

**Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris  
et École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts**

---

**Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie  
Parcours Hydrologie-Hydrogéologie**

**Quelle donnée de précipitation pour un modèle global de  
prévision Pluie – Débit ?**

**Lionel Berthet**

**Directeurs de recherche : Vazken Andréassian, Charles Perrin**



**Unité Hydrosystèmes et  
Bioprocédés du groupement  
d'Antony**

**Septembre 2006**





## Résumé

La modélisation Pluie–Débit employée à des fins de prévision des crues permet d’allonger l’horizon de prévision par rapport à des méthodes ne se basant que sur l’observation de débits en amont. La donnée de pluie est difficile à évaluer, car elle se base sur un faible nombre d’observations. D’autre part, les modèles sont conçus pour des pas de temps d’une durée déterminée. Dans ce travail, le modèle global de prévision de GRP, conçu et optimisé pour le pas de temps journalier est utilisé pour comparer les performances obtenues avec trois chroniques horaires différentes de pluies pour la même période sur quarante bassins versants. La recherche des caractéristiques d’une donnée de pluie utile au modèle conduit à examiner les cumuls partiels et la répartition temporelle des données. Ce travail est également l’occasion d’une première évaluation du fonctionnement du modèle GRP au pas de temps horaire. Finalement, des pistes d’amélioration du modèle pour l’adapter au pas de temps horaire sont examinées.

## Abstract

Using Rainfall–Runoff models for flood forecasting allows to explore further forecast horizons, compared with methods only-based on upstream discharges observations. Evaluation of rainfall data is an awkward subject, due to the weak number of measurements. Here, the lumped model GRP designed for daily timestep is used to compare the performances reached by the model working with three different rainfall data for the same period on forty basins. Characteristics of rainfall data which are useful for this model are looked for : rainfall partial sum and distribution according to time appeared to be strongly involved in such a definition. This work is also the first observation of how the model GRP works at hourly timestep. Finally, changes in order to improve the model behaviour at hourly timestep are tested.

## Remerciements

Je remercie chaleureusement Vazken Andréassian pour ses nombreux conseils et suggestions, sa disponibilité et l'ambiance qu'il sait créer au sein de l'équipe d'Hydrologie de l'unité de Recherche, toutes choses m'ayant permis de réaliser ce stage dans les meilleures conditions.

Ma gratitude va également à Charles Perrin qui a répondu patiemment à de nombreuses questions techniques concernant la signification et les motivations du code informatique et qui, à quelques occasions, a modéré mes essais pour assurer la rigueur nécessaire à cette étude.

Enfin, je tiens à remercier tous les membres de l'équipe d'Hydrologie et de l'unité de Recherche HBAN pour l'accueil en son sein et les aides qu'ils m'ont fournies, ainsi que pour m'avoir initié à l'ultimate frisbee, un sport aussi simple en apparence qu'intense et ludique dans sa pratique.

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
Les spécificités de la prévision, comparée à la simulation . . . . .	2
Difficultés scientifiques de la prévision . . . . .	3
Prévision au pas de temps fin . . . . .	4
<b>I Modèle et données employés</b>	<b>6</b>
I.1 Le modèle GRP . . . . .	6
I.2 Une étude sur 40 bassins versants français . . . . .	8
I.3 Les différentes données de pluie . . . . .	11
I.3.1 Les pluies mesurées au sol . . . . .	11
I.3.2 Les pluies issues de l'interpolation SAFRAN . . . . .	11
I.3.3 Construire de nouvelles données de pluies . . . . .	12
<b>II Comparaison statistique des deux chroniques de pluie</b>	<b>13</b>
<b>III Comparaison des performances en prévision</b>	<b>14</b>
III.1 Méthodologie employée . . . . .	14
III.2 Résultats globaux . . . . .	16
III.3 Recherche de corrélations entre performances et caractéristiques des bassins versants . . . . .	23
III.4 Recherche de corrélations entre performances et caractéristiques des données de pluie . . . . .	24
III.5 Quelle finesse pour le pas de temps ? . . . . .	26
<b>IV Fonctionnement du modèle GRP au pas de temps horaire</b>	<b>31</b>
IV.1 Performances moyennes . . . . .	31
IV.2 Stabilité des calages obtenus . . . . .	33
IV.3 Améliorer GRP au pas de temps horaire . . . . .	36
IV.3.1 Ces pistes sont-elles liées au pas de temps ? . . . . .	36
IV.3.2 Tests réalisés . . . . .	37
IV.3.3 Résultats des comparaisons . . . . .	38
<b>Conclusions</b>	<b>43</b>
<b>Références</b>	<b>47</b>



## Introduction

Les inondations restent des phénomènes naturels meurtriers : rien qu'en France, elles tuent en moyenne plusieurs personnes par an<sup>1</sup>. Elles comptent également parmi les catastrophes naturelles entraînant le plus de dégâts matériels<sup>2</sup>. Améliorer la lutte contre ces phénomènes reste un objectif de notre société, exprimé par l'État et également par des personnes privées comme les assureurs.

Cette lutte est réalisée par plusieurs moyens. Les deux principaux sont la prévention (liée à la prédétermination) des crues et leur prévision. La prédétermination est liée à la simulation des crues et à l'étude des chroniques passées. Elle vise à déterminer l'aléa en fonction de la localisation. Cette information croisée avec la vulnérabilité des hommes et des biens permet de définir une carte des risques. L'étape suivante est alors de limiter soit la vulnérabilité en empêchant les populations de s'installer aux endroits les plus dangereux, voire même en les déplaçant, soit l'aléa, par exemple en travaillant le cours d'eau par des ouvrages hydrauliques. Cette approche ne peut malheureusement pas tout résoudre : elle est limitée par des impossibilités techniques et des enjeux économiques (tout site ou population ne peut pas être protégé à un coût raisonnable). En outre, les évolutions humaines modifient fortement la carte de la vulnérabilité : c'est par exemple le cas des migrations des populations vers des zones urbaines densément peuplées et souvent situées sur des cours d'eau, ou la multiplication des biens et installations à protéger. La prévision entre alors en jeu pour annoncer le plus tôt possible de l'approche d'un événement de crue, de façon à permettre la protection des personnes (évacuations si nécessaire) et des biens.

Améliorer la prévision des crues passe par de nombreux chantiers concernant par exemple la coordination entre équipes météorologiques et hydrologiques, la communication entre différents professionnels et avec les populations concernées (Houdant, 2004). Cela doit également passer par une recherche en hydrologie orientée par l'objectif de la prévision opérationnelle : la prévision est un domaine bien spécifique en hydrologie qui se distingue par

---

<sup>1</sup>Le Centre européen de Prévention des Risques avance le chiffre d'une dizaine de morts par an en moyenne.

<sup>2</sup>En France, entre 150 et 300 millions d'euros, soit 80 % du coût des dommages imputables aux risques naturels, d'après le dossier d'information produit le 15 décembre 2000 par le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.

son objet même et ses modalités d'autres champs de recherche s'intéressant à la même partie du cycle de l'eau (allant des précipitations à la formation d'un débit) comme la simulation hydrologique. Si ces deux branches partagent un certain nombre de difficultés techniques qui ne sont toujours pas totalement résolues, la prévision exprime ces difficultés d'une manière qui lui est propre et présente en outre des problèmes spécifiques. Ces particularités expliquent les sujets abordés au cours de ce stage de master et les recherches menées.

### **Les spécificités de la prévision, comparée à la simulation**

#### **Inscription dans le temps**

Ce qui rend la prévision si spécifique, comparée à la simulation est son inscription dans le temps. Cette temporalité crée non seulement des conditions de travail différentes mais modifie la nature même de l'objet sur lequel ce travail est réalisé. En effet, la simulation vise à reproduire le mieux possible la partie du cycle de l'eau allant de la chute de la précipitation à la formation d'un débit sur une longue période. La prévision ne s'intéresse qu'à la formation du débit dans le futur. Comme la dynamique du cycle de l'eau lui interdit de travailler trop loin dans le futur, le prévisionniste se concentre sur une courte durée (sur quelques pas de temps). Sur une telle durée, il est judicieux de ne pas s'intéresser qu'à la transformation des précipitations en débit, mais également à la propagation des débits. Aussi, la plupart des modèles conçus pour la prévision sont soit Débit-Débit (et néglige alors l'information contenue dans les données de précipitation) soit « (Pluie, Débit)-Débit » (l'outil modélise la transformation de la précipitation en débit, mais prend également en compte les derniers débits observés pour prédire les prochains débits). En termes d'automatique, les modèles de prévision se démarquent des modèles de simulation car ils s'enrichissent de boucles de rétro-contrôle.

#### **Conditions de travail**

Les conditions de travail sont également très différentes. Pour effectuer une simulation, l'opérateur dispose généralement de temps pour collecter l'ensemble des chroniques de données, les contrôler, éventuellement les corriger puis effectuer l'ensemble de la simulation (pendant une durée éventuellement limitée par les ressources informatiques). Le prévisionniste doit collecter les données des derniers pas de temps (passés et éventuellement futurs), vérifier leur qualité et effectuer sa prévision dans un temps très court. La procédure doit être suffisamment simple pour être réalisée par de nombreuses personnes



différentes à n'importe quel moment et exprimer des résultats compréhensibles et utiles à des publics très différents. Enfin, la prévision est sensée pouvoir être poursuivie quelques soient les conditions.

Ces conditions conduisent à rechercher un équilibre entre la qualité de la description hydrologique qui nécessite toujours plus de données et de temps, et son caractère opérationnel exigeant simplicité d'utilisation, modération dans l'acquisition de données et robustesse.

## **Difficultés scientifiques de la prévision**

En conséquence de ces spécificités, les difficultés scientifiques de la modélisation hydrologique s'expriment différemment pour la prévision par rapport à la simulation.

### **Paramétrage et calage**

Le paramétrage et le calage des modèles hydrologiques sont souvent des opérations délicates. De nombreux modèles rencontrent des problèmes d'équifinalité (Sorooshian and Gupta, 1983), liés à une surparamétrisation (Gan et al., 1997). Des outils mathématiques complexes de calage, comme un calage sur le maximum de vraisemblance (Sorooshian et al., 1983), ou encore les calages basés sur des modèles génétiques (Wang, 1997) ou dérivés comme SCE-UA (Duan et al., 1992; Gan and Biftu, 1996) ont été développés.

En ce qui concerne les modèles dédiés à la prévision, la robustesse est une qualité majeure. Des modèles parcimonieux sont développés dans cette optique. Un faible nombre de paramètres rend leur signification plus éloignée d'une réalité physique (ce que n'assure pas automatiquement un plus grand nombre de paramètres). Le choix des valeurs des paramètres n'a pas pour but premier de représenter la réalité du bassin versant mais d'obtenir les meilleures performances du modèle.

### **Qu'est-ce qu'une donnée ?**

La notion de donnée pour un modèle hydrologique est complexe. Le nombre et la précision nécessaires des variables d'un modèle sont liés à la finesse de la description des phénomènes. Mais pour faire tourner son modèle, le concepteur doit également tenir compte de la différence qu'il y a entre les variables physiques qu'il pense nécessaire de faire figurer dans le modèle et les données dont il peut disposer. De même que pour les paramètres, la question

d'une perte de signification physique des variables du modèle se pose quand celui-ci est maintenu à un niveau de simplicité correspondant aux exigences de la prévision. Ainsi qu'est-ce que la précipitation pour un modèle global, c'est-à-dire qu'est-ce qu'une donnée unique pour représenter le champ pluvieux sur une vaste surface ? Et surtout comment le relier aux mesures faites en quelques points du bassin versant ? La donnée de pluie est le plus souvent basée sur des mesures réalisées aux stations pluviométriques d'un réseau relativement lâche, comparé à la taille des cellules pluvieuses. Elle est alors le résultat d'une interpolation de ces mesures, cette interpolation pouvant aller de la plus simple moyenne arithmétique à une interpolation complexe ou au krigeage (Johansson, 2000). Des travaux de recherche sont menés pour évaluer l'intérêt de prendre en compte d'autres facteurs comme le vent et le relief pour mieux décrire le champ pluvieux, notamment sur les zones montagneuses (Johansson, 2002; Johansson and Chen, 2003).

L'évapotranspiration ne présente pas d'aussi fortes variations sur un bassin versant de taille raisonnable (hors fort gradient altimétrique). Fowler (2002) s'intéresse à l'importance de l'estimation de cette variable. Elle a de toute façon une importance limitée en période de crue.

Pour le prévisionniste, le problème est rendu plus aigu par les conditions liées à l'acquisition en temps réel des données les plus importantes. De plus, le modèle de prévision peut fonctionner non seulement avec des données mesurées mais également des données prévues (comme pour la pluie). Enfin, le prévisionniste a pour mission de donner une réponse dans toutes les situations, quelles que soient la quantité et la qualité des données dont il dispose. Il n'est donc pas étonnant de constater le grand nombre de contributions concernant les conséquences de lacunes, des incertitudes ou des erreurs (Oudin et al., 2006) sur les données (Andréassian et al., 2001; Paturel et al., 1995).

## **Prévision aux pas de temps fins**

Parmi les crues les plus violentes (en France) et les plus difficiles à prévoir, figurent en bonne place les crues « éclairs » qui sont la conséquence de précipitations intenses et souvent très localisées. Il est nécessaire pour les prévoir de développer des modèles fonctionnant à des pas de temps courts. Ces modèles présentent de nouvelles facettes des difficultés précédemment présentées. Ce stage a été l'occasion de travailler sur deux de ces problèmes.

**Fonctionnement d'un modèle de prévision au pas de temps horaire**

Le premier objectif de ce stage est d'observer le comportement d'un modèle de prévision Pluie-Débit construit pour fonctionner au pas de temps journalier quand il est utilisé au pas de temps horaire.

L'utilisation de ce modèle à un pas de temps pour lequel il n'a pas été optimisé n'est pas évidente car il se base sur une représentation très schématique des phénomènes régissant le cycle de l'eau (cf. la description du modèle, page 6). Les paramètres, obtenus par calage, n'ont pas une signification physique précise, aussi les valeurs des paramètres à un pas de temps  $\Delta t_1$  ne peuvent pas être calculées à partir des valeurs correspondant à un autre pas de temps  $\Delta t_2$ . Il pourrait donc y avoir des difficultés imprévues de calage au pas de temps horaire. En outre, les concepteurs de ce modèle l'ayant voulu parcimonieux, un certain nombre de paramètres ont été optimisés lors de la conception du modèle, de façon à ne pas avoir à être calés pour chaque bassin versant et pour chaque horizon de prévision. Enfin, la structure du modèle peut ne pas correspondre aux phénomènes hydrologiques à un autre pas de temps que celui pour lequel le modèle a été construit.

