

---

## Modélisation hydrologique globale

### 4.1 Introduction

Depuis les premiers modèles de simulation pluie-débit proposés au début des années 1960, de nombreux modèles ont été développés selon des approches très variées. Cependant, aucun d'entre eux n'est pleinement satisfaisant pour décrire l'ensemble des mécanismes qui régissent la transformation de la précipitation en débit.

Pour les besoins de notre approche, nous avons recherché un modèle de référence performant et de structure relativement simple pour être facilement applicable sur une grande variété de bassins versants. Parmi les modèles examinés dans la littérature, les modèles globaux du Génie Rural (GR), développés à Irstea depuis le début des années 1980, correspondaient bien à notre approche. En effet, ce sont des modèles robustes et performants en termes de simulation des débits, tout en restant suffisamment simples pour limiter les difficultés de mise en œuvre.

Aujourd'hui, le modèle GR5 (Le Moine, 2008) est la version globale la plus avancée des modèles pluie-débit GR<sup>7</sup>. Cette version a été testée sur un grand nombre de bassins versants français au pas de temps horaire et donne de meilleurs résultats que sa version antérieure GR4 (Le Moine, 2008). Le modèle GR4, établi par Perrin *et al.* (2003), fait partie des modèles globaux de référence utilisés pour le projet de comparaison des modèles distribués (Smith *et al.* 2012a) et s'est montré aussi performant que les autres modèles de la communauté hydrologique pour la simulation des débits. C'est pourquoi, le modèle global GR5 a été choisi dans notre travail comme modèle de référence pour la simulation des débits.

Dans ce chapitre nous présenterons tout d'abord le fonctionnement du modèle hydrologique GR5 ainsi que les procédures nécessaires à son utilisation. Puis, nous définirons la méthodologie d'évaluation qui sera utilisée dans la suite de nos travaux de recherche. Enfin, nous analyserons les simulations globales de débit obtenues sur notre échantillon de 181 bassins versants.

---

<sup>7</sup> Depuis 2013, une nouvelle version des modèles GR a été établie par Pushpalatha (2013) : le modèle GR6.

## 4.2 Le modèle hydrologique pluie-débit GR5

### 4.2.1 Présentation de la structure pluie-débit GR5

#### 4.2.1.1 Fonctionnement du modèle GR5

Le modèle hydrologique pluie-débit GR5 est un modèle développé de manière empirique, dont la structure l'apparente à des modèles conceptuels pour représenter les processus hydrologiques à l'échelle du bassin versant. C'est un modèle à réservoir, continu et global. La réponse du bassin versant à l'exutoire est calculée à partir de données d'entrée moyennées sur le bassin, sans représenter ce qui se passe aux échelles inférieures. Cela revient à faire l'hypothèse que la variabilité spatiale des caractéristiques physiques et des phénomènes météorologiques ne joue qu'un rôle de second ordre sur la réponse hydrologique du bassin versant, celle-ci étant principalement contrôlée par les valeurs moyennes des caractéristiques et des entrées météorologiques du bassin. Les stratégies de développement qui ont mené à la structure de ce modèle sont détaillées dans la thèse de Le Moine (2008). Le fonctionnement du modèle GR5 est brièvement présenté ci-dessous (Figure 17).

