observés, notamment à cause de l'indifférence à l'égard du débit initial précédent chaque événement. Le modèle GRD démarre systématiquement avec un débit nul, qui relève d'un choix lors du développement de la méthode AIGA pour le pourtour méditerranéen. Parallèlement à ce problème, il faut noter qu'une nouvelle fois GRD pâtit d'une mauvaise initialisation aboutissant à une surestimation des débits simulés, comme pour le bassin de l'Argens. Il y a cinq débits modélisés (trait rouge) supérieurs à la période de retour 10 ans, pour deux observés sur la même période (trait noir).

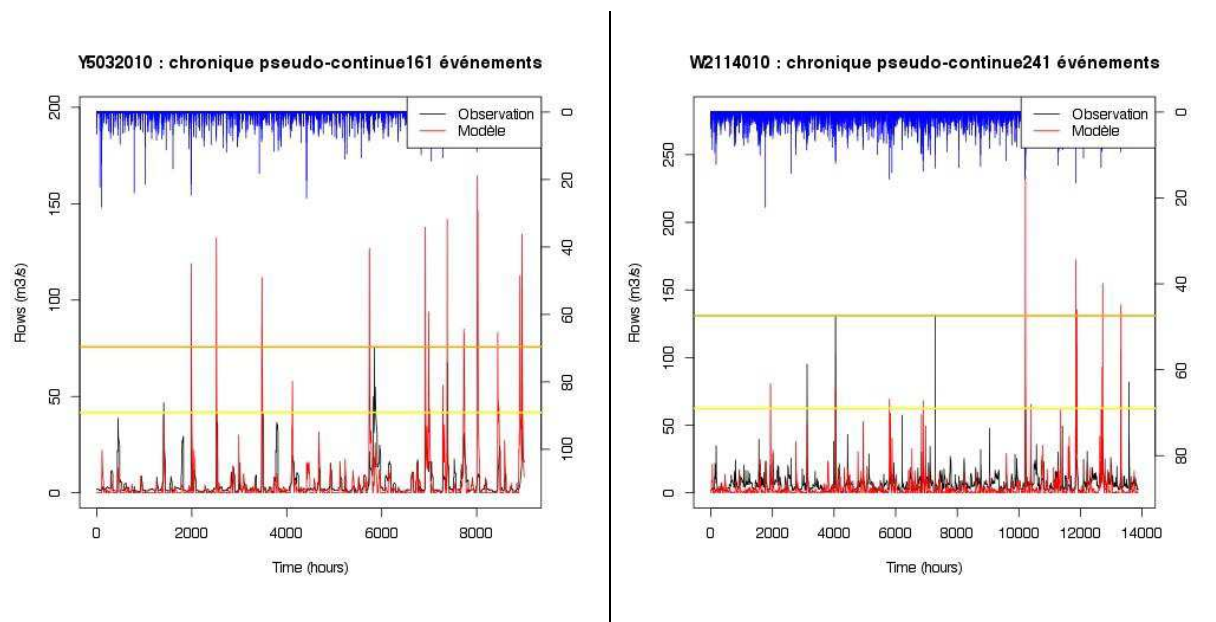
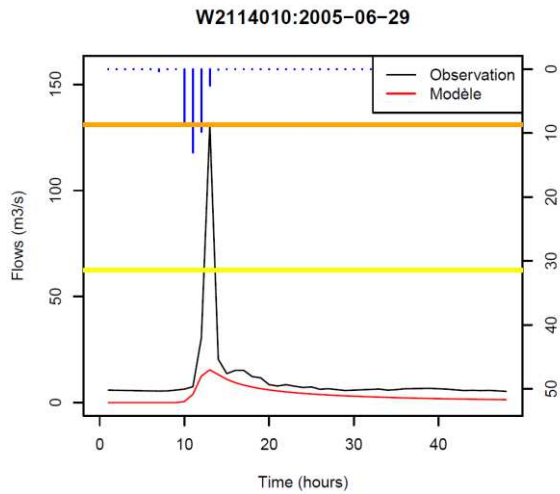


Figure 47 - Chroniques pseudo-continues sur le bassin versant de l'Argens (Y5032010 - Méditerranée) et sur le bassin de La Severaisse (W2114010 - Alpes Internes). En noir, sont représentés les débits observés et en rouge, les débits simulés. Les seuils de période de retour de 2 ans (jaune) et 10 ans (orange) se fondent sur les débits observés, afin de mettre en évidence les problèmes et d'attribuer à chaque bassin ses débits de référence.

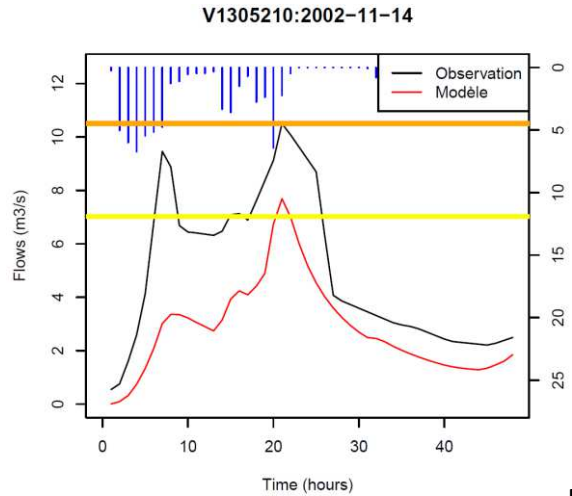
Si la chronique complète montre les défaillances du modèle en se focalisant sur certains événements, il est possible d'identifier plus précisément les limites du module horaire (Figure 48). L'absence de réaction du modèle (Figure 48-A), peut s'expliquer par la non-détection de la pluie pendant l'événement. La sous-estimation de la pluie, malgré l'utilisation de la lame d'eau la plus précise de Météo-France, COMEPHORE, illustre bien cette difficulté bien présente en montagne. Aucune solution hydrologique n'est envisageable et chaque modèle développé, dans ces conditions, continuera d'obtenir de faibles performances.

Outre la sous-estimation de la pluie, le manque de réaction du modèle (Figure 48-B) peut s'expliquer aussi par l'initialisation du module horaire, la taille des réservoirs (trop grands), la mauvaise estimation de l'humidité des sols, la prise en compte de la neige, autant de difficultés lors de la modélisation des débits. A l'inverse, un modèle trop réactif simule une crue qui n'a pas eu lieu (Figure 48-C). L'absence de distinction entre la neige et la pluie ou de petits réservoirs peut en être la cause, ainsi que la méthode de routage utilisée (soit la somme des débits unitaires à l'exutoire). Des débits simulés, excessifs sur la fin des chroniques (Figure 48-D), s'observent sur beaucoup de bassins, lors de longs événements (supérieur à 72h), en lien avec la saturation du réservoir de production, qui ne se vidange pas pendant un événement (pas de prise en compte ni de l'ETP ni de la vidange). Partir de l'hypothèse d'un débit initial nul, en montagne ou sous des latitudes plus septentrionales, n'est pas pertinent. Ainsi, pour l'événement du 23 novembre 2000 sur le bassin de l'Argens (Figure 48-E), pourtant situé au sud, cette absence de prise en compte se répercute sur le modèle, qui n'a pas su recréer un débit atteignant le seuil de 2 ans, comme cela fut observé.

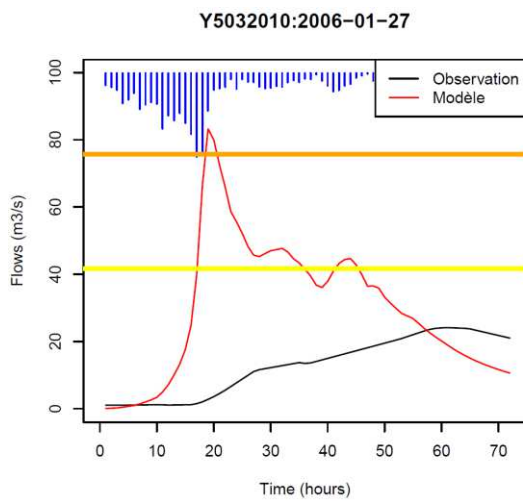
Toutes ces observations mettent en évidence les points faibles du modèle initial, proche de celui utilisé en opérationnel dans la méthode AIGA. Cependant les problèmes observés de pluies mesurées, de mauvaise initialisation, de non prise en compte de phénomènes, comme les apports de débit initiaux et de la neige, restent évidents et la méthode perfectible. Tous ces problèmes soulevés permettent de tirer quelques enseignements orientant la suite des démarches à entreprendre. Il faut tout d'abord revoir la règle d'initialisation avec un nouveau couplage module horaire GRD et continu GR4J pour le réservoir de production, mais également pour le réservoir de routage car un débit initial nul semble pénalisant. La taille des deux réservoirs de GRD paraît également inadaptée et doit être recalée. Ensuite, la zone de montagne implique une prise en compte de la neige qui permet de différer l'écoulement par des stockages temporaires, ce qui peut être reproduit par l'introduction d'un module neige.



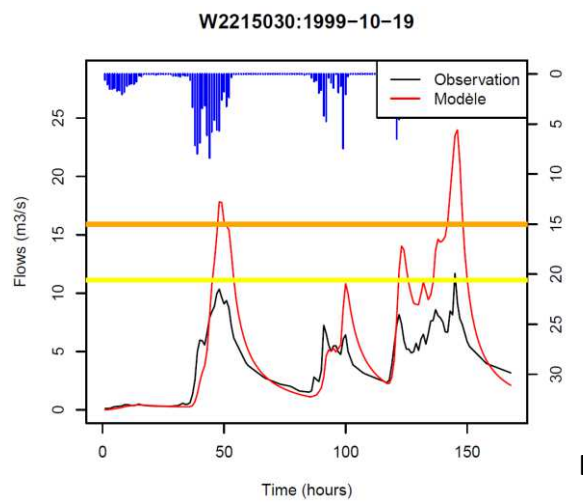
A)



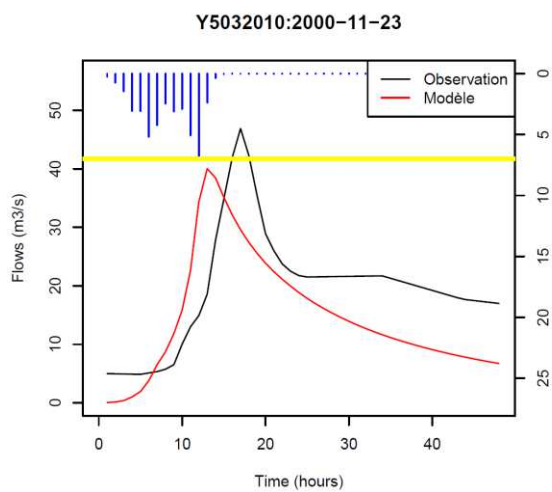
B)



C)



D)



E)

Figure 48 - Différents hydrogrammes, avec le débit observé (noir), le simulé (rouge), la pluie (bleu), et les périodes de retour 2 et 10 ans (jaune et orange), illustrent les problèmes : A) de sous-estimation des pluies ; B) de manque de réactivité ; C) d'excès de réactivité ; D) de saturation des réservoirs ; E) d'importance du débit initial.

2 Méthode proposée

Pour adapter ce système aux régions montagneuses, plusieurs variantes sont proposées en couplant le modèle événementiel GRD avec le modèle GR4J (2.1). Afin de prendre en compte la neige, un module neige y est également ajouté (2.2).

2.1 Couplage du modèle d'initialisation (GR4J) et du modèle de crues (GRD)

2.1.1 Principes

Pour initialiser le modèle horaire événementiel global (GRD), il faut réaliser un couplage avec un modèle permettant de suivre l'état hydrique du bassin versant. Celui-ci est obtenu à l'aide du module journalier du modèle global GR4J. Ce modèle permet alors de renseigner le taux de remplissage de départ du réservoir de production mais également celui de routage, contrairement à la version initiale où GRD s'appuie uniquement sur la production de GR3J.

Afin de déterminer les meilleurs couplages possibles, le travail s'effectue sur les 118 bassins versants de l'échantillon, issu de la banque HYDRO, à l'aide de modèles globaux et non distribués. Ce choix diffère de la méthode AIGA et a permis de gagner du temps de calcul et de tester beaucoup de couplages différents pendant les travaux de thèse. A la fin du chapitre, un ultime test sert à comparer les performances en global, par rapport aux versions distribuées, pour la version AIGA actuelle mais également pour le meilleur modèle confectionné durant le chapitre.

Au pas de temps horaire, le modèle GRD permet de simuler les événements de crues et fonctionne selon un modèle événementiel. Ce système implique de devoir initialiser le taux de remplissage de ses deux réservoirs, de production et de routage. Pour cela, le modèle journalier (GR4J) avec ses quatre paramètres à caler (A_{cont} , B_{cont} , C , D) fournit au modèle horaire événementiel (GRD) les informations suivantes (Figure 49):

- l'état de remplissage de son réservoir de production, la veille d'une crue : $S/A_{GR4J(j-1)}$. Cette valeur servira alors à initialiser le réservoir de production de GRD;
- le débit journalier de la veille d'un événement $Q_{GR4J(j-1)}$. Cette valeur servira à initialiser le réservoir de routage de GRD (procédure dite d'assimilation).
- la taille du réservoir de production correspondant à celle du module GR4J ($A_{cont} = A_{hor}$);

Pour évaluer l'intérêt de l'initialisation, deux variantes de la version initiale sont testées (variante 1 et variante 2). Pour la première variante, seul le réservoir de production du modèle GRD est initialisé par GR4J, le réservoir de routage a pour valeur initial 30% de sa capacité, comme pour la méthode AIGA. Pour la seconde version, en plus de l'initialisation du réservoir de production du modèle GRD, son réservoir de routage est initialisé par assimilation du débit journalier de la veille de l'événement fourni par GR4J. Pour ces deux versions, la taille du réservoir de production de GRD (A_{hor}) est la même que celle du modèle journalier (A_{cont}). Les détails quant aux couplages et aux calages des modèles sont présentés dans la section suivante. La prise en compte de la neige suivra avec deux nouvelles variantes (3 et 4).

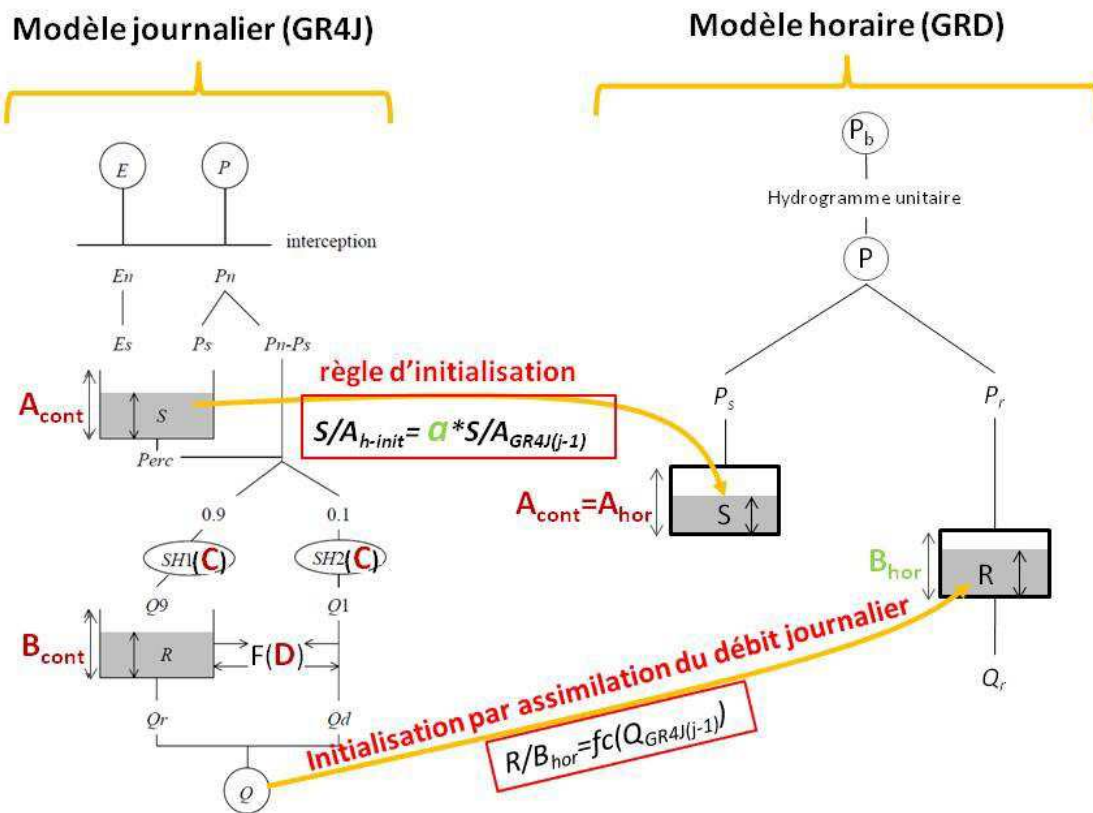


Figure 49 – Présentation du couplage entre le module journalier (GR4J) et le module horaire (GRD) avec les 2 règles d'initialisations (production et routage en rouge) et les 4 paramètres à caler de GR4J (bordeau) et les 2 de GRD (vert).

Initialisation du réservoir de production du modèle horaire GRD

Pour l'état initial du réservoir de production du modèle horaire GRD, une formule, analogue à celle utilisée dans la méthode AIGA actuelle, est définie (équation 15):

$$\left(\frac{S}{A}\right)_{h_init} = a * (S/A)_{GR4J(j-1)} \quad (15)$$

Avec $\left(\frac{S}{A}\right)_{h_init}$ pour le taux de remplissage initial du réservoir de production du modèle horaire (GRD)

$(S/A)_{GR4J(j-1)}$ pour le taux de remplissage du réservoir de production du module journalier GR4J, à la veille de l'événement

a un paramètre à caler pour relier les taux de remplissage du module GRD et du module GR4J

Cette relation provient de tests ayant permis de simplifier la relation utilisée dans la méthode AIGA entre GR3J et GRD (Chapitre 3, section 1.3) et de n'avoir à caler qu'un seul paramètre (a) par bassin versant. Dans la version originelle, trois paramètres régionaux définissent une relation unique, pour tous les bassins versants, entre le modèle journalier continu et le modèle horaire événementiel. Dans les couplages testés dans ce chapitre, l'initialisation du modèle horaire (réalisée à partir du paramètre S/A_{h_init}), pour chaque événement d'un même bassin versant, est fournie par l'état du modèle GR4J, à travers le paramètre ($S/A_{GR4J(j-1)}$) corrigé par le facteur a . Ce paramètre d'initialisation (S/A_{h_init}) est compris entre 0 (lorsque l'événement se déroule suite à une période très sèche) et 1 (lorsque les sols sont saturés). Cette valeur est liée aux précipitations et à l'ETP des journées précédant l'événement.

Le calage des deux modèles (journalier et horaire) s'effectuant en deux étapes (voir plus loin), les valeurs de $S/A_{GR4J(j-1)}$ fournies au module horaire, même lorsqu'il est en phase de calage, sont toujours issues d'un module journalier en validation. Cette méthode, consistant à caler en deux fois (d'abord le module journalier puis le module horaire) permet de rectifier des biais éventuels de GR4J, grâce au terme a . L'humidité des sols est donc à présent prise en compte par le modèle horaire, au sein de la fonction de production, et il ne reste plus qu'à initialiser le réservoir de routage (B_{hor}).

Initialisation du réservoir de routage du modèle horaire GRD

L'analyse des débits initiaux, observés sur les événements (Chapitre 2 section 4), a souligné que ceux-ci peuvent être négligés dans certains cas, pour les bassins versants soumis à un régime méditerranéen. Cependant ils doivent être intégrés dans la modélisation des crues, surtout pour les bassins de montagnes (notamment les Alpes Internes). Pour initialiser le réservoir de routage du module horaire, il faut assimiler le débit de la veille de l'événement fourni par GR4J ($Q_{GR4J(j-1)}$).

A l'origine, le débit nul initial du modèle horaire (GRD), dans la version de départ (méthode AIGA), correspond à un taux de remplissage de 30% (équation 16, voir Chapitre 3, section 1.3 relatif à l'initialisation du réservoir de routage de GRD). Cette règle implique que :

$$Q_0 = 0,0006 * B_{hor}$$

Avec : Q_0 = le débit initial de GRD avant l'événement, dont la valeur est 0 (16)

B_{hor} = la taille du réservoir du modèle horaire GRD

Dans le nouveau couplage entre le modèle horaire GRD et le modèle journalier GR4J, le taux de remplissage initial (R_0) du réservoir de routage (B_{hor}) est obtenu à partir du débit journalier simulé à la veille de l'événement ($Q_{GR4J(J-1)}$). L'estimation du taux de remplissage R_0 est donc déterminée par la solution approximative de Makhlof (1994) (équation 17) :

$$R_0 = B_{hor} \left[1 - \frac{1}{4(1 + q_0)^4 - 3 + (4q_0)^{0.2} + (8q_0)^{0.4}} \right] \quad (17)$$

$$q_0 = \frac{Q_{GR4J(J-1)}}{B_{hor}}$$

Avec : R_0 = l'initialisation du réservoir B_{hor}

B_{hor} = la taille du réservoir du modèle horaire GRD

$Q_{GR4J(J-1)}$ = le débit de la veille de l'événement, fourni par GR4J

Le taux de remplissage du réservoir de routage du modèle événementiel horaire (GRD) est donc en lien au débit de la veille de l'événement. Un débit nul correspond donc à un taux de remplissage nul, contrairement à la version initiale où ce débit nul correspond à un remplissage de 30%.

Dans ce couplage entre le modèle continu journalier (GR4J) et le modèle horaire événementiel (GRD), il y a donc six paramètres à caler. Le calage est effectué en deux phases : d'abord le modèle continu GR4J, nécessaire à l'initialisation du modèle de crue GRD (2.1.2), puis le modèle de crue GRD initialisé par GR4J (2.1.3). Dans un premier temps, les quatre paramètres de GR4J (A_{cont} , B_{cont} , C , D) sont calés à l'aide de la méthode pas à pas (présentée ci-dessous). Puis, en utilisant les sorties du modèle GR4J en validation, les deux paramètres (α et B_{hor}) du modèle horaire GRD sont calés. Le paramètre A_{hor} a une valeur égale au A_{cont} de GR4J, calé lors de la première phase ; l'hypothèse sous-jacente est que la taille du réservoir de production est indépendante du pas de temps du modèle.

2.1.2 Calage du modèle continu journalier (GR4J)

La première étape consiste à caler le module journalier qui fournira une information continue sur l'état d'humidité des sols. La méthode locale pas-à-pas, développée par Michel (1989) et Edijatno (1991), est utilisée pour caler les quatre paramètres de GR4J (A_{cont} , B_{cont} , C , D). Simple, elle souffre des problèmes intrinsèques, liés aux méthodes locales (maximums locaux, faibles variations de certains paramètres), et parvient à des résultats satisfaisants, comparables à ceux des méthodes globales. Cela s'explique par le petit nombre de paramètres à caler (quatre) et leur degré d'indépendance les uns envers les autres (Nascimento 1995). La recherche de l'optimum est par ailleurs effectuée à partir d'un seul vecteur de valeurs de départ et non plusieurs. Ce choix s'appuie sur les travaux de Perrin (2000) qui a examiné l'influence du nombre de points de départ sur l'algorithme. Il conclut que l'ajout d'un second point de départ n'améliore pas les performances, à cause de la simplicité du modèle.

La méthode pas à pas est utilisée avec le critère C2M comme fonction objectif (Chapitre 3, section 3.1.3) calculé sur la racine carrée des débits. Le choix d'utiliser des débits transformés influence les valeurs des paramètres du modèle. Chiew et al. (1993) décrivent

deux transformations possibles des débits, utilisables dans la phase de calage : soit ils ne sont pas transformés, favorisant ainsi les périodes de hautes-eaux, soit une puissance leur est ajoutée, les débits moyens gagnant en considération. Perrin (2000) répertorie plusieurs auteurs employant la transformation logarithmique pour favoriser la simulation des étiages. En se référant aux résultats de Perrin (2000; 2002), un calage sur la racine carré des débits (puissance 0.5) semble plus adapté au cas du GR4J, utilisé ici pour initialiser un module horaire de simulation des crues, pour lesquelles la connaissance précise des étiages est hors de propos. Ce choix a été confirmé par le calage de GR4J à l'aide d'autres transformations de débits (non transformés ou logarithme) qui donnent des résultats pour le modèle événementiel GRD moins bon. Une fois calé le modèle GR4J, il faut s'intéresser à la seconde phase de calage, celle du module horaire GRD, par un test de sensibilité.

Méthode Pas à pas

La méthode pas-à-pas recherche le vecteur de paramètres optimums, d'une manière itérative en maximisant (ou en minimisant) une fonction objectif comme le C2M. L'espace de paramètres est parcouru en modifiant chaque paramètre, l'un après l'autre, avec un pas de recherche pouvant varier d'une itération à l'autre, le long des axes de l'espace des paramètres. Afin que le pas soit le même pour tous les paramètres, ceux-ci subissent une transformation mathématique (ici : logarithmique). La recherche commence par un vecteur initial fournisseur de la première valeur de la fonction objectif. Si un meilleur résultat est obtenu, la recherche continue dans cette direction avec en plus, la possibilité d'augmenter le pas de recherche pour accélérer le processus. Si le résultat est moins bon, l'ampleur du pas de recherche est diminuée pour affiner le résultat. La recherche se termine dès lors que le pas de variation devient minime (0.01), l'optimum étant alors atteint, ou que le nombre d'itération est supérieur à un certain seuil (100n), concluant à la non-identification d'un optimum. Une description complète de cette méthode est disponible dans la thèse de Perrin (2000).

2.1.3 Calage du modèle de crues horaire (GRD)

Sur les six paramètres à caler des deux modèles journalier et horaire, il n'en reste que deux : la taille du réservoir de routage (B_{hor}) et le paramètre α de la relation entre le $S/A_{GR4J(j-1)}$ et le $S/A_{h_{init}}$ (équation 13). Ils sont déterminés par un test de sensibilité (Figure 50). Leur calage est effectué de la même façon pour chaque variante de modélisation. Pour le paramètre α (en abscisse), les valeurs sont parcourues avec un pas de 0,05, allant de 0,05 à 2,1. Initialement établie à 50 mm dans le modèle GRD, la taille du réservoir de routage (B_{hor}) est remise en cause dans cette utilisation en version globale (alors qu'initialement GRD est un modèle distribué à la maille de 1 km²). Dans la configuration originelle, il y a donc un réservoir de 50 mm pour chaque pixel. Lors du calage local de GRD global, les valeurs de B_{hor} testées sont comprises entre 1 et 1050 mm. Variable, le pas de recherche est plus resserré aux valeurs faibles et atteint un maximum de 50 mm. Sont dégagés 1512 couples (α , B_{hor}) potentiels, pour le calage du module horaire. La fonction objectif à maximiser est le Nash Pseudo-Continu (NPC). D'autres fonctions objectifs sont

possibles comme un NPC calculé uniquement sur les pointes de crues ou le critère CSI. Mais des tests préalables ont montré que le NPC, sur les chroniques événementielles, donne les meilleurs résultats car l'utilisation de la chronique contraint plus le modèle lors du calage et permet d'obtenir des paramètres plus robustes.

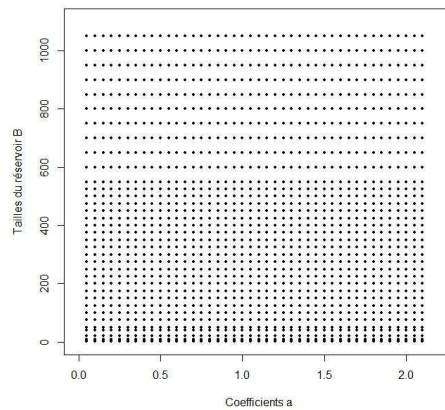


Figure 50 - Test de sensibilité des paramètres a et B_{hor} pour GRD

Le couplage entre le module journalier (GR4J) et horaire (GRD) est effectué à l'aide de modèles globaux (les modèles distribués sont présentés à la fin du chapitre) et six paramètres sont à caler en deux fois. A partir de cette base commune, nous étudions dans ce chapitre l'intérêt d'initialiser le réservoir de production et de routage simultanément, pour s'adapter aux zones montagneuses. Afin d'achever cette mise en route méthodologique, il ne reste plus qu'à assimiler la neige aux pas de temps journalier et horaire.

2.2 Prise en compte de la neige aux pas de temps journalier et horaire

La neige influence grandement l'humidité des sols et le bilan hydrologique annuel des bassins montagneux, comme l'illustrent les études de Merz et Blöschl (2003) et de Nester et al. (2012). Pour la prendre en compte, elle est introduite sur deux niveaux, dans la modélisation des crues. D'abord, un module de neige est placé en amont de GR4J. Ce module permet de prendre en compte le stockage des précipitations solides et leur fonte de façon différée. Ce module doit permettre d'améliorer l'estimation de l'humidité des sols et du débit journalier, nécessaires à l'initialisation du modèle de crues horaire. Ensuite, la prise en compte de la neige est réalisée au pas de temps horaire. Dans ce cas, un module de neige ne nous a pas semblé nécessaire pour gérer le stock de neige lors de la période de crue. Cette partie peut en effet être considérée comme négligeable (Sui et Koehler 2001). Par contre, il nous est apparu nécessaire de distinguer la partie liquide des précipitations, de celle solide, pour ne pas surévaluer les apports en précipitations (pouvant être en partie solide) lors d'une crue.

Donc, dans les deux cas (journalier et horaire), la distinction des précipitations doit être réalisée. Pour le pas de temps journalier, la partie solide sera prise en compte dans un module de neige, dans lequel le stockage et la fonte de la neige seront gérés. Pour le pas de

temps horaire, la partie solide sera simplement supprimée des précipitations en entrée du modèle.

Pour évaluer la quantité de neige en entrée des modèles horaire et journalier, les données SAFRAN sont nécessaires à chaque pas de temps. En effet, la lame d'eau COMEPHORE ne distingue pas la neige de la pluie. Pour le pas de temps journalier (respectivement horaire), le ratio Pluie/Neige de SAFRAN est calculé chaque jour (respectivement chaque heure) et la part solide de la lame COMEPHORE est déterminée par les équations 18 et 19.

$$COMEPHORE_{Liquide} = \frac{Pluie_{SAFRAN}}{(Pluie_{SAFRAN} + Neige_{SAFRAN})} * COMEPHORE \quad (18)$$

$$COMEPHORE_{Solide} = COMEPHORE - COMEPHORE_{Liquide} \quad (19)$$

Pour le module de neige journalier, la part neigeuse est recueillie dans un réservoir de neige, dont la fonte est reproduite par une formule degrés-jour régionale qui a été présentée au chapitre 3 section 2.1. Pour rappel, ce type de formule estime la quantité de neige fondue à partir du stock de neige et de la température journalière. La fonte obtenue est alors ajoutée à la pluie COMEPHORE de laquelle la part solide a été soustraite. C'est cette nouvelle lame d'eau journalière qui alimente GR4J à la place des précipitations brutes (Figure 51). Cette méthode d'addition simple de la fonte et de la pluie est la plus courante en hydrologie (comme par exemple Valéry 2010).

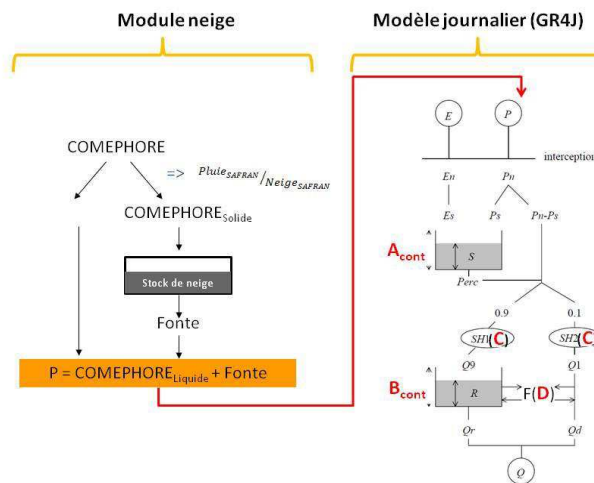


Figure 51 – Fonctionnement du modèle GR4J avec le module neige.

Pour le pas de temps horaire, seul la pluie liquide entre dans le modèle GRD. Cependant, l'intégration de la fonte de la neige sur la modélisation des crues a aussi été testée. Dans ce cas, nous utilisons la fonte fournie par le modèle de neige journalier. Cette partie fondue est discrétisée uniformément seulement sur les heures où la température horaire, fournie par SAFRAN, est supérieure à 0°C ; le reste du temps, la fonte est indiquée à 0 mm/h. Notons déjà que cette dernière opération n'a eu qu'un impact négligeable sur la modélisation.

2.3 Les variantes testées

Quatre variantes (Tableau 9) déjà évoquées au chapitre 3, et leurs résultats sont comparées et ensuite discutées. Dans cette partie nous justifions de l'intérêt d'initialiser le modèle horaire (GRD global) (section 3). La variante 2 est le fruit d'une initialisation complète du modèle horaire à partir de GR4J, avec l'humidité des sols correspondant à la veille de l'événement, corrigée par un paramètre à caler α ainsi qu'avec le débit de base, provenant de l'assimilation du débit journalier de la veille. L'intérêt de cette double initialisation est mise en évidence en la comparant à la variante 1, où seule l'humidité des sols est prise en compte, comme dans la version initiale. Pour ces deux (trois si l'on compte la version initiale d'AIGA) premières variantes, il n'y a aucune prise en compte de la neige.

La question de l'initialisation se poursuit dans la section 4, en intégrant la neige dans la modélisation. Pour l'influence de celle-ci sur les modèles d'anticipation des crues, la variante 4 inclut le module de fonte de la neige, au pas de temps journalier, et une distinction de la part liquide et solide des précipitations journalières et horaires. Cette variante 4 est comparée à la variante 3, qui ne tient compte de la fonte et de la part liquide des précipitations qu'au pas de temps journalier à travers GR4J. Les performances des deux versions de GR4J (avec le module neige et sans la neige) sont également analysées et la partie des résultats commence par ce point.

Tableau 9 – Modèle initiale et ses 4 variantes testées lors de l'approche locale

	Initialisation (journalier) Modélisation continue			Crues (horaire) Simulation événementielle		
	Modèle	Module neige	Indice de suivi	Modèle	Différence Pluie/Neige	Initialisation 1 : $(\frac{S}{A})_{h_{init}}$ 2 : R0/B
Initial	GR3J	Non	1 : $(\frac{S}{A})_{GR3J(j-1)}$	GRD distribué	NON	1 : fct (S/A) (formule régionale) 2 : 30%
Variante 1	GR4J	Non	1 : $(\frac{S}{A})_{GR4J(j-1)}$	GRD global	NON	1 : $\alpha * (\frac{S}{A})_{GR4J(j-1)}$ 2 : 30%
Variante 2	GR4J	Non	1 : $(\frac{S}{A})_{GR4J(j-1)}$ 2 : $Q_{GR4J(j-1)}$	GRD global	NON	1 : $\alpha * (\frac{S}{A})_{GR4J(j-1)}$ 2 : fct($Q_{GR4J(j-1)}$)
Variante 3	GR4J	Oui	1 : $(\frac{S}{A})_{GR4J(j-1)}$ 2 : $Q_{GR4J(j-1)}$	GRD global	NON	1 : $\alpha * (\frac{S}{A})_{GR4J(j-1)}$ 2 : fct($Q_{GR4J(j-1)}$)
Variante 4	GR4J	Oui	1 : $(\frac{S}{A})_{GR4J(j-1)}$ 2 : $Q_{GR4J(j-1)}$	GRD global	OUI	1 : $\alpha * (\frac{S}{A})_{GR4J(j-1)}$ 2 : fct($Q_{GR4J(j-1)}$)

3 Apport de l'initialisation

Préambule : toutes les boîtes à moustache utilisées, pour présenter les performances des différentes versions du modèle dans les chapitres suivants, ont été définies au chapitre 2, section 3. Les moustaches correspondent aux premier et neuvième déciles. La boîte englobe les premier et troisième quartiles. Finalement, la médiane est représentée par le trait noir épais et la moyenne, par une croix rouge.

3.1 Calage du modèle journalier GR4J

Afin de s'assurer que le modèle journalier (GR4J) fournit au modèle horaire GRD des états initiaux corrects pour le réservoir de production et de routage, les performances de GR4J sont analysées d'abord sans prendre en compte la neige. Le calage des paramètres est opéré à l'aide du Split-Sample Test, sur les deux sous-périodes de cinq ans, de l'algorithme pas-à-pas, d'une procédure de simple départ et du critère C2M, portant sur la racine carrée des débits comme fonction objectif. Auparavant, une période de mise en route d'un an rend le modèle autonome à l'égard des états initiaux. Les deux sous-périodes de calages permettent d'obtenir deux sous-périodes de cinq ans en validation. Pour analyser les résultats, la moyenne des performances en validation est calculée.

Sur la Figure 52, la médiane des résultats atteint 55%, en termes de C2M. Ce chiffre, comparable à celui du modèle GR4J testés dans les travaux de Mathevet (2005). Il y a cependant une grande variabilité dans les performances, entre les 10% les meilleurs et les 10% les plus faibles, il y a une différence de 65% qui s'explique par les grandes différences entre les caractéristiques des bassins HYDRO. Le modèle reproduit correctement les chroniques de débits journaliers sur les affluents du Rhône de la Haute-Savoie (hormis le massif du Mont-Blanc), les bassins de la Drôme (mauve et bleu), du Var et des Alpes-Maritimes. Cependant, les résultats sont décevants, étant inférieurs à 25%, voire négatifs dans les zones montagneuses (Haute-Savoie, Savoie, Hautes-Alpes), notamment à cause de l'exclusion, dans les simulations, de la neige qui peut représenter de 30 à 50% des précipitations annuelles (chapitre 2). Les résultats sont aussi faibles dans le delta du Rhône. Ces chroniques journalières modélisées (indice d'humidité (S/A) et débit) sur les périodes de validation vont maintenant participer à l'initialisation du module horaire GRD.

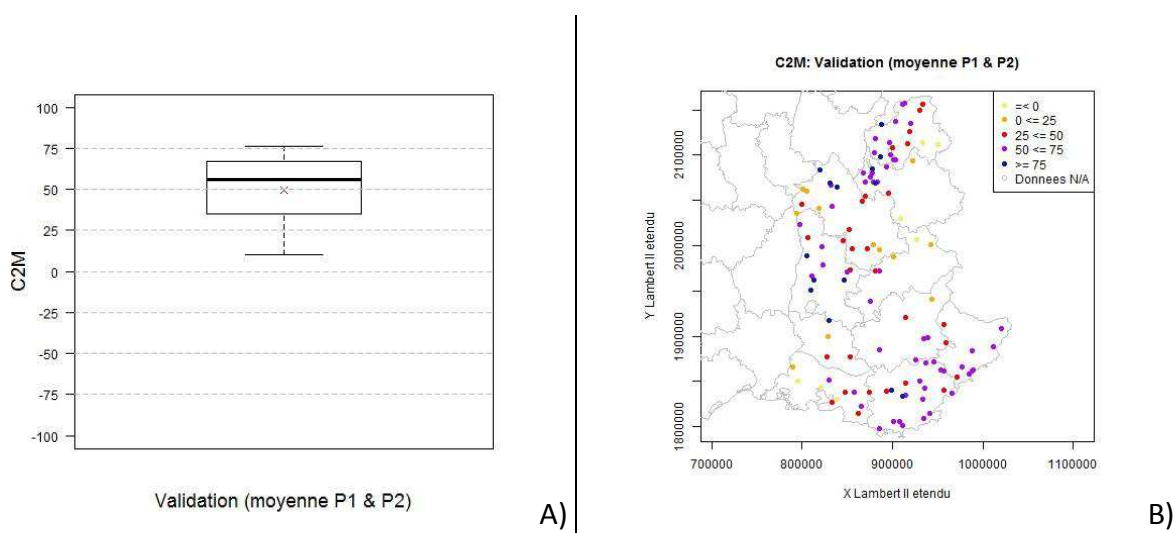


Figure 52 – Présentation des résultats de GR4J en termes de C2M : A) résultat général ; B) cartographie des résultats.

3.2 Calage du modèle horaire pour les variantes 1 et 2

L'apport de l'estimation de l'état de saturation des sols (remplissage initial du réservoir de production de GRD) et du débit initial, par le modèle journalier GR4J, est présenté dans cette partie. Comme il a été précisé lors de la mise en place des variantes, GR4J est utilisé en validation sans tenir compte de la neige, et pour les variantes 1 et 2. Pour appréhender l'impact de ces deux données d'initialisation sur les performances de GRD, une variante 1.0 est définie. Son initialisation est simplifiée par rapport aux deux autres variantes. Le réservoir de production est identique pour chaque événement, il n'y a plus de variation journalière, et sa valeur a été calé pour chaque bassin, correspondant au paramètre a . La deuxième version testée (variante 1) a, pour rappel, une initialisation limitée au réservoir de production (comme le modèle GRD de la méthode AIGA). Pour ces deux versions, le débit initial est nul et le remplissage initial du réservoir de routage correspond à 30% (comme pour le GRD de la méthode AIGA). Pour la troisième version (variante 2), en plus de l'initialisation du réservoir de production, le réservoir de routage est initialisé en assimilant le débit de la veille simulé par GR4J. Pour les variantes 1 et 2, la règle d'initialisation est identique avec le paramètre a à caler. Pour les trois versions, la taille du réservoir de production correspond à celle de GR4J. La taille du réservoir de routage (B_{hor}) et le paramètre a sont déterminés indépendamment, pour chaque modèle, par le même test de sensibilité (section 2.1.3) et avec le critère NPC comme fonction objectif. Un couple de paramètres (a et B_{hor}) est donc déterminé pour chaque bassin versant.

Sur la Figure 53, les résultats en validation (moyenne des performances des deux sous-périodes), en termes de NPC, se révèlent meilleurs lorsque l'initialisation du module horaire tient compte des états d'humidité et du débit antérieur du bassin versant (variante 2), fournis par GR4J. L'initialisation, limitée au réservoir de production (variante 1), améliore les performances du module horaire, qui passe de 12.5% pour la variante 1.0 à 26%, pour la variante 1. Toujours sur la Figure 53, les résultats, avec l'ajout du débit de base (variante 2), obtiennent des gains significatifs, la médiane des résultats passant de 25%, pour la variante 1, à 40%, pour la variante 2. En analysant toute la distribution, le gain est en moyenne de 15 points, en termes de NPC.

La non-prise en compte de la variabilité de l'état d'humidité des sols signifie que les crues dépendent exclusivement de la pluviométrie. L'amélioration des performances avec l'intégration de l'humidité des sols (1.0→1) n'est donc pas surprenante et concorde avec de nombreuses études (par exemple Javelle et al. 2010b; Nikolopoulos et al. 2011; Trambly et al. 2012). C'est d'ailleurs ce procédé, similaire à la variante 1, qui initialise GRD dans la méthode AIGA. Cependant, entre les variantes 1 et 2, le gain est encore plus important, ce qui signifie que la procédure d'initialisation de GRD de la méthode AIGA est insuffisante pour notre zone d'étude et que l'assimilation des débits est nécessaire. Des tests complémentaires, réalisés pendant les travaux de thèse, ont permis de déterminer que l'assimilation du débit de GR4J jouait un rôle prépondérant, par rapport à l'initialisation de la production.

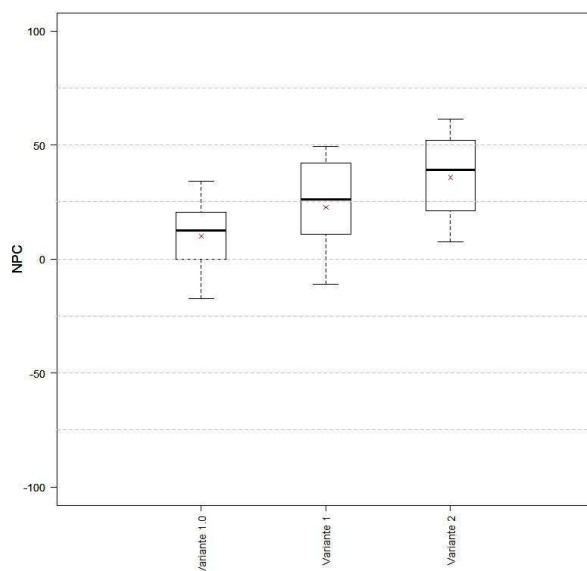


Figure 53 – Intérêt de l’initialisation du module horaire : Variante 1.0 : unique, Variante 1 : réservoir de production, Variante B : réservoirs de production et de routage

La zone d’étude étant fortement hétérogène, le paragraphe suivant analyse plus précisément les régions où l’assimilation des débits simulés provenant de GR4J a été la plus intéressante et montre que même en Méditerranée, un gain dans les résultats est observé.

La description de la zone d’étude (Chapitre 2) a exposé l’hétérogénéité des sous-régions, délimitées en hydro-écorégions. Il est donc intéressant d’analyser les performances de la variante 1 et de la variante 2 par sous-région, afin de quantifier les bénéfices de l’ajout de la prise en compte du débit de base. La variante 1.0 n’est pas représentée car elle n’a que de faibles résultats, comparée aux des deux autres. Sur la Figure 54, les améliorations sont plus ou moins visibles selon les sous-régions HER étudiées. Elles sont faibles mais non négligeables en région méditerranéenne. Les performances du premier décile évoluent de -8% à 15%, et la médiane oscille entre 29% et 37%. Dans les Préalpes du Sud, le 3^{ème} quartile connaît la plus forte augmentation, passant de 48% à 60%. Les plus fortes progressions sont observées dans les HER des Alpes du Nord, les améliorations étant de l’ordre de 15% pour tous les bassins versants. Dans les Alpes Internes, elles s’échelonnent entre 20% et 40%.

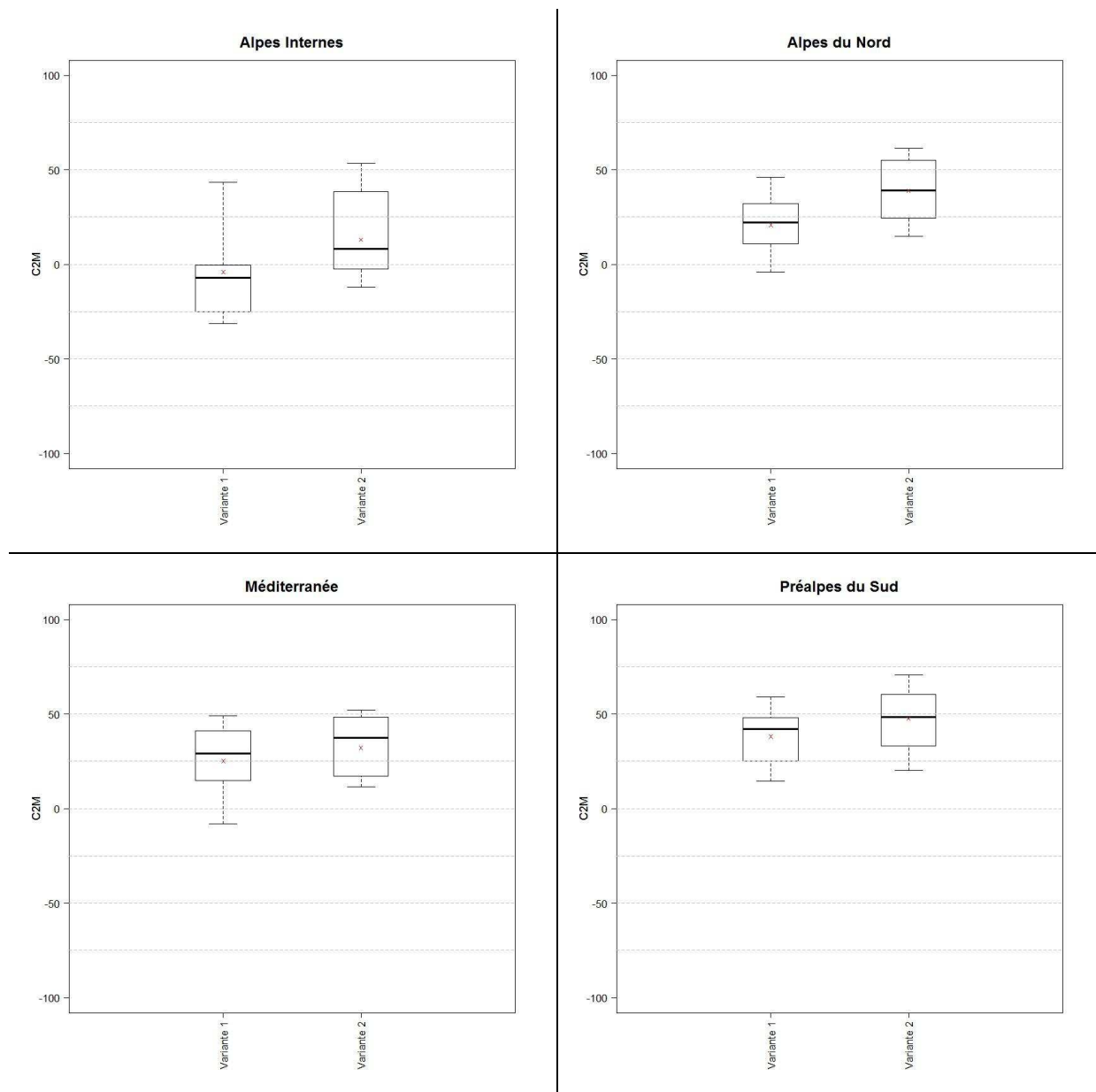


Figure 54 – Comparaison des variantes 1 et 2 en termes de NPC, pour chaque HER. A) Alpes Internes ; B) Alpes du Nord ; C) Méditerranée ; D) Préalpes du Sud.

Ces premiers tests permettent de conclure à l'amélioration significative des performances du modèle événementiel horaire (variantes 1.0→1) grâce à l'intégration de l'estimation de l'état antérieur d'humidité des sols, renseigné par le modèle journalier GR4J. Cependant, une estimation du débit de la veille de l'événement, obtenue à l'aide de GR4J procure de meilleurs résultats (variante 1→2). Cette double initialisation est nécessaire pour toutes les sous-régions HER, la Méditerranée n'en faisant pas exception.

Il faut cependant noter que les performances restent plus faibles dans les Alpes Internes. Mais la progression demeure possible dans les régions montagneuses avec l'ajout d'un module neige, qui améliorera l'estimation des états initiaux du modèle GRD. Ces résultats sont présentés dans la prochaine partie.

Les premiers résultats, relatifs à l'initialisation du module horaire par le module journalier GR4J, ont trait à :

L'estimation de l'humidité des sols

- Avec une connaissance approfondie de cette humidité, les performances du module horaire sont meilleures, comparées à celles issues de l'emploi d'une donnée unique par bassin.

L'assimilation du débit de base par le modèle horaire, fourni par GR4J

- Cette assimilation est bénéfique sur tous les bassins versants, à l'exception de quelques uns en Méditerranée.
- Conformément aux observations sur les débits observés, le gain est maximal dans les régions montagneuses et plus faible, quoique non-négligeable, dans les régions du Sud.

4 Apport de la neige

4.1 Sur le module journalier GR4J

Jusqu'à présent la modélisation s'est effectuée sans tenir compte de la neige, ce qui peut s'avérer handicapant. Dans la première partie de cette section, le modèle GR4J est complété par le module de neige journalier afin de mieux reproduire l'évolution temporelle de l'humidité des sols mais également du débit. GR4J est recalé avec les nouvelles données de pluies. On rappelle que celles-ci sont obtenues d'une part par le retranchement de la part solide des précipitations, connue grâce au rapport SAFRAN précipitations liquide/solide et d'autre part, par l'ajout de la fonte au cumul de pluie liquide. L'ajout du module neige a modifié les paramètres du modèle dont la taille du réservoir de production (Annexe C). Dorénavant celle-ci semble moins aberrante, en zone de montagnes, et ne doit plus compenser l'absence de prise en compte de la neige, conformément aux constatations d'Oudin, Perrin et al. (2006) sur les conséquences de la méconnaissance des pluies sur la taille du réservoir de production de GR4J.

Sur la Figure 55, les résultats analysés correspondent à nouveau à la moyenne des deux sous-périodes, lors de la phase de validation. Ils illustrent une amélioration des performances de GR4J (C2M) pour le premier décile et le premier quartile, de l'ordre de 15 points (Figure 55-A), malgré la simplicité du module neige. La part des précipitations neigeuses est à l'échelle de 64 km² et la fonte est obtenue à l'aide d'un modèle degré-jour, dont la régionalisation est unique pour toute la zone d'étude. La médiane des résultats est stable, les bassins influencés par la neige restant peu nombreux. La localisation des améliorations confirme ce constat : seules les régions montagneuses obtiennent des performances supérieures de 5%, avec la prise en compte de la neige, il n'y a aucune incidence sur les autres bassins (en bleu), sauf sur un seul bassin aux résultats dégradés (point vert) (Figure 55-B). Bien adapté à la région, le module de neige participe à l'amélioration des résultats en montagne, sans détériorer ceux des autres bassins.

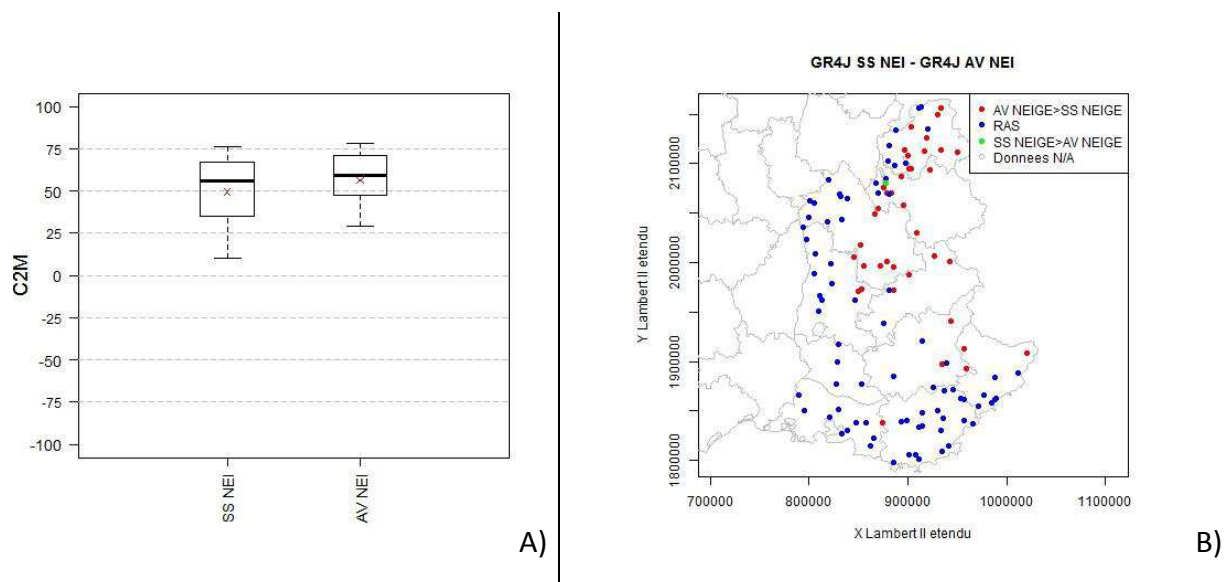


Figure 55 – Présentation des résultats de la modélisation journalière des débits en termes de C2M : A) Comparaison de GR4J sans la neige, à droite et avec la neige, à gauche ; B) Présentation spatiale de l'amélioration : en rouge les améliorations, en bleu pas de changement et en vert une dégradation.

Nous pouvons remarquer que, sur la Figure 56, les performances du nouveau modèle journalier s'uniformisent sur la majorité des bassins versants de la zone d'étude, qu'ils soient en montagne ou sur la côte, avec un critère C2M dépassant les 50% (violet et bleu). Des améliorations sont présentes sur certains bassins en montagne (points rouges et orange) ainsi que sur certains affluents du Rhône et de son delta. Ces limites actuelles du modèle seront débattues dans la section 5, relative à la limite de la méthode.

Il faut maintenant quantifier l'apport de la prise en compte de la neige sur la modélisation des crues dans les versions 3 et 4. C'est l'objet de la section qui suit. Elle permettra de savoir s'il faut encore améliorer la prise en compte de la neige ou si l'estimation actuelle suffit pour initialiser le modèle horaire GRD. Les paramètres de GR4J ayant été transformés avec l'ajout du module neige, les changements sur le modèle horaire ne se sont pas limités à l'amélioration de l'initialisation. La taille du réservoir de production du modèle horaire est également changée, étant désormais égale à celle de GR4J.

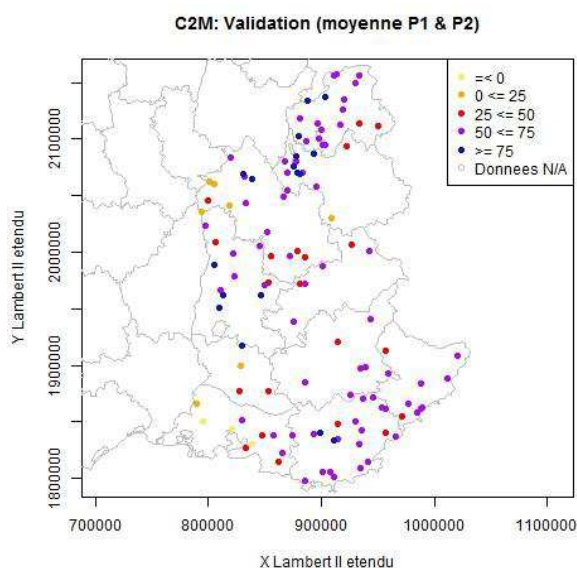


Figure 56 – Performance de GR4J avec le module neige. Les bons résultats en C2M sont représentés en violet (50% - 75%) et bleu (>75%).