**Qualité des données d'entrée du modèle**

Le modèle que nous testerons ne prend en entrée pour fonctionner que deux données : l'évapotranspiration potentielle (ETP) et la précipitation (cf. page 6).

Le modèle utilise l'ETP pour estimer l'évapotranspiration réelle. Des travaux récents (Oudin et al., 2005a,b) montrent que ce modèle se satisfait bien d'ETP calculées avec des formules simples.

La pluie est loin d'être aussi uniforme sur un bassin versant et est donc plus difficile à estimer. La question posée ici n'est pas tant de décrire le plus fidèlement possible le champ pluvieux (que nous ne pouvons d'ailleurs pas connaître), mais d'évaluer les différences de performance du modèle de prévision obtenues avec différentes données de pluie en entrée et d'expliquer ces différences de performances.

La comparaison des différentes données de pluie s'inscrit en outre dans le projet du laboratoire qui doit déterminer rapidement les données de précipitation dont il a besoin pour ses prochains travaux.

## I Modèle et données employés

### I.1 Le modèle GRP

Le modèle employé appartient à la famille des modèles GR développés au CEMAGREF. Il s'agit du modèle GRP, établi par Tangara (2005).

Face au grand nombre de modèle Pluie–Débit existants, plusieurs critères ont été choisis (Perrin, 2000) pour définir une classification des modèles qui peuvent être qualifiés de :

- **Globaux ou distribués** : dans le premier cas, le bassin versant est considéré comme une entité globale qui ne fait pas l'objet de découpage selon une maille (comme pour les modèles distribués). Certains modèles sont dits semi-distribués quand ils découpent le bassin versant en sous-bassins fonctionnant comme des unités hydrologiques homogènes (c'est par exemple le cas de HBV (Bergström, 1995)),
- **Conceptuels ou à base physique**, selon que la transformation de la pluie en débit choisie s'appuie sur une description des phénomènes physiques ou non (il s'agit là de deux extrêmes, la plupart des modèles se situent dans un entre-deux),
- **Déterministes ou stochastiques**,
- **Cinématiques** si l'évolution temporelle est simplement décrite ou **dynamiques** si l'évolution temporelle est reliée aux forces qui en sont la cause.

Les modèles GR sont des modèles globaux, déterministes. Ils sont plus proches du modèle purement conceptuel que du modèle purement à base physique et leur conception s'appuie sur une démarche empirique. En effet, les phénomènes physiques ne pouvant être décrits en détail à cette échelle, une représentation schématique des principales étapes du cycle de l'eau est faite.

GRP a été optimisé pour fonctionner au pas de temps journalier et compte 3 paramètres à caler. Sa structure est très proche de celle de la plupart des modèles GR (cf. Fig. 1). Les précipitations sont d'abord comparées à l'ETP, pour déterminer les précipitations nettes ( $P_n$ ). Celles-ci sont séparées en un flux dirigé vers le réservoir de production et en un flux alimentant l'écoulement. Le niveau du réservoir de production est compris comme étant un indicateur de l'humidité du bassin versant : c'est lui qui détermine la fraction de la pluie nette qui s'écoule et la quantité d'eau dirigée vers le réservoir (qui est stockée). L'eau sort du réservoir de production, principalement par

# I MODÈLE ET DONNÉES EMPLOYÉS

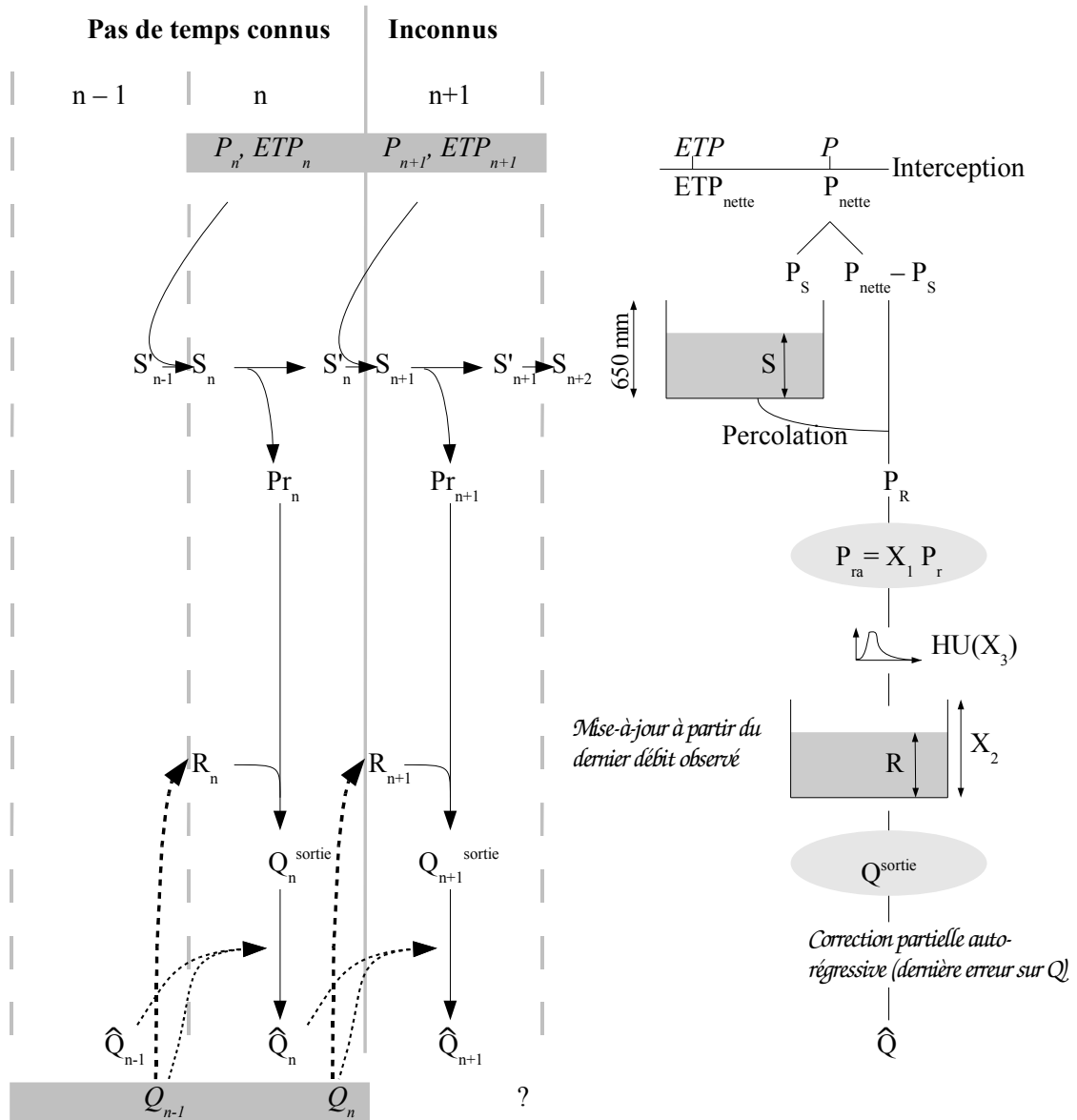


FIG. 1 – Principe de fonctionnement du modèle GRP

évapotranspiration (quand  $E_n$  est positive). L'eau contenue dans le réservoir peut également alimenter l'écoulement (par percolation), mais cela concerne généralement de faibles quantités d'eau.

Le flux ruisselé fait l'objet d'une fonction d'échange (non conservative) comportant une branche unique (à la différence de GR4J où l'écoulement est scindé vers deux voies menant chacune à un hydrogramme unitaire distinct). Après passage à travers un hydrogramme unitaire, le flux débouche dans un réservoir de routage, d'où sort le débit.

Les paramètres à caler sont :

- $X_1$ , coefficient de la fonction d'échange (sans dimension, valeurs classiques autour de 1),
- $X_2$ , taille du réservoir de routage (le plus souvent de quelques centaines à quelques milliers de millimètres),
- $X_3$ , longueur de l'hydrogramme unitaire (habituellement comprise entre quelques heures et quelques jours).

Ce modèle est conçu spécifiquement pour la prévision ; il comporte pour cela :

- une procédure de mise-à-jour du niveau du réservoir de routage,
- une correction du débit calculé en sortie.

Il s'agit de procédures simples ne prenant en compte que l'écart entre le dernier débit observé et le débit calculé correspondant. En outre, il est calé directement « en mode prévision », c'est-à-dire que le calage porte sur le modèle en entier, en incluant les procédures de mise-à-jour et de correction du débit de sortie. Le calage « en mode prévision » porte sur un horizon de prévision déterminé.

### I.2 Une étude sur 40 bassins versants français

L'étude est menée sur 40 bassins versants présentés dans le tableau 1. Ils sont répartis sur le territoire de la France métropolitaine et représentent une variété de régimes hydrométéorologiques (cf. Fig. 2). Quelques bassins versants sont situés dans la zone de climat méditerranéen. D'autres se trouvent en Bretagne, dans une zone de climat océanique. Les autres bassins versants sont majoritairement ceux d'affluents de la Seine et de la Loire, plus au centre de la France.

Code	Nom	X (hm)	Y (hm)	Alt. (m)	S. (km <sup>2</sup> )
A1522020	La Lauch à Guebwiller	964255	2334824	290	68,1
A5723010	L'Ingressin à Toul	861133	2414582	210	54,7
H2001020	L'Yonne à Corancy	721963	2234521	332	98
H2513110	Le Tholon à Champvallou	676120	2327100	87	131
H3613010	Le Lunain à Paley	638903	2360885	85	163
H3613020	Le Lunain à Épsiy	632485	2370090	51	252
H3923010	Le ru d'Ancœur à Blandy	633113	2396886	65	181
H4252010	L'Orge à Morsang-sur-Orge	600344	2407668	35	922
H5723011	L'Orgeval à Boissy-le-Châtel (Le Theil)	656985	2524600	77	104
H7853010	Le Sausseron à Nesles-la-Vallée	587907	2458713	37	101
H7913030	La Mauldre à Aulnay-sur-Mauldre	563378	2437810	24	369
J2034010	Le Guindy à Plouguiel	189318	2435178	20	125
J3024010	Le Guillec à Trézilidé	127490	2421203	35	43
J4124420	La rivière de Pont-l'Abbé à Plonéour-Lanvern	108760	2343820	15	32,1
J4712010	L'Éllé au Faouët	166865	2353772	75	142
K0100020	La Loire à Goudet	725285	1988855	780	432
K0253020	La Borne occidentale à Espaly-Saint-Marcel	720384	2006577	650	375
K0550010	La Loire à Bas-en-Basset	739758	2034330	450	3234
K0614010	Le Furan à Andrézieux-Bouthéon	750130	2059859	350	178
K0744010	L'Anzon à Débats-Rivière-d'Orpra	725702	2086108	410	181
K0753210	Le Lignon du Forez à Boën	729460	2084058	470	371
K0813020	L'Aix à Saint-Germain-Laval	729480	2093705	377	193
K0974010	Le Gand à Neaux	743449	2107749	360	85
K1173210	L'Arconce à Montceaux-l'Étoile	731835	2152310	242	599
K2724210	L'Artière à Clermont-Ferrand	662686	2086014	341	49
K2783010	La Morge à Maringues	675876	2101512	290	713
K5623010	L'Auron au Pondy	624018	2200486	167	199
K5653010	L'Auron à Bourges	608476	2226352	130	585
P3245010	Le Mayne à S <sup>t</sup> -Cyr-la-Roche	526230	2030443	119	49
U4305410	La Denante à Davayé	787052	2147482	190	11,1
U4525210	Le Mrgon à Villefranche-sur-Saône	785816	2112500	168	68
V3315010	La Valencize à Chavanay	786585	2048645	180	36
V3517010	Le Ternay à Savas	780365	2037001	508	25,5
V6035010	Le Toulourenc à Malaucène	830095	1916858	311	150
V6052010	L'Ouvèze à Vaison-la-Romaine	818400	1919202	189	585
X2414030	L'Artuby à la Bastide	945360	1871869	1010	91
Y3514020	Le Vistre à Bernis	758851	1864374	15	291
Y5615010	Le Loup à Tournettes-sur-Louis	976714	1866292	124	206
Y5615030	Le Loup à Villeneuve-Loubet	987608	1861434	2	279
Y5625020	La Cagne à Cagnes-sur-Mer	988909	1862350	1	95

TAB. 1 – Les 40 bassins versants de l'étude (latitude et longitude exprimées dans le système de Lambert 2)

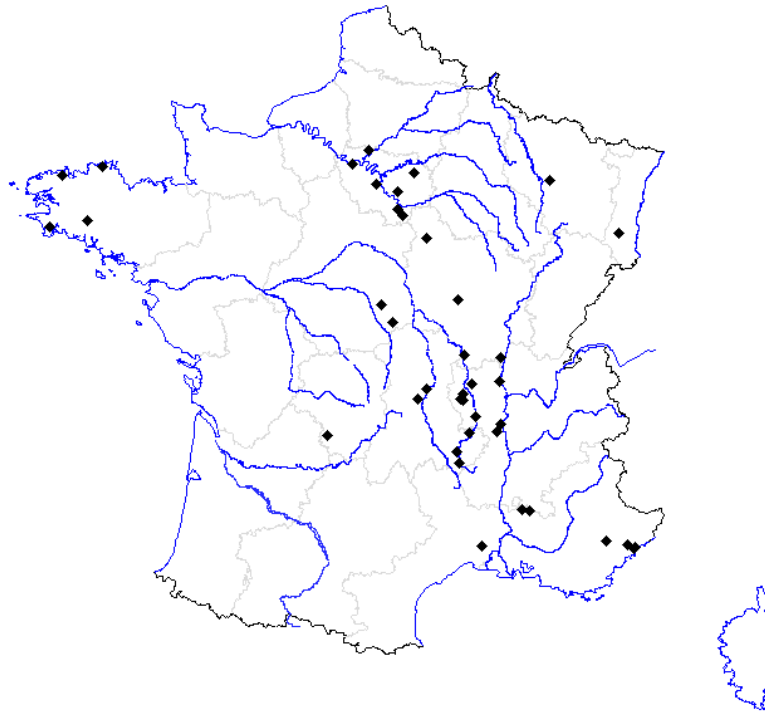
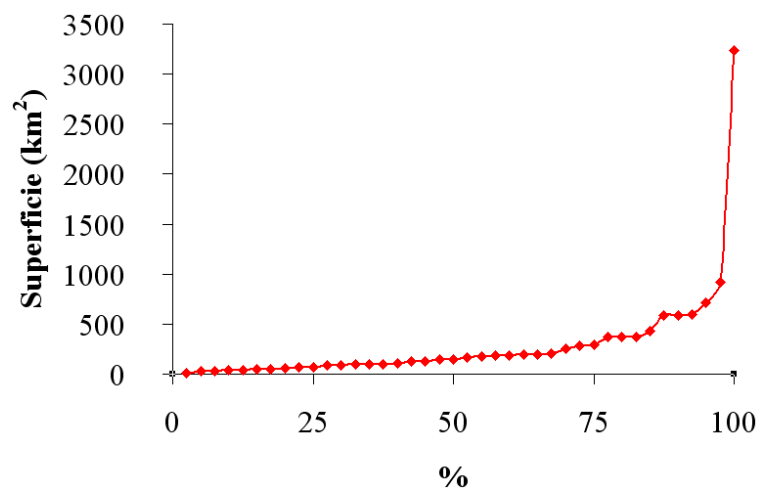


FIG. 2 – Répartition géographique des bassins versants de l'étude



10 FIG. 3 – Distribution des superficies des bassins versants de l'étude



Si ces bassins versants témoignent de la diversité des régimes climatiques métropolitains, ils sont moins représentatifs de la variété des régimes hydrologiques. Ce sont pour la grande majorité de petits bassins versants en amont de plus grandes rivières (cf. Fig. 3) : si le plus grand bassin versant a une superficie de 3 234 km<sup>2</sup>, il est le seul à dépasser les 1 000 km<sup>2</sup> et la médiane des superficies est de 157 km<sup>2</sup>. Les 37 exutoires d'altitudes les plus basses s'étagent régulièrement entre les altitudes de 1 m et 500 m. L'exutoire le plus élevé présente une altitude de 1 010 m.

### I.3 Les différentes données de pluie

Sur chacun des 40 bassins versants présentés, nous disposons de deux chroniques de pluie sur une période commune allant d'août 1995 à décembre 2000, soit 5,5 années. Ces chroniques sont donc courtes, ce qui pourrait poser, comme nous le verrons par la suite, des difficultés pour la mise en route et le calage du modèle.

#### I.3.1 Les pluies mesurées au sol

La première chronique de pluie dont nous disposons correspond à la moyenne arithmétique des mesures faites au niveau des pluviomètres du réseau automatique de Météo France situés à l'intérieur ou à proximité du bassin versant. Cette donnée de pluie, que nous noterons par la suite  $P^{Sol}$ , est proche des données collectées par les réseaux de mesure des Services de Prévision des Crues en France.

#### I.3.2 Les pluies issues de l'interpolation SAFRAN

La seconde pluie,  $P^{Saf}$ , provient d'une interpolation des mesures réalisées sur le réseau précédent fonctionnant en temps réel, avec l'ajout des données obtenues sur le réseau climatique d'État, plus fin (on passe d'un millier de postes à plus de 4000) mais non automatisé (Le Moigne, 2002).<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup>Il existe en fait deux données SAFRAN : la donnée en temps réel où l'information du réseau fin mais non-automatique ne pouvant être les pluies réelles, elle est remplacée par une information statistique issue des chroniques enregistrées par ce réseau, et la donnée différée qui est délivrée tous les deux mois en prenant en compte les pluies réellement mesurées sur le réseau fin. Nous utilisons cette dernière donnée qui représente la donnée qui serait disponible en France au pas de temps journalier si tous les postes étaient automatisés. Dans la mesure où il s'appuie sur un réseau plus dense, le calcul SAFRAN devrait donner

Cependant, il présente la particularité de présenter des données journalières et horaires : toutes les mesures sont d’abord agrégées au pas de temps journalier, l’interpolation est calculée et les pluies sont désagrégées pour revenir au pas de temps horaire sur la base d’un indice lié à l’humidité et à la température de l’atmosphère. Cette donnée est connue pour être fiable au pas de temps journalier, par contre la qualité de la désagrégation horaire a été mise en doute par Météo France.

### I.3.3 Construire de nouvelles données de pluies

Il est possible de construire de nouvelles séries de données de pluie en combinant ces deux chroniques. Cela peut d’abord nous permettre de tester les hypothèses faites sur la qualité des deux données précédentes. Le second intérêt de telles combinaisons est d’obtenir des données de pluie qui permettent d’améliorer les performances du modèle de prévision et de comprendre quels sont les caractéristiques d’une « bonne » donnée de pluie pour ce modèle.

Nous allons donc tester une combinaison de ces deux pluies conçue pour remédier aux défauts de la répartition temporaire de la pluie SAFRAN. Cette pluie, que nous noterons  $P^{Corr}$ , a le cumul journalier de la pluie issue de l’interpolation SAFRAN et la désagrégation horaire au cours d’une journée (météorologique : de 06 h 00 à 06 h 00) de la pluie mesurée au sol :

$$P_{j,h}^{Corr} = \frac{P_{j,h}^{Sol}}{\sum_{k=0}^{23} P_{j,k}^{Sol}} \cdot \sum_{k=0}^{23} P_{j,k}^{Saf}$$

---

en théorie une meilleure estimation de la pluie de bassin.

## II Comparaison statistique des deux chroniques de pluie

Cette étape poursuit deux buts. D'abord, mieux connaître les différentes chroniques et découvrir les caractéristiques statistiques qui les différencient. Ce travail permet également de préparer la recherche des éventuelles corrélations entre les différences de performance obtenues par le modèle avec les chroniques de pluie et les différences statistiques de ces pluies.

Sur chaque bassin versant, ont été calculés :

- la moyenne, l'écart-type et le maximum des pluies  $P^{Sol}$  et  $P^{Saf}$ ,
- la moyenne, la médiane, l'écart-type, le troisième quartile et le maximum des écarts entre les pluies  $P^{Sol}$  et  $P^{Saf}$ ,
- le nombre de jours de pluie nulle pour les pluies  $P^{Sol}$  et  $P^{Saf}$ ,
- le retard moyen du maximum mensuel d'une pluie sur l'autre,
- les indices de similarité  $i_1$  et  $i_2$  pour les jours de pluie non nulle définis par :

$$i_1 = 1 - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{P_i^{Sol} - P_i^{Saf}}{P_i^{Sol} + P_i^{Saf}}$$

$$i_2 = \frac{2}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{P_i^{Sol} \cdot P_i^{Saf}}{P_i^{Sol^2} + P_i^{Saf^2}}$$

Quand les deux pluies sont très proches, les deux indices  $i_1$  et  $i_2$  tendent vers 1. Ils décroissent à mesure que les pluies s'éloignent l'une de l'autre. Des valeurs typiques obtenues sont 0,9 pour  $i_1$  et 0,8 pour  $i_2$ .

Il n'y a pas de différence marquée sur les 40 bassins versants. On peut tout de même noter que :

- Les pluies SAFRAN sont enregistrées un petit peu plus tard que les pluies mesurées au sol (le retard moyen sur les maxima mensuels est de 0,05 jours, soit un peu plus d'une heure).
- Le cumul des pluies SAFRAN est le plus souvent supérieur à celui des pluies mesurées au sol.
- L'intensité moyenne des pluies mesurées au sol est légèrement supérieure à celle des pluies SAFRAN, mais l'écart-type est tel qu'on ne peut rien conclure.

On ne peut rien conclure à ce stade sur la valeur d'une donnée de pluie par rapport à l'autre.

### III Comparaison des performances obtenues en prévision avec les différentes données de pluie

#### III.1 Méthodologie employée

##### **Placer les bassins versants sur un même « banc d'essai »**

Les bassins versants étudiés sont susceptibles de présenter des régimes hydrologiques très différents. Aussi, il serait difficile d'interpréter une comparaison des performances du modèle de prévision sur ces bassins versants à des horizons de prévision identiques. En effet, pour un horizon de prévision donné, les bassins versants les plus rapides pourront avoir complètement « transféré » l'eau reçue lors d'un événement pluvieux tandis que les bassins versants les plus lents n'en auront restitué qu'une petite partie. Or, nous souhaitons pouvoir comparer les performances obtenues sur les différents bassins versants pour rechercher d'éventuelles corrélations entre des caractéristiques de ces bassins et les performances relatives obtenues avec les différentes données de pluie.

Pour placer les bassins versants dans des situations comparables, nous avons décidé de comparer les performances obtenues pour les différents bassins versants à des horizons de prévision différents : pour le bassin versant  $i$ , l'horizon de prévision  $H_i$  correspond à une fraction fixe  $\alpha$  d'une estimation du temps de base  $L_i$ . Le paramètre  $X_3$ , longueur de l'hydrogramme unitaire, calé en simulation a été choisi comme estimation du temps de base. Aussi, le modèle a été exécuté une fois pour tous les bassins versants en simulation, et le paramètre  $X_3$  a été conservé pour chaque bassin comme estimation de son temps de base.

##### **Calculs réalisés**

Conformément à la méthodologie préconisée par Klemeš (1986), les chroniques ont été scindées en deux moitiés, la première servant au calage (après une période de mise en route du modèle) et la seconde étant destinée au contrôle. Ces périodes sont échangées dans une nouvelle exécution du programme. Tous les résultats de performance qui seront présentés, ont été calculés sur la période de contrôle.

Etant donnée la faible durée de nos chroniques, la période de mise-en-route a

### III COMPARAISON DES PERFORMANCES EN PRÉVISION

---

été limitée à 6 mois, ce qui est très court et surtout ne contient pas une année complète. Le calage a été réalisé sur 3 ans. Là encore, il s'agit une durée de calage relativement courte.

Six comparaisons correspondant à différents degrés d'avancement de la transformation de la pluie en débit ont été réalisées. Chaque comparaison est caractérisée par une valeur de  $\alpha$ , qui sera notée  $\alpha_j$ . Ainsi, l'horizon de prévision du  $i^{\text{ème}}$  bassin versant pour la  $j^{\text{ème}}$  comparaison vaut  $H_{i,j} = \alpha_j \cdot L_i$ . Les fractions  $\alpha_j$  ont été choisies autour de l'unité pour décrire les performances obtenues à différents stades du processus hydrologique transformant la pluie en débit à l'exutoire du bassin versant :

$$\alpha_j \in \left\{ \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, 1, \frac{3}{2}, 2 \right\}$$

Quand  $\alpha_j \cdot L_i$  est inférieur à 1,  $H_{i,j}$  est ramené à 1 pour des raisons numériques.

Les calculs ont été réalisés en supposant les pluies « futures » parfaitement connues (connues de la même façon que les pluies passées), ce qui est l'extremum optimiste de la prévision des pluies futures.

A chaque exécution du programme de prévision, les performances sont estimées et les valeurs des paramètres calés sont conservées.

#### Critères de performances

Les performances sont estimées par trois critères : l'erreur quadratique moyenne (RMSE), la persistance et le critère  $C_{2M,P}$ .

L'erreur quadratique moyenne est un indice classique qui n'est pas normé (et ne permet donc pas la comparaison entre différents bassins).

$$RMSE = \frac{1}{N} \cdot \sqrt{\sum_{t=1}^N \left( Q_{t+H_{i,j}} - \widehat{Q}_{t+H_{i,j}} \right)^2}$$

où

- $\widehat{Q}_t$  est le débit calculé au pas de temps  $t$ ,
- $Q_t$  est le débit observé au pas de temps  $t$ ,
- $H_{i,j} = \alpha_j \cdot L_i$  est le  $j^{\text{ème}}$  horizon de prévision pour le  $i^{\text{ème}}$  bassin versant,

### III COMPARAISON DES PERFORMANCES EN PRÉVISION

---

–  $N$  est le nombre total de pas de temps où les prévisions sont calculées.

La persistance est l'équivalent pour la prévision du critère de Nash-Sutcliffe (Nash and Sutcliffe, 1970) pour la simulation : elle compare l'erreur faite à chaque pas de temps sur le débit prévu par le modèle à l'horizon de prévision  $H$  à l'erreur sur la prévision faite par un modèle simpliste qui propose comme prévision le dernier débit observé. Il s'agit donc d'un indice normé, qui évolue entre  $-\infty$  et 1. On peut également comprendre cet indice comme étant dérivé de l'erreur quadratique normée par la variance observée.

$$Persistence = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N \left( Q_{t+H_{i,j}} - \hat{Q}_{t+H_{i,j}} \right)^2}{\sum_{t=1}^N \left( Q_{t+H_{i,j}} - Q_t \right)^2}$$

Enfin, le critère  $C_{2M,P}$  est issu d'une symétrisation de la persistance et est l'équivalent pour la prévision du critère  $C_{2M}$  (Mathevet, 2005) pour la simulation. Il varie entre -1 et 1.

$$C_{2M,P} = \frac{Persistence}{2 - Persistence}$$

Les définitions de la persistance et de  $C_{2M}$  font qu'il n'est pas possible de comparer les performances exprimées par ces indices à différents horizons de prévision pour un même bassin (ce que permet par contre l'indice RMSE) car la qualité du modèle simpliste utilisé comme référence évolue avec l'horizon de prévision.

## III.2 Résultats globaux

Les résultats présentés ici permettent de comparer les performances (exprimées en persistance) du modèle avec les différentes pluies à différents horizons de prévision.

### Quel horizon choisir au calage ?

Une des questions liées à l'étude du fonctionnement du modèle au pas de temps horaire est la stabilité des jeux de paramètres avec l'horizon de prévision utilisé en calage. Le modèle étant calé directement en « mode prévision », il est intéressant d'examiner l'impact du choix de l'horizon choisi au calage.

### III COMPARAISON DES PERFORMANCES EN PRÉVISION

Pour chaque horizon de prévision en contrôle  $H_{i,j}^{\text{Contrôle}}$ , nous avons enregistré les performances obtenues avec les jeux de paramètres calculés à des calages réalisés à différents horizons de prévision  $H_{i,j}^{\text{Calage}}$ <sup>4</sup>. La figure 4 présente les évolutions des performances selon l'horizon utilisé lors du calage, pour les pluies corrigées. Les graphes obtenus avec les deux autres pluies sont très comparables. Comme on pouvait s'y attendre, les meilleures performances en contrôle sont obtenues quand l'horizon utilisé en calage est proche ou égal à l'horizon de prévision en contrôle. Pour la suite de l'analyse, nous nous intéresserons uniquement aux essais pour lesquels les horizons en calage et en contrôle sont identiques.

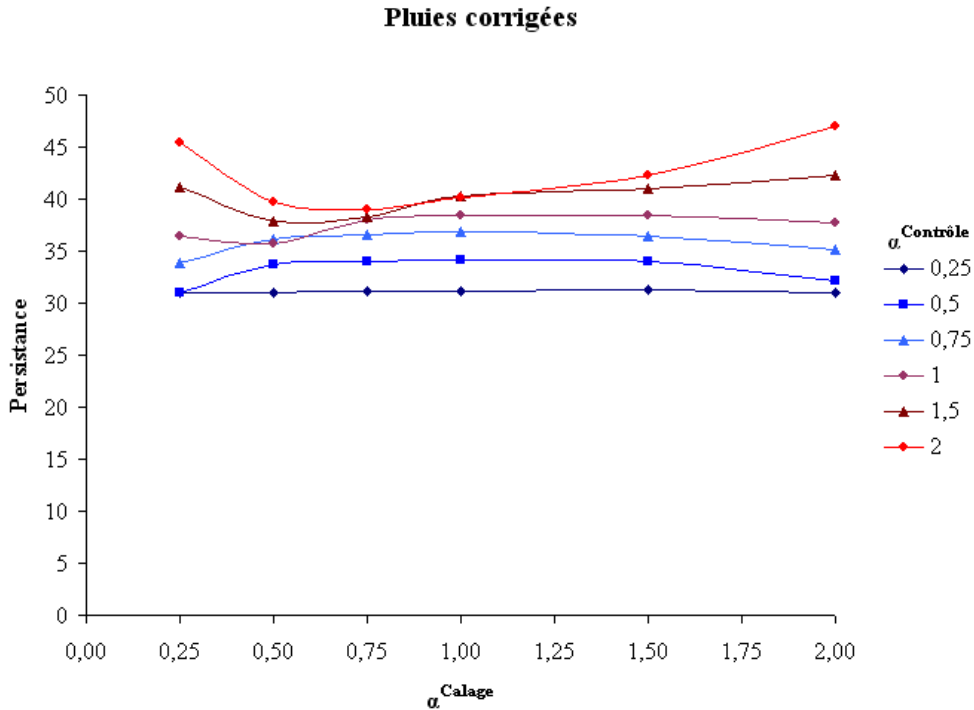


FIG. 4 – Performances moyennes obtenues sur les 40 bassins versants à différents horizons de prévision  $H_{i,j}^{\text{Contrôle}}$  selon l'horizon  $H_{i,j}^{\text{Calage}}$  utilisé en calage

<sup>4</sup>Cette question est liée à l'examen de la stabilité des calages présenté dans la partie IV.2.

### III COMPARAISON DES PERFORMANCES EN PRÉVISION

---

#### Performances moyennes obtenues avec les différentes pluies

Pour tous les horizons de prévision explorés, les moyennes des performances obtenues avec les pluies mesurées au sol sont nettement supérieures à celles des performances obtenues avec les pluies issues du calcul SAFRAN (cf. Tab. 2). La différence moyenne est de 8,5 points de persistance, ce qui traduit une différence significative de performance. De même pour tous les horizons de prévision, les moyennes des performances obtenues avec les pluies  $P^{\text{Corr}}$  sont supérieures à celles des pluies  $P^{\text{Sol}}$ . Par contre, la différence moyenne n'est que de 3,2 points de persistance.

Horizon de prévision	$\frac{L_i}{4}$	$\frac{L_i}{2}$	$\frac{3 \cdot L_i}{4}$	$L_i$	$\frac{3 \cdot L_i}{2}$	$2 \cdot L_i$
$P^{\text{Saf}}$	22,7	24,0	25,8	27,7	30,6	32,2
$P^{\text{Sol}}$	35,9	28,1	34,3	35,9	38,3	40,9
$P^{\text{Corr}}$	38,4	30,9	36,6	38,4	41,1	47,0

TAB. 2 – Performances moyennes en contrôle sur les 40 bassins versants du modèle exprimées par le critère de persistance aux différents horizons de prévision pour les 3 données de pluie

#### Distribution des écarts de performances

Au delà de la moyenne, la comparaison des performances obtenues avec les différentes pluies pour chaque bassin (cf. Fig. 5) montre que les pluies  $P^{\text{Sol}}$  semblent apporter de nettement meilleures performances que les pluies  $P^{\text{Saf}}$  et que les performances obtenues avec les pluies  $P^{\text{Corr}}$  sont légèrement meilleures que les premières.

Les écarts entre les performances obtenues avec les différentes données de pluie varient beaucoup. Nous avons sélectionné les écarts les plus grands (plus de 25 points de persistance en valeur absolue) et examiné les 7 bassins versants correspondants ainsi que le réseau des postes pluviométriques horaires automatiques sur et proches de ces bassins. Il s'agit des points les plus éloignés de la bissectrice sur la figure 5. La plupart de ces bassins versants sont d'assez petites tailles (le plus grand a une superficie de 279 km<sup>2</sup>, la médiane étant à 104 km<sup>2</sup>). Les bassins pour lesquels la pluie  $P^{\text{Saf}}$  l'emporte largement sur la pluie  $P^{\text{Sol}}$  possèdent très peu voire pas de postes automatiques



### III COMPARAISON DES PERFORMANCES EN PRÉVISION

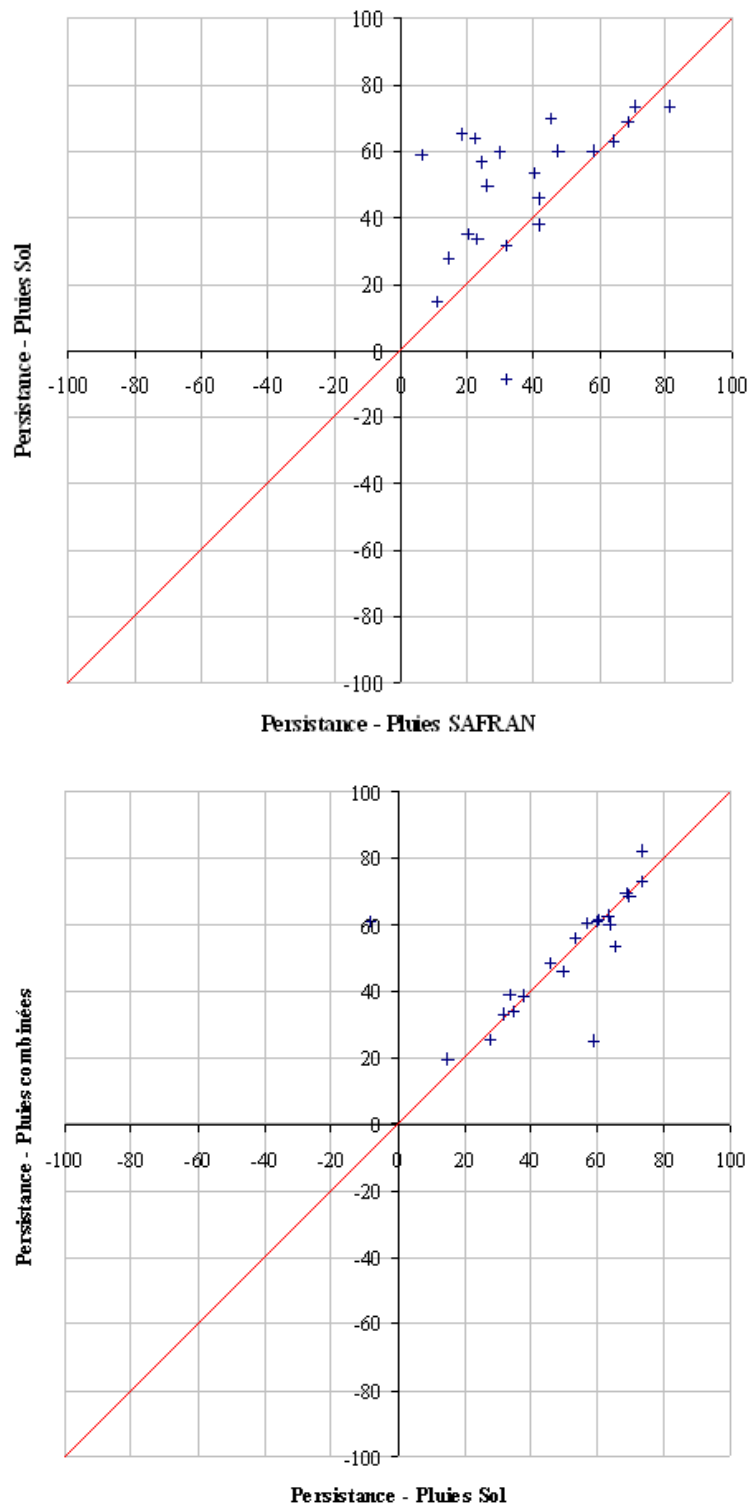


FIG. 5 – Comparaison des persistances sur les 40 bassins versants obtenues en utilisant les différentes données de pluie (ici pour  $\alpha_j = 1$ )

et il y en a également peu dans leurs voisinages. Au contraire, les bassins pour lesquels la pluie  $P^{Sol}$  l'emporte nettement sur la pluie  $P^{Saf}$  bénéficient d'un réseau automatique beaucoup plus dense, ce qui peut expliquer que les pluies  $P^{Saf}$  n'apportent pas beaucoup d'information supplémentaire au pas de temps journalier et en conséquence sont nettement moins utiles au pas de temps horaire. Ces observations ont été faites sur un nombre limité de bassins versants, ce qui interdit d'en tirer des affirmations définitives.

L'examen des distributions des performances (cf. Fig. 6, où sont représentées le minimum, le premier décile, le premier quartile, la médiane (trait rouge), la moyenne (croix bleue), le troisième quartile, le neuvième décile et le maximum des performances) montre que pour plus des trois quarts des bassins versants étudiés, les pluies  $P^{Sol}$  donnent de meilleurs résultats que les pluies  $P^{Saf}$ . Pour un peu moins des trois quarts des bassins versants, les pluies  $P^{Corr}$  donnent des résultats un peu meilleurs que les pluies  $P^{Sol}$ .

Plus les horizons de prévision sont grands, plus les écarts extrêmes des performances s'éloignent des valeurs médianes. Nous ne pouvons pas y voir un effet mécanique lié à la définition multiplicative des horizons de prévision  $H_{i,j} = \alpha_j \cdot L_i$  que nous avons choisie, puisque la hauteur des boîtes (entre les premier et dernier quartiles) n'augmente pas.

#### **Les différences observées sont-elles significatives ?**

Nous supposons dans un premier temps de façon arbitraire que sur un bassin versant, un écart moyen de performances de 5 points de persistance est significatif. Nous comptons alors le nombre de bassins versants pour lesquels les performances avec  $P^{Sol}$  sont nettement meilleures que celles obtenues avec  $P^{Saf}$  (c'est-à-dire quand la différence des performances est supérieure à cette valeur limite), les bassins versants pour lesquels c'est le contraire et les bassins versants pour lesquels nous ne pouvons rien dire (cf. Tab. 3). Quel que soit l'horizon de prévision choisi, pour plus de 50 % des bassins versants, les performances obtenues avec les pluies  $P^{Sol}$  sont significativement meilleures que celles des pluies  $P^{Saf}$ . C'est loin d'être le cas pour la comparaison entre les performances obtenues avec les pluies  $P^{Corr}$  et  $P^{Sol}$ . Pour la majorité des bassins versants, l'écart des valeurs n'est pas significatif.

Pour mieux évaluer la significativité des écarts de performance mesurés, nous utilisons une approche statistique en réalisant un test dont l'hypothèse principale  $H_0$  est que l'utilisation des pluies  $P^{Corr}$  n'apporte rien de plus que les

### III COMPARAISON DES PERFORMANCES EN PRÉVISION

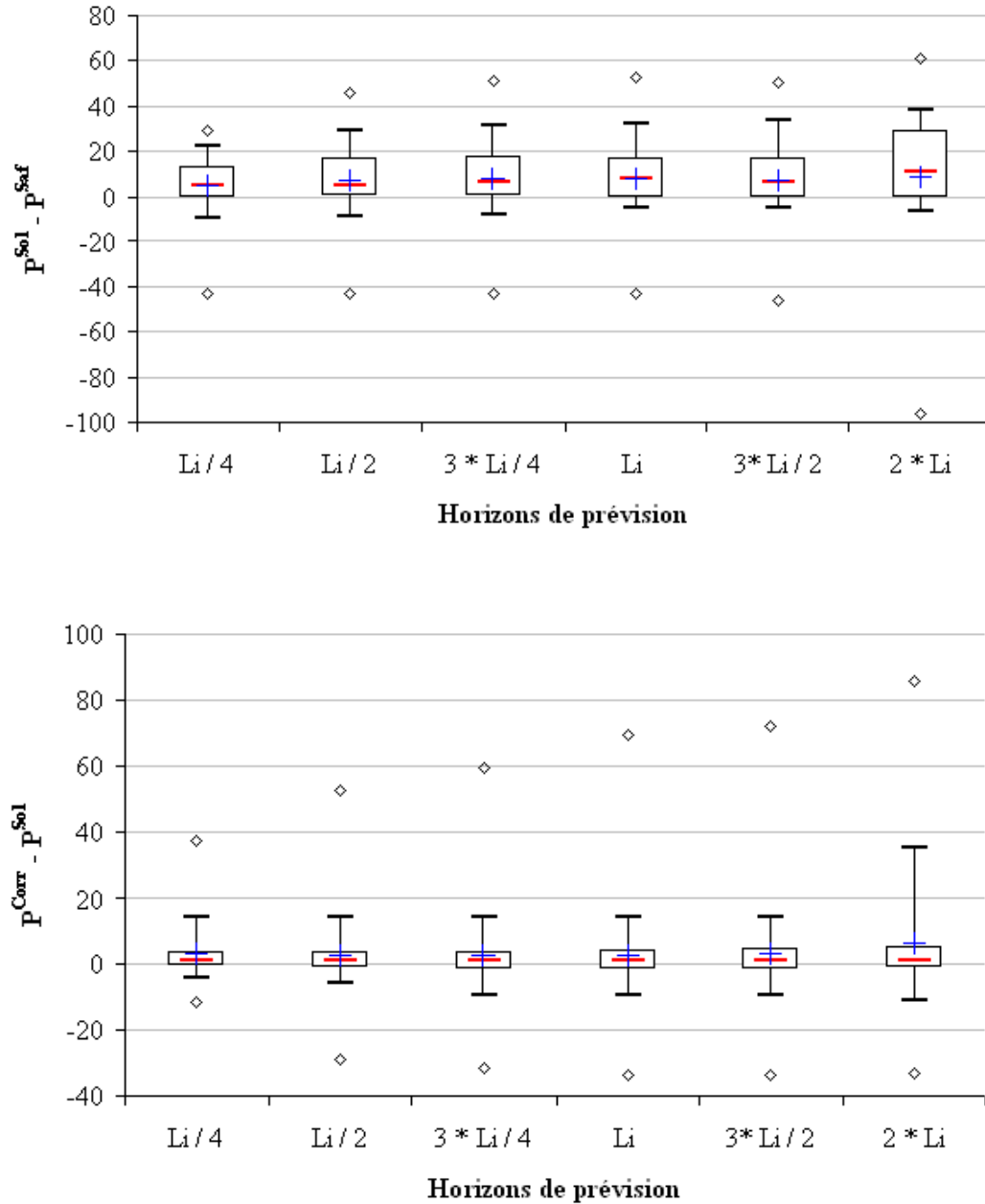


FIG. 6 – Distribution des écarts des performances exprimées en persistance obtenues avec les différentes pluies sur les 40 bassins versants de l'étude (minimum, premiers décile et quartile, médiane (trait rouge), moyenne (croix bleue), derniers quartile et décile, maximum)

### III COMPARAISON DES PERFORMANCES EN PRÉVISION

Horizon de prévision	$\frac{L_i}{4}$	$\frac{L_i}{2}$	$\frac{3 \cdot L_i}{4}$	$L_i$	$\frac{3 \cdot L_i}{2}$	$2 \cdot L_i$
$P^{Sol}$ nettement meilleures	20	20	20	22	21	21
Écart entre $P^{Corr}$ et $P^{Sol}$ peu significatif	14	14	14	12	13	14
$P^{Saf}$ nettement meilleures	6	6	6	6	6	5

Horizon de prévision	$\frac{L_i}{4}$	$\frac{L_i}{2}$	$\frac{3 \cdot L_i}{4}$	$L_i$	$\frac{3 \cdot L_i}{2}$	$2 \cdot L_i$
$P^{Corr}$ nettement meilleures	9	8	8	8	9	11
Écart entre $P^{Corr}$ et $P^{Sol}$ peu significatif	28	28	27	28	27	24
$P^{Sol}$ nettement meilleures	3	4	5	4	4	5

TAB. 3 – Répartition des 40 bassins versants selon que l'écart des performances obtenues avec les différentes pluies est significatif (pour une différence de persistance de plus de 5 points) ou non

pluies  $P^{Sol}$ , c'est-à-dire que l'espérance  $\mu$  de la variable aléatoire  $X$  *écart des performances obtenues avec les pluies  $P^{Corr}$  et  $P^{Sol}$*  est nulle. L'hypothèse alternative  $H_1$  est que cette espérance est strictement positive.

$$\begin{cases} H_0 : \mu = 0 \\ H_1 : \mu > 0 \end{cases}$$

N'ayant pas d'information à valoriser dans la description de  $X$ , nous utilisons l'hypothèse que  $X \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ . La moyenne empirique (pour  $n$  observations) centrée réduite suit alors une loi de Student de degré  $n - 1$  :

$$\frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{n}} \sim t_{(n-1)}$$

où  $S^2$  est l'estimateur non biaisé de la variance :  $S^2 = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2$ .

L'écart entre les performances obtenues avec les deux pluies a un niveau de signification  $\beta$  si on peut rejeter  $H_0$  alors qu'elle est vraie avec la probabilité

### III COMPARAISON DES PERFORMANCES EN PRÉVISION

---

$1 - \beta$ , c'est-à-dire pour  $\bar{X} > c$ , avec  $c$  tel que :

$$\begin{aligned} Pr [\text{rejet de } H_0 | H_0 \text{ vraie}] &= 1 - \beta \\ Pr \left[ \frac{\bar{X}}{S/\sqrt{n}} > \frac{c}{S/\sqrt{n}} \right] &= 1 - \beta \\ \frac{c}{S/\sqrt{n}} &= t_{(n-1)}(\beta) \\ c &= t_{(n-1)}(\beta) \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} \end{aligned}$$

On peut utiliser la loi de Student inverse pour déterminer  $\beta$  :

$$\beta = 1 - t_{(n-1)}^{-1} \left( \frac{\bar{X}}{S/\sqrt{n}} \right)$$

La confiance  $\beta$  à accorder à l'hypothèse que l'écart des performances est significatif varie selon les horizons de prévision considérés :

Horizon de prévision	$\frac{L_i}{4}$	$\frac{L_i}{2}$	$\frac{3 \cdot L_i}{4}$	$L_i$	$\frac{3 \cdot L_i}{2}$	$2 \cdot L_i$
$\beta$	95 %	82 %	73 %	73 %	77 %	93 %

Il est donc raisonnable de privilégier les pluies  $P^{Corr}$  par rapport aux pluies  $P^{Sol}$ , dans le cadre de l'utilisation du modèle GRP. La même étude pour comparer les pluies  $P^{Sol}$  et  $P^{Saf}$  conclut à des indices de confiance tournant entre 98 et 99 % selon les horizons de prévision.

### III.3 Recherche de corrélations entre performances et caractéristiques des bassins versants

Le but est de rechercher si les écarts des performances obtenues par le modèle avec les différentes pluies peuvent être reliés en partie à des caractéristiques des bassins versants. En effet, nous ne connaissons pas la pluie de bassin réelle mais en avons seulement une estimation basée sur quelques mesures. La qualité de la donnée de pluie (au sens de l'utilité pour le calcul de prévision) est conditionnée par la qualité et le nombre des mesures d'une part et par la pertinence de l'interpolation d'autre part. La qualité de ces mesures varie principalement en fonction de la densité et de l'implantation du réseau de

mesure, conséquences de caractéristiques physiques du bassin versant, comme sa taille, son accessibilité (donc au relief, au climat...). L'interpolation mathématique des données mesurées est indépendante des bassins versants et peut donc être plus ou moins pertinente selon le bassin versant (les effets orographiques sont rarement pris en compte par exemple).

Des corrélations ont été recherchées entre les différences des performances obtenues avec les pluies  $P^{Sol}$  et  $P^{Saf}$  et les caractéristiques suivantes :

- la superficie des bassins versants  $S_i$ ,
- l'indication du temps de base  $L_i$ ,
- la vitesse de réaction des bassins versants définie par  $\frac{S_i}{L_i}$ ,
- la localisation du bassin versant, à l'aide d'un système d'information géographique.

Des exemples de résultats sont donnés en figures 7 et 8.

Aucune corrélation nette n'a été détectée. Cela peut signifier que la qualité des données de pluie n'est pas liée à la nature du bassin versant. Mais d'autres facteurs peuvent cacher un lien éventuel entre la qualité des différentes données de pluie et la physique des bassins versants. En effet, la représentation des processus hydrologiques par le modèle est plus ou moins adaptée aux différents bassins versants et peut donc influencer sur les performances du modèle. Cette représentation est elle-même plus ou moins adaptée aux données de pluie... Nous ne pouvons pas préconiser l'emploi de telle ou telle donnée de pluie pour un type de bassin versant. En conséquence, il est plus pertinent de s'intéresser directement au signal « Pluie ».

#### III.4 Recherche de corrélations entre performances et caractéristiques des données de pluie

Ici, le but est différent : nous recherchons des corrélations entre les différences de performances et les différences des données de pluie exprimées à travers deux indices :

- la différence relative des cumuls de pluie sur la période étudiée à travers

$$\text{l'indice } BALANCE = \frac{\sum_{i=1}^n P_i^{Saf}}{\sum_{i=1}^n P_i^{Sol}},$$

### III COMPARAISON DES PERFORMANCES EN PRÉVISION

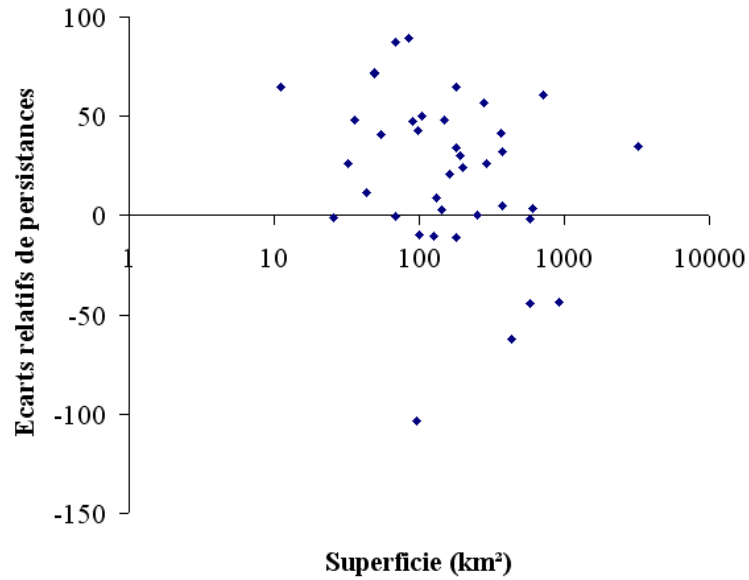


FIG. 7 – Exemple de recherche de corrélation entre les écarts des performances obtenues avec les données  $P^{Sol}$  et  $P^{Saf}$ , et la superficie des bassins versants (ici pour  $\alpha_j = 1$ )

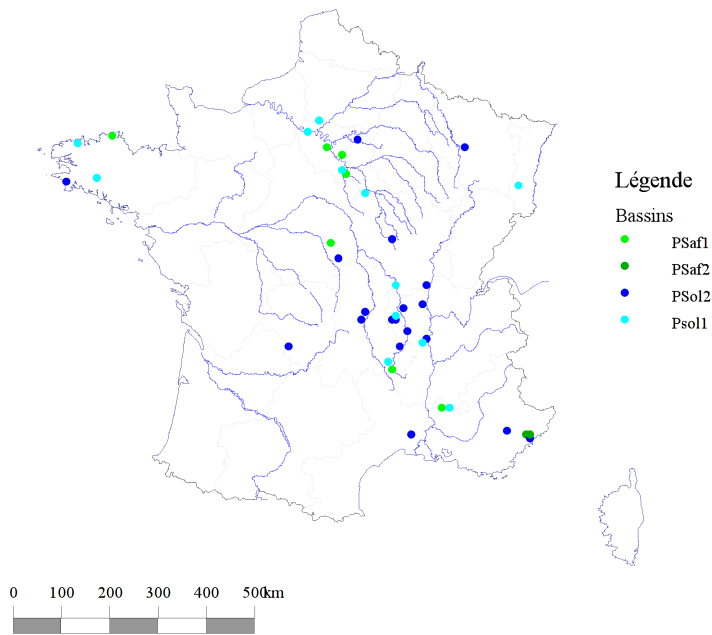


FIG. 8 – Exemple de recherche de corrélation entre les écarts des performances obtenues avec les données  $P^{Sol}$  et  $P^{Saf}$ , et la localisation des bassins versants (ici pour  $\alpha_j = 1$ )

– l'indice  $GORE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left( \sqrt{P_i^{Saf}} - \sqrt{P_i^{Sol}} \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left( \sqrt{P_i^{Sol}} - \sqrt{P^{Sol}} \right)^2}$ , inspiré du critère de Nash-Sutcliffe (Nash and Sutcliffe, 1970).

Une corrélation se dessine dans les graphes entre les différences de performances et l'écart relatif des cumuls de pluie ou l'indice GORE (cf. Fig. 9 et 10). Néanmoins, nous sommes loin d'une corrélation parfaite et il n'est pas possible de conclure quoi que soit concernant les qualités d'une bonne pluie pour le modèle.

Deux caractéristiques des pluies (au moins) sont donc importantes pour obtenir de bonnes performances du modèle :

- le cumul sur une certaine période,
- la répartition des pluies sur cette période (comme le montre l'ordre des performances obtenues avec les pluies  $P^{Saf}$ , puis  $P^{Sol}$  et enfin  $P^{Corr}$ ).

Cela pose la question du pas de temps adapté à la prévision.

#### III.5 Quelle finesse pour le pas de temps ?

Une approche pour déterminer à quel point les données de pluie doivent être précises dans le temps est de comparer les performances obtenues avec les mêmes données de pluie, agrégées à des pas de temps de longueurs différentes. Nous nous limitons ici à comparer les pluies horaires, les pluies agrégées sur des pas de temps de 3 et 6 heures.

##### Comment comparer les résultats obtenus à des pas de temps différents ?

Il n'est pas possible de comparer directement les performances correspondant aux débits horaires, aux débits moyens sur 3 heures et 6 heures. Nous allons donc comparer les prévisions sur des débits moyens sur 6 heures réalisés à l'aide des pluies horaires, agrégées sur 3 ou 6 heures :

1. La première étape est donc l'agrégation des pluies horaires sur 3 et 6 heures.
2. Puis GRP est utilisé avec ces trois données de pluie pour réaliser des prévisions au même horizon de prévision mais en fonctionnant avec des



### III COMPARAISON DES PERFORMANCES EN PRÉVISION

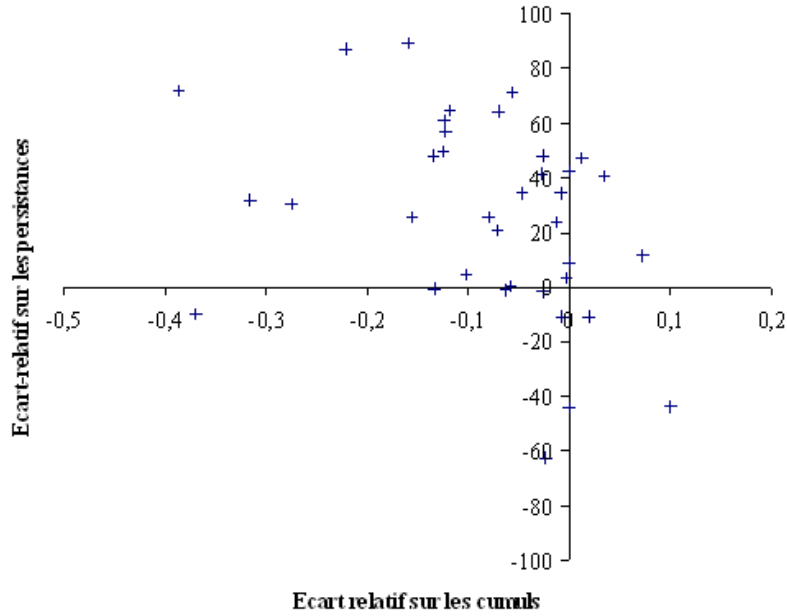


FIG. 9 – Exemple de recherche de corrélation entre les écarts des performances obtenues avec les données  $P^{Sol}$  et  $P^{Saf}$ , et la différence relative des cumuls de ces chroniques sur toute la période étudiée (ici pour  $\alpha_j = 1$ )

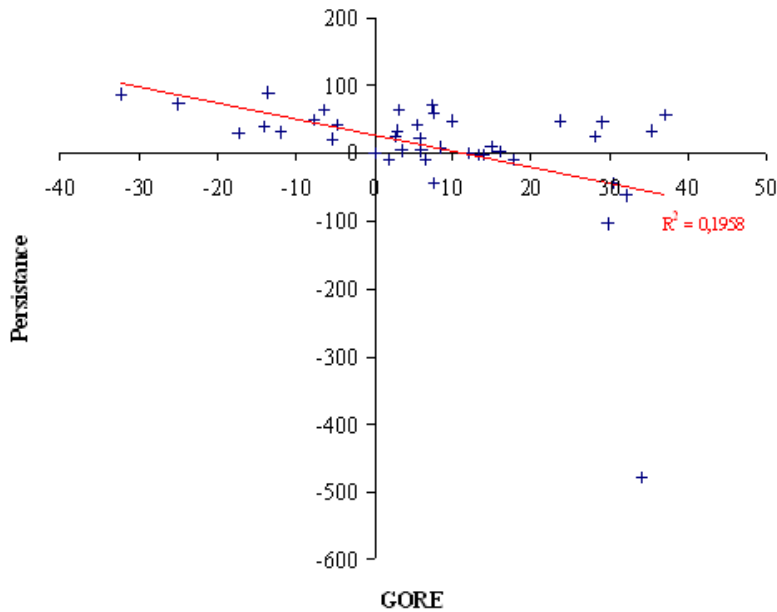


FIG. 10 – Exemple de recherche de corrélation entre les écarts des performances obtenues avec les données  $P^{Sol}$  et  $P^{Saf}$ , et l'indice GORE calculé sur ces chroniques de pluie (ici pour  $\alpha_j = 1$ )

### III COMPARAISON DES PERFORMANCES EN PRÉVISION

---

pas de temps de longueurs différentes : les prévisions aboutissent à des débits horaires, des débits moyens sur 3 heures et des débits moyens sur 6 heures.

3. Les chroniques de débits horaires et moyens sur 3 heures résultants ont ensuite été agrégées pour définir des chroniques de débits prévus pour des pas de temps de 6 heures. Ce sont les performances de ces chroniques que nous avons comparées.

La figure 11 présente ce protocole.

Ce procédé a été réalisé pour les trois chroniques de pluie  $P^{Sol}$ ,  $P^{Saf}$  et  $P^{Corr}$  et pour trois horizons de prévision différents définis par  $\alpha = 0,5$ ,  $\alpha = 1$  et  $\alpha = 1,5$ . Comme les données sont agrégées sur  $n$  heures et que le modèle travaille avec des pas de temps et non en tenant compte de la durée de ces pas de temps, les prévisions sont faites à  $H_{i,j,n} = \frac{\alpha_j \cdot L_i}{n}$  pas de temps. Aussi nous avons dû écarter pour cette étude les bassins tels que  $L_i \leq \frac{6}{\alpha}$ .

#### Résultats

Pour toutes les pluies et pour les trois horizons de prévision, les performances des prévisions de débits hexahoraires faites avec les pluies horaires et avec les pluies agrégées sur 3 heures sont équivalentes (les pluies agrégées sur 3 heures sont parfois légèrement plus efficaces). Les performances obtenues avec les pluies agrégées sur 6 heures sont moins bonnes. Deux hypothèses peuvent expliquer ce résultat : soit la précision horaire n'est pas nécessaire pour prévoir les débits moyens sur 6 heures soit le modèle n'est pas capable d'utiliser l'information supplémentaire contenue dans les données horaires par rapport à l'information contenue dans les pluies agrégées sur 3 heures.

Nous avons en outre comparé l'évolution des écarts relatifs des performances obtenues avec les pluies  $P^{Saf}$  et  $P^{Corr}$  (qui ont les mêmes cumuls journaliers) avec la longueur du pas de temps employé. Cet écart-relatif se comble légèrement à mesure que la longueur du pas de temps augmente. Cette évolution était attendue. La faiblesse de l'évolution peut avoir deux explications : la première est que les pluies  $P^{Saf}$  ont une répartition sur des périodes de 6 heures qui reste mauvaise<sup>5</sup>. L'autre explication, reliée aux constatations pré-

---

<sup>5</sup>A ce sujet, T. Mathevet fait remarquer que par exemple les algorithmes de désagrégation de  $P^{Saf}$  font pleuvoir souvent à 4 heures du matin (au moment où l'humidité de

### III COMPARAISON DES PERFORMANCES EN PRÉVISION

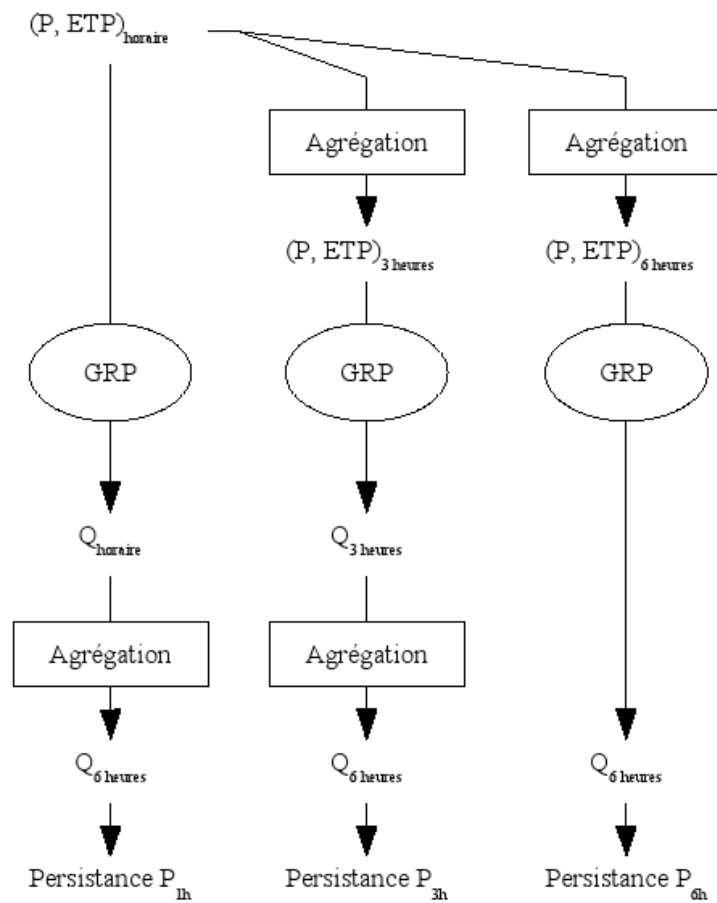


FIG. 11 – Schéma de l'expérience permettant d'évaluer les différences de performances obtenues avec des données sur 1, 3 et 6 heures

### III COMPARAISON DES PERFORMANCES EN PRÉVISION

---

cédentes, est que le modèle n'utilise pas toute l'information contenue dans les données horaires et notamment pas la répartition horaire qui lui est fournie.

---

l'air est la plus élevée) !

## IV Fonctionnement du modèle GRP au pas de temps horaire

### IV.1 Performances moyennes

Au pas de temps journalier, le modèle GRP donne des performances dont la moyenne sur un échantillon de 188 bassins versants est de l'ordre de 30 points de persistance pour une prévision à 1 jour, 10 points à 2 jours (Tangara, 2005). Il n'est pas possible de comparer directement les performances moyennes obtenues lors de ce stage avec ces dernières pour plusieurs raisons :

- les horizons de prévision sont différents,
- les bassins versants utilisés dans cette étude sont moins nombreux que ceux utilisés par Tangara (2005),
- les durées des chroniques sont différentes,
- les chroniques horaires sont a priori plus riches en information exploitable par le modèle que les chroniques journalières.

Cependant, les valeurs moyennes de performance obtenues (cf. Tab. 2) au cours de ce stage donnent à penser que le modèle, bien qu'optimisé pour le pas de temps journalier, fonctionne déjà assez bien au pas de temps horaire. Pour aller plus loin, nous avons sélectionné les bassins versants pour lesquels l'estimation du temps de base  $L_i$  est proche de 12 h ou de 24 h. Les séries de débits horaires prévus ont été agrégées pour donner les débits moyens journaliers prévus sur lesquels ont été calculées les persistances journalières pour des horizons de prévision définis par  $\alpha_j = 2$  (24 ou 48 heures) et  $\alpha_j = 1$  (24 heures) (cf. Tab. 4). Toutes ces valeurs sont nettement supérieures aux performances moyennes obtenues avec des données journalières par Tangara (2005) : le modèle semble donc capable d'utiliser l'information supplémentaire contenue dans les données horaires.

Il ne s'agit que d'un très petit échantillon (limité par les exigences sur les horizons de prévision) sur lequel on ne peut pas fonder de conclusions définitives. Pour situer les bassins versants de cet échantillon parmi les 40 bassins de l'étude, le tableau 5 donne les performances de GRP avec la même donnée de pluie pour les prévisions aux mêmes horizons sur les débits horaires sur ces bassins et leurs rangs au sein des 40 bassins versants : il s'agit, pour la plupart, de bassins versants sur lesquels GRP obtient ses meilleures

#### IV FONCTIONNEMENT DU MODÈLE GRP AU PAS DE TEMPS HORAIRE

---

Bassin versant	$L_i$	Prévision des débits journaliers (horaires agrégés)		
		à environ 1 jour	à environ 2 jours	à environ 3 jours
J4712010	10	74,6		
J2034010	12	69,5		
K0550010	12	71,0		
H3613010	27	72,0	72,8	
H2513110	28	52,5	57,1	
H3923010	30	83,0		
K5653010	36			66,0

TAB. 4 – Performances exprimées en persistance des prévisions de débits journaliers calculés comme moyenne journalière des débits horaires prévus par GRP à partir des pluies  $P^{Corr}$

Bassin versant	$L_i$	Prévision des débits horaires à environ					
		1 jour		2 jours		3 jours	
		Persistance	Rang	Persistance	Rang	Persistance	Rang
J4712010	10	71,9	4				
J2034010	12	65,8	11				
K0550010	12	75,3	3				
H3613010	27	61,5	6	65,7	12		
H2513110	28	48,3	14	53,2	20		
H3923010	30	82,1	1	84,9	1		
K5653010	36					66,2	10

TAB. 5 – Performances exprimées en persistance des prévisions de débits horaires par GRP à partir des pluies  $P^{Corr}$

performances au pas de temps horaire ; la lecture du tableau 4 est donc à nuancer.

## IV.2 Stabilité des calages obtenus

Les jeux de paramètres optimaux dépendent de l’horizon de prévision puisque le calage se fait en mode « prévision ». Cependant il serait troublant que les jeux de paramètres obtenus par calage pour différents horizons de prévision soient très différents les uns des autres. De même, les données de pluie représentant les mêmes précipitations, il serait difficile d’expliquer qu’elles mènent lors du calage à des jeux de paramètres optimaux très différents. Ainsi, la stabilité du calage est une indication du bon fonctionnement du modèle.

Nous avons représenté pour chaque bassin versant, les valeurs de chaque paramètre pour les différents horizons de prévision et les différentes données de pluie. Nous avons examiné les graphes obtenus pour déterminer si les calages réalisés avec les différentes données de pluie aboutissaient (à un horizon de prévision donné) à un jeu de paramètres unique, à deux ou trois optima bien définis ou si le calage n’était pas net (cf. Tab. 6). De même, nous avons vérifié si les calages à différents horizons de prévision donnaient pour une même pluie, un même optimum, deux ou trois optima bien définis ou non (cf. Tab. 7). Des exemples de ces différentes situations sont présentées en figure 12.

1 optimum	2 ou 3 optima distincts	Peu clair
9	21	10

TAB. 6 – Répartition des calages selon le nombre d’optima différents obtenus pour différentes données de pluie à un horizon de prévision donné sur les 40 bassins versants.

Nous constatons que l’utilisation de différentes pluies conduit en majorité à l’obtention de 2 ou 3 jeux de paramètres lors du calage. Cependant, la surface de réponse des modèles GR est connue pour être assez régulière (Edijatno, 1991). Lorsque nous rencontrons deux ou trois optima proches les uns des autres, il est difficile de savoir s’il s’agit d’un même optimum dont l’estimation lors du calage s’est déplacé légèrement du fait de l’emploi de données de pluie différentes ou s’il s’agit bien d’extrema locaux bien distincts. Cela

#### IV FONCTIONNEMENT DU MODÈLE GRP AU PAS DE TEMPS HORAIRE

---

confirme le fait que les paramètres reflètent aussi une adaptation aux données d'entrée (Oudin et al., 2006).

En ce qui concerne l'évaluation de la stabilité du calage pour les différents horizons de prévision, l'estimation du temps de base  $L_i$  étant égal à 0,5 pas de temps pour 10 bassins versants, tous les horizons de prévision sont égaux à 1. Aussi, nous ne pouvons observer pour ces bassins versants l'évolution des calages pour divers pas de temps. Ces bassins versants ont été sortis de l'étude de l'évolution du calage avec les horizons de prévision pour cette raison. Pour quelques autres bassins versants, les horizons de prévision les plus petits peuvent être égaux à 1 (et égaux entre eux). Cependant, cette étude porte sur un nombre important de calages distincts, puisque ce nombre est le produit de :

- 3 pluies,
- 2 périodes de calage distinctes,
- 162 bassins versants  $\times$  horizons de calage distincts.

Soit 972 calages distincts.

1 optimum	2 ou 3 optima distincts	Peu clair
16	11	3

TAB. 7 – Répartition des calages selon le nombre d'optima différents obtenus à différents horizons de prévision pour une pluie donnée sur les 30 bassins versants se prêtant à cette étude.

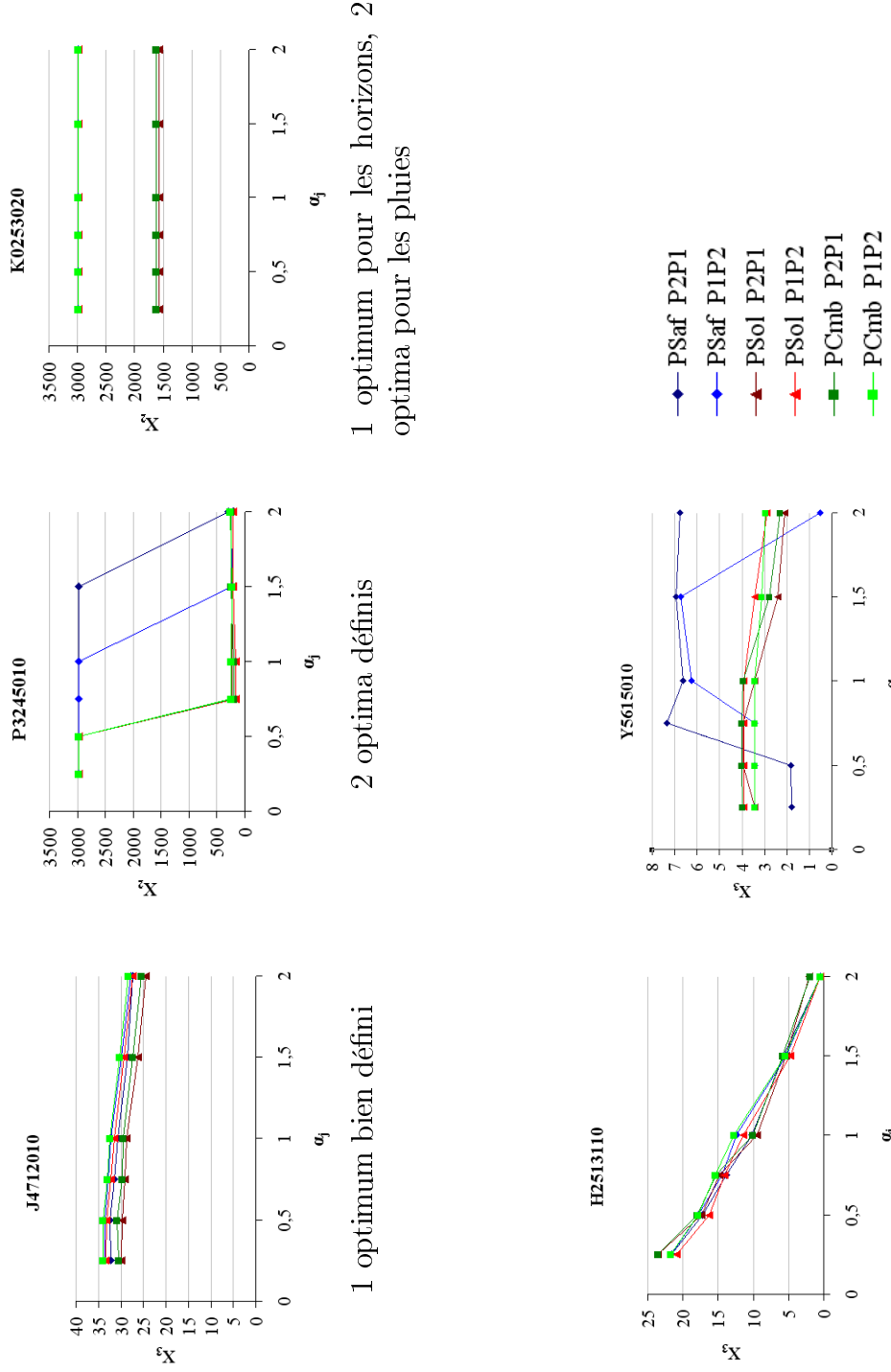
Pour une donnée de pluie, la majorité des bassins versants présente des jeux de paramètres très stables lorsque l'horizon de prévision varie.

Ces observations et le fait que le nombre de bassins versants où il est difficile de définir un optimum ou quelques optima communs aux différentes pluies et aux différents horizons de prévision est très faible, indiquent que dans la grande majorité des cas, le calage semble bien fonctionner. En outre, les valeurs obtenues lors du calage restent dans des gammes connues (pour le modèle GRP), ce qui montre que les jeux de paramètres obtenus sont raisonnables.

Ainsi, la faible durée de nos chroniques et donc la courte durée utilisée pour



## IV FONCTIONNEMENT DU MODÈLE GRP AU PAS DE TEMPS HORAIRE



1 optimum pour les pluies, peu clair pour les horizons de prévision

FIG. 12 – Exemples de situations typiques d'évolution des paramètres calés avec l'emploi de différentes données de pluie et à différents horizons de prévision permettant d'évaluer la stabilité des calages. P1P2 et P2P1 désignent les périodes utilisées en calage et contrôle.

caler le modèle n'a pas eu un impact trop important et n'a pas empêché la procédure de calage d'obtenir, dans la grande majorité des cas, des jeux de paramètres satisfaisants.

### IV.3 Premières pistes d'amélioration du modèle GRP au pas de temps horaire

Deux pistes pour améliorer les performances du modèle au pas de temps horaire ont été explorées :

- « libérer » la taille du réservoir de production, paramètre qui avait été fixé à 650 mm lors de la conception du modèle GRP pour le pas de temps journalier.
- proposer d'autres formes d'hydrogramme unitaire.

#### IV.3.1 Ces pistes sont-elles liées au pas de temps ?

##### La taille du réservoir de production dépend-elle du pas de temps ?

Le réservoir de production est caractérisé par sa taille  $A$  et son niveau  $S$ . Son rôle est de déterminer la proportion de l'eau précipitée qui va ruisseler  $P_n - P_s$  en fonction de son taux de remplissage ( $k = \frac{S}{A}$ ). La compréhension physique intuitive du modèle est que  $k$  représente le taux d'humidité du sol et  $A$  la quantité d'eau maximale qu'il peut stocker. Dans cette interprétation,  $A$  ne devrait pas dépendre du temps. Examinons la représentation mathématique de ce schéma. La fonction de répartition est :

$$f_A(P_n, S) \longrightarrow P_s = \frac{A \cdot \left(1 - \left(\frac{S}{A}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{A}\right)}{1 + \frac{S}{A} \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{A}\right)}$$

Elle est dérivée de la solution de l'équation différentielle ((Michel, 1991) et pour plus de détails, voir l'annexe 3.1 de (Edijatno, 1991)) :

$$dS = \left(1 - \left(\frac{S}{A}\right)^2\right) \cdot P dt$$

Cela nous assure que la fonction de répartition vérifie l'équation (\*) pour les petites quantités de pluie. Aussi, la fonction de répartition (et donc  $A$ ) est

## IV FONCTIONNEMENT DU MODÈLE GRP AU PAS DE TEMPS HORAIRE

---

indépendante du pas de temps.

$$f_A \left( \sum_{i=1}^{24} P_{n,i}, S \right) = \sum_{i=1}^{24} f_A(P_{n,i}, S) \quad (*)$$

On retrouve ce résultat par un développement limité de  $f_A$  en  $P/A \simeq 0$ , justifié par le fait que pour les pluies horaires,  $P \ll A$ .

### Hydrogramme unitaire discrétisé et pas de temps

L'hydrogramme unitaire que nous employons ne joue pas exactement le même rôle au pas de temps horaire et au pas de temps journalier. Au pas de temps journalier, l'hydrogramme unitaire est généralement très court et se rapproche du décalage pur dans le temps tandis qu'au pas de temps horaire, il a beaucoup plus une fonction de répartition temporelle. En outre, Mathevet (2005) a montré qu'en simulation au pas de temps horaire, l'hydrogramme unitaire a un rôle de lissage des données de précipitation qui sont beaucoup plus hachées qu'au pas de temps journalier, ce qui privilégie l'emploi d'hydrogrammes peu anguleux.

### IV.3.2 Tests réalisés

Ont été testés à trois horizons de prévision (pour  $\alpha_j \in \left\{ \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2} \right\}$ ), pour les données de pluie  $P^{Corr}$ , en libérant le paramètre *taille du réservoir de production* :

- l'hydrogramme symétrique de GRP noté GR4P,
- un hydrogramme triangulaire symétrique noté GR4P-TRI,
- un hydrogramme « circulaire » (elliptique) noté GR4P-CER,
- un hydrogramme de GRP asymétrisé noté GR4P-ASY,
- un décalage pur dont le délai est calé (à la place de la longueur de l'hydrogramme unitaire) noté GR4P-DEC.

Ces différents hydrogrammes sont représentés en figure 13.

Le modèle GRP employé jusqu'ici sera noté GR3P pour le différencier de GR4P qui est le même modèle, calé en libérant la taille du réservoir de production (quatrième paramètre).

## IV FONCTIONNEMENT DU MODÈLE GRP AU PAS DE TEMPS HORAIRE

---

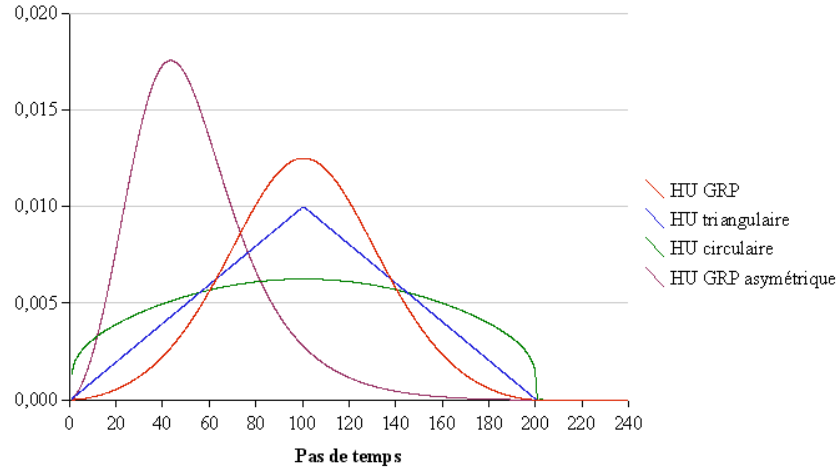


FIG. 13 – Les différents hydrogrammes unitaires testés

### IV.3.3 Résultats des comparaisons

#### Libération de la taille du réservoir de production

Caler la taille du réservoir de production (en même temps que les trois paramètres de GRP) ne permet pas d'améliorer les performances du modèle pour  $\alpha = 1/2$  (cf. Tab. 8), mais permet de gagner plusieurs points de persistance en moyenne pour des horizons de prévision plus longs ( $\alpha = 1$  et  $\alpha = 3/2$ ).

Horizons de prévision	$\alpha = \frac{1}{2}$	$\alpha = 1$	$\alpha = \frac{3}{2}$
<b>GR3P</b>	33,8	38,4	41,1
<b>GR4P</b>	33,6	42,8	48,3

TAB. 8 – Performances moyennes de GRP avec les pluies  $P^{Corr}$  sur les 40 bassins versants selon que la taille du réservoir de production est calé ou non

La variabilité des écarts de performances a été représentée pour les différents horizons de prévision (cf. Fig. 14 pour  $\alpha = 1$ ). Les mesures ont fait l'objet de tests statistiques similaires à ceux réalisés dans la partie III.2. Il en résulte

#### IV FONCTIONNEMENT DU MODÈLE GRP AU PAS DE TEMPS HORAIRE

---

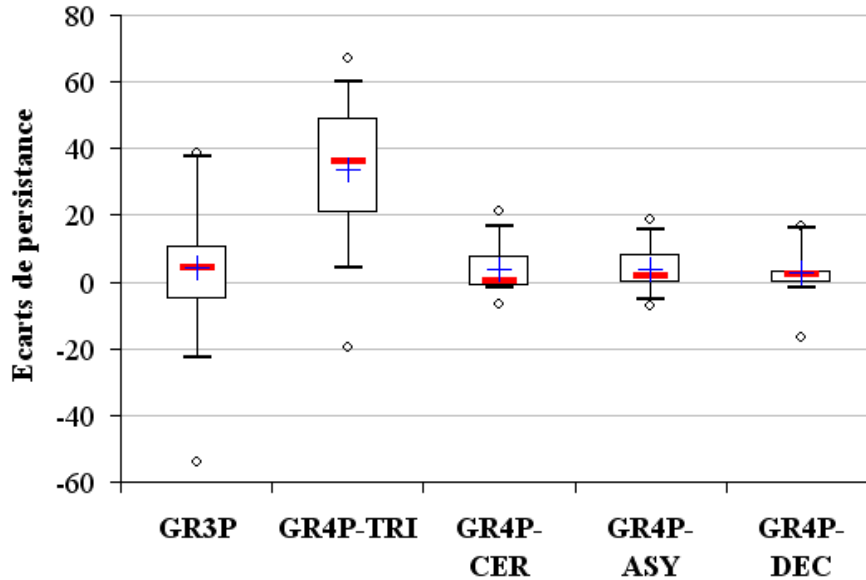


FIG. 14 – Variabilité des écarts de performances des différents hydrogrammes unitaires comparés à celui de GR4P, observée sur les 40 bassins versants (ici pour  $\alpha = 1$ )

que pour  $\alpha = 1/2$ , horizon pour lequel GR3P est très légèrement meilleur en moyenne que GR4P, la confiance à accorder au fait que GR3P soit meilleur que GR4P est de 6 %. Pour  $\alpha = 1$  et  $\alpha = 3/2$ , où les résultats moyens de GR4P sont nettement meilleurs que ceux de GR3P, la confiance à accorder à l’assertion que l’espérance de performance de GR4P est supérieure à celle de GR3P atteint 82 % et 95 %.

Une autre manière de décider s’il faut fixer ou laisser libre la taille du réservoir de production est d’observer sa variabilité (cf. Fig. 15). Ce paramètre quand il est calé varie de quelques dizaines de millimètres à quelques dizaines de mètres ! Cependant, pour la grande majorité des bassins versants, ce paramètre ne dépasse pas 2000 millimètres (au-delà, la procédure d’initialisation pose des problèmes particuliers et les résultats pour ces bassins sont certainement contestables). L’étendue de ces valeurs qui ne se répercute pas dans les performances laisse à penser que la valeur de ce paramètre n’a pas une grande influence sur les performances et peut générer des instabilités au

## IV FONCTIONNEMENT DU MODÈLE GRP AU PAS DE TEMPS HORAIRE

---

calage.

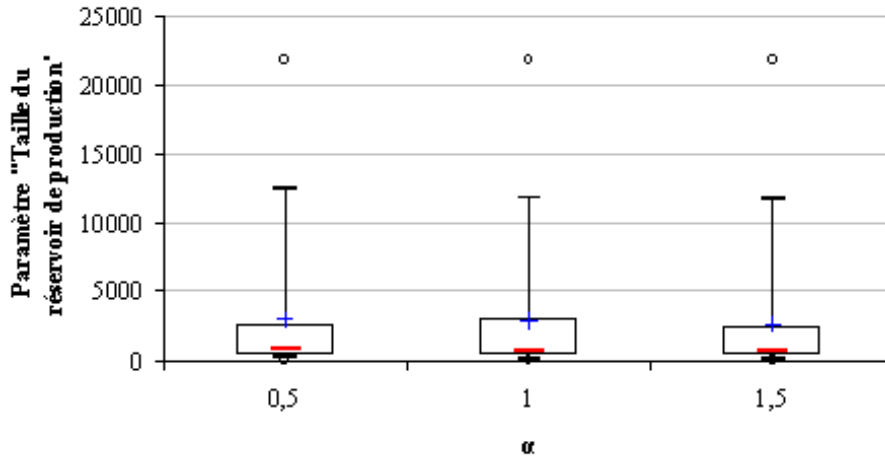


FIG. 15 – Variabilité de la taille du réservoir de production observée lors du calage sur les 40 bassins versants à différents horizons de prévision

On peut noter cependant que la médiane observée (769 mm pour  $\alpha = 1/2$  et 665 mm pour  $\alpha \in \{1, 3/2\}$ ) est proche de la médiane trouvée par Tangara (2005) sur un autre échantillon de bassins-versants et au pas de temps journalier, ce qui est cohérent avec le calcul réalisé page 36.

### Essais de différents hydrogrammes unitaires

Tous les hydrogrammes unitaires testés à l'exception de l'hydrogramme triangulaire apportent au modèle GR4P des performances moyennes proches de celles obtenues précédemment avec l'hydrogramme de GR3P (cf. Tab. 9). Ces performances moyennes sont légèrement moins bonnes que celles de l'hydrogramme « initial ». Il est remarquable que le décalage pur obtienne d'aussi bons résultats que les hydrogrammes au pas de temps horaire.

Les performances moyennes obtenues par le modèle incluant l'hydrogramme triangulaire sont nettement moins bonnes que celles de GR4P. Ceci peut s'expliquer par la nature beaucoup plus anguleuse de cet hydrogramme, comparé

IV FONCTIONNEMENT DU MODÈLE GRP AU PAS DE  
TEMPS HORAIRE

---

Horizons de prévision	$\alpha = \frac{1}{2}$	$\alpha = 1$	$\alpha = \frac{3}{2}$
<b>GR4P</b>	33,6	42,8	48,3
<b>GR4P-TRI</b>	11,9	9,1	11,2
<b>GR4P-CER</b>	30,8	39,2	45,5
<b>GR4P-ASY</b>	29,3	38,9	46,5
<b>GR4P-DEC</b>	28,4	39,8	46,8

TAB. 9 – Performances moyennes de GR4P avec les pluies  $P^{Corr}$  sur les 40 bassins versants selon la nature de l’hydrogramme unitaire employé

aux autres hydrogrammes.

La distribution des écarts de performances entre le modèle GR4P initial et ce modèle incluant un autre hydrogramme est assez ramassée (cf. Fig. 14), ce qui rend assez certain que l’hydrogramme unitaire initial est plus efficace que les variantes proposées. Un essai supplémentaire qu’il serait intéressant de réaliser est de reprendre la forme de l’hydrogramme unitaire asymétrique qui semble intéressante en libérant le paramètre qui renforce ou affaiblit son asymétrie.





## Conclusions

Cette étude a permis de s'intéresser à deux problématiques différentes :

- la sensibilité du modèle à la donnée de pluie qui lui est fournie,
- le fonctionnement à un pas de temps fin d'un modèle de prévision global conçu pour un pas de temps moins fin.

### Comparaison de différentes données de pluie

Nous avons comparé les performances obtenues par le modèle global GRP avec des données de pluie différentes au pas de temps horaire sur 40 bassins versants français. La première donnée de pluie est la moyenne des mesures faites par un réseau de pluviomètres. La deuxième provient de l'interpolation faite au sein du modèle atmosphérique SAFRAN. La troisième est une combinaison des deux précédentes, permettant de corriger leurs défauts connus. Nous avons pu montrer que les pluies mesurées au sol permettaient d'obtenir de nettement meilleurs résultats que les pluies issues de l'interpolation SAFRAN, tandis que les pluies « corrigées », combinaison des deux premières données amenaient le modèle à des résultats légèrement mais encore significativement, meilleurs.

Il est délicat d'expliquer ce qui fait la qualité d'une donnée de pluie. Si les plus gros écarts de performance sont explicables par la faible (ou au contraire la forte) densité du réseau de mesure pour tel ou tel bassin versant, nous n'avons pas pu mettre en évidence de liens globaux entre les écarts de performance et une ou des caractéristique(s) du bassin versant. Cela n'est pas étonnant : entre les caractéristiques du bassin versant et le débit calculé résultant du modèle se trouvent plusieurs « écrans » qui brouillent un éventuel lien. Le premier est la nature du réseau de mesures (densité et emplacements) qui varie d'un bassin à l'autre, même si la qualité de ce réseau dépend en partie du bassin versant (effets orographiques et zones difficiles d'accès où il n'y a pas de stations de mesure, par exemple) : le signal « pluie » et donc le débit calculé sont liés à ce réseau.

Il nous faut donc nous intéresser plus directement au signal « pluie ». Nous n'avons pas trouvé de liens entre les performances obtenues et les caractéristiques statistiques des données de pluie autres que le cumul. Nous nous sommes donc penchés sur l'importance relative du cumul sur des périodes de différentes longueurs et de la répartition des pluies dans ces périodes, comme

nous y invitaient les différences de performance des trois données de pluie.

Pour étudier ces importances relatives, nous avons comparé les performances obtenues selon qu'on utilise les pluies horaires, les pluies agrégées sur 3 heures et les pluies agrégées sur 6 heures. Il ressort que le modèle n'est pas plus performant au pas de temps horaire qu'au pas de temps de 3 heures : il ne tire pas parti de l'information supplémentaire qu'est la répartition horaire dans les périodes de 3 heures.

### **Fonctionnement du modèle**

L'étude menée a été aussi l'occasion de tester le fonctionnement du modèle GRP au pas de temps horaire alors que ce modèle a été conçu pour le pas de temps journalier. Ces deux pas de temps sont très différents car les signaux d'entrée ne se ressemblent pas : les pluies horaires sont beaucoup plus « hachées » que les pluies journalières et l'ETP horaire varie largement dans la journée alors que la variation de l'ETP journalière est beaucoup plus ample. De plus, GRP est parcimonieux et les valeurs de plusieurs paramètres ont été fixées lors d'essais faits au pas de temps journalier pour éviter qu'il y ait trop de paramètres à caler pour chaque bassin versant.

Les performances moyennes obtenues au pas de temps horaire sont tout à fait raisonnables. De plus, il semble bien (même si nous avons trop peu de bassins versants testés pour l'affirmer définitivement) que GRP fonctionnant au pas de temps fin est capable de prendre en compte la richesse supplémentaire contenue dans la donnée horaire (comparée à la donnée journalière), même pour calculer des débits journaliers moyens.

Pour évaluer le fonctionnement au pas de temps horaire de GRP, nous nous sommes également intéressés à la stabilité du calage à différents horizons de prévision et pour différentes données de pluie. Dans la grande majorité des cas, ce calage est assez stable, ce qui donne à penser que le calage fait avec des données horaires se passe bien.

Deux pistes d'amélioration du modèle au pas de temps horaire ont finalement été explorées. La première concerne l'opportunité de libérer la taille du réservoir de production, paramètre fixé dans GRP, la seconde s'intéresse à la forme optimale de l'hydrogramme unitaire employé. Dans le premier cas, les performances moyennes s'améliorent de quelques points de persistance

et la médiane des tailles calées du réservoir reste proche de la valeur fixée initialement dans GRP. Dans le second cas, tous les hydrogrammes testés du plus anguleux au plus « rond » conduisent à des performances moins bonnes que l'hydrogramme de GRP. L'hydrogramme le plus anguleux amenant à des performances nettement moins bonnes.

### **Quelles perspectives ?**

L'utilisation du pas de temps horaire apporte une amélioration sensible des performances en comparaison avec l'emploi du pas de temps journalier, ce même avec un modèle optimisé pour le pas de temps journalier. Néanmoins, il apparaît que ces performances peuvent être atteintes par le modèle avec un pas de temps trihoraire. Il serait donc intéressant de vérifier par une analyse des chroniques de débits si la répartition horaire des pluies influe réellement sur les débits moyens observés sur quelques heures sur les bassins étudiés ou si le modèle est actuellement incapable de tirer parti de cette information. En effet, la structure du modèle lisse le signal très « haché » des pluies horaires par au moins deux de ses composantes : le réservoir de routage (très grand par rapport à la quantité d'eau qui y entre au cours d'un pas de temps) et l'hydrogramme unitaire très lisse au pas de temps horaire.

Il est nécessaire de reprendre le modèle pour l'adapter aux pas de temps plus fins. Dans un premier temps, on pourra se concentrer sur les composantes qui dépendent nettement du pas de temps, mais comme le modèle est un tout, il faudra ensuite s'intéresser de façon plus systématique à toutes les étapes du modèle.

Outre la structure du modèle, le passage à des pas de temps plus fins amènera à s'interroger sur l'interaction du modèle avec les données d'entrée, notamment en ce qui concerne la sensibilité à la méconnaissance des pluies futures (ce qui n'a pas du tout été fait dans cette étude) et la prise en compte de l'information spatiale des données de pluie qui est d'autant plus cruciale que le pas de temps s'affine.



---

## Références

- Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., Usart-Sanchez, I., and Jacques, L. (2001). Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models. *Journal of Hydrology*, 250 :206 – 223.
- Bergström, S. (1995). *Computer Models of Watershed Hydrology*, chapter The HBV model, pages 443–476. Singh, V.P.
- Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 28(4) :1015 – 1031.
- Edijatno (1991). *Mise au point d'un modèle élémentaire Pluie-Débit au pas de temps journalier*. PhD thesis, Université Louis Pasteur de Strasbourg et CEMAGREF.
- Fowler, A. (2002). Assessment of the validity of using mean potential evaporation in computations of the long-term soil water balance. *Journal of Hydrology*, 256 :248 – 263.
- Gan, T. Y. and Biftu, G. F. (1996). Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models : Optimization algorithms, catchment conditions, and model structure. *Water Resources Research*, 32(12) :3513 – 3524.
- Gan, T. Y., Dlamini, E. M., and Biftu, G. F. (1997). Effects of model complexity and structure, data quality, and objective functions on hydrologic modeling. *Journal of Hydrology*, 192 :81 – 103.
- Houdant, B. (2004). *Contribution à l'amélioration de la prévision hydrométéorologique opérationnelle. Pour l'usage des probabilités dans la communication entre acteurs*. PhD thesis, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts.
- Johansson, B. (2000). Areal precipitation and temperature in the swedish mountain. an evaluation from a hydrological perspective. *Nordic Hydrology*, 31 :207–228.
- Johansson, B. (2002). *Estimation of areal precipitation for hydrological modelling in Sweden*. PhD thesis, Göteborg University.

## RÉFÉRENCES

---

- Johansson, B. and Chen, D. (2003). The influence of wind and topography on precipitation distribution in sweden : statistical analysis and modelling. *International Journal of Climatology*, 23(12) :1523–1535.
- Klemeš, V. (1986). Operational testing of hydrologic simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1) :13 – 24.
- Le Moigne, P. (2002). Description de l’analyse des champs de surface sur la france par le système safran. CNRM/GMME N°77.
- Mathevet, T. (2005). *Quels modèles Pluie-Débit globaux au pas de temps horaire ? Développements empiriques et intercomparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants*. PhD thesis, Ecole nationale du Génie rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF).
- Michel, C. (1991). *Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux*. CEMA-GREF.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Forecasting through conceptual models : part I - A : discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 :282–290.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., and Loumagne, C. (2005a). 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 :290 – 306.
- Oudin, L., Michel, C., and Anctil, F. (2005b). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? part 1 – can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs? *Journal of Hydrology*, 303 :275 – 289.
- Oudin, L., Perrin, C., Mathevet, T., Andréassian, V., and Michel, C. (2006). Impact of biased and randomly corrupted inputs on the efficiency and the parameters of watershed models. *Journal of Hydrology*, 320(1-2) :62–83.
- Paturol, J. E., Servat, E., and Vassiliadis, A. (1995). Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data - case of the gr2m model. *Journal of Hydrology*, 168 :111 – 125.

- Perrin, C. (2000). *Vers une amélioration d'un modèle Pluie-Débit au travers d'une approche comparative*. PhD thesis, INPG.
- Sorooshian, S. and Gupta, V. K. (1983). Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models : the question of parameter observability and uniqueness. *Water Resources Research*, 19(1) :260 – 268.
- Sorooshian, S., Gupta, V. K., and Fulton, J. L. (1983). Evaluation of maximum likelihood parameter estimation techniques for conceptual rainfall-runoff models : Influence of calibration data variability and length on model credibility. *Water Resources Journal*, 19 :251 – 259.
- Tangara, M. (2005). *Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global*. PhD thesis, Ecole pratique des hautes études de Paris, Ecole doctorale : Sciences de la Vie et de la Terre, Laboratoire : Hydrologie et Environnement.
- Wang, Q. J. (1997). Using genetic algorithms to optimise model parameters. *Environmental Modelling & Software*, 12(1) :27 – 34.