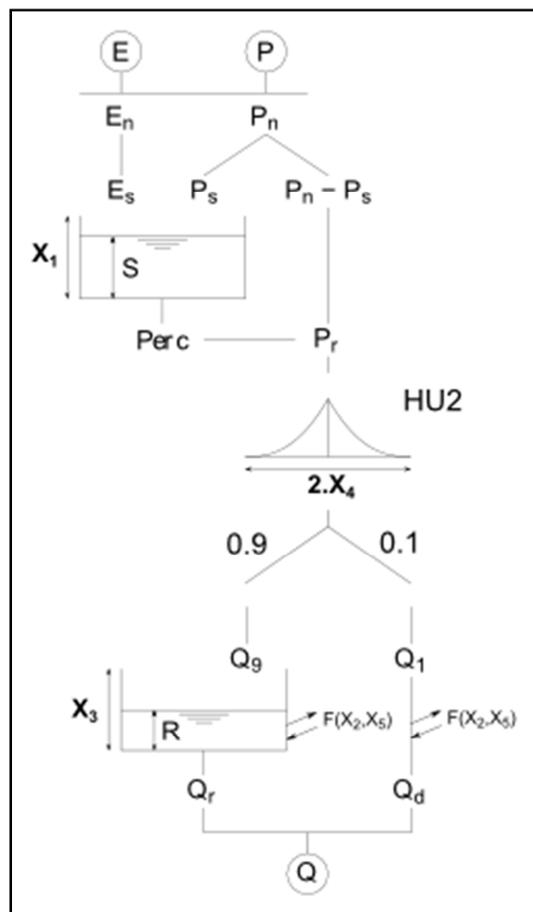


Figure 17 : Schéma structurel du modèle global GR5.

A partir des données de précipitation  $P$ , d'évapotranspiration potentielle  $E$  et d'un jeu de cinq paramètres ( $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$ ), un débit est calculé à l'exutoire du bassin versant modélisé. Le modèle GR5 transforme la pluie en débit par étapes :

- (i) Dans un premier temps, une **production**  $P_r$  est calculée à partir des données de précipitation et d'évapotranspiration potentielle moyennées sur l'unité de calcul élémentaire (généralement le bassin versant, mais ce pourrait être une maille ou un sous-bassin). Une pluie nette  $P_n$  est calculée après neutralisation des précipitations par l'évapotranspiration potentielle du bassin. Si les précipitations sont inférieures à l'évapotranspiration potentielle, la pluie nette est nulle, la différence forme l'évapotranspiration nette  $E_n$  et une quantité d'évaporation  $E_s$  (calculée à partir de  $E_n$ ) est retirée du réservoir de production. A l'inverse, si la pluie nette n'est pas nulle, une partie de cette pluie nette  $P_s$  alimente le premier réservoir du modèle (appelé réservoir de production) qui est dimensionné par le paramètre  $X_1$  (mm), l'autre partie, la pluie efficace, va aller alimenter l'écoulement. A l'issue de cette première étape, la pluie efficace et la percolation du réservoir de production forment la production du bassin sur le pas de temps considéré;
- (ii) Dans un second temps, la production est transférée via la **fonction de transfert** représentée par un hydrogramme unitaire dont le temps de base est déterminé par le paramètre  $X_4$  (heures). La majeure partie du transfert (90%) est routée vers l'exutoire à travers le réservoir de routage, de capacité  $X_3$  (en mm), qui permet de lisser le signal d'entrée. Le reste (10%) est directement transmis vers l'exutoire, sans passer par le réservoir de routage.
- (iii) Pendant le processus de routage, une **fonction d'échange** est utilisée pour représenter les échanges souterrains avec la nappe. Une quantité d'eau est ajoutée (dans le cas d'apport) ou enlevée (dans le cas de pertes) au bassin versant. Ces échanges sont opérés dans le réservoir de routage ainsi que dans la branche d'écoulement direct qui court-circuite le réservoir de routage. La fonction d'échange est contrôlée linéairement par le niveau du réservoir de routage, au moyen d'un coefficient multiplicatif (paramètre  $X_2$ ) et peut s'inverser selon que l'on est au-dessus ou en dessous d'un taux de remplissage seuil (paramètre  $X_5$ ).

Le modèle GR5 a été développé au pas de temps journalier et au pas de temps horaire. Il est important de rappeler que le changement de pas de temps occasionne des transformations de certains paramètres (fixes ou à optimiser) du modèle (Mathevet 2005). Ces transformations ont été estimées théoriquement d'après les formulations des différentes fonctions mathématiques du modèle, puis vérifiées empiriquement en comparant les résultats des modélisations obtenus aux différents pas de temps sur 1040 bassins versants français (Le Moine 2008). La constante de percolation et l'exposant de l'hydrogramme unitaire ont des valeurs fixes différentes selon le pas de temps de fonctionnement du modèle (Tableau 3), ainsi que les cinq paramètres à optimiser ( $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$ ).

Fonction	Formulation mathématique	Valeur optimale empirique
Percolation	$PERC = S \cdot \left( 1 - \frac{1}{\left( 1 + \left( \frac{S}{\beta \cdot X_1} \right)^4 \right)^{1/4}} \right)$	$\beta_J = 2.25$ $\beta_H = 5.25$
Hydrogramme unitaire	$HU2(i) = SH2(i) - SH2(i - 1)$ $SH2(t) = \begin{cases} 0 & , t < 0 \\ -\frac{1}{2} \left( \frac{t}{X_4} \right)^\alpha & , 0 < t < X_4 \\ 1 - \frac{1}{2} \left( 2 - \frac{t}{X_4} \right)^\alpha & , X_4 < t < 2 \cdot X_4 \\ 1 & , t \geq 2 \cdot X_4 \end{cases}$	$\alpha_J = 2.50$ $\alpha_H = 1.25$

Tableau 3 : Changement des paramètres fixes du modèle entre les pas de temps journalier (J) et horaire (H) :  $\beta$  est la constante de percolation et  $\alpha$  l'exposant de l'hydrogramme unitaire.

#### 4.2.1.2 Paramétrage du modèle GR5

Les cinq paramètres du modèle GR5 doivent être déterminés pour calculer les débits à l'exutoire du bassin versant : ils définissent le comportement du bassin versant en réponse aux données de précipitation et d'évapotranspiration. Ces paramètres n'ont pas de sens physique *a priori*, dans le sens où il n'existe pas de relation univoque avec des caractéristiques physiques du bassin. Cependant, chaque paramètre a une influence dominante sur les débits simulés à l'exutoire du bassin :

- $X_1$  (mm), qui représente la capacité du réservoir de production, permet notamment d'avoir un effet tampon plus ou moins fort sur les pluies et de contrôler les pertes par évaporation issues du réservoir ;
- $X_2$  (mm) représente les gains ou pertes maximum du bassin par pas de temps, c'est le second paramètre qui permet d'ajuster le bilan en eau du bassin. L'amplitude de ces échanges est fonction du remplissage du réservoir de routage ;
- $X_3$  (mm) qui représente la capacité (à un pas de temps) du réservoir de routage, modélise le transfert et contrôle la dynamique des récessions de débit : il lisse temporellement la série des pluies efficaces ;
- $X_4$  (h) représente le temps de base de l'hydrogramme unitaire (c'est-à-dire qu'il définit la longueur de l'hydrogramme unitaire) : il permet d'introduire un délai entre pluie et débit. Il contrôle donc le décalage temporel entre entrées et sorties. Les hydrogrammes ont également un effet de lissage en répartissant les pluies efficaces sur plusieurs pas de temps.

- $X_5$  (.) est le seuil dans le réservoir de routage correspondant au taux de remplissage où le signe des échanges (gain ou perte) s'inverse. Ce cinquième paramètre est borné entre 0 et 1. Il conceptualise la saisonnalité des échanges : de la rivière vers l'aquifère pendant les hautes eaux et les échanges inverses, pendant les basses eaux (si  $X_2$  est négatif).

Les avantages du modèle global GR5 résident dans sa robustesse et la simplicité de sa structure. Il requiert peu de données et seulement cinq paramètres pour calculer un débit à l'exutoire des bassins. Cependant, ce type d'approche nécessite d'ajuster les paramètres du modèle par calage sur des séries de données d'observation de la réponse du bassin versant (c'est-à-dire les débits).

## 4.2.2 Initialisation et optimisation du modèle pluie-débit

### 4.2.2.1 Initialisation des états du modèle pluie-débit

Avant toute simulation, il faut déterminer l'état initial dans lequel se trouve le bassin versant. Une mauvaise définition des conditions initiales (et principalement des niveaux des réservoirs en début de simulation) peut entraîner des erreurs de simulation et donc une diminution des performances du modèle (Le Moine 2008).

Les conditions initiales n'étant pas mesurables, il est commun d'utiliser une période d'initialisation ou mise en route (*warm-up* en anglais). En effet, on considère en général que les conditions initiales influencent peu les simulations dès lors que l'on a laissé évoluer les états du modèle en fonction des entrées météorologiques pendant au moins un cycle hydrologique. Cela correspond au fait que pour une majorité de bassins, la mémoire des conditions initiales n'excède pas un an. Cela n'est cependant pas vrai pour tous les bassins, certains ayant une mémoire plus longue.

De manière générale, les modèles pluie-débit sont donc initialisés en utilisant quelques années de forçage climatique sur lesquelles on laisse évoluer le modèle avant d'évaluer la qualité de ses simulations. Cette procédure peut cependant se révéler « coûteuse » en données lorsque les séries disponibles sont courtes, et il est donc utile de limiter autant que possible la longueur de la période d'initialisation. D'autres procédures peuvent donc être envisagées pour limiter le « coût » de cette initialisation (voir par ex. Le Moine, 2008), même si elles sont généralement plus coûteuse en temps de calcul.

Dans notre cas, nous souhaitons évaluer la réanalyse des lames d'eau sur les 10 années disponibles (1997-2006) sans perdre la durée d'initialisation. Pour cela, les données de précipitations nécessaires avant l'année 1997 sont issues des données journalières SAFRAN (qui sont disponibles depuis 1958) désagrégées au pas de temps horaire : elles sont constantes sur la journée et correspondent au  $1/24^{\text{ième}}$  de la pluie journalière. Au début de la période d'initialisation, les réservoirs de production et de routage sont respectivement remplis à 80% et 20% de leur capacité.

Cette méthode d'initialisation a l'avantage de définir les états initiaux du modèle à partir de données observées qui permettent d'obtenir des conditions initiales cohérentes avec la dynamique du bassin versant aux pas de temps précédents. Cependant, il faut définir la durée à partir de laquelle les conditions initiales n'ont plus de poids sur les performances du modèle évalué entre 1997 et 2006 (cf. 4.3.1.1).

#### 4.2.2.2 Optimisation des jeux de paramètres

Le modèle hydrologique pluie-débit GR5 nécessite l'estimation de cinq paramètres qui sont calés par rapport au débit observé à l'exutoire des bassins versants. L'algorithme de calage est une méthode « pas à pas » développée par Michel (1989) avec le pré-filtrage des paramètres proposé par Mathevet (2005). C'est une méthode locale directe qui cherche à maximiser (ou minimiser) une fonction objectif.

Percentiles	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>
33 <sup>ième</sup>	224.75	-2.94	81.45	8.20	0.00
50 <sup>ième</sup>	322.14	-1.37	172.43	14.60	0.10
66 <sup>ième</sup>	642.26	-0.47	387.61	30.30	0.20

**Tableau 4 : Distribution des paramètres au pas de temps horaire du modèle pluie-débit global GR5H (Le Moine, 2008)**

La méthode de pré-filtrage des paramètres permet de fournir à la méthode de calage pas-à-pas un point de départ situé dans la région probable de convergence (Mathevet 2005). Elle consiste en une inspection systématique mais grossière de l'espace des paramètres, en se basant sur des quantiles des distributions a priori des paramètres. Le pré-filtrage est opéré sur les quantiles 0.16, 0.50 et 0.83 de la distribution des paramètres, chacun de ces quantiles se retrouvant au centre d'un tiers de la distribution. Dans le cas du modèle GR5, nous avons donc trois valeurs pour chacun des cinq paramètres à optimiser : il existe  $3^5=243$  combinaisons possibles de paramètres qui sont testées afin de définir le meilleur jeu initial de paramètre pour l'algorithme de calage.

Le modèle GR5 a été développé et testé par Le Moine (2008) sur une base de 1040 bassins versants français. Nous utiliserons les distributions des paramètres obtenues sur cette base de bassins versants pour « préfiltrer » l'espace des paramètres (Tableau 4). Notons que la distribution des paramètres est dépendante du pas de temps de fonctionnement du modèle. Une fois que les paramètres auront été calés sur les 10 années de la base de données (1997-2006), à partir du pré-filtrage issