



HAL
open science

Comparaison de deux modèles hydrologiques dans un contexte de prévision des crue

Flavien Riffiod

► **To cite this version:**

Flavien Riffiod. Comparaison de deux modèles hydrologiques dans un contexte de prévision des crue. Hydrologie. 2013. hal-02600754

HAL Id: hal-02600754

<https://hal.inrae.fr/hal-02600754v1>

Submitted on 16 May 2020

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.



Comparaison de deux modèles hydrologiques dans un contexte de prévision des crues

Mastère Hydraulique - ENSEEIHT

Flavien RIFFIOD

MAÎTRES DE STAGE :

Carina FURUSHO

David DORCHIES

Charles PERRIN

MEMBRES DU JURY :

Ludovic CASSAN

Jacques CHORDA

Alexei STOUKOV

13

Sommaire

Liste des figures :	5
Liste des tableaux :	5
Introduction :	7
I. Modèles utilisés	8
1. Le modèle d’ETP utilisé :	8
2. Le modèle GRP :	8
3. Le modèle TGR.....	9
4. Le module Cemaneige :	10
II. Bassins étudiés	11
1. Le Rhin :	11
a. Bassin du Rhin jusqu’à la frontière franco-allemande :	11
b. Régulation du Lac de Biemme :	12
c. Assemblage utilisé :	13
2. La Meuse	14
a. Bassin de la Meuse-amont :	14
3. Autres bassins testés :	15
III. Méthode et critères d’évaluation.....	16
1. Critères quadratiques	16
Critère de Nash-Sutcliffe :	16
Critère de persistance :	16
Critère de persistance bornée :	16
Critère calculés au dessus d’un seuil	17
2. Critères de franchissement de seuil :	17
3. Critère de « dynamisme »	18
IV. Résultats	19
1. Sur les bassins amont :	19
a. Influence du calage et de la correction sur GRP :	19
b. Influence du calage sur TGR :	21
2. Sur les assemblages :	23
a. Meuse-amont	23
b. Bassin du Rhin	25
3. Apport du module neige sur les bassins amont Suisses.....	29
V. Discussion	Erreur ! Signet non défini.

VI. Conclusion	31
Référence :	32
1. Ouvrage :	32
2. Thèses :	32
3. Articles :	32
4. Rapports :	32
5. Sites internet :	33
Annexes :	33

Liste des figures :

Figure 1 : Carte des 22 SPC (source MEDDE).....	7
Figure 2 : Déploiement de GRP	7
Figure 3 : Schéma du modèle GRP	8
Figure 4 : Schéma du modèle hydrologique GRK utilisé par TGR.....	9
Figure 5 : Réponse du « lag and route » utilisé dans TGR à un échelon de débits	9
Figure 6 : Structure et équations du module Cemaneige	10
Figure 7 : Bassin du Rhin à Bâle et 19 stations limnimétriques disponibles pour cette étude	11
Figure 8 : Effet sur le sens des écoulements de la régulation du lac de Biene	12
Figure 9 : Assemblage retenu pour le bassin du Rhin à Bâle.....	13
Figure 10 : Bassin de la Meuse-amont	14
Figure 11 : Assemblage utilisé pour la Meuse-amont.....	0
Figure 12 : 4 situations possibles du tableau de contingence.....	17
Figure 13 : Comparaison de la variation de débit prévue à la variation de débit observée	18
Figure 14 : Défauts de mesure du débit à Sarrebourg à cause du vannage.....	19
Figure 15: Critère de dynamisme pour 20 BV	22
Figure 17 : Efficacité comparé sur tous les débits et au dessus du seuil de vigilance à Neufchâteau pour TGR (bleu), GRP_TAN (rouge) et GRP_RNA (vert)	23
Figure 16 : Légende utilisée dans les graphes suivants.....	0
Figure 18 : Efficacité comparé sur tous les débits et au dessus du seuil de vigilance à Domrémy pour TGR (bleu), GRP_TAN (rouge) et GRP_RNA (vert).....	24
Figure 19 : Efficacité comparé sur tous les débits et au dessus du seuil de vigilance à Chalaines pour TGR (bleu), GRP_TAN (rouge) et GRP_RNA (vert).....	25
Figure 20 : Efficacité comparé au dessus du seuil de vigilance jaune à Bâle pour TGR (bleu), GRP_TAN (rouge) et GRP_RNA (vert)	26
Figure 21 : Variation prévue du débit en fonction de la variation observée à la station de Neuhausen en sortie de lac de Constance	28
Figure 22 : Hydrogrammes sur le tronçon Sarre-amont en mai 2013	0

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Analyse des lames d'eau écoulee sur les BV et BV _i de la Meuse	15
Tableau 2 : Distribution des valeurs de C2MP et C2MP_Q98 pour les 31 BV . Erreur ! Signet non défini.	
Tableau 3 : Distribution des valeurs de C2MP et C2MP_Q98 pour les 28 BV . Erreur ! Signet non défini.	
Tableau 4 : Performances des 3 calages de TGR	22
Tableau 5 : Comportement de TGR (à gauche) et GRP_TAN (à droite) à Bâle pour une échéance de 48h sur 3 événements.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 6 : EFF et EFF_Q99 avec (rouge) et sans (bleu) module neige sur 8 bassins suisses	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 7 : Paramètres de GRP dépendant de l'échéance utilisée.....	33
Tableau 8: Performances de GRP avec et sans le module neige sur les bassins suisses.....	33
Tableau 9 : Performances comparées entre TGR et GRP sur le tronçon Meuse-amont.....	34

Introduction :

Les hommes se sont toujours installés à proximité des cours d'eau, malgré les débordements possibles de ceux-ci lors des crues. La violence et les dégâts causés par celles-ci ont toujours eu un côté mystique, ce qui n'a pas empêché certains de chercher des explications rationnelles. Thalès a été l'un des premiers à voir l'eau sous toutes ses formes comme une entité unique, mais si l'on considère l'hydrologie comme l'étude du cycle de l'eau et des échanges entre l'atmosphère (nuages, pluie), la surface terrestre (rivières, lacs, océans) et le sous-sol (nappe, rivières souterraines), Aristote est un des premiers hydrologues à expliquer certains phénomènes de condensation et de rosée.

Faute de mesure, les Grecs n'ont cependant pas pu relier correctement les grandeurs et il faudra des siècles avant d'avoir de réels modèles hydrologiques. Ceux-ci sont classés en trois grandes familles, les modèles conceptuels, les modèles empiriques et les modèles physiques. Les modèles empiriques sont des « boîtes noires » qui lient les entrées et les sorties par des relations mathématiques sans chercher un sens physique. Les modèles conceptuels peuvent être assimilés à des boîtes grises puisqu'ils font des bilans d'eau et cherchent à représenter le fonctionnement du bassin versant grâce à différents réservoirs. Les différents paramètres du modèle sont ensuite calés à partir de données mesurées (précipitation, débit, pluie, rayonnement...) mais les valeurs pris par ces paramètres ne sont pas mesurables directement sur le terrain. Le troisième type de modèle est physique ou à base physique où les relations qui quantifient les échanges sont élaborées à partir d'équations physiques où les paramètres sont théoriquement mesurables sur le terrain.

L'utilisation de modèles hydrologiques dans les services d'état est assez récente. En effet, avant la réforme de 2005, la surveillance était assurée par 55 services d'annonce des crues (SAC) indépendants et dont le rôle était de prévenir les crues en aval principalement à partir des débits mesurés aux stations amont. Ce système a cependant montré ses limites, notamment lors de l'événement cévenol de septembre 2002 qui causa la mort de vingt-deux personnes dans le département du Gard. La réforme de la vigilance s'est donc faite en regroupant les services d'annonce des crues en vingt-deux services de prévisions des crues (SPC, Figure 1) et en créant le service centrale d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations (SCHAPI) qui travaille en lien étroit avec Météo France.

Une convention de partenariat de recherche entre le SCHAPI et l'IRSTEA (anciennement CEMAGREF) a pour objectif de développer des outils de prévision des crues facilement déployables dans le réseau des SPC. Le modèle GRP a été développé dans ce sens d'abord par Tangara (2005) puis par Berthet (2010) qui l'a adapté au pas de temps horaire. Il est déjà utilisé en opérationnel dans 9 des 22 SPC et en test dans 8 autres (Figure 2). Un nouveau modèle va être mis-à-disposition des SPC avant la fin de l'année, TGR, qui à la différence de GRP est semi-distribué ; le sujet de cette étude est la comparaison des performances de ces deux modèles dans un usage de prévision des crues sur des bassins du SPC Rhin-Sarre, la Meuse ainsi que sur le Rhin.



Figure 1 : Carte des 22 SPC (source MEDDE)

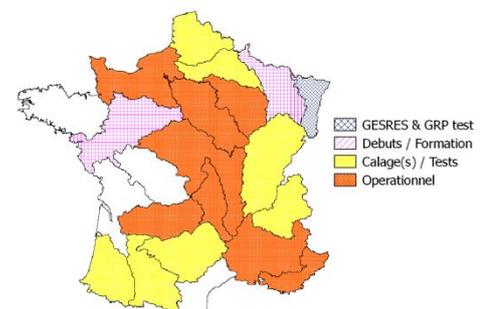


Figure 2 : Déploiement de GRP

I. Modèles utilisés

1. Le modèle d'ETP utilisé :

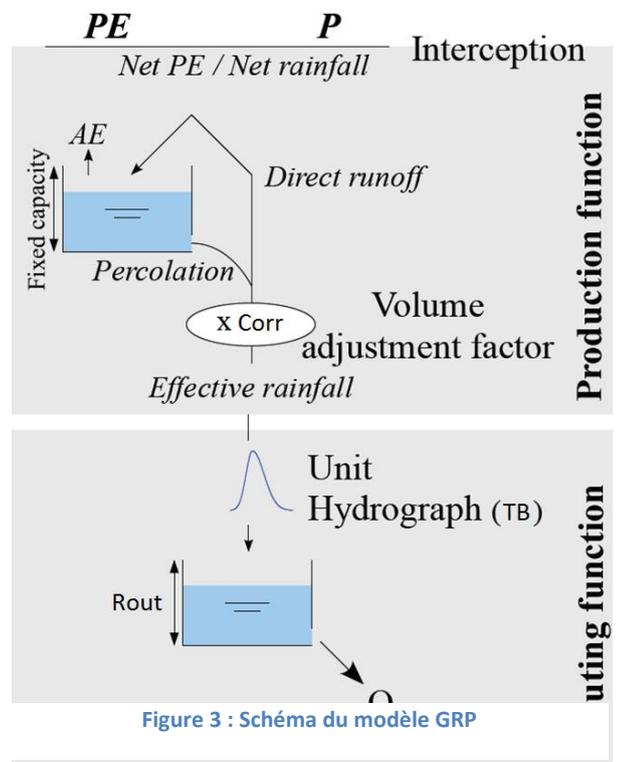
L'évapotranspiration représente l'eau passant vers l'atmosphère et peut être vu de manière simplifiée comme la différence entre l'eau précipitée et l'eau écoulee. Sur la majorité des bassins versants, elle vaut plus de 50% de la valeur des précipitations. Cette évapotranspiration ne peut cependant pas être directement mesurée à l'échelle d'un bassin, c'est pourquoi on la calcule à partir de formules plus ou moins empiriques et elle est considérée par certains comme une partie intégrante du modèle. Dans toute cette étude, l'évapotranspiration potentielle (ETP) sera calculée à partir de la formule d'Oudin (2004) qui ne nécessite que la température et le jour julien pour être calculée. Sur les bassins versants français, l'ETP utilisée est issue d'une base de données d'IRSTEA calculée à partir de températures spatialisées, alors que sur les bassins suisses, elle sera calculée par poste de température ponctuel.

2. Le modèle GRP :

Le modèle GRP a été développé d'abord par Tangara (2005), puis par Berthet (2010) dans le but d'offrir un modèle hydrologique au pas de temps horaire aux SPC. C'est un modèle empirique, global (c'est-à-dire sans discrétisation spatiale du bassin), à trois paramètres et qui ne nécessite que peu de données (débits, pluies et ETP).

Le modèle peut être « conceptualisé » en représentant deux réservoirs, un de production et un de routage. Les trois paramètres à caler sont le coefficient de correction des pluies **Corr**, la capacité du réservoir de routage **Rout** et le temps de base de l'hydrogramme unitaire **TB**. Tous les autres paramètres sont fixés.