4.2 Apport de la neige sur le modèle GRD (variantes 3 et 4)

Les résultats de la variante 4, qui prend en compte la neige au pas de temps journalier, par l'intermédiaire de l'initialisation de GR4J, et au pas de temps horaire par l'emploi seul des précipitations liquides, sont présentés dans cette partie. Afin d'appréhender le mieux possible l'apport de la neige sur la modélisation, cette version est comparée aux variantes 1 et 2, présentées dans la section 3, qui se différencient par l'absence de prise en compte de la neige. De plus, pour compléter cette comparaison, la variante 3 ayant des caractéristiques entre la 2 et la 4 est ajoutée. La variante 3 tient compte de la neige au pas de temps journalier mais le modèle horaire (GRD) est identique à celui de la variante 2, caractérisée par la non-distinction entre les précipitations liquides et solides. Pour chaque modèle, le module GR4J a été calé au préalable, pour fournir une estimation de l'humidité des sols, un débit de base et la taille du réservoir de production du module

horaire. Ce dernier est d'une part, identique pour les variantes 1 et 2 et d'autre part, pour les variantes 3 et 4, obtenu par GR4J complété par le module neige journalier. La taille du réservoir de routage B_{hor} et le paramètre α sont déterminés indépendamment pour chaque modèle par le même test de sensibilité (section 2.2) avec le critère NPC comme fonction objectif. Un couple de paramètres (α et B_{hor}) est donc déterminé pour chaque bassin versant. L'analyse est effectuée d'abord sur l'ensemble des bassins (4.2.1) et ensuite par HER (4.2.2).

4.2.1 Performances sur les 118 bassins versants

Les résultats sont présentés sur la Figure 57 en termes de NPC. Pour rappel, les performances du modèle GRD ne sont évaluées que sur les événements de crues au pas de temps horaire et non sur l'ensemble de la chronique de dix années, comme c'était le cas pour GR4J. Si l'amélioration des performances entre les variantes 1 et 2 est fortement visible (section 3), l'analyse des performances dans cette partie, en étape de validation, dévoile une très faible amélioration (boîtes à moustaches similaires (Figure 57)) entre les variantes 3 et 2, leur différence portant sur la prise en compte de la neige journalière lors de l'initialisation. Les médianes sont identiques et seul le premier quartile progresse. Cette intégration des données de neige, lors de l'initialisation du modèle horaire, n'a qu'un faible impact. Les causes peuvent en être multiples, soit un faible nombre de bassins versants influencés par la neige, soit une piètre reproduction de la dynamique nivale, dans le cas de la présence de glacier, soit qu'une tendance suffise à l'initialisation, au lieu d'une modélisation précise de l'état d'humidité des sols et du débit de base. La première hypothèse sera vérifiée dans cette partie, lors de l'analyse par sous-région (HER). Quant aux deux autres, le phénomène sera décrit lors de l'analyse des limites de la variante 4 dans la section 5 de ce chapitre.

En comparant les variantes 4 et 3, la prise en compte de l'information sur la neige, au pas de temps horaire (part liquide), il est visible que celle-ci apporte une meilleure amélioration que la prise en compte de la neige par le modèle journalier (écart entre la variante 2 et la variante 3). La médiane de 40% atteint 46% avec le modèle le plus complet (Figure 57). Distinguer la neige de la pluie, au pas de temps horaire, s'avère donc crucial pour appréhender les précipitations alimentant directement la génération du débit de crue et les distinguer de celles qui seront retenues temporairement sur le bassin versant, comme le montre l'étude de Nester et al. (2012).

Pour synthétiser, les améliorations des performances obtenues pendant cette phase de développement avec les quatre variantes (1, 2, 3, 4), sont de l'ordre de 20 points de NPC, que ce soit pour les meilleurs ou les moins bons résultats (Figure 57). Cependant, la définition du débit initial à la place du débit nul, permet d'obtenir la meilleure amélioration quand les 118 bassins versants sont analysés en même temps. L'apport de la neige n'a que légèrement enrichi les performances, surtout au pas de temps horaire. A cause du faible nombre de bassins montagneux subissant la neige dans notre échantillon HYDRO, les bénéfices restent négligeables pour ce qui est de l'initialisation du module horaire (entre les variantes 2 et 3). L'analyse par sous-région permet d'obtenir un résultat plus contrasté qui constitue la suite de notre analyse.

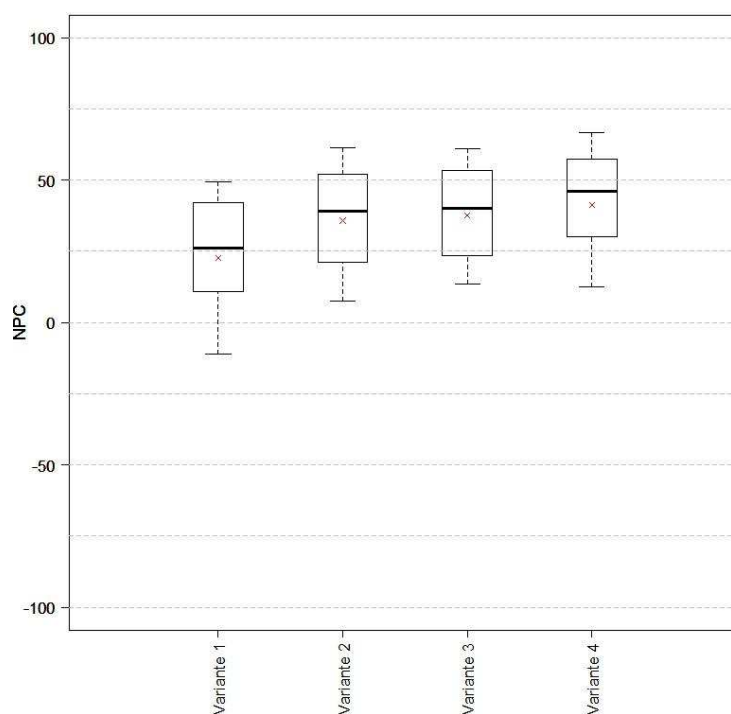


Figure 57 - Progression à travers les différents variantes.

4.2.2 Performances par sous-régions HER

L'échantillon HYDRO présentant des bassins versants aux caractéristiques variées, une analyse plus détaillée est nécessaire afin de mieux appréhender les améliorations apportées sur la variante 1 et conduisant à la variante 4. Lors du chapitre 2, les bassins ont été regroupés au sein de sous-régions, les plus homogènes possibles (HER), aux caractéristiques différentes (Chapitre 2).

Sur la Figure 58, en comparant les variantes 1 et 2, nous voyons que prendre en compte le débit de base permet d'améliorer les performances du modèle dans toutes les régions, surtout dans les Alpes Internes et les Alpes du Nord. Les bénéfices de l'apport de la neige sont plus contrastés, avec d'une part, les régions où les résultats ne sont pas améliorés, voir légèrement dégradés, et d'autre part, celles où l'impact est clairement visible. Dans le cas de la Méditerranée et des Préalpes du Sud, la neige n'a que peu d'influence sur les résultats et la variante 2 est bien adaptée à cet environnement. Une amélioration discrète est observable dans les Alpes du Nord, grâce à la prise en compte de la neige au pas de temps horaire (variante 4). Finalement et sans surprise, ce sont surtout les Alpes Internes qui enregistrent la meilleure progression, d'abord avec la prise en compte de la neige au pas de temps journalier (entre 2 et 3), puis au pas de temps horaire (entre 3 et 4).

Toutes les sous-régions obtiennent des gains lors de l'amélioration de la variante 1 vers la variante 4, mais c'est dans les Alpes internes qu'est observée la meilleure progression. Cependant, les performances de la variante 4 restent les plus faibles dans les

régions des Alpes Internes et de la Méditerranée. Notre nouveau modèle n'est donc pas parfait et il présente quelques limites d'utilisation comme la présence de glaciers (Alpes Internes) ou d'écoulement souterrain qui sont décrits dans la section 5 de ce chapitre. Cette première étape du développement d'un modèle hydrologique pour les bassins non-jaugés est réalisée localement, le modèle est calé sur chaque bassin où il est utilisé (calage-validation). Il faut donc, avant de régionaliser le modèle hydrologique, s'assurer que sa complexification ne le rend pas moins robuste.

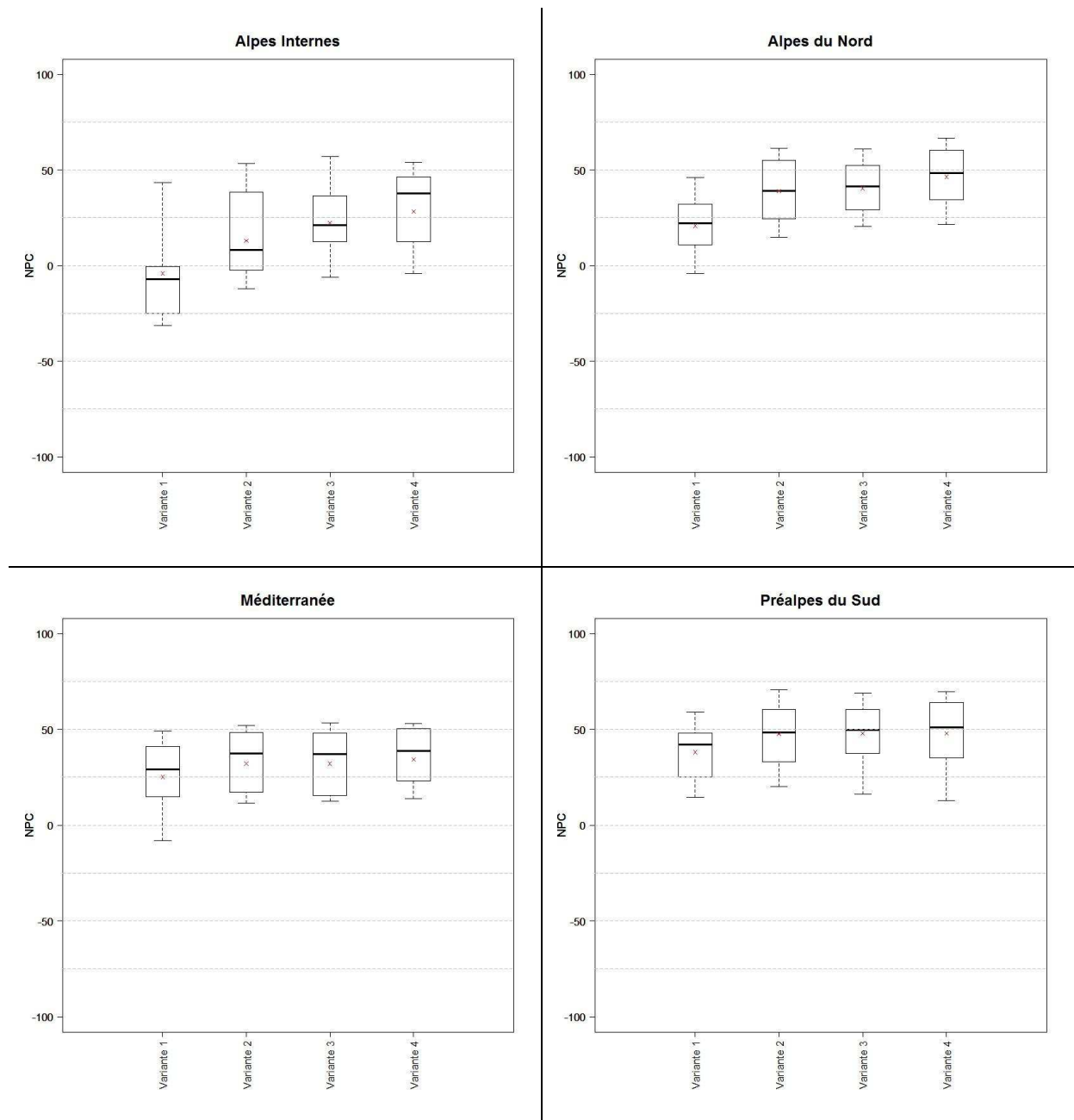


Figure 58 – Analyse par HER de l'évolution des résultats, aux travers des quatre modèles.

Les résultats, relatifs à l'initialisation du module horaire par le module journalier GR4J et à la prise en compte de la neige sur les deux modèles, ont montré que :

Pour les Alpes Internes

- la prise en compte de la neige au sein de GR4J améliore les résultats (modèle C) ;
- une progression encore plus importante est visible, suite à la prise en compte de la neige au pas de temps horaire. Cette apport réside surtout dans la différenciation des hydrométéores (ne pas prendre en compte la partie « neige » dans la modélisation des ruissellements : variante 4) ;
- Cependant, sur cette région on trouve les performances les plus faibles.

Pour les Alpes du Nord

- la soustraction de la part neigeuse dans les précipitations totales horaire améliore les résultats (variante 4) ;

Pour la Méditerranée et les Préalpes du Sud

- la prise en compte de la neige aux pas de temps journalier et horaire ne change pas les résultats. La différence reste négligeable par rapport à l'intégration d'un débit initial (variante 2).

4.3 Robustesse des différentes versions testées

Complexifier un modèle n'a de sens que si celui-ci reste robuste et utilisable en validation ou une fois régionalisé. En effet, un modèle très performant en calage, qui ne donne pas satisfaction en validation (par exemple, lors d'une utilisation opérationnelle par les services de prévision des crues), n'est pas utile. Cependant la robustesse du modèle, soit sa capacité à reproduire les mêmes performances en calage et en validation, a tendance à diminuer avec la complexification du modèle. L'étude comparative entre différents modèles (Perrin 2002) illustre ce propos et montre que, si le modèle est sur-paramétré, sa robustesse diminue, comme l'illustrent les graphiques de la Figure 59. On s'aperçoit que la variante 1.0, la plus simple, est aussi la plus robuste. C'est l'apport du débit de base qui détériore la robustesse du modèle, tout en augmentant considérablement ses performances. La neige n'a quant à elle, qu'un impact limité.

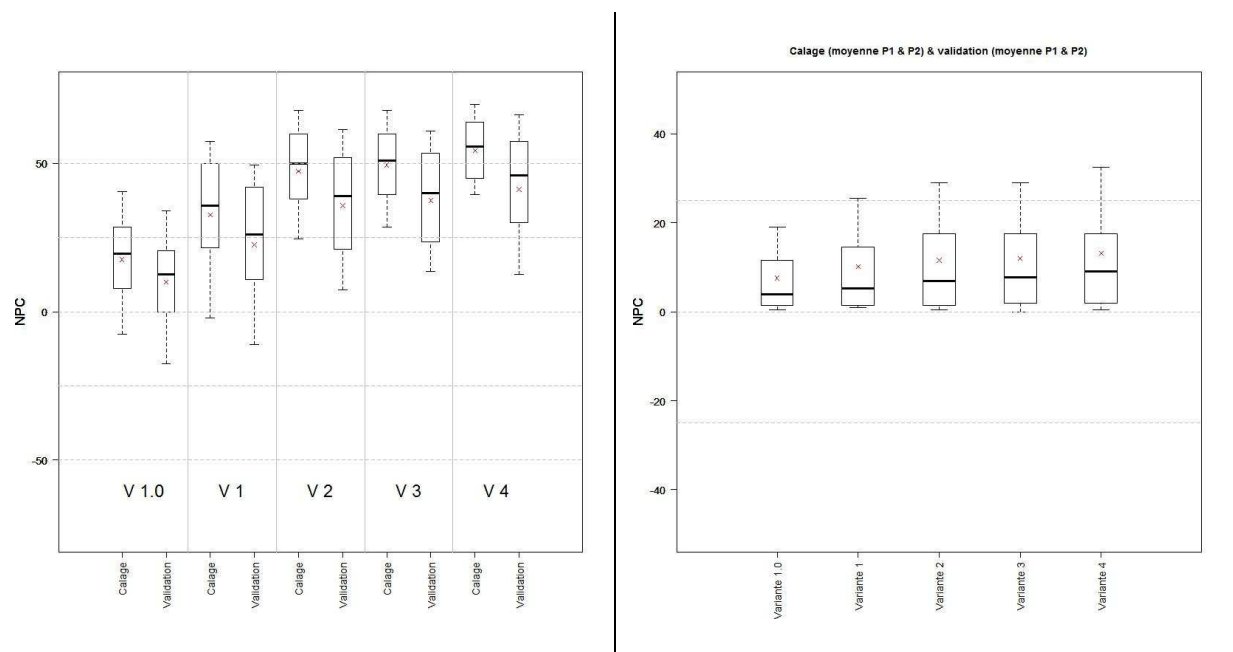
La perte d'environ 10 points de NPC, entre le calage et la validation, pour les modèles les plus complexes, peut s'expliquer par le fait que les deux sous-périodes de 5 ans, utilisées pour le split-sample test, sont contrastées : la première (1997-2001) étant plus pluvieuse et plus neigeuse. Deux pistes peuvent expliquer ce manque de robustesse : les précipitations annuelles à cause du contraste entre les deux sous-périodes et l'ETP.

Plusieurs études se sont penchées sur l'influence de la connaissance des précipitations, sur les performances des modèles conceptuels et l'estimation de leurs paramètres. Paturel et al. (1995) soulignent, par exemple, que les paramètres des modèles conceptuels ne sont pas indépendants des données de précipitations, sur des bassins versants de Côte-d'Ivoire. Les travaux d'Oudin, Perrin et al. (2006) complètent ce résultat en provoquant des erreurs sur les chroniques de pluies, influençant fortement certains

paramètres de GR4J, ainsi que la performance du modèle. Pour généraliser ces résultats, les travaux de Coron, Andréassian et al. (2012) démontrent la forte dépendance de la période de calage sur le comportement du modèle conceptuel. Par exemple, si le calage porte sur une période humide, le modèle aura tendance à surestimer les débits en période sèche, et inversement. La méconnaissance des précipitations en montagne et la différence entre les 5 premières et les 5 dernières années pénalisent, de manière croissante, tous les modèles testés, de plus en plus gourmands en données d'entrées. D'autres découpages temporelles n'ont pas été testés car lors de la phase de régionalisation et d'évaluation sur les bassins non-jaugés, le calage et la validation seront effectués sur les chroniques entières de 10 ans. Il n'était donc pas nécessaire de voir l'impact du découpage en sous-périodes sur nos modèles.

Quant à l'ETP, les travaux d'Andréassian et al. (2004) et d'Oudin (2006) montrent que les modèles sont peu sensibles à une erreur sur cette donnée, quelle que soit la formule utilisée pour l'obtenir, car les paramètres du modèle compensent ce biais. De plus, comme vu au chapitre 2, l'ETP est considérée comme constante d'une année sur l'autre, donc ses valeurs sont similaires sur les deux sous-périodes.

Il y a donc bien une perte de robustesse avec la complexification des modèles, mais le gain dû à l'assimilation de la neige et des données fournies par GR4J a permis d'obtenir des performances en validation supérieures à celles de variantes simples, comme la 1.0. Cependant, les performances peuvent encore être améliorées et cela passe, nécessairement, par l'examen des limites de l'actuelle meilleure variante, la numéro 4.



5 Discussion au sujet de la variante retenue (4) et ses possibles améliorations

Les performances de la variante 4, à l'échelle locale, sont largement supérieures à celle de la méthode AIGA, présentée au début de ce chapitre, pour l'étape de validation. Même si une dégradation des résultats est attendue lors de la phase de régionalisation de ce nouveau modèle, d'ores et déjà, en termes de NPC, les progrès acquis sont remarquables, surtout pour les Alpes Internes. Cependant, cette région ainsi que celle de la Méditerranée ont les performances les plus faibles. La méthode présente donc encore certaines limites, qui orienteront la recherche de pistes d'améliorations, dans cette partie pour des travaux futurs.

Pour mieux localiser les bassins à problèmes au sein des différentes HER, il convient d'analyser les NPC bassin par bassin (Figure 60). Les meilleurs résultats, soit des NPC entre 50% et 75% (en mauve), se trouvent le long du Rhône, au Nord de la zone d'étude ainsi que dans le Var et les Alpes Maritimes. La plupart des bassins, dont les valeurs moyennes sont comprises entre 0 et 50% de NPC, sont surtout présents dans les montagnes (Alpes Internes) et en Méditerranée (Bouches-du-Rhône). Les moins bons résultats, pour lesquels un modèle naïf serait meilleur que la variante 4 (NPC<0), sont le fait de 6 bassins sur 118 (en jaune). Plusieurs raisons sont envisageables pour expliquer ces mauvaises performances, telles que la méconnaissance de la pluie, la mauvaise simulation de l'évolution neigeuse, la présence de karsts, etc. Toutes ses raisons sont précisées par la suite.

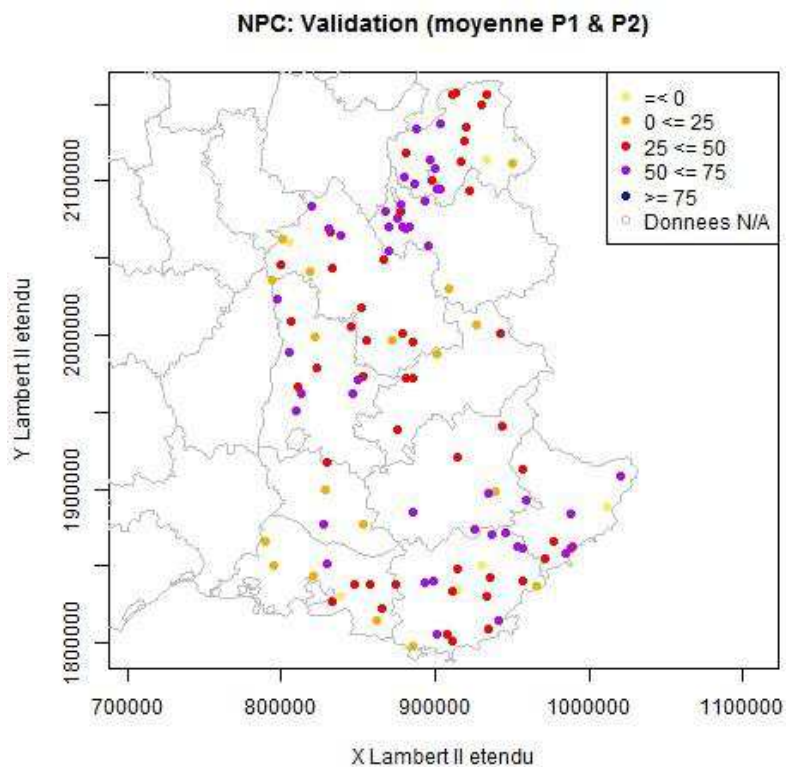


Figure 60 – Cartographie des résultats de la variante 4 en termes de NPC en validation.

5.1 Limites de la version retenue (variante 4)

Afin de mettre en évidence les problèmes de la variante 4, les performances de chaque cas sont analysées avec les descripteurs physiographiques et climatiques (présenté au chapitre 2) caractérisant les bassins versants. Le but est de montrer les pistes d'améliorations potentielles, afin d'améliorer encore le modèle hydrologique. D'un point de vue global, peu de tendances s'affirment entre les performances et les caractéristiques des bassins (disponibles en annexe C). D'autant plus que certains descripteurs étant liés entre eux, comme l'altitude, la neige et la température, une analyse pour chacun d'entre eux se révèle complexe.

Cependant, sur la Figure 61, nous pouvons relever que sur les bassins versants, où la part de neige sur les précipitations annuelles est supérieure à 25-30%, les performances en termes de NPC diminuent (Figure 61-A). Le second descripteur intéressant est le rendement (rapport débit/pluie) dont les résultats chutent à partir de 60% (Figure 61-B). Quant aux valeurs les plus élevées, les performances décroissent plus fortement à partir de 100%, ce qui correspond aux bassins dont le débit est supérieur aux précipitations. Cela indique soit un apport karstique, soit une sous-estimation de la pluie. Pour les valeurs faibles, il n'y a pas de tendance mais les mauvais résultats peuvent également s'expliquer par des surestimations de la pluie ou des pertes karstiques. Les problèmes karstiques soulèvent le problème de la non-prise en compte de l'hydrogéologie par le modèle. Quant aux problèmes liés à la pluie, il prend sa source dans les mauvaises mesures en montagne (Chapitre 1). De plus, l'utilisation de modèles globaux implique d'utiliser des lames d'eau moyennes sur le bassin versant, pouvant influencer la dynamique du bassin versant.

Les trois facteurs limitant, évoqués ci-dessus, sont décrits plus précisément et sont analysés afin de présenter des pistes d'amélioration possibles :

- la qualité de la simulation de l'évolution temporelle de la neige (5.2) ;
- la spatialisaton de la pluie (5.3) ;
- et l'hydrogéologie (0).

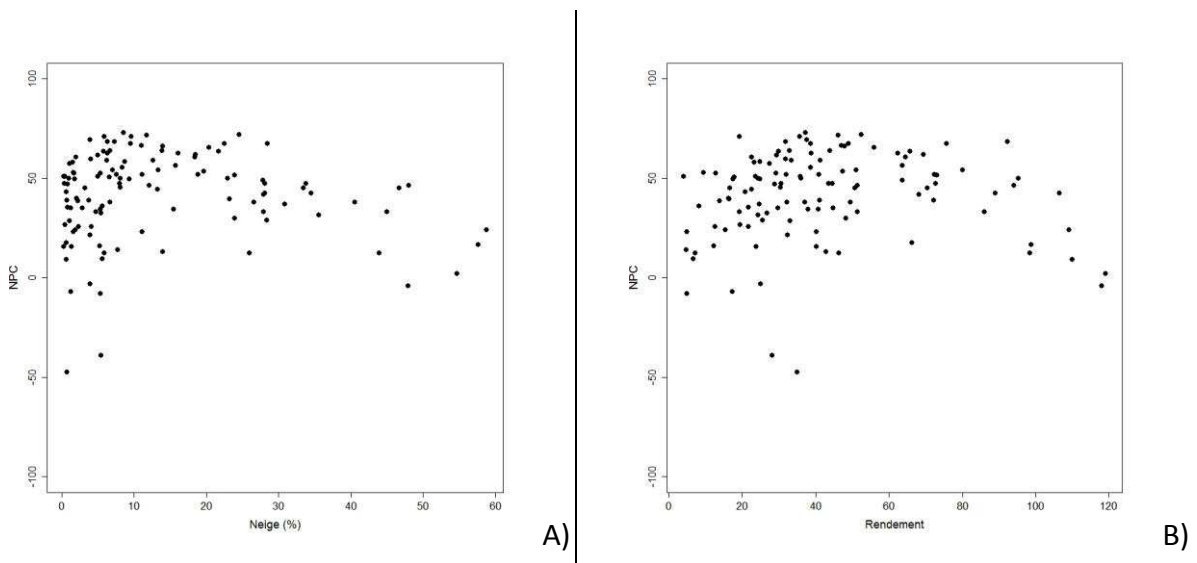


Figure 61 - Nash pseudo-continuu (NPC) en fonction des descripteurs physiques et hydro-climatiques. A) % neige annuelle , B) Coefficient d'écoulement.

5.2 Qualité de la prise en compte de la neige

Dans la section 4, il a été montré que la prise en compte de la neige dans la variante 4 améliorerait les résultats mais que ceux-ci restaient faibles dans les Alpes Internes, où les chutes de neige sont les plus importantes. Des améliorations sur la prise en compte de la neige peuvent donc encore être apportées.

Lors du développement de la variante 4, il a été choisi d'utiliser un module neige journalier de type degré-jour régionalisé. Son avantage principal est d'être facilement intégrable au modèle hydrologique journalier. De plus, au pas de temps horaire, il a été décidé de différencier les hydrométéores afin d'améliorer la connaissance de la part liquide agissant dans le modèle horaire. Cependant, ces deux utilisations soulèvent deux problèmes. Le premier est relatif aux données d'entrée qui s'appuient sur la lame d'eau SAFRAN, d'une résolution de 64 km², pour connaître le ratio pluie/neige journalier et horaire. La variabilité du ratio est donc lissée sur une grande maille. Cependant, le cumul de pluie est obtenu à partir de la lame d'eau COMEPHORE ce qui permet de connaître la variabilité et le cumul des précipitations au kilomètre carré. Nous avons donc une pluie connue spatialement sur 1 km² avec un rapport pluie/neige sur 64 km². Ce rapport peut dégrader les performances du module degré-jour en haute-montagne. Le second problème est lié au module neige lui-même. Sa simplicité et son calage régional, effectué sur toute la France, ne sont peut-être pas optimums pour tous les bassins de haute montagne.

A ces deux obstacles, s'ajoute la présence de certains glaciers, qui influence le régime hydrologique comme l'illustre la modélisation journalière de l'Arve à Chamonix par GR4J (Figure 62). L'intégration du module neige permet d'améliorer la représentation de l'écoulement (vert), par rapport au GR4J sans la neige (rouge). Cependant, les forts débits liés à l'écoulement glaciaire ne sont pas reproduits. Sur ces bassins, peu nombreux dans l'échantillon étudié, la dynamique glaciaire serait à prendre en compte pour améliorer fortement les performances du modèle. Pour cela, certains auteurs couplent au modèle hydrologique un modèle degré-jour, tenant compte de paramètres telle que la radiation, pour simuler l'évolution du glacier (par exemple le modèle conceptuel suisse Prevah de Kobierska et al. 2013).

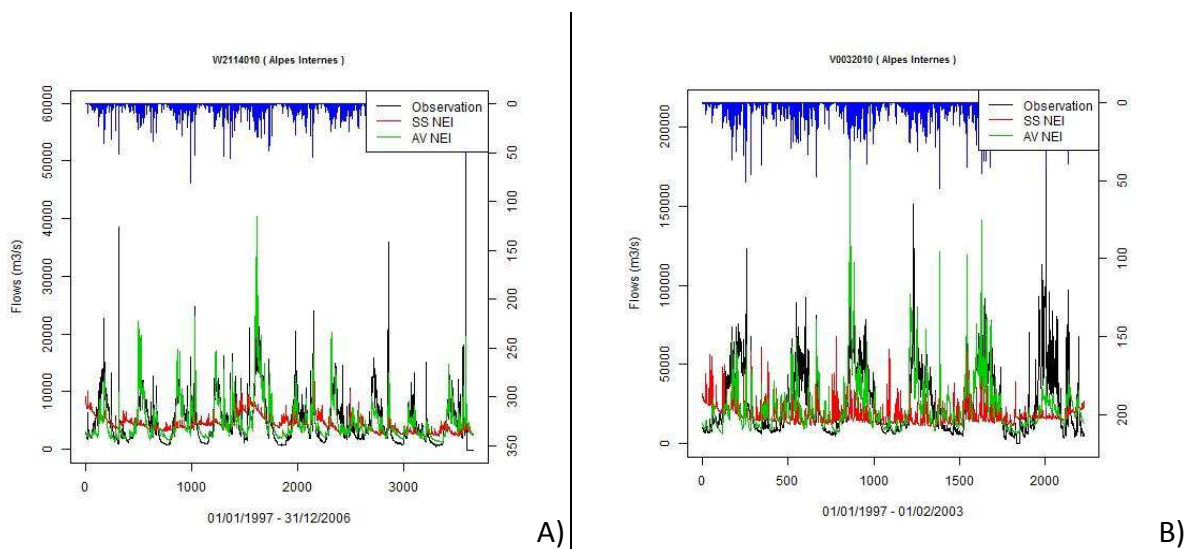


Figure 62 – A) bassin nival B) bassin nivo-glaciaire. En noir, sont montrés les débits observés ; en rouge, ceux de GR4J sans la neige et en vert, ceux de GR4J, avec la neige.

En conclusion, pour obtenir de meilleurs résultats avec la neige, les améliorations peuvent porter sur l'emploi de données plus précises que celles dont nous disposons et sur un recalage du modèle degré-jour. Cependant, cette piste n'a pas été explorée car dans la suite de cette thèse, ce modèle sera à nouveau régionalisé pour être appliqué aux bassins non-jaugés. En ce qui concerne les glaciers, si l'ajout d'un module glaciaire semble être une autre voie d'amélioration, elle concerne moins de cinq bassins versants au sein de notre échantillon, ce qui donc aura un impact très limité sur les résultats.

5.3 Prise en compte de la variabilité spatiale de la pluie

Tous les développements présentés dans ce chapitre ont été présentés avec des modèles globaux afin de gagner du temps de calculs. En montagne plus qu'ailleurs, la variabilité spatiale des précipitations est importante, avec la présence d'orages très localisés. De tels phénomènes peuvent être pris en compte en adoptant une modélisation distribuée, si la qualité de la lame d'eau d'entrée est précise. Dans ce paragraphe, nous tentons de montrer l'apport de la distribution des pluies sur la modélisation pour la variante 4 et nous comparons ce résultat avec la version initiale distribuée.

Objet de discorde dans la littérature, la question « Faut-il préférer un modèle global ou un distribué ? » reste en suspens depuis quatre décennies, comme le montre la synthèse de Zocatelli, Borga et al. (2010). Les uns considèrent l'hétérogénéité spatiale comme étant un facteur d'importance, les autres, que les erreurs inhérentes au modèle sont trop conséquentes par rapport à la différence spatiale. Pour rappel, la distribution de GRD dans la version initiale, proche de la méthode AIGA, consiste à modéliser les débits sur des pixels d'un kilomètre carré afin d'obtenir des débits unitaires qui sont additionnés à l'exutoire. L'éloignement des pixels par rapport à ce dernier n'est pas comptabilisé, tous les débits ont donc le même poids au sein du débit final et ne sont pas « déphasés » par un cheminement hydraulique. Cette section a donc pour but d'observer l'influence de la distribution des pluies sur les performances du modèle GRD de la version AIGA originelle en le « globalisant », d'une part et sur la variante 4 en le transformant en un modèle distribué, d'une manière similaire à la méthode AIGA, d'autre part.

Pour l'utilisation de la version initiale en mode global et non plus distribué, le modèle horaire GRD s'effectue dorénavant sur l'ensemble du bassin versant. Les tailles des réservoirs A (environ 200 mm) et B (50 mm) ainsi que le taux de remplissage initial du modèle distribué, fourni par GR3J et disponible sur chaque pixel d'un kilomètre carré, sont moyennés pour obtenir des valeurs uniques par bassin versant. Pour la « distribution » de la variante 4, l'initialisation du modèle, fournie par GR4J, demeure globale, ce qui implique un taux de remplissage identique à tous les réservoirs de productions et de routage, de chaque pixel du module horaire. Les valeurs fournies par GR4J sont appliquées à chaque pixel. Le calage des paramètres est aussi fait en supposant qu'ils sont homogènes sur le bassin versant. En fait, nous créons une modélisation distribuée paramétrée de façon uniforme sur le bassin. Cette approche permet alors de tester uniquement l'apport de la distribution de la pluie. A l'instar du GRD originel, les débits simulés pour chaque bassin sont finalement calculés en additionnant les débits unitaires.

Les résultats présentés sur la Figure 63 sont similaires, pour les deux approches testées, et concordent avec ceux de Fouchier (Fouchier 2010) que ce soit pour la version initiale de AIGA (approche régionale) ou le variante 4 (approche locale). Si l'hétérogénéité de la pluie est bien prise en compte par la lame d'eau COMEPHORE, sa précision en montagne, dépendant des rares pluviomètres, reste faible. Les gains de performances du modèle hydrologique sont donc limités. Selon Blöschl (2008), utiliser un modèle distribué implique de disposer de données d'entrées très précises. La version initiale et la variante 4 ont aussi des défauts, dont une règle de routage à l'exutoire simple (somme) ne tenant pas compte de l'éloignement des pixels par rapport à l'exutoire. Actuellement, l'adoption d'un modèle global suffit, car passer à un modèle distribué nécessiterait des améliorations quant au routage et à la connaissance de la variabilité spatiale des précipitations liquides comme solides.

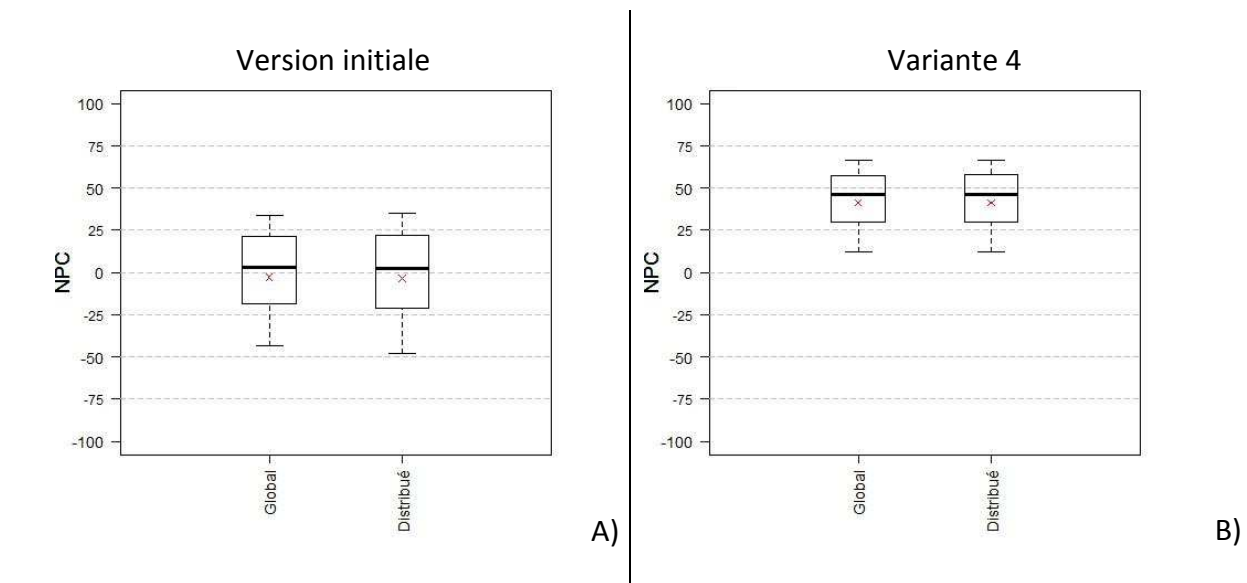


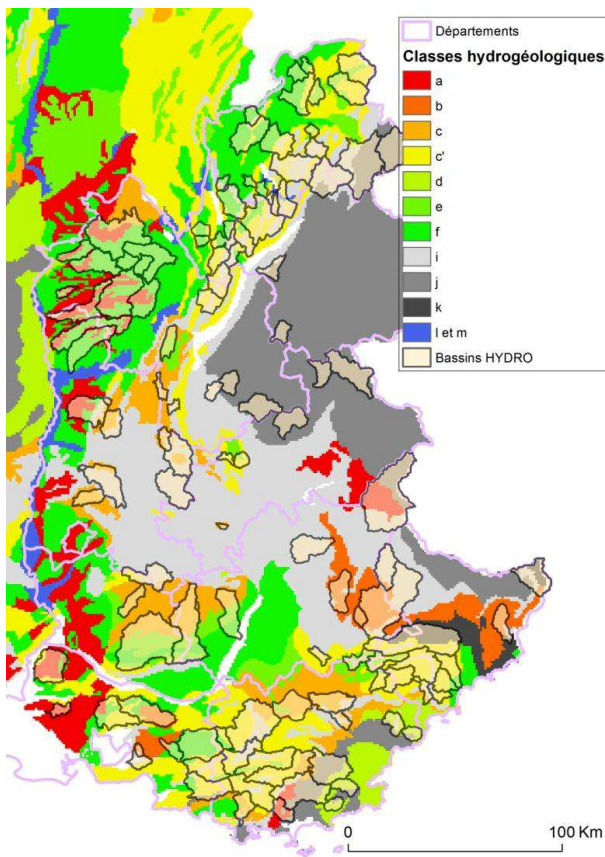
Figure 63 - Comparaison des modèles GRD horaires, en version globale et distribuée, en termes de NPC. A) version initiale, B) variante 4.

5.4 Prise en compte de l'hydrogéologie

La prise en compte de l'hydrogéologie est une des pistes d'amélioration de toutes les variantes testées, y compris la variante 4, pour certains bassins de la zone d'étude présentant des coefficients d'écoulement trop faibles ou trop élevés. La présence de nombreux aquifères sur la zone d'étude peut influencer les performances de variante 4. Ainsi, les écoulements souterrains peuvent dans certains cas augmenter la vitesse de montée des crues éclair, comme ce fût sans doute le cas lors du 15 juin 2010 à Draguignan (Centre d'Études Techniques de l'Équipement CETE-Méditerranée 2011). Si le karst est reconnu pour sa forte influence sur les régimes hydrologiques, d'autres types de substrats peuvent également perturber les écoulements des bassins versants, y compris durant les épisodes de crues éclair (Le Moine et al. 2007; Fleury et al. 2013).

Sur la Figure 64, la carte de Margat (1978) propose de diviser la zone d'étude en trois parties : la première composée d'aquifères continus (a et b) ou discontinus (c, c' et d), la deuxième partie, de zones semi-perméables (e et f), et la dernière, en montagne, est

caractérisée par l'absence d'aquifère ou par une présence d'aquifères profonds (tons gris et noir) aux substrats imperméables. De ce fait, beaucoup de bassins versants de l'échantillon HYDRO sont sensibles aux apports et pertes d'eau, dont il faut idéalement tenir compte, pour améliorer la modélisation.



LÉGENDE

TYPES DE SYSTÈMES AQUIFÈRES

Systèmes aquifères à aire d'alimentation

a Aquifère continu, à nappe libre, assimilable à un monocouche (y compris les aquifères alluviaux étendus non subordonnés principalement à des cours d'eau de surface)

b Aquifère multicouche, à nappe supérieure libre

c Aquifère discontinu à surface libre, karstique ou volcanique, de structure tabulaire

c' Aquifère discontinu à surface libre, structure plissée, compartimentée

d Aquifère discontinu, à surface libre, de roches cristallines fracturées

e Couverture semi-perméable, pouvant comporter des nappes perchées, d'aquifères monocouches continus ou discontinus à nappe libre ou semi-captive (cf. a, c, d) (= aire d'alimentation de ces aquifères)

f Formations semi-perméables capacitives encaissant des aquifères locaux, alluviaux surtout, qu'elles contribuent à alimenter, et/ou couverture semi-perméable de système multicouche sans nappe supérieure libre

Aire à nappe libre suralimentée par irrigation, épandage ou pertes de canaux, à partir d'eau de surface

Aire majeure où l'alimentation des nappes libres est influencée par l'urbanisation (infiltration réduite, pertes des réseaux de distribution d'eau)

Aires d'émergence

g Aire d'émergence de nappe libre

h Aire d'émergence de nappe captive, à travers une couverture superficielle semi-perméable

g et h sont des aires assimilables à des surfaces équipotentielles : zones marécageuses, à drainage naturel ou artificiel dense, d'altitude soit (g, h) voisine du niveau de la mer (basse plaine littorale, delta, polder), soit (g, h) supérieure (= niveau de base local)

Pan d'eau douce de surface en liaison avec un aquifère

Formations très faiblement perméables : à capacité variable mais souvent non négligeable. Domaines à ruissellement très prédominant. Aquifères libres très localisés possibles notamment dans des formations superficielles

i Couverture d'aquifères captifs profonds éventuels (monocouches ou multicouches)

j Domaine sans nappe étendue, libre ou captive : socle schisteux, socle sous couverture non aquifère ; massifs cristallins et schisteux des régions montagneuses à ruissellement très prédominant

k Zone très complexe non divisible à l'échelle de la carte, aquifères très locaux possibles (domaine montagneux surtout)

Aquifères alluviaux subordonnés : à des cours d'eau de surface exogènes (par rapport aux systèmes aquifères locaux)

l Aquifère alluvial indépendant lié à un cours d'eau (l), ou aquifère littoral lié à la mer (m), en domaine sans nappe libre étendue (classes f, i, j)

n Aquifère alluvial lié à un cours d'eau exogène, et emboîté dans un aquifère étendu (a, b, c ou d) vis à vis duquel il a en général la fonction d'un drain

Aquifères alluviaux de type l ou n d'extension latérale non significative à l'échelle de la carte (<1 km)

N.B. : Certains aquifères alluviaux sont mixtes : l (ou m) + n...

Figure 64 – Carte hydrogéologique des 13 classes issues d'une simplification, à partir de la carte de Margat (1978) et de la notice des classes.

Dans le modèle GR4J, les aquifères sont intégrés à la modélisation hydrologique, sous la forme d'échanges souterrains, estimés par un paramètre d'échange (D) (Perrin et al. 2003). Cependant, le lien entre la nature du sol et la valeur de ce paramètre est difficile à obtenir. Le Moine et al. (2007) justifient ce constat par le fait que d'une part, le modèle global ne peut pas tenir compte des échanges souterrains au sein d'un même bassin, et d'autre part, que ce paramètre d'échange sert également à corriger les erreurs des données de pluie. Pour ce qui est du modèle GRD, les écoulements souterrains ne sont pas pris en compte, même s'ils peuvent jouer des rôles prépondérants pendant des épisodes de crues. Par exemple, Fleury, Maréchal et al. (2013) relèvent un apport karstique non négligeable aux crues rapides et proposent un modèle doté d'un réservoir tenant compte de l'aquifère karstique sur la région de Nîmes.

Une amélioration possible du modèle serait l'intégration des échanges souterrains, présents sur les bassins accueillant de nombreux aquifères, comme c'est le cas sur le pourtour méditerranéen. Néanmoins, cela nécessite un travail monumental de localisation précise des aquifères, sans oublier ceux qui sont les moins développés, se fondant sur la littérature, pour obtenir une base de données complète (Guillot 2013). Ensuite, des traçages renseignent les sens des écoulements souterrains des bassins. Les modèles hydrologiques peuvent ainsi incorporer ces données, mais dans le cas de modèles fonctionnant sur beaucoup de bassins, cela reste impossible. Enfin, tenir pleinement compte des écoulements souterrains nécessite une modélisation semi-distribuée, voir distribuée.

6 Conclusion

Dans ce chapitre, l'objectif premier de la thèse, portant sur l'adaptation du modèle hydrologique GRD aux zones montagneuses, a été réalisé en partie. Sans modifier le fondement du système actuel d'anticipation des crues, fondé sur un module horaire événementiel initialisé à partir d'un module journalier, les modèles ont été complexifiés à travers différentes étapes : de la simple initialisation, tenant compte de l'humidité des sols avant chaque événement de crue (variante 1), à une initialisation plus complexe. Celle-ci est opérée par un modèle journalier complet (GR4J) alimentant, à l'aide de simulations journalières, le modèle horaire avec des estimations de l'humidité des sols et du débit de base. Pour prendre en compte les spécificités de la montagne, un module neige a été ajouté au pas de temps journalier et la distinction, entre les précipitations solides et liquides, a été réalisée au pas de temps horaire, afin d'obtenir le modèle le plus performant possible (la variante 4).

Les améliorations des performances, obtenues pendant cette phase de développement avec les quatre variantes (1, 2, 3, 4), sont de l'ordre de 20 points de Nash-Pseudo-Continu (NPC), que ce soit pour les meilleurs ou les moins bons résultats. La définition du débit initial à la place du débit nul (variante 2), permet d'obtenir la meilleure amélioration surtout dans les Alpes du Nord et les Alpes Internes. Les bénéfices de l'apport de la neige sont plus contrastés, avec d'une part, les régions où les résultats n'ont pas été améliorés, voire légèrement dégradés, et d'autre part, celles où l'impact est clairement visible. Dans le cas de la Méditerranée et des Préalpes du Sud, la neige a peu d'influence sur les résultats et la variante 2 est bien adaptée à cet environnement. Une amélioration discrète est observable dans les Alpes du Nord, grâce à la différenciation de la pluie et la neige au pas de temps horaire (variante 4). Finalement et sans surprise, ce sont surtout les Alpes Internes qui enregistrent la meilleure progression, d'abord avec la prise en compte de la neige au pas de temps journalier, puis au pas de temps horaire.

Cependant, dans les régions des Alpes Internes et de la Méditerranée, les performances restent en deçà des deux autres sous-régions. Pour obtenir de meilleurs résultats, l'intégration d'un meilleur module de neige et d'une donnée de pluies plus précises, permettant l'utilisation d'un modèle distribué, sont des pistes à explorer. Une autre solution serait l'amélioration de la calibration des tailles des réservoirs par la prise en compte de la pente, potentiellement importante en montagne, comme le font déjà les modèles TOPMODEL et G2G (Beven et Kirkby 1979; Bell et al. 2007). Cette complexification séparerait les différents biais propres à la montagne, c'est-à-dire la pente, la neige, la glace, etc. Finalement, l'influence des transferts souterrains lors de crues éclair, autre défi, semble plus complexe à corriger sur une grande échelle. Une connaissance précise des systèmes d'aquifères nécessite des mesures sur le terrain, pour chaque bassin disposant d'aquifères, ce qui se révèle impossible pour une modélisation à l'échelle régionale.

Finalement, la variante 4 semble être la plus adaptée aux contraintes de développement d'un modèle hydrologique à vocation opérationnelle. Aucune recherche complémentaire, quant à la structure et au fonctionnement du modèle, n'a été entreprise dans le cadre de cette thèse. Cette première étape dans l'élaboration d'un modèle régional d'anticipation de crues s'est effectuée sur des bassins versants jaugés, en validation, avec un modèle qui a pu, au préalable, pour chacun d'eux, être calé en intégrant leurs caractéristiques. Complexifier davantage ce modèle semble inutile car cela rendrait le

modèle moins robuste et plus difficile à régionaliser, sachant que lors de cette nouvelle étape, des pertes de performances peuvent encore se produire. Par la suite, cette variante 4 sera nommée nouvelle version de la méthode d'AIGA par opposition à la version initiale. Les 3 autres versions seront considérées comme des versions intermédiaires.

Pour l'étape suivante (Etape 3), diverses méthodes de régionalisation sont appliquées à cette nouvelle version sur les mêmes bassins versants issus de la banque HYDRO (Chapitre 5). Une fois la meilleure technique adoptée, le premier objectif de la thèse sera réalisé. Ensuite, la seconde validation, dernière étape de la thèse, sera faite sur les bassins RTM afin de réaliser le second objectif de la thèse (Chapitre 6).

Chapitre V : Approche régionale de la nouvelle version de la méthode AIGA

Comment régionaliser un modèle hydrologique ?

Quelle est la meilleure méthode de régionalisation ?

Quels sont les gains de la nouvelle version de la méthode AIGA par rapport à l'ancienne ?

A ce stade du manuscrit, le premier objectif est partiellement atteint. Pour rappel celui-ci consiste à développer un système d'anticipation de crues éclair adapté aux bassins montagneux non-jaugés. Au chapitre précédent, une meilleure méthode d'initialisation du modèle horaire GRD, par rapport à celle utilisée dans la version initiale (voisine de la méthode AIGA actuelle), a été déterminée en prenant en compte les précipitations neigeuses. Afin d'atteindre complètement le premier objectif, il reste à concevoir la meilleure régionalisation possible pour la variante 4 afin de parvenir à une nouvelle méthode AIGA, qui couple le modèle horaire GRD, qui ne prend en compte que les précipitations liquides, au modèle journalier GR4J, fournissant une estimation de l'humidité des sols et du débit initial. Cette version pourra alors être utilisée sur des bassins non-jaugés. La décennie « Predictions in Ungauged Basins » (PUB) a permis, entre 2003 et 2013, d'améliorer les performances des modèles sur ces bassins non-jaugés, grâce à diverses méthodes de régionalisation (chapitre 3) (Hrachowitz et al. 2013).

Différentes méthodes vont être testées, dans ce chapitre, sur l'échantillon de bassins HYDRO, la meilleure sera retenue. La principale difficulté du modélisateur, à cette phase, réside dans la conservation des bonnes performances du modèle hydrologique, pour ne pas réduire à néant les améliorations obtenues sur des bassins jaugés (chapitre 4). Une mauvaise régionalisation peut entraîner l'inutilité du modèle sur les bassins non-jaugés. A la fin de ce chapitre, le meilleur modèle régionalisé sera retenu et évalué. Cette première étape de la double évaluation du modèle est réalisée classiquement, comme dans la majorité des études traitant du sujet, et achève le premier objectif de la thèse. Par la suite, au chapitre 6, l'évaluation se portera sur les bassins véritablement non-jaugés sujets aux crues éclair, afin de répondre au second objectif de la thèse.

D'abord, au sein de ce chapitre, les six paramètres calés sur 10 années sont présentés pour chaque bassin versant HYDRO, afin d'appréhender leur répartition spatiale. Ensuite, des régressions, entre les paramètres et les caractéristiques des bassins versants, sont testées (section 1.2). Cette première technique n'aboutissant pas, deux autres méthodes de régionalisation : répartition en 2 groupes (médiane (section 2.1) et voisinage (section 2.2)), sont appliquées. Des variantes sont développées, sous forme de contraintes, afin d'obtenir la meilleure régionalisation. Pour s'assurer que la régionalisation n'efface pas les gains obtenus avant la complexification du modèle, la variante 4 est comparée aux variantes 1, 2 et 3 (section 3). Finalement, la variante 4 régionalisée concourt avec la méthode AIGA originelle (section 4).

1 Analyse des paramètres calés

Avant d'engager la régionalisation, les 6 paramètres de la nouvelle version de la méthode AIGA, leurs valeurs et leurs répartitions spatiales, sont analysés (modèle journalier continu (GR4J) et modèle horaire événementiel (GRD)). Comme dans le chapitre 4, le calage est opéré en deux fois, d'abord le modèle journalier GR4J et ensuite le modèle horaire GRD. Cependant le calage est réalisé sur la période complète des 10 ans de données et sur les 118 bassins HYDRO. Les résultats sont analysés d'abord spatialement et ensuite à l'aide de régressions simples, avec les descripteurs géomorphologiques et climatiques donnés lors de la présentation des échantillons de bassins versants (chapitre 2).

1.1 Variation spatiale des paramètres

Sur la Figure 65 sont affichées les valeurs de chaque paramètre (A_{cont} , B_{cont} , C , D , B_{hor} et a) à l'aide de 5 classes de même effectif. Il existe une forte variabilité pour chaque paramètre et aucune sous-région géographique n'est déterminable, aucun des bassins versants n'ayant un vecteur de six paramètres semblable. Il faut toutefois noter pour le paramètre d'échange (D) du modèle journalier GR4J, que la valeur est positive sur les bassins de montagnes et des Bouches-du-Rhône. La régionalisation à partir de la variabilité spatiale des paramètres n'est donc pas une solution retenue.

Cette analyse des paramètres calés sur dix ans a permis de mettre en évidence une variabilité des paramètres, qui sont indépendants les uns des autres, ainsi qu'une difficulté à déterminer un jeu unique de six paramètres pour tous les bassins ou du moins ceux au sein de la même sous-région. Les caractéristiques hydro-climatiques et géomorphologiques des bassins étant fortement contrastées, une des pistes de régionalisation consiste à tenter de calculer des régressions entre les descripteurs (géomorphologiques et climatiques) et les 6 paramètres des modèles journalier (GR4J) et horaire (GRD), avant de tester d'autres techniques de régionalisation.

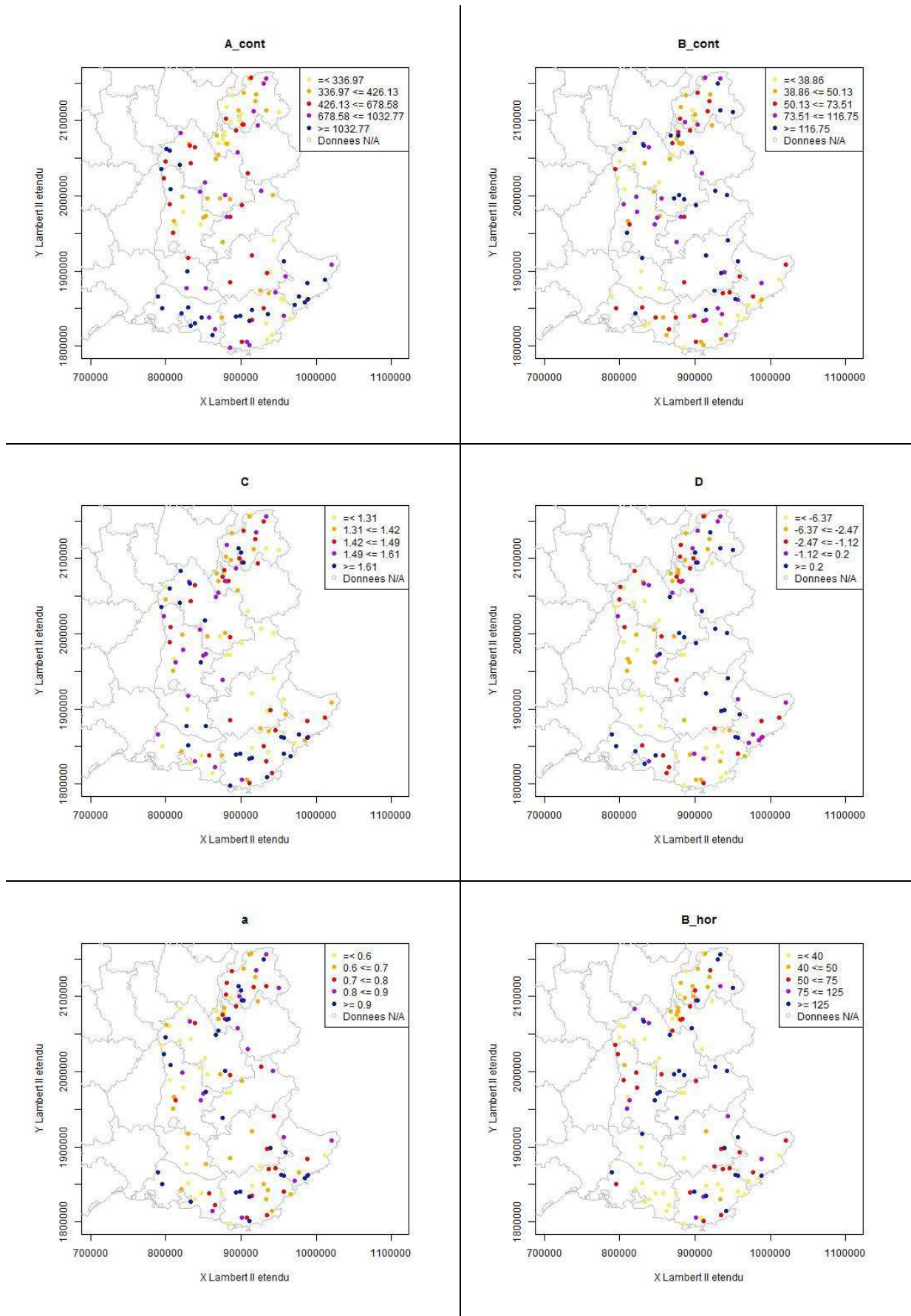


Figure 65 – Valeurs des paramètres A_{cont} , B_{cont} , C et D du modèle GR4J et B_{hor} et a pour GRD.

1.2 Régression entre les paramètres et les descripteurs géomorphologiques et climatiques

La régression a pour objectif de relier les paramètres du modèle à des variables explicatives, dont le nombre fluctue, tout en restant limité chez la plupart des auteurs, comme l'indiquent Viviroli et al. (2009).

Les régressions linéaires peuvent être soit simples, soit multiples, avec ou sans contraintes imposées aux bassins donneurs, comme par exemple l'altitude, dans un but d'amélioration des relations (Parajka et al. 2005; Viviroli et al. 2009). Dans tous les cas, cette technique s'appuie sur les deux hypothèses suivantes :

- les caractéristiques physiques des bassins sont liées aux paramètres du modèle ;
- les caractéristiques utilisées pour la régression sont pertinentes.

Dans cette thèse, les régressions découlent de la technique simple, la plus répandue, consistant à optimiser au préalable les six paramètres de la variante 4 (nouvelle version de la méthode AIGA) ($A_{cont}=A_{hor}$, B_{cont} , C , D , B_{hor} , a). Dans un second temps, il s'agit d'établir des relations avec les 12 descripteurs hydro-climatiques et géomorphologiques déjà présentés⁶. Ces régressions sont soit simples (un seul descripteur à la fois) et linéaires (équation 20), soit simples et dotées d'une loi puissance (équation 21, linéarisation par le logarithme) :

$$y = ax + b \quad (20)$$

$$\ln(y) = a * \ln(x) + \ln(b) \quad (21)$$

Avec y : pour le paramètre du modèle

x : pour le descripteur

a et b sont des variables à caler

Le Tableau 10 présente les deux meilleures valeurs de R^2 , obtenues pour chaque paramètre avec une régression linéaire simple dotée d'une loi puissance. Ces résultats sont meilleurs qu'avec une régression simple. Seuls les descripteurs utilisables sur des bassins non-jaugés ont été pris en compte, ce qui élimine l'utilisation des rendements et des débits, qui pourtant offrent des R^2 plus élevés. Les valeurs de corrélation (R^2) sont faibles et s'échelonnent pour le 1^e descripteur, entre 0,29 pour le paramètre B_{cont} avec la température journalière, et 0,03, pour le paramètre a , avec l'occupation des sols par les forêts. Le deuxième descripteur, permettant des régressions multiples avec de meilleurs R^2 , démontre que pour notre étude, son utilisation restera limitée. En effet, quand la somme des R^2 de deux descripteurs est élevée, il y a une dépendance entre les deux descripteurs, comme c'est le cas pour le paramètre B_{cont} , qui a comme meilleur descripteur la température journalière et l'ETP, dérivée de la température.

⁶ Superficie, altitude, ratio relief (pente), territoires artificiels, territoires agricoles, forêt et territoires naturels, débits annuels, précipitations annuelles, coefficient d'écoulement, part de la neige, ETP, température journalière moyenne.

Nos faibles valeurs de R^2 peuvent s'expliquer par l'équifinalité de certains paramètres des modèles GR liés à leur interdépendance (Fouchier 2010). Une autre explication réside dans les difficultés, rencontrées par le calage en montagne, où la pluie est méconnue, conduisant à des valeurs aberrantes pour les paramètres. Finalement, le nombre réduit de descripteurs disponibles et utilisables pour les bassins non-jaugés, n'est peut-être pas adapté ; Viviroli et al. (2009) en utilisent jusque 82 ce qui est exceptionnellement élevé.

Etant donné les mauvaises régressions obtenues à l'exception d'un descripteur, inutilisable en non-jaugé, les performances des deux modèles (GR4J et GRD), régionalisés par régression, n'ont pas été évaluées. De plus, cette décision est appuyée par les résultats de diverses études prouvant que les performances des modèles globaux sont inférieures, avec les régressions par rapport aux autres méthodes de régionalisation (par exemple Oudin et al. (2008), Bao et al. (2012) et Parajka et al.(2013)).

Cependant, plusieurs techniques peuvent être des pistes d'amélioration, dont l'utilisation de régressions multiples avec d'autres descripteurs comme l'hydrogéologie (Aubert 2012; Organde et al. 2013), la critique préalable des donneurs (Oudin et al. 2008), ou l'utilisation d'autres techniques de régression comme par exemple calcul des régressions simultanément au calage des paramètres (Parajka et al. 2007). Dans la suite des travaux, ces pistes ne sont pas explorées et il est choisi d'utiliser d'autres méthodes de régionalisation comme la médiane des paramètres, exploitée par la version initiale de la méthode AIGA.

Tableau 10 - Valeurs des R^2 entre les 6 paramètres des modèles journalier (GR4J) et horaire (GRD) et des deux meilleurs descripteurs

Paramètres	1 ^e descripteur	R^2	2 ^e descripteur	R^2
A_{cont}	Ratio de relief (pente)	0,2	Précipitation - COMEPHORE (mm)	0,17
B_{cont}	Température journalière (°C)	0,29	ETP journalière (mm)	0,23
C	Température journalière	0,25	Surface (km ²)	0,20
D	Température journalière	0,14	ETP journalière (mm)	0,12
B_{hor}	Température journalière	0,12	ETP journalière (mm)	0,12
a	Occupation des sols : forêts	0,03	Surface (km ²)	0,01

2 Techniques testées de régionalisation pour la nouvelle version de la méthode AIGA

Pour aboutir à la mise en place d'un modèle régional, plusieurs méthodes de régionalisation ont été comparées. La meilleure et la plus adaptée à la nouvelle version (variante 4) de la méthode AIGA et à la zone d'étude a été sélectionnée. Au préalable, le modèle est calé sur les 10 ans de données des 118 bassins HYDRO, donneurs potentiels. Pour chaque méthode de régionalisation, les paramètres sont transférés sur un bassin cible, choisi parmi les 118 bassins HYDRO. Les débits sont alors simulés avec ce jeu de paramètres et comparés en termes de NPC avec les débits observés. Les méthodes retenues sont :

- la médiane des paramètres
 - o calculée à partir de l'échantillon HYDRO total
 - o calculée uniquement parmi les bassins localisés au sein de la même HER que le bassin cible;
- voisinage :
 - o défini par une distance géographique afin de sélectionner les bassins donneurs les plus proches du receveur ;
 - o défini par la distance euclidienne entre les mêmes caractéristiques pour définir la ressemblance entre les bassins. Les caractéristiques sont celles présentées au chapitre 2 lors de la description des échantillons de bassins.

Lors de la régionalisation, il n'y a pas eu de combinaison de ces méthodes. Les six paramètres de la nouvelle version, composé du modèle journalier GR4J et du modèle horaire GRD sont transférés d'une manière unique à chaque test afin de ne pas complexifier la technique. Une régionalisation différente pour chaque paramètre serait possible mais offrirait 4^6 possibilités (nombre de méthodes testées pour les 6 paramètres), ce qui n'a pas été testé ici. De plus, les quatre méthodes sont utilisées avec des variantes (réalisées sous forme de contraintes) pour améliorer les résultats comme par exemple une sélection sur les donneurs.

2.1 Régionalisation par la médiane

Une première méthode de régionalisation consiste à prendre la médiane des différents paramètres calés sur les bassins versants. Dans les relevés bibliographiques de Parajka et al. (2013), les résultats ainsi obtenus sont souvent les moins bons. Mais, cette généralité comporte des exceptions, comme le prouvent Viviroli et al. (2009), dont la médiane a permis d'améliorer les performances par rapport la technique des régressions. Pour perfectionner les capacités de cette méthode, certains auteurs déterminent des sous-régions (altitude comparable, rayon de 50 km autour du bassin cible) dans lesquelles la médiane des paramètres est calculée (Parajka et al. 2005; Goswami et al. 2007). Cette piste d'amélioration est poursuivie dans cette section avec les HER pour montrer le gain par rapport à une médiane sans restriction.

Les paramètres régionaux des 118 bassins HYDRO sont déterminés de deux manières. Dans la première, il s'agit de calculer la médiane des paramètres des 117 bassins, le bassin restant reçoit alors ce nouveau jeu de paramètres. Ainsi, les 118 jeux sont quasi identiques. Et dans la seconde technique, les quatre HER permettent de déterminer des sous-régions, au

sein desquelles la méthode précédente est appliquée : on retire le bassin cible et la médiane des paramètres des bassins restants dans la même sous-région est calculée. Le but recherché ici est d'améliorer les résultats en se reposant sur l'homogénéité hydro-climatique des sous-régions.

Sur la Figure 66 les performances de ces deux régionalisations sont présentées en termes de NPC. Elles sont appliquées à la nouvelle version de la méthode AIGA sur dix ans et illustrent le fait que l'influence des sous-régions (HER), dans la sélection des paramètres, n'améliore pas les résultats. Cette constatation est contraire aux études présentées au début de cette section. Une régionalisation (Figure 66-A) effectuée par sous-région (HER) conduit à une moyenne et un 1^{er} quartile plus faibles que ceux déterminés lors d'une régionalisation unique à toute la zone d'étude (TOTAL). Géographiquement, les détériorations (de plus de 5 points de NPC en vert sur la Figure 66-B) liées à cette intégration des HER se localisent essentiellement sur des affluents du Rhône, en Isère et dans une moindre mesure en Haute-Savoie, département qui présente aussi le cas inverse (en rouge). Au contraire, dans le sud, cette même intégration de la HER profite aux performances (en rouge), car les bassins, dont les performances sont améliorées, sont plus nombreux que ceux dont les résultats sont détériorés (Figure 66-C). Globalement les gains d'une régionalisation par sous-région sont faibles (juste au-dessus de la bissectrice) et même, quelques bassins voient leurs performances fortement réduites, par rapport à celles obtenues par une régionalisation unique (points très en-dessous de la bissectrice). Pour mieux comprendre pourquoi l'utilisation de sous-régions n'a pas amélioré les résultats, une analyse par HER est réalisée pour examiner si certaines HER ne pénalisent pas cette technique.

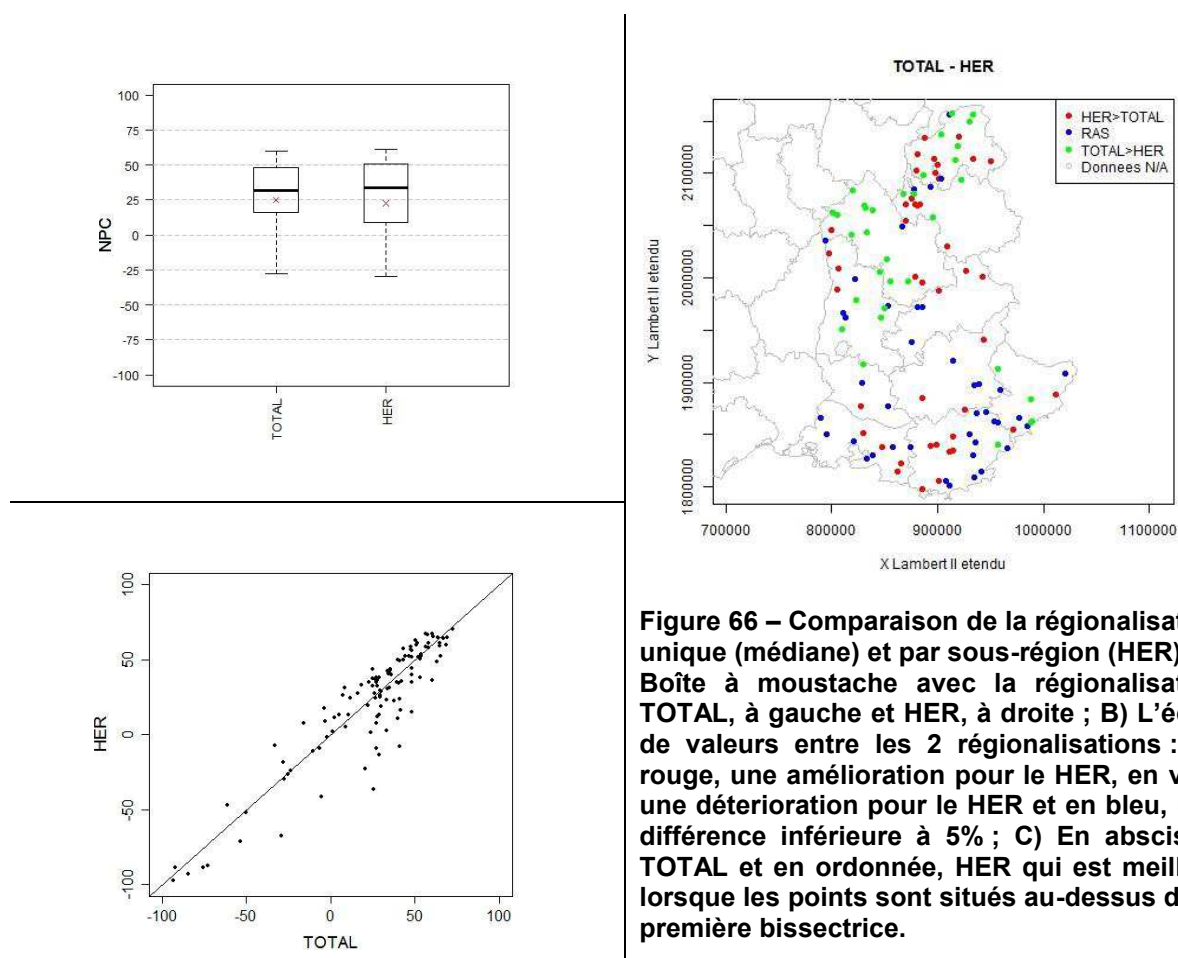


Figure 66 – Comparaison de la régionalisation unique (médiane) et par sous-région (HER). A) Boîte à moustache avec la régionalisation TOTAL, à gauche et HER, à droite ; B) L'écart de valeurs entre les 2 régionalisations : en rouge, une amélioration pour le HER, en vert, une détérioration pour le HER et en bleu, une différence inférieure à 5% ; C) En abscisse, TOTAL et en ordonnée, HER qui est meilleur lorsque les points sont situés au-dessus de la première bissectrice.

Les performances des deux régionalisations (Figure 67) sont comparées par sous-régions HER et confirment l'absence d'homogénéité des résultats. La régionalisation par sous-région est bénéfique dans les Alpes Internes et la Méditerranée, les gains étant présents sur la moyenne, le 1^{er} décile et le 1^{er} quartile, mais les performances sont fortement dégradées dans les deux autres HER. Dans les Alpes du Nord, la variabilité des paysages (montagnes, Haute-Savoie, et plaines, le long du Rhône) est la cause notamment d'une grande différence, en termes de tailles de réservoir de production ($A_{cont\ ou\ hor}$), allant de 300 à 1000 mm (Figure 65, page 131). Il y a donc une grande variabilité au sein de la région et donc le bénéfice d'utiliser une sous-région « homogène » n'existe pas. Cette HER est sans doute mal découpée et un découpage plus fin permettrait sans doute d'augmenter les performances de la régionalisation par la médiane dans cette sous-région. Pour les Préalpes du Sud, une variabilité moindre des paramètres au sein de la HER mais également un nombre plus réduit de bassins donateurs peut expliquer la dégradation.

Cette première technique simple de la médiane a montré que les performances du modèle est dépendante de deux facteurs : un nombre élevé de bassin versant et une homogénéité, toute relative, des paramètres. Le découpage en sous-région HER n'a que confirmé ce constat en accentuant les points faibles dans les HER moins homogènes. Ce résultat forme un bon point de départ dans la régionalisation et nous allons tenter de l'améliorer avec la méthode de régionalisation par voisinage en commençant par la proximité géographique et poursuivant par la ressemblance.

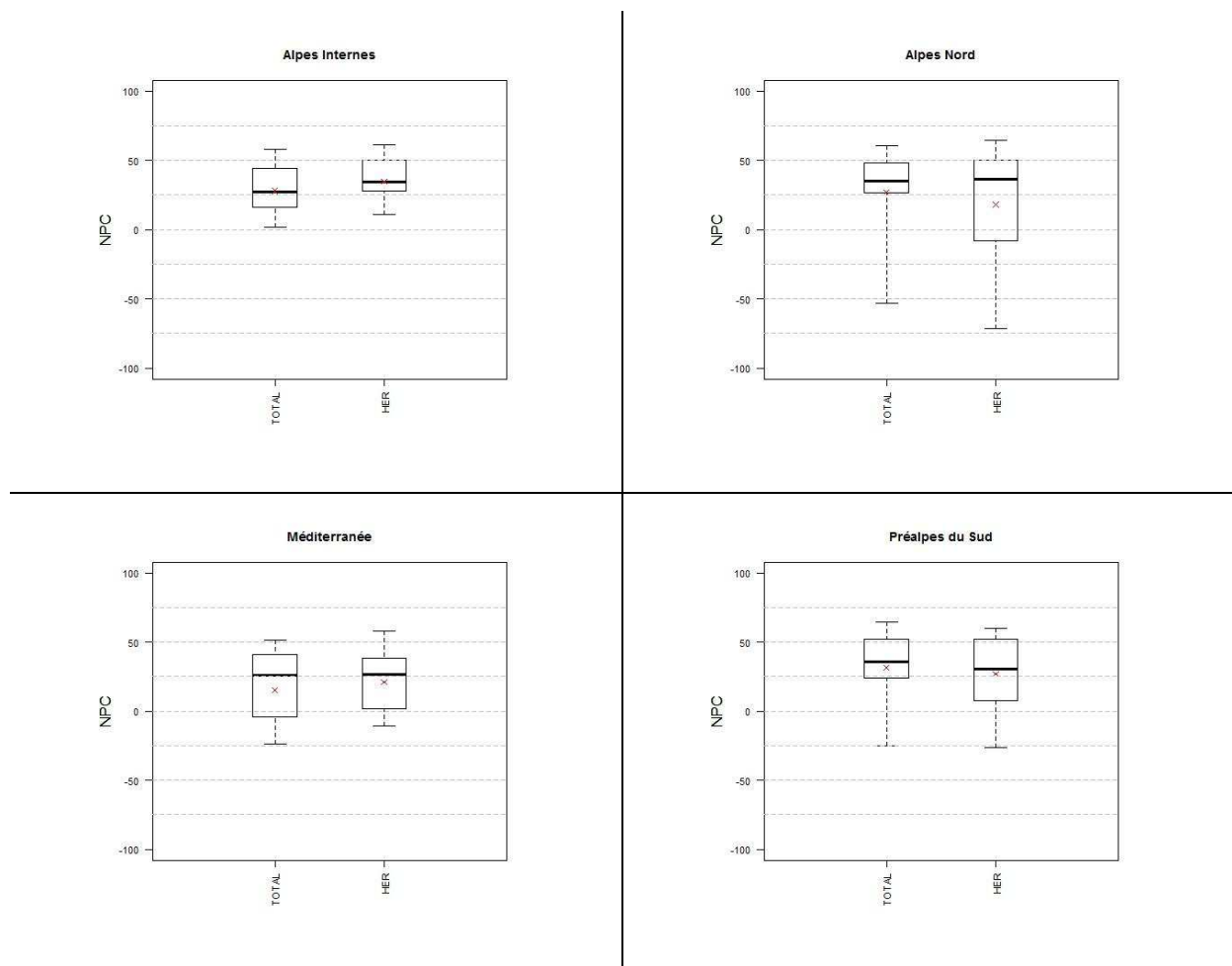


Figure 67 – Comparaison des régionalisations : médiane sur l'échantillon TOTAL et sur chaque

sous-région HER.

2.2 Régionalisation par voisinage

Deux techniques de prises en compte des bassins voisins comme donneurs sont testées dans cette partie et proviennent d'autres études (par exemple Oudin et al. 2008) :

- Distance euclidienne entre les centroïde ou exutoire (géographique) (2.2.1)
- Distance euclidienne entre diverses caractéristiques (ressemblance) (2.2.2)

A la fin de cette partie, la meilleure des deux techniques est conservée (2.2.3) et nous tenterons de l'améliorer par la suite.

2.2.1 Distance géographique

Considérer la distance géographique entre les bassins versants, pour associer à chaque bassin cible ses donneurs, est une première technique de voisinage. Il y a trois caractéristiques à prendre en compte pour ce test :

- A partir de quel point du bassin doit être calculée la distance ?
- Combien de voisins sont-ils nécessaires ?
- Comment obtenir un jeu de paramètre pour le bassin cible à partir de plusieurs donneurs ?

La distance géographique est calculée à partir soit des centroïdes, soit des exutoires, ou bien encore, en pondérant la prise en compte des deux premières propositions. Le centroïde a ceci d'avantageux par rapport à l'exutoire de permettre de ne pas associer à un grand bassin, un petit affluent proche de son exutoire. Dans le cas des bassins imbriqués, la dernière solution, c'est-à-dire la pondération, est la plus appropriée, offrant de meilleurs résultats. Cette piste peut s'avérer intéressante mais sur notre échantillon, il est difficile d'y voir le bénéfice car celui-ci comporte très peu de bassins emboîtés. Une distance fondée sur une pondération entre centroïdes et exutoires n'a donc pas été envisagée, car le gain sur les résultats ne serait pas perceptible. Seul le choix de distance entre les exutoires ou les centroïdes est utilisé en faisant varier le nombre de bassins voisins à prendre en compte. Dans cette thèse, les distances entre les centroïdes et entre les exutoires ont été obtenues par la distance euclidienne (équation 22):

$$dist_{don,cible} = \sqrt{(x_{don} - x_{cible})^2 + (y_{don} - y_{cible})^2} \quad (22)$$

Avec x : pour les coordonnées est-ouest des centroïdes ou des exutoires

y : pour les coordonnées nord-sud des centroïdes ou des exutoires

Quant au nombre de voisins nécessaires à la régionalisation de modèles hydrologiques, il semble qu'un certain nombre apporte de meilleurs résultats, comme le montrent les travaux d'Oudin et al. (2008) et de Viviroli et al. (2009). Un seul voisin n'est donc pas l'idéal, car les variations des conditions géomorphologiques peuvent s'avérer fortes sur de courtes distances, comme l'indique Ouarda (2001). Toutefois, la norme est plus à une certaine homogénéité régionale, dotée de légères variations quant aux caractéristiques hydro-climatiques des bassins versants. Choisir plusieurs voisins peut entraîner aussi de

mauvais résultats, dans le cas où les variations spatiales sont conséquentes comme en montagne (Parajka et al. 2005). Il faut donc déterminer entre ces deux extrêmes le nombre de voisins à prendre en compte. Dans notre étude, nous testons la prise en compte d'un voisin jusqu'à 10 car en prendre davantage ne semble pas nécessaire, les performances évoluant peu au delà de ce nombre (Oudin et al. 2008).

Le nombre de voisins impliquent d'avoir autant de jeux de paramètres à donner au bassin cible. Pour déterminer le jeu optimal pour ce dernier, la valeur médiane de chaque paramètre est choisie pour effectuer la simulation sur le bassin cible. Dans la littérature, une autre technique est présentée, reposant sur la médiane des simulations réalisées pour le bassin cible à l'aide des jeux de paramètres des différents donneurs, c'est-à-dire qu'il y a autant de simulation sur le bassin cible que de donneurs et le débit correspond à la médiane des débits simulés sur le bassin cible avec les différents jeux de paramètres issus des donneurs. Entre les deux méthodes, la différence est négligeable pour les modèles GR (Oudin et al. 2008). La médiane des paramètres a été privilégiée de par le gain de temps qu'elle apporte en calcul.

Sur la Figure 68, nous montrons que les résultats diffèrent peu suivant le nombre de voisins choisis soit à partir des exutoires soit à partir des centroïdes. Tout de même, l'utilisation du centroïde entraîne une légère amélioration des performances par rapport à la distance prise à l'exutoire. Ce résultat, peu surprenant, est directement lié à l'échantillon des bassins HYDRO qui sont peu imbriqués. Quant au nombre de voisins nécessaires, la médiane et la moyenne des performances (lignes grasses noirs et croix rouges) évoluent peu entre un et dix voisins (Figure 68-A). Toutefois, en sélectionnant trois voisins⁷, sur les critères de distance géographique, obtenus aux centroïdes, les résultats semblent légèrement s'améliorer, au regard de toute la distribution (boîte à moustache). De plus, la prise de la médiane parmi les trois bassins voisins pour chaque paramètre annule l'impact qu'aurait un bassin proche fort différent ce qui offre, au final, des résultats moins dégradés. Ce cas de figure pourrait se présenter également lors de la deuxième évaluation sur les bassins RTM car comme il a été montré au Chapitre 2, leurs tailles sont plus petites et la localisation entre les deux échantillons sont différentes. Ce premier test à permis de préférer, pour la distance géographique, l'utilisation de trois voisins en se focalisant sur le centroïde. Cette approche doit d'abord être comparée à la distance euclidienne (2.2.2) et ensuite améliorée en tenant compte de la surface des bassins versants et de la qualité des simulations des bassins donneurs.

⁷ Le choix de cinq voisins convenait également mais lors des phases de critiques des bassins donneurs (voir plus loin), il s'est avéré que les résultats étaient plus faibles qu'avec trois voisins.

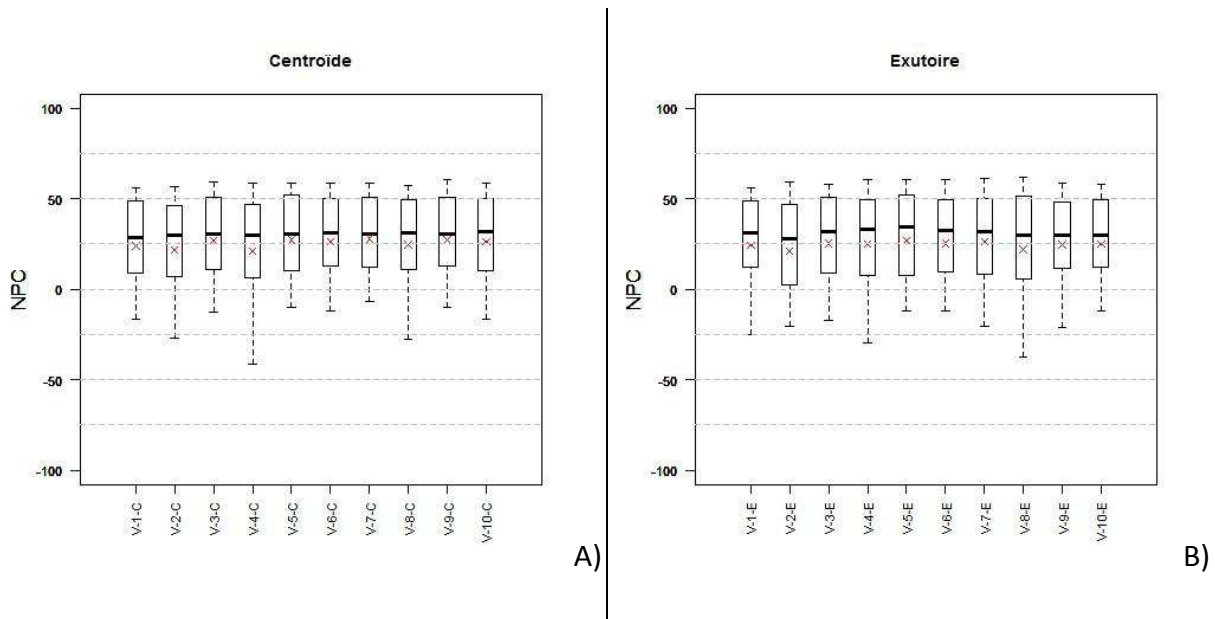


Figure 68 – Analyse de la performance de la variante 4 régionalisée, en fonction du nombre de bassins donneurs. A) utilisant les centroïdes ; B) utilisant les exutoires.

2.2.2 Distance euclidienne entre diverses caractéristiques (ressemblance)

Une seconde technique de voisinage repose sur la sélection de bassins donneurs ressemblant le plus possible au bassin cible. Pour quantifier cette similitude, des auteurs utilisent la distance euclidienne entre différents descripteurs hydro-climatiques ou géomorphologiques (identiques à ceux des régressions). Comme Randrianasolo (2012) le relève, soit chaque descripteur a le même poids dans le calcul de la distance (Parajka et al. 2005; Oudin et al. 2008) soit ils sont pondérés entre eux par un facteur (w_j) optimisé (Oudin et al. 2010) :

$$dist_{don,cible} = \sqrt{\sum_{j=1}^J w_j \left(\frac{X_{don,j} - X_{cible,j}}{\sigma_{X,j}} \right)^2} \quad (23)$$

Avec $X_{don,j}$: valeur du descripteur j , pour le bassin donneur ;

$X_{cible,j}$: valeur du descripteur j , pour le bassin cible ;

J : nombre de descripteurs utilisés ;

w_j : facteur de pondération pour chaque descripteur.

Les études d'Oudin et al. (2008) et d'Oudin et al. (2010) ont permis de déterminer les caractéristiques des bassins versants, essentielles pour régionaliser le modèle GR4J. En effet, des bassins analogues d'un point de vue physiographique ne le sont pas automatiquement en termes hydrologique, ce qui nécessite l'emploi de descripteurs pertinents au regard de ce dernier. Il s'est avéré qu'avec l'utilisation de seulement trois descripteurs, les performances de GR4J étaient similaires aux résultats générés par six descripteurs pris simultanément parmi la surface, la pente moyenne, l'altitude médiane, la densité du réseau de drainage, la couverture forestière et l'indice d'aridité.

Conformément aux résultats d'Oudin et al. (2008), seuls la pente, le couvert forestier et l'indice d'aridité (ETP annuelle/Précipitation annuelle) participent à la régionalisation du modèle. À l'instar de la distance géographique, le nombre de voisins est toujours compris entre un et dix. Les régionalisations testées diffèrent peu entre elles, tout en montrant un léger optimal, lorsque les bassins donneurs sont au nombre de cinq ou six, ce qui est similaire aux autres études portant sur les modèles GR. Six voisins ressemblants ont donc été sélectionnés pour chaque bassin cible. Ce résultat doit être maintenant comparé avec la distance géographique pour déterminer la technique par voisinage la plus pertinente comme cela a été fait dans d'autres études.

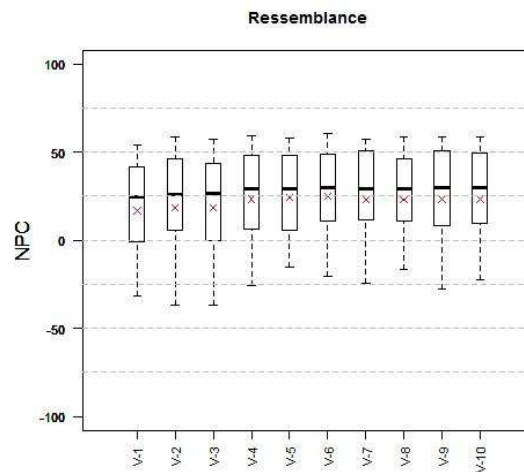


Figure 69 – Analyse de la performance du modèle GRD de la variante 4 régionalisé, en fonction du nombre de bassins donneurs et en se basant sur un critère de ressemblance.

2.2.3 Distance géographique ou ressemblance

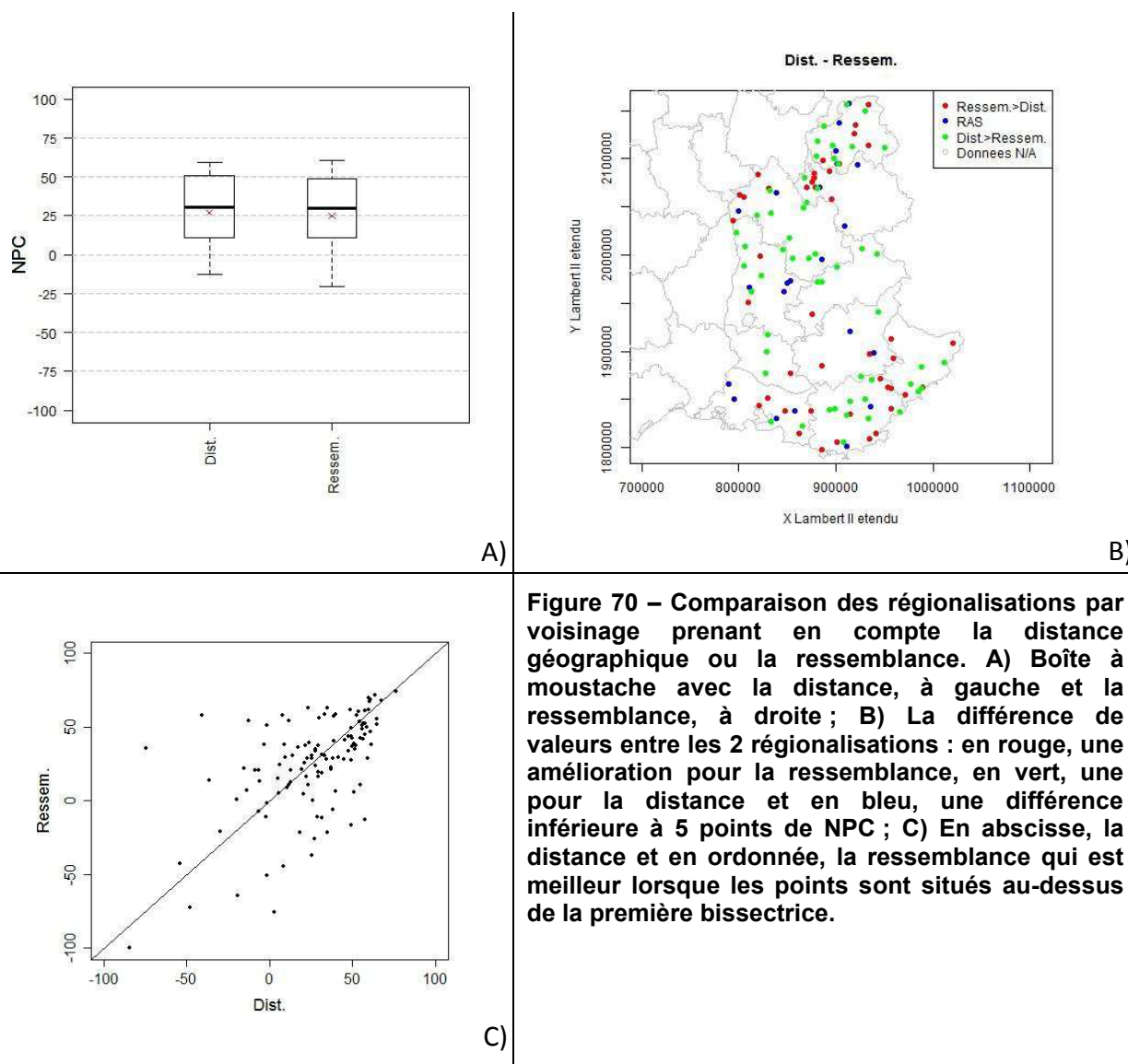
Avec les deux techniques de voisinages présentées ci-dessus, soit la distance géographique (trois voisins) et la ressemblance (six voisins), les performances du modèle régionalisé s'avèrent similaires. Le but est donc de comparer ces deux méthodes, pour apprécier dans le détail si certaines zones géographiques ne sont pas plus propices à l'une ou l'autre, afin de choisir la meilleure des deux. Nous pouvons voir que sur la Figure 70-A, globalement, les performances sont légèrement inférieures dans le cas de la ressemblance. Le voisinage calculé sur la distance géographique dispose de plus de cas favorables que son concurrent (en vert sur la Figure 70-B). Cependant, aucune des deux méthodes ne prédomine dans une zone particulière, conformément aux constatations d'Oudin et al. (2008) avec la régionalisation de GR4J. La Figure 70-C souligne les différences présentes entre les deux techniques, non négligeables car les NPC peuvent être corrects pour l'une et négatifs pour l'autre.

En se focalisant sur les entités HER (Figure 71), l'objectif est de prédéfinir, pour chaque zone, la méthode la plus adaptée. Dans les Alpes du Nord et les Préalpes du Sud, les résultats sont meilleurs en utilisant les distances géographiques. Mais la médiane et la moyenne restent identiques, ce qui signifie que des bassins bénéficiant d'améliorations

coexistent avec d'autres, souffrant de dégradations. Dans ces deux mêmes HER, ces derniers cas sont plus nombreux que dans les autres sous-régions. Dans les Alpes Internes, les résultats sont également meilleurs avec la distance géographique, sa médiane étant supérieure à celle de la ressemblance. La qualité des descripteurs, une pluie imprécise et la forte variabilité des phénomènes en montagne sont autant de facteurs à l'origine des meilleurs progrès obtenus par la régionalisation sur la distance. Par contre, en Méditerranée, c'est la méthode liée à la ressemblance qui procure un résultat médian supérieur et des performances maximales.

Même si les HER ont permis de définir, pour chaque région, la méthode la plus bénéfique en termes de gains, le comportement des bassins au sein de ces sous-régions peut différer fortement et favoriser l'une ou l'autre méthode. Aucune solution ne définit précisément et a priori la meilleure technique de voisinage.

Pour la suite des travaux, la distance géographique a été préférée, car elle fournit globalement des performances légèrement supérieures, qui seront maximisées dans la section suivante en appliquant des contraintes sur le choix des bassins donateurs.



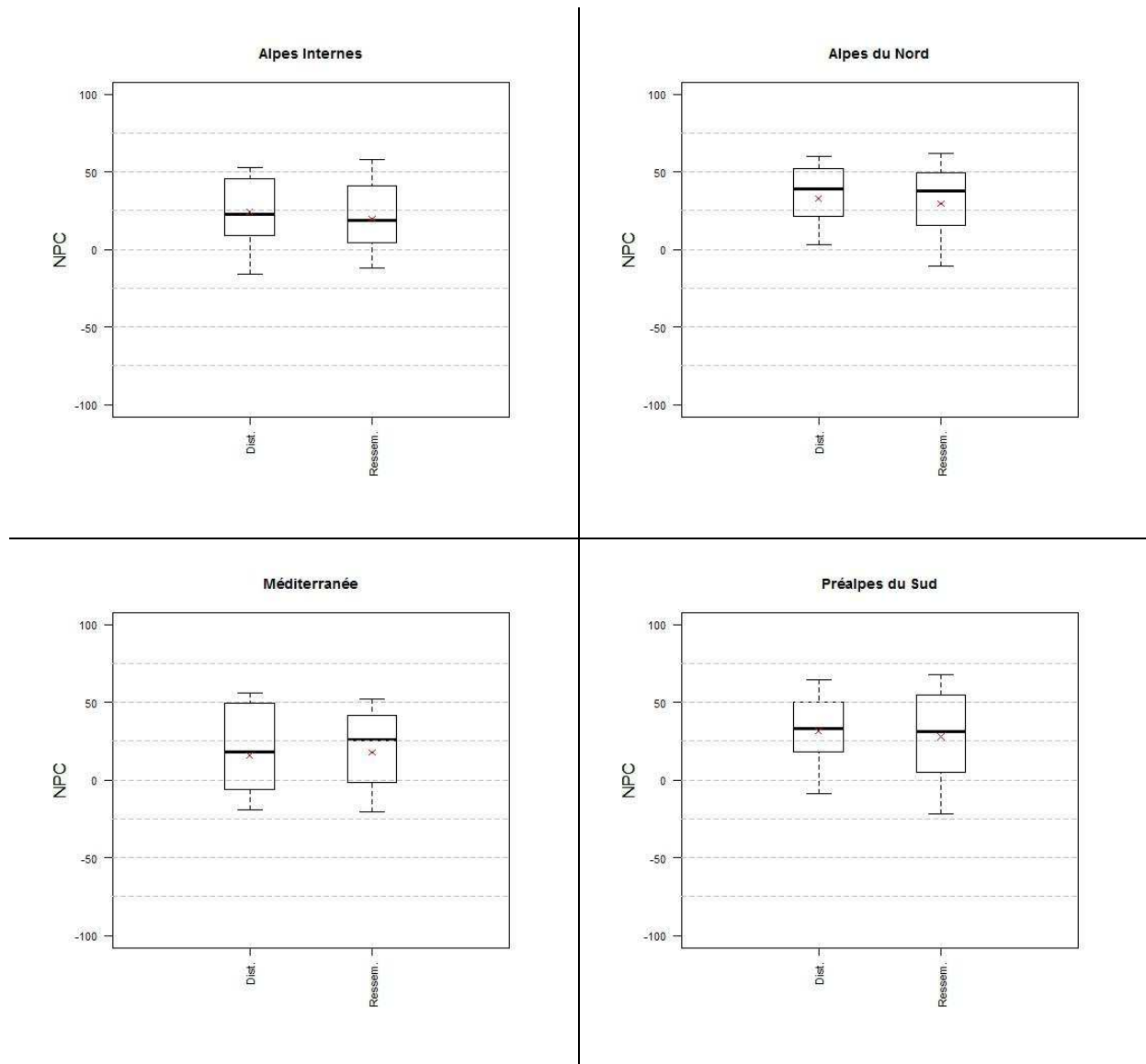


Figure 71 – Comparaison des méthodes de voisinage sur chaque sous-région HER.

2.3 Tests de contraintes sur les donneurs

A l'instar de la régionalisation portant sur les médianes des paramètres, la technique du voisinage est complexifiée par la sélection opérée parmi les donneurs potentiels. Les travaux de Goswami et al. (2007) signalent une dégradation des résultats en rapport avec une grande différence de taille entre le bassin donneur et la cible. De plus, Viviroli et al. (2009) démontrent que l'exploitation de bassins de même altitude est bénéfique pour les performances. D'autres auteurs sélectionnent leurs donneurs en analysant les performances des modèles en calage, comme le font Oudin et al. (2008), lors de la détermination des régressions. Cette technique est transposable pour choisir des voisins. Au vu de ces études, il est intéressant de tester différentes sélections parmi les donneurs.

Afin de restreindre la sélection à trois voisins pour chaque bassin cible, plusieurs contraintes sur les donneurs sont testées :

- une contrainte liée à la surface, permettant de conserver seulement les donneurs ayant une superficie similaire au bassin cible ;
- une contrainte liée à la qualité des donneurs, en se référant à une performance minimale du critère NPC à obtenir lors du calage sur les dix ans de données ;
- une contrainte liée à la localisation : les voisins sont désignés au sein d'une même HER, additionnant ainsi aux critères déjà présentés, celui de la contrainte géographique.

2.3.1 Contrainte liée à la surface

Pour éviter d'associer des grands bassins avec des petits, le calcul de la distance géographique entre les trois donneurs et le bassin cible est complexifié : il prend désormais en compte la superficie des bassins (équation 24). Plus la différence de taille, entre les deux bassins, est grande, plus leur rapport donne un chiffre adimensionnel élevé, qui augmente la distance calculée. Ce paramètre est pondéré par le facteur α ; si α vaut 0, la surface n'est pas intégrée (le rapport valant alors 1) et s'il vaut 1, celle-ci devient prépondérante.

$$dist_{don,cible} = \sqrt{(x_{don} - x_{cible})^2 + (y_{don} - y_{cible})^2} \left(\frac{S_{Gd}}{S_{Pt}} \right)^\alpha \quad (24)$$

Avec x : les coordonnées est-ouest des centroïdes ou des exutoires ;

y : les coordonnées nord-sud des centroïdes ou des exutoires ;

S_{Gd} : la superficie la plus élevée entre le donneur et sa cible (km²) ;

S_{Pt} : la superficie la plus petite entre le donneur et sa cible (km²) ;

α : facteur de pondération variant de 0 à 1.

Les résultats, obtenus en termes de NPC avec la technique de la distance géographique et trois voisins, démontrent que la surface a peu d'influence sur l'échantillon. Les causes principales en sont l'absence de bassins emboîtés et une gamme de superficies restreintes, comprises entre 10 km² et 1000 km² (Chapitre 2). Les meilleures performances sont ainsi obtenues quand le facteur α vaut 0 ce qui correspond à la distance géographique sans prise en compte de la surface, inversement quand sa pondération est maximale ($\alpha=1$), les résultats sont les « plus faibles ». Le peu de différences constatées a motivé l'abandon de la surface des bassins versants en tant que contrainte de sélection des bassins donneurs. La distance géographique demeure donc ce critère de sélection, fondé sur le calcul des distances entre le centroïde du bassin cible et ceux des trois voisins les plus proches. Il reste maintenant à envisager une sélection des donneurs quant à leur performance en calage et une restriction sur la localisation aux travers des HER.

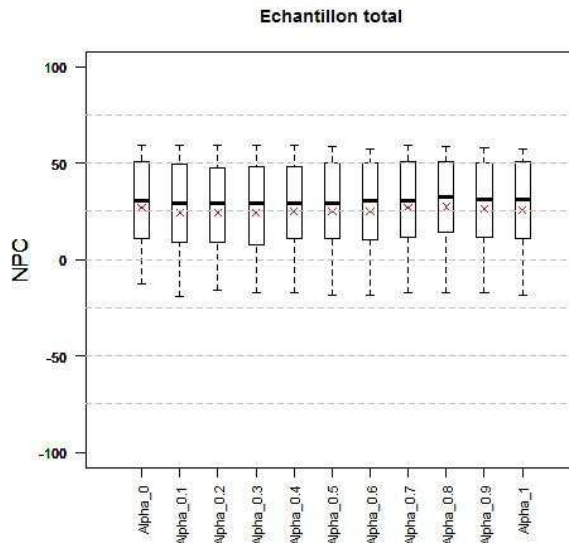


Figure 72 – Apport de la prise en compte de la surface dans le choix des voisins. $\alpha=0$ correspond à une distance géographique sans surface et $\alpha=1$ maximise l'importance de la surface.

2.3.2 Contrainte liée à la qualité des donneurs

Afin d'améliorer la régionalisation par voisinage géographique, contraindre la sélection des voisins par l'analyse du calage des donneurs potentiels, est une deuxième piste d'amélioration de la régionalisation. Se fondant sur les techniques utilisées lors des régionalisations par régression, dont les moins bons donneurs sont retirés, une condition est imposée, quant à la performance du modèle GRD de la variante 4, couplage complet, en calage sur chaque bassin. L'hypothèse sous-jacente est qu'un bassin versant, où le modèle est mal calé, ne peut pas devenir un bon donneur. Pour ne retenir que les meilleurs donneurs, plusieurs seuils de sélections sont testés : d'un NPC de -100 correspondant à aucune restriction, à un NPC de minimum 50. Plus le seuil est haut, moins il y a de bassins donneurs disponibles ce qui influence les résultats.

Comme l'illustre la Figure 73, la restriction du seuil d'éligibilité des donneurs potentiels n'améliore pas les performances (de gauche à droite sur le graphique). Lorsque la condition du NPC est faible (entre 0 et 20), les résultats n'évoluent pas. Très peu de bassins sont affectés (il reste 114 donneurs sur 117) et le nombre de donneurs potentiels demeure stable. Cependant, une fois que le NPC atteint une valeur de 30, la performance du modèle régionalisé grâce à la distance géographique, décroît tout comme le nombre de donneurs potentiels. Les voisins s'éloignent du bassin cible et lui correspondent moins. Finalement, une absence de condition, portant sur les performances en calage des donneurs potentiels, a été jugée plus pertinente. Actuellement, les deux techniques de contraintes sur les donneurs n'ont pas permis d'améliorer la régionalisation par voisinage et il ne reste plus que la contrainte géographique à tester.

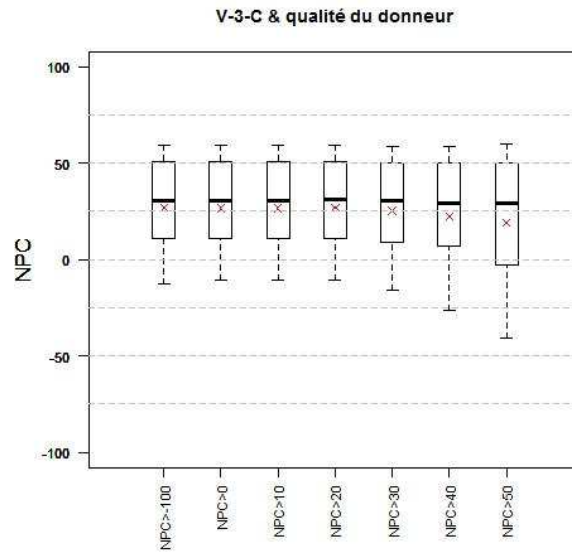
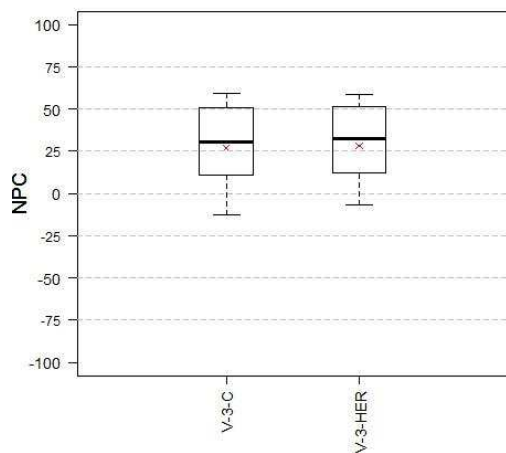


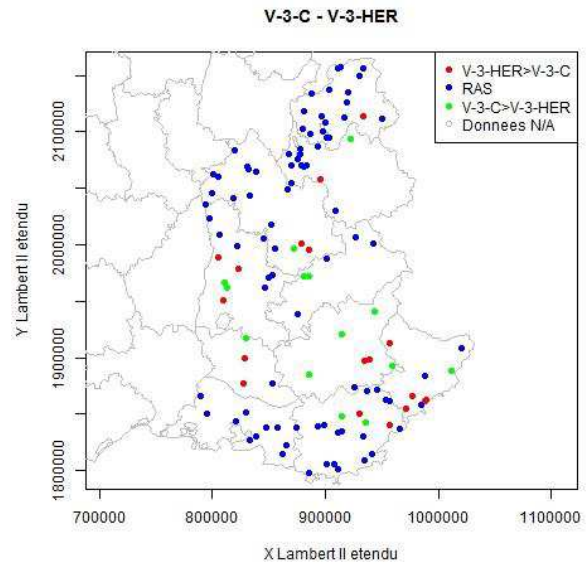
Figure 73 – Apport de la prise en compte des performances en calage des donneurs potentiels sur la régionalisation par la distance géographique.

2.3.3 Contrainte liée à la localisation

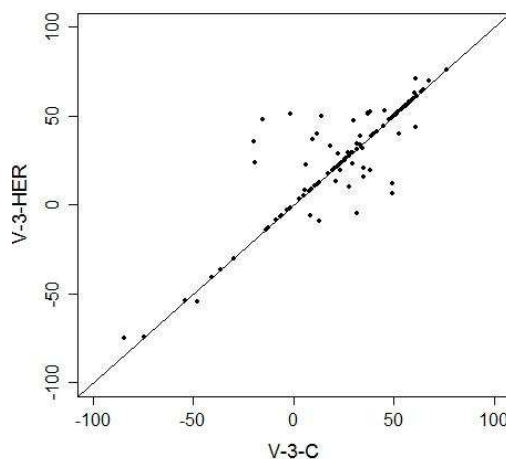
La régionalisation se fondant sur trois voisins du bassin cible pourrait être perfectionnée par une sélection des donneurs selon leur appartenance ou non à la même HER, ce qui revient à faire une restriction géographique quant aux donneurs. Ces régions étant presque homogènes, il y a tout lieu d’espérer une amélioration des performances du modèle. La Figure 74-A rend perceptible un léger gain dans toute la distribution en comparant cette nouvelle régionalisation (V-3-C-HER) à son homologue sans restriction (V-3-C). La carte (Figure 74-B) illustre les différences de progrès entre les bassins. Quand la densité des donneurs est forte, aucune différence n’est présente entre les deux méthodes (en bleu). Ce constat est identique lorsque les bassins donneurs se situent au centre des HER. Les écarts se creusent lorsque les donneurs proviennent des frontières des HER, entraînant aussi bien des améliorations que des dégradations (Figure 74-C). Pour mieux appréhender cette constatation, l’analyse est poursuivie par HER car certaines ont une densité de bassins élevées et d’autres moins.



A)



B)



C)

Figure 74 – Apport de la restriction géographique sur la méthode de voisinage A) Boîte à moustache sans restriction (à gauche) et avec restriction (à droite) ; B) La différence de valeurs entre les 2 cas de régionalisation : en rouge, une amélioration avec la restriction, en vert, une amélioration sans la restriction et en bleu, une différence inférieure à 5 points de NPC ; C) En abscisse, pas de restriction et en ordonnée, la restriction qui est meilleur lorsque les points sont situés au-dessus de la première bissectrice.

En se focalisant sur les HER (Figure 75), la différence des comportements des bassins versants apparaît nettement. Dans les HER de la Méditerranée et des Alpes du Nord, les résultats des deux méthodes divergent peu, car celles-ci disposent d'un grand nombre de bassins éligibles en tant que donneurs. Le gain est présent, quoi que limité, dans les Préalpes du Sud, en comparaison avec les performances obtenues sans la restriction et au vu de la médiane. Cependant, le 1^{er} quartile est plus faible quand une contrainte est appliquée sur les donneurs, signifiant en cela que certains bassins ont rencontrés une dégradation des résultats. Les Alpes Internes, ayant l'échantillon de bassins le plus réduit, est la sous-région connaissant la plus forte amélioration (médiane et moyenne, 1^{er} quartile et 1^{er} décile) mais au prix d'une baisse des meilleurs performances.

Avec la technique de la restriction géographique, les résultats ne sont amendés que sur les frontières des HER, avec une plus forte incidence sur les régions n'ayant que peu de bassins versants. Cependant et dans certains cas, la restriction diminue les performances sur certains bassins versants. Les causes peuvent en être : les limites engendrées par la

technique de voisinage fondée sur la distance, les forts bouleversements pouvant se dérouler sur de courtes distances, ou encore l'absence de véritable homogénéité des HER. Finalement, la technique de voisinage avec trois voisins et une restriction géographique est retenue pour la suite ainsi que les trois voisins sans aucune restriction. Ces deux méthodes de régionalisation de voisinages forment un parallélisme avec la médiane et la médiane au sein de la HER. Il reste donc pour la discussion des meilleures méthodes de régionalisations quatre techniques qui seront comparées dans la partie suivante.

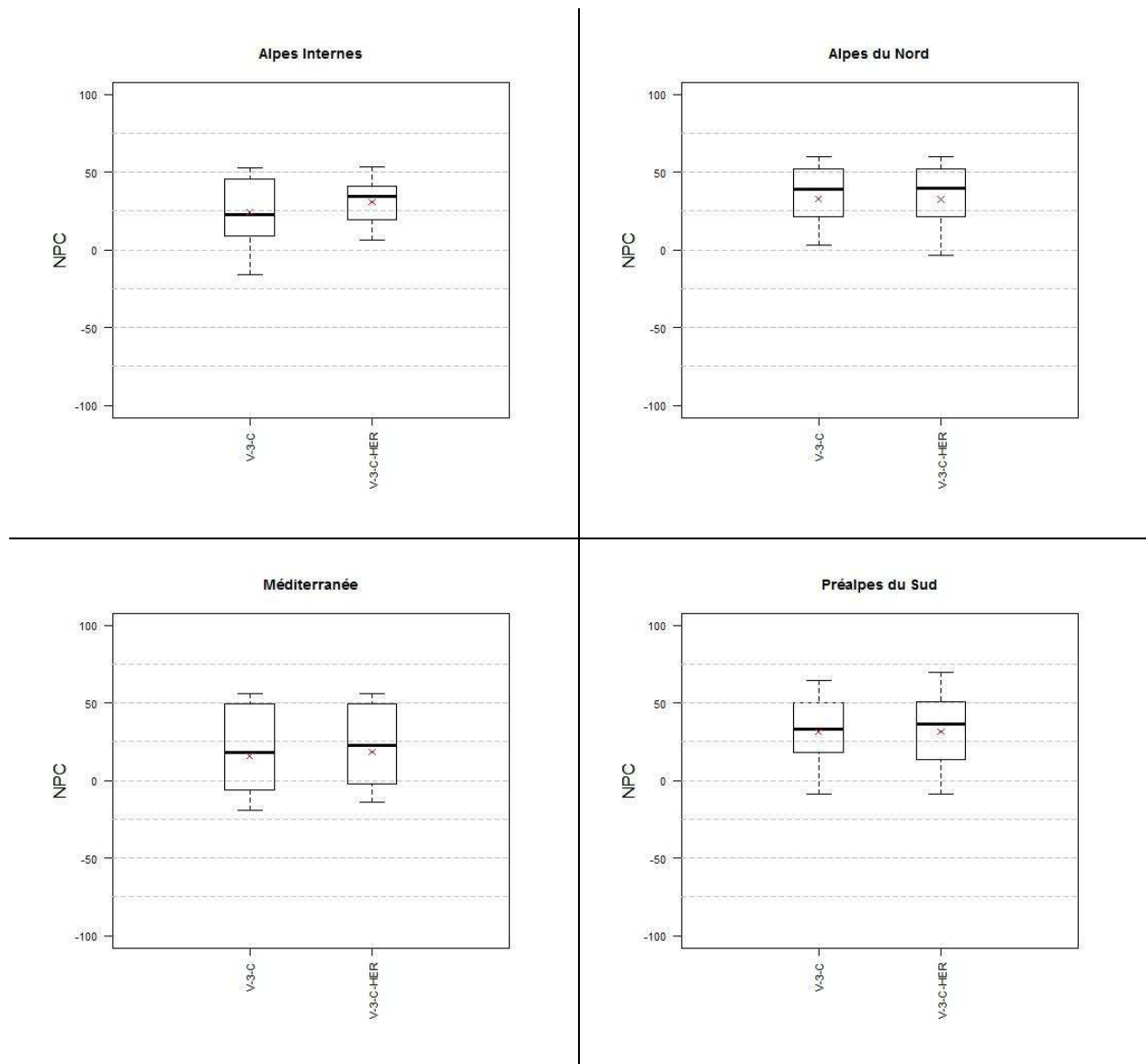


Figure 75 – Apport de la restriction géographique sur la méthode de voisinage, sur chaque sous-région HER.

2 méthodes de régionalisation ont été testées :

- la médiane des paramètres, intégrant ou non les sous-régions délimitées par les HER ;
- la technique de voisinage se fondant sur la distance géographique ou sur la ressemblance des bassins, à l'aide de trois caractéristiques physiques.

La méthode par voisinage semble donner les meilleurs résultats, quand:

- trois voisins sont sélectionnés ;
- la distance géographique est prise en compte, entre les centroïdes ;
- une contrainte appliquée sur la surface ou sur la qualité des donneurs n'améliorent pas les résultats les voisins donneurs proviennent de sous-régions homogènes (HER).

Les régionalisations comparées finalement pour la suite :

Médiane sur tout l'échantillon (TOTAL)	Trois voisins sans contrainte géographique (V-3-C)	Trois voisins au sein de la HER (V-3-C-HER)	Médiane au sein de la HER (HER)
---	---	--	------------------------------------

2.4 Régionalisation retenue pour la nouvelle version d'AIGA (variante 4)

Après avoir testé diverses techniques relatives aux médianes (2.1) et aux voisins (type de voisinage 2.2 et contraintes 2.3), il est apparu que des différences existaient entre chaque technique. Il faut alors déterminer la meilleure. Les travaux réalisés et présentés jusqu'ici sont synthétisés. Une méthode de sélection a priori d'une technique de régionalisation par rapport à la localisation des bassins est ensuite tentée afin de savoir s'il vaut mieux une régionalisation unique sur notre zone d'étude ou des régionalisations différentes suivant les sous-régions.

Les résultats présentés sur la Figure 76, permettent de constater que la médiane des résultats est quasiment identique pour chaque régionalisation, sur l'échantillon total des 118 bassins versants. Avec la technique de la médiane sans restriction, le 1^{er} quartile obtenu est le plus élevé et le 3^{ème}, le plus « faible ». Ce résultat surprend car il est contraire à la synthèse de Parajka et al. (2013) qui, à travers une trentaine d'études, souligne la piètre qualité de la médiane comme méthode de régionalisation. Cependant, les travaux de Viviroli et al. (2009) obtiennent aussi de bons résultats, identiques à ceux présentés ici, avec la médiane. Le peu de variabilité de certains paramètres des modèles GR4J et GRD, formant la nouvelle version de la méthode d'AIGA, présentés au début du chapitre (section 1) en est une des causes.

En comparant les méthodes de régionalisation sur l'échantillon de 118 bassins versants, les techniques de voisinage (V-3-C et V-3-C-HER) permettent également d'augmenter les performances du 1^{er} décile, comparées aux deux régionalisations fondées sur la médiane. Cet écart est encore plus visible sur la HER Alpes du Nord, dont la densité élevée de bassins favorise les techniques de voisinage basées sur la distance (également

relevé par Parajka et al. 2013). En ce qui concerne les autres HER, chacune d'elles bénéficie d'une régionalisation plus adaptée. Ainsi, la régionalisation médiane au sein de la HER est très adaptée dans les Alpes Internes alors qu'en Méditerranée et dans les Préalpes du sud, la technique de la médiane des paramètres est à privilégier sans restriction géographique. De plus, les régionalisations accumulent de plus forts progrès sur les régions les plus humides, quelle que soit la méthode. Mais, cela est encore plus visible avec l'emploi du voisinage. La HER Méditerranée a donc les moins bons résultats. Ce constat se retrouve dans les travaux de synthèse de Parajka et al. (2013) et de Patil et Stieglitz (2012), qui affirment que les régionalisations fonctionnent mieux sur un territoire humide, car les territoires arides sont plus hétérogènes, avec des processus non-linéaires plus prépondérants (crues éclair).

Les différences entre chaque HER confirment l'inexistence d'une méthode de régionalisation qui soit globalement meilleure qu'une autre, les performances dépendant pour beaucoup des bassins versants sur lesquels les régionalisations sont exécutées. Nous comprenons donc les enjeux de cette phase de régionalisation et l'intérêt d'améliorer encore les techniques actuelles. Les résultats légèrement meilleurs pour la régionalisation des trois voisins au sein des HER (V-3-C-HER) font que c'est cette technique qui est retenue pour la suite des travaux. Il est possible maintenant de comparer les performances de la nouvelle version régionalisée de la méthode AIGA avec la version initiale, dont les performances ont été présentées au début du chapitre 4. Cependant, nous devons vérifier qu'une fois régionalisées, les autres variantes testées en local (variante 1, variante 2 et variante 3) ne procurent pas de meilleurs résultats. Ensuite, seulement, la nouvelle version sera comparée à l'ancienne.

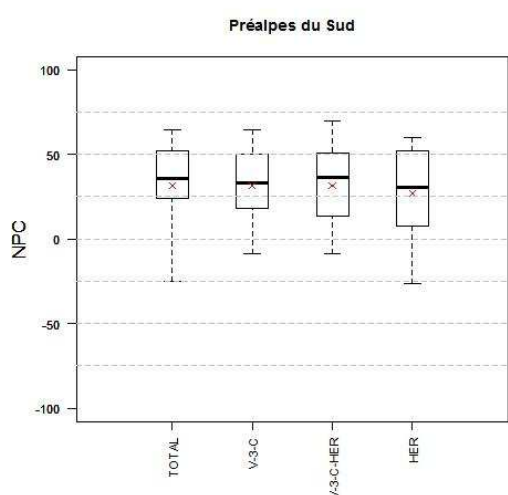
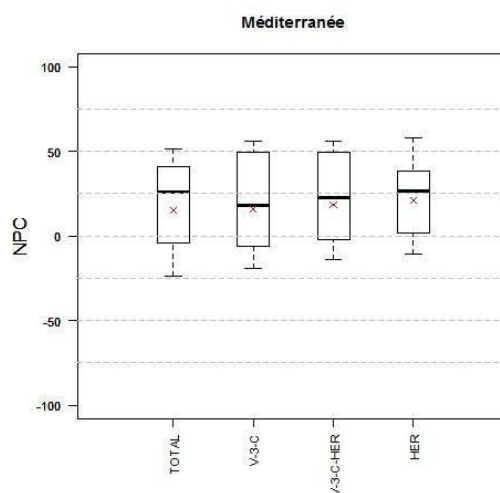
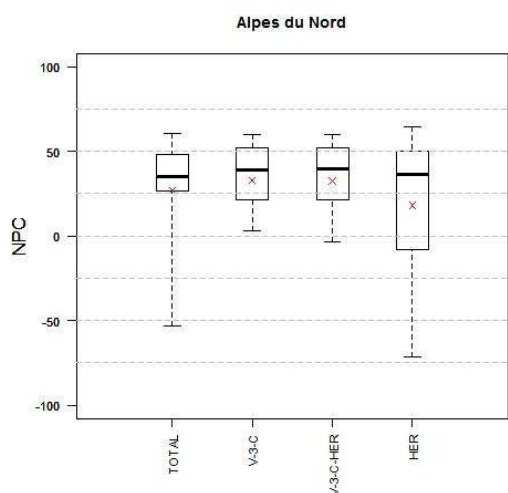
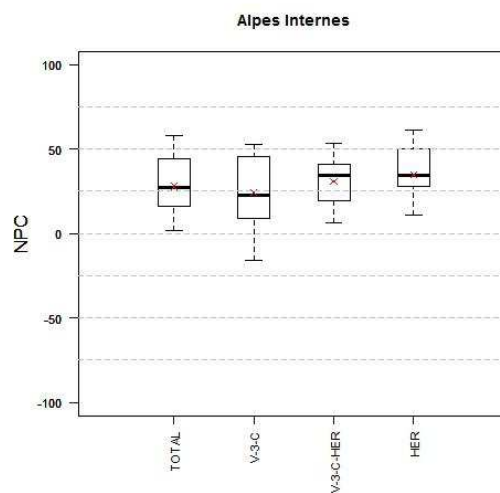
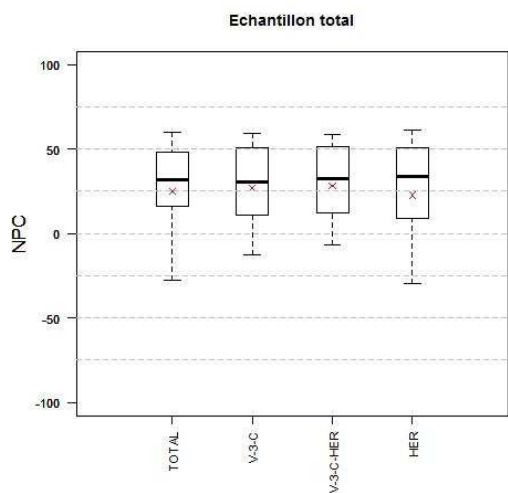


Figure 76 – Comparaison des quatre méthodes de régionalisation retenues : médiane des paramètres sans restriction (TOTAL), distance géographique entre les centroïdes avec trois voisins, la même distance géographique au sein d'une même HER, une médiane des paramètres au sein de la HER. Les résultats sont présentés sur l'échantillon total ainsi que sur les quatre HER.

3 Comparaison de la nouvelle version avec les variantes 1, 2 et 3

La complexification des modèles, effectuée au chapitre 4 (pour rappel : Tableau 11), s'est traduite par une amélioration des performances grâce surtout à l'apport du débit de base lors de l'évaluation locale. La régionalisation de chaque modèle, en se fondant sur les trois voisins du bassin cible issus de la même HER, permet de vérifier que ces améliorations des performances sont toujours intéressantes pour les modèles fonctionnant en mode « régional ». En effet, une régionalisation dégrade les résultats et si une variante plus simple que la nouvelle version choisie pour la méthode AIGA (variante 4) obtient de meilleures performances, il n'est pas nécessaire d'utiliser la version la plus complexe. Il s'agit donc d'une simple vérification avant de faire la comparaison avec la version initiale.

Tableau 11 – Version initiale et les 4 variantes (dont la nouvelle version) testées lors de la phase d'élaboration (chapitre 4).

	Initialisation (journalier) Modélisation continue			Crues (horaire) Simulation événementielle		
	Modèle	Module neige	Indice de suivi	Modèle	Différence Pluie/Neige	Initialisation 1 : $((S/A)_{h_init})$ 2 : R0/B
Initial	GR3J	Non	1 : $(S/A)_{(j-1)}$	GRD distribué	NON	1 : fct (S/A) (formule régionale) 2 : 30%
Variante 1	GR4J	Non	1 : $(S/A)_{GR4J(j-1)}$	GRD global	NON	1 : $a * (S/A)_{GR4J(j-1)}$ 2 : 30%
Variante 2	GR4J	Non	1 : $(S/A)_{GR4J(j-1)}$ 2 : $Q_{GR4J(j-1)}$	GRD global	NON	1 : $a * (S/A)_{GR4J(j-1)}$ 2 : fct($Q_{GR4J(j-1)}$)
Variante 3	GR4J	Oui	1 : $(S/A)_{GR4J(j-1)}$ 2 : $Q_{GR4J(j-1)}$	GRD global	NON	1 : $a * (S/A)_{GR4J(j-1)}$ 2 : fct($Q_{GR4J(j-1)}$)
Variante 4 (nouveau modèle)	GR4J	Oui	1 : $(S/A)_{GR4J(j-1)}$ 2 : $Q_{GR4J(j-1)}$	GRD global	OUI	1 : $a * (S/A)_{GR4J(j-1)}$ 2 : fct($Q_{GR4J(j-1)}$)

La progression, de la variante 1 à la variante 4, est visible sur la Figure 77 (à gauche). Cependant la régionalisation diminue légèrement les améliorations, par rapport aux modèles fonctionnant en mode « local ». A droite, le gain sur les résultats médians, entre 1 et 4, apparaît plus faible pour le modèle régional : de 14 points, pour celui-ci, contre 20 points, pour le local. Ce sont les moins bons résultats (1^{er} décile) qui connaissent la plus faible progression : 23 points en local et 15, en régional. Les gains liés à complexification du modèle ont donc été diminués, lors de la régionalisation. Les incertitudes engendrées par cette dernière sont alors supérieures à la prise en compte du débit de base et de la neige. Il faut donc dorénavant se charger d'améliorer la régionalisation au lieu de complexifier le modèle.

Malgré ces observations, la variante 4 régionalisée reste la meilleure. Elle constitue donc la nouvelle version pour le système d'anticipation de crues éclair et achève les travaux relatifs au premier objectif de la thèse consistant en l'élaboration d'un modèle adapté aux zones montagneuses. Afin de montrer les progrès accomplis par rapport à la version de départ, elle est comparée à la version initiale.

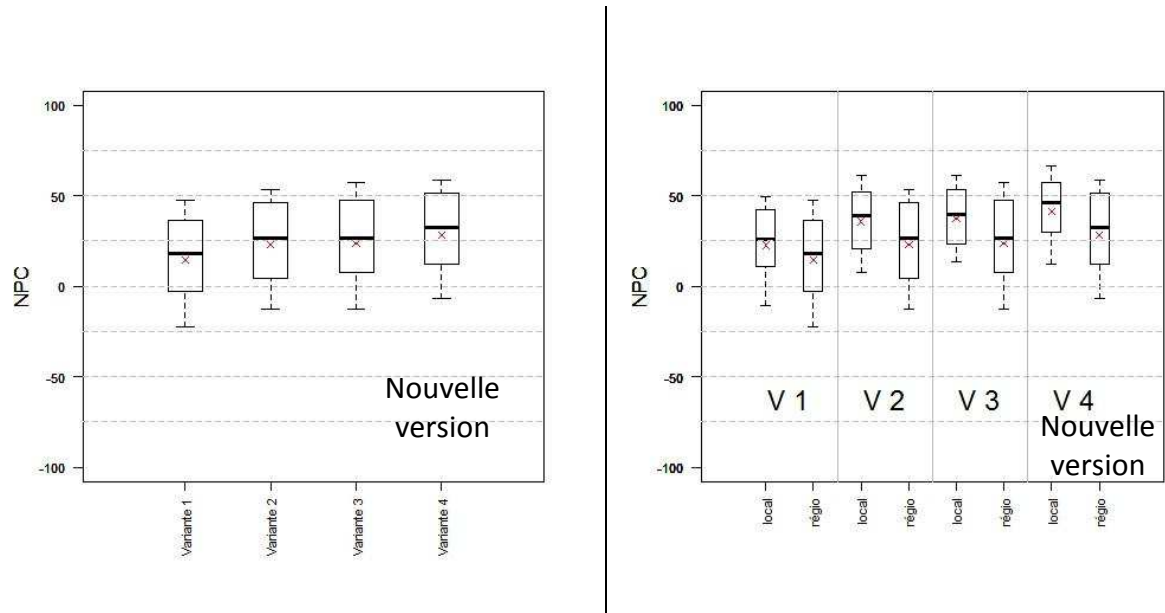
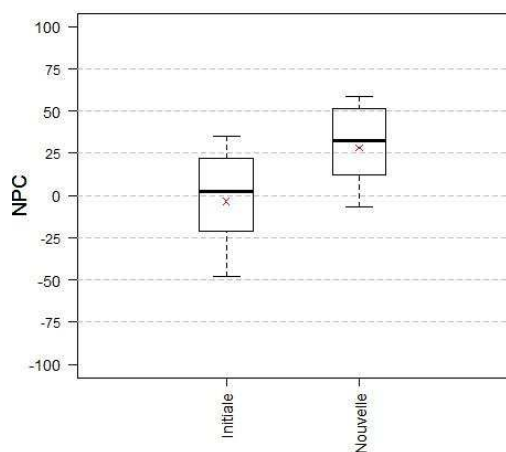


Figure 77 – Comparaison des performances des variantes 1, 2, 3 et 4 avec la meilleure régionalisation obtenue, soit celle des trois voisins au sein de la même HER, à gauche ; comparaison avec la version locale correspondante à droite.

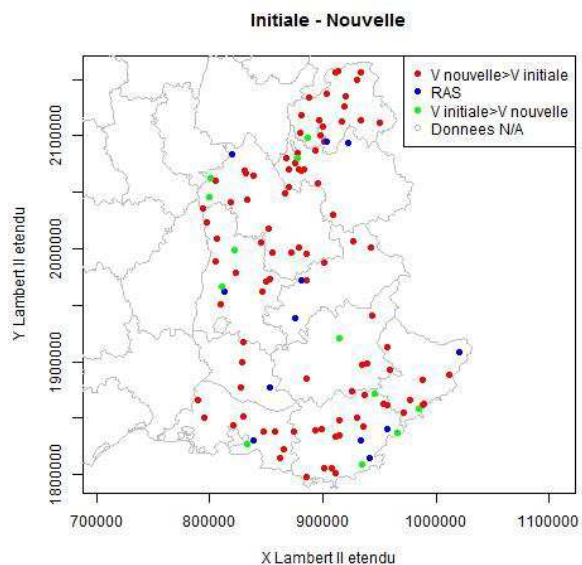
4 Comparaison entre la version initiale et la nouvelle version de la méthode AIGA

Le premier objectif de la thèse était de remplacer la version initiale de la méthode AIGA par une nouvelle variante plus adaptée aux régions montagneuses. Au travers du chapitre 4, relatif à l'élaboration de cette nouvelle variante, et de celui-ci pour sélectionner la meilleure régionalisation, une nouvelle version de la méthode AIGA a été développée. Il faut dès maintenant la qualifier en comparant ses performances avec la méthode initiale, d'abord sur les bassins HYDRO et ensuite lors de la seconde évaluation au chapitre suivant sur des bassins non-jaugés (deuxième objectif de thèse). Dans un premier temps l'analyse s'effectue sur l'ensemble des 118 bassins versants. L'hétérogénéité de la zone d'étude implique ensuite de réaliser une analyse par sous-régions HER en prenant en compte tous les événements pluvieux. Finalement, une saisonnalité des crues ayant été décelée sur la zone d'étude (Chapitre 2), l'analyse comparative s'effectue par saison.

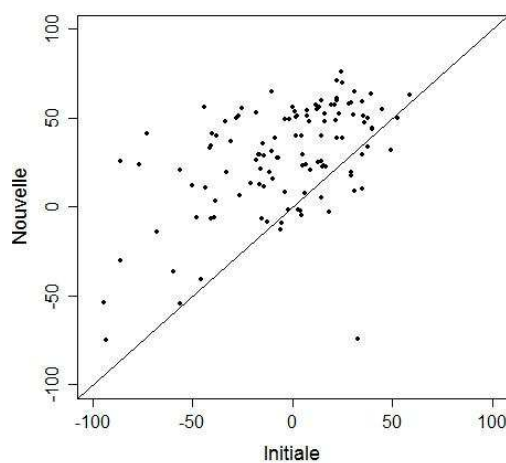
Globalement sur la Figure 78-A, les résultats ont augmenté en moyenne de 35 points en termes de NPC, si toute la distribution des résultats est prise en compte. La médiane des résultats est passée de 0 points à près de 30 points et les performances négatives ne représentent plus que 10 à 25% des bassins pour la nouvelle version, au lieu des 50% dans le cas de l'initiale. Les performances se sont améliorées (Figure 78-B) sur 80% des bassins versants (en rouge), et pour seulement 10% des bassins (en bleu) aucun changement ne s'est produit. Finalement, les 10% restants ont subi une dégradation (en vert). Ces deux derniers cas se retrouvent dispersés sur toute la zone d'étude, prouvant ainsi les difficultés liées à la régionalisation. Quant aux dégradations, elles restent faibles, points sous la première bissectrice de la Figure 78-C, à l'exception notable d'un bassin ayant perdu 100 points de NPC. Notons que les meilleures expériences s'expliquent d'une part par une meilleure initialisation et régionalisation mais d'autre part, du fait que le critère de calage de la version initiale était la pointe de crue. Ce calage a été choisi pour favoriser les débits maximums et non pour reproduire les volumes de crues ce qui pénalise cette version initiale lors de l'évaluation en termes de NPC. Afin d'affiner cette première analyse de résultats, les performances des deux versions sont comparées par sous-régions.



A)



B)



C)

Figure 78 – Comparaison de la version initiale et de la nouvelle A) Boîte à moustache avec l’initiale, à gauche et la nouvelle, à droite ; B) L’écart de valeurs entre les deux versions: en rouge, une amélioration avec la nouvelle, en vert, une dégradation pour la nouvelle et en bleu, aucune différence (inférieure à 5 points de NPC) ; C) En abscisse, l’ancienne version et en ordonnée, la nouvelle qui est meilleur lorsque les points sont situés au-dessus de la première bissectrice.

4.1 Analyse par sous-régions

La version initiale étant au départ développée pour opérer sur le pourtour méditerranéen, ses performances sont examinées à travers les quatre HER, pour déceler celles où les progrès sont les plus perceptibles. Sur la Figure 79, dans les Alpes du Nord, les performances de la nouvelle version sont supérieures de 30 points environ, sur toute la distribution, à celles de l’ancienne version. Pourtant, cette dernière produit ses meilleurs résultats dans cette région (Chapitre 4). Dans les Préalpes du Sud, seconde région en termes de performances pour la version initiale, la médiane des résultats augmente de 30 points, avec les simulations de la nouvelle version, et les 1^{er} et 3^{ème} quartiles, de 25 points. Pour la Méditerranée, les gains sont les plus faibles. Cependant, l’amélioration n’est pas négligeable, atteignant 25 points pour la médiane. Cette région demeure donc problématique, à cause notamment des bassins des Bouches-du-Rhône. Finalement, c’est dans les Alpes Internes que l’augmentation est la plus forte, étant en moyenne, sur tous les bassins, de l’ordre de 50 points. Cette observation est conforme à ce qui avait été observé en local au chapitre 4.

En conclusion, en analysant indifféremment les crues selon les saisons, les progrès de la nouvelle version sur l'ancienne sont présents sur la totalité de la zone d'étude mais surtout dans les Alpes Internes. Les crues ayant lieu en majorité en automne et en hiver, il est intéressant de décrire le progrès selon les saisons pour mettre en évidence l'intérêt de la prise en compte de la neige notamment.

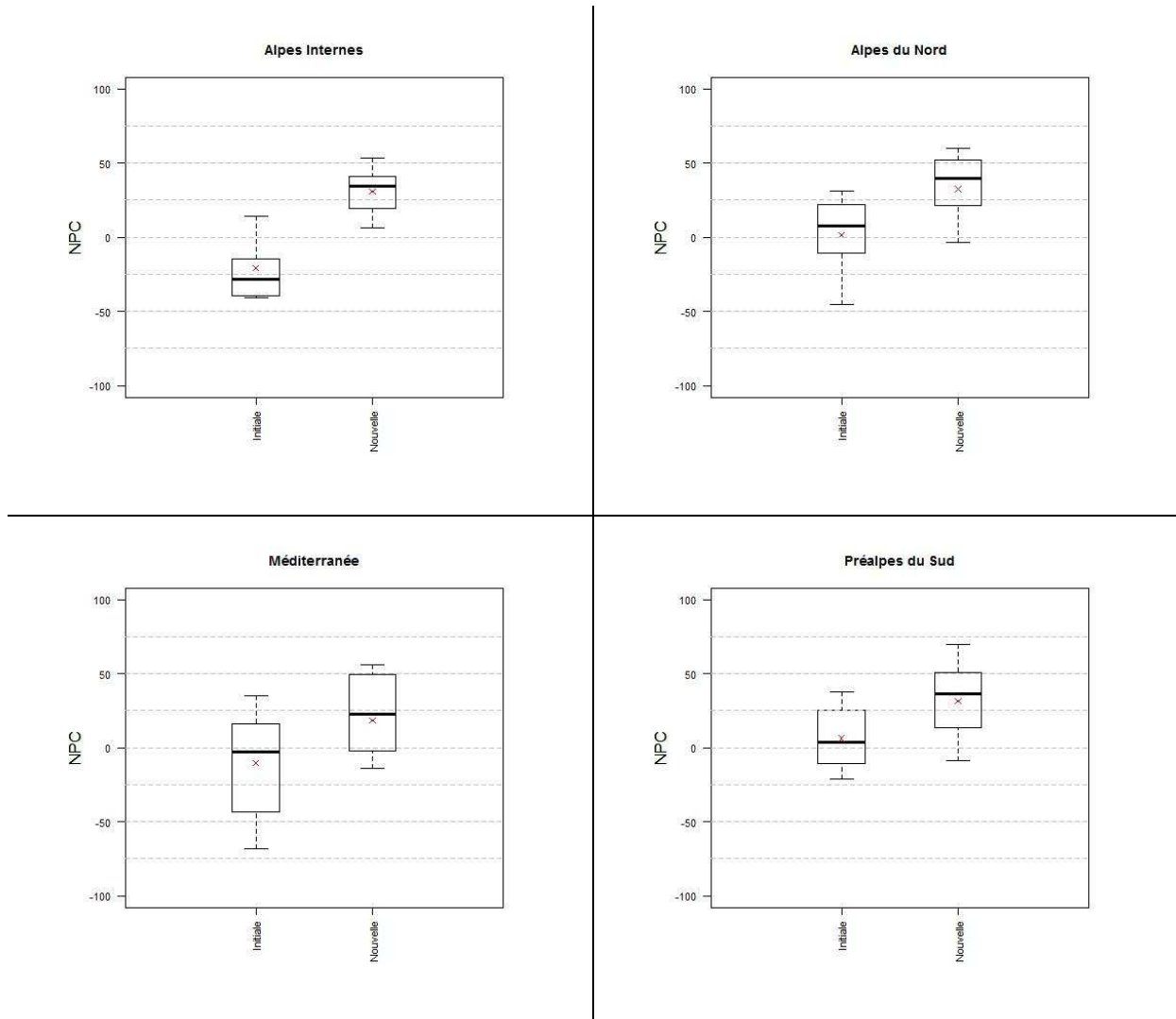


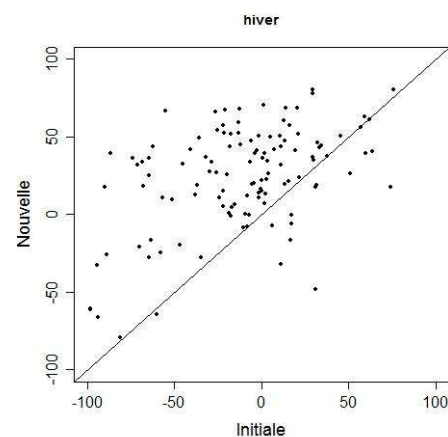
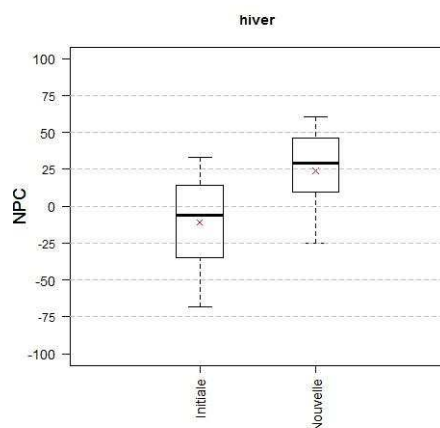
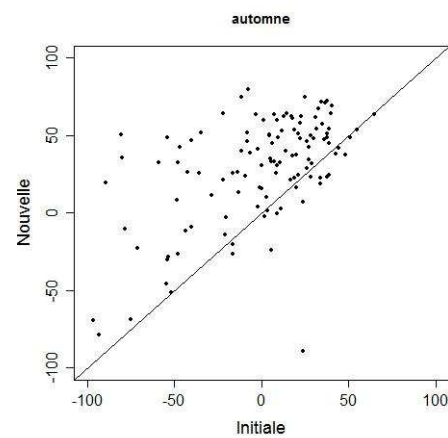
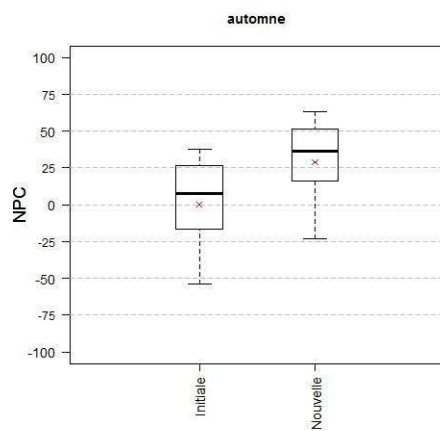
Figure 79 – Comparaison de l'ancienne version et de la nouvelle dans chaque sous-région HER.

4.2 Analyse par saisons

La saisonnalité des crues, décrite dans le chapitre 2, est un nouvel axe d'évaluation des gains de la nouvelle version de la méthode AIGA, qui intègre désormais la neige. Sur la Figure 80, les performances des deux versions (ancienne et nouvelle) ont été extraites selon les saisons. L'automne et l'hiver (les deux premières lignes), regroupant 75% des crues, affichent les plus forts progrès pour la nouvelle version, avec des médianes augmentant respectivement de 28 et de 35 points. Cela va de pair avec peu de dégradations, indiquant ainsi que le nouveau modèle fonctionne bien pour les saisons importantes.

Le gain en automne est surtout lié à une meilleure paramétrisation et celui de l'hiver, à une prise en compte de la neige. Quant au printemps, le gain sur la médiane est plus important, avec une valeur de 39 points, mais les dégradations sont aussi les plus nombreuses, mais relativement faibles, par rapport aux résultats obtenus par la version initiale. Cependant, seulement 15% des crues se déroulent à cette saison. C'est le débit initial lié à la fonte des neiges qui explique ces écarts de résultats. En été, aucune différence n'est présente entre les médianes, grâce à la compensation (gains et dégradations) des deux versions. La nouvelle n'est alors pas plus performante, quel que soit le bassin. Ce résultat décevant s'explique par la méconnaissance de la pluie car celle-ci est le résultat d'orages qui peuvent se produire entre les pluviomètres ou provoquer des extinctions du signal radar. Cependant, seul 7.5% des crues se déroulent en été, cette contre-performance est donc à relativiser.

Finalement, la nouvelle version régionalisée par voisinage au sein de la HER semble bien adaptée à la zone de montagne, comme le montrent les analyses par sous-régions ou par saisons avec des gains non négligeables sur la version initiale. Cette version nécessite toutefois des données de neige et de pluie qui sont peu précises en montagne (manque de pluviomètres, résolution de la lame SAFRAN à 64 km²) ce qui peut handicaper les performances. En effet, l'erreur sur les données d'entrées est complétée par celles liées à la régionalisation. Notons aussi que ces résultats sont évalués en termes de NPC. Reste alors à les évaluer aussi en termes de déclenchement d'alerte et d'anticipation sur des petits bassins versants non-jaugés.



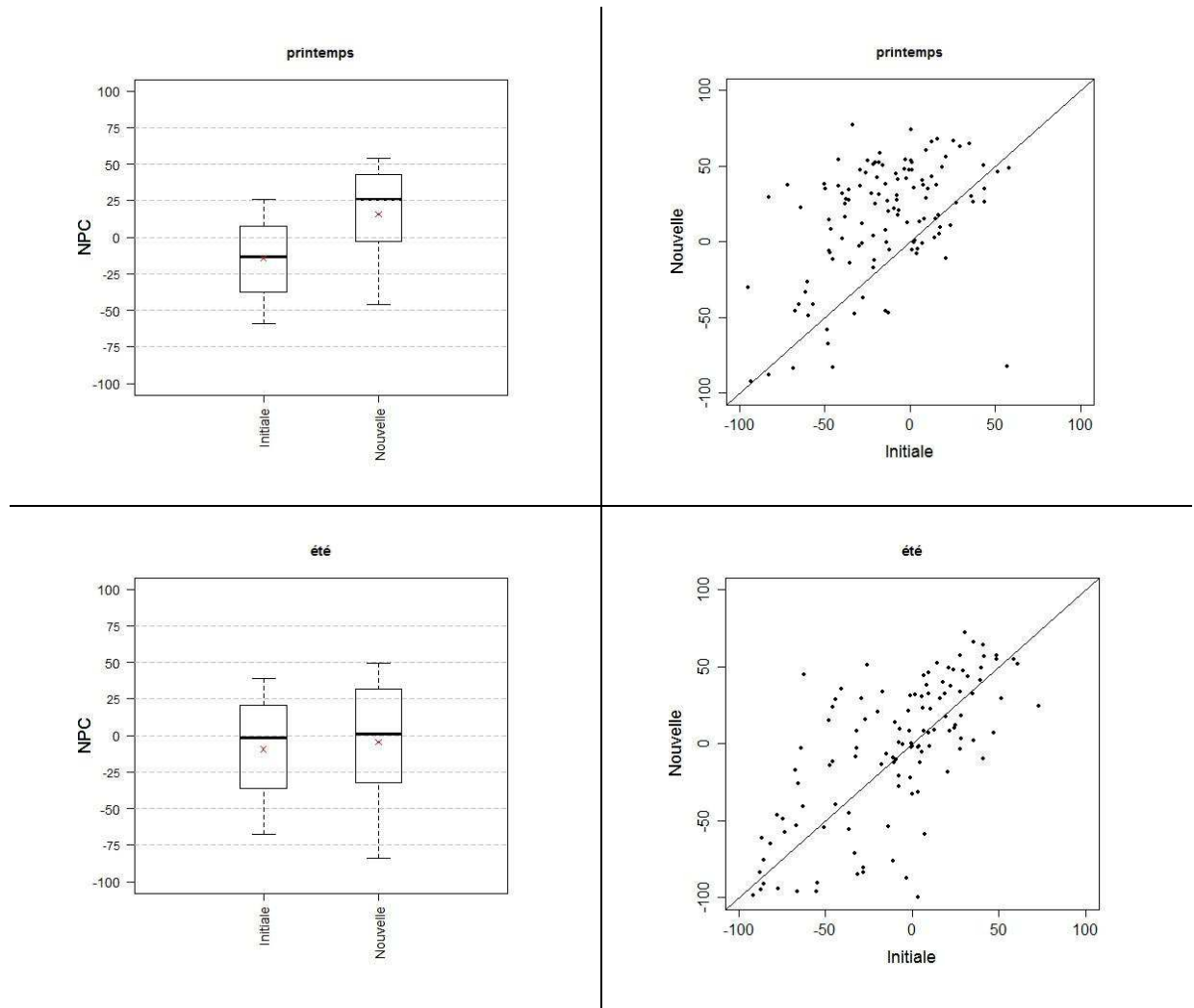


Figure 80 – Comparaison de l’ancienne version d’AIGA et de la nouvelle (variante 4) pour chaque saison. A gauche, les boîtes à moustaches ; à droite, en abscisse, version AIGA initiale et en ordonnée, la nouvelle (variante 4) qui est meilleur lorsque les points sont situés au-dessus de la première bissectrice.

5 Conclusion et pistes d'amélioration

Dans ce chapitre, l'objectif était de fournir la meilleure version régionale possible à partir de la variante 4, la meilleure élaborée en « local », afin d'adapter la version initiale de la méthode AIGA à la zone d'étude montagneuse. Pour se faire, différentes techniques de régionalisation ont été testées dans ce chapitre et les résultats ont été rapprochés de ceux disponibles dans la littérature. Si la technique des régressions a rapidement été abandonnée, les autres méthodes (médiane et voisinage) ont été perfectionnées, afin d'obtenir les meilleures régionalisations possibles. Il en résulte que sur la zone d'étude, la technique de voisinage au sein d'une même HER produit des résultats légèrement supérieurs. Cependant, si cette technique est globalement meilleure, elle ne l'est pas pour toutes les HER. Toutefois, il semble difficile de pouvoir choisir a priori la meilleure technique de voisinage. Pour la suite de la thèse, la variante 4 régionalisée, à l'aide du voisinage dans les HER, est conservée, devenant la nouvelle version de la méthode AIGA.

Afin de s'assurer que la nouvelle version, obtenue « en local » (Chapitre 4), soit aussi la plus adaptée en « régional », elle a été comparée aux autres variantes (1, 2 et 3). Les bénéfices obtenus à l'aide de la variante 4 sont toujours perceptibles, une fois la régionalisation effectuée, même s'ils sont plus modérés. Les améliorations prioritaires de la méthode ne portent plus sur la prise en compte des processus par la complexification des modèles journalier (GR4J) ou horaire (GRD), mais sur la régionalisation, point névralgique à traiter.

Par rapport à la modélisation en cours dans la méthode AIGA, le gain est non négligeable, sur chaque HER et surtout sur les Alpes Internes. Les étapes 2 et 3 de la thèse ont donc permis de réaliser correctement le premier objectif. En outre, la saisonnalité des crues, prise en compte dans l'analyse, permet de signaler que les gains maximums sont atteints en automne et en hiver, saisons les plus concernées par les crues. À l'inverse, en été, la différence entre la version initiale et la nouvelle est beaucoup plus faible. Mais, à cette saison, les événements pluvieux génèrent moins de crues.

Cependant et malgré les améliorations, de très fortes variations de performances existent entre les bassins. De ce fait, il est difficile d'obtenir une seule régionalisation qui convient à l'ensemble de notre échantillon de bassins. Ce constat est conforté par la synthèse de plusieurs études réalisée par Parajka et al. (2013) démontrant qu'aucun consensus n'existe. Etant donné la difficulté rencontrée par la détermination d'une meilleure technique, pour chaque bassin, voire chaque région, l'utilisation simultanée de plusieurs régionalisations semble être une piste intéressante, qui augmenterait les performances des modèles, comme l'illustrent les travaux de Goswami et al. (2007).

Cette première évaluation étant effectuée et ayant permis de déterminer la meilleure version régionale, il faut s'attaquer, dans les deux derniers chapitres de cette thèse, à l'évaluation du modèle sur les petits bassins RTM (second objectif de thèse). Dans cette ultime étape (Etape 4), nous espérons confirmer les améliorations obtenues, par rapport à la méthode AIGA actuelle, sur les bassins HYDRO.

Chapitre VI : Evaluation des modèles sur de véritables bassins non-jaugés

Comment évaluer les améliorations de la nouvelle version de la méthode AIGA sur des bassins réellement non-jaugés ?

Les développements réalisés sur le pseudo non-jaugé demeurent-ils toujours pertinents sur le véritable non-jaugé ?

Quelles sont les faiblesses du nouveau modèle sur les bassins non-jaugés ?

Jusqu'à présent, la thèse s'est focalisée sur son premier objectif qui portait sur l'adaptation de la méthode AIGA originelle, actuellement en service au sein de la plateforme RHYTMME, aux zones montagneuses en améliorant son initialisation tout en prenant en compte la neige (Etape 2). Cette nouvelle version de la méthode AIGA a été par la suite régionalisée à l'aide de la technique du voisinage au sein d'une sous-région homogène -HER- (Etape 3). Maintenant, le but est de répondre au second objectif de la thèse en proposant une nouvelle évaluation sur de véritables bassins non-jaugés disposant seulement de données historiques de dégâts provenant des services RTM (Etape 4). Afin de mettre en valeurs les travaux réalisés jusqu'ici, les performances de cette nouvelle version sont comparées à celles de la version initiale. Cette ultime étape permet de confirmer les décisions opérées lors des étapes précédentes et d'identifier les faiblesses restantes du modèle dans un contexte non-jaugé.

D'abord, sont présentées les différentes bases de données qui sont disponibles pour évaluer les modèles sur de petits bassins non-jaugés ne disposant pas de données de débits. Ensuite, une méthode d'évaluation de l'ancienne et de la nouvelle version de la méthode AIGA est mise en place, en se fondant sur des signalements de dégâts (RTM) et sur une approche multi-seuils. Cette technique permet d'analyser les tableaux de contingences obtenus à l'aide de plusieurs seuils simultanément. Les résultats obtenus sont estimés par cette nouvelle approche sur les bassins issus de la base de données RTM. Une discussion est entamée sur les limites de la méthode d'évaluation et sur les problèmes induits par l'application d'un modèle hydrologique sur des petits bassins sujets aux crues éclair à partir d'un calage opéré sur des bassins jaugés (HYDRO). La conclusion met en évidence l'intérêt de la double évaluation effectuée dans cette thèse et présente les pistes d'améliorations poursuivies dans le chapitre suivant.

1 Evaluation des modèles sur des bassins non-jaugés

1.1 Présentation des différents types de base de données

L'évaluation des alertes sur des bassins non-jaugés demeure ardue, ceux-ci ne disposant pas par définition de données de débits, nécessaires à l'évaluation des modèles hydrologiques. Pour pallier ces difficultés, les hydrologues ont recours à des données proxys qui peuvent remplacer les données débitométriques obtenues en continu. Celles-ci sont obtenues lors de campagnes de terrains, par des coupures de presses, etc... Les informations fournies peuvent alors se présenter sous la forme d'estimations de débits par de l'hydraulique, de simples données de dégâts,... Trois données proxys, issues de relevés de dégâts et adaptées aux bassins non-jaugés, sont présentées ci-dessous : relevés post-événement, données historiques, données de dégâts avec un suivi en quasi temps réel.

Relevés post-événement

Ce sont les relevés de dégâts très complets, effectués lors d'événements majeurs, à partir des enquêtes opérées sur le terrain (laisses de crues) et des relevés hydrauliques, sur des petits bassins versants non-surveillés par les réseaux nationaux. Ces mesures permettent ensuite d'estimer des débits de pointe, à partir de l'hydraulique, que l'on peut comparer ensuite à ceux estimés par le modèle. Le projet HYDRATE, déjà présenté (Chapitre 1), préconise les méthodes à utiliser pour de tels relevés et a participé à la construction d'une base de données sur les crues majeures en Europe (Borga et al. 2011). Cette technique d'évaluation a comme principal inconvénient de ne tester les modèles que sur des crues importantes, ne permettant pas d'évaluer le modèle sur de plus petites crues ni d'estimer les fausses alertes du modèle car aucune information n'est disponible en dehors des crues exceptionnelles.

Données historiques

La deuxième technique consiste à comparer les alertes simulées par les modèles hydrologiques, aux dégâts recensés dans les bases de données. Nous pouvons par exemple citer la base de données *Storm Data database* (NWS) aux Etats-Unis ou celle consolidée par les services des RTM en France. Ces deux bases sont alimentées en relevés récents mais aussi en extraits de presse, ce qui permet d'obtenir des informations sur des crues historiques (localisation, date...) et sur les dégâts observés. Si l'avantage est de travailler sur de longues chroniques, le manque d'exhaustivité des renseignements pose problème pour estimer efficacement les fausses alertes des modèles hydrologiques. D'une part, aucune information n'est fournie dans le cas où aucune crue dommageable n'est survenue et d'autre part, les relevés sont généralement focalisés sur les zones urbaines, où les enjeux humains sont fort présents (Gourley et al. 2010). De plus l'occupation des sols (urbanisation) et la géomorphologie des cours d'eau peuvent avoir changé avec le temps, rendant la comparaison délicate entre la simulation hydrologique et les observations (Spreafico 2006). Cette technique enrichit la première méthode présentée dans cette partie en permettant d'évaluer les modèles sur plus de crues et non plus sur les crues exceptionnelles. Cependant, la comptabilisation des fausses alertes reste délicate à cause de la non exhaustivité des données.

Données de dégâts avec un suivi en quasi temps réel

Enfin, la dernière technique présentée s’approche de la base de données historiques, dont elle collecte les informations sur les dégâts faisant suite à des catastrophes naturelles, auxquelles elle ajoute des renseignements sur l’absence de signalements. Par exemple, un fort orage sans dégâts sera intégré à la base. Aux Etats-Unis, le projet *Severe Hazards Analysis and Verification Experiment* (SHAVE) œuvre dans ce sens, en contactant les entreprises et les particuliers, à chaque événement, pour connaître la géolocalisation et l’évolution temporelle des événements et ainsi tenter de graduer le plus précisément possible la dangerosité des événements, sur une échelle de dix classes (« No impact » à « Rescue/Fatality/Injury ») (Ortega et al. 2009; Gourley et al. 2010).

L’intérêt de connaître l’information de non-crues a été montré par les travaux Caliano et al. (2013), à l’aide de la comparaison des bases de données NWS et SHAVE. L’absence de la désignation « pas d’inondation » (NWS) est considérée comme préjudiciable lors de l’évaluation des modèles, en empêchant la comptabilisation des fausses alertes. Il est donc préférable de compléter les données historiques avec des rapports de *non-crues* pour améliorer l’évaluation des modèles hydrologiques, à la fois en termes d’alertes manquées et de fausses alertes.

En France, le projet RHYTMME et ses utilisateurs-expérimentateurs (collectivités, SNCF,...) évaluent en temps réel la pertinence des alertes de la méthode AIGA, à l’aide d’une plateforme de services et de dégâts observés sur le terrain (Defrance et al. 2012; Javelle et al. 2013a). En cas d’absence de retour, de la part des expérimentateurs, cela signifie qu’aucun dégât n’est à constaté.

Le principal atout de ce projet et du projet SHAVE réside dans le fait que lorsqu’un événement pluvieux important se produit, son absence dans les bases de données signifie qu’aucun dégât n’a été subi. Ainsi, il est possible de reconnaître les fausses alertes simulées par les modèles.

Synthèse

Chaque base a donc des points positifs et négatifs qui sont résumés dans le Tableau 12. Malgré les avantages du dernier type de données (précision des relevés et l’information sur les événements sans dégât), il a été choisi d’utiliser la base de données historiques des RTM. Le fait de pouvoir travailler sur une période de dix ans a été déterminant afin de garantir la présence d’assez de relevés de dégâts pour évaluer la nouvelle version de la méthode AIGA.

Tableau 12 - Caractérisation des différentes sources de données (- défaut, + intérêt, ++ fort intérêt, +++ très fort intérêt)

Type de base	Période de relevés	Précision des relevés	Information sur les événements sans dégât
Relevés post-événement	- (quelques crues)	+++	-
Données historiques	++	+	+
Données de dégâts avec suivi	+	++	+++

Pour rappel, les relevés de la base des RTM ont été sélectionnés sur la période 1997-2006 (chapitre 2). Au total, 123 bassins sont donc disponibles pour évaluer la nouvelle version de la méthode AIGA sur des sites non-jaugés, localisés sur les départements des Alpes-de-Hautes-Provences, des Hautes-Alpes et des Alpes-Maritimes. Un site RTM ayant un risque unique prédéfini (crue ou inondation dans notre cas), nous n'avons retenus que ceux qui ont subi un signalement de crue ou d'inondation pendant notre période de dix années. Les sites sujets aux laves torrentielles, aux chutes de bloc ou aux autres aléas n'ont pas été pris en compte dans notre étude. En outre, la taille des bassins versants issus des 123 sites RTM est inférieure à celle de leurs homologues issus de la banque HYDRO, la surface médiane étant de respectivement 21 km² et 110 km² (Figure 81). Sur un total de 179 signalements (crue ou inondation), chaque bassin dispose d'au moins un et au plus de six signalements par bassin, et en moyenne 1,5. Cette proportion est identique, quelle que soit la région HER étudiée.

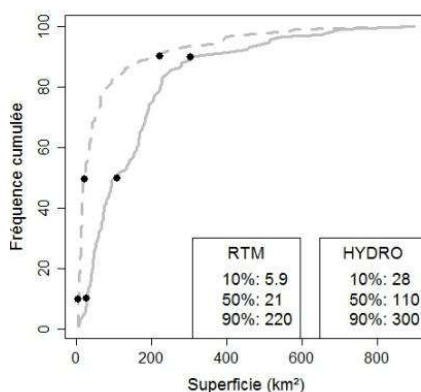


Figure 81 – Cf. chapitre 3 : superficie des bassins versants RTM (traits pointillés) et HYDRO (traits pleins).

Obtenir une information sur les dégâts est important pour évaluer les modèles hydrologiques mais cette donnée ne peut pas être utilisée directement. En effet, pour que les modèles émettent une alerte en simulant des débits sur les bassins versants, il faut que ceux-ci soient quantifiés et hiérarchisés à l'aide d'un seuil d'alerte propre au bassin. Il faut ensuite que ce seuil soit en rapport avec les dégâts observés ce qui n'est pas évident et nécessite l'utilisation de diverses techniques présentées ci-après.

1.2 Détermination d'un seuil d'alerte à partir des relevés de dégâts

Quand aucune information concernant des crues antérieures n'est disponible, un seuil d'alerte théorique doit être déterminé. Les travaux de Carpenter, cités par de nombreux scientifiques, préconisent de définir ce seuil comme équivalent à un débit d'une période de retour de deux ans, qui correspond au début des débordements des cours d'eau (Carpenter et al. 1999). Cependant, sur les petits bassins, ce seuil ne semble pas adapté (Reed et al. 2002). En effet, dans la réalité, chaque site est inondé plus ou moins souvent selon son degré d'exposition. Idéalement, les seuils devraient donc être déterminés à grande

échelle et intégrer le risque d'exposition des infrastructures humaines (Naulin et al. 2013). L'apport de relevés de dégâts peut donc améliorer sensiblement la détermination des seuils d'alerte de crues.

Les bases de données de dégâts renseignent à l'échelle locale sur de vastes régions (11 départements français pour les RTM) l'exposition aux risques de crues. Cependant, la liaison entre les dégâts et les crues n'est pas évidente pour deux raisons. Premièrement, les dégâts signalés ne le sont que lorsque des enjeux humains sont présents et ajoutons à cela que l'occupation des sols évolue dans le temps. Secondement, plusieurs crues de même amplitude peuvent engendrer des dégâts différents. Par exemple, un affaissement de berge peut être provoqué par une succession de crues qui à force détruisent la berge. Cependant, même si c'est la dernière crue qui est responsable, ce n'est pas forcément la plus forte. Malgré ces limites, il s'avère donc préférable de relier les signalements de dégâts au seuil d'alerte du modèle autant que possible, plutôt que d'utiliser des seuils théoriques déterminés régionalement.

Dans la littérature, les résultats des travaux de Versini et al. (2010) et Naulin et al. (2013) sur les coupures de routes dans le Gard (projet ANR PREDIFLOOD) sont intéressants et présentent l'intérêt d'utiliser des relevés de terrains pour caler des seuils de susceptibilité, correspondant à une probabilité d'inondation pour plusieurs périodes de retour. À travers ces deux études, il apparaît clairement qu'il est crucial de considérer la vulnérabilité des lieux, pour définir correctement un seuil d'alerte.

Notre travail débute avec une approche similaire à Naulin et al. (2013) en reliant les relevés RTM à un seuil d'alerte. Cependant le manque d'exhaustivité de la base de données utilisée et l'absence de rapports de *non-crues*, nous a dirigé vers une approche multi-seuils. Celle-ci permet de mieux comparer l'ancienne et la nouvelle version de la méthode AIGA. Les améliorations effectuées lors des chapitres précédents sont mises en évidence tout en diminuant l'impact de l'absence de signalements dans la base de données.

2 Proposition d'une méthode pour évaluer des modèles à partir de données de dégâts

2.1 Une approche avec un seuil par bassin

Conscient des difficultés liées à l'emploi de données historiques, la base des services RTM (présentée au chapitre 2) est utilisée pour évaluer le nouveau modèle sur de véritables bassins non-jaugés. D'emblée, l'utilisation d'un seuil d'alerte unique (de 2 ans ou plus) apparaît inapproprié pour émettre une alerte en rapport avec les dégâts. Le fait qu'en moyenne, il y ait 1,5 signalements de dégâts par bassin RTM sur les dix années, la période de retour est de 6,5 ans en moyenne (10/1,5 ans).

Le seuil d'alerte est donc à déterminer afin d'estimer la pertinence du système d'anticipation au regard des relevés dégâts. Son évaluation se réalise, à près coup, à l'aide du critère CSI/POD/SR fondé sur les statistiques de contingences. Ce procédé est défini par la suite et se divise en 5 phases distinctes.

La démarche la plus simple et la plus intuitive consiste à caractériser les signalements des RTM en fonction des simulations de débits, sur chaque bassin. Ce procédé se déroule en cinq temps :

1. simulation des débits pour tous les événements pluvieux (par bassin) ;
2. identification des signalements de dégâts sur la même chronique (par bassin);
3. fixation d'un seuil lié au nombre de dégâts signalés (par bassin);
4. comptage des bonnes et des fausses alertes et de celles manquées (par bassin);
5. calcul des critères CSI/POD/SR (échantillon complet).

Pour illustrer et mieux comprendre la méthode d'évaluation (Figure 82-A), prenons un bassin versant virtuel avec 2 signalements de dégâts (rectangle vert) et 11 événements qui sont représentés par leur débit maximum modélisé (en noir). A ce stade, les simulations sont effectuées (1) ainsi que l'identification des signalements (2). Il faut ensuite fixer le seuil d'alerte en rapport avec le nombre de signalements de dégâts (3).

Dans un premier temps, nous avons choisi de fixer le seuil de manière à ce qu'il y ait une égalité entre le nombre d'alertes que le modèle émet et le nombre de signalements RTM pour chaque bassin. Sur la Figure 82-B, ce choix de seuil conduit à définir :

- une bonne alerte (AR), c'est-à-dire que le dépassement de ce seuil par le débit simulé coïncide avec le signalement d'un dégât (point vert) ;
- une fausse alerte (FA), c'est-à-dire que le dépassement de ce seuil par le débit simulé ne coïncide pas avec le signalement d'un dégât (point jaune) ;
- et enfin une alerte manquée (AM), c'est-à-dire qu'à la date du signalement de dégât n'a pas dépassé le seuil (point rouge).

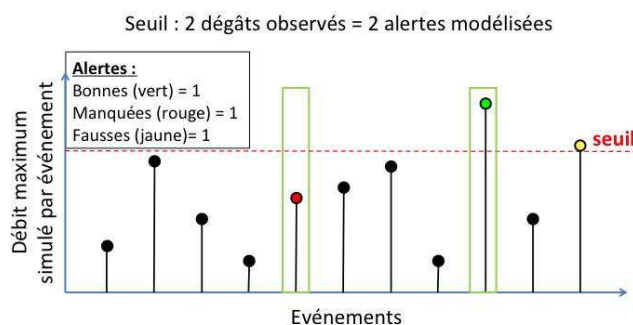
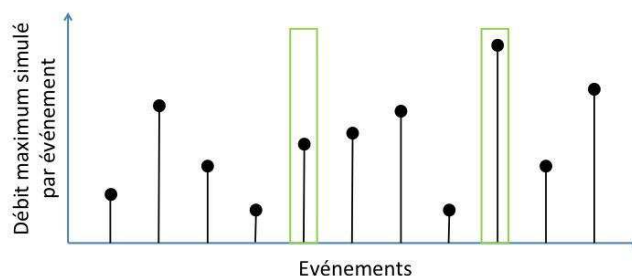


Figure 82 – A) Représentation des débits maximums des événements (noir) et des signalements de dégâts (rectangle vert) sur un bassin. B) Détermination du seuil (ligne en pointillés rouge) et identification des alertes (bonnes - vert -, fausses - jaunes - et manquées - rouge -) sur le même bassin avec les mêmes événements.

La dernière opération (4), consiste à calculer le trio de critères CSI/POD/SR (présentés sur le Tableau 13) à partir des statistiques de contingence. Cette opération n'est pas faite pour chaque bassin séparément mais sur l'ensemble des bassins versants pour des raisons de représentativité des valeurs numériques. Les bonnes, mauvaises et fausses alertes de chaque bassin sont additionnées afin d'obtenir une valeur pour chaque type d'alertes pour l'ensemble de l'échantillon. Ces alertes sont finalement utilisées pour obtenir un critère CSI, un POD et un SR pour l'ensemble des bassins versants.

Tableau 13 - Statistiques de contingences et critères POD/SR/CSI

Alerte calculée	AR	FA	$POD = \frac{\Sigma AR}{\Sigma AR + \Sigma AM}$ $SR = \frac{\Sigma AR}{\Sigma AR + \Sigma FA}$ $CSI = \frac{\Sigma AR}{\Sigma AR + \Sigma AM + \Sigma FA}$
Pas d'alerte calculée	AM	NC	
	Alerte observée	Pas d'alerte observée	Statistiques de contingence

Avec ΣAR : le nombre de bonnes alertes sur l'ensemble des bassins (alertes modélisées et observées) ;

ΣAM : le nombre d'alertes manquées sur l'ensemble des bassins (alertes observées et non modélisées) ;

ΣFA : le nombre de fausses alertes sur l'ensemble des bassins (alertes modélisées et non observées).

La sélection du seuil est donc propre à chaque bassin, fondée sur le nombre de dégâts qui y sont observés. Toutefois, le fait de fixer arbitrairement ce seuil, tel que le nombre d'alertes modélisées soit égal au nombre de dégâts signalés, peut parfois être très pénalisant. Ainsi, la Figure 83 présente deux cas conduisant avec cette méthode à la même évaluation du modèle : très mauvaise avec une fausse alerte, une alerte manquée et aucune alerte réussie.

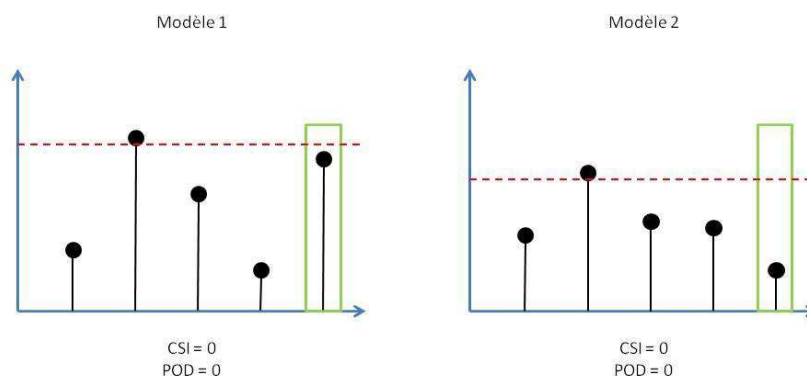


Figure 83 – Limitation du calcul du POD et du CSI pour différencier deux modèles où le signalement ne correspond pas à une bonne alerte. En noir, sont représentés des débits maximums, en vert, le signalement de dégât et en rouge, le seuil.

Pourtant, l'un des deux modèles évalués, le modèle 1 semble bien meilleur. En effet, pour l'événement où un dégât a été signalé (rectangle vert), même si le seuil d'alerte n'a pas été franchi, le modèle s'en est approché. Au contraire, le modèle 2 en était très éloigné.

Pour cette raison, il a été choisi de généraliser la méthode qui vient d'être présentée à une approche « multi-seuils » décrite au paragraphe suivant.

2.2 Généralisation de l'approche simple seuil par une approche multi-seuils

2.2.1 Principe

L'approche, détaillée ci-après, a été inspirée par le concept statistique de la courbe de ROC (Receiver Operating Characteristic) (Swets 1973) et, en particulier, de son utilisation faite en médecine (Delacour et al. 2005). Dans cette utilisation, il s'agit de déterminer l'efficacité de tests de dépistage, dont le résultat (positif ou négatif) est lié au dépassement ou non d'un seuil ; seuil qu'il faut également déterminer. Si ce seuil est trop haut, aucune personne infectée ne sera détectée. En revanche, s'il est trop bas, toutes les personnes testées seront déclarées infectées, même celles qui ne le sont pas.

L'idée est donc, entre ces deux extrêmes, tous les deux aussi peu informatifs l'un que l'autre, de faire varier le niveau du seuil au-delà duquel le test sera considéré comme positif. Ensuite, il faut regarder l'évolution concomitante des personnes désignées positives par le test (vrais positifs : POD - probability of detection-) à raison de celles désignées à tort (faux positifs : POFD –probability of false detection-), comme l'illustre la Figure 84.

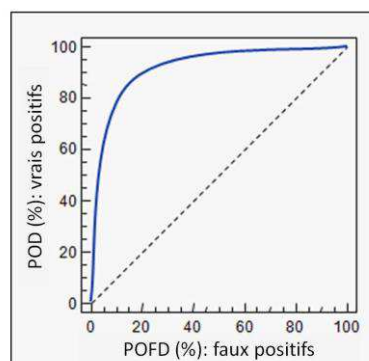


Figure 84 – Courbe de ROC tracée à partir des valeurs de POD en fonction du POFD pour plusieurs seuils.

Surtout exploitée en médecine et en pharmacie pour estimer l'efficacité d'un test de dépistage, la première apparition de la courbe de ROC en météorologie remonte à 1982 (Mason 1982; Manzato 2005) et son application aux crues éclair date de 1992 (Krzysztofowicz 1992). En termes d'interprétation, plus la courbe s'éloigne de la première bissectrice (pointillés), plus le modèle distingue le cas Vrai/Vrai du cas Faux/Faux. Un résultat obtenu par tirage aléatoire donnera ainsi des valeurs proches de la bissectrice. Numériquement, cela signifie que dans le cas de bonnes performances, l'aire située sous la courbe a des valeurs approchant 1 alors que dans un contexte aléatoire, celle-ci s'approche de 0.5.

Se basant sur le même principe, une courbe similaire à celle de ROC est déterminée à l'aide des POD et des SR calculés comme pour l'approche précédente (2.1) mais pour plusieurs seuils. Elle s'affranchit ainsi de la sélection d'un seuil, lors de l'analyse des performances des modèles hydrologiques. Privilégier le SR au POD se justifie par le fait qu'il est plus pertinent, pour un système d'anticipation des crues, de déterminer un seuil d'alerte en connaissant les taux de vraies et de fausses alertes. Quant aux non-alertes non-simulées, elles sont toujours élevées et ne fournissent pas de résultats intéressants pour un système opérationnel. La courbe POD/SR est donc construite à partir des résultats des différents modèles testés qui sont alors comparés simultanément en termes de différentes valeurs de POD et de SR.

La construction de cette courbe POD/SR est réalisée en deux étapes :

1. Généralisation du comptage d'alertes (POD et SR) pour différents seuils à tester par bassin en fonction des relevés de dégâts.

2. tracé de la courbe POD/SR

2.2.2 Comptage d'alertes (POD et SR) pour différents seuils

Afin de généraliser la méthode d'un seul seuil présentée au paragraphe 2.1, le seuil de détection va être petit à petit abaissé. Cela aura pour conséquence d'augmenter le nombre d'alertes simulées avec un nombre fixe de signalements de dégâts. Par voie de conséquence, le POD augmentera, alors que le SR diminuera. Il y aura donc de plus en plus de fausses alertes. Pour définir les différents seuils, la relation suivante est utilisée :

$$Nbr\ d'alertes\ modélisées = N * nbr\ de\ signalements \quad (25)$$

Avec N : un nombre entier ;

$N = 1$ correspondant au cas présenté au paragraphe 2.1

Afin d'illustrer la démarche et comprendre les conséquences sur les alertes du modèle, le même exemple que pour la méthode à un seul seuil est utilisé. Il s'agit d'un bassin versant virtuel avec 2 signalements et 11 événements avec pour chacun le débit maximum simulé. Sur la Figure 85-A, le premier seuil testé est déterminé de la même manière que dans l'approche avec un seul seuil. Le paramètre N a comme valeur 1. Le nombre d'alertes simulées correspond donc au nombre de signalements. Dans notre cas, il y a donc 2 signalements (rectangle vert) et 2 alertes simulées (une bonne (vert) et une fausse (jaune)). Ensuite sur la Figure 85-B, le deuxième seuil ($N=2$) implique que pour les 2 signalements, 4 alertes doivent être simulées par le modèle. Le seuil est donc abaissé pour augmenter le nombre de bonnes alertes mais en conséquence, le nombre de fausses augmente également. Il y a donc dans ce cas, toujours 1 bonne alerte et une manquée d'une part et, d'autre part 3 fausses alertes, soit 2 en plus qu'au seuil précédent. Le troisième seuil ($N=3$ sur la Figure 85-C) offre la possibilité de ne plus manquer d'alertes (2 bonnes alertes) avec un nombre de fausses alertes qui augmente à 4. Finalement pour $N=4$ (Figure 85-D), seul le nombre de fausses alertes croît jusqu'à la valeur de 6.

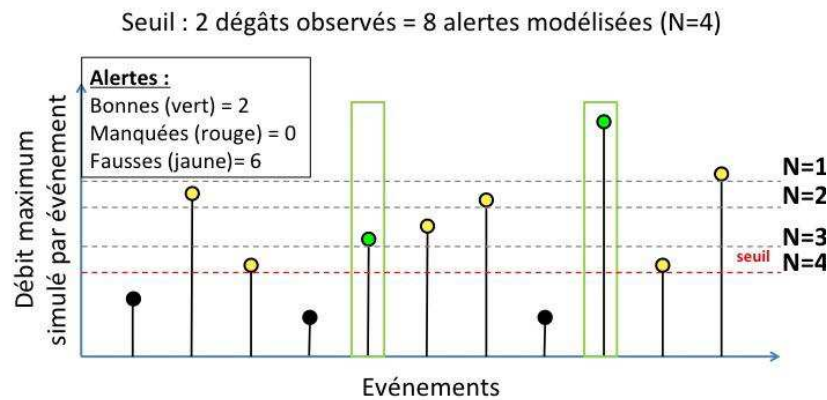
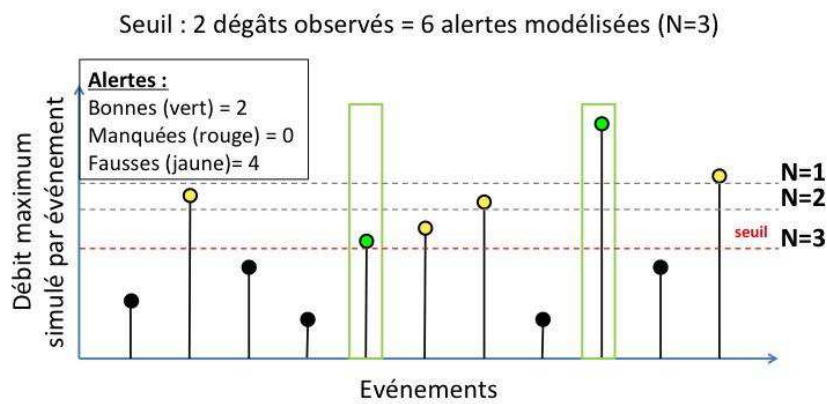
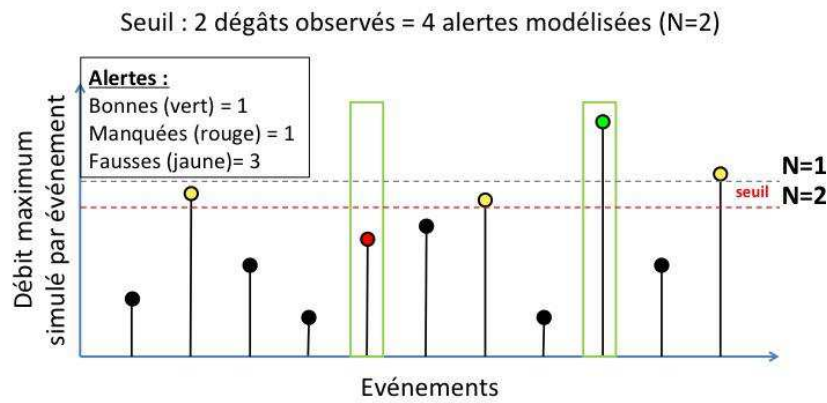
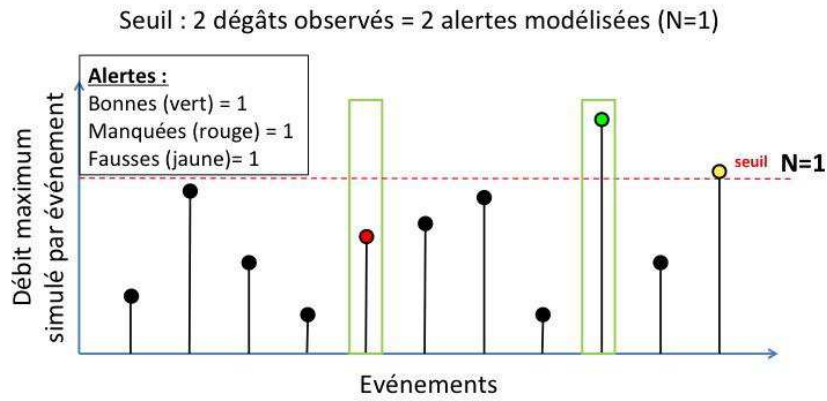


Figure 85 - Evolution du nombre d'alertes (bonnes, manquées et fausses) en fonction du seuil fixé. Les valeurs de N évoluent de 1 à 4.

2.2.3 Tracé de la courbe POD/SR

Pour chaque seuil testé, les bonnes alertes de l'ensemble des bassins versants sont additionnées afin d'obtenir un nombre total de bonnes alertes pour l'échantillon complet. Le même calcul est effectué pour les alertes manquées et les fausses alertes. Les critères de contingence POD et SR sont alors calculés pour chaque seuil testé (N fois). A partir de tous les POD et les SR, le graphe POD/SR (Figure 86) est alors tracé et le modèle peut ainsi être évalué sur plusieurs seuils à la fois. Rappelons que pour obtenir une valeur de SR égale à 1 (aucune fausse alerte), il aurait fallu que tous les signalements correspondent aux plus forts débits pour tous les bassins. Inversement, pour obtenir un POD égal à un, il faudra réussir toutes les alertes et donc avoir un seuil très faible dans certains cas.

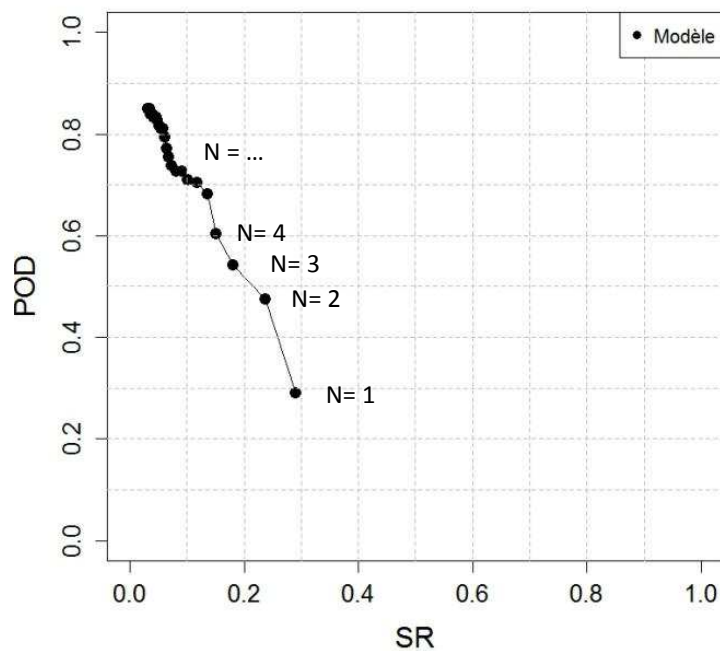


Figure 86 - Performances d'un modèle estimé par le POD en fonction du SR. Les différents points correspondent aux critères de contingences pour les différents seuils (N valeurs).

Pour pouvoir comparer deux modèles hydrologiques entre eux, les **courbes POD/SR** de chacun sont tracées sur le même graphique. Il sera alors possible d'analyser les résultats **comparativement** et de distinguer le meilleur modèle, même si les performances sont proches (Modèle 1 et 2 sur la Figure 83). Sur la Figure 87, la courbe la plus haute et la plus à droite correspond à des valeurs de POD et SR plus élevées et donc à un meilleur modèle. Dans l'absolu, les meilleurs résultats sont représentés par les courbes s'approchant de la valeur (1,1), dans le coin supérieur droit. Le cas idéal correspondrait à un POD toujours égal à 1, pour tous les seuils, avec un SR variant entre 0 et 1. Pour distinguer deux résultats proches, l'aire sous la courbe peut être calculée, sachant que sa valeur maximale s'approcherait de 1.

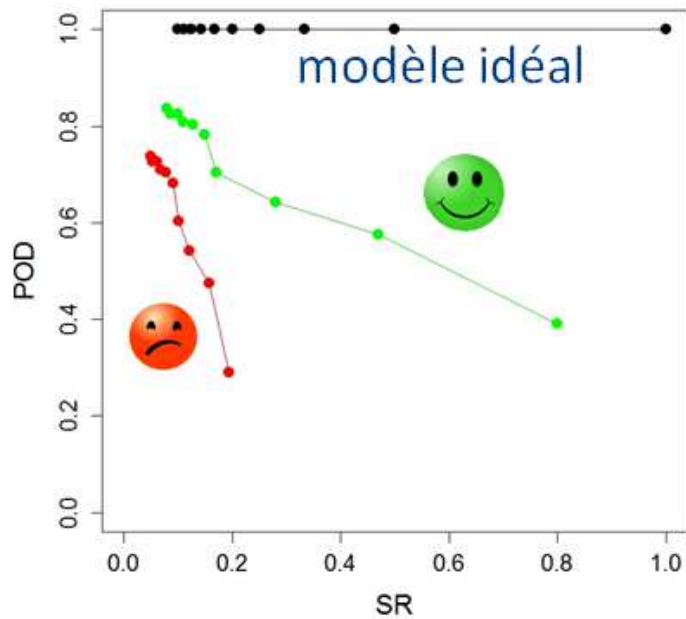


Figure 87 – Comparaison des courbes POD/SR. En noir est représenté le modèle idéal, en vert un meilleur modèle et en rouge un moins bon.

Cette approche multi-seuils est également intéressante pour les services de prévision de crues. Elle permet de fixer un seuil en fonction du taux de détection (POD) qu'ils souhaitent obtenir et/ou du taux de fausses alertes (SR) qu'ils sont prêts à accepter. Cependant, cette fixation du seuil n'est pas utilisée pour les résultats de cette thèse et nous préférons une analyse des performances des modèles en considérant tous les seuils simultanément.

3 Application sur les bassins RTM

3.1 Mise-en-œuvre

Afin de valoriser les travaux de cette thèse, la nouvelle méthode AIGA est comparée à l'ancienne ainsi qu'à une simple alerte sur la pluie, grâce à l'approche multi-seuils (courbes POD/SR), sur l'échantillon des bassins RTM.

Pour rappel, cet échantillon des RTM est composé de 123 bassins non-jaugés, qui se répartissent sur trois sous-régions HER :

- Alpes Internes avec 60 bassins ;
- La Méditerranée avec 20 bassins ;
- et les Préalpes du Sud avec 40 bassins.

A partir de la base de données de dégâts, 179 signalements sont exploités sur l'ensemble de l'échantillon, représentant 1,45 signalement par bassin, soit le plus souvent 1 ou 2 par bassin. De plus, environ 26000 événements sont simulés par chaque modèle testé, sur ce jeu de données. Pour la détermination des événements et plus d'informations sur les bassins RTM, il faut se référer au chapitre 2.

Sur cet échantillon, trois modèles sont en lice :

La méthode AIGA originelle

Pour rappel, la méthode AIGA originelle s'appuie sur deux modèles hydrologiques (Chapitre 3). Le premier qui évolue au pas de temps journalier en continu permet d'obtenir une estimation de l'humidité des sols. Il est composé uniquement d'un réservoir de production, issu de GR3J, qui tient compte de la pluie journalière COMEPHORE et de l'ETP fournie par la formule d'Oudin (Oudin et al. 2005). Le second modèle est quant à lui utilisé de manière événementielle au pas de temps horaire (GRD). Il permet de simuler les débits pendant les épisodes de crues. Cependant, son fonctionnement implique de connaître les taux de remplissage de ces deux réservoirs : celui de production est estimé à partir du modèle journalier et celui de routage est rempli à hauteur de 30%, ce qui correspond à un débit initial nul. Les paramètres sont identiques pour chaque bassin RTM et ont les valeurs d'origine.

La nouvelle méthode AIGA

La nouvelle version de la méthode AIGA est issue d'une part, de tests sur différentes variantes possibles entre le modèle continu journalier (GR4J), le modèle événementiel GRD et le module de fonte de neige journalier (chapitre 4) et d'autre part sur la recherche de la meilleure régionalisation possible sur les bassins HYDRO (Chapitre 5). Il en résulte une méthode constituée d'un modèle continu journalier GR4J, qui fournit une estimation de l'humidité des sols, et d'un débit initial au modèle événementiel horaire (GRD). Ce dernier n'est alimenté que par les précipitations liquides, la part neigeuse en ayant été retirée. Pour la régionalisation, les paramètres utilisés pour les bassins RTM sont issus des trois bassins HYDRO les plus proches au sein de la même sous-région HER (chapitre 5).

Simple alerte sur la pluie

En plus des deux modèles hydrologiques, un système d'alerte uniquement fondé sur les précipitations est testé. Il s'agit d'un système s'approchant de celui des APIC⁸ utilisées par Météo-France (chapitre 1). Le principe consiste à déclencher une alerte quand le cumul de pluie est supérieur à un seuil. Dans notre cas, le cumul utilisé correspond à la pluie de bassin obtenue en 24h, mesurée par la lame d'eau radar COMEPHORE. A l'instar des modèles hydrologiques, le seuil est fixé de telle sorte que le nombre de fois que le cumul 24h est supérieur au seuil correspond au nombre de signalements de dégâts. Ce seuil est ensuite abaissé suivant la méthode décrite au paragraphe 2.2.

Finalement, il reste à déterminer le nombre de seuils qui seront utilisés pour la comparaison des trois systèmes d'alerte, la valeur N de l'équation 25. Pour chacun de nos 123 bassins de l'échantillon RTM, il a été choisi de baisser le seuil **10 fois**, valeurs de N variant ainsi entre 1 et 10. Il y a donc pour chacun des bassins **10 seuils différents** ainsi que 10 valeurs associées de bonnes, manquées et fausses alertes. Le choix de ne pas abaisser le seuil davantage s'explique par le fait que plus le seuil est bas, plus les variations deviennent faibles entre les seuils, sans bouleverser l'interprétation des résultats.

Toutes les informations de nos tests sont reprises synthétiquement dans le tableau suivant :

Tableau 14 - Synthèse de l'application sur les bassins RTM

Nombre de bassins versants	Nombre de modèles testés	Nombre de seuils utilisés
123	3	10

3.2 Résultats généraux

Comme il a été précisé à plusieurs reprises, les résultats de la nouvelle méthode d'évaluation seront analysés d'une manière comparative entre les deux modèles hydrologiques (nouvelle et ancienne version d'AIGA) et l'alerte sur la pluie. Ils sont présentés sur la Figure 88.

Pour les résultats, une représentation exacte du graphique obligerait de positionner en abscisse les valeurs comprises entre 0 et 1, pour le SR, et de 0 à 1, pour le POD. Les différences entre les modèles demeurant relativement faibles, les bornes du SR ont été fixées entre 0 et 0.6 afin d'obtenir un agrandissement sur les performances et ainsi de faciliter l'interprétation des courbes POD/SR. Cet agrandissement pouvant influencer l'interprétation des courbes proches, les observations doivent rester prudentes.

⁸ APIC consiste à émettre un avertissement quand un cumul de pluie est dépassé sur un nombre fixé de pixels d'un kilomètre carré au sein d'une même commune sur un pas de temps, présenté au Chapitre 1.

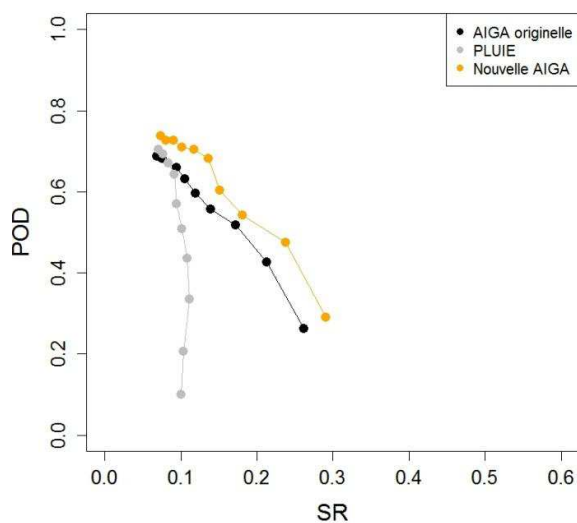


Figure 88 - Comparaison des performances des modèles horaires de l'ancienne méthode AIGA (noir) et de la nouvelle (orange) et d'une alerte sur la pluie (gris), sur les 123 bassins RTM.

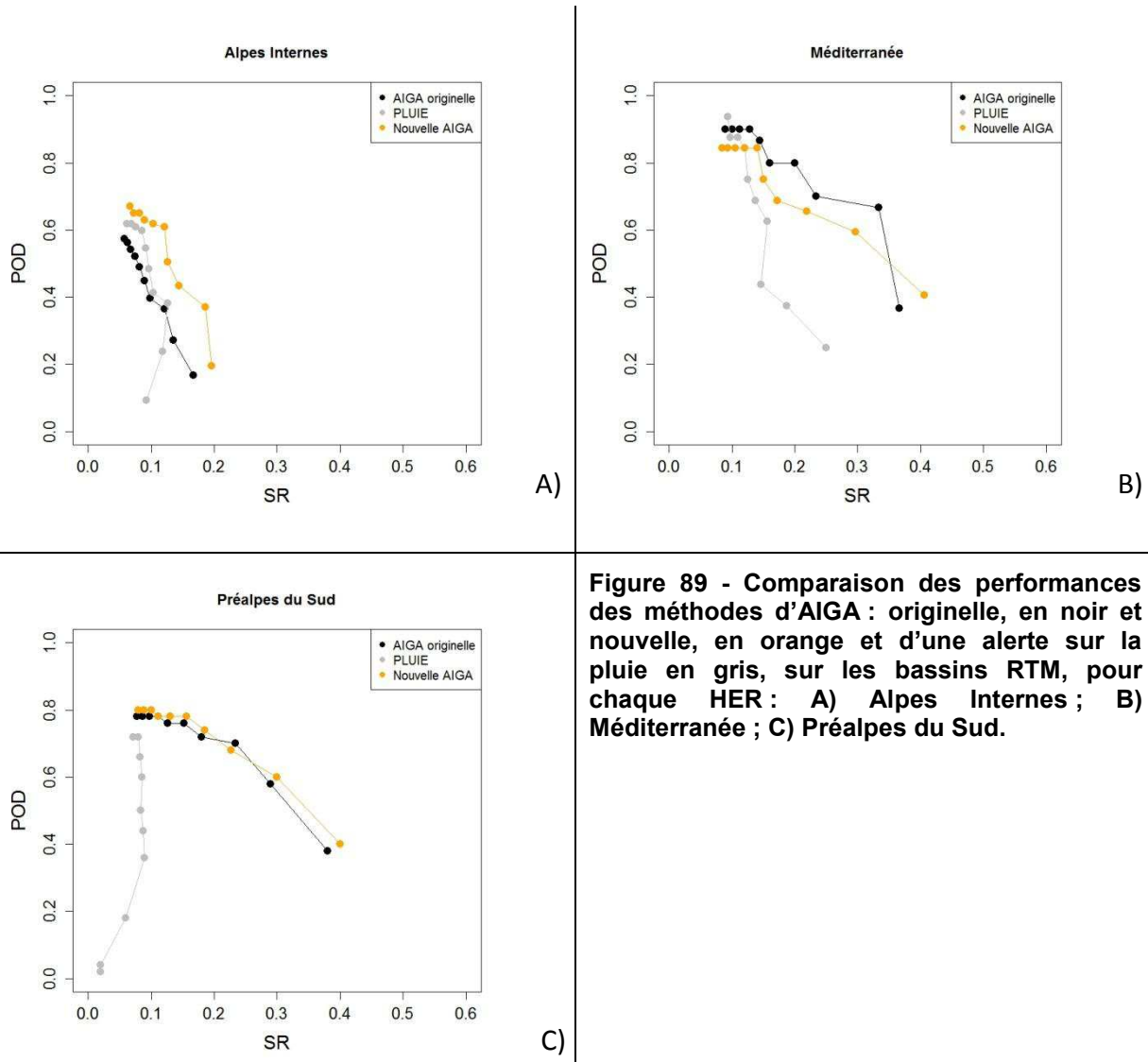
En observant la Figure 88, il s'avère que les deux modèles hydrologiques (courbes orange et noir) surpassent la simple alerte sur la pluie (courbe grise) et ce quel que soit le seuil. De faibles gains sont obtenus par la nouvelle version de la méthode AIGA (la courbe orange la plus à droite) par rapport à la version originelle (courbe noire au centre) sur les véritables bassins non-jaugés (RTM).

Cette première analyse a confirmé les progrès enregistrés par la nouvelle version de la méthode AIGA par rapport à l'ancienne, mis en évidence sur les bassins HYDRO au chapitre 5 lors de la régionalisation. A l'image des travaux portant sur les bassins HYDRO, certaines vérifications ont été effectuées avant de poursuivre l'analyse des résultats. Tout d'abord, nous avons vérifié que la nouvelle méthode AIGA, basée sur la variante 4, était meilleure sur les bassins RTM que les autres variantes 1, 2 et 3, élaborées lors du chapitre 4. Ensuite, pour la variante 4, les autres régionalisations (testées au chapitre 5) ont été appliquées sur les RTM. Ces deux résultats sont disponibles en annexe D. Il en ressort que la variante 4 régionalisée avec la méthode des 3 voisins au sein de la sous-région HER donne comme pour les bassins HYDRO les meilleures performances. Afin de peaufiner la comparaison entre la méthode originelle et la nouvelle, les résultats sont analysés au sein des trois sous-régions HER, regroupant des bassins RTM (3.2).

Notons néanmoins que les résultats obtenus peuvent, quelle que soit la méthode considérée (nouvelle ou ancienne AIGA), apparaître faibles. En effet, la Figure 88 indique par exemple pour la nouvelle méthode (courbe orange) que si nous fixons les seuils d'alerte de façon à détecter 60% des dégâts ($POD = 0.6$), alors en contre partie, le taux de succès des alertes n'est que de 15% ($SR=0.15$). En d'autres termes, en cas d'alerte, il y a 85% de chance qu'il n'y ait pas un dégât associé. Nous reviendrons sur ce point à la section 4.

3.3 Résultats sur les HER

Les résultats sur l'ensemble de l'échantillon, présentés au précédent paragraphe, cachent des disparités parmi les performances entre les sous-régions. Pour palier à ce problème, la Figure 89 présente par HER les performances des deux versions d'AIGA et de l'alerte sur la pluie.



Dans les Alpes Internes (Figure 89-A), les bénéfices générés par le débit initial et la neige sont perceptibles, les résultats de la nouvelle version d'AIGA sont supérieurs par rapport à ceux de la version originelle et de l'alerte sur la pluie. C'est cependant dans cette sous-région que les performances sont les plus faibles. Notons que la différence entre la méthode originelle d'AIGA et la simple alerte sur la pluie est très faible.

Par contre, en ce qui concerne les deux autres HER (Méditerranée et Préalpes du Sud), les résultats sont plus proches entre les deux versions d'AIGA, et supérieurs à ceux des Alpes Internes. Les améliorations apportées à la nouvelle méthode AIGA ont une incidence très limitée : les courbes sont similaires sur les Préalpes du Sud. Sur la Méditerranée, la nouvelle version subit une dégradation, en opposition aux conclusions obtenues quant à

l'étude portant sur les bassins HYDRO où la nouvelle version d'AIGA régionalisée était meilleure en termes de Nash-Pseudo-Continu par rapport à l'originelle. Ces différences de comportements entre les sous-régions soulignent l'influence des caractéristiques géomorphologiques et climatiques des bassins RTM sur les performances car les sous-régions ont des bassins fort différents (Chapitre 2). Ce point sera éclairci dans la partie traitant des limites de la modélisation (section 4.2)

Avec ces premiers résultats, la non-linéarité entre les pluies fortes et les phénomènes de crues est mise en évidence. L'utilisation de modèles hydrologiques est à privilégier par rapport à une simple alerte basée sur la pluie, même sur les petits bassins versants non-jaugés et ce quelle que soit la région.

Le graphique POD/SR permet d'évaluer par comparaison des modèles hydrologiques (ou alertes sur la pluie) en sites non-jaugés sans avoir besoin de données débitmétriques. Sa mise en place s'établit sur des statistiques de contingence, prenant en compte les taux de détection (POD) et de succès (SR), simultanément sur plusieurs seuils d'alerte.

Les principaux résultats soulignent que :

- la nouvelle version d'AIGA reste meilleure que l'ancienne sur les bassins RTM, confirmant les conclusions obtenues sur les bassins HYDRO (chapitre 5). Cependant, les gains se sont affaiblis ;
- l'analyse par sous-région démontre que c'est dans les Alpes Internes que les améliorations sont les plus visibles bien que les performances soient les plus faibles par rapport aux deux autres HER ;
- les systèmes d'alerte fondés uniquement sur un dépassement de seuil par la pluie sont à proscrire car le taux de succès (SR), quel que soit le seuil considéré, est largement inférieur aux modèles hydrologiques.

4 Discussion

Les résultats précédents ont montré des améliorations de la nouvelle version de la méthode AIGA par rapport à l'ancienne. Ils ont également souligné un net gain de la modélisation hydrologique par rapport à de simples alertes fondées sur des dépassements de seuils de pluie. Cependant, les performances restent assez modestes, avec notamment des taux de succès (SR) très faibles. Nous discutons dans les deux paragraphes suivants des raisons qui peuvent apparemment expliquer ces faibles résultats :

- limites liées à notre méthode d'évaluation et aux données de dégâts
- limites liées à notre modélisation et aux données de pluie

4.1 Limites liées à notre méthode d'évaluation et aux données de dégâts

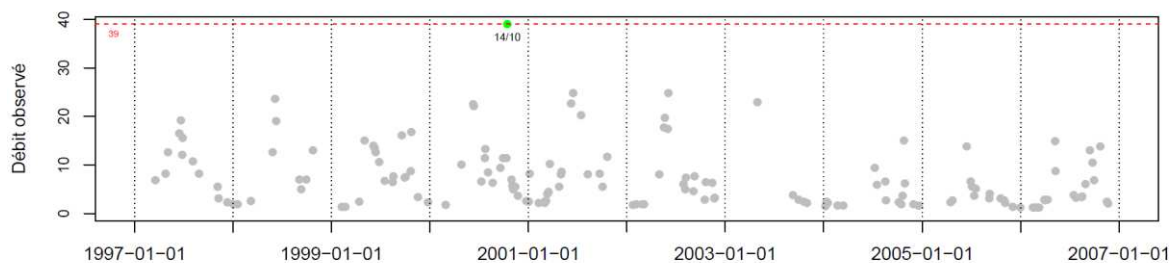
La méthode d'évaluation POD/SR développée dans ce chapitre s'appuie sur les relevés de dégâts présents dans la base de données des RTM. Elle caractérise la plus ou moins bonne concomitance entre les alertes émises et les dégâts réellement observés. De fait, cette méthode s'appuie sur les hypothèses suivantes :

- l'existence d'un lien entre le débit et les dégâts subis : deux débits similaires engendrent les mêmes dégâts et sont donc répertoriés dans la base de données. Cette hypothèse forte implique qu'il n'y a pas d'effets de « mémoire » ou d'accumulation et que tous les événements conduisant à des dégâts sont indépendants. De plus, les dégâts sont réellement engendrés par des débits de crues et non par des laves torrentielles qui engendrent des dégâts plus importants à partir de processus différents ;
- la stationnarité : sur la période de dix années, nous supposons qu'il n'y ait pas eu de changement au sein des bassins versants, comme l'occupation des sols, pouvant modifier la nature des dégâts occasionnés durant les crues. Le débit déclenchant le dégât ne varie pas dans le temps ;
- l'exhaustivité de la base de données : sur les dix années, nous supposons que les relevés sont obtenus sur l'ensemble des bassins pour tous les événements de crues d'une manière homogène. Par exemple, chaque agent de terrain a la même sensibilité par rapport à ce qu'est un dégât.

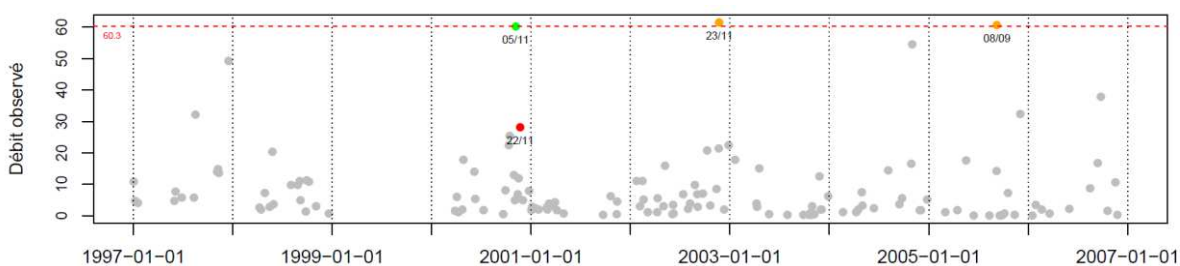
Afin de vérifier les trois hypothèses ci-dessus, quatre bassins communs aux deux échantillons (HYDRO et RTM) sont étudiés, c'est-à-dire que sont disponibles à la fois des débits observés ainsi que des relevés de dégâts. Ce sont les seuls bassins communs entre nos deux échantillons. La comparaison des **débits observés** et des **signalements RTM** permet de confirmer ou d'infirmer les hypothèses de travail. Le fait, dans les exemples suivants, de présenter la concomitance entre les dégâts et les débits observés et non modélisés, nous permet d'exclure temporairement les problèmes pouvant être liés à la modélisation elle-même. Si sur un des quatre bassins, une des hypothèses n'est pas vérifiée, il est possible qu'il en soit de même sur les autres bassins RTM, mais cela ne pourra être déterminé formellement.

Sur la Figure 90, le cas de la Durance est idéal : le débit observé le plus fort coïncide avec l'unique signalement des RTM, le seuil le plus élevé donne donc le meilleur résultat et à chaque fois que ce dernier est abaissé, la performance régresse. En ce qui concerne la

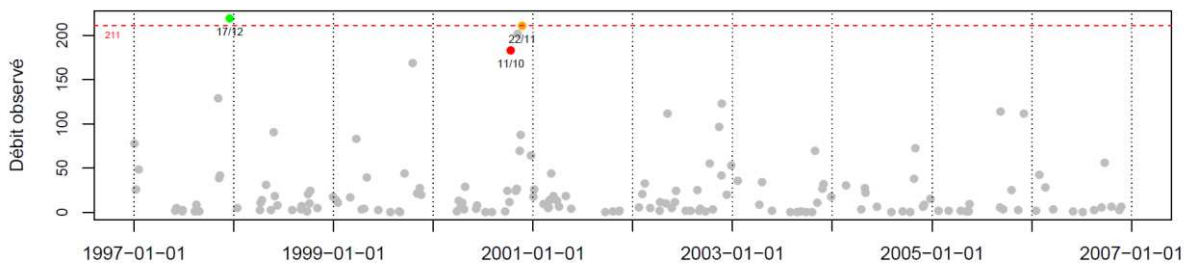
Mourachonne qui comporte deux signalements (juste en-dessous), un signalement de dégât correspond bien au plus fort débit observé. Cependant, deux débits observés, d'intensité similaire (en orange), n'ont pas provoqué de signalements, contrairement au signalement du 22/11, qui est pourtant associé à un débit observé plus faible. Sur le Loup et l'Issole, des observations similaires ont été faites.



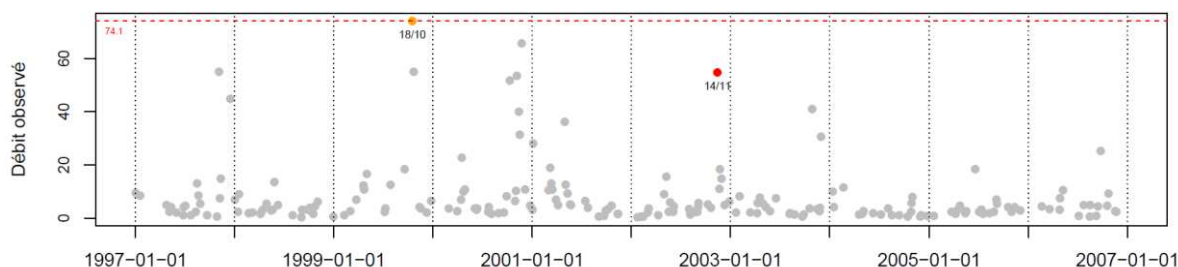
La Durance à Val-des-prés (207 km²)



La Mourachonne à Pégomas (44.7 km²)



Le Loup à Villeneuve-Loubet (279 km²)



L'Issole à Saint-André-Les-Alpes (137 km²)

Figure 90 – Débits maximums observés pendant chaque événement, sur 10 années, pour les quatre bassins communs aux RTM et HYDRO, avec en pointillés rouges, le seuil le plus élevé (nombre de signalements = nombre de dépassements), en gris, tous les maxima observés, en vert, le signalement RTM coïncidant avec un débit observé supérieur au seuil d'alerte, en orange, les débits observés supérieurs au seuil et ne correspondant pas à des signalements, et représentés par les points rouges, les signalements avec des débits observés sous le seuil.

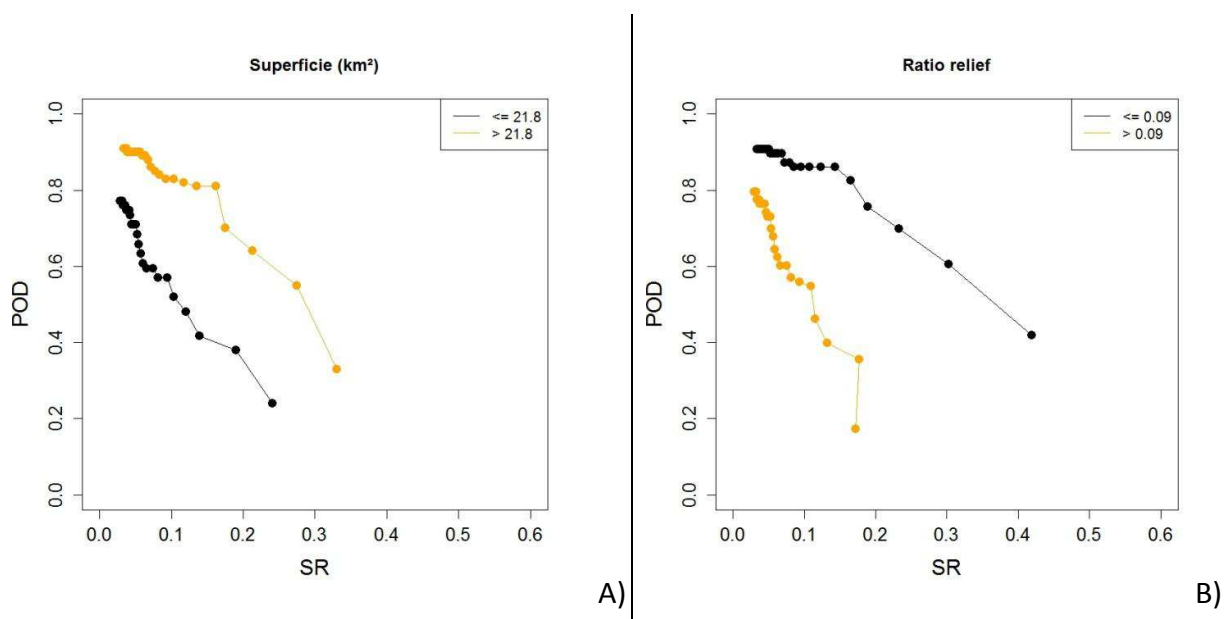
Grâce à ces quatre exemples, il a été montré que nos hypothèses en rapport avec la méthode d'évaluation ne sont pas toujours vérifiées. Toutefois, il est impossible de déterminer laquelle des trois hypothèses est fausse.

Cependant, malgré le problème soulevé, nous pensons que la méthode proposée n'en garde pas moins tout son intérêt. En effet, celle-ci consiste à comparer des modèles d'alerte entre eux, en l'absence de mesures débitométriques, ce qui est très souvent le cas sur les bassins soumis aux crues éclair. Ainsi, les performances doivent être appréciées d'une manière relative, d'un modèle à l'autre, et non dans l'absolu.

4.2 Limites liées à notre modélisation et aux données de précipitation

Après avoir signalé les problèmes en relation avec la méthode d'évaluation et les bases de données de dégâts, nous nous intéressons aux limites qui sont en lien avec la modélisation et les données de précipitations. Pour caractériser les défaillances, seules les performances de la nouvelle méthode AIGA sont analysées.

Sur la Figure 91, les résultats sont représentés d'une part en fonction de deux caractéristiques physiques (superficie et pente -ratio relief-) et d'autre part en fonction de la saison des événements. Pour les deux descripteurs physiques, l'échantillon est divisé en deux parties, l'une avec les 62 bassins RTM dont les valeurs sont les plus faibles et l'autre, avec les 61 autres aux valeurs les plus fortes. Il est ainsi possible de déterminer sur quel type de bassins le modèle fonctionne le mieux. Pour la superficie (Figure 91-A), les plus grands bassins, mesurant plus de 21,8 km², sont représentés en orange et les plus petits en noir. Pour les pentes (Figure 91-B), les bassins aux plus faibles pentes (<0.09) sont dessinés en noir et ceux aux plus fortes pentes en orange. L'analyse a également été faite avec les autres descripteurs présentés au chapitre 2, et elle a été placée en annexe E. Pour les saisons (Figure 91-C), les résultats de la nouvelle version d'AIGA sont représentés en noir pour l'été et en orange pour l'automne.



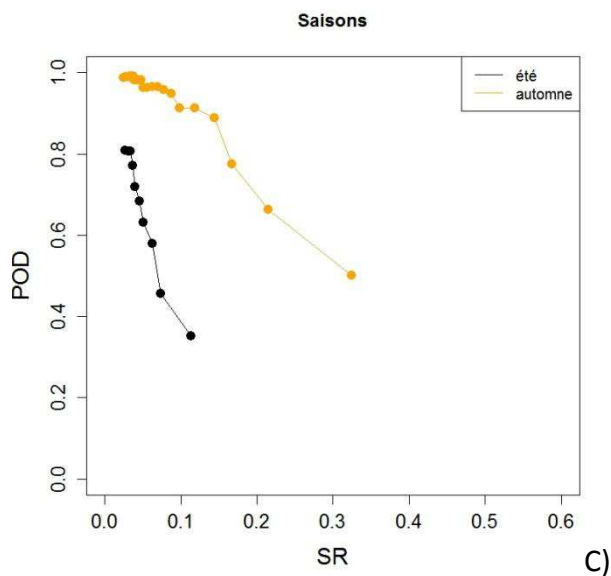


Figure 91 – Mise en évidence des problèmes de la nouvelle méthode AIGA en lien avec les caractéristiques des bassins versants et les données de pluie à travers les saisons. A) Superficie : comparaison des performances entre les grands bassins (orange) et les petits (noir). B) Ratio relief (pente) : comparaison des performances des bassins pentus (orange) et « plats » (noir). C) Saisons : comparaison des performances entre l'automne (orange) et l'été (noir).

Les résultats montrent que ce sont les plus petits bassins qui enregistrent les moins bonnes performances avec des valeurs de SR et de POD plus faibles, pour les dix seuils, avec une différence de l'ordre de 0,1 point par rapport aux grands bassins. Ces petits bassins sont souvent caractérisés par de fortes pentes car ils sont localisés principalement en montagne (Alpes Internes). De ce fait, les bassins très pentus sont également ceux qui présentent les plus faibles SR avec une valeur de 0,2 au maximum. Par contre pour les bassins plus plats, les POD et les SR ont des valeurs plus acceptables avec un maximum de 0,4 pour chacun d'eux. Finalement, nous constatons qu'en automne, les performances sont meilleures qu'en été où les valeurs de SR sont très faibles (<0.15). Le modèle est donc moins adapté aux petits bassins à forte pente subissant des événements en été.

Pour expliquer ces différences entre les bassins versants, nous pouvons **avancer trois hypothèses** qui vous sont présentées ci-dessous.

Hypothèse 1 :

Les moins bonnes performances sont observées sur les bassins pour lesquels la méconnaissance des précipitations est la plus élevée. Sur la Figure 91-C, c'est en été que la précision des précipitations a l'air de poser problème. A cette saison, ce sont souvent des orages très localisés qui touchent de petits bassins versants, principalement situés en montagne (Alpes Internes). Dans notre base de données, cela représente 57 signalements RTM sur 179 (32%). Cependant, ces orages posent des problèmes quant à l'estimation de leur cumul, souvent sous-estimé, car, soit ils se produisent entre les pluviomètres du réseau au sol, peu dense en montagne (Gottardi 2009), soit ils sont très intenses provoquant des extinctions du signal radar (par exemple : Diss et al. 2009; Berne et Krajewski 2013). Pour illustrer ce propos, l'événement pluvieux du 27 juillet 2003 est présenté sur la Figure 92.

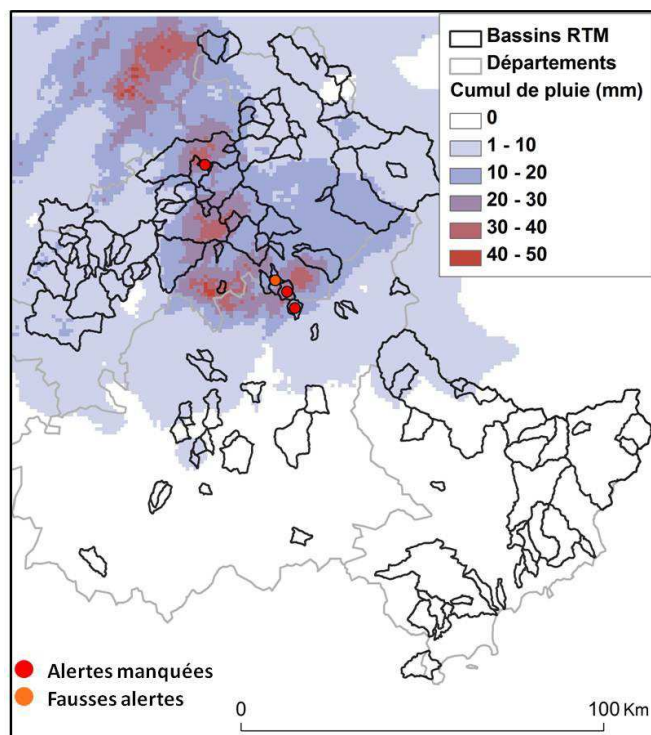


Figure 92 – Cumul de pluie lors de l'événement du 27 juillet 2003 sur les départements des Alpes-de-Haute-Provence, des Hautes-Alpes et des Alpes-Maritimes. Comparaison des alertes de la nouvelle méthode AIGA par rapport aux trois signalements des RTM avec un seuil de déclenchement très faible (N=27).

Cet événement se caractérise par des cumuls, estimés par la lame d'eau COMEPHORE, de maximum 50 mm sur 2 jours. Si nous portons l'analyse sur les 3 bassins relevés par les RTM (points rouges), le cumul des précipitations est compris entre 15 et 25 mm, ce qui est faible pour provoquer une crue éclair. Pourtant les services des RTM y ont relevés des dégâts. En utilisant un seuil très faible, correspondant à 27 fois le nombre de signalements de chaque bassin (N=27), aucune alerte n'est émise à l'endroit où il y a des signalements, qui sont donc manqués (en rouge), et une fausse alerte (modélisée et ne correspondant pas à un relevé RTM) apparaît. Ce problème d'alertes modélisées est vraisemblablement lié à une sous-estimation du cumul de pluie.

La qualité de la lame d'eau en montagne a donc un rôle crucial vis-à-vis des performances des modèles hydrologiques. Elle peut expliquer, en partie, les mauvais résultats obtenus sur des bassins de montagne n'ayant que peu de données pluviométriques à leur disposition (problème de la mesure radar ou pas de pluviomètres pour le recalage des pluies radars). Toutefois, il faut s'attendre à des progrès conséquents sur la connaissance des précipitations sur les bassins versants, grâce à l'utilisation des radars en bande X installés récemment dans le cadre du projet RHYTMME.

Hypothèse 2 :

La deuxième piste d'explication concerne certaines caractéristiques des bassins versants. Sur la Figure 91-A&B, l'analyse des performances en fonction de la pente (ratio de relief) montre des différences entre les grands bassins plus plats et les petits bassins pentus. La présence d'autres sortes de phénomènes, en plus des crues éclair, peut expliquer ces résultats car les petits bassins de montagne sont également sujets aux crues et aux laves torrentielles où les sédiments peuvent représenter plus de 50% du volume d'eau ruisselé (chapitre 1, Bertrand et al. 2013). Pour illustrer ce constat, la Figure 93 présente une lave torrentielle qui s'est produite en juin 2009 sur le Réal (2km²), affluent du Tuébi dans les Alpes-Maritimes. Dans ce cas, il ne s'agit plus d'une crue éclair et les processus qui se déroulent sur le bassin ne sont plus identiques.



Figure 93 – Evénement du 29 juin 2009 sur le ruisseau du Réal (2 km²) dans les Alpes-Maritimes (06).

Ces phénomènes pénalisent nos modèles car ils ne sont pas pris en compte et il faudrait ajouter un module complémentaire pour prendre en compte les laves torrentielles, en particulier au pas de temps horaire. Divers types de modules sont indiqués à la fin du prochain chapitre : seuils de pluie, modèles de stabilité... Il s'agit d'une piste d'amélioration à ne pas négliger dans des travaux futurs.

Hypothèse 3 :

Finalement, la différence de taille entre les bassins HYDRO, utilisés lors du développement de la nouvelle méthode AIGA et celles des bassins RTM, où le modèle est évalué, semble influencer le fonctionnement du modèle (Figure 91-A). La régionalisation de la nouvelle méthode AIGA a été obtenue à partir de bassins versants jaugés. La technique par voisinage au sein de la même région HER a été choisie et correspond à des transferts de paramètres, à partir de bassins donneurs vers un bassin cible, sans aucune transformation en lien avec la superficie des bassins. Cependant, les bassins HYDRO ont des caractéristiques physiques moyennées, par rapport aux petits bassins RTM où celles-ci sont plus spécifiques et plus variables. Les processus hydrologiques y sont donc différents (cinétique des crues). Dans cette situation, le transfert des paramètres entre bassins est délicat et la technique par voisinage peut dégrader fortement les résultats.

Certains paramètres du modèle hydrologique, obtenus sur les bassins HYDRO, ne sont sans doute pas adaptés aux bassins RTM plus petits. Par exemple les paramètres B_{hor} du modèle événementiel de la nouvelle méthode AIGA sont plus grands sur les bassins HYDRO que s'ils avaient été calés directement sur les bassins RTM. Par cette technique, d'éventuels problèmes de paramétrisation en lien avec la descente d'échelle seront corrigés. Une autre solution aurait été d'imposer une relation avec la surface (ou une condition sur la surface pour le voisinage) pour transférer les paramètres entre les bassins HYDRO et les RTM.

Pour conclure cette partie 4.2, nous pouvons dire qu'en plus des biais liés à la technique d'évaluation (4.1), des limites liées à la modélisation sont perceptibles. Les trois problèmes, relevés ci-dessus, sont donc probablement présents, sans qu'il soit possible de dire quel est le principal. Toutefois au chapitre 7, les biais relatifs à la paramétrisation du modèle, obtenue sur les bassins HYDRO, sont explorés. Des solutions quant à la descente d'échelle sont recherchées, par exemple en calant certains paramètres du modèle GRD directement sur les petits bassins versants non-jaugés afin de prendre en compte la cinétique des crues de ce type de bassin.

La nouvelle méthode d'évaluation (courbes POD/SR) compare directement des modèles hydrologiques entre eux ou des bassins aux caractéristiques fort différentes. Le tout est réalisé en l'absence de données débitmétriques. Il y a bien des problèmes liés à l'utilisation de données de dégâts (4.1) mais les analyses restent valables car les éléments comparés entre eux sont impactés de la même manière. Cependant, en réalisant l'évaluation en POD/SR, il s'est avéré que sur les bassins RTM des progrès étaient encore possibles. La double évaluation, une première fois sur les bassins HYDRO et ensuite sur les RTM, est donc très importante. Cela a permis d'analyser les limites de notre méthode d'évaluation et de la modélisation testée, en soulevant ces problèmes liés :

- à l'évaluation : il a été démontré par l'utilisation de débits observés que les plus forts débits n'entraînent pas forcément des dégâts. Trois raisons possibles : le lien débit-dégât, la stationnarité des bassins versants et le manque d'exhaustivité de la base de données ;
- aux données et à la modélisation : la méconnaissance de la pluie en montagne, lors d'orages très localisés en été, les phénomènes de laves torrentielles et non de crues éclair sur les bassins pentus, et finalement la paramétrisation, issue de plus grands bassins (HYDRO), ne reproduisent pas correctement la cinétique des crues éclair.

5 Conclusion

Ce chapitre a permis de répondre au second objectif de la thèse en mettant en évidence la nécessité d'une double évaluation à l'échelle des bassins sujets aux crues éclair. Une technique d'évaluation, à l'aide de signalements de dégâts, a pu être développée, permettant de comparer des modèles entre eux et cela en l'absence de tout débit observé, ce qui est d'un réel intérêt.

Les résultats obtenus confirment les décisions prises lors des phases antérieures relatives au développement de la nouvelle méthode AIGA sur les bassins HYDRO. Ces dernières participent à la progression des résultats sur les bassins RTM, par rapport à la version originelle, même si tous ne sont pas bons. En effet, les progrès ont été significatifs sur les bassins des Alpes Internes mais les résultats y restent les plus faibles comparés aux autres régions ce qui sous-entend que le couplage de modèles est perfectible. Certains problèmes ont été mis en évidence et sont soit inhérents à l'utilisation de bases de données soit aux modèles. Pour ce dernier, il semble que la paramétrisation, obtenue sur les grands bassins versants, n'est pas optimale sur les petits bassins versants à forte pente. De plus dans certains cas, il s'agit vraisemblablement de phénomènes différents des crues éclair comme les laves torrentielles qui ne sont pas pris en compte par nos modèles.

Généraliser cette approche, en ajoutant d'autres données de dégâts (coupures de routes), en l'étendant à d'autres départements où existent des services de RTM, permettrait d'obtenir un plus large échantillon de bassins, afin de mieux discerner les imperfections du modèle. Malgré les avantages d'une évaluation par comparaison, il est impossible de connaître ainsi les performances absolues des modèles. Celles-ci nécessiteraient l'obtention d'informations sur les non-événements, afin de garantir l'exhaustivité des données et de rendre optimale l'utilisation des courbes POD/SR en fonction de plusieurs seuils ou l'utilisation du critère CSI. Des projets, tels que RHYTMME ou SHAVE relèvent ce défi, même si actuellement la localisation des relevés reste trop imprécise et peut-être pas exhaustive (Calianno et al. 2013). A cela doit être ajoutée l'évolution temporelle dans les relevés sur le terrain, afin de permettre aux modèles d'être évalués en intégrant la nécessaire anticipation, dépendante de l'exposition des êtres humains au risque, pendant les événements extrêmes (Ruin et al. 2008). Finalement et malgré les imperfections des bases de données, de tels projets sont essentiels et doivent être généralisés, afin d'évaluer les modèles sur les véritables bassins non-jaugés sujets aux crues éclair.

Dans la suite de la thèse, afin de corriger les problèmes induits par la superficie des bassins de calage par rapport à celle des bassins RTM, le modèle hydrologique horaire (GRD) de la nouvelle méthode AIGA sera simplifié et calé régionalement à l'aide des bassins RTM sans passer par le calage et la régionalisation sur les bassins HYDRO. De cette façon, les paramètres des modèles seront directement en lien avec les caractéristiques des bassins versants sujets aux crues éclair. Nous espérons ainsi obtenir des gains de performances et ne pas complexifier le modèle inutilement au risque de dégrader les résultats.

Chapitre VII : Calage d'un modèle hydrologique directement à l'aide de données de dégâts

Intégrer des données de dégâts dans le calage améliore-t-il les résultats ?

Les meilleurs modèles obtenus sur des bassins jaugés, le sont-ils toujours sur de véritables petits bassins non-jaugés ?

Lors du chapitre précédent, l'évaluation sur les bassins RTM de la nouvelle méthode AIGA a été effectuée à l'aide d'une approche multi-seuils et d'une courbe POD/SR. Cette nouvelle technique s'est révélée pertinente. Elle complète d'ailleurs l'évaluation du meilleur modèle, habituellement limitée aux bassins de la banque HYDRO. Cette méthode d'évaluation permet de comparer les modèles entre eux et de mettre en évidence certaines faiblesses de la nouvelle version d'AIGA. Cependant, les performances obtenues sur les bassins réellement non-jaugés (RTM) demeurent très faibles pour certains bassins fort différents des bassins HYDRO (bassins de calage). De plus, l'analyse des caractéristiques des bassins a montré que les bassins posant le plus de difficultés sont les plus petits pentus.

L'idée principale de ce chapitre est de s'affranchir des bassins HYDRO, lors du calage du modèle hydrologique du système d'anticipation des crues éclair. L'hypothèse sous-jacente est, qu'en utilisant directement les bassins RTM, les problèmes liés à la taille des bassins disparaîtront. En effet, les paramètres seront déterminés à partir de bassins de montagnes de tailles équivalentes et en se focalisant directement sur la détection des dégâts.

L'idée de se concentrer sur une information directement en lien avec les objectifs, ici les bassins versants non-jaugés subissant des crues éclair, est déjà présente en hydrologie. Certains auteurs préconisent, par exemple, de caler les modèles avec quelques mesures sporadiques réalisées lors de jaugeages volants. Cette technique consiste à jauger épisodiquement les bassins versants : si les moments sont bien choisis, quelques mesures suffisent (Perrin et al. 2007; Singh et Bárdossy 2012). Cette technique améliore la modélisation hydrologique, mais elle est délicate à reprendre sur les bassins sujets aux crues éclair. Lors de ces dernières, le jaugeage est ardu avec des risques pour le matériel ainsi que pour les techniciens.

Dans notre cas, il s'agit donc d'utiliser directement l'information de dégâts. Dans la littérature, si plusieurs auteurs utilisent des bases de données historiques ou des bases de relevés de terrains pour évaluer les systèmes d'anticipation de crues (par exemple Calianno et al. 2013; Gourley et al. 2013; Naulin et al. 2013), aucune étude, jusqu'à maintenant et à notre connaissance, n'a préconisé une utilisation de ces données pour caler les paramètres des modèles hydrologiques.

Ce chapitre tente de valoriser la simple information de dégâts disponible sur l'échantillon de bassins versants RTM. Les résultats présentés ici sont le point de démarrage de futurs travaux. Il s'agit donc d'une première prospection à travers quatre nouvelles variantes issues de la nouvelle version de la méthode AIGA. Dans des futurs travaux d'après thèse, il faudra perfectionner les variantes testées afin d'obtenir une nouvelle version d'AIGA adaptée aux bassins non-jaugés.

La première partie est consacrée à la description de ces versions et à leur technique de calage. Ensuite, les premiers résultats sont exposés et discutés afin de mettre en évidence l'apport de cette nouvelle approche du calage. La conclusion souligne les perspectives ouvertes par cette nouvelle méthode ainsi que les pistes envisagées pour améliorer les systèmes d'anticipation de crues éclair sur les petits bassins non-jaugés de montagnes.

1 Simplification et calage du modèle hydrologique

Imaginer des structures de modèles plus adaptées aux bassins RTM et un calage effectué directement sur ces derniers devient une nécessité. Même si s'affranchir de l'usage de données hydrologiques dans l'élaboration de modèles semble compliqué, les relevés de dégâts des services RTM fournissent une information simple, pouvant compléter celle fournie par les bassins jaugés.

Une solution serait d'utiliser les signalements des dégâts pour caler directement les modèles hydrologiques. Idéalement, un calage local est à faire, mais le nombre de signalements RTM étant trop faible par bassin, il a été choisi de caler régionalement le modèle horaire, sur la base des bassins RTM de la même HER, afin de profiter des 10 ans de données. Cette régionalisation a été privilégiée, car elle est la plus simple à mettre en œuvre et garantit de meilleurs résultats qu'une médiane des paramètres sans restriction. Le modèle journalier est quant à lui régionalisé sur les bassins HYDRO comme précédemment mais avec une méthode légèrement différente, décrite dans la section 2.3.

Dans la section suivante, trois nouvelles variantes de la nouvelle méthode AIGA seront déterminées à l'aide d'un modèle journalier (GR4J ou GR3J), du module neige et du modèle événementiel horaire GRD. Nous rappellerons ensuite comment sont régionalisés les modèles continus. Finalement, la nouvelle méthode de calage régionale, fondée sur les courbes POD/SR du modèle horaire GRD, et identique pour chaque nouvelle variante, sera présentée avec la technique d'évaluation à adopter pour rester en non-jaugé.

1.1 Choix des structures de modèles à tester

Afin de montrer l'intérêt d'un calage directement effectué sur les bassins RTM sans passer par une régionalisation sur les bassins HYDRO aux caractéristiques différentes, plusieurs structures de modèles sont proposées. Le but est de montrer que si notre modèle est complètement calé indépendamment des bassins HYDRO, plus le modèle est adapté aux petits bassins RTM.

Les structures de modèles, testées dans ce chapitre, sont formées de la même façon que celles de la nouvelle version de la méthode AIGA (élaborée au chapitre 4 et régionalisée au chapitre 5 : la Variante 4). Pour rappel, cette structure se compose d'un modèle continu au pas de temps journalier et d'un modèle événementiel au pas de temps horaire. En journalier, est fourni un suivi de l'état de l'humidité des sols et un débit initial pour permettre l'initialisation d'un modèle événementiel. Un module de fonte de neige est ajouté en amont de cette simulation et améliore le suivi journalier. Le modèle événementiel GRD simule les débits de crues au pas de temps horaire (voir chapitre 4 pour plus de détails).

A partir de cette structure fondée sur un modèle journalier continu et un modèle horaire événementiel, nous déterminons les trois nouvelles variantes. Celles-ci correspondent à des simplifications de la variante 4 afin de montrer l'intérêt d'un calage sur des données de dégâts.

Les quatre structures comprenant la nouvelle version d'AIGA et les trois variantes simplifiées sont définies comme suit et résumées dans le Tableau 15 :

- La nouvelle méthode AIGA (variante 4) se compose d'un suivi continu journalier, opéré par le modèle GR4J composé de 4 paramètres (A_{cont} , B_{cont} , C et D) et un module de fonte de neige (degré-jour). Le modèle de crue, horaire et événementiel horaire (GRD), est initialisé au niveau de son réservoir de production par le suivi de GR4J et corrigé par un paramètre α . Le réservoir de routage est également initialisé en fonction du débit de GR4J. La neige est également prise en compte au pas de temps horaire. GRD a donc le paramètre A_{hor} équivalent à A_{cont} et deux paramètres à caler, l'un pour la règle d'initialisation et l'autre étant la taille du réservoir de routage (α et B_{hor}). La régionalisation des 6 paramètres à caler (A_{cont} , B_{cont} , C et D , α et B_{hor}), pour l'utilisation sur les bassins RTM, est obtenue par les 3 bassins HYDRO, au sein de la même région HER que le bassin cible RTM (3 voisins dans HER). Ce modèle est détaillé aux chapitres 4 (pour le couplage et le fonctionnement) et 5 (pour la régionalisation). C'est cette version qui a été évaluée au chapitre 6 sur les bassins RTM.
- La première nouvelle variante (variante 4b) est quasi identique à la variante 4, à la différence près que les paramètres α et B_{hor} du modèle horaire GRD sont calés régionalement et directement sur les bassins RTM et non sur les bassins HYDRO. Ces deux paramètres sont donc déterminés par HER et peuvent connaître de très légères variations. La méthode de calage des deux paramètres est définie un peu plus loin. Le modèle GR4J est, comme pour la variante 4, calé sur les bassins HYDRO, à l'aide de la régionalisation par les paramètres médians, au sein de la même sous-région HER, et non par les voisinages. Ce paramètre peut donc uniquement avoir trois valeurs qui correspondent à chaque HER; ce qui expliqué plus tard.
- La deuxième structure (variante 5) est une simplification qui diffère légèrement de la précédente. L'initialisation du réservoir de production n'est plus fournie par GR4J mais par le modèle journalier GR3J de la méthode AIGA originelle. La fonte journalière de la neige n'est donc plus prise en compte et il y a une incidence sur la taille du réservoir de production du modèle événementiel horaire (GRD). Cependant, l'initialisation du réservoir de routage est toujours effectuée par l'assimilation du débit journalier simulé par le modèle GR4J (comme la variante 4b). Pour le modèle horaire GRD, la taille du réservoir de production est donc similaire à celui de la méthode AIGA, avec une valeur comprise entre 200 et 250 mm. Les paramètres α (entre GR3J et GRD) et B_{hor} sont également à caler, comme pour la variante 4b (pour plus de détails pour le fonctionnement du modèle GR3J, se référer au chapitre 3 section 1.3).
- Finalement, la dernière variante à tester (variante 6) ressemble à la variante 5 sauf que le débit initial pour chaque événement est nul et non plus fourni par GR4J. L'initialisation du modèle horaire événementiel GRD est donc similaire à celle méthode AIGA. Pour rappel, le débit nul correspond à un remplissage de 30% (chapitre 3). Il reste cependant le paramètre liant le taux de remplissage entre GR3J et GRD (α) ainsi que la taille du réservoir de routage du modèle GRD (B_{hor}) à caler.

Les quatre variantes présentées ci-dessus sont donc confrontées dans ce chapitre et sont composées de modèles globaux. La variante 4, la nouvelle version de la méthode AIGA, a ses propres modèles journalier (GR4J) et horaire (GRD) qui sont calés régionalement à l'aide des 118 bassins HYDRO, avec un critère de calage basé sur les débits (Nash Pseudo-Continu, NPC, voir chapitre 3 section 3.1.3).

Les trois nouvelles variantes, par contre, ont leur modèle continu journalier (GR4J ou GR3J) qui est calé régionalement à l'aide de bassins HYDRO sur des données de débit (les détails sont décrits dans la section suivante 1.2) et leur modèle événementiel horaire (GRD), calé régionalement mais directement à l'aide des bassins RTM avec la courbe POD/SR sur des données de dégâts, c'est-à-dire que le transfert des paramètres α et B_{hor} s'effectue entre bassins RTM (décrit en 1.3). De plus, pour le modèle GRD, l'ensemble des variantes tient compte de la neige au pas de temps horaire (décrit au chapitre 4, section 2.2).

Tableau 15 – Modèle initial et ses 4 variantes testées lors de l'approche locale

	Initialisation (journalier)				Crues (horaire)			
	Modélisation continue				Simulation événementielle			
	Modèle	Module neige	Indice de suivi	Paramètres	Modèle	Différence Pluie/Neige	Initialisation 1 : $(\mathcal{S}/A)_{h_{init}}$ 2 : R0/B	Paramètres
Nouvelle méthode / Variante 4	GR4J	Oui	1 : $(\mathcal{S}/A)_{GR4J(j-1)}$ 2 : $Q_{GR4J(j-1)}$	A_{cont}, B_{cont}, C, D régionalisation 3 voisins dans même HER sur bassin HYDRO	GRD global	OUI	1 : $\alpha * (\mathcal{S}/A)_{GR4J(j-1)}$ 2 : $fct(Q_{GR4J(j-1)})$	$A_{hor} = A_{cont}$ (GR4J) α et B régionalisation 3 voisins dans même HER sur bassin HYDRO
Variante 4b	GR4J	Oui	1 : $(\mathcal{S}/A)_{GR4J(j-1)}$ 2 : $Q_{GR4J(j-1)}$	A_{cont}, B_{cont}, C, D régionalisation médiane des bassins HYDRO dans la même HER	GRD global	OUI	1 : $\alpha * (\mathcal{S}/A)_{GR4J(j-1)}$ 2 : $fct(Q_{GR4J(j-1)})$	$A_{hor} = A_{cont}$ (GR4J) α et B régionalisation par HER sur les N-1 bassins RTM
Variante 5	GR3J GR4J	Non Oui	1 : $(\mathcal{S}/A)_{GR3J(j-1)}$ 2 : $Q_{GR4J(j-1)}$	GR3J = A_{cont} régionalisé par la médiane ($A_{cont} = 200$ mm) GR4J = voir variante 4b	GRD global	OUI	1 : $\alpha * (\mathcal{S}/A)_{GR3J(j-1)}$ 2 : $fct(Q_{GR4J(j-1)})$	$A_{hor} = A_{cont} = 200$ mm (GR3J) α et B régionalisation par HER sur les N-1 bassins RTM
Variante 6	GR3J	Non	1 : $(\mathcal{S}/A)_{GR3J(j-1)}$	GR3J = voir Méthode AIGA	GRD global	OUI	1 : $\alpha * (\mathcal{S}/A)_{GR3J(j-1)}$ 2 : 30%	$A_{hor} = A_{cont} = 200$ mm (GR3J) α et B régionalisation par HER sur les N-1 bassins RTM

1.2 Calage des paramètres du modèle GR4J

Mise à part pour la variante 4 (nouvelle méthode AIGA) où le modèle GR4J a été régionalisé précédemment, à l'aide de la méthode des voisins au sein d'une sous-région HER, pour la variante 4b, la régionalisation du modèle journalier GR4J est différente mais elle n'est pas réalisée directement sur les bassins RTM.

Pour le modèle GR4J, utilisé pour l'initialiser le réservoir de production de la variante 4b et le débit initial des variantes 4b et 5, il n'a pas été possible d'utiliser les bassins RTM et la courbe POD/SR pour le régionaliser. En effet, le fait d'avoir quatre paramètres à caler est difficile à réaliser sur des critères de contingences qui ne sont pas assez restrictifs. De ce fait, la régionalisation consistant à prendre la médiane des paramètres au sein de chaque sous-région HER, à l'aide des 123 bassins HYDRO, a été employée conformément à ce qui a été fait au chapitre 5. La méthode par voisinage n'a pas été retenue afin d'utiliser la même technique de régionalisation entre GR4J et GRD. Pour ce dernier, il n'était pas possible d'utiliser le voisinage (voir la section suivante 1.3).

Le modèle GR4J a donc des valeurs de paramètres identiques (A_{cont} , B_{cont} , C et D) sur les bassins RTM au sein de chaque sous-région HER. Elles sont fournies par l'ensemble des bassins HYDRO de la même sous-région. Le modèle est donc utilisé en permanence en validation. Rappelons que, du fait de l'hypothèse consistant à ce que la taille du réservoir de production soit équivalente entre le modèle journalier (GR4J) et horaire (GRD), le paramètre A_{hor} (GRD) est le même que A_{cont} pour la variante 4b.

1.3 Technique de calage des deux paramètres du modèle GRD

Pour les trois nouvelles variantes (4b, 5 et 6), les deux paramètres a et B_{hor} du modèle horaire événementiel (GRD) sont calés régionalement sur la période de 1997 à 2006. La courbe POD/SR, présentée au chapitre précédent est directement utilisée pour caler les paramètres. L'optimisation s'effectue en maximisant l'aire sous la courbe, qui prend en compte plusieurs seuils simultanément. Les détails de la procédure sont donnés dans la section qui suit. Afin de dévoiler le potentiel d'un calage direct sur les bassins RTM, la régionalisation HER s'est imposée de par les résultats légèrement supérieurs qu'elle offre (pour les bassins HYDRO, Chapitre 5) par rapport à ceux de la médiane, dans les HER Méditerranée et Alpes Internes qui représentent plus de la moitié des bassins RTM. La régionalisation par voisinage n'a pas été retenue, le nombre de dégât par bassin étant faible, il n'y aurait pas eu assez de signalements de dégâts sur trois bassins pour caler la courbe POD/SR. Elle demeure une piste à explorer si plus de données deviennent disponibles.

Pour caler les deux paramètres (a et B), le principe de base est d'optimiser la courbe POD/SR sur les $n-1$ bassins de la sous-région HER du bassin cible. Un test de sensibilité, similaire à celui effectué lors du calage local (chapitre 4), est programmé avec les 42 mêmes valeurs de a (comprises entre 0.05 et 2.1), et les 31 de B (comprises entre 1 et 1050). Pour déterminer la meilleure courbe, la fonction « objectif » correspond à l'aire sous la courbe. Celle-ci est calculée par la méthode des trapèzes, en additionnant les 9 aires unitaires délimitées par les 10 seuils testés, définis au chapitre 6 (Figure 94).

Pour chaque bassin cible, nous obtenons, sur les autres bassins au sein de la même HER, le meilleur jeu de paramètres possibles, qui est ainsi transféré sur le bassin cible. Finalement, l'évaluation multi-seuils est effectuée sur tous les bassins versants calés régionalement et une nouvelle courbe de POD/SR est obtenue. Cette courbe correspond aux résultats en « validation », dont la donnée du bassin cible n'a pas été utilisée lors du calage. Cette procédure est opérée sur les trois variantes 4b, 5 et 6.

Les trois courbes différentes sont comparées entre elles et avec celles de la variante 4, pour souligner les améliorations liées au calage effectué directement sur les bassins RTM, sans le passage préliminaire par les bassins HYDRO. Les résultats sont présentés, par la suite, pour toute la zone d'étude et par sous-régions HER.

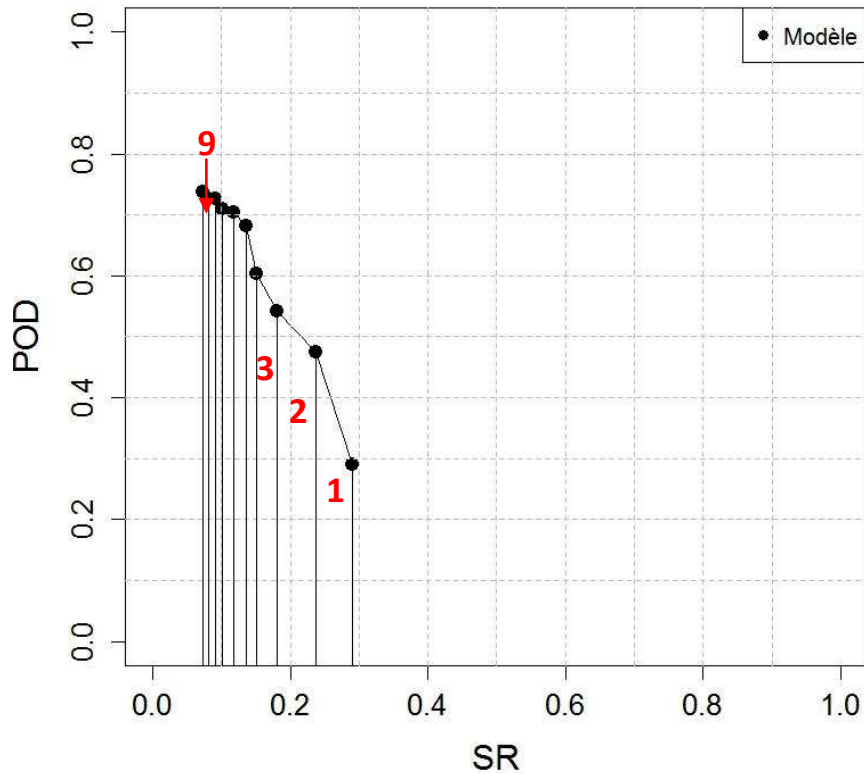


Figure 94 – Calcul de l'aire sous la courbe par addition des aires unitaires (1→9)

2 Résultats et discussion

2.1 Etudes des paramètres régionaux du modèle GRD à travers les différentes variantes

Une analyse des valeurs des paramètres des modèles horaires GRD (A_{hor} , α , B_{hor}), issus des quatre variantes (4, 4b, 5 et 6) est proposée afin de faciliter l'interprétation et la discussion des résultats (2.2 et 2.3). Nous commençons par nous focaliser sur le paramètre A_{hor} de GRD qui provient, pour les variantes 4 et 4b du modèle GR4J régionalisé par voisinage pour le premier et par le paramétrage moyen au sein des HER pour le second, et pour les variantes 5 et 6, de GR3J. Le Tableau 16 présente l'évolution des valeurs pour l'ensemble des bassins RTM. Nous constatons que les valeurs prises par GR3J sont beaucoup plus faibles que celles de GR4J, passant en moyenne de 207 mm pour le premier, à une valeur comprise entre 651 et 712 mm, pour le second. Notons que pour le modèle GR3J, le paramètre A n'est pas optimisé mais pris à la valeur imposée dans la version originelle (chapitre 3). Notons aussi que la régionalisation par voisinage de GR4J offre une gamme de valeur plus large que la régionalisation par la médiane par HER. En effet, cette dernière ne propose, du fait d'être calculé à l'aide des bassins HYDRO, que trois valeurs différentes, une par sous-région où se trouvent les bassins RTM.

Tableau 16 - Variation de la valeur de la taille du réservoir de production du modèle horaire (A_{hor}) pour les quatre variantes.

Taille du réservoir de production A_{hor} en mm, identique à Acont	Moyenne	Minimum	Maximum
Variante 4 (GR4J – voisinage au sein de la HER)	712	369	1236
Variante 4b (GR4J – médiane par HER)	651	476,5	920,5
Variante 5 (GR3J)	207	200	251
Variante 6 (GR3J)	207	200	251

Directement en relation avec la taille du réservoir de production, le paramètre α dispose d'une valeur évoluant sur chaque bassin, en fonction de la variante utilisée. Cependant, si la taille du réservoir est importante, le calage joue également un rôle important. Sur le Tableau 17, la valeur est plus faible en moyenne pour la variante 4, où le paramètre est obtenu à partir des bassins HYDRO, par rapport aux autres variantes, où il est calé régionalement à partir des bassins RTM. La variabilité du paramètre est également plus forte dans ces derniers cas, bien que centrée autour de trois valeurs. En effet, il faut voir que le calage par voisinage (variante 4) conduit à des valeurs pouvant être variable d'un bassin à l'autre, et ce de façon continue dans l'espace. Par contre le calage sur les bassins RTM par HER conduit à des valeurs peu variables au sein d'une même HER, mais pouvant être très variable d'une HER à l'autre.

Tableau 17 - Variation du paramètre a , reliant les modèles journalier et horaire, à travers les quatre variantes

Taille du paramètre a en mm entre le modèle journalier (GR4J/GR3J) et le modèle horaire (GRD)	Moyenne	Minimum	Maximum
Variante 4	0,7	0,45	0,85
Variante 4b	1,13	0,35	2,05
Variante 5	1,07	0,65	1,6
Variante 6	1,04	0,45	1,85

Finalement, le paramètre B_{hor} a des valeurs qui varient numériquement assez peu, avec des valeurs comprises entre 1 et 75 mm selon les variantes. Les moyennes sont aux alentours de 35 mm à l'exception notable de la variante 5, où la moyenne atteint 50,4 mm. Cependant, l'impact entre un B_{hor} de 1 mm et 10 mm est énorme en modifiant fortement la cinétique de la crue. Par contre, la différence entre un B_{hor} de 50 mm et de 75 mm a un impact faible sur la simulation de la crue.

Tableau 18 - Variation du paramètre B_{hor} du modèle horaire pour les quatre variantes

Taille du paramètre B_{hor} en mm du modèle horaire (GRD)	Moyenne	Minimum	Maximum
Variante 4	30,6	20	40
Variante 4b	33,6	1	50
Variante 5	50,4	20	75
Variante 6	37,7	20	75

Ce bref aperçu des valeurs des paramètres a été effectué sur l'ensemble de l'échantillon de bassins. Si cette première approche est utile pour connaître les gammes de valeurs, une description plus précise de l'évolution des paramètres, bassin par bassin, entre les différentes variantes est proposée afin d'étayer les précédentes constatations, en commençant par comparer les variantes 4 et 4b.

2.1.1 Evolution des paramètres entre les variantes 4 et 4b

Préambule : pour l'analyse des 3 variantes qui suivent (2.1.1, 2.1.2 et 2.1.3) plusieurs précautions sont à prendre lors de la lecture des cartes de paramètres :

- Les cartes du paramètre A_{hor} montrent le rapport des valeurs de paramètres entre les variantes, la valeur 1 signifie qu'elles sont identiques
- Les cartes des paramètres a et B_{hor} montrent le résultat de la soustraction entre les valeurs des variantes.
- Les classes entre les cartes ne sont pas identiques ! Cependant, lors de la comparaison des variantes (4 et 4b, 4b et 5, 5 et 6), la couleur rouge signale qu'il n'y a pas de changement entre les deux variantes analysées; les couleurs bleue et violette, que les valeurs des paramètres de la première variante examinée sont plus élevées que la seconde; enfin, les couleurs jaune et orange, que les valeurs des paramètres de la première variante examinée sont plus faibles que la seconde.

Avant de présenter les résultats, rappelons que la modification d'un paramètre entre deux modélisations est souvent difficile à interpréter car des phénomènes d'équifinalité peuvent intervenir lorsque des paramètres présentent une dépendance (même faible) comme entre le paramètre a et B_{hor} (Fouchier 2010).

Plus précisément, entre les variantes 4 et 4b (Figure 95), des évolutions différentes sont observables suivant les bassins versants. Cinq sous groupes se démarquent, numérotés sur la figure A.

Zone 1 : Les bassins versants de cette zone (appartenant aux Alpes Internes) ont leurs réservoirs de production (A_{hor}) et de routage (B_{hor}) de taille similaire (figure A et C). Cependant, le paramètre a a des valeurs beaucoup plus élevées pour la variante 4b (jaune), celles-ci étant supérieures de l'ordre de 1 à 1.55 pour une valeur a comprise entre 0,35 et 2,05. Cela entraîne une meilleure réactivité du modèle. Dans cette région, la variante 4 n'était donc pas assez réactive.

Zone 2 : Sur la zone correspondant aux Préalpes du Sud, pour les paramètres A_{hor} et a , il y a peu de différences. Pour le paramètre B_{hor} , quelques bassins (en jaune sur la figure C) ont des valeurs de ce paramètre plus fortes pour la variante 4b que pour 4, favorisant ainsi une réaction et des pointes de crues plus faibles.

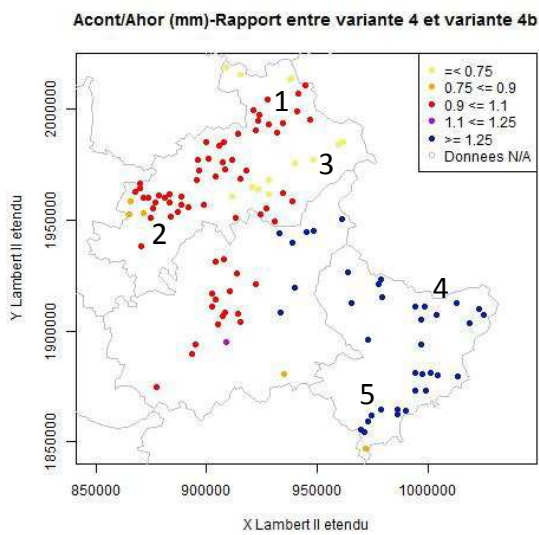
Zone 3 : Un peu au sud de la zone 1 pour la variante 4b, des bassins ont des réservoirs de production (figure A en jaune) et de routage plus grands (figure A en jaune) et une augmentation du paramètre a plus faible que pour la zone 1 (figure B en jaune).

Zone 4 : Pour cette zone, le fait d'imposer un réservoir de production plus petit à la variante 4b (en bleu sur la figure A), le calage a abouti à un paramètre a plus élevé pour augmenter la réactivité du modèle GRD. Cette réactivité est

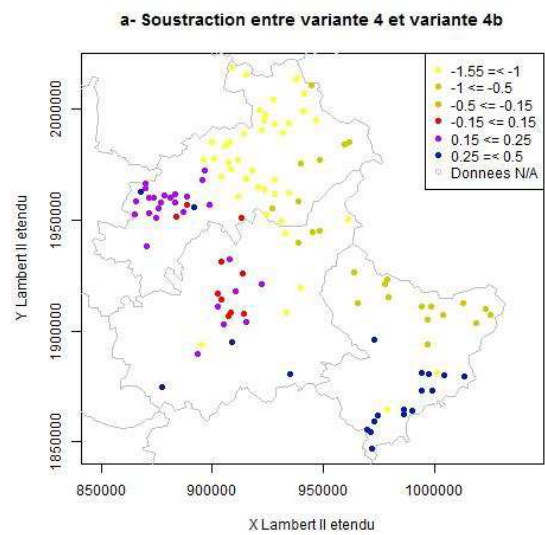
cependant compensée par une augmentation du paramètre B_{hor} qui réduit la montée des crues. Si ce n'est un phénomène d'équifinalité, il semblerait qu'il faille modéliser des crues plus « volumineuses » ou du moins associées à des sols plus saturés mais pas nécessairement plus « pointues ».

Zone 5 : elle correspond aux bassins de la HER de Méditerranée et malgré la réduction du réservoir de production (en bleu figure A), le paramètre a est lui aussi réduit, tout comme le réservoir de routage. Le calage des paramètres a et B_{hor} compense la réduction du réservoir de production.

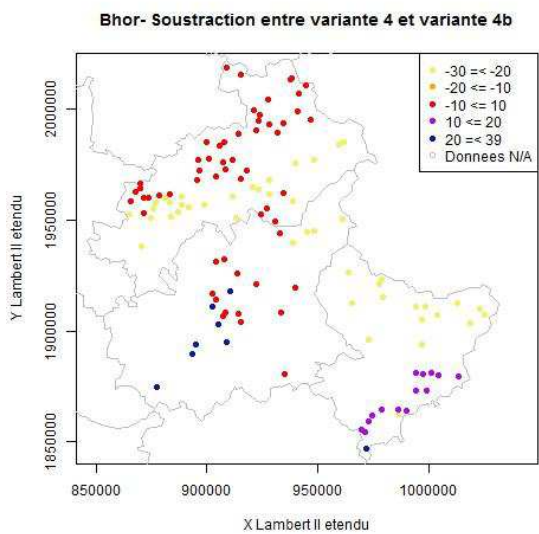
Le calage régional sur les RTM (variante 4b) permet donc, dans certains cas (zone 5), de compenser le changement de régionalisation, dans d'autres, de rendre le modèle plus réactif par rapport aux très petits bassins versants.



A)



B)

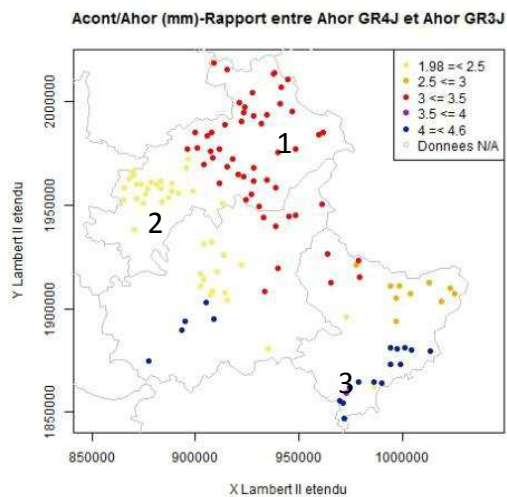


C)

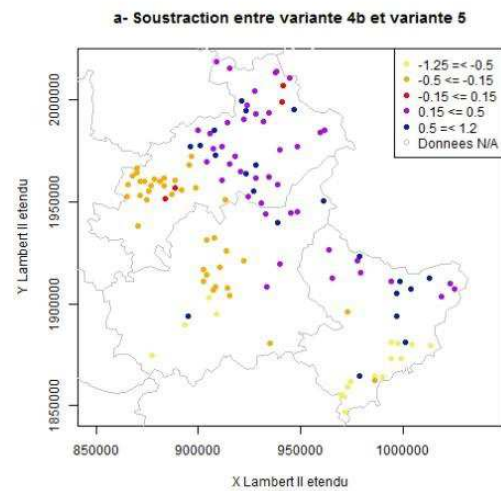
Figure 95 – Variations, entre les variantes 4 et 4b, des trois paramètres du modèle GRD. A) Paramètre A_{hor} avec les 5 zones homogènes pour l'ensemble des paramètres. B) Paramètre a ; C) paramètre B_{hor} . Les valeurs sont supérieures pour la variante 4 quand les couleurs sont violette ou bleue (et inversement).

2.1.2 Evolution des paramètres entre les variantes 4b et 5

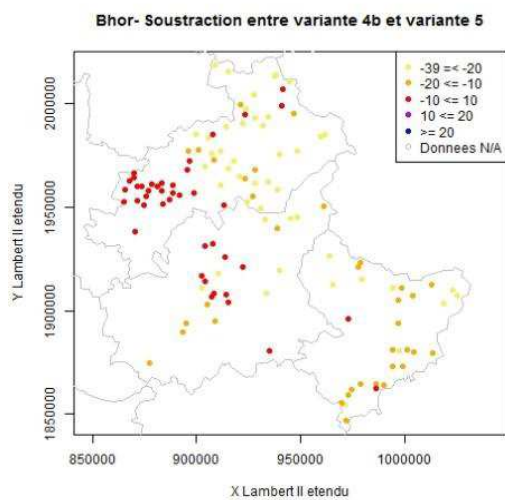
La seule différence entre les variantes 4b et 5 réside dans la taille du réservoir de production du modèle GRD, fourni respectivement par GR4J et GR3J. Du fait d'avoir une taille unique par HER pour le modèle GR4J, les trois sous-régions ont des paramètres qui évoluent de manières différentes. Pour les Alpes Internes (zone 1 sur la figure A), le réservoir de production est entre 2,5 et 3,5 fois plus petit avec la variante 5 par rapport à 4b (en rouge et en orange) ce qui se traduit par une réduction du paramètre a (bleu et violet) mais une augmentation de la taille du réservoir de routage. La région des Préalpes du sud (zone 2) présente une variation de la taille du réservoir de production plus faible entre la variante 4b et 5 qui est 2 fois plus faible pour cette dernière (figure A en jaune). Cependant, le paramètre a est en même temps augmenté (figure B, orange) pour un réservoir de routage identique (figure C, rouge). Dans cette région, les rapports de dégâts ont favorisé un modèle plus réactif. Pour la dernière région, la Méditerranée, le réservoir de production est entre 4 et 4,5 fois plus petit pour la variante 5, conjuguée à un paramètre a plus élevé et un B_{hor} plus grand.



A)



B)

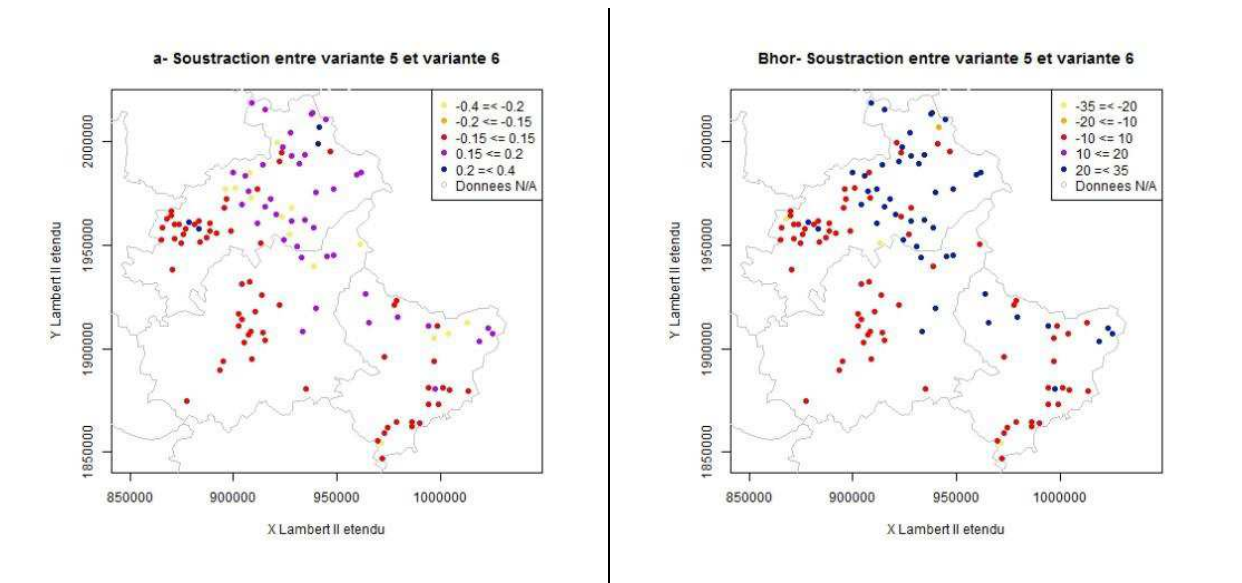


C)

Figure 96 - Variations, entre les variantes 4b et 5, des trois paramètres du modèle GRD. A) Paramètre A_{hor} avec les 3 sous-régions HER qui ont des comportements homogènes pour l'ensemble des paramètres. B) Paramètre a ; C) paramètre B_{hor} . Les valeurs sont supérieures pour la variante 4b quand les couleurs sont violette ou bleue (et inversement).

2.1.3 Evolution des paramètres entre les variantes 5 et 6

Finalement, les variantes 5 et 6 ont des paramètres plus semblables que dans les autres comparaisons. Notons cependant que pour les Alpes internes, le paramètre α et la taille du réservoir de routage (B_{hor}) sont légèrement plus faibles que pour la variante 6. Cette constatation s'explique sans doute par le fait que, dans cette dernière version, le débit initial n'est plus pris en compte ce qui impacte les paramètres dans la zone de montagnes où il est le moins négligeable (chapitre 2, section 4).



2.2 Résultats du modèle GRD pour les différentes variantes

L'évaluation des trois modèles GRD, calés sur les bassins RTM, et de la version régionalisée sur les bassins HYDRO (variante 4) est présentée, sur ces mêmes bassins, à l'aide de la courbe POD/SR (Figure 98). D'abord, il s'avère qu'utiliser des données RTM dans le calage régional (variante 4b, 5 et 6) offre de meilleures performances, comparées à la variante 4. En effet, les courbes des trois nouvelles versions sont situées plus à droite que la courbe orange. Ensuite, en analysant chaque courbe l'une par rapport à l'autre, nous pouvons constater l'impact des modifications apportées : d'abord, les conséquences du transfert des paramètres des bassins HYDRO vers les RTM et celles du changement de régionalisation (variantes 4 et 4b), ensuite l'influence de la taille du réservoir de production (variantes 4b et 5) et finalement de celle du débit initial fourni par GR4J (modèles 5 et 6).

Pour l'impact du transfert des paramètres, il faut d'abord comparer les variantes 4 (courbe orange) et 4b (courbe verte). L'apport des données RTM ne donne que de légers gains pour la courbe verte, par rapport à la courbe orange, sauf pour les 2 seuils d'alerte les plus hauts où les résultats sont similaires. L'analyse de l'aire sous la courbe confirme cette faible différence avec des valeurs à peine supérieures pour la variante 4b par rapport à 4 (0.16 et 0.15), l'aire étant comprise entre 0 et 1. L'apport des données RTM, pour modifier les paramètres α et B_{hor} , a donc un impact limité car la régionalisation par voisinage au sein

des HER offre des résultats supérieurs à ceux de la médiane prise dans la même HER sur les bassins RTM (résultat du chapitre précédent présenté en annexe D). Le nouveau calage corrige cependant ce problème mais sans le compenser, ce qui limite la progression entre les deux variantes. Pour obtenir une plus value à l'utilisation des RTM en calage, il faudrait donc changer d'autres paramètres, car nous ne pouvons pas choisir la méthode de régionalisation, par faute de relevés de dégâts, comme expliqué dans la section 1.3.

Entre la variante 4b (courbe verte) d'une part et la variante 5 (courbe bleu) d'autre part, la différence réside dans la taille du réservoir de production du module horaire (A_{hor}). Les résultats sont améliorés avec ce dernier modèle, dont la courbe est plus à droite pour les plus hauts seuils, ce qui procure des aires sous la courbe supérieures. Le fait d'obtenir des réservoirs plus petits, grâce à GR3J a été accompagné, pour les HER de Méditerranée et des Préalpes du Sud, par une augmentation du paramètre a et des variations de la taille du réservoir de routage faibles, offrant donc un modèle plus réactif grâce à l'utilisation des données RTM.

L'apport du débit initial est capital sur les bassins HYDRO, que ce soit avec le modèle local mais également avec le modèle régional. A l'échelle des RTM, il faut voir, en comparant les variantes 5 et 6, si le débit issu du GR4J régionalisé sur les bassins HYDRO est encore bénéfique aux performances. La seule différence entre ces deux versions se situe au niveau du débit de base : qui est assimilé à partir de GR4J pour la variante 5 et nul, pour la seconde. Les résultats sont meilleurs pour la seconde version, ce qui signifie que, soit la prise en compte de ce débit n'est plus nécessaire aux bassins RTM, soit que les paramètres du GR4J conduisent à un débit initial erroné qui pénalise le module horaire.

Il en résulte que la meilleure version obtenue à l'aide du calage sur les bassins RTM est la plus simple des trois variantes 4b, 5 et 6. Pour expliquer au mieux les problèmes de descente d'échelle, induisant ceux du transfert de paramètres et d'initialisation des débits, une analyse plus précise par sous-régions HER avec des caractéristiques des bassins versants fort différentes entre elles (chapitre 2) est faite. De plus, les performances sont comparées entre les grands et les petits bassins RTM.

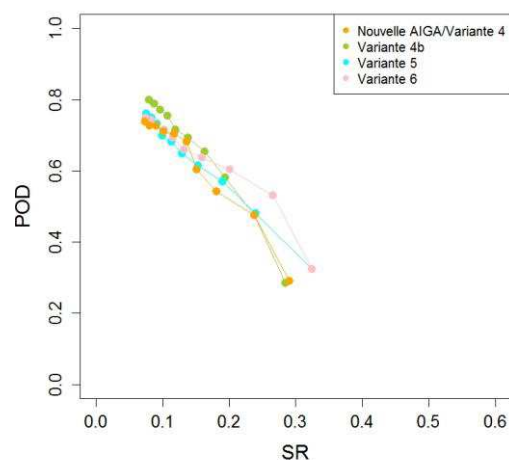


Figure 98 – Courbes POD/SR pour les quatre variantes 4, 4b, 5 et 6.

2.3 Discussions sur l'apport du calage directement effectué sur les RTM

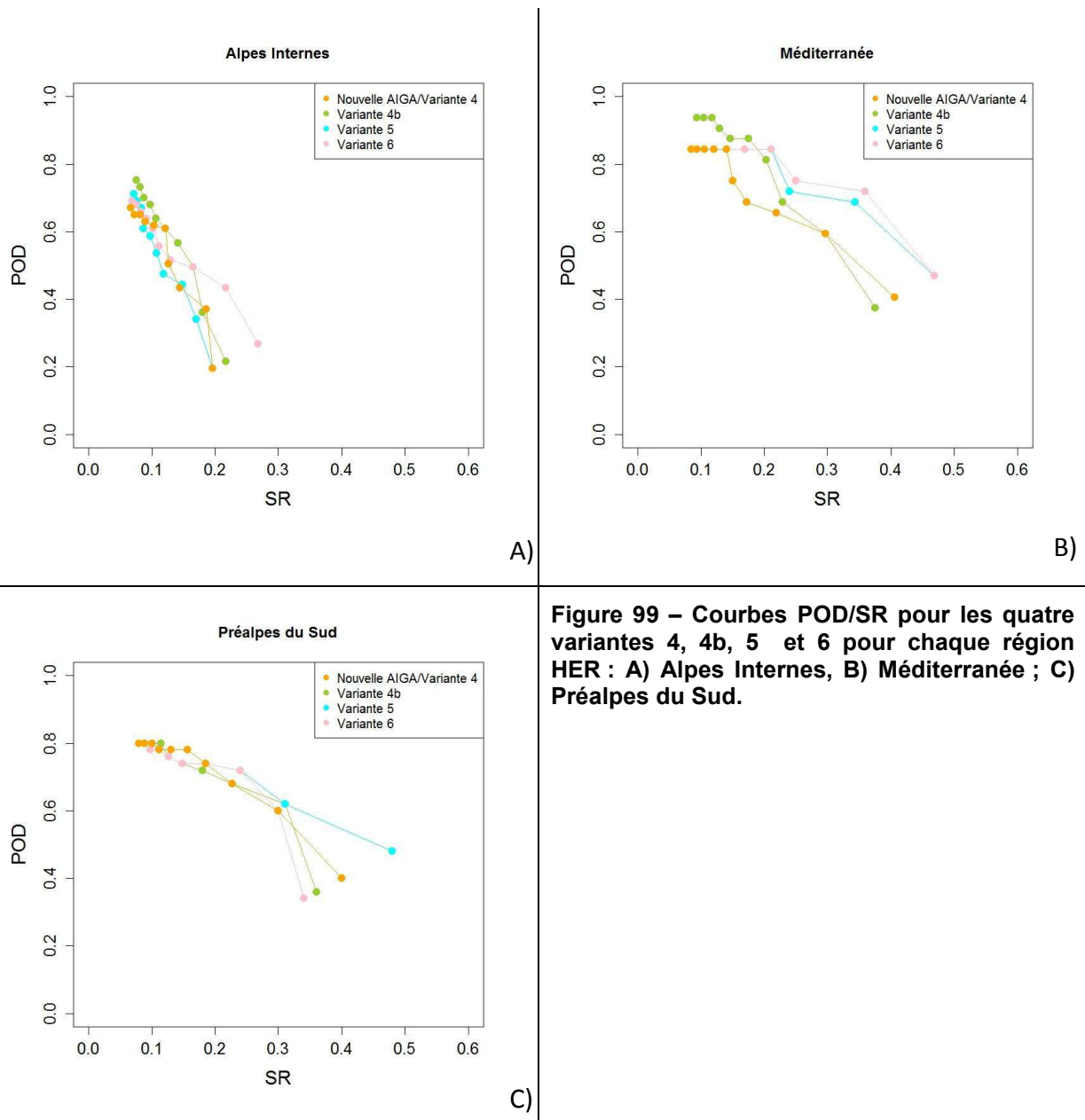
Chaque sous-région HER a ses propres caractéristiques : les Alpes Internes sont fortement influencées par la neige et la Méditerranée a des débits initiaux souvent négligeables. Ces différences permettent d'expliquer pourquoi le plus simple modèle est aussi le meilleur et de désigner quels sont les aménagements qu'il faudra lui apporter, pour continuer à l'améliorer.

Dans la HER Méditerranée regroupant 20 bassins (Figure 99-B), les résultats sont meilleurs, comparés à ceux des autres HER quelles que soient les variantes. Cependant, ils soulignent également l'existence de deux groupes distincts de variantes: d'une part, la 4 et la 4b et d'autre part, la 5 et la 6. Pour rappel, la différence de taille du réservoir de production pour ces deux groupes est la plus importante au sein de cette HER (un facteur 4 – 4,5). Les deux variantes 5 et 6 obtiennent d'ailleurs des résultats corrects avec des POD et SR assez élevés. La régionalisation opérée à partir des bassins HYDRO est donc pénalisante et nécessite de consacrer une part des recherches futures sur la taille du réservoir de production du modèle journalier GR4J et du modèle horaire GRD. Une meilleure paramétrisation du modèle journalier améliorera aussi la qualité du débit initial et permettra à la variante 5 d'être supérieure à la 6.

Les Préalpes du Sud, avec 40 bassins, ont la variante 5 comme meilleure version avec des performances largement plus élevées que les variantes 4, 4b et 6. Cette deuxième sous-région dispose de caractéristiques similaires à la région méditerranéenne (un débit initial faible) et des caractéristiques de montagnes (présence de neige, quoique beaucoup moins marquée que pour les Alpes Internes). Ce qui explique les meilleures performances de la variante 5, c'est une meilleure paramétrisation obtenue à partir du calage sur les bassins RTM. En effet, par rapport à la variante 4b, le réservoir de production (A_{hor}) est plus petit et le paramètre a plus grand pour un réservoir de routage équivalent (B_{hor}). Le modèle est donc plus réactif que la variante 4b (ainsi que la variante 4, qui a pour cette sous-région un paramétrage quasi identique). La comparaison des variantes 5 et 6, nous renseigne sur l'importance du débit initial, qui représente la seule différence entre ces deux variantes, les trois paramètres de GRD pour ces deux variantes ayant des valeurs proches. Pour cette sous-région, le calage à partir des données RTM est bénéfique et le débit initial ne peut être négligé.

Finalement, en étudiant le comportement des variantes sur les Alpes Internes, qui regroupent 60 bassins (Figure 99-A), tous les modèles rencontrent leurs pires résultats par rapport aux autres HER, comme cela a déjà été évoqué. La cause principale semble être la méconnaissance des précipitations dans cette région montagneuse et les difficultés dues aux forts cumuls de neige annuels. La lame d'eau COMEPHORE est exclusivement obtenue par des pluviomètres, absents au-dessus de 2000m (Gottardi 2009) ; aucune donnée radar n'étant disponible. La variante 6, la plus simple, fournit des résultats supérieurs aux autres variantes (courbe rose). Cependant et contrairement aux autres, elle ne tient pas compte de la neige pour estimer l'humidité des sols ni du débit initial d'avant événement. Il semble donc que le module neige éprouve des difficultés à reproduire la dynamique nivale, comme cela avait été relevé lors de l'approche locale (chapitre 4). L'initialisation fournie par GR4J semble erronée (humidité des sols et débits initiaux). Pour confirmer cette constatation, une analyse comparative est réalisée entre les bassins les plus et les moins neigeux. La Figure 100-A montre, pour les quatre variantes, les aires sous les courbes POD/SR. Cette

représentation renseigne la même information que les courbes mais de manière plus claire. Pour les bassins les plus enneigés (en rouge), les performances sont plus faibles que pour les moins enneigés, pour toutes les variantes.



Cependant, la mauvaise prise en compte de la neige et la méconnaissance des précipitations ne peuvent pas expliquer à elles seules ces résultats sur les bassins des Alpes internes. En effet, cette sous-région est caractérisée par la présence des bassins les plus pentus et les plus petits, ceux où se produisent les crues et laves torrentielles. Nous allons analyser les performances des modèles en fonction des pentes et des surfaces pour essayer de montrer que les moins bonnes performances sont aussi liées à des dynamiques hydrologiques différentes.

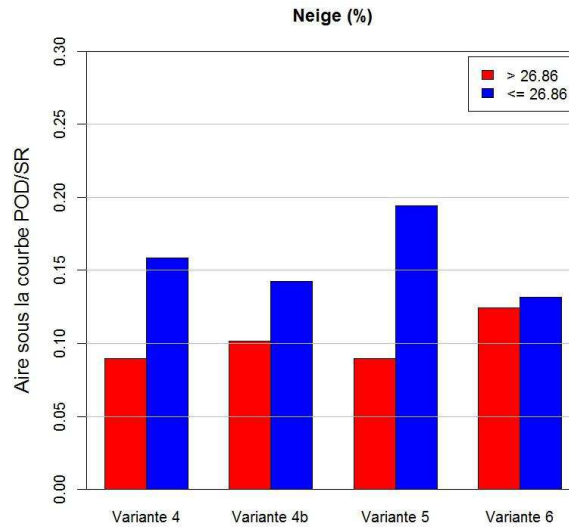
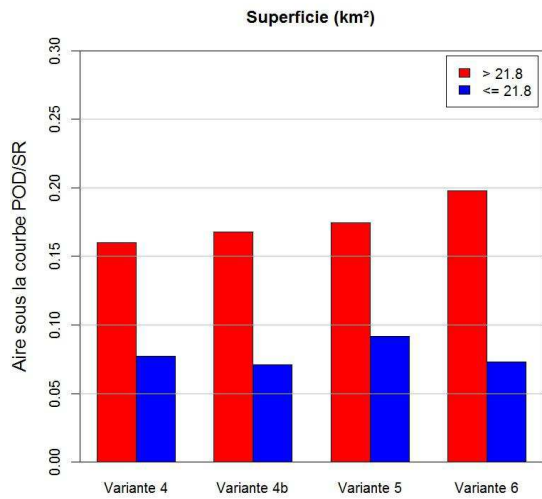
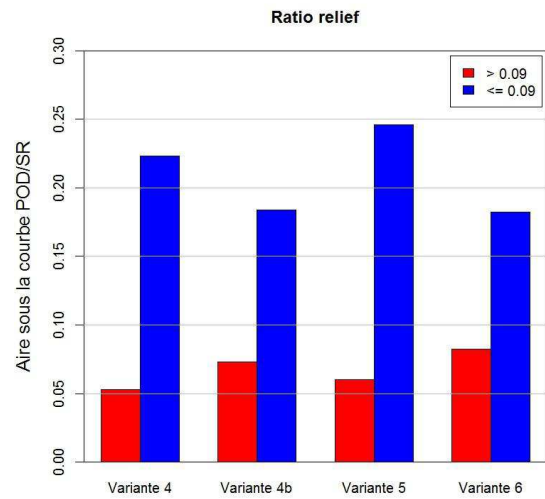


Figure 100 – Aire sous la courbe POD/SR pour les variantes 4 (nouvelle AIGA), 4b, 5 et 6. En rouge, le résultat pour les bassins avec plus de 26.86% de leur précipitation sous phase neigeuse et en bleu, moins de 26.86%.

Sur la Figure 101-A, l'analyse des aires sous la courbe, en fonction de la taille des bassins versants, confirme que, pour toutes les variantes, les performances sont meilleures sur les grands bassins de l'échantillon, représenté en rouge ($> 21 \text{ km}^2$). Parallèlement, l'aire pour les petits bassins (bleu) reste stable. Le calage local a donc servi surtout les grands bassins versants avec une dynamique hydrologique plus proche de celles des bassins HYDRO. Pour confirmer cette constatation, l'analyse des performances en fonction de la pente des bassins (Figure 101-B) est réalisée. Elle indique que ce sont sur les plus fortes pentes (rouge) que les résultats restent inchangés, quel que soit le modèle, voire qu'ils diminuent. Dans le cas des petits bassins versants aux fortes pentes, les temps de réactions des bassins semblent être très rapide, parfois inférieurs à l'heure ; une modélisation au pas de temps infra-horaire peut alors s'avérer utile afin de reproduire plus correctement la cinétique des crues. De plus, les phénomènes rencontrés ne sont peut-être plus des crues éclair et répondent à des processus d'écoulements différents. Comme cela a été souligné au premier chapitre, ces plus petits bassins versants sont sujets aux crues éclair mais également aux crues/laves torrentielles. Celles-ci se produisent sur les bassins à fortes pentes, lorsqu'il y a un stock de sédiments important (Bertrand et al. 2013).



A)



B)

Figure 101 – Aire sous la courbe POD/SR pour les variantes 4 (nouvelle AIGA), 4b, 5 et 6. A) pour les grands bassins, en rouge et les petits, en bleu ; B) pour la pente (ratio de relief), en rouge, les fort pentus et en bleu, les plus plats.

3 Synthèse et perspective

La synthèse des résultats retrace les améliorations apportées depuis la version originelle d'AIGA jusqu'à la nouvelle version intégrant des données de dégâts dans le calage (variante 6), en précisant quelles sont les perspectives à suivre pour obtenir le meilleur couplage (continu journalier - horaire événementiel), y compris sur les petits bassins versants de montagne. Pour le moment, la variante 6 ne forme pas une nouvelle version d'AIGA mais est issue de premiers travaux prospectifs nécessaires au développement futur d'une nouvelle méthode adaptée aux petits bassins non-jaugés.

Le second objectif de la thèse était d'évaluer les systèmes d'anticipation de crues sur des bassins non-jaugés, à l'aide de données de dégâts provenant des sites RTM. Cet objectif a été atteint au chapitre précédent avec l'approche multi-seuils. Cependant, certains problèmes ont été mis en évidence et ceux-ci sont vraisemblablement dus au calage réalisé sur les bassins jaugés (HYDRO), qui ont une superficie moyenne plus importante que les bassins non jaugés (RTM). Afin de surmonter ce biais, nous avons tenté dans ce chapitre un calage des modèles directement sur les bassins RTM non-jaugés, grâce aux relevés de dégâts, pour améliorer les performances des modèles hydrologiques. Cette méthode se rapproche en plusieurs points des méthodes de jaugeages volants, dans lesquelles le calage de modèle s'effectue sur quelques mesures (Perrin et al. 2007).

Sur la Figure 102, les gains en termes de POD et de SR sur les bassins RTM sont représentés à l'aide des courbes POD/SR. Pertinents, ils sont visibles lorsque la méthode AIGA originelle (courbe noire) est comparée à la nouvelle méthode régionalisée uniquement sur les bassins HYDRO (variante 4, développée aux chapitres 4 et 5) (courbe orange) mais aussi, à la nouvelle méthode prenant en compte des données de dégâts pour son calage (variante 6 développée dans ce chapitre-ci, courbe rose). Globalement, il y a une augmentation de 10% sur les POD et SR, quel que soit le seuil (la courbe rose se rapproche du coin supérieur droit). Cette amélioration est liée à l'emploi des bassins sujets aux crues éclair pour le calage à l'aide d'une fonction « objectif » (aire de la courbe POD/SR) utilisant les relevés de dégâts.

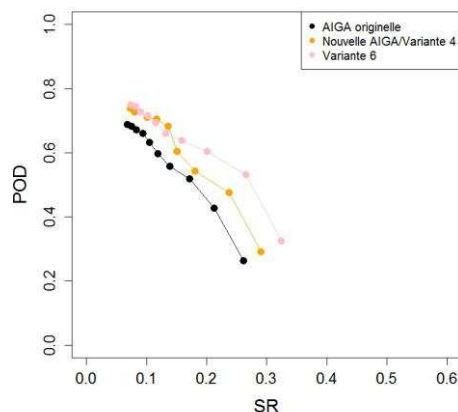


Figure 102 – Courbe POD/SR sur l'ensemble des bassins RTM, pour la méthode AIGA originelle (en noir), la méthode régionalisé sur les bassins HYDRO (variante 4, orange) et finalement la régionalisation sur les RTM (variante 6, rose)

Ce changement de conception a montré un léger gain entre la nouvelle méthode AIGA régionalisée (variante 4) et la variante 4b. Il semble, cependant, que le fait de devoir régionaliser par la méthode de la médiane par sous-région HER et par la fixation de la taille du réservoir de production par GR4J pénalise la variante 4b, qui ne tire pas pleinement profit du calage sur les RTM des paramètres α et B_{hor} . L'amélioration a donc été obtenue en simplifiant le couplage entre le modèle journalier et le modèle horaire afin d'obtenir la variante 6, en rose. La taille du réservoir de production du modèle horaire n'y est plus fournie par GR4J mais par GR3J, comme dans la méthode AIGA originelle, et le débit initial est à nouveau nul. Les paramètres fournis par un calage sur les bassins HYDRO mènent à un modèle pas assez réactif pour les bassins situés en montagne. La différence entre la méthode AIGA originelle et la variante 6 se limite donc principalement aux paramètres α et B_{hor} , à la prise en compte de la neige au pas de temps horaire et à une modélisation distribuée pour le premier et globale pour le second. Cette dernière différence n'a cependant qu'un impact limité, car la connaissance des précipitations restent imprécise en région montagneuse, comme cela a été montré au chapitre 4.

Ces gains, obtenus avec ces premiers résultats exploratoires, mettent en évidence les développements ultérieurs à apporter à la nouvelle méthode AIGA, notamment en ce qui concerne l'amélioration de la précision des débits initiaux, qui, bien simulés, restent importants. Pour réussir, le débit initial doit être ajouté à la variante 6 dont la taille du réservoir de production semble adéquate (fournie par GR3J). Ce débit peut être obtenu en calant le modèle journalier GR4J régionalement à l'aide des données RTM, à l'instar de ce qui a été fait pour les modèles horaires de ce chapitre. Cette solution semble par contre difficile à mettre en œuvre, car cela consisterait à caler quatre paramètres (A_{cont} , B_{cont} , C , D) avec une fonction « objectif » POD et SR trop peu contraignante, et donc pas assez robuste. La seconde solution possible serait d'estimer les débits initiaux, non plus à l'aide de GR4J, mais avec des débits statistiques régionaux ou à partir des débits observés sur les bassins HYDRO voisins. Dans ce dernier cas, les différences de superficies entre bassins HYDRO et RTM, impliquant des processus hydrologiques différents, pourront également être source de problèmes. Les trois pistes devront donc être explorées, avec d'éventuels biais liés à la surface des bassins versants à corriger.

La deuxième amélioration consiste à réintégrer un module de neige, non pas en amont du modèle journalier GR4J mais de GR3J. En effet, les meilleurs résultats obtenus par la variante 6 ont été réalisés sans prise en compte de la neige ni de la fonte journalière. Connaissant l'importance des précipitations solides sur les bassins RTM, il est impératif de coupler à GR3J un module de fonte degré-jour, à l'instar de ce qui a été réalisé pour GR4J. Cet ajout imposera un calage du réservoir de production de GR3J qui, dans nos résultats n'était pas optimisé et provenait d'études antérieures sur des bassins jaugés.

Ces premiers résultats ont aussi soulevés à plusieurs reprises le manque de réactivité du modèle. L'analyse des performances en rapport avec la superficie des bassins a confirmé ce constat et indique deux autres pistes d'améliorations possibles. D'abord, avec l'arrivée des données des radars en bande X du projet RHYTMME, il sera possible de travailler avec des précipitations intra-horaires. Ce changement permettra d'obtenir d'autres paramètres pour nos modèles afin de mieux reproduire la cinétique des crues éclair sur les petits bassins pentus. Secondement, pour rendre les bassins encore plus réactifs lors d'orage très intenses, il faudra tester l'intégration d'une fonction de production non linéaire, pour le modèle

horaire GRD, dépendante de l'intensité des pluies. Cette modification a déjà été réalisée pour l'approche SHYREG (quantile de crues) et à mener à des performances plus justes (Aubert 2012).

De plus, lors du développement du modèle durant cette thèse, il a été démontré que la phase de régionalisation était une source d'erreurs dans l'estimation des paramètres et qu'elle pénalisait les modèles. Lors du calage direct sur les RTM, nous avons dû passer par une régionalisation des paramètres estimés sur les bassins issus de la même HER. Ce choix se justifie par le manque de relevés de terrains sur la période de 10 ans. En effet, une moyenne de 1,45 relevé par bassin sur 10 ans n'est pas satisfaisante. A l'instar du passage de l'évaluation locale à l'échelle régionale sur les bassins HYDRO, il est évident qu'un calage local sur une plus longue chronique de pluie augmentera les performances. L'évaluation pourra dans ce cas être réalisée à l'aide d'un split-sample test et montrer l'intérêt d'intégrer les relevés de dégâts de chaque bassin non-jaugé, pour contraindre les modèles hydrologiques. Cette autre voie d'amélioration nécessite dès lors d'utiliser des données de pluies horaires, par exemple celles de SAFRAN qui offre des chroniques de 50 ans, qui soient accompagnée d'une résolution plus faible de 64 km² (contre 1 km² pour les lames d'eau COMEPHORE)⁹. Cette solution ne règlera cependant pas les problèmes liés à la modélisation propre aux petits bassins versants plus pentus, où les processus générateurs de laves torrentielles s'éloignent de ceux des crues éclair.

Plusieurs méthodes (comme l'indice de Melton) existent pour déterminer si un bassin est soumis aux crues/laves torrentielles, en considérant entre autres la pente du bassin. Néanmoins, celles-ci dépendent de plusieurs facteurs qui varient avec le temps, comme le stock de roches disponibles ou les précipitations en cours (Papa et al. 2013). Pour déterminer en temps réel s'il s'agit d'une lave torrentielle ou d'une crue éclair, certains préconisent d'utiliser un seuil de pluie à ne pas dépasser, en estimant la quantité de débris disponibles (Papa et al. 2013), d'autres ajoutent un module de stabilité de la pente au modèle hydrologique en place (Lepore et al. 2013; Tao et Barros 2013b). C'est en couplant à notre modèle hydrologique un module spécifique aux crues/laves torrentielles que les performances du système d'anticipation de crues seront améliorées sur les plus petits bassins versants sujets à ces deux catastrophes naturelles.

En définitive, si les améliorations amenées par l'utilisation de bases de données de dégâts engendrent de nouvelles difficultés, celles-ci demeurent pertinentes pour la modélisation hydrologique sur les petits bassins non-jaugés, où toute instrumentalisation semble impossible (fort onéreuse). Cependant, ces bases restent limitées à certaines zones d'études et manquent parfois de précision et d'exhaustivité. Il faut donc encourager tout projet visant à uniformiser ces bases (Gourley et al. 2013) et à codifier la méthodologie des relevés de terrain (Borga et al. 2008), pour homogénéiser et généraliser leur utilisation dans le calage et l'évaluation des modèles hydrologiques.

⁹ La méthode SAFRAN a été présentée au chapitre 2 dans la section 1.3

Conclusion générale

Cette thèse a poursuivi deux objectifs :

- Le premier consistait à adapter le modèle hydrologique de la méthode AIGA, opérationnelle sur la plateforme du projet RHYTMME, sur les petits bassins versants non-jaugés des zones de montagnes.
- Le second objectif, portait sur une seconde évaluation du nouveau modèle, directement effectuée sur les bassins sujets aux crues éclair, en utilisant une base de données de dégâts.

Ce second objectif constitue l'aspect le plus novateur de cette thèse. La double évaluation s'effectue d'abord classiquement, en utilisant les débits observés pour les comparer aux simulations des modèles puis, des données de dégâts sont directement utilisées pour évaluer une seconde fois le modèle. Les performances des modèles sont dès lors discutées sur de véritables bassins non-jaugés, sur la base d'une approche multi-seuils et de critères de contingence. Peu de personnes s'intéressent à ces techniques et quand il s'agit de caler directement les modèles avec ces relevés de dégâts, aucune étude n'a, à notre connaissance, exploré cette voie. Toutefois et malgré des résultats prometteurs, ceux-ci doivent encore faire l'objet d'études approfondies.

A travers les sept chapitres de cette thèse, nos deux objectifs ont été poursuivis. Les principaux résultats et les pistes d'améliorations du nouveau modèle élaboré sont présentés dans cette conclusion.

Pour obtenir la nouvelle version de la méthode AIGA, une zone d'étude correspondant au sud-est de la France, de la Méditerranée jusqu'au lac Léman, a été déterminée afin d'obtenir deux jeux d'une centaine de bassins versants (chacun possédant des caractéristiques variées). Un premier jeu de 118 bassins munis de données débitométriques nous a permis de développer le modèle et de le régionaliser, afin qu'il puisse anticiper divers types de crues : de la crue de fonte des Alpes, jusqu'aux crues éclair de la côte méditerranéenne. Le second jeu de 123 bassins, fondé sur les relevés historiques de dégâts de la base de données des services de Restauration des Terrains de Montagnes (RTM), a été utilisé dans un second temps. La nouvelle version de la méthode AIGA a donc pu être confrontée à l'ancienne sur de véritables bassins sujets aux crues éclair.

Afin d'adapter la méthode AIGA aux zones de montagnes, conformément au premier objectif de la thèse, quatre variantes de la méthode originelle ont été développées en proposant :

- d'initialiser plus correctement le modèle horaire événementiel au niveau des deux réservoirs, à l'aide d'un modèle journalier continu (GR4J) qui fournit l'humidité des sols et le débit de la veille de l'événement ;
- d'ajouter la prise en compte de la neige à l'aide d'un module de stockage et de fonte des neiges, basé sur un modèle degré-jour au pas de temps journalier, pour améliorer l'initialisation du modèle GRD.

Par une approche locale (chapitre 4), où les modèles sont calés pour chaque bassin à partir des données de débits, la meilleure variante a été choisie. Pour opérer ce choix, les débits simulés par le modèle sont comparés aux observations pour chaque bassin versant. Les résultats réalisés par les quatre variantes ont finalement désigné le couplage le plus complet, celui entre le modèle GR4J, qui fournit l'état d'humidité et le débit initial, et le modèle événementiel GRD, qui intègre la neige. L'analyse par sous-régions, issues des hydro-écorégions (soit les HER, des régions homogènes aux caractéristiques propres (chapitre 2)), souligne que les améliorations apportées aux performances, par cette variante, sont les plus élevées sur les Alpes Internes (haute montagne) par rapport à la variante 1 munie de l'initialisation la plus simple, similaire à celle de la méthode AIGA. Cependant, dans cette sous-région, les résultats sont encore les plus faibles et des gains sont possibles dans des travaux futurs sur le module neige.

A ce stade, la meilleure variante a dû être régionalisée (chapitre 5) pour être utilisable sur des bassins non-jaugés, ne disposant pas de données hydrologiques pour être calée localement. Plusieurs techniques de régionalisation, issues de la littérature, ont été testées. Finalement, c'est l'utilisation de trois bassins voisins du bassin cible, au sein d'une même sous-région HER, qui a conduit à des résultats légèrement supérieurs. Tout en s'assurant que la régionalisation n'avait pas réduit à néant les avantages de la variante 4, la plus complète, obtenue lors du développement en local, les performances de cette variante régionalisée ont été comparées à celles de la méthode AIGA originelle. Les résultats sont concluants et connaissent une progression sur toutes les régions, y compris en Méditerranée, région pour laquelle l'ancienne méthode AIGA avait été développée. Le premier objectif de la thèse, sur l'adaptation de la méthode AIGA aux zones montagneuses, est donc atteint.

Classiquement les études portant sur la régionalisation des modèles hydrologiques se seraient arrêtées à ce stade. Cependant, cette thèse voulait également évaluer la progression enregistrée par la nouvelle version de la méthode AIGA, sur de véritables bassins versants non-jaugés ce qui constitue le second objectif (chapitre 6). Pour y répondre, nous avons utilisé une base de données de dégâts de 123 bassins versants, aux caractéristiques différentes des bassins jaugés, issus de la banque HYDRO, vus en première partie. Ces autres bassins, situés principalement en montagne, sont plus petits, plus pentus que les bassins HYDRO, et subissent des chutes de neige. Pour réaliser cette nouvelle évaluation et quantifier les améliorations entre les deux versions de la méthode AIGA, une approche multi-seuils a été imaginée, en se basant sur les courbes de ROC. Avec cette nouvelle courbe et des statistiques de contingences, nous avons analysé l'évolution du taux de bonnes alertes (modélisées et observées), POD, et celui de fausses alertes (modélisées et non-observées) SR pour plusieurs seuils de dépassement, simultanément. L'évaluation est donc indépendante du seuil d'alerte choisi. Les alertes du modèle hydrologique ont donc pu être comparées aux dégâts relevés sur le terrain et présents dans la base de données des services de Restauration des Terrains en Montagnes (RTM).

Cela nous a permis de confirmer les gains de la nouvelle méthode AIGA, obtenue pendant cette thèse, vis-à-vis de la version originelle. Cependant, cette nouvelle évaluation met en lumière certains problèmes dégradant les performances de cette nouvelle méthode. Les principaux sont:

- la méconnaissance des précipitations en zones de montagnes ;
- la non-exhaustivité de la base de données des RTM ;
- la technique de régionalisation, s'appuyant sur des paramètres calés sur des bassins versants HYDRO nettement plus grands que ceux issus de la base des RTM ;
- la présence de crues et laves torrentielles sur les petits bassins pentus qui ne sont pas modélisées par notre modèle.

Voulant diminuer l'impact d'une mauvaise modélisation sur les performances, lors du chapitre 7, le dernier, une nouvelle paramétrisation du modèle hydrologique horaire est essayée, en calant celui-ci directement, à l'aide de la courbe POD/SR, sur les bassins non-jaugés, sans passer par une phase de calage sur les bassins HYDRO. Cet ultime test améliore encore les performances très encourageantes du modèle. Il nous a en outre permis de montrer le potentiel existant dans l'emploi des données de dégâts, afin de caler les modèles. De plus, il a prouvé la nécessité de disposer de bases de dégâts complètes et exhaustives. Finalement, ces résultats ont donc permis d'avancer dans l'élaboration d'un système d'alerte de crues adapté aux très petits bassins versants. Ils ont aussi mis en évidence les difficultés de travailler sur des bassins où se déroulent à la fois des crues éclairs et aussi des crues et laves torrentielles. Ces dernières répondent d'ailleurs à des processus hydrologiques différents et sont la cause de décès et de dégâts conséquents. Il faudra donc, dans une prochaine phase, compléter notre système d'alerte en y intégrant un module permettant de différencier ces deux phénomènes par rapport aux crues éclair.

Pistes d'amélioration

A l'issue de ces travaux, nous identifions quatre pistes d'amélioration.

1. Tirer profit de la lame d'eau RHYTMME a priori plus précise

Disposer de dix années de données de précipitations, provenant de la réanalyse radar COMEPHORE de Météo-France, a été une chance pour cette thèse. Les lames d'eau, fournies par les quatre radars en bande X du projet RHYTMME, n'existaient pas encore. Maintenant, il serait possible d'en bénéficier, avec leurs avantages : des mesures plus précises et un pas de temps fin de l'ordre de cinq minutes. Nous pouvons dès lors imaginer leur utilisation dans des travaux futurs, et leur apport à une nouvelle version de la méthode AIGA en région montagneuse. La précision offrira une meilleure connaissance spatiale des précipitations. Quant au pas de temps fin des simulations de crues intra-horaires, il conduira peut-être à une meilleure anticipation.

2. Améliorer le modèle hydrologique et sa régionalisation

Notre méthode s'est appuyée sur le couplage d'un modèle journalier continu, fournisseur des états initiaux d'avant crue, et d'un modèle événementiel horaire simulant les crues. Plusieurs pistes sont à envisager pour obtenir un modèle encore plus fiable d'une part sur les bassins issus de la banque HYDRO et d'autre part sur les bassins issus des RTM :

- faire évoluer le couplage modèles journalier/horaire et module neige en l’adaptant sur les bassins non-jaugés en améliorant le calage régional des paramètres des modèles directement sur les données de dégâts (suite du chapitre 7);
- confronter notre méthode (modélisation continue-événementielle) à un modèle horaire continu comme GR5H (voir thèse de Lobligeois en cours) afin d’obtenir une solution plus intégrée. En effet, la méthode AIGA, s’appuyant sur deux modèles, a été difficile à régionaliser et dans certaines régions, comme la haute montagne, les résultats ne sont pas très satisfaisants ;
- améliorer la régionalisation en testant d’autres techniques (régressions multiples, approche multi-modèles basée sur plusieurs régionalisations simultanément,...).

3. S’appuyer sur des bases de données de dégâts plus exhaustives

Pour les bases de données, la discussion des résultats, sur les véritables bassins non-jaugés, a pointé le manque d’exhaustivité des bases de données de dégâts comme principale limite à l’évaluation. Le petit nombre de relevés sur dix ans a limité nos investigations. Afin de mieux cerner les bassins où la nouvelle méthode AIGA est insatisfaisante, il faudra améliorer les bases de données de dégâts en leur fixant un cadre strict avec:

- des relevés plus systématiques des dégâts avec une information quant au fait que la crue n’engendre pas de dégâts (non-dégâts) Aux Etats-Unis, ce type de bases existe avec la *Severe Hazards Analysis and Verification Experiment* (SHAVE) (Gourley et al. 2010) ou en France avec le projet RHYTMME et son club d’expérimentateurs, confrontant en temps réel leurs observations à la plateforme RHYTMME ;
- des bases de données avec plus de relevés en unifiant des bases de données existantes, comme dans le projet FLASH (www.nssl.noaa.gov/projects/flash/database.php) regroupant les bases SHAVE, *Storm Data database* (NWS) et les enregistrements de débits des cours d’eau aux Etats-Unis (2013) ;
- une information sur la chronologie des épisodes de crues pour évaluer l’anticipation, suggérée par Calianno et al. (2013) et Ruin et al. (2008).

4. Intégrer les phénomènes de lave torrentielle

Les crues éclair se déroulent sur des petits bassins versants pentus qui peuvent subir également des crues et laves torrentielles. Dès lors, il faut réussir à discerner les deux types de phénomènes afin de connaître la proportion de chacun ce qui peut être réalisé à l’aide de l’indice de Melton (Bertrand et al. 2013). Cette étape permettra de quantifier l’intérêt d’ajouter un module qui gère les crues/laves torrentielles. Celui-ci pourra se présenter soit sous la forme d’une alerte fondée sur un seuil de pluie à ne pas dépasser, en estimant la quantité de débris mobilisables (Papa et al. 2013), soit sous la forme d’un module de stabilité de la pente directement en lien avec le modèle hydrologique en place (Lepore et al. 2013; Tao et Barros 2013b). A terme, la méthode AIGA pourrait donc gérer les crues éclair et les crues/laves torrentielles simultanément. Une telle avancée, en plus de contribuer à l’amélioration de la prévision des crues dans les plateformes de services intégrés, participera à une meilleure connaissance de ces risques naturels, profitant aux populations, et, nous l’espérons, aidera à sauver des vies.

Liste des illustrations

Figure 1 - Développement du réseau de radars en bande X de RHYTMME. En rouge, le radar HYDRIX du projet CRISTAL et en vert, ceux de RHYTMME.....	2
Figure 2 - Schéma de fonctionnement de la méthode AIGA, couplant un modèle de simulation en temps réel à un modèle stochastique fournissant les quantiles de référence. Les couleurs représentent la dangerosité selon les périodes de retour (2 ans : jaune, 10 ans : orange et 50 ans : rouge) (Javelle et al. accepté).....	3
Figure 3 - Inventaire des débits de crues éclair exceptionnelles répertoriées dans le cadre du projet HYDRATE, avec la courbe enveloppe correspondante, et ceux atteints lors de la crue éclair de l'Argens et de ses affluents (juin 2010), en fonction de la taille des bassins versants (d'après Gaume et Borga 2013).	10
Figure 4 - Carte des débits spécifiques des crues éclair en Europe. (Gaume et Borga 2013).....	11
Figure 5 Durée d'épisodes orageux en fonction de leur déploiement surfacique. Les carrés représentent les champs d'utilisation des radars et des pluviomètres (Borga et al. 2008).	16
Figure 6 - Erreur moyenne de la pluie horaire totale issue du projet "Dee Weather Radar Project", sur des bassins d'environ 60 km ² . Pour le radar, le graphe représente l'erreur par rapport au nombre de pluviomètres . Les chiffres décrivent des types de précipitations allant de l'orage isolé 1 à la pluie stratiforme 4 (Browning et Collier (repris dans (Collier 2007)).	17
Figure 7 - Fonctionnement d'un radar météorologique (source : <i>Encyclopedia Britannica</i>).....	18
Figure 8 - Réseau ARAMIS au 29 novembre 2012 avec les 24 radars du réseau ARAMIS et les 2 radars en bande X, en test, de RHYTMME (Météo-France 2013a).....	20
Figure 9 – Précision de l'alerte en fonction du moment où elle est émise (adapté à partir de Blöschl 2008).	22
Figure 10 - Alertes météorologiques au niveau européen, compilées à partir des systèmes météorologiques nationaux. En date du 2 juin 2013, 16h20. (Source : http://www.meteoalarm.eu/).....	23
Figure 11 - Schémas de fonctionnement de la méthode AIGA, couplant un modèle de simulation en temps réel à un modèle stochastique, fournissant les quantiles de référence. Les couleurs représentent la dangerosité selon les périodes de retour (2 ans : jaune, 10 ans : orange et 50 ans : rouge) (Javelle et al. accepté).....	26
Figure 12 – Zone d'étude encadrée en bleu, et en rouge, la zone RHYTMME.	34
Figure 13 – Numérotation des départements de la zone d'étude.	34
Figure 14 - Fonctionnement de SAFRAN d'après Vidal, 2010.	37
Figure 15 - Localisation des 118 bassins HYDRO (noir) et des 123 bassins RTM (rouge).....	41
Figure 16 – Couverture pluviométrique des 118 bassins HYDRO (noir) et des 123 bassins RTM (rouge).	42
Figure 17 – (A) Cumul des précipitations annuelles selon COMEPHORE. (B) Cumul des précipitations annuelles selon SAFRAN, obtenu en additionnant la neige et la pluie, afin d'obtenir une pluie totale comparable à celle de COMEPHORE... ..	43
Figure 18 - Rapport entre les cumuls de la période 1997-2001 et ceux de la période 2002-2006. (A) COMEPHORE (B) Pluie totale SAFRAN.	44
Figure 19 - Part de la neige dans les précipitations annuelles (A). Différence de neige moyenne annuelle entre les 5 premières années et les 5 dernières (B). Les valeurs sont exprimées en mm équivalent eau; les fortes valeurs indiquent une seconde période moins neigeuse sur les massifs (rouge).	45
Figure 20 – Analyse de la température moyenne annuelle : moyenne sur 10 ans (A) ; différence de température entre les 5 premières années et les 5 dernières avec en bleu une température plus chaude pour 2002-2006 et en rouge l'inverse (B). 46	

Figure 21 - Evapotranspiration potentielle annuelle (ETP), sur la période 1997-2006, calculée à partir de la température SAFRAN et de la formule d'Oudin.	47
Figure 22 – (A) Représentation des distributions sous forme d’une boîte à moustache ; (B) représentation des distributions sous forme de fréquences cumulées.....	49
Figure 23 - Présentation des 4 hydro-écorégions et répartition des bassins HYDRO et RTM.	50
Figure 24 – Nombre de bassins versants par hydro-écorégion : A) HYDRO et B) RTM.....	51
Figure 25 - Nombre de signalements RTM par hydro-écorégions. A gauche, le nombre total, à droite, le nombre par bassin.	51
Figure 26 – Description physique des 241 bassins. Pour les graphiques de distribution à gauche, les RTM sont en pointillés et les HYDRO, en traits plein ; et à droite, la répartition en HER. (A) superficie en km ² ; (B) altitude en m ; (C) ratio de relief (m/m) ; (D) ratio de relief en fonction de la surface : 1) RTM (triangles) et HYDRO (carrés) ; 2) par HER (HYDRO et RTM). ...	53
Figure 27 – Occupation des sols des bassins versants HYDRO (trait plein) et RTM (pointillés) (à gauche) et échantillon complet en fonction des HER (à droite). (A) territoires artificiels ; (B) terrains agricoles et (C) zones de forêts et semi-naturelles.	55
Figure 28 – Graphique de Le Turc-Bodyko représentant le rapport débit/précipitation (Q/P adimensionnel) en fonction du rapport précipitation/évapotranspiration potentielle (P/E0). Les points représentent les 118 bassins HYDRO et la couleur la HER associée à leur localisation.	57
Figure 29 – Description hydro-climatique des 241 bassins versants. Pour les graphiques à gauche, les RTM sont en pointillés gris et les HYDRO en trait plein gris. A gauche, les distributions et à droite, la répartition en HER. (A) Précipitations annuelles COMEPHORE en mm ; (B) Pourcentage de la part neigeuse sur les précipitations annuelles ; (C) ETP annuelle en mm ; (D) Température journalière moyenne (°C).	59
Figure 30 – Chronique de la pluie de bassin journalière et exemple de définition d’un événement, représenté par l’accolade orange, pour un seuil de 10mm (rouge).....	61
Figure 31 - Nombre d'événements pluviographiques	63
Figure 32 – Le graphique de gauche présente la distribution des deux échantillons et le graphique de droite, la représentation de l’échantillon total par HER. Au-dessus, le cumul des précipitations par événement ; en dessous, l’intensité par événement.	64
Figure 33 – Analyse des débits sur l’échantillon HYDRO complet (118 bassins) et par sous-région HER. A gauche sont présentés les débits pseudo-spécifiques initiaux pour tous les événements (m ³ /s/km ² ^0.8) et à droite, les débits pseudo-spécifiques maximums (m ³ /s/km ² ^0.8) durant les mêmes événements.	65
Figure 34 – Saisonnalité des crues (> 2 ans « expérimental ») (à gauche) et des signalements RTM (à droite).	66
Figure 35 - Saisonnalité des crues et des signalements RTM par HER.	67
Figure 36 - Structure du modèle horaire unitaire GRD.....	71
Figure 37 – Part de la pluie résultante (P _r), qui est stockée (P _s) dans le réservoir de production en fonction de l’intensité (pictogramme) et du taux de remplissage (abscisse).	73
Figure 38 - Taille du réservoir A _{hor} . La taille est définie avec un seuil minimum de 200 mm et un maximum d’environ 300 mm dans les Alpes-Maritimes.	73
Figure 39 - Hydrogramme d'un bassin versant avec différents débits simulés à partir de différents taux initiaux de remplissage du réservoir A. Les débits les plus faibles correspondent à des réservoirs moins remplis (teintes vertes) et la courbe orange à un réservoir rempli dès le démarrage. La courbe noir représente le débit observé.	75
Figure 40 - Chronique de l'estimation de l'humidité des sols par le modèle GR3J, entre le 01/01/1997 et le 31/12/2006, pour l’Argens à Châteauvert (Var).	76

Figure 41 - Schéma de fonctionnement du modèle GR4J de Perrin (2010).....	81
Figure 42 – Présentation du cadre méthodologique général poursuivi pendant les travaux de thèse.	84
Figure 43 - Calcul d'un critère de Nash sur des chroniques pseudo-continues, lors de l'évaluation d'un modèle événementiel, pour chaque bassin (NPC).	88
Figure 44 - Schématisation de la régionalisation.....	89
Figure 45 - Cas possible de comparaison d'un modèle hydrologique et d'une base de données de dégâts.....	90
Figure 46 – Présentation des résultats de la méthode AIGA en NPC : A) résultat général ; B) cartographie des résultats ; C) répartition en HER ;.....	95
Figure 47 - Chroniques pseudo-continues sur le bassin versant de l'Argens (Y5032010 - Méditerranée) et sur le bassin de La Severaisse (W2114010 - Alpes Internes). En noir, sont représentés les débits observés et en rouge, les débits simulés. Les seuils de période de retour de 2 ans (jaune) et 10 ans (orange) se fondent sur les débits observés, afin de mettre en évidence les problèmes et d'attribuer à chaque bassin ses débits de référence.	96
Figure 48 - Différents hydrogrammes avec le débit observé (noir), le simulé (rouge) et la pluie (bleu), illustrent les problèmes : A) de sous-estimation des pluies ; B) de manque de réactivité ; C) d'excès de réactivité ; D) de saturation des réservoirs; E) d'importance du débit initial.	98
Figure 49 – Présentation du couplage entre le module journalier (GR4J) et le module horaire (GRD) avec les 2 règles d'initialisations (production et routage en rouge) et les 4 paramètres à caler de GR4J (bordeau) et les 2 de GRD (vert).....	100
Figure 50 - Test de sensibilité des paramètres a et B_{hor} pour GRD.....	104
Figure 51 – Fonctionnement du modèle GR4J avec le module neige.....	105
Figure 52 – Présentation des résultats de GR4J en termes de C2M : A) résultat général ; B) cartographie des résultats.	107
Figure 53 – Intérêt de l'initialisation du module horaire : Variante 1.0 : unique, Variante 1 : réservoir de production, Variante B : réservoirs de production et de routage	109
Figure 54 – Comparaison des variantes 1 et 2 en termes de NPC, pour chaque HER. A) Alpes Internes ; B) Alpes du Nord ; C) Méditerranée ; D) Préalpes du Sud.	110
Figure 55 – Présentation des résultats de la modélisation journalière des débits en termes de C2M : A) Comparaison de GR4J sans la neige, à droite et avec la neige, à gauche ; B) Présentation spatiale de l'amélioration.....	112
Figure 56 – Performance de GR4J avec le module neige. Les bons résultats en C2M sont représentés en violet (50% - 75%) et bleu (>75%).	113
Figure 57 - Progression à travers les différents variantes.	115
Figure 58 – Analyse par HER de l'évolution des résultats, aux travers des quatre modèles.	116
Figure 59 – Robustesse des modèles : à gauche, les valeurs du calage et des validations pour chaque modèle, sur les 118 bassins (moyenne P1 & P2) ; à droite, la différence entre le calage moyen et la validation moyenne de P1 & P2.	118
Figure 60 – Cartographie des résultats de la variante 4 en termes de NPC en validation.....	119
Figure 61 - Nash pseudo-continu (NPC) en fonction des descripteurs physiques et hydro-climatiques. A) % neige annuelle , B) Coefficient d'écoulement.....	120
Figure 62 – A) bassin nival B) bassin nivo-glaciaire. En noir, sont montrés les débits observés ; en rouge, ceux de GR4J sans la neige et en vert, ceux de GR4J, avec la neige.....	121
Figure 63 - Comparaison des modèles GRD horaires, en version globale et distribuée, en termes de NPC. A) version initiale, B) variante 4.	123

Figure 64 – Carte hydrogéologique des 13 classes issues d’une simplification, à partir de la carte de Margat (1978) et de la notice des classes.	124
Figure 65 – Valeurs des paramètres A_{contr} , B_{contr} , C et D du modèle GR4J et B_{hor} et α pour GRD.	131
Figure 66 – Comparaison de la régionalisation unique (médiane) et par sous-région (HER). A) Boîte à moustache avec la régionalisation TOTAL, à gauche et HER, à droite ; B) L’écart de valeurs entre les 2 régionalisations : en rouge, une amélioration pour le HER, en vert, une détérioration pour le HER et en bleu, une différence inférieure à 5% ; C) En abscisse, TOTAL et en ordonnée, HER qui est meilleur lorsque les points sont situés au-dessus de la première bissectrice.	135
Figure 67 – Comparaison des régionalisations : médiane sur l’échantillon TOTAL et sur chaque sous-région HER.	136
Figure 68 – Analyse de la performance de la variante 4 régionalisée, en fonction du nombre de bassins donateurs. A) utilisant les centroïdes ; B) utilisant les exutoires.	139
Figure 69 – Analyse de la performance du modèle GRD de la variante 4 régionalisé, en fonction du nombre de bassins donateurs et en se basant sur un critère de ressemblance.	140
Figure 70 – Comparaison des régionalisations par voisinage prenant en compte la distance géographique ou la ressemblance. A) Boîte à moustache avec la distance, à gauche et la ressemblance, à droite ; B) La différence de valeurs entre les 2 régionalisations : en rouge, une amélioration pour la ressemblance, en vert, une pour la distance et en bleu, une différence inférieure à 5 points de NPC ; C) En abscisse, la distance et en ordonnée, la ressemblance qui est meilleur lorsque les points sont situés au-dessus de la première bissectrice.	141
Figure 71 – Comparaison des méthodes de voisinage sur chaque sous-région HER.	142
Figure 72 – Apport de la prise en compte de la surface dans le choix des voisins. $\alpha=0$ correspond à une distance géographique sans surface et $\alpha=1$ maximise l’importance de la surface.	144
Figure 73 – Apport de la prise en compte des performances en calage des donateurs potentiels sur la régionalisation par la distance géographique.	145
Figure 74 – Apport de la restriction géographique sur la méthode de voisinage A) Boîte à moustache sans restriction (à gauche) et avec restriction (à droite) ; B) La différence de valeurs entre les 2 cas de régionalisation : en rouge, une amélioration avec la restriction, en vert, une amélioration sans la restriction et en bleu, une différence inférieure à 5 points de NPC ; C) En abscisse, pas de restriction et en ordonnée, la restriction qui est meilleur lorsque les points sont situés au-dessus de la première bissectrice.	146
Figure 75 – Apport de la restriction géographique sur la méthode de voisinage, sur chaque sous-région HER.	147
Figure 76 – Comparaison des quatre méthodes de régionalisation retenues : médiane des paramètres sans restriction (TOTAL), distance géographique entre les centroïdes avec trois voisins, la même distance géographique au sein d’une même HER, une médiane des paramètres au sein de la HER. Les résultats sont présentés sur l’échantillon total ainsi que sur les quatre HER.	150
Figure 77 – Comparaison des performances des variantes 1, 2, 3 et 4 avec la meilleure régionalisation obtenue, soit celle des trois voisins au sein de la même HER, à gauche ; comparaison avec la version locale correspondante à droite.	152
Figure 78 – Comparaison de la version initiale et de la nouvelle A) Boîte à moustache avec l’initiale, à gauche et la nouvelle, à droite ; B) L’écart de valeurs entre les deux versions: en rouge, une amélioration avec la nouvelle, en vert, une dégradation pour la nouvelle et en bleu, aucune différence (inférieure à 5 points de NPC) ; C) En abscisse, l’ancienne version et en ordonnée, la nouvelle qui est meilleur lorsque les points sont situés au-dessus de la première bissectrice.	154
Figure 79 – Comparaison de l’ancienne version et de la nouvelle dans chaque sous-région HER.	155
Figure 80 – Comparaison de l’ancienne version d’AIGA et de la nouvelle (variante 4) pour chaque saison. A gauche, les boîtes à moustaches ; à droite, en abscisse, version AIGA initiale et en ordonnée, la nouvelle (variante 4) qui est meilleur lorsque les points sont situés au-dessus de la première bissectrice.	157
Figure 81 – Cf. chapitre 3 : superficie des bassins versants RTM (traits pointillés) et HYDRO (traits pleins).	162

Figure 82 – A) Représentation des débits maximums des événements (noir) et des signalements de dégâts (rectangle vert) sur un bassin. B) Détermination du seuil (ligne en pointillés rouge) et identification des alertes (bonnes - vert -, fausses - jaunes - et manquées - rouge -) sur le même bassin avec les mêmes événements.	164
Figure 83 – Limitation du calcul du POD et du CSI pour différencier deux modèles où le signalement ne correspond pas à une bonne alerte. En noir, sont représentés des débits maximums, en vert, le signalement de dégât et en rouge, le seuil. 165	
Figure 84 – Courbe de ROC tracé à partir des valeurs de POD en fonction du POFD pour plusieurs seuils.	166
Figure 85 - Evolution du nombre d’alertes (bonnes, manquées et fausses) en fonction du seuil fixé. Les valeurs de N évoluent de 1 à 4.	168
Figure 86 - Performances d’un modèle estimé par le POD en fonction du SR. Les différents points correspondent aux critères de contingences pour les différents seuils (N valeurs).	169
Figure 87 – Comparaison des courbes POD/SR. En noir est représenté le modèle idéal, en vert un meilleur modèle et en rouge un moins bon.	170
Figure 88 - Comparaison des performances des modèles horaires de l’ancienne méthode AIGA (noir) et de la nouvelle (orange) et d’une alerte sur la pluie (gris), sur les 123 bassins RTM.	173
Figure 89 - Comparaison des performances des méthodes d’AIGA : originelle, en noir et nouvelle, en orange et d’une alerte sur la pluie en gris, sur les bassins RTM, pour chaque HER : A) Alpes Internes ; B) Méditerranée ; C) Préalpes du Sud.	174
Figure 90 – Débits maximums observés pendant chaque événement, sur 10 années, pour les quatre bassins communs aux RTM et HYDRO, avec en pointillés rouges, le seuil le plus élevé (nombre de signalements = nombre de dépassements), en gris, tous les maxima observés, en vert, le signalement RTM coïncidant avec un débit observé supérieur au seuil d’alerte, en orange, les débits observés supérieurs au seuil et ne correspondant pas à des signalements, et représentés par les points rouges, les signalements avec des débits observés sous le seuil.	177
Figure 91 – Mise en évidence des problèmes de la nouvelle méthode AIGA en lien avec les caractéristiques des bassins versants et les données de pluie à travers les saisons. A) Superficie : comparaison des performances entre les grands bassins (orange) et les petits (noir). B) Ratio relief (pente) : comparaison des performances des bassins pentus (orange) et « plats » (noir). C) Saisons : comparaison des performances entre l’automne (orange) et l’été (noir).	179
Figure 92 – Cumul de pluie lors de l’événement du 27 juillet 2003 sur les départements des Alpes-de-Haute-Provence, des Hautes-Alpes et des Alpes-Maritimes. Comparaison des alertes de la nouvelle méthode AIGA par rapport aux trois signalements des RTM avec un seuil de déclenchement très faible (N=27).	180
Figure 93 – Événement du 29 juin 2009 sur le ruisseau du Réal (2 km ²) dans les Alpes-Maritimes (06).	181
Figure 94 – Calcul de l’aire sous la courbe par addition des aires unitaires (1→9)	191
Figure 95 – Variations, entre les variantes 4 et 4b, des trois paramètres du modèle GRD. A) Paramètre A_{hor} avec les 5 zones homogènes pour l’ensemble des paramètres. B) Paramètre a ; C) paramètre B_{hor} . Les valeurs sont supérieures pour la variante 4 quand les couleurs sont violette ou bleue (et inversement).	195
Figure 96 - Variations, entre les variantes 4b et 5, des trois paramètres du modèle GRD. A) Paramètre A_{hor} avec les 3 sous-régions HER qui ont des comportements homogènes pour l’ensemble des paramètres. B) Paramètre a ; C) paramètre B_{hor} . Les valeurs sont supérieures pour la variante 4b quand les couleurs sont violette ou bleue (et inversement).	196
Figure 97 - Variations, entre les variantes 5 et 6, des paramètres (A_{hor} , à gauche et B_{hor} , à droite) du modèle GRD. Le paramètre A_{hor} n’est pas représenté car il est identique aux deux variantes.	197
Figure 98 – Courbes POD/SR pour les quatre variantes 4, 4b, 5 et 6.	198
Figure 99 – Courbes POD/SR pour les quatre variantes 4, 4b, 5 et 6 pour chaque région HER : A) Alpes Internes, B) Méditerranée ; C) Préalpes du Sud.	200
Figure 100 – Aire sous la courbe POD/SR pour les variantes 4 (nouvelle AIGA), 4b, 5 et 6. En rouge, le résultat pour les bassins avec plus de 26.86% de leur précipitation sous phase neigeuse et en bleu, moins de 26.86%.	201

Figure 101 – Aire sous la courbe POD/SR pour les variantes 4 (nouvelle AIGA), 4b, 5 et 6. A) pour les grands bassins, en rouge et les petits, en bleu ; B) pour la pente (ratio de relief), en rouge, les fort pentus et en bleu, les plus plats.	202
Figure 102 – Courbe POD/SR sur l'ensemble des bassins RTM, pour la méthode AIGA originelle (en noir), la méthode régionalisé sur les bassins HYDRO (variante 4, orange) et finalement la régionalisation sur les RTM (variante 6, rose).....	203
Figure 103 – Illustration de cas rejetés lors de l'assignation des sites à leur bassin versant. A) Un bassin non inclus ; B) 2 ravines qui sont des affluents du cours d'eau dont le bassin versant est dessiné.	221
Figure 104 - Schéma de fonctionnement du modèle GR4J de Perrin (2010).....	223
Figure 105 – Au-dessus : taille du réservoir de production de GR4J, en ordonnée avec la neige et en abscisse sans la neige. En dessous : évolution du taux de remplissage du réservoir de production pour un affluent de l'Isère entre 1997 et 2006, avec la neige en bleu et sans la neige en rouge.	227
Figure 106 – Représentation des performances de la variante 4 en termes de Nash-Pseudo-Continu (NPC) en fonction des différents descripteurs géomorphologiques et climatiques.....	230
Figure 107 – A gauche, évaluation des variantes 1, 2, 3 et 4 régionalisé à partir de la méthode des 3 voisins au sein de la même HER sur l'échantillon des bassins RTM. A droite, évaluation des différentes régionalisations sur la variante 4 sur l'échantillon RTM.	231
Figure 108 – Représentation des performances de la nouvelle méthode AIGA (orange) et de la méthode originelle (noir) à l'aide des courbes POD/SR en fonction des différents descripteurs géomorphologiques et climatiques. En traits pleins sont représentés les fortes valeurs du descripteur et en pointillés les faibles.....	234

Liste des tableaux

Tableau 1 - Caractéristiques des divers types de radars. (Diss 2009; Breil 2013).....	20
Tableau 2 - Synthèse des 3 systèmes d'alerte aux crues pour les bassins non-jaugés.	27
Tableau 3 - Critères de sélection de l'échantillon.....	39
Tableau 4 - Paramètres et conditions initiales du modèle événementiel.	77
Tableau 5 – Version initiale de la méthode AIGA et des quatre variantes utilisées pour cette thèse, composée à partir du modèle événementiel horaire (GRD), des modèles continus journaliers (GR3J et GR4J) et du module neige (degré-jour). ...	82
Tableau 6 - Différents cas de régionalisation utilisés dans la partie REGIONAL de la thèse.....	89
Tableau 7 - Tableau de contingence des dépassements de débits observés (abscisse) et calculés (ordonnée).	90
Tableau 8 - Caractéristiques de la version initiale, modèle utilisé dans la méthode AIGA.....	94
Tableau 9 – Modèle initiale et ses 4 variantes testées lors de l'approche locale.....	106
Tableau 10 - Valeurs des R^2 entre les 6 paramètres des modèles journalier (GR4J) et horaire (GRD) et des deux meilleures descripteurs.....	133
Tableau 11 – Version initiale et les 4 variantes (dont la nouvelle version) testées lors de la phase d'élaboration (chapitre 4).	151
Tableau 12 - Caractérisation des différentes sources de données (- défaut, + intérêt, ++ fort intérêt, +++ très fort intérêt)	161
Tableau 13 - Statistiques de contingences et critères POD/SR/CSI.....	165
Tableau 14 - Synthèse de l'application sur les bassins RTM.....	172
Tableau 15 – Modèle initial et ses 4 variantes testées lors de l'approche locale.....	189
Tableau 16 - Variation de la valeur de la taille du réservoir de production du modèle horaire (A_{hor}) pour les quatre variantes.	192
Tableau 17 - Variation du paramètre a , reliant les modèles journalier et horaire, à travers les quatre variantes.....	193
Tableau 18 - Variation du paramètre B_{hor} du modèle horaire pour les quatre variantes.....	193

Annexes

<u>ANNEXE A</u>	<u>TECHNIQUE DE DETERMINATION DES BASSINS RTM</u>	<u>221</u>
<u>ANNEXE B</u>	<u>DESCRIPTION DU FONCTIONNEMENT DE GR4J.....</u>	<u>223</u>
<u>ANNEXE C</u>	<u>IMPACT DE LA PRISE EN COMPTE DE LA NEIGE SUR LA TAILLE DU RESERVOIR DE PRODUCTION DE GR4J ET SUR LA SIMULATION DE L'HUMIDITE DES SOLS</u>	<u>227</u>
<u>ANNEXE D</u>	<u>ANALYSE DES RESULTATS DE LA VARIANTE 4 EN FONCTION DE L'ENSEMBLE DES DESCRIPTEURS PHYSIQUES</u>	<u>229</u>
<u>ANNEXE E</u>	<u>PERFORMANCES DE L'ENSEMBLE DES VARIANTES ET DES REGIONALISATIONS SUR LES BASSINS DE L'ECHANTILLON RTM.....</u>	<u>231</u>
<u>ANNEXE F</u>	<u>ANALYSE DES COURBES POD/SR EN FONCTION DE L'ENSEMBLE DES DESCRIPTEURS PHYSIQUES</u>	<u>233</u>

Annexe A Technique de détermination des bassins RTM

La méthode a été développée par Ecrepont et se divise en 2 étapes (Ecrepont 2012).

La première étape : l'association bassin versant site

Une base de données des bassins versants réalisée par la société HYDRIS-Hydrologie pour le compte du SCHAPI a été utilisée. Cette base de données regroupe tous les bassins versants de la France de minimum 5 km². Le long des cours d'eau présents dans la base de données Carthage en descendant vers l'aval, un bassin versant est dessiné à chaque fois que :

- la taille du bassin versant augmente de 5km ;
- aux points de confluences ;
- aux stations hydrométriques de la banque HYDRO.

Le but de cet étape est de sélectionner les sites RTM qui sont complètement inclus dans des bassins versants de la base de données, en permettant une erreur de 500m, c'est-à-dire qu'un site peut sortir du bassin versant jusqu'à 500m.

On ne conserve que le plus petit bassin versant incluant le site RTM et à la fin de cette étape, les 405 sites ont été assignés à un bassin versant.

La deuxième étape : le contrôle visuel

Le site RTM doit représenter le cours d'eau principal drainant le bassin versant associé et il doit être inclus à l'intérieur (Figure 103-A). Une sélection visuelle est alors opérée sur les 405 sites car certains sites ne sont pas utilisables en Hydrologie (traverse une crête, à cheval sur 2 bassins versants, plusieurs ravines (Figure 103-B)) ou le site ne représente qu'un affluent (Figure 103-B). A la fin de cette opération, l'échantillon RTM ne compte plus que 123 bassins versants en tout sur les 3 départements.

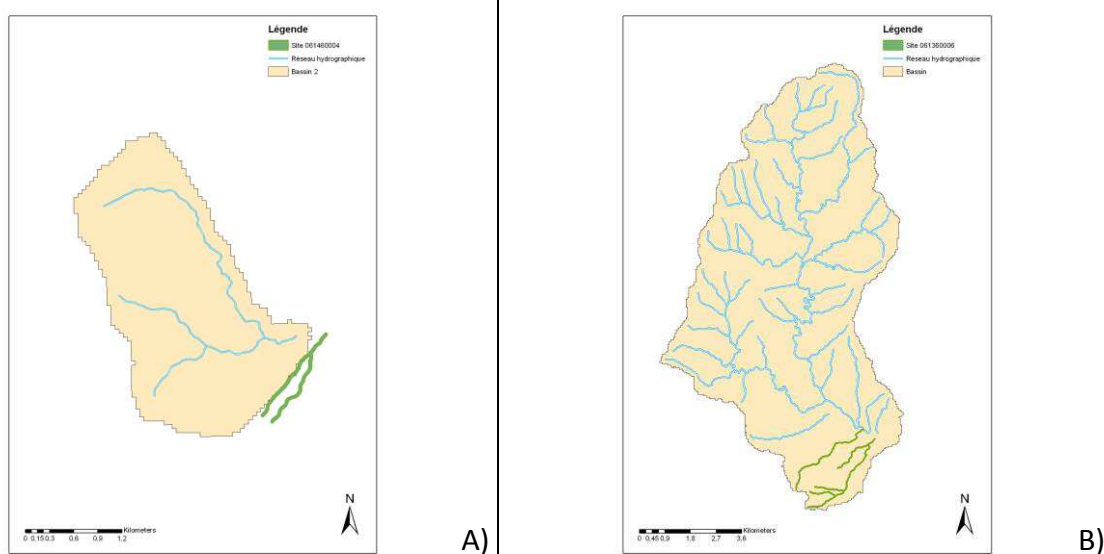


Figure 103 – Illustration de cas rejetés lors de l'assignation des sites à leur bassin versant. A) Un bassin non inclus ; B) 2 ravines qui sont des affluents du cours d'eau dont le bassin versant est dessiné.

Annexe B Description du fonctionnement de GR4J

Le modèle GR4J d'IRSTEA (Perrin, 2010) est un modèle global conceptuel qui fonctionne de manière continue. Son fonctionnement est simple et illustré sur la Figure 104. Il ne nécessite, une fois calé, que des données de précipitations (P) et d'évapotranspiration (E). Ces deux données remplissent et vident le premier réservoir, dit de production, permettant d'obtenir un état d'humidité du bassin en continu. A ce réservoir est associé un hydrogramme unitaire (SH1) et un réservoir de routage de taille B_{cont} pour reproduire l'écoulement lent ainsi qu'un demi-hydrogramme unitaire pour simuler l'écoulement rapide (SH2). Finalement, une fonction d'échange avec l'extérieur (D) permet de prendre en compte l'hydrogéologie.

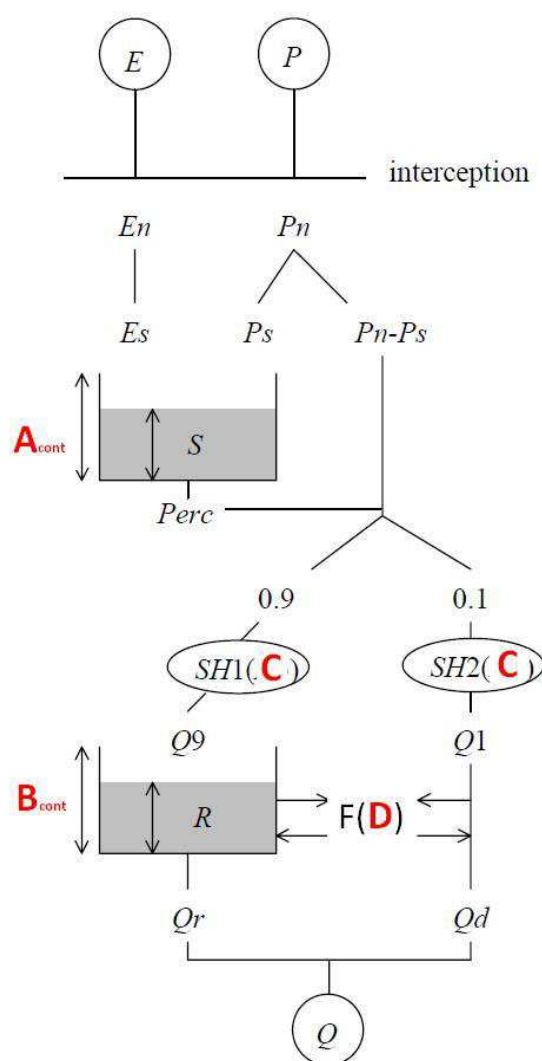


Figure 104 - Schéma de fonctionnement du modèle GR4J de Perrin (2010).

La pluie (P) et l'ETP (E) se neutralisent, à l'image du module d'initialisation de la méthode AIGA (cf Chapitre III :1.3), à chaque jour de simulation donnant la pluie nette (P_n) ou l'ETP nette (E_n) :

- si $P > E$; alors $P_n = P - E$ et $E_n = 0$
- si $P < E$; alors $P_n = 0$ et $E_n = E - P$

Réservoir de production

Ce réservoir distingue, à partir de la pluie nette (P_n), la pluie le remplissant (P_s), de celle alimentant le débit simulé (P_r) (équation 25). Cette répartition, dépendante du taux de remplissage (S/A), évolue pendant la simulation.

Quand $P_n > 0$, le réservoir de taille A (paramètre à caler) se remplit (équation 26), selon son état de remplissage (plus le réservoir est vide (S/A petit), plus la quantité de pluie contribuant au remplissage (P_s) est élevée), et selon la taille (A est petit, P_s est plus faible).

Quand $E_n > 0$, le réservoir se vide d'une quantité E_s (équation 27), dépendant de son remplissage (S) et sa taille (A). A chaque pas de temps, qu'il pleuve ou non, le réservoir se vidange par une percolation ($Perc$) (équation 28), plus forte lorsqu'il est rempli mais cette percolation reste faible. Le taux de remplissage du réservoir est mis à jour en lui soustrayant le volume d'eau percolée.

$$P_r = P_n - P_s \quad (26)$$

$$P_s = A \cdot \tanh(P_n/A) \left[\frac{1 - (S/A)^2}{1 + (S/A) \tanh(P_n/A)} \right] \quad (27)$$

$$\tanh(x) = \frac{(e^{2x} - 1)}{(e^{2x} + 1)}$$

$$E_s = A \cdot \tanh(E_n/A) \left[\frac{2(S/A) + (S/A)^2}{1 + (S/A) \tanh(E_n/A)} \right] \quad (28)$$

$$Perc = S - \left(S^{-4} + \left(\frac{9}{4} A \right)^{-4} \right)^{-\frac{1}{4}} \quad (29)$$

$$S = S - Perc \quad (30)$$

Avec P_r = la pluie routée (mm),

P_s = la pluie stockée (mm),

P_n = la pluie nette, neutralisée par l'ETP (mm),

A = taille du réservoir de production (mm),

S = remplissage du réservoir de production (mm),

E_s = Evaporation du réservoir de production (mm),

E_n = l'ETP nette, neutralisée par la pluie (P) (mm),

$Perc$ = vidange (mm)

Séparation des composantes de l'écoulement

La pluie routée (P_r) est divisée en deux parts : l'une représente un écoulement lent (90%), passant par un hydrogramme unitaire (équation 30) et le réservoir de routage, et l'autre, un écoulement rapide (10%) passant par un autre hydrogramme unitaire (équation 31) et contribuant directement au débit. Les deux hydrogrammes unitaires se fondent sur un temps de base C (un paramètre à caler) pour simuler le temps de montée, par un retard progressif des deux composantes du débit.

$$SH1(j) = \left(\frac{j}{C}\right)^{5/2} \quad \text{si } 0 \leq j \leq C \quad (31)$$

$$SH1(j) = 1 \quad \text{si } j > C$$

$$SH2(j) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{j}{C}\right)^{5/2} \quad \text{si } 0 \leq j \leq 2.C \quad (32)$$

$$SH2(j) = 1 \quad \text{si } j > 2.C$$

Avec $SH1$ = l'hydrogramme unitaire de la composante lente

$SH2$ = l'hydrogramme unitaire de la composante rapide

C = paramètre pour le temps de base

j = le pas de temps du modèle.

Calcul du débit à l'exutoire

Les deux composantes du débit (Q_9 et Q_1) sont corrigées par F qui tient compte des échanges d'eau souterraine, incluant l'infiltration profonde. La valeur de ces échanges dépend de la taille du réservoir de routage (B_{cont}) et de son remplissage (R) (equation 32). Le paramètre D est positif, si le bassin est alimenté de l'extérieur, ou au contraire, négatif, lorsqu'il subit des pertes d'eau.

$$F = D \left(\frac{R}{B_{cont}} \right) \quad (33)$$

Avec F = quantité d'eau perdue ou obtenue par les échanges extérieurs (mm),

D = paramètre déterminant si le bassin est donneur ou receveur (mm),

R = taux de remplissage du réservoir de routage (mm),

B_{cont} = taille du réservoir de routage (mm).

La composante rapide du débit (Q_1) est corrigée en tenant compte de l'échange souterrain (équation 33).

$$Q_d = \max(0, Q_1 + F) \quad (34)$$

Avec F = quantité d'eau perdue ou gagnée par les échanges extérieurs (mm),

Q_d = composante rapide du débit corrigée par l'échange F (mm),

Q_1 = composante rapide du débit (mm).

Le remplissage du réservoir de routage (R_0) est actualisé à partir de celui du pas de temps précédent (R), de la composante lente et de l'échange souterrain (F). Le débit « lent » (Q_r) est obtenu par ce taux de remplissage et par la taille du réservoir de routage (B_{cont}) (eq). Le remplissage (R) est réactualisé en fin de pas de temps (eq). Le débit simulé s'obtient par l'addition du débit rapide (Q_d) et du débit lent (Q_r).

$$R_0 = \max(0, R + Q_9 + F) \quad (35)$$

$$Q_r = \max(0, R_0 - (R_0^{-4} - B_{cont}^{-4})^{-\frac{1}{4}}) \quad (36)$$

$$R = R_0 - Q_r \quad (37)$$

Avec R_0 = remplissage du réservoir de routage actualisé

R = remplissage du réservoir au pas de temps précédent

Q_9 = composante rapide du débit (mm),

F = quantité d'eau perdue ou obtenue par les échanges extérieurs (mm),

Q_r = débit « lent »

Résumé

GR4J se compose de deux réservoirs reproduisant la dynamique des débits des bassins versants, en dissociant l'écoulement lent du rapide, à l'aide de 4 paramètres :

- A_{cont} : taille du réservoir de production
- B_{cont} : taille du réservoir de routage
- C : temps de base de l'hydrogramme unitaire
- D : paramètre d'échange

Annexe C Impact de la prise en compte de la neige sur la taille du réservoir de production de GR4J et sur la simulation de l'humidité des sols

Cette annexe montre la diminution de la taille du réservoir de production de GR4J grâce à la prise en compte de la neige. De plus, les conséquences de cette diminution sont illustrées à l'aide de l'évolution du taux de saturation du réservoir sur un affluent de l'Isère où la saisonnalité est à présent reproduite.

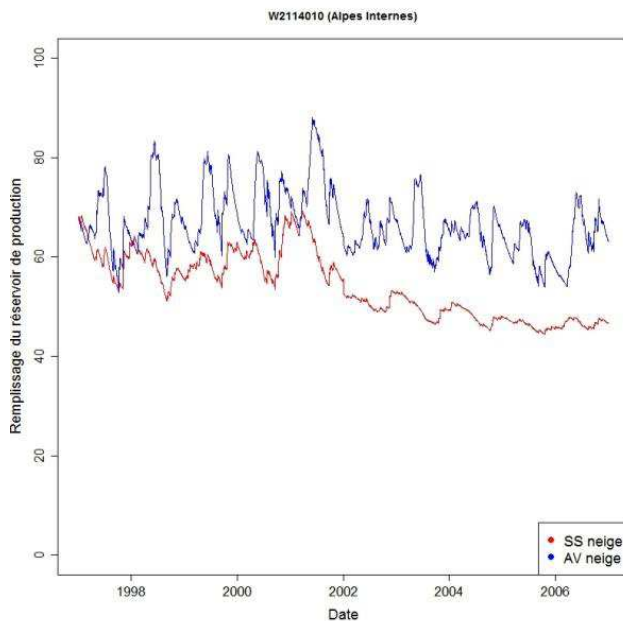
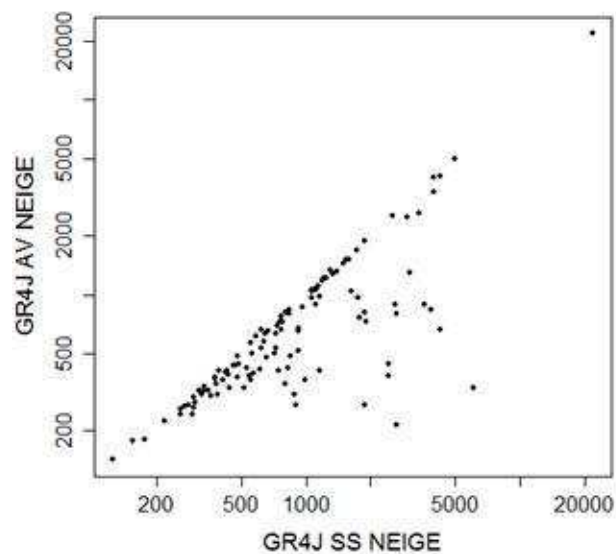
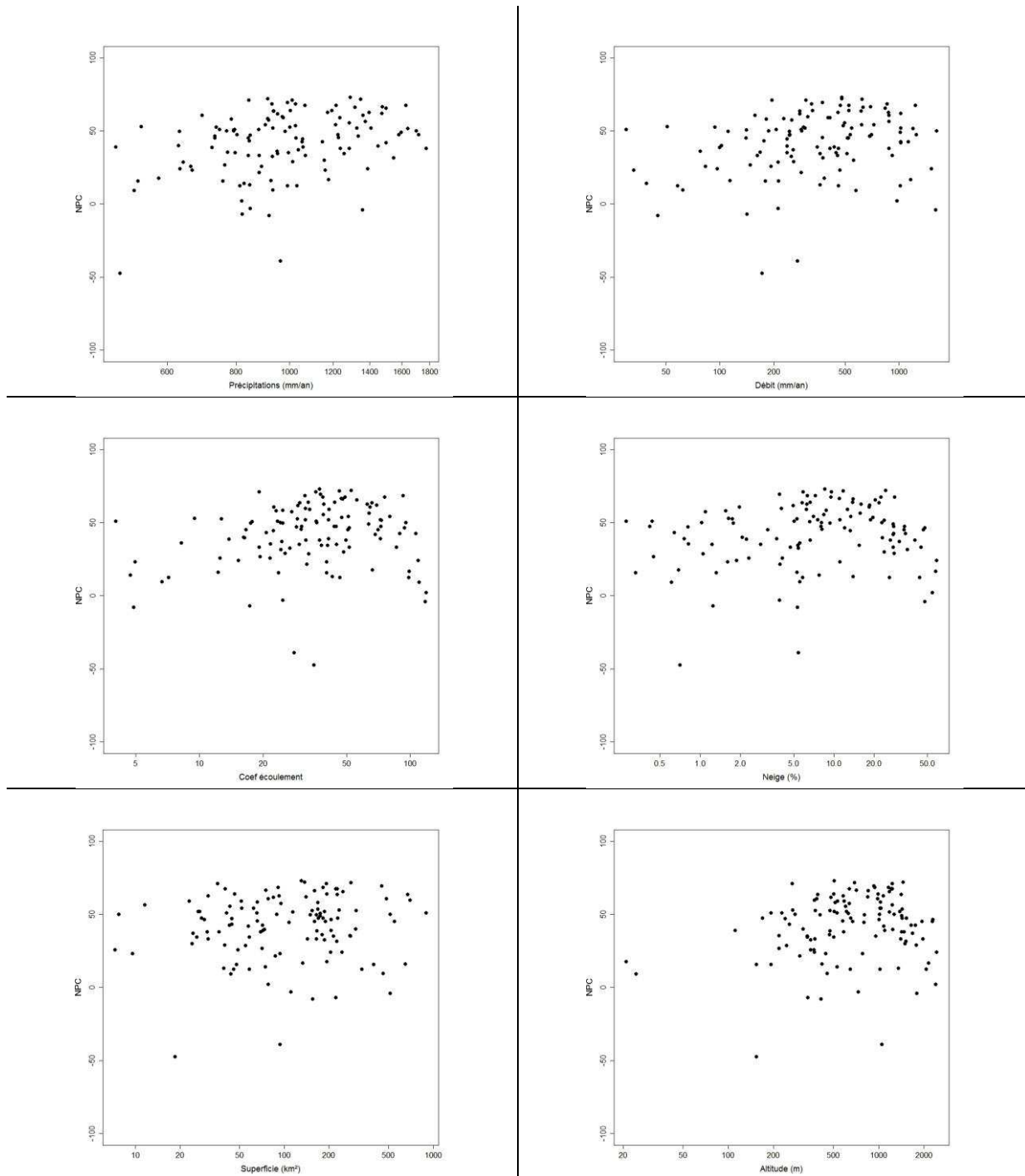


Figure 105 – Au-dessus : taille du réservoir de production de GR4J, en ordonnée avec la neige et en abscisse sans la neige. En dessous : évolution du taux de remplissage du réservoir de production pour un affluent de l'Isère entre 1997 et 2006, avec la neige en bleu et sans la neige en rouge.

Annexe D Analyse des résultats de la variante 4 en fonction de l'ensemble des descripteurs physiques

Cette annexe présente les performances de la variante 4 en fonction des descripteurs physiques des bassins versants qui ont été définis au chapitre 2 : Précipitation, Débit, Rendement (coefficient d'écoulement), la part de neige dans les précipitations annuelles, la superficie, l'altitude, la pente (ratio de relief), la température journalière, l'ETP, la part de territoire artificiel sur le bassin, la part de terrains agricoles et la part de terrains naturels (forêts, montagnes,...)



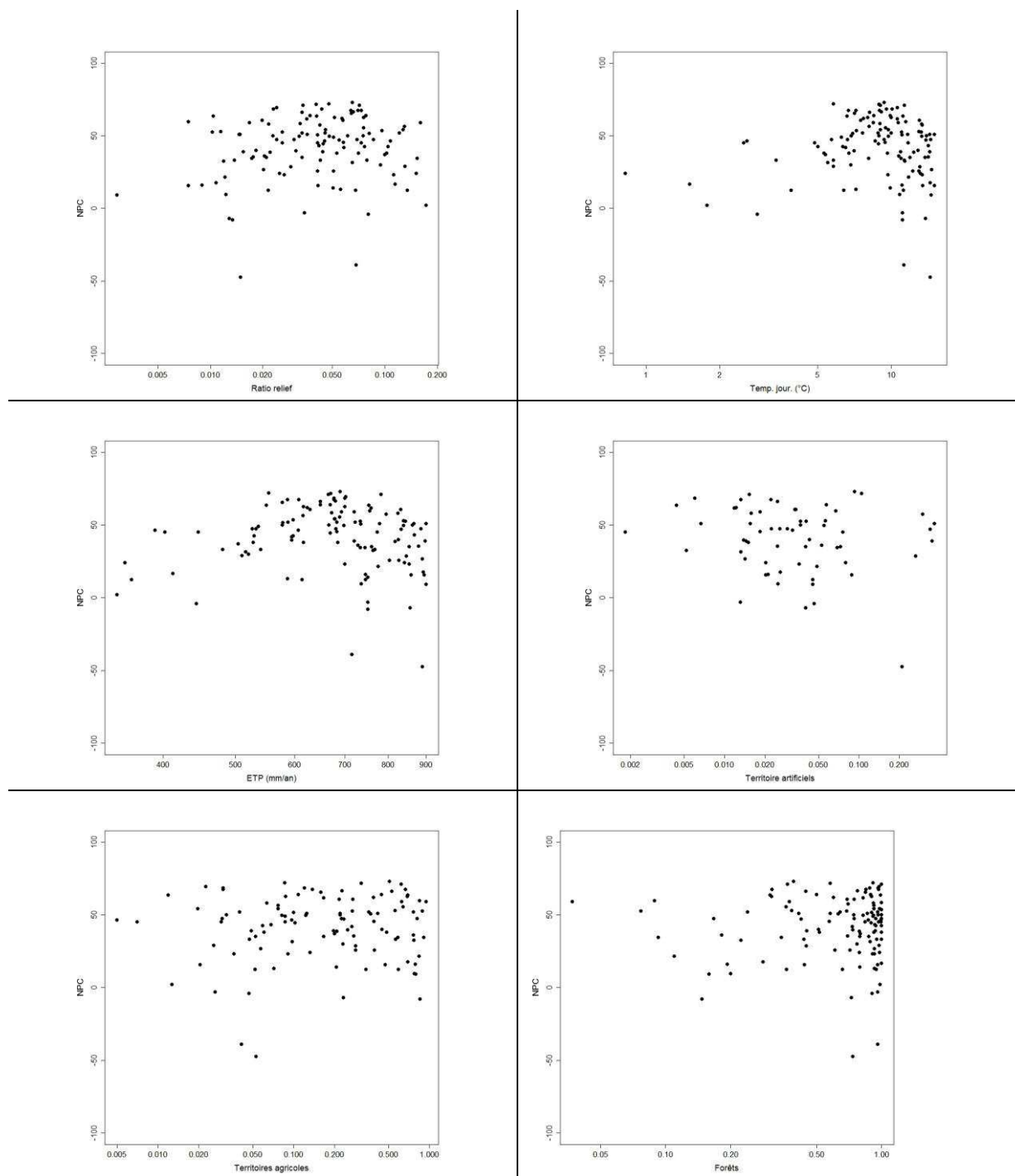
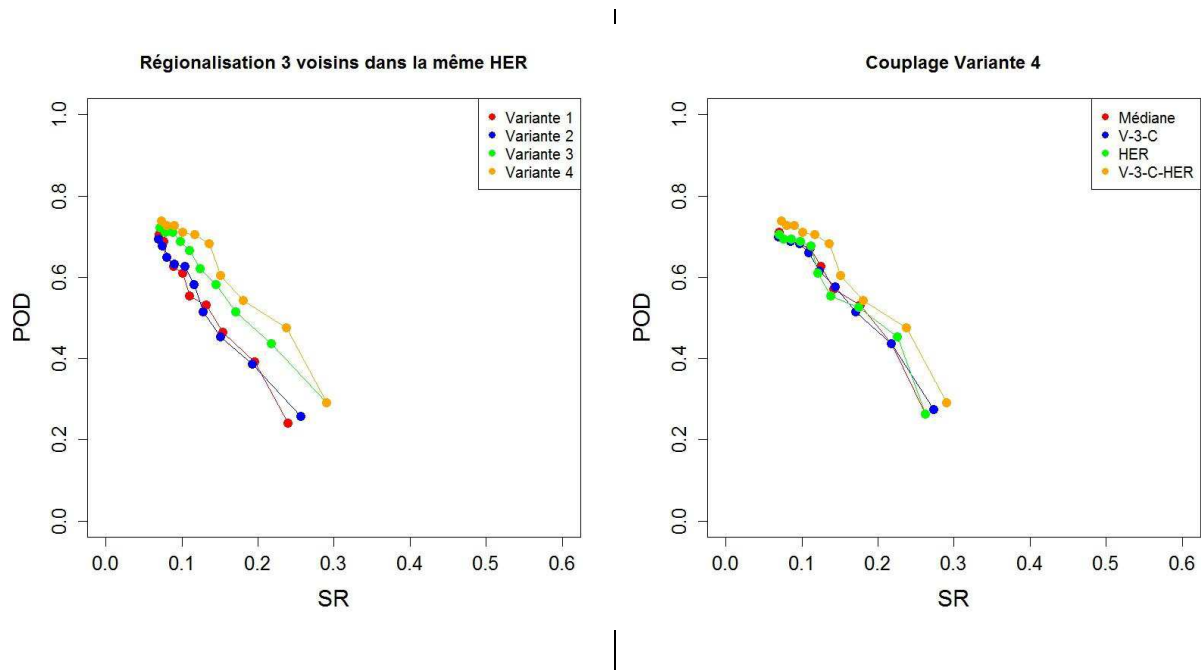


Figure 106 – Représentation des performances de la variante 4 en termes de Nash-Pseudo-Continu (NPC) en fonction des différents descripteurs géomorphologiques et climatiques.

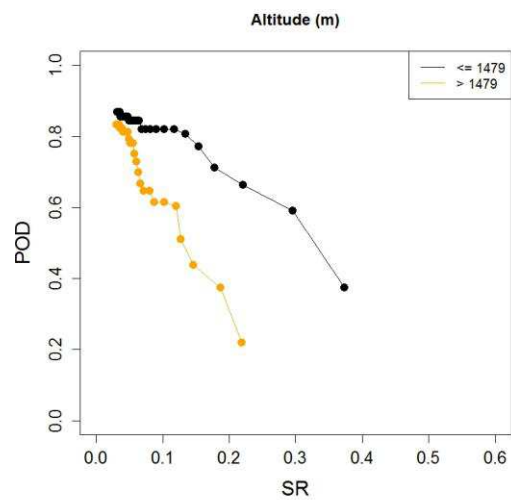
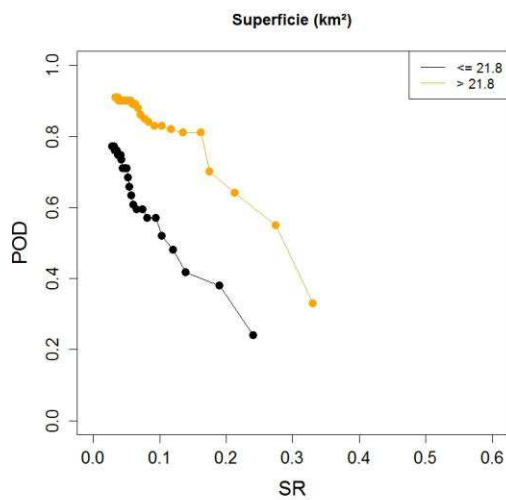
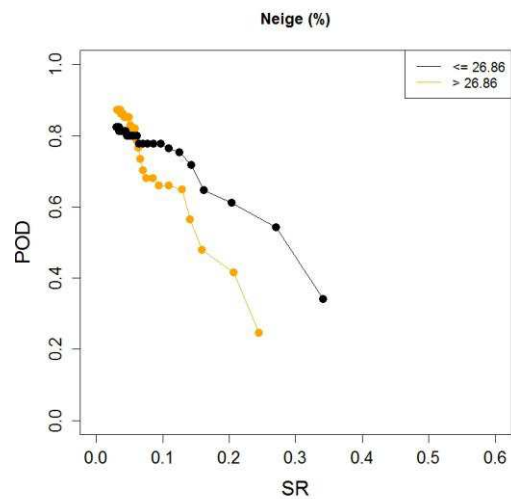
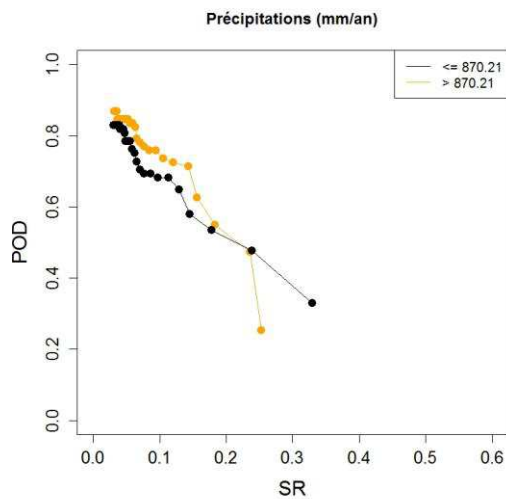
Annexe E Performances de l'ensemble des variantes et des régionalisations sur les bassins de l'échantillon RTM

Voici la présentation des résultats complémentaires du chapitre 6, relatif à l'évaluation des modèles sur les bassins non-jaugés. Les graphiques de la Figure 107 permettent de s'assurer que la variante 4 régionalisé à l'aide des trois voisins au sein de la même sous-région HER donne les meilleures performances.



Annexe F Analyse des courbes POD/SR en fonction de l'ensemble des descripteurs physiques

Cette annexe compare les performances de nouvelle méthode AIGA (orange) en fonction des descripteurs géomorphologiques et climatiques des bassins versants non-jaugés qui ont été définis au chapitre 2 : Précipitation, la part de neige dans les précipitations annuelles, la superficie, l'altitude, la pente (ratio de relief), la température journalière, l'ETP, la part de terrains agricoles et la part de terrains naturels (forêts, montagnes,...)



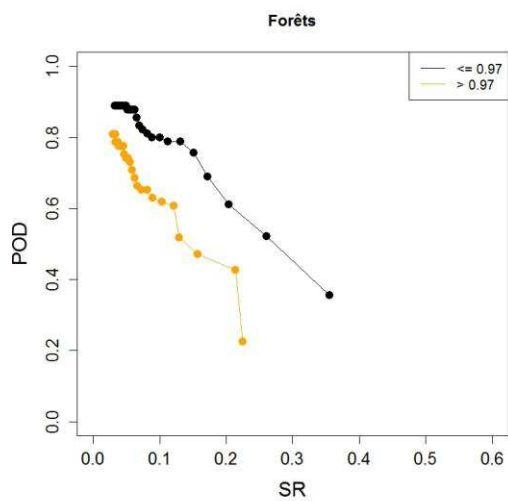
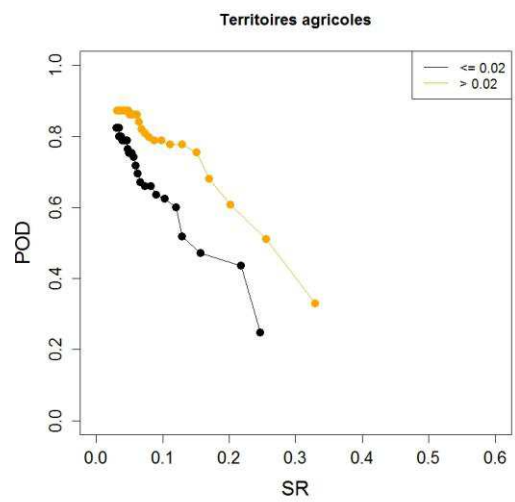
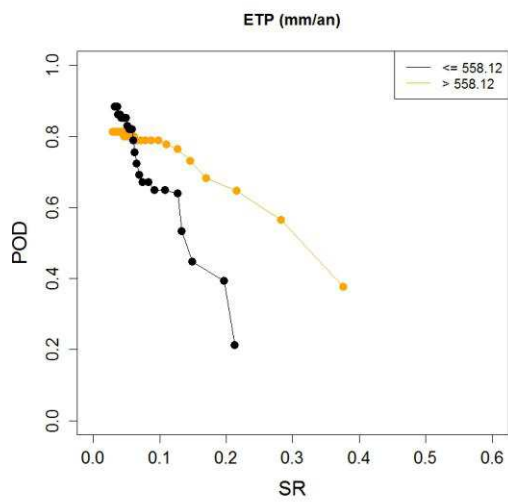
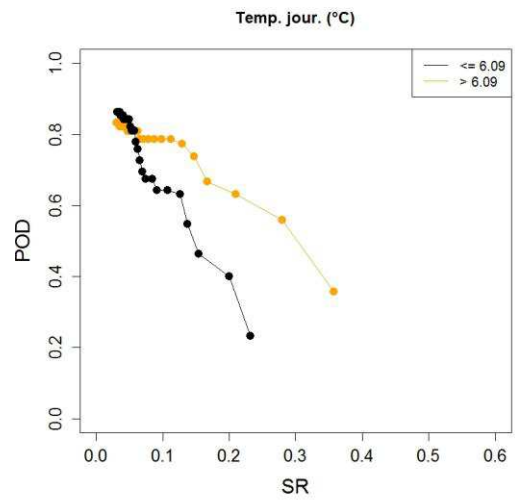
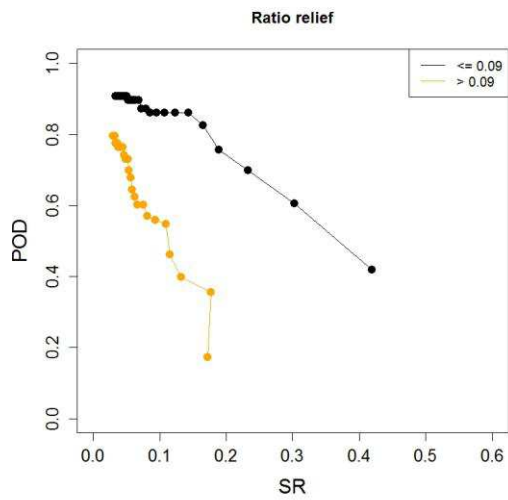


Figure 108 – Représentation des performances de la nouvelle méthode AIGA (orange) et de la méthode originelle (noir) à l'aide des courbes POD/SR en fonction des différents descripteurs géomorphologiques et climatiques. En traits pleins sont représentés les fortes valeurs du descripteur et en pointillés les faibles.

Bibliographie

- [1] Alfieri, L., J. Thielen and F. Pappenberger (2012). "Ensemble hydro-meteorological simulation for flash flood early detection in southern Switzerland." Journal of Hydrology **424-425**: p. 143-153.
- [2] Andréassian, V., C. Perrin and C. Michel (2004). "Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and parameters of watershed models." Journal of Hydrology **286**(1-4): p. 19-35.
- [3] Andréassian, V., C. Perrin, L. Berthet, N. Le Moine, J. Lerat, C. Loumagne, L. Oudin, T. Mathevet, M. H. Ramos and A. Valéry (2009). "Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models." Hydrology and Earth System Sciences(13): p. 1757-1764.
- [4] Andréassian, V. and C. Perrin (2012). "On the ambiguous interpretation of the Turc-Budyko nondimensional graph." Water Resources Research **48**(10): W10601.
- [5] Andrieu, H., J. D. Creutin, G. Delrieu and D. Faure (1997). "Use of a weather radar for the hydrology of a mountainous area. Part I: radar measurement interpretation." Journal of Hydrology **193**(1-4): p. 1-25.
- [6] Arnaud, P. (1997). Modèle de prédétermination de crues basé sur la simulation stochastique des pluies horaires : extension de sa zone de validité (pourtour méditerranéen français), paramétrisation du modèle horaire par l'information journalière et couplage des deux pas de temps: 365 p.
- [7] Arnaud, P. (2005). Simplification de gr3h pour la prédétermination des crues. Application sur des petits bassins versants. Note interne: 26 p.
- [8] Arnaud, p. and J.-A. Fine (2006). Modélisation pluie-débit pour la prédétermination des crues par SHYREG. Etude du comportement à l'infini du modèle GR simplifié. DPPR 2006. : 21 p.
- [9] Arnaud, P. (2007). Développement de la version AIGA 2. Application aux données du Gardons à Anduze. Etude DE 2007: 20 p.
- [10] Arnaud, P. (2009). Développement de la méthode AIGA version 2. Etude de l'initialisation d'une version dégradée d'AIGA sur 1039 bassins versants français. Etude DE 2008: 17 p.
- [11] Arnaud, P., J. Lavabre, C. Fouchier, S. Diss and S. P. Javelle (2011). "Sensitivity of hydrological models to uncertainty in rainfall input." Sensibilité des modèles hydrologiques aux incertitudes dues à l'information pluviométrique **56**(3): p. 397-410.
- [12] Aubert, Y. (2012). Estimation des valeurs extrêmes de débit par la méthode Shyreg: Reflexions sur l'équifinalité dans la modélisation de la transformation pluie en débit. IRSTEA, Aix-en-Provence. Paris, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6). **Thèse de doctorat**: 316 p.
- [13] Bachoc, A., R. Garçon, F. Daly, A. Gautheron, E. Gaume, C. Perrin, C. Oblé and T. Lepelletier (2011). "Besoins opérationnels et progrès actuels en matière de connaissance des phénomènes physiques dans l'hydrologie des crues." La Houille Blanche(1): p. 14-21.
- [14] Bao, Z., J. Zhang, J. Liu, G. Fu, G. Wang, R. He, X. Yan, J. Jin and H. Liu (2012). "Comparison of regionalization approaches based on regression and similarity for predictions in ungauged catchments under multiple hydro-climatic conditions." Journal of Hydrology **466-467**: p. 37-46.
- [15] Bell, V. A., A. L. Kay, R. G. Jones and R. J. Moore (2007). "Development of a high resolution grid-based river flow model for use with regional climate model output." Hydrol. Earth Syst. Sci. **11**(1): p. 532-549.
- [16] Berne, A. and W. F. Krajewski (2013). "Radar for hydrology: Unfulfilled promise or unrecognized potential?" Advances in Water Resources **51**: p. 357-366.
- [17] Berthet, L., V. Andréassian, C. Perrin and P. Javelle (2009). "How crucial is it to account for the antecedent moisture conditions in flood forecasting? Comparison of event-based and continuous approaches on 178 catchments." Hydrol. Earth Syst. Sci. **13**(6): p. 819-831.

- [18] Bertrand, M., F. Liébault and H. Piégay (2013). "Debris-flow susceptibility of upland catchments." Natural Hazards: p. 1-15.
- [19] Beven, K. J. and M. J. Kirkby (1979). "Considerations in the development and validation of a simple physically based, variable contributing area model of catchment hydrology." Surface and subsurface hydrology. Proc. Fort Collins 3rd international hydrology symposium, July 1977: p. 23-36.
- [20] Blöschl, G. (2008). "Flood warning - On the value of local information." International Journal of River Basin Management **6**(1): p. 41-50.
- [21] Bonnifait, L., G. Delrieu, M. L. Lay, B. Boudevillain, A. Masson, P. Belleudy, E. Gaume and G. M. Saulnier (2009). "Distributed hydrologic and hydraulic modelling with radar rainfall input: Reconstruction of the 8-9 September 2002 catastrophic flood event in the Gard region, France." Advances in Water Resources **32**(7): p. 1077-1089.
- [22] Borga, M. (2002). "Accuracy of radar rainfall estimates for streamflow simulation." Journal of Hydrology **267**(1-2): p. 26-39.
- [23] Borga, M., P. Boscolo, F. Zanon and M. Sangati (2007). "Hydrometeorological Analysis of the 29 August 2003 Flash Flood in the Eastern Italian Alps." Journal of Hydrometeorology **8**(5): p. 1049-1067.
- [24] Borga, M., E. Gaume, J. D. Creutin and L. Marchi (2008). "Surveying flash floods: gauging the ungauged extremes." Hydrological Processes **22**(18): p. 3883-3885.
- [25] Borga, M., E. N. Anagnostou, G. Blöschl and J. D. Creutin (2011). "Flash flood forecasting, warning and risk management: The HYDRATE project." Environmental Science and Policy **14**(7): p. 834-844.
- [26] Breil, D. (2013). "Projet RHYTMME (2007-2013)." Retrieved 30/05, 2013, from <http://rhytmme.cemagref.fr/>.
- [27] Caliano, M., I. Ruin and J. J. Gourley (2013). "Supplementing flash flood reports with impact classifications." Journal of Hydrology **477**: p. 1-16.
- [28] Carpenter, T. M., J. A. Sperflage, K. P. Georgakakos, T. Sweeney and D. L. Fread (1999). "National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems." Journal of Hydrology **224**(1-2): p. 21-44.
- [29] Caruso, A. (2012). Qualification des débits de crues SHYREG, dans le cadre du projet CARTINO. Cas des bassins versants influencés par des ouvrages hydrauliques, Note interne.
- [30] CETE-Méditerranée (2011). Volet 1 : Identification des secteurs karstiques favorables à la contribution aux crues des cours d'eau. Evaluation de la contribution du karst aux crues de l'Argens et la Nartuby. Aix-en-Provence.
- [31] Chiew, F. H. S., M. J. Stewardson and T. A. McMahon (1993). "Comparison of six rainfall-runoff modelling approaches." Journal of Hydrology **147**(1-4): p. 1-36.
- [32] Collier, C. G. (2007). "Flash flood forecasting: What are the limits of predictability?" Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society **133**(622): p. 3-23.
- [33] Coron, L., V. Andréassian, C. Perrin, J. Lerat, J. Vaze, M. Bourqui and F. Hendrickx (2012). "Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments." Water Resour. Res. **48**(5): W05552.
- [34] Cosgrove, B. A., S. Reed, F. Ding, Y. Zhang, Z. Cui and Z. Zhang (2009). Flash flood forecasting for ungauged locations with NEXRAD precipitation data, threshold frequencies, and a distributed hydrologic model, Kansas City, MO.
- [35] Creutin, J. D., H. Andrieu and D. Faure (1997). "Use of a weather radar for the hydrology of a mountainous area. Part II: radar measurement validation." Journal of Hydrology **193**(1-4): p. 26-44.
- [36] Creutin, J. D. and M. Borga (2003). "Radar hydrology modifies the monitoring of flash-flood hazard." Hydrological Processes **17**(7): p. 1453-1456.

- [37] Creutin, J. D., M. Borga, C. Lutoff, A. Scolobig, I. Ruin and L. Créton-Cazanave (2009). "Catchment dynamics and social response during flash floods: the potential of radar rainfall monitoring for warning procedures." Meteorological Applications **16**(1): p. 115-125.
- [38] Creutin, J. D., M. Borga, E. Grunfest, C. Lutoff, D. Zoccatelli and I. Ruin (2013). "A space and time framework for analyzing human anticipation of flash floods." Journal of Hydrology **482**(2): p. 14-24.
- [39] Dawson, C. W., R. J. Abrahart and L. M. See (2007). "HydroTest: A web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts." Environmental modelling and software **22**(7): p. 1034-1052.
- [40] De Marsily, G. (1994). "On the use of models in hydrology." Quelques reflexions sur l'utilisation des modeles en hydrologie **7**(3): p. 219-234.
- [41] de Saint-Aubin, C. and C. Viel (2009). Ensemble streamflow forecasting over France: use of the system SIM. European Flood Alert System (EFAS): 4th annual user meeting. Reading.
- [42] Defrance, D., P. Javelle, P. Arnaud, V. Andréassian, E. Moreau and P. Mériaux (2011). Flash flood warning methods: how to evaluate them? An application in the French Southern Alps using the AIGA warning method and different rainfall input data. EGU General Assembly 2011, 03/04/2011 - 08/04/2011. Vienna, AUT.
- [43] Defrance, D., S. Ecrepont, P. Javelle, C. Fouchier, V. Andréassian, P. Arnaud, P. Mériaux and M. Tolsa (2012). The « RHYTMME » project in mountainous aeras using X-band wheather radars: some preliminary results obtained for flash flood warning. . IMPRINTS Final Workshop 26/09/2012 - 27/09/2012. Bruxelles, BE.
- [44] Delacour, H., A. Servonnet, A. Perrot, J. F. Vigezzi and J. M. Ramirez (2005). "ROC (receiver operating characteristic) curve: Principles and application in biology." La courbe ROC (receiver operating characteristic): Principes et principales applications en biologie clinique **63**(2): p. 145-154.
- [45] Desilets, S. L. E., T. P. A. Ferré and B. Ekwurzel (2008). "Flash flood dynamics and composition in a semiarid mountain watershed." Water Resources Research **44**(12): W12436.
- [46] Diss, S. (2009). Apport de l'imagerie radar pour la connaissance spatio-temporelle des champs de pluie. Utilisation pour une modélisation prédictive des crues. Cemagref (Aix-en-Provence). Paris, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6). **Thèse de Doctorat**: 257 p.
- [47] Diss, S., J. Testud, J. Lavabre, P. Ribstein, E. Moreau and J. Parent du Chatelet (2009). "Ability of a dual polarized X-band radar to estimate rainfall." Advances in Water Resources **32**(7): p. 975-985.
- [48] Doocy, S., A. Daniels, S. Murray and T. D. Kirsch (2013). "The Human Impact of Floods: A Historical Review of Events 1980-2009 and Systematic Literature Review." PLoS Currents(APR 2013).
- [49] Duan, Q., S. Sorooshian and V. Gupta (1992). "Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall- runoff models." Water Resources Research **28**(4): p. 1015-1031.
- [50] Ecrepont, S. (2012). Aide au Développement d'un système d'alerte de crues en région montagneuse. IRSTEA. Aix-en-Provence, Stage de fin d'étude, Université Josph Fourier (Grenoble 1): 60 p.
- [51] Edijatno and C. Michel (1989). "Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres." La Houille Blanche(2): p. 113-122.
- [52] Edijatno (1991). Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Cemagref (Antony), ENGEES. **Thèse de Doctorat**: 627 p. .
- [53] Faure, D., G. Delrieu, P. Tabary, J. Parent Du Chatelet and M. Guimera (2005). "Application of the hydrologic visibility concept to estimate rainfall measurement quality of two planned weather radars." Atmospheric Research **77**(1-4): p. 232-246.
- [54] Feyen, L., J. A. Vrugt, B. Ó. Nualláin, J. van der Knijff and A. De Roo (2007). "Parameter optimisation and uncertainty assessment for large-scale streamflow simulation with the LISFLOOD model." Journal of Hydrology **332**(3-4): p. 276-289.

- [55] Fleury, P., J. C. Maréchal and B. Ladouche (2013). "Karst flash-flood forecasting in the city of Nîmes (southern France)." Engineering Geology **164**: p. 26-35.
- [56] Folton, N. and P. Arnaud (Soumis). "Utilisation des réanalyses SAFRAN pour la détermination de la ressource en eau en zone de montagne." Hydrological sciences journal.
- [57] Fouchier, C. (2010). Développement d'une méthodologie pour la connaissance régionale des crues. **Thèse de doctorat**: 266 p. .
- [58] Gaume, E. (2002). Eléments d'analyse sur les crues éclair. Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêt. Paris. **Thèse de doctorat**: 359 p. .
- [59] Gaume, E., M. Livet, M. Desbordes and J. P. Villeneuve (2004). "Hydrological analysis of the river Aude, France, flash flood on 12 and 13 November 1999." Journal of Hydrology **286**(1-4): p. 135-154.
- [60] Gaume, E., V. Bain, P. Bernardara, O. Newinger, M. Barbut, A. Bateman, L. Blaskovicová, G. Blöschl, M. Borga, A. Dumitrescu, et al. (2009). "A compilation of data on European flash floods." Journal of Hydrology **367**(1-2): p. 70-78.
- [61] Gaume, E. and M. Borga (2013). "Etat des connaissances récentes acquises sur les crues éclair en Europe : bilan du projet de recherches européen HYDRATE (2006-2010)." La Houille Blanche(2): p. 24-30.
- [62] Georgakakos, K. P. (2006). "Analytical results for operational flash flood guidance." Journal of Hydrology **317**(1-2): p. 81-103.
- [63] Goswami, M., K. M. O'Connor and K. P. Bhattarai (2007). "Development of regionalisation procedures using a multi-model approach for flow simulation in an ungauged catchment." Journal of Hydrology **333**(2-4): p. 517-531.
- [64] Gottardi, F. (2009). Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne: Utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement. Application aux grands massifs montagneux français. Grenoble, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG: 284 p. .
- [65] Gourley, J. J., J. M. Erlingis, T. M. Smith, K. L. Ortega and Y. Hong (2010). "Remote collection and analysis of witness reports on flash floods." Journal of Hydrology **394**(1-2): p. 53-62.
- [66] Gourley, J. J., J. M. Erlingis, Y. Hong and E. B. Wells (2011). "Evaluation of Tools Used for Monitoring and Forecasting Flash Floods in the United States." Weather and Forecasting **27**(1): p. 158-173.
- [67] Gourley, J. J., Y. Hong, Z. L. Flamig, A. Arthur, R. Clark, M. Caliano, I. Ruin, T. Ortel, M. E. Wiczorek, P.-E. Kirstetter, et al. (2013). "A Unified Flash Flood Database across the United States." Bulletin of the American Meteorological Society **94**(6): p. 799-805.
- [68] Guillot, A. (2013). Détermination des bassins versants français influencés par la présence de zones karstiques. . IRSTEA. Aix-en-Provence, Stage de fin d'étude, Université Joseph Fourier (Grenoble 1).
- [69] Hapuarachchi, H. A. P., Q. J. Wang and T. C. Pagano (2011). "A review of advances in flash flood forecasting." Hydrological Processes **25**(18): p. 2771-2784.
- [70] Herschy, R. W. (2002). "The world's maximum observed floods." Flow Measurement and Instrumentation **13**(5-6): p. 231-235.
- [71] Hingray, B., C. Picouet and A. Musy (2009). Hydrologie. Tome 2, Une science pour l'ingénieur, PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES.
- [72] Hingray, B., J.-P. Dedieu, T. Lebel, C. Oblé, J.-E. Sicart, D. Six, C. Vincent, P. Wagnon and I. Zin (2012). "Observations glaciologiques et hydrométéorologiques en zone de montagne : quelques problématiques et perspectives actuelles." La Houille Blanche(2): p. 5-11.
- [73] Hock, R. (2003). "Temperature index melt modelling in mountain areas." Journal of Hydrology **282**(1-4): p. 104-115.

- [74] Hrachowitz, M., H. H. G. Savenije, G. Blöschl, J. J. McDonnell, M. Sivapalan, J. W. Pomeroy, B. Arheimer, T. Blume, M. P. Clark, U. Ehret, et al. (2013). "A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)-a review." Hydrological sciences journal **58**(6): p. 1198-1255.
- [75] Javelle, P., L. Berthet, P. Arnaud, J. Lavabre and C. Perrin (2008). Comparaison de deux versions du modèle GR pour la prévision des crues sur un grand échantillon de bassins versants français. Colloque SHF-191e CST «Prévisions hydrométéorologiques», Lyon, 18-19 novembre 2008, Lyon, FRA.
- [76] Javelle, P. (2009). Initialisation d'AIGA2. Mise au point d'une règle d'initialisation à partir d'un indice journalier calculé en continu. Rapport d'étude: 37 p.
- [77] Javelle, P., D. Defrance, S. Diss, M. Tolsa, P. Arnaud and J. Lavabre (2010a). Application of the AIGA flash flood warning method to the 14th June 2010 event on the Nartuby and Argens rivers. EGU Leonardo Topical Conference on the hydrological cycle "Looking at Catchments in Colors", Luxembourg.
- [78] Javelle, P., C. Fouchier, P. Arnaud and J. Lavabre (2010b). "Flash flood warning at ungauged locations using radar rainfall and antecedent soil moisture estimations." Journal of Hydrology **394**(1-2): p. 267-274.
- [79] Javelle, P., D. Defrance, S. Ecrepont, C. Fouchier, P. Mériaux, M. Tolsa and S. Westrelin (2013a). Flash flood warning in mountainous areas using X-band weather radars and the AIGA method in the framework of the RHYTMM project. EGU General Assembly 2013, 07/04/2011 - 12/04/2011. Vienna, AUT.
- [80] Javelle, P., J. Demargne, D. Defrance, J. Pansu and P. Arnaud (2013b). "Evaluating flash flood warnings at ungauged locations using post-event survey: a case study with the AIGA warning system." Hydrological sciences journal.
- [81] Javelle, P., J. Demargne, D. Defrance, J. Pansu and P. Arnaud (accepté). "Evaluating flash flood warnings at ungauged locations using post-event survey: a case study with the AIGA warning system." Hydrological sciences journal.
- [82] Jonkman, S. N. and J. K. Vrijling (2008). "Loss of life due to floods." Journal of Flood Risk Management **1**(1): p. 43-56.
- [83] Klemes, V. (1986). "Operational testing of hydrological simulation models." Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques **31**(1): p. 13-24.
- [84] Klemes, V. (1990). The modelling of mountain hydrology : the ultimate challenge. Wallingford, ROYAUME-UNI, International Association of Hydrological Sciences.
- [85] Kobierska, F., T. Jonas, M. Zappa, M. Bavay, J. Magnusson and S. M. Bernasconi (2013). "Future runoff from a partly glacierized watershed in Central Switzerland: A two-model approach." Advances in Water Resources **55**: p. 204-214.
- [86] Krzysztofowicz, R. (1992). "Performance tradeoff characteristic of a flood warning system." Water Resources Bulletin **28**(1): p. 193-200.
- [87] Lavabre, J. and Y. Gregoris (2006). AIGA: A flood forecasting tool. Application to the French Mediterranean region. Water Resource Variability : analyses and impacts. FRIEND 2006, La Havane (Cuba), AISH Publications.
- [88] Le Moine, N., V. Andréassian, C. Perrin and C. Michel (2007). "How can rainfall-runoff models handle intercatchment groundwater flows? Theoretical study based on 1040 French catchments." Water Resources Research **43**(6): W06428.
- [89] Lefrou, C., X. Martin, J.-P. Labarthe, J. Varret, B. Mazière, R. Tordjeman and R. Feunteun (2000). Les crues des 12, 13 et 14 novembre 1999 dans les départements de l'Aude, de l'Hérault, des Pyrénées-Orientales et du Tarn. Les inondations des 12 et 13 Novembre 1999 dans l'Aude et les Pyrénées-Orientales. A. I. n. 004. Paris, Ministère de l'écologie et du développement durable: 140 p. .
- [90] Lepore, C., E. Arnone, L. V. Noto, G. Sivandran and R. L. Bras (2013). "Physically based modeling of rainfall-triggered landslides: a case study in the Luquillo forest, Puerto Rico." Hydrol. Earth Syst. Sci. **17**(9): p. 3371-3387.
- [91] Liechti, K., L. Panziera, U. Germann and M. Zappa (2013). "Flash-flood early warning using weather radar data: from nowcasting to forecasting." Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. **10**(1): p. 1289-1331.
- [92] Llasat, C., M. Llasat-Botija, O. Petrucci, A. A. Pasqua, J. Rossello, F. Vinet and L. Boissier (2013). "Floods in the north-western Mediterranean region: Presentation of the HYMEX database and comparison with pre-existing global databases." Houille Blanche(1): p. 5-9.

- [93] Llasat, M.-C., A. Atencia, L. Garrote and L. Mediero (2009). "The Hydrometeorological Forecasting in the Framework of the European Project Flash." La Houille Blanche(6): p. 66-71.
- [94] Lobligeois, F. (en cours). Utilisation de la réanalyse des lame d'eau radar pour la simulation des crues à l'échelle nationale. IRSTEA, Antony. Paris, AgroParisTech. **Thèse de doctorat**.
- [95] Makhlouf, Z. (1994). Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres: 426 p. .
- [96] Manzato, A. (2005). "An Odds Ratio Parameterization for ROC Diagram and Skill Score Indices." Weather and Forecasting **20**(6): p. 918-930.
- [97] Marchi, L., M. Borga, E. Preciso and E. Gaume (2010). "Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management." Journal of Hydrology **394**(1-2): p. 118-133.
- [98] Margat (1978). Carte hydrogéologique de la France : Systèmes aquifères. C. BRGM.
- [99] Martin, C. (2010). "Les inondations du 15 juin 2010 dans le Centre Var : réflexion sur un épisode exceptionnel." Études de Géographie Physique **4**: 35 p. .
- [100] Martin, E., G. Thirel, F. Regimbeau, J. Noilhan, L. Franchisteguy, J.-M. Soubeyroux and F. Habets (2009). "Vers une prévision d'ensemble des débits à l'échelle des grands bassins français." La Houille Blanche(5): 88-94.
- [101] Mason, I. B. (1982). "A model for the assessment of weather forecasts." Australian Meteorological Magazine **30**: p. 291-303.
- [102] Mathevet, T. (2005). Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire ? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants: 463 p. .
- [103] Mathevet, T., C. Michel, V. Andréassian and C. Perrin (2006). A bounded version of the Nash-Sutcliffe criterion for better model assessment on large sets of basins. Wallingford, AISH.
- [104] Mériaux, P., S. Westrelin, J. L. Chèze, P. Tabary, P. Javelle and D. Defrance (2011). Projet RHYTMME : déploiement d'un réseau de radars dédié à la Gestion des risques en territoires montagneux méditerranéens. L'eau en montagne, mieux observer pour mieux prévoir. Actes du colloque d'hydrotechnique 200è session du CST. Editions SHF, 261 p., Lyon, FRA.
- [105] Merz, R. and G. Blöschl (2003). "A process typology of regional floods." Water Resources Research **39**(12): SWC51-SWC520.
- [106] Météo-France. (2013a, 29/11/2012). "Les radars." Retrieved 14/10/2013, 2013, from http://comprendre.meteofrance.com/pedagogique/dossiers/observation/radars?page_id=16446
- [107] Météo-France. (2013b, 30/12/2013). "Nivôse, un réseau neige pour la haute montagne." Retrieved 30/12/2013, 2013, from <http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/observer-le-temps/moyens/les-stations-au-sol>.
- [108] Ministère de l'Écologie, d. D. d., des Transports et du Logement (2011). Plan submersions rapides. Submersions marines, crues soudaines et ruptures de digues: 79 p.
- [109] Montesarchio, V., F. Lombardo and F. Napolitano (2009). "Rainfall thresholds and flood warning: an operative case study." Nat. Hazards Earth Syst. Sci. **9**(1): p. 135-144.
- [110] Nascimento, N. (1995). Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Cemagref (Antony). Paris, CERGRENE/ENPC. **Thèse de Doctorat**: 550 p.
- [111] Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe (1970). "River flow forecasting through conceptual models part I -- A discussion of principles." Journal of Hydrology **10**(3): p. 282-290.
- [112] Nassif, S. H. and E. M. Wilson (1975). "THE INFLUENCE OF SLOPE AND RAIN INTENSITY ON RUNOFF AND INFILTRATION / L'influence de l'inclinaison de terrain et de l'intensité de pluie sur l'écoulement et l'infiltration." Hydrological Sciences Bulletin **20**(4): p. 539-553.

- [113] Naulin, J. P., O. Payrastre and E. Gaume (2013). "Spatially distributed flood forecasting in flash flood prone areas: Application to road network supervision in Southern France." Journal of Hydrology **486**: p. 88-99.
- [114] Nester, T., R. Kirnbauer, J. Parajka and G. Blöschl (2012). "Evaluating the snow component of a flood forecasting model." Hydrology Research **43**(6): p. 762-779.
- [115] Nikolopoulos, E. I., E. N. Anagnostou, M. Borga, E. R. Vivoni and A. Papadopoulos (2011). "Sensitivity of a mountain basin flash flood to initial wetness condition and rainfall variability." Journal of Hydrology **402**(3-4): p. 165-178.
- [116] Norbiato, D., M. Borga, S. Degli Esposti, E. Gaume and S. Anquetin (2008). "Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: An assessment for gauged and ungauged basins." Journal of Hydrology **362**(3-4): p. 274-290.
- [117] Organde, D., P. Arnaud, J. A. Fine, C. Fouchier, N. Folton and J. Lavabre (2013). "Regionalization of a flood frequency estimation method over metropolitan France: The SHYREG method." Régionalisation d'une méthode de prédétermination de crue sur l'ensemble du territoire français: La méthode SHYREG **26**(1): p. 65-78.
- [118] Ortega, K. L., T. M. Smith, K. L. Manross, A. G. Kolodziej, K. A. Scharfenberg, A. Witt and J. J. Gourley (2009). "The Severe Hazards Analysis and Verification Experiment." Bulletin of the American Meteorological Society **90**(10): p. 1519-1530.
- [119] Ouarda, T. B. M. J., C. Girard, G. S. Cavadias and B. Bobée (2001). "Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis." Journal of Hydrology **254**(1-4): p. 157-173.
- [120] Oudin, L., F. Hervieu, C. Michel, C. Perrin, V. Andréassian, F. Anctil and C. Loumagne (2005). "Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling." Journal of Hydrology **303**(1-4): p. 290-306.
- [121] Oudin, L. (2006). "Une formule simple d'évapotranspiration potentielle pour la modélisation pluie-débit à l'échelle du bassin versant." Houille Blanche(6): p. 113-120.
- [122] Oudin, L., C. Perrin, T. Mathevet, V. Andréassian and C. Michel (2006). "Impact of biased and randomly corrupted inputs on the efficiency and the parameters of watershed models." Journal of Hydrology **320**(1-2): p. 62-83.
- [123] Oudin, L., V. Andréassian, C. Perrin, C. Michel and N. Le Moine (2008). "Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments." Water Resources Research **44**(3): W03413.
- [124] Oudin, L., A. Kay, V. Andréassian and C. Perrin (2010). Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar? Water Resour. Res., AGU. **46**: W11558.
- [125] Palmer, T. n., J. Barkmeijer, B. R., E. Klinker and D. Richardson (2002). "L'avenir de la prévision d'ensemble." La Météorologie(36): 6 p.
- [126] Papa, M. N., V. Medina, F. Ciervo and A. Bateman (2013). "Derivation of critical rainfall thresholds for shallow landslides as a tool for debris flow early warning systems." Hydrol. Earth Syst. Sci. **17**(10): p. 4095-4107.
- [127] Parajka, J., R. Merz and G. Blöschl (2005). "A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters." Hydrol. Earth Syst. Sci. **9**(3): p. 157-171.
- [128] Parajka, J., G. Blöschl and R. Merz (2007). "Regional calibration of catchment models: Potential for ungauged catchments." Water Resources Research **43**(6): W06406.
- [129] Parajka, J., A. Viglione, M. Rogger, J. L. Salinas, M. Sivapalan and G. Blöschl (2013). "Comparative assessment of predictions in ungauged basins-Part 1: Runoff-hydrograph studies." Hydrology and Earth System Sciences **17**(5): p. 1783-1795.
- [130] Parent du Chatelet, J. (2003). "Aramis, le réseau français de radars pour la surveillance des précipitations." La Météorologie **8**(40): p. 44-52.
- [131] Patil, S. and M. Stieglitz (2012). "Controls on hydrologic similarity: role of nearby gauged catchments for prediction at an ungauged catchment." Hydrol. Earth Syst. Sci. **16**(2): p. 551-562.

- [132] Paturol, J. E., E. Servat and A. Vassiliadis (1995). "Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data -- case of the GR2M model." Journal of Hydrology **168**(1-4): p. 111-125.
- [133] Payrastre, O., E. Gaume and H. Andrieu (2011). "Usefulness of historical information for flood frequency analyses: Developments based on a case study." Water Resour. Res. **47**(8): W08511.
- [134] Perret, C., A. Hauet, D. Parrel, G. SAYSSET, P. Vignon and P. Schnegg (2012). "Le réseau d'observation hydroclimatologique de montagne d'EDF – Etat des lieux. Mesures de débit par dilution d'un traceur fluorescent." La Houille Blanche(3): p. 18-25.
- [135] Perrin, C. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative: 530 p. .
- [136] Perrin, C. (2002). "Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative." La Houille Blanche(6-7): p. 84-91.
- [137] Perrin, C., C. Michel and V. Andréassian (2003). "Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation." Journal of Hydrology **279**(1-4): p. 275-289.
- [138] Perrin, C., L. Oudin, V. Andreassian, C. Rojas-Serna, C. Michel and T. Mathevet (2007). "Impact of limited streamflow data on the efficiency and the parameters of rainfall-runoff models." Hydrological sciences journal **52**(1): p. 131-151.
- [139] Quintana-Seguí, P., P. Le Moigne, Y. Durand, E. Martin, F. Habets, M. Baillon, C. Canellas, L. Franchisteguy and S. Morel (2008). "Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France." Journal of Applied Meteorology and Climatology **47**(1): p. 92-107.
- [140] Ramos, M. H., J. Thielen and F. Pappenberger (2008). Utilisation de la prévision météorologique d'ensemble pour la prévision hydrologique opérationnelle et l'alerte aux crues. SHF Colloque Prévisions hydrométéorologiques, Lyon, 18-19 novembre 2008, Paris, Societe Hydrotechnique de France.
- [141] Ramos, M. H., J. Thielen and A. de Roo (2009). Prévision hydrologique d'ensemble et alerte avec le Système européen d'alerte aux crues (EFAS) : cas des crues du bassin du Danube en août 2005. Paris, Ed. Hermès Lavoisier.
- [142] Randrianasolo, A., M. H. Ramos and V. Andréassian (2011). "Hydrological ensemble forecasting at ungauged basins: using neighbour catchments for model setup and updating." Adv. Geosci. **29**: p. 1-11.
- [143] Randrianasolo, A. (2012). Généralisation de l'approche d'ensemble à la prévision hydrologique dans les bassins versants non jaugés: 314 p. .
- [144] Reed, S., D. Johnson and T. Sweeney (2002). "Application and national geographic information system database to support two-year flood and threshold runoff estimates." Journal of Hydrologic Engineering **7**(3): p. 209-219.
- [145] Reed, S., J. Schaake and Z. Zhang (2007). "A distributed hydrologic model and threshold frequency-based method for flash flood forecasting at ungauged locations." Journal of Hydrology **337**(3-4): p. 402-420.
- [146] Rico, M., G. Benito and A. Barnolas (2001). "Combined palaeoflood and rainfall-runoff assessment of mountain floods (Spanish Pyrenees)." Journal of Hydrology **245**(1-4): p. 59-72.
- [147] Roche, M. (1975). "Méthodes de calcul des crues brutales - réseaux d'observation, leur exploitation et collecte des données." Bulletin des sciences hydrologiques **20**(1): p. 13-34.
- [148] Rojas-Serna, C., C. Michel, C. Perrin and V. Andréassian (2006). Ungauged catchments: How make the most of a few streamflow measurements? Wallingford, AISH.
- [149] Roux, H., D. Labat, P. A. Garambois, M. M. Maubourguet, J. Chorda and D. Dartus (2011). "A physically-based parsimonious hydrological model for flash floods in Mediterranean catchments." Nat. Hazards Earth Syst. Sci. **11**(9): p. 2567-2582.
- [150] Rouzeau, M., X. Martin and J.-C. Pauc (2010). Retour d'expérience des inondations survenues dans le département du Var les 15 et 16 juin 2010. Inspection générale de l'environnement. N°10-070-02. Paris, Ministère de l'écologie et du développement durable.

- [151] Ruin, I., J.-D. Creutin, S. Anquetin and C. Lutoff (2008). "Human exposure to flash floods – Relation between flood parameters and human vulnerability during a storm of September 2002 in Southern France." Journal of Hydrology **361**(1–2): p. 199-213.
- [152] Ruin, I., B. Boudevillain, J. D. Creutin and C. Lutoff (2013). Toward a space-time scale framework for the study of everyday life activity's adaptation to hazardous hydro-meteorological conditions: Learning from the June 15th, 2010 flash flood event in Draguignan (France). European Geosciences Union: General Assembly 2013, Vienne.
- [153] Ruiz-Villanueva, V., M. Borga, D. Zoccatelli, L. Marchi, E. Gaume and U. Ehret (2012). "Extreme flood response to short-duration convective rainfall in South-West Germany." Hydrol. Earth Syst. Sci. **16**(5): p. 1543-1559.
- [154] Sauquet, E. (2006). Cartographie des écoulements mensuels moyens en France. Note de synthèse: 92 p. .
- [155] Schaefer, J. T. (1990). "The critical success index as an indicator of warning skill." Wea. Forecasting **5**: p. 570-575.
- [156] Seibert, J. and K. J. Beven (2009). "Gauging the ungauged basin: How many discharge measurements are needed?" Hydrology and Earth System Sciences **13**(6): p. 883-892.
- [157] Singh, S. K. and A. Bárdossy (2012). "Calibration of hydrological models on hydrologically unusual events." Advances in Water Resources **38**(0): p. 81-91.
- [158] Sivapalan, M., K. Takeuchi, S. Franks, V. Gupta, H. Karambiri, V. Lakshmi, X. Liang, J. J. McDonnell, E. Mendiondo, P. O'Connell, et al. (2003). "IAHS decade on predictions in ungauged basins (PUB), 2003-2012: shaping an exciting future for the hydrological sciences." Hydrological sciences journal **48**(6): p. 857 - 880.
- [159] Spreafico, M. (2006). Flash floods in mountain areas. Climate variability and change : hydrological impacts. Wallingford, UK, AISH. **308**: p. 232-238.
- [160] Sui, J. and G. Koehler (2001). "Rain-on-snow induced flood events in Southern Germany." Journal of Hydrology **252**(1–4): p. 205-220.
- [161] Swets, J. A. (1973). "The relative operating characteristic in psychology." Science **182**(4116): p. 990-1000.
- [162] Tabary, P. (2007). "The New French Operational Radar Rainfall Product. Part I: Methodology." Weather and Forecasting **22**(3): p. 393-408.
- [163] Tabary, P., J. Desplats, K. Do Khac, F. Eideliman, C. Gueguen and J. C. Heinrich (2007). "The New French Operational Radar Rainfall Product. Part II: Validation." Weather and Forecasting **22**(3): p. 409-427.
- [164] Tabary, P., P. Dupuy, G. L'Henaff, C. Gueguen, L. Moulin, O. Laurantin and C. Merlier (2012). A 10-year (1997–2006) reanalysis of Quantitative Precipitation Estimation over France: methodology and first results. International Symposium on "Weather Radar and Hydrology", Exeter, IAHS.
- [165] Tao, J. and A. P. Barros (2013a). "Prospects for flash flood forecasting in mountainous regions – An investigation of Tropical Storm Fay in the Southern Appalachians." Journal of Hydrology **506**(0): p. 69–89.
- [166] Tao, J. and A. P. Barros (2013b). "Coupled prediction of flood response and debris flow initiation during warm and cold season events in the Southern Appalachians, USA." Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. **10**(7): p. 8365-8419.
- [167] Thielen-del Pozo, J. (2012). Learning from the European Flood Awareness System (EFAS) to develop European Flash Flood Early Warning capacities. IMPRINTS final workshop. Bruxelles.
- [168] Trambly, Y., C. Bouvier, P. A. Ayrat and A. Marchandise (2011). "Impact of rainfall spatial distribution on rainfall-runoff modelling efficiency and initial soil moisture conditions estimation." Natural Hazards and Earth System Science **11**(1): p. 157-170.
- [169] Trambly, Y., R. Bouaicha, L. Brocca, W. Dorigo, C. Bouvier, S. Camici and E. Servat (2012). "Estimation of antecedent wetness conditions for flood modelling in northern Morocco." Hydrology and Earth System Sciences **16**(11): p. 4375-4386.

- [170] Valéry, A. (2010). Modélisation précipitations – débit sous influence nivale. Élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. Cemagref (Antony). Paris, AgroParisTech. **Thèse de Doctorat**: 405 p. .
- [171] Versini, P.-A., E. Gaume and H. Andrieu (2009). "Simulations hydrométéorologiques distribuées et prévision des coupures de routes dans le gard." La Houille Blanche(6): p. 72-75.
- [172] Versini, P. A., E. Gaume and H. Andrieu (2010). "Application of a distributed hydrological model to the design of a road inundation warning system for flash flood prone areas." Nat. Hazards Earth Syst. Sci. **10**(4): p. 805-817.
- [173] Versini, P. A. (2012). "Use of radar rainfall estimates and forecasts to prevent flash flood in real time by using a road inundation warning system." Journal of Hydrology **416-417**: p. 157-170.
- [174] Vidal, J. P., E. Martin, L. Franchistéguy, M. Baillon and J. M. Soubeyroux (2010). "A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system." International Journal of Climatology **30**(11): p. 1627-1644.
- [175] Viviroli, D., H. Mittelbach, J. Gurtz and R. Weingartner (2009). "Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland - Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results." Journal of Hydrology **377**(1-2): p. 208-225.
- [176] Wasson, J. G., A. Chandesris, H. Pella and Y. Souchon (2001). Définition des hydroécocorégions françaises. Méthodologie de détermination des conditions de référence au sens de la Directive Cadre pour la gestion des eaux. rapport de phase 1: 68 p. .
- [177] Wikipedia. (2013a, 23/09/2013). "Ouvèze." Retrieved 03/01/2014, 2013, from http://fr.wikipedia.org/wiki/Ouv%C3%A8ze#Crue_du_22_septembre_1992.
- [178] Wikipedia. (2013b, 25/04/2013). "Corine Land Cover." Retrieved 04/06/2013, 2013, from http://fr.wikipedia.org/wiki/Corine_Land_Cover.
- [179] Yamakoshi, T., Y. Nakano, T. Ishizuka, K. Tamura and Y. Hasegawa (2012). Time Sequence on the Flash Flood Disaster in the Tsurugi River, Hofu City, in Japan. EGU General Assembly 2012, 22/04/2012 - 25/04/2012, Vienna, AUT.
- [180] Younis, J., S. Anquetin and J. Thielen (2008). "The benefit of high-resolution operational weather forecasts for flash flood warning." Hydrology and Earth System Sciences **12**(4): 1039-1051.
- [181] Zanon, F., M. Borga, D. Zoccatelli, L. Marchi, E. Gaume, L. Bonnifait and G. Delrieu (2010). "Hydrological analysis of a flash flood across a climatic and geologic gradient: The September 18, 2007 event in Western Slovenia." Journal of Hydrology **394**(1-2): p. 182-197.
- [182] Zoccatelli, D., M. Borga, F. Zanon, B. Antonescu and G. Stancalie (2010). "Which rainfall spatial information for flash flood response modelling? A numerical investigation based on data from the Carpathian range, Romania." Journal of Hydrology **394**(1-2): p. 148-161.