Ce modèle est utilisé en prévision et possède deux types d'assimilations. Le réservoir de routage est toujours mis-à-jour pour correspondre au dernier débit observé. Une correction des prévisions est ensuite faite, soit en se basant sur la dernière erreur (dite de Tangara) :



$$\hat{Q}_{t+H|H} = \hat{Q}_{t+H|H} \cdot \left(\frac{Q_t}{\hat{Q}_{t|t-1}} \right)^\gamma$$

Où $\hat{Q}_{t+H|H}$ correspond à la prévision faite au pas de temps t pour un horizon H, $\hat{Q}_{t|t-1}$ correspond à la prévision faite au pas de temps t-1 pour un horizon de 1h et Q_t est le débit observé à l'instant t et γ est un paramètre fixe dépendant de l'échéance de prévision.

Une correction alternative est possible en utilisant un réseau de neurones artificiels (Berthet, 2010).

3. Le modèle TGR

Le second modèle utilisé est le modèle TGR qui est semi-distribué et qui combine un modèle hydrologique GR et un modèle hydraulique simple de type « Lag & Route » (Munier, 2009). La structure du module hydrologique est la suivante :

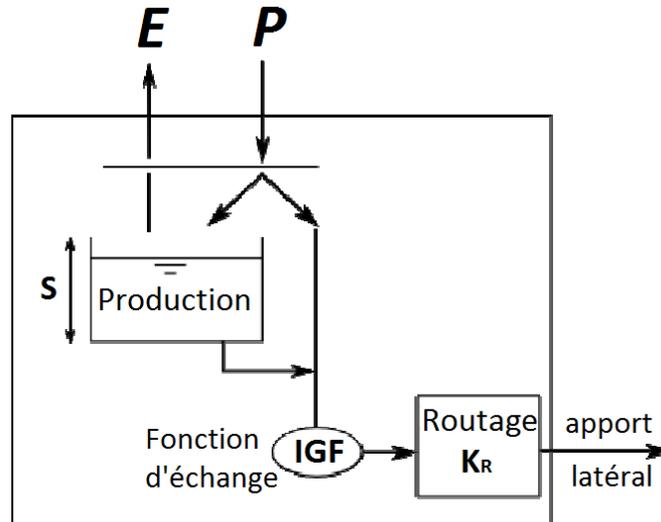


Figure 4 : Schéma du modèle hydrologique GRK utilisé par TGR

Les trois paramètres à caler sont la taille du réservoir de production S (en mm) la fonction d'échange avec la nappe (identique au coefficient de correction de GRP) noté IGF , ainsi que la capacité du réservoir de routage K_R (en heure). Le réservoir de routage est linéarisé pour permettre une assimilation par un filtre de Kalman (Kalman, 1960).

Le modèle hydraulique se comporte comme une fonction de transfert du 1^{er} ordre et comporte deux paramètres à caler qui sont le temps de retard T et la constante du 1^{er} ordre K_0 , tous deux exprimés en heures et dont l'effet sur la propagation d'un débit sur un bief est le suivant illustré sur la figure 5 :

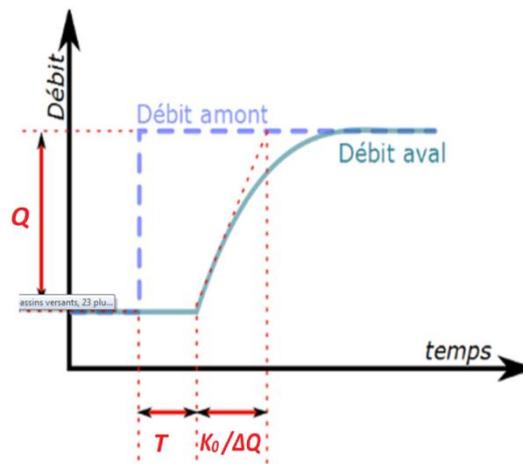
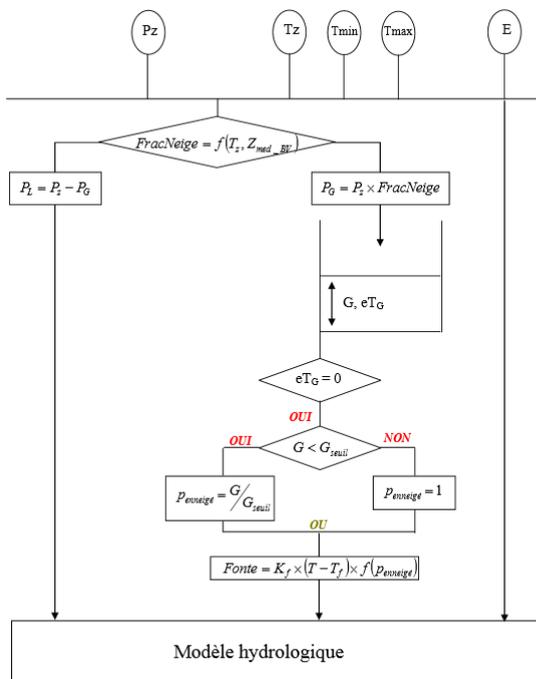


Figure 5 : Réponse du « lag and route » utilisé dans TGR à un échelon de débits

4. Le module Cemaneige :

Le module neige a été développé par Valery (2010) et peut être utilisé en amont de n'importe quel modèle hydrologique (voir structure figure 6). Il utilise cinq bandes d'altitudes sur lesquelles il oriente une partie des précipitations mesurées dans un stock de neige en fonction de la température de l'air. Bien qu'il comporte deux paramètres à caler, à savoir le facteur de fonte degré-heure (K_f) et un coefficient de pondération de l'état thermique du manteau (C_{T_G}), ceux-ci sont fixés dans la version opérationnelle de GRP.

A l'origine non présent dans TGR, il sera recodé sous Scilab pour effectuer un prétraitement de la chronique complète des pluies.



Extrapolation des données d'entrée

$$Tz = T + \theta_{altitude} \times (Z_z - Z_{med_BV})$$

$$Pz = P \times \exp[\beta_{altitude} \times (Z_z - Z_{med_BV})]$$

Calcul de la fraction solide

si $Z_{med_BV} < 1500m$, fonction type Turcotte et al. (2007)

si $(Tz\ max) \leq 0^\circ C$, $FracNeige = 1$ si $(Tz\ max) \geq 0^\circ C$, $FracNeige = 0$

sinon, $FracNeige = 1 - (Tz\ max) / ((Tz\ max) - (Tz\ min))$

si $Z_{med_BV} \geq 1500m$, fonction type USACE (1956)

si $(Tz\ moy) < -1^\circ C$, $FracNeige = 1$ si $(Tz\ moy) > +3^\circ C$, $FracNeige = 0$

sinon, $FracNeige = 1 - ((Tz\ moy) - (-1)) / ((+3) - (-1))$

$$P_G = Pz \times FracNeige \text{ et } P_L = Pz - P_G$$

Accumulation

$$G = G + P_G$$

$$eT_G = C_{T_G} \times eT_G + (1 - C_{T_G}) \times Tz$$

Calcul de la fonte potentielle

si $eT_G = 0$ et $Tz > T_f$, $F_{pot} = K_f \times (Tz - T_f)$

si $F_{pot} > G$, $F_{pot} = G$

Calcul pourcentage de la zone enneigée

si $G < G_{seuil}$, $p_{enneigé} = G / G_{seuil}$, = 1 sinon

Calcul de la fonte effective

$$FONTE = [(1 - V_{min}) \times p_{enneigé} + V_{min}] \times F_{pot}$$

Actualisation réservoir neige

$$G = G - FONTE$$

Calcul de la lame d'eau transmise au modèle hydrologique

$$Lame_eau = P_L + FONTE$$

Figure 6 : Structure et équations du module Cemaneige (source : Valéry, 2010)

II. Bassins étudiés

1. Le Rhin :

a. Bassin du Rhin jusqu'à la frontière franco-allemande :

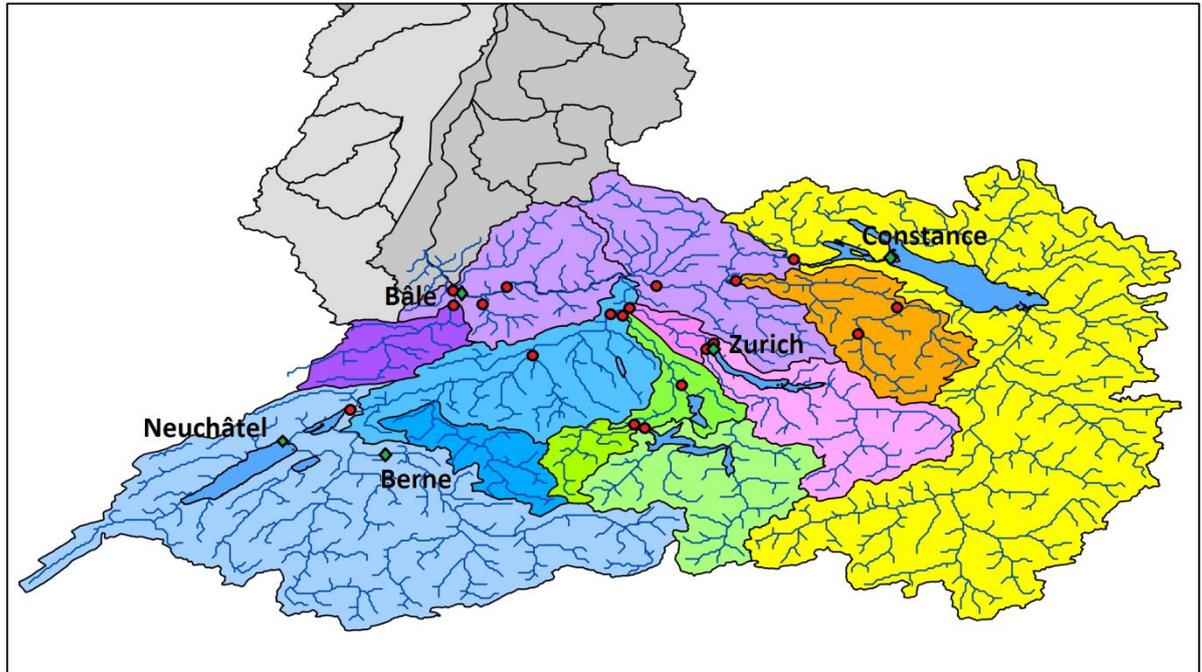


Figure 7 : Bassin du Rhin à Bâle et 19 stations limnimétriques disponibles pour cette étude

Le Rhin est un fleuve constitué d'un bassin de 185 000 km² s'étalant sur neuf pays d'Europe (Suisse, Allemagne, France, Hollande, Italie, Autriche, Liechtenstein, Luxembourg, Belgique). Il prend son nom après la confluence du Rhin antérieur (Allemand : *Vorderrhein*) et du Rhin supérieur (All. : *Hinterrhein*) à Bonaduz à 599m d'altitude. Cette première section du Rhin est appelé Rhin-Alpin (All. : *Alpenrhein*) et mesure 86 km jusqu'au Lac de Constance, situé à 396m.

Le Lac de Constance (*Bodensee*) d'une surface de 536 km² est constitué de deux lacs, l'*Obersee* d'une surface de 473 km² à l'amont, relié par une portion de 4km (le *Seerhein*) à l'*Untersee* d'une surface de 63 km². Avec un temps de résidence moyen supérieur à 4 ans, le lac a pour effet de laminer les crues survenant sur le bassin versant amont d'une surface de 11 500 km², ce qui n'empêche pas le débit en sortie (au niveau de Neuhaussen) de connaître des variations importantes suivant les saisons ; on a ainsi relevé un débit moyen journalier de plus de 1100 m³/s pendant la crue de mai-juin 1999 contre 165 m³/s en octobre 2003 (données OFEV).

La section suivante est nommée Haut-Rhin (*Hochrhein*) et s'écoule vers l'ouest sur 165 km. La pente est encore élevée puisque l'altitude passe de 395m à 252m entre l'amont et l'aval, dont 23m sont dus aux seules chutes du Rhin. La confluence avec l'Aar (*Aare*), le principal affluent du Rhin avec un bassin versant de 17 779 km² a lieu à Koblenz ; le débit moyen de l'Aar est d'ailleurs supérieur à celui du Rhin avant la confluence (590 m³/s contre 439 m³/s). Deux autres grands affluents confluent avec le Rhin dans cette section : la Thur en rive gauche (à ne pas confondre avec la Thur française, affluent de l'Il) et la Wutach en rive droite dont les bassins font respectivement 1696 km² et 1140 km².

Le Rhin se dirige ensuite vers le Nord entre Bâle et Bingen am Rhein dans ce qu'on nomme le Rhin supérieur (*Oberrhein*). Sur cette portion de bassin s'étalant sur 350 km, la concentration de population est élevée puisque sur une surface de 21 500 km², elle est de 5 800 000 habitants (soit 270 habitants/km²). Les principales villes du bassin sont Bâle, Mulhouse, Strasbourg, Fribourg-en-Brigau et Karlsruhe. Cette partie a été fortement aménagée pour faciliter la navigation à partir du XIX^{ème} siècle, notamment en coupant des méandres, ce qui a eu pour effet une réduction du cours du Rhin de 81 km.

b. Régulation du Lac de Bienne :

D'importants travaux ont été effectués sur le bassin de l'Aare, le premier étant connu sous le nom de déviation de la Kander [Walser, 1959] et qui a consisté à dévier cet affluent de l'Aare dans le Lac de Thoune. Ces travaux ont permis de réduire de 1352 km² la superficie du Rhin en amont de Bâle ne traversant aucun lac. Mais la plus grosse modification du cours de l'Aare fut celle réalisée sur la période 1869-1891 pour la faire se jeter dans le Lac de Bienne (*Bielersee*), ce qui réduit encore de 2436 km² la surface de bassin ne traversant aucun lac.

Le débit sortant du Lac de Bienne est notamment régulé en fonction de débit de l'Emme [OFEV, 2007]. La « condition de Murgenthal » stipule que le débit en sortie du Lac de Bienne est régulé de manière à limiter le débit de l'Aare à Murgenthal à 850 m³/s. Le Lac de Bienne (noté B, voir figure 8) étant relié au lac de Neuchâtel (noté N), lui-même relié au Lac de Morat (noté M), les écoulements sont fortement influencés par la régulation du lac comme le montre la figure 8 :

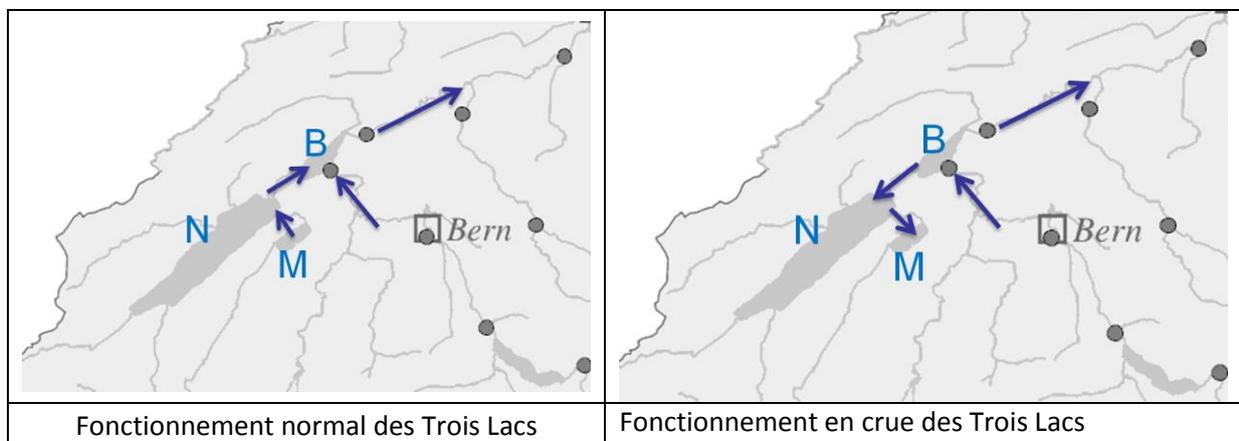


Figure 8 : Effet sur le sens des écoulements de la régulation du lac de Bienne (B : Lac de Bienne, N : Lac de Neuchâtel, M : Lac de Morat)

En période normale, les écoulements se font du lac de Morat vers le lac de Neuchâtel et du lac de Neuchâtel vers le lac de Bienne mais le sens d'écoulement change lorsqu'une limitation du débit de sortie du lac de Bienne fait augmenter son niveau.

Le lac de Bienne fait environ 39,3 km², lors de la crue d'août 2007, le marnage a été de 1,2m, ce qui représente une quantité d'eau retenue dans le lac de 47 millions de m³. Les lac de Neuchâtel (217,9 km²) et de Morat (22,8 km²) communiquent par le principe des vases communicant avec le lac de Bienne, ce qui augmente le volume total d'eau pouvant être retenue. Lors de la crue d'août 2007, les lacs de Neuchâtel et de Morat ont vu leur niveau augmenter d'environ 80cm, ce qui représente un volume supplémentaire d'environ 192 millions de m³ d'eau.

Malgré cet important volume, la condition de Murgenthal n'est pas réalisable lors de forts événements pluvieux, si bien que lors de la crue d'août 2007, le débit de l'Aare est monté à 1 260 m³/s à Murgenthal malgré un dépassement du niveau haut du lac de Bienne de 54 cm.

c. Assemblage utilisé :

Comme vu précédemment, le bassin du Rhin possède plusieurs lacs assez importants. Ces lacs, du fait de leur capacité de stockage et parfois d'une régulation ont un impact sur la formation des crues. L'impact de la localisation des précipitations sur les crues, en amont ou en aval d'un lac, n'est donc pas négligeable, ce qui justifie l'utilisation d'un modèle semi-distribué.

L'assemblage choisi comporte 19 bassins ou sous-bassins différents est représenté sur la figure 9 :

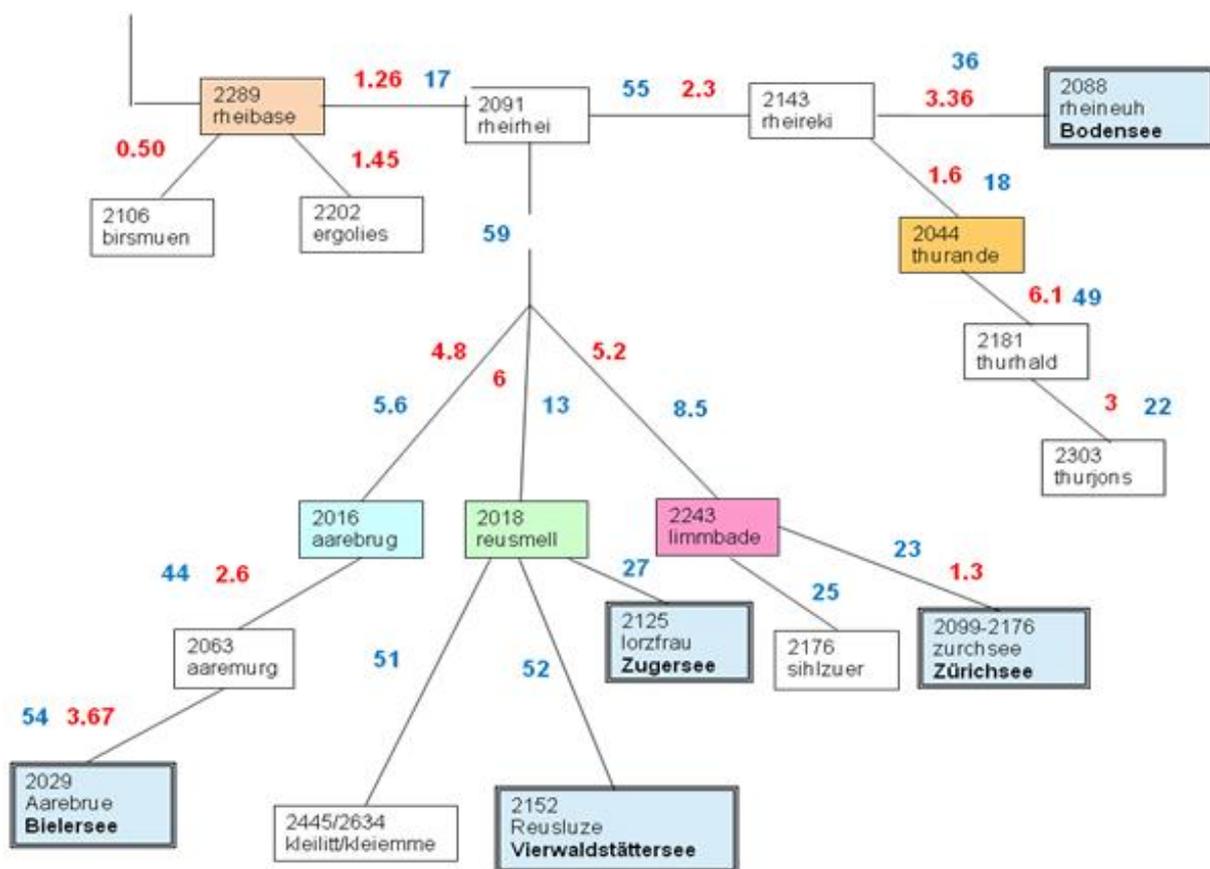


Figure 9 : Assemblage retenu pour le bassin du Rhin à Bâle

Les stations limnimétriques sont représentées par des rectangles, elles sont représentées en bleu quand elles sont placées directement en sortie d'un lac. Les autres couleurs servent uniquement à différencier les affluents majeurs que sont la Thur en orange, la Limmat en rose, la Reuss en vert et l'Aare en bleu. Les nombres en rouge correspondent aux temps de propagations en heure entre deux stations estimés par l'OFEV et ceux en bleu à la distance en km entre ces deux stations calculés à partir d'une couche SIG.

versant intermédiaire de Neufchâteau correspond au bassin versant de Neufchâteau auquel on retire les bassins versants de Goncourt et de Circourt. Le tableau 1 permet de mettre en évidence des fortes disparités. En effet, alors que celle-ci est proche de 400 mm d'eau écoulés par an sur la majorité des bassins, deux sous bassins sortent du lot, puisqu'elle est de 780 mm sur le sous-bassin de Neufchâteau et de 112 mm sur celui de Domrémy-la-Pucelle. Cette différence ne s'explique pas complètement par les phénomènes de pertes et de résurgences et les erreurs dans les courbes de tarages ont sûrement une influence dans ces différences.

Tableau 1 : Analyse des lames d'eau écoulée sur les BV et BVi de la Meuse

Station	Surface BV (km ²)	Qmoy (m ³ /s)	Q95 (m ³ /s)	Qmoy (mm/an)
Goncourt	364	4.9	20.7	425
Sommecourt	212	2.7	13.5	402
Circourt	405	4.7	22.3	366
Circourt	193	2		327
BVI				
Neufchâteau	862	11.9	57.6	435
Neufchateau	93	2.3		780
Bvi				
Domrémy	1031	12.5	54.1	382
Domrémy	169	0.6		112
BVI				
Chalaines	1717	19.7	82.5	362
Chalaines	686	7.2		331
BVI				

3. Autres bassins testés :

Les modèles hydrologiques GRP et TGR seront testés sur seize bassins du SPC Rhin-Sarre, principalement des bassins amonts, ainsi que sur les bassins de la Savoureuse à Giromagny et à Belfort. Ces derniers, bien qu'en dehors de notre zone d'étude, ont été ajoutés ici car ils sont utilisés comme bassins de démonstration avec l'utilitaire GRP/TGR.

III. Méthode et critères d'évaluation

1. Critères quadratiques

Critère de Nash-Sutcliffe :

Les critères quadratiques sont très utilisés pour juger des performances d'un modèle, le critère de Nash-Sutcliffe est l'un des plus utilisés :

$$NSE(H) = 1 - \frac{\sum_t [Q_{t+H} - \hat{Q}_{t+H|t}]^2}{\sum_t [Q_{t+H} - \bar{Q}]^2}$$

Où H est l'horizon de prévision, Q_{t+H} le débit qui sera observé à la date $t + H$, $\hat{Q}_{t+H|t}$ la prévision établie à la date t pour la date $t + H$ et où $\bar{Q} = \frac{1}{n} \sum_t Q_{t+H}$.

Ce critère est adimensionnel et compris entre moins l'infini et 1. Il correspond à une comparaison des performances du modèle hydrologique à un modèle « naïf » valant le module du débit. Il peut être utilisé en prévision comme ici, ou en simulation où l'on comparera simplement le débit observé au débit simulé. C'est d'ailleurs ce critère qui est utilisé par défaut pour le calage de TGR (qui est effectué sans assimilation de données).

Une variante de ce critère faisant intervenir le carré des débits peut être utilisée pour le calage de TGR :

$$NSE_{carQ}(H) = 1 - \frac{\sum_t [(Q_{t+H})^2 - (\hat{Q}_{t+H|t})^2]^2}{\sum_t [(Q_{t+H})^2 - \bar{Q}^2]^2}$$

Critère de persistance :

Le critère de Nash-Sutcliffe est peu utilisé en prévision car le modèle naïf est très facile à battre lorsque des observations de débits sont disponibles pour l'assimilation. Le critère de persistance (Kitanidis et Bras, 1980) propose de comparer le débit prévu au dernier débit observé :

$$EFF(H) = 1 - \frac{\sum_t [Q_{t+H} - \hat{Q}_{t+H|t}]^2}{\sum_t [Q_{t+H} - Q]^2}$$

Ce critère est aussi appelé efficacité (sous-entendu « comparé au modèle de persistance »). A cause de la comparaison avec le modèle naïf dont les performances dépendent de l'échéance, ce critère dépend de l'échéance et a tendance à s'améliorer quand l'échéance augmente (en condition de pluies futures parfaitement connues), le modèle naïf étant de plus en plus facile à battre.

Critère de persistance bornée :

Le précédent critère a l'inconvénient de pouvoir prendre des valeurs fortement négatives, le calcul de moyenne de critères de persistance sur un ensemble de bassins est donc trop fortement influencé par quelques bassins. On peut donc utiliser une formulation bornée du critère EFF dans l'intervalle $] - 1, 1]$ et donnée par :

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

C'est le critère utilisé par défaut pour le calage de GRP. Notons que le calage du modèle basé sur PI ou $C_{2M,P}$ conduit aux mêmes jeux de paramètres.

Critère calculés au dessus d'un seuil

Cette étude se concentre sur la capacité des modèles à être bon en période de crue, les performances pendant ces crues sont donc le principal intérêt pour nous. Les critères de performances seront donc parfois calculés au dessus d'un seuil, c'est-à-dire pour l'efficacité :

$$EFF_seuil(H) = 1 - \frac{\sum_t [Q_{t+H} |_{Q>seuil} - \hat{Q}_{t+H|t} |_{Q>seuil}]^2}{\sum_t [Q_{t+H} |_{Q>seuil} - Q |_{Q>seuil}]^2}$$

Pour calculer les performances, deux seuils différents seront utilisés pour cette étude, soit le seuil de vigilance utilisé par le SPC, soit un seuil calculé à partir d'un quantile des débits. Trois quantiles seront utilisés, Q95, Q98 et Q99 qui correspondent aux débits dépassés respectivement sur 5%, 2% et 1% des pas de temps.

2. Critères de franchissement de seuil :

Dans le cadre de la prévision des crues, il est important de connaître la capacité d'un modèle à prévoir le dépassement ou non d'un seuil (de vigilance par exemple). A chaque pas de temps, on comptabilise la prévision dans une des quatre configurations décrites à la figure 12 :

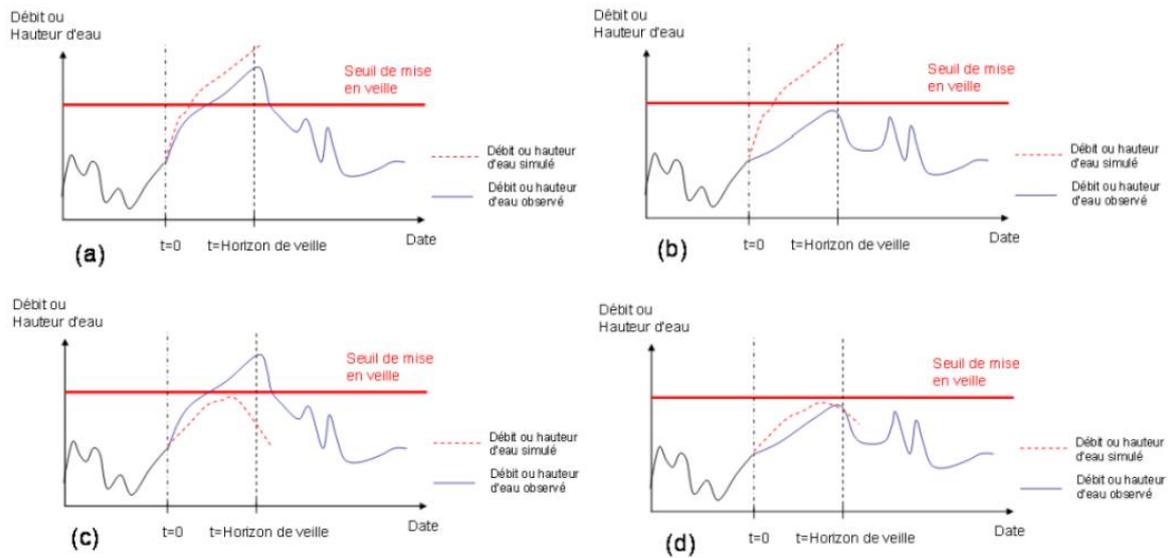


Figure 11 : 4 situations possibles du tableau de contingence

(a) Alerte valable, (b) Fausse alerte, (c) Alerte manquée, (d) Alerte non valable

Trois critères sont ensuite calculés :

- La probabilité de détection : $POD = \frac{a}{a+c}$
- Le taux de fausses alertes : $FAR = \frac{b}{a+b}$
- L'indice de succès critique : $CSI = \frac{a}{a+b+c}$

L'idéal est d'avoir les critères POD et CSI à 100% et le critère FAR à 0%. Ce critère a cependant l'inconvénient d'être dépendant à la fois du seuil et de l'échéance de prévision choisis.

3. Critère de « dynamisme »

L'étude des performances du modèle TGR montre que souvent, le calage offrant les meilleures performances est « mou », c'est-à-dire que la variation de débit prévue est inférieure en valeur absolue à la variation de débit observée. Ceci s'observe graphiquement ainsi :

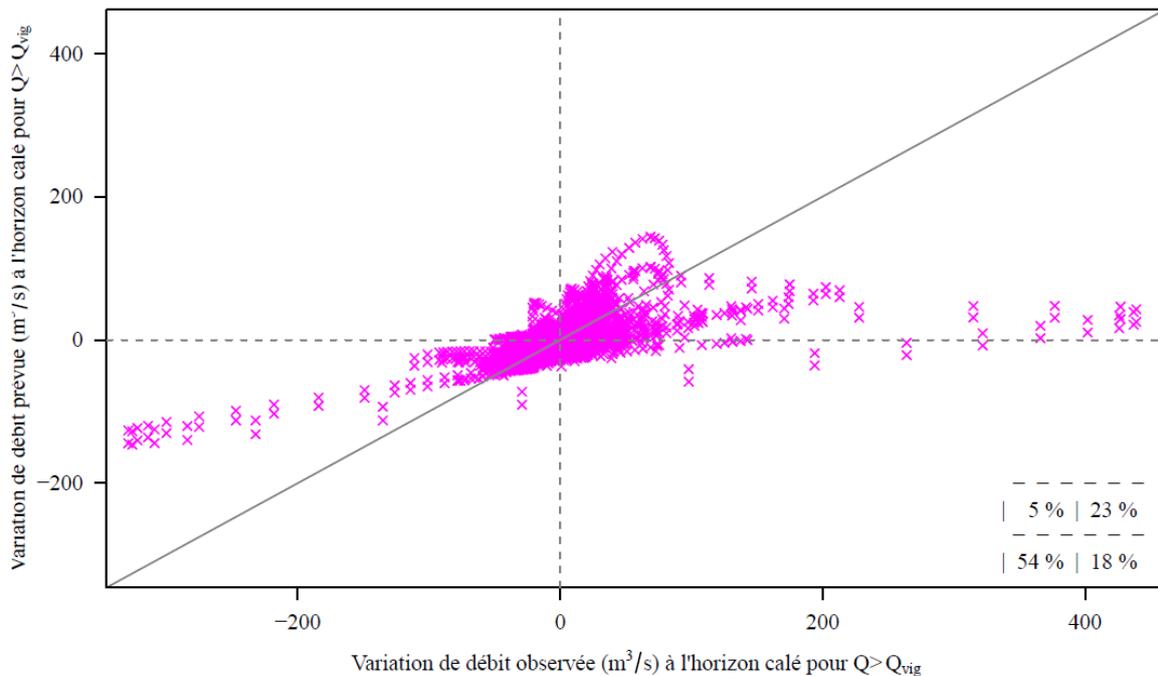


Figure 12 : Comparaison de la variation de débit prévue à la variation de débit observée

Afin de quantifier ce comportement, un critère de « dynamisme » a été calculé en plus des critères de performances habituels :

$$Dynamisme = \frac{\sum |Variation\ prévue|}{\sum |Variation\ observée|}$$

Idéalement, ces critères doivent être les plus proches possible de 1. Le critère de dynamisme du modèle de persistance vaut ainsi 0 car la variation prévue est toujours nulle.

Un critère supérieur à 1 traduit un comportement « sur-réactif », tandis qu'un critère de dynamisme inférieur à 1 traduit un comportement « sous-réactif » ou « mou » du modèle.

IV. Résultats

Pour calculer tous les critères présentés ici, la méthode utilisée sera le premier test de Klemes (1986) aussi appelé calage-contrôle, c'est-à-dire que l'on cale les modèles sur une période et que l'on calcul les performances sur une autre période, indépendante de la première. Le rôle des périodes est ensuite inversé. Cette approche permet de tester les modèles sur des situations inconnues et de mieux estimer les performances sur les événements futurs qui dans tous les cas n'auront pas servis à caler le modèle.

1. Sur les bassins amont :

Les modèles hydrologiques sont surtout utilisés sur les bassins amont puis les prévisions aux stations aval sont élaborées à partir d'abaques et/ou de modèles hydrauliques. Le module hydrologique de TGR sera donc comparé à GRP sur un certain nombre de bassins versants.

Pour l'ensemble des bassins, différents critères parmi l'efficacité (noté EFF), l'efficacité au dessus du seuil Q98 (noté EFF_Q98), la probabilité de détection (POD), le taux de fausse alerte (FAR), l'indice de succès critique (CSI) et le critère de dynamisme seront calculés et comparés.

a. Influence du calage et de la correction sur GRP :

Le modèle GRP a été développé pour la prévision des crues, ce qui a pour conséquence un routage différent (et plus simple) que les modèles de simulation développés par l'IRSTEA tels GR4 ou GR5.

Pour améliorer les performances sur les forts débits et ne pas influencer le calage par les bas débits où les mesures peuvent être perturbées par des manœuvres d'ouvrage hydraulique, il est possible de ne caler GRP que pour des débits supérieurs à un seuil. La station de Sarrebourg est par exemple fortement influencée par un vannage automatisé en amont qui provoque des oscillations de la hauteur d'eau entre 1,20m et 1,50m ; ces oscillations dans la mesure de hauteur entraînent une oscillation des débits compris entre 0 et 4 m³ (voir figure 14) :

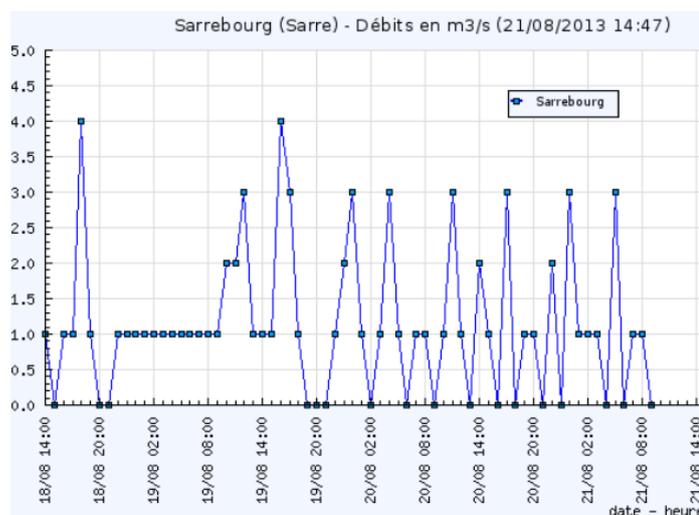


Figure 13 : Défauts de mesure du débit à Sarrebourg à cause du vannage

Enfin, pour vérifier que les rôles respectifs du modèle hydrologique et de la correction des débits dans les performances du modèle, on testera GRP sans la correction des débits de Tangara ; ce modèle sans correction sera désigné sur les graphiques par GRP*. Toutes les comparaisons effectuées ici sont pour une échéance de 12h.

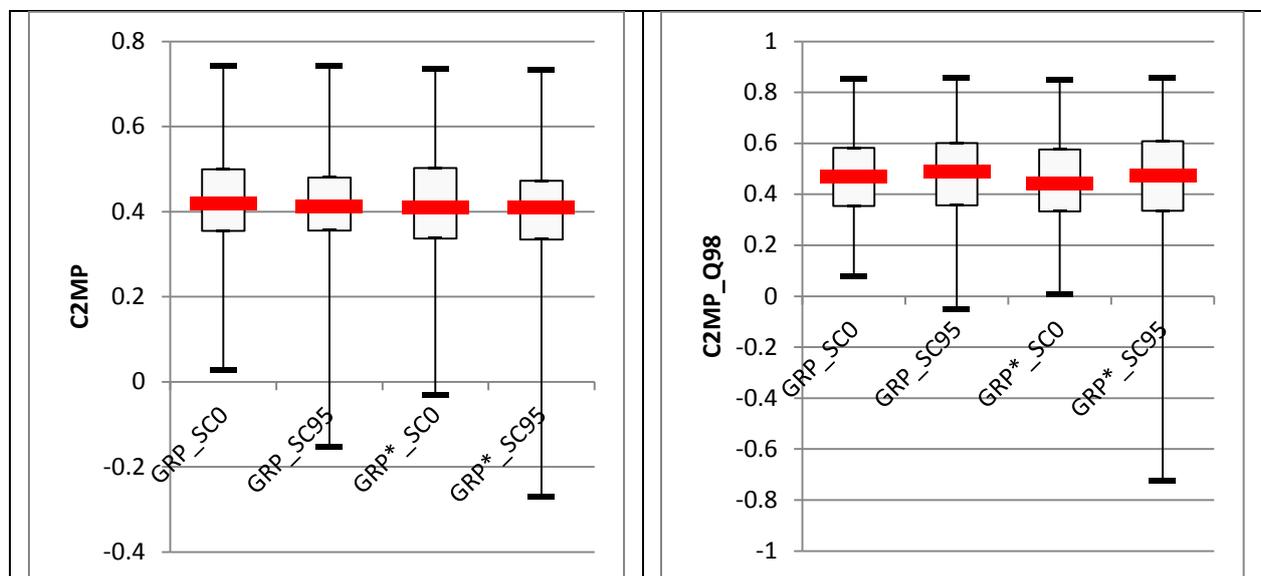


Figure 14: Distribution des valeurs de C2MP et C2MP_Q98 pour les 31 BV

Ces graphiques en boîtes à moustaches (figure 15) montrent que globalement, la correction des débits de Tangara n'apporte aucun gain sur ces bassins pour une échéance de 12h. En regardant les performances bassin par bassin, on constate que seuls les deux bassins aux plus faibles performances sont vraiment influencés par cette correction. Ces résultats sont comparables avec ceux obtenus par Berthet (2010), à savoir que passé les échéances les plus courtes (1h et 3h), le coefficient de correction γ baisse et la correction apporte un gain uniquement sur les moins bons bassins.

Le seuil de calage ne semble pas avoir d'effet significatif sur les performances, car comme pour la correction des débits, seuls les deux bassins aux performances les plus faibles sont réellement influencés par le seuil de calage, et de manière négative qui plus est. Ceci montre que bien que simplifié par rapport aux modèles utilisés en simulation et axé sur la prévision des crues, le modèle GRP est adapté au fonctionnement hydrologique des bassins sur toute la gamme de débit. Surtout, la légère baisse globale des performances au dessus du seuil Q98 montre que le calage au dessus d'un seuil a tendance à accentuer la différence de performances entre la période de calage et la période de contrôle. En effet sur la période de calage, les performances au dessus du seuil Q98 du modèle calé au dessus du seuil Q95 ont toutes les chances d'être supérieures à celle du modèle calé sur tous les débits Or sur la période de contrôle, ce gain est totalement perdu.

De façon anecdotique, le critère C2MP_Q98 est amélioré de 0,03 avec un calage au dessus d'un seuil pour le bassin de Sarrebourg où les mesures à bas débits sont connues pour être mauvaises. Ce gain est appréciable, mais il ne constitue que le 7^{ième} meilleur gain.

b. Influence du calage sur TGR :

Le modèle TGR propose plus de libertés pour le calage puisqu'en plus du seuil de calage de TGR, il est possible d'adopter un calage plus orienté sur les hauts débits.

En effet, en plus du calage au dessus d'un seuil, il est possible de caler le modèle sur le carré des débits (cf. critère $NSE_{carQ}(H)$) afin de privilégier les hauts débits sans négliger complètement les plus faibles débits.

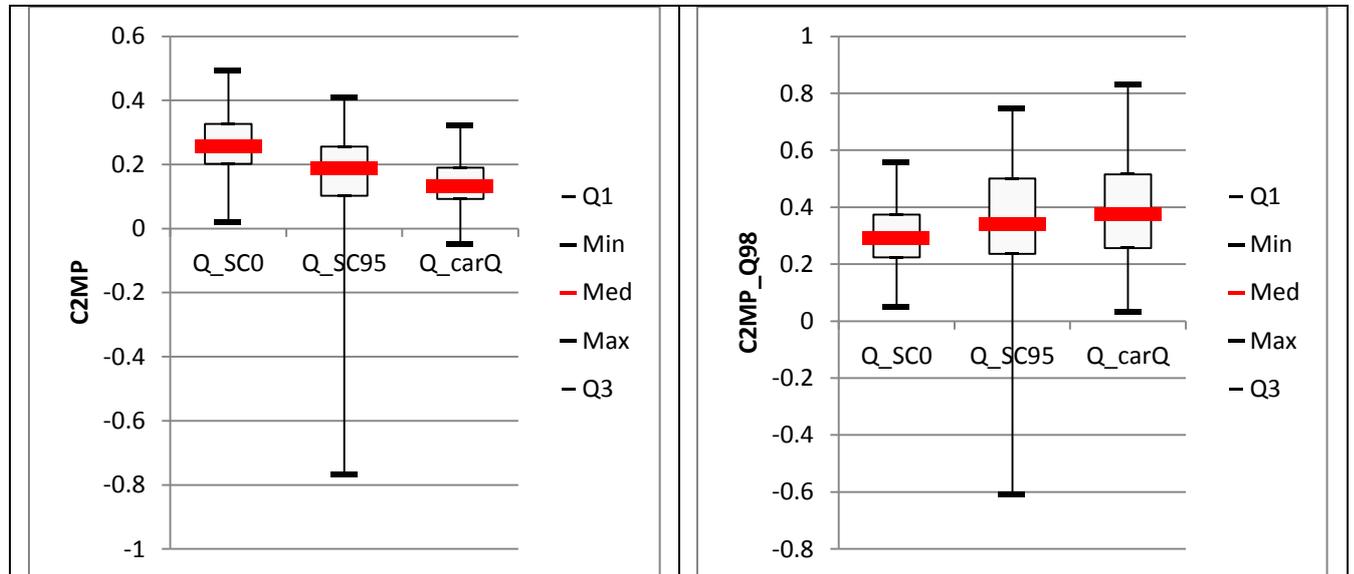


Figure 15 : Distribution des valeurs de C2MP et C2MP_Q98 pour les 28 BV

Les deux graphiques de la figure 16 montre que contrairement au modèle GRP, le calage a un réel effet sur les performances du modèle aussi bien sur tous les débits que pour les crues.

Le premier graphe de la figure 16 montre que les performances sur tous les débits sont meilleures avec le calage réalisé en donnant un même poids à tous les pas de temps, ce qui est compréhensible. Le minimum est très inférieur avec le calage au dessus du seuil Q95, mais ceci n'est dû qu'à un seul bassin et n'est pas généralisable aux bassins du quartile le moins bon.

Le modèle étant amené à être utilisé par les SPC, les performances sur les hauts débits sont les plus importantes dans cette utilisation et le second graphique est le plus intéressant pour cet usage. Sur la majorité des bassins, les performances au dessus du seuil Q98 des calages « carQ_SC0 » et « Q_SC95 » sont meilleures que celle du calage « Q_SC0 ».

Le calage au dessus d'un seuil est cependant moins performant que le calage sur le carré des débits et ce, pour la grande majorité des bassins. Le calage au dessus d'un seuil Q95 semble plus instable puisque pour trois bassins, ses performances sur les hauts débits sont inférieurs au calage « Q_SC0 ».

Les modalités de calage de TGR influencent donc fortement les performances évaluées par le critère C2MP. Il est donc intéressant de regarder l'impact du calage sur les autres critères. On synthétise pour les 28 bassins versants et pour les trois calages les trois critères (POD, FAR, CSI) par la moyenne des quartiles dans le tableau 2 :

Tableau 2 : Performances des 3 calages de TGR

	Q_SC0			Q_SC95			carQ_SC0		
	POD	FAR	CSI	POD	FAR	CSI	POD	FAR	CSI
MOY_25	16.9	8.4	16.2	32.7	23.7	20.8	38.7	31.0	24.7
MOY_50	34.8	20.0	29.1	51.0	38.5	31.5	53.9	41.7	33.7
MOY_75	41.7	27.4	37.3	61.9	53.3	37.6	64.9	52.1	40.7
MOY_100	52.7	44.2	43.9	77.6	70.4	52.1	82.4	65.9	52.0

La ligne MOY_25 correspond à la moyenne des critères des 25% des bassins les plus faibles et la ligne MOY_100 à la moyenne des critères des 25% des bassins les plus forts. Le critère CSI, offre une note globale sur les dépassements de seuil, est meilleurs pour les trois premiers quartiles pour le calage carQ_SC0. Pour le dernier quartile (MOY_100), il est juste 0,1% moins bon que pour le calage SC_95, ce qui peut être considéré comme équivalent.

Le Tableau 2 montre que par rapport à un calage standard sur tous les débits (c'est-à-dire « Q_SC0 »), le passage à un calage « hauts-débits » augmente les trois critères pour tous les quartiles. Cela signifie que si le modèle ainsi calé dépasse plus souvent le seuil « Q98 », ce n'est pas toujours à des moments appropriés. On s'attend donc à avoir un critère de dynamisme supérieur pour les calages « haut-débits » :

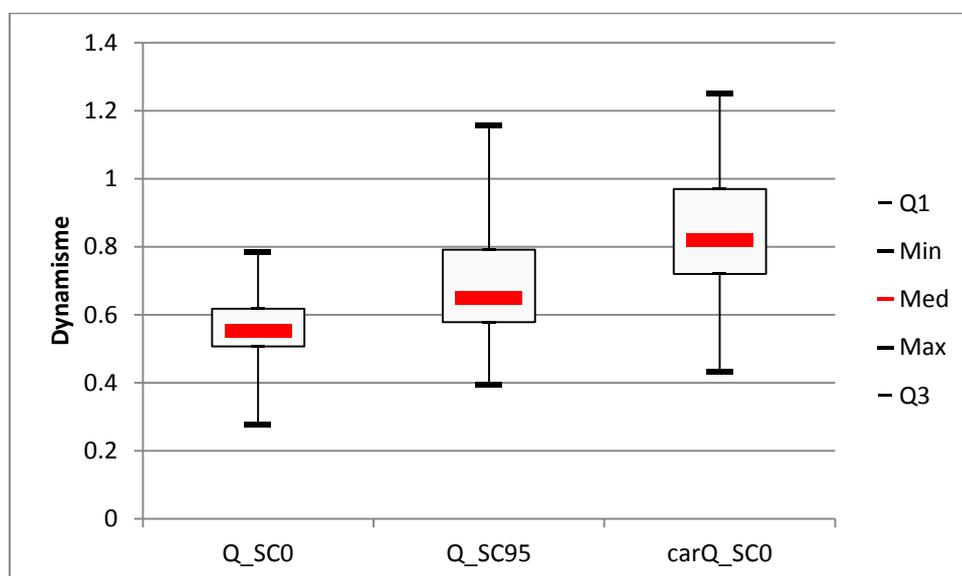


Figure 16: Critère de dynamisme pour 20 BV

La figure 17 montre que le calage offrant le critère de dynamisme le plus proche de 1 est globalement le calage « carQ_SC0 ». Cependant, le dynamisme du modèle calé par ce critère dépasse 1 pour 3 bassins sur 28, ce qui peut amener le modèle à sur-réagir aux précipitations.

A l'inverse, ce graphique montre que sur 50% des bassins, le critère de dynamisme est inférieur à 0,5 pour le calage « Q_SCO », et pour 75% des bassins, il est inférieur à 0,62. Ce calage amène donc le modèle à être très peu réactif, et il risque de sous-estimer les montées de crue ; dans le cadre d'un usage en SPC, ce calage est donc à éviter.

2. Sur les assemblages :

Compte-tenu des observations faites sur les bassins amont, le calage de TGR sur les assemblages sera effectué avec le critère « carQ_SCO ».

a. Meuse-amont

Les performances seront regardées pour les stations du tronçon réglementaire du SPC Meuse-Moselle où l'on dispose de données suffisantes, c'est-à-dire Neufchâteau, Domrémy-la-Pucelle et Chalaines. Pour les deux modèles, le calage-contrôle se fera sur la même période comprise entre 1996 et 2012. Les mêmes données de précipitations et les mêmes coefficients de pondérations de celles-ci sont utilisés pour ne pas biaiser la comparaison.

Pour juger des performances des modèles en usage SPC, on s'intéressera à trois échéances différentes, 6h, 12h et 24h. Deux critères seront regardés, l'efficacité (ou critère de persistance) sur tous les débits (noté **EFF**) ainsi que l'efficacité au dessus du seuil de vigilance (noté **EFF_SV**).

L'assemblage TGR sera comparé au modèle GRP avec la correction de Tangara (noté GRP_TAN) ou celle par réseau de neurones artificiels (noté GRP_RNA). L'utilisation de RNA s'explique ici par le fait qu'ils peuvent améliorer significativement les performances lorsque l'échéance de prévision est plus faible que le temps de réaction, ce qui est le cas sur les bassins relativement lent.

- ◆ TGR
- GRP_TAN
- ▲ GRP_RNA

2176
sihlzuer

La station la plus amont du tronçon réglementaire est celle de Neufchâteau. Les performances sont résumées dans la figure 19 :

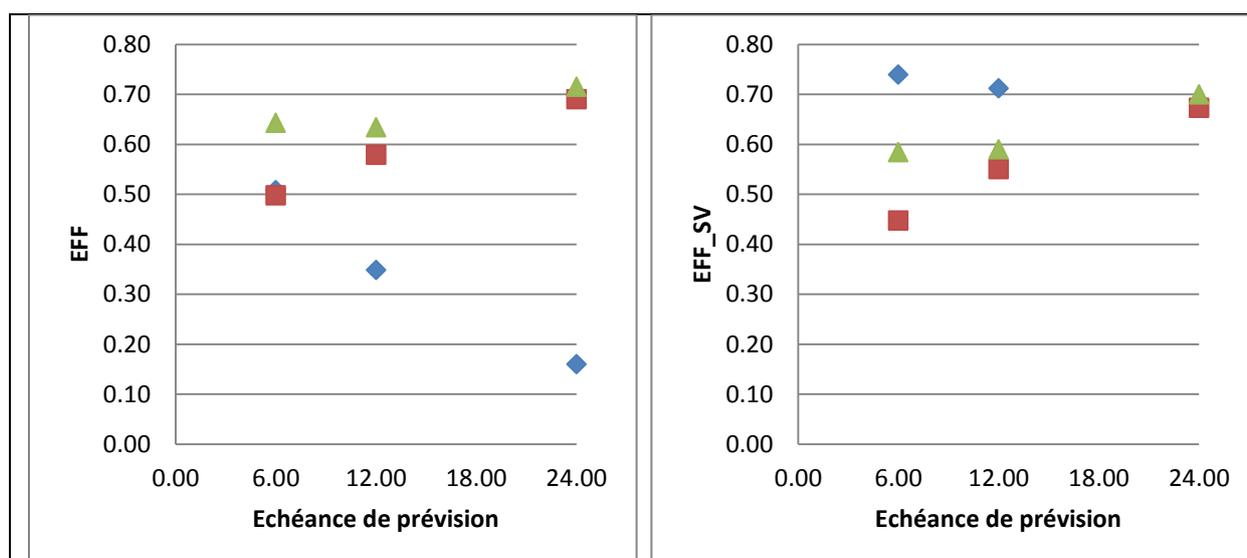


Figure 17 : Efficacité comparé sur tous les débits et au dessus du seuil de vigilance à Neufchâteau pour TGR (bleu), GRP_TAN (rouge) et GRP_RNA (vert)

Le graphe de gauche montre que sur l'ensemble des débits, les performances du modèle TGR sont au niveau de celle du modèle GRP avec correction Tangara pour une échéance de prévision de 6h, puis baissent fortement à 12h et 24h. La correction des débits par RNA augmente sensiblement les performances à court-terme avec des améliorations respectives de 0.14 et 0.05 aux échéances de 6 et 12h.

Au dessus du seuil vigilance, le même comportement est observé entre la correction de Tangara et celle RNA avec des améliorations respectives de 0.14 et 0.04 aux échéances de 6 et 12h. Le comportement de TGR est par contre très différent puisqu'aux échéances les plus courtes, celui-ci est bien meilleur que les deux modèles GRP, sans doute grâce à la propagation. Pour une échéance de 24h, les trois modèles sont équivalents.

La figure 20 récapitule les performances à la station de Domrémy-la-Pucelle :

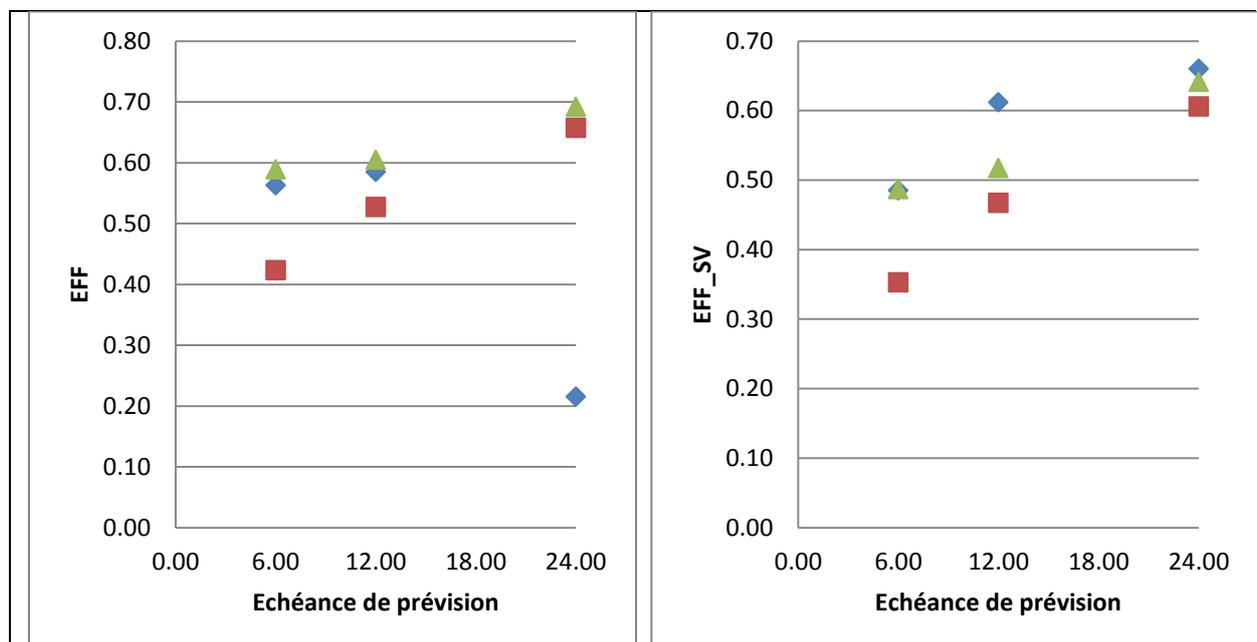


Figure 18 : Efficacité comparé sur tous les débits et au dessus du seuil de vigilance à Domrémy pour TGR (bleu), GRP_TAN (rouge) et GRP_RNA (vert)

Sur tous les débits, le modèle TGR s'en sort mieux qu'à la station de Neufchâteau en égalant notamment les performances du modèle GRP avec la correction par RNA pour les échéances de 6h et 12h. Comme pour la station de Neufchâteau, les performances de TGR ne sont pas satisfaisantes pour l'échéance de 24h.

Au dessus du seuil de vigilance et pour la plus faible échéance (6h), les performances de TGR arrivent seulement à égaler les performances du modèle GRP avec la correction par RNA, malgré l'apport théorique de la propagation des débits. Elles sont cependant supérieures à celles des deux modèles GRP pour les échéances de 12h et 24h.

La figure 21 récapitule les performances à la station de Chalaines :

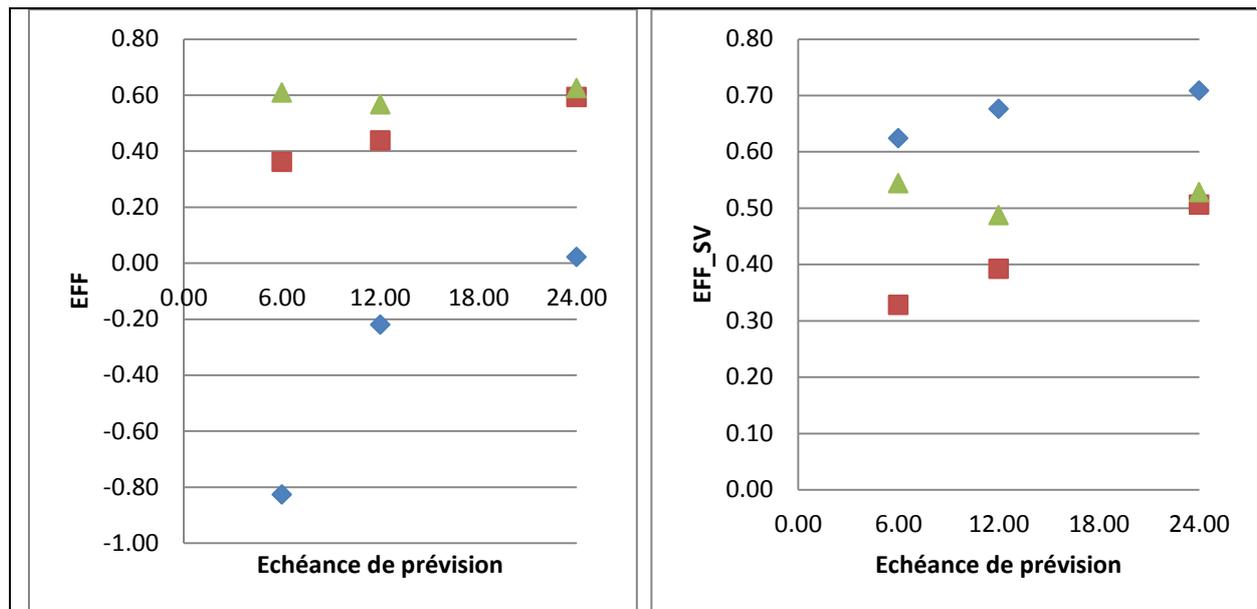


Figure 19 : Efficacité comparé sur tous les débits et au dessus du seuil de vigilance à Chalaines pour TGR (bleu), GRP_TAN (rouge) et GRP_RNA (vert)

Pour l'ensemble des débits, les performances de TGR à cette station de Chalaines sont vraiment mauvaises, avec des prévisions moins bonnes que le modèle de persistance. Au dessus du seuil de vigilance, la tendance s'inverse et le modèle TGR est meilleur que GRP pour les trois échéances, de manière tout à fait significative avec notamment une amélioration de 0.19 pour l'échéance de 24h.

b. Bassin du Rhin

L'assemblage à 19 bassins versants intermédiaires est utilisé, ainsi qu'un calage sur les carrés des débits au dessus du seuil Q95. Les performances sur le bassin seront regardées à la station de Bâle qui est située tout près de la frontière franco-germano-suisse. Le modèle sera comparé à un modèle global GRP avec correction de Tangara ou par RNA afin de voir l'apport d'un modèle semi-distribué pour des échéances de 6h, 12h, 24h et 48h.

La figure 20 montre que pour les quatre échéances, le modèle TGR obtient des performances bien meilleures que les modèles GRP. Sur ce bassin complexe et fortement influencé, la correction des débits par RNA donne des performances inférieures à la correction de Tangara, ce qui s'explique par le sur-paramétrage induit par cette correction. Lionel Berthet (2010) avait noté ce comportement sur les bassins où les performances de GRP sont les plus mauvaises.

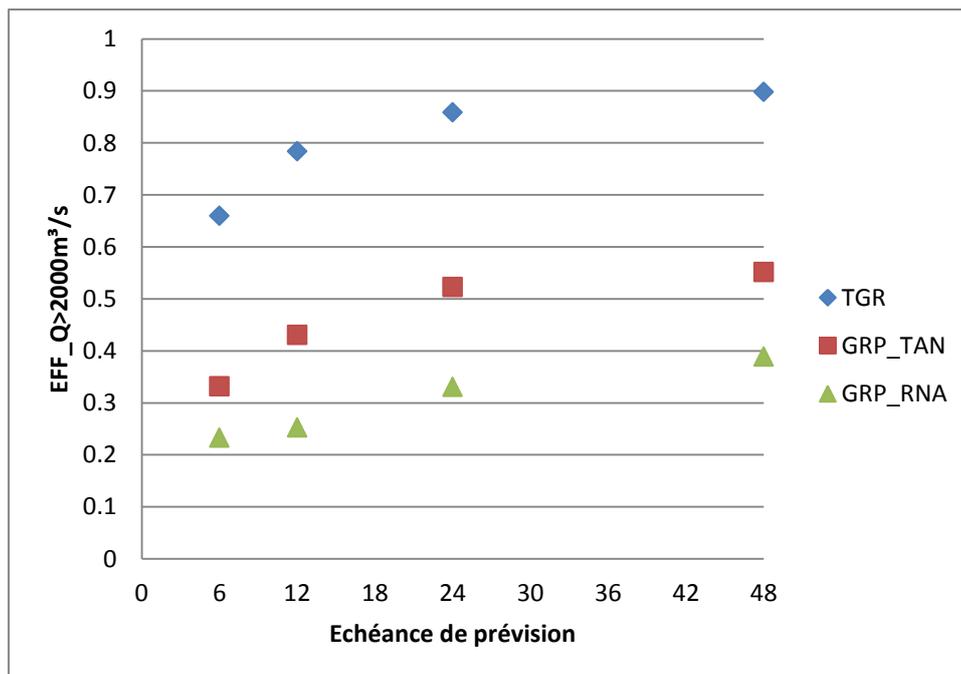


Figure 20 : Efficacités comparées au dessus du seuil de vigilance jaune à Bâle pour TGR (bleu), GRP_TAN (rouge) et GRP_RNA (vert)

La comparaison des modèles TGR et GRP_TAN sur trois événements (figure 23) pour une échéance longue (48h) montre que le comportement du modèle TGR est correct avec des pics de crues assez en phase. En comparaison, le modèle GRP est complètement influencé par l'assimilation des débits, ce qui se traduit par une reproduction des pics de crues avec 48h de retard.

Ces événements permettent également de voir l'effet positif du filtre de Kalman puisque les prévisions fournies par TGR sont lissées. Ce caractère lisse des prévisions à une échéance donnée est intéressant dans le cadre de la prévision des crues car cela signifie que les prévisionnistes auront des prévisions successives stables.

Même si la montée de crue est assez bien reproduite, l'événement d'avril 2006 montre que le modèle TGR peut s'avérer grossier sur certains événements. Le premier pic de crue prévu par TGR autour de 2600 m³/s traduit un comportement sur-réactif du modèle sur les petits événements. L'erreur faite dans la prévision n'impacte cependant pas le critère d'efficacité puisque celui-ci n'est calculé que lorsque le débit observé est supérieur au seuil de 2000 m³.

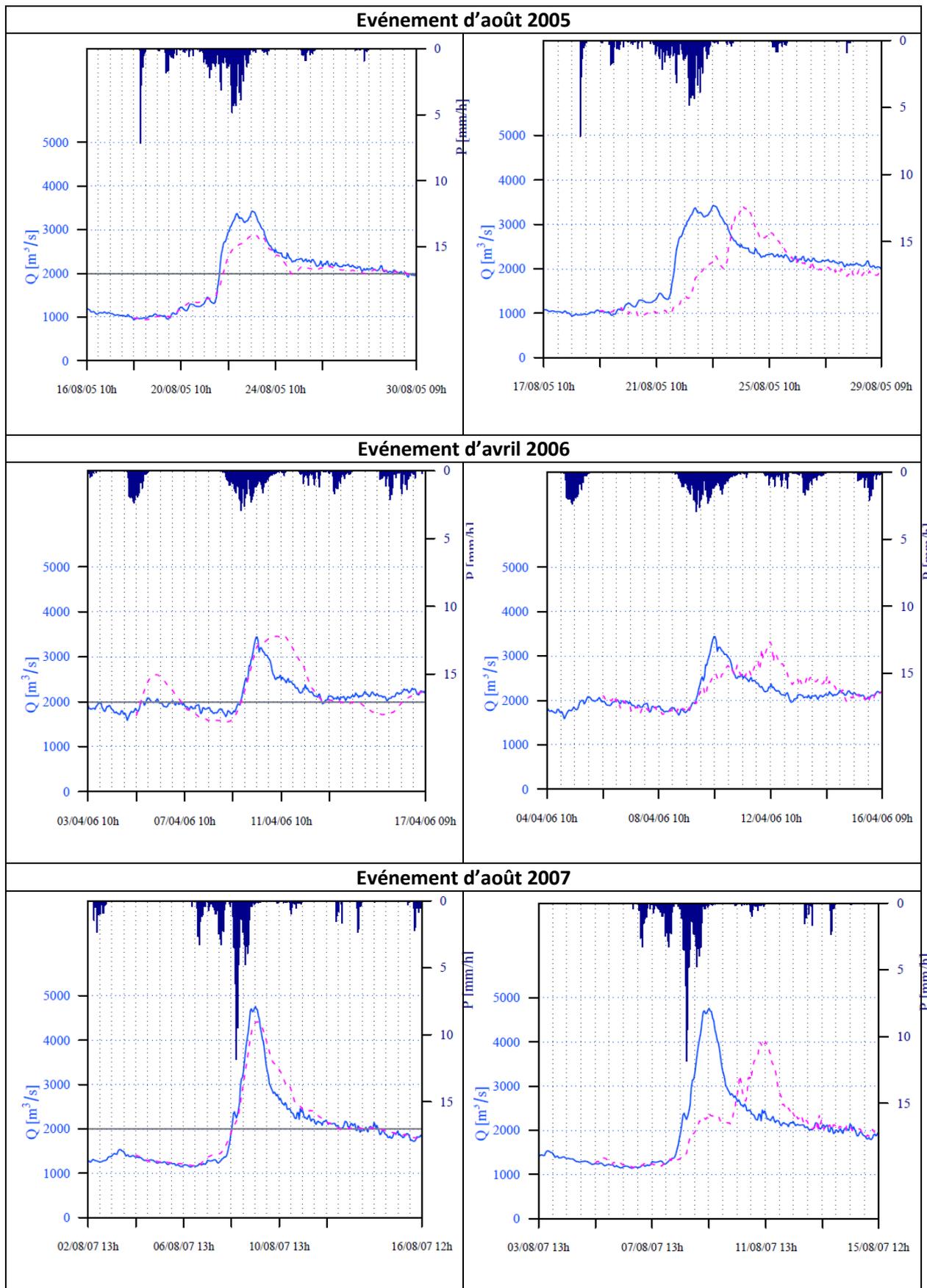


Figure 21 : Comportement de TGR (à gauche) et GRP_TAN (à droite) à Bâle pour une échéance de 48h sur 3 événements

Bien que le modèle soit plutôt bon à la station de Bâle, située la plus en aval, ce n'est pas le cas pour certaines stations plus en amont, et notamment celles situées en sortie d'un lac. Ainsi, malgré un calage effectué sur les plus hauts débits, les prévisions pour la station de Neuhausen en sortie du lac de Constance sont proches de celles du modèle de persistance :

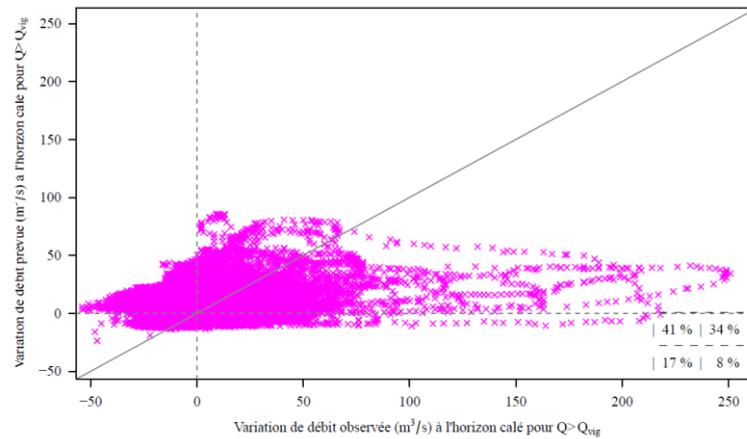


Figure 22 : Variations prévues du débit en fonction des variations observées à la station de Neuhausen en sortie du lac de Constance

Le module hydrologique de TGR n'étant pas conçu pour des lacs, le meilleur calage obtenu est celui qui prend le moins de risque, ce comportement est donc normal. De plus, seulement trois pluviomètres pour une surface de 11000 km² sont utilisés, ce qui est loin d'être optimal, Schaake (1981) recommande 10 pluviomètres pour une telle surface :

$$N = 0.6 \times A^{0.3}$$

Avec N le nombre de pluviomètre et A l'aire du BV en km²

3. Apport du module neige sur les bassins amont suisses

Le module neige a été intégré dans la version 3.0 de GRP, dernière version déployée dans le réseau des services de prévision des crues ; il n'est pas encore disponible pour le modèle TGR. Le bassin du Rhin à Bâle ayant une altitude moyenne de 1025m, la prise en compte du stockage et de la fonte nivale doit pouvoir améliorer sensiblement les performances des modèles hydrologiques. L'efficacité est calculée sur 8 bassins pour une échéance de 48h, sur tous les débits et au dessus du débit défini par le quantile Q98 (figure 25) :

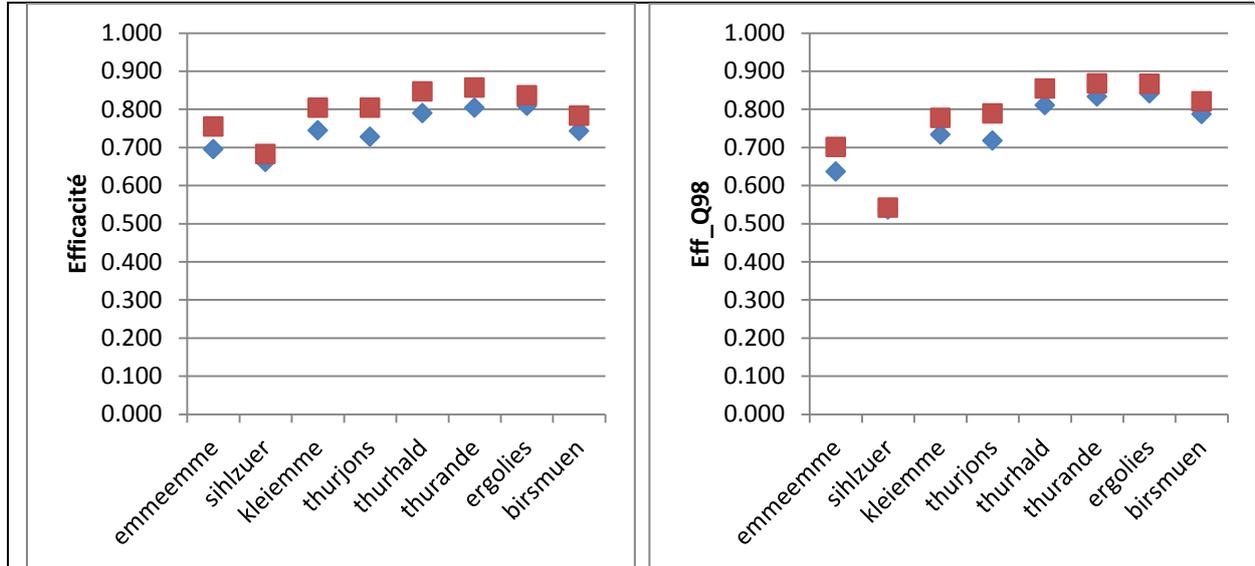


Figure 23: EFF et EFF_Q98 avec (rouge) et sans (bleu) module neige sur 8 bassins suisses pour le modèle GRP

Les performances du modèle GRP sont améliorées sur tous les bassins, à la fois sur tous les débits et au dessus du seuil défini par le débit Q98. L'amélioration va de 0.021 (0.005 au dessus du seuil) pour la Sihl à Zurich (sihlzuer) à 0.076 (0.071 au dessus du seuil) pour la Thur à Jonschwill avec une moyenne de 0,049 (0,040 au dessus du seuil).

Pour le modèle TGR, les mêmes critères sont renseignés sur la figure 26.

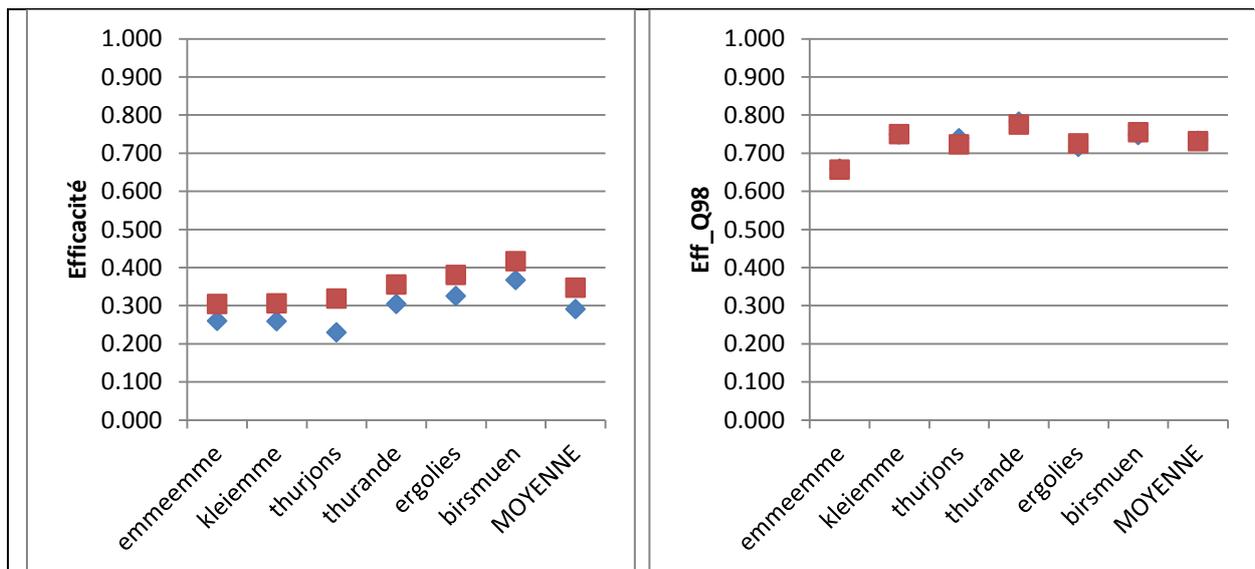


Figure 24 : EFF et EFF_Q98 avec (rouge) et sans (bleu) module neige sur 8 bassins suisses pour le modèle TGR

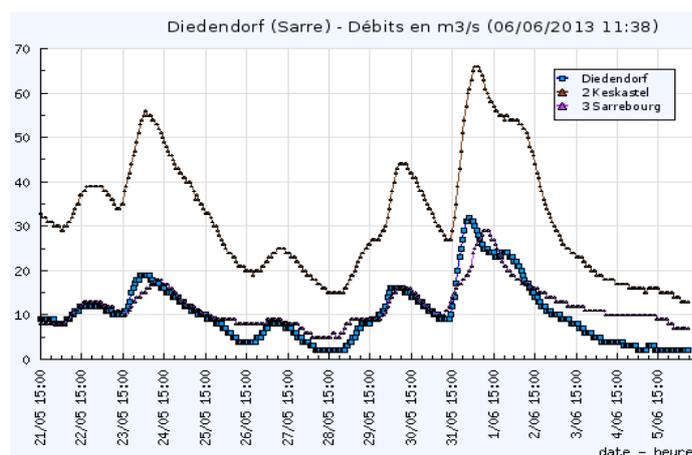
Sur tous les débits, le module neige améliore les performances sur tous les bassins, mais cette amélioration est plus faible avec le modèle TGR qu'avec le modèle GRP. L'amélioration moyenne des performances est de 0,056, ce qui est proche de l'amélioration observé avec GRP (qui est de 0,052 si l'on prend exactement le même échantillon de bassin). Au dessus du seuil Q98, le module neige ne permet par contre pas d'améliorer les performances sur les bassins choisis.

V. Discussion

La comparaison des performances des modèles TGR et GRP sur les assemblages montre qu'un modèle semi-distribué peut être un gros avantage en prévision des crues. L'assemblage sur la Meuse révèle que le gain peut être important sur les hauts débits, et ce pour les échéances de 6h, 12h et 24h.

Sur le bassin du Rhin, le fait d'avoir un modèle semi-distribué permet de tenir compte de l'effet des lacs notamment, même si la marge de progression reste élevée pour les stations à la sortie des lacs. Le modèle TGR étant codés avec Scilab, l'ajout de modules spécifiques pour certaines stations est envisageable sans trop modifier le code principal.

L'étude de TGR sur des assemblages montre que le calage d'un modèle semi-distribué présente des difficultés supplémentaires comparé à un modèle global. En effet pour un modèle global, une sur- ou sous-estimation des débits par la courbe de tarage n'a pas forcément de conséquences sur les performances ; c'est différent dans le cas d'un modèle semi-distribué car le calage des bassins intermédiaires dépend à la fois des courbes de tarages des stations amonts et de la courbe de tarage de la station de sortie.



La figure 27 montre les hydrogrammes de trois stations sur la Sarre lors d'une petite crue de Mai 2013. Les courbes de tarages ne semblent pas cohérentes entre Sarrebourg (311 km²), Didendorf (733km²) et Keskastel (879km²) puisque le débit mesuré à Didendorf est quasiment le même que celui à Sarrebourg malgré un bassin plus de deux fois plus grand, et très loin de celui mesuré à Keskastel malgré une taille de bassin assez proche. Le calage d'un modèle semi-distribué sur ces trois stations risque d'aboutir à un coefficient d'IGF nulle sur le bassin intermédiaire de Sarrebourg et très important sur le bassin intermédiaire de Diedendorf.

VI. Conclusion

Dans cette étude, nous avons comparé le comportement et les performances de deux modèles hydrologiques développés par l'IRSTEA et mis-a-disposition du réseau de prévision des crues. Le premier, GRP, est un modèle global conceptuel, facile à mettre en œuvre car il ne nécessite comme données que des chroniques de débits, de précipitations horaires et d'ETP.

Bien que plus complexe puisqu'il permet de réaliser des assemblages entre les stations, le modèle TGR remplit sa mission d'offrir un modèle semi-distribué simple à mettre en place puisqu'il ne nécessite comme données supplémentaires que les distances entre les stations. Des tests effectués sur le bassin de la Meuse amont et sur le bassin du Rhin nous montrent que face au modèle GRP, l'amélioration des performances dans le cadre de la prévision peut être significative.

La comparaison des modules hydrologiques de GRP et TGR montre cependant que la linéarisation du réservoir de routage rend le calage plus dépendant de la gamme des débits pour laquelle le modèle va être utilisé. Un modèle calé sur les hauts débits a toutes les chances d'être mauvais le reste du temps, ce qui n'encouragera pas les prévisionnistes à faire confiance au modèle en période de crue.

Cette linéarisation du réservoir de routage, qui est la conséquence de l'utilisation d'un filtre de Kalman est d'autant plus dommage que ce type d'assimilation est particulièrement plaisant pour les prévisionnistes. En effet le modèle est moins influencé par le bruit dans les mesures et fournit des prévisions successives stables. Ceci s'oppose à une assimilation basée sur le dernier débit qui offre globalement des meilleures performances mais risque de sur-interpréter les variations de débits mesurées et de fournir des prévisions successives trop différentes.

L'utilisation d'un filtre de Kalman d'ensemble, qui est actuellement à l'étude, serait sans aucun doute une grande amélioration car cela permettrait d'utiliser un réservoir de routage non-linéaire plus performant sur la gamme des débits, tout en gardant les avantages du filtre de Kalman.

Enfin, au vu de l'amélioration apportée par le module Cemaneige avec GRP sur l'ensemble des bassins amont du bassin du Rhin, l'ajout de celui-ci à TGR a été fait et des tests sont en cours pour voir s'il permet d'améliorer les performances à Bâle, notamment lors des crues d'été où la fonte des neiges joue un rôle majeur.

Référence :

1. Ouvrage :

Commission Internationale de l'Hydrologie du Bassin du Rhin, 1978, *Das Rheingebiet, Hydrologische Monographie / Le bassin du Rhin, Monographie Hydrologique*

2. Thèses :

Berthet L., 2010, *Prévision des crues au pas de temps horaire : pour une meilleure assimilation de l'information de débit dans un modèle hydrologique*

Munier S., 2009, *Modélisation intégrée des écoulements pour la gestion en temps réel d'un bassin versant anthropisé*

Oudin L., 2004, *Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global*

Valéry A., 2010, *Modélisation précipitations – débit sous influence nivale : Elaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants*

Tangara M., 2005, *Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global*

3. Articles :

Andréassian V., Perrin C., Michel C., Usart-Sanchez I., Lavabre J., 2001, *Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models*, Journal of Hydrology, 250, 206-223

Bardossy, A., Das, T., 2006, *Influence of rainfall observation network on model calibration and application*, Hydrology and Earth System Sciences, 3, 3691-3726

Fourmigué, P., Lavabre, J., 2005, *Prévision de crues avec le modèle conceptuel pluie-débit GR3H : adaptabilité aux incertitudes sur la pluie*, Revue des sciences de l'eau 18/1, 87-102

Schaake, J.C., 1981, *Summary of River Forecasting Rainage Network Density Requirements*, unpublished, <http://www.nws.noaa.gov/oh/mopex/rainage%20density%20requirement.htm>

Kalman, R. E., 1960, *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*, Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering Vol. 82: pp. 35-45

Klemes, V. (1986). *Operational testing of hydrologic simulation models*. Hydrological Sciences Journal, 31(1) : 13 - 24.

4. Rapports :

Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2007, *Modèle hydrologiques du Génie Rural (GR) : résumé*

Valéry, A., 2006, *Etude de faisabilité d'un modèle hydrologique appliqué au bassin versant du Rhin Suisse en vue des prévisions de débit à l'amont de Kembs*

Perret, C., Lobey, B., 2008, *La crue du Rhin du 9 août 2007 : retour d'expérience*

5. Sites internet :

Académie Nancy-Metz, 2012, *Perte de la Meuse*, Base Géologie : géologie de la Lorraine, <http://www4.ac-nancy-metz.fr/base-geol/fiche.php?dossier=157&p=3descrip>

Office fédéral de l'environnement, OFEV, *Données et bases hydrologiques*, <http://www.bafu.admin.ch/hydrologie/index.html>

Annexes :

Tableau 3 : Paramètres de GRP dépendant de l'échéance utilisée

Δt	1 h	2 h	3 h	6 h	12 h	24 h
Capacité du réservoir de production A	275	275	275	275	300	325
Coefficient de la fonction de percolation B	5,25	4,75	3,50	3,00	2,50	2,50
Exposant de l'hydrogramme unitaire α	1,25	1,50	1,75	1,75	1,75	2,25
Exposant de la fonction de vidange du réservoir de routage β	2	–	–	2	–	2,5
Exposant de la correction finale γ	0,450	0,400	0,325	0,175	0,125	0,100

Tableau 4: Performances de GRP avec et sans le module neige sur les bassins suisses

	EFF			EFF_Q99		
	SMN	AMN	AMN-SMN	SMN	AMN	AMN-SMN
emmeemme	0.695	0.755	0.060	0.637	0.701	0.064
sihlzuer	0.662	0.683	0.021	0.537	0.542	0.005
kleiemme	0.745	0.804	0.059	0.734	0.777	0.043
thurjons	0.728	0.804	0.076	0.718	0.789	0.071
thurhald	0.790	0.847	0.057	0.811	0.854	0.043
thurande	0.804	0.857	0.053	0.833	0.868	0.035
ergolies	0.809	0.837	0.028	0.842	0.867	0.025
birsmuen	0.743	0.783	0.040	0.787	0.821	0.034
MOYENNE	0.747	0.796	0.049	0.737	0.777	0.040
MINI			0.021			0.005
MAX			0.076			0.071

Tableau 5 : Performances comparées entre TGR et GRP sur le tronçon Meuse-amont

Station	Échéance	Modèle	EFF	EFF_SV
Neuchateau	6h	TGR	0.51	0.74
		GRP_TAN	0.50	0.45
		GRP_RNA	0.64	0.58
	12h	TGR	0.35	0.71
		GRP_TAN	0.58	0.55
		GRP_RNA	0.63	0.59
	24h	TGR	0.16	0.69
		GRP_TAN	0.69	0.67
		GRP_RNA	0.72	0.70
Domremy	6h	TGR	0.56	0.49
		GRP_TAN	0.42	0.35
		GRP_RNA	0.59	0.49
	12h	TGR	0.59	0.61
		GRP_TAN	0.53	0.47
		GRP_RNA	0.61	0.52
	24h	TGR	0.22	0.66
		GRP_TAN	0.66	0.61
		GRP_RNA	0.69	0.64
Chalaines	6h	TGR	-0.83	0.62
		GRP_TAN	0.36	0.33
		GRP_RNA	0.61	0.54
	12h	TGR	-0.22	0.68
		GRP_TAN	0.44	0.39
		GRP_RNA	0.57	0.49
	24h	TGR	0.02	0.71
		GRP_TAN	0.59	0.51
		GRP_RNA	0.63	0.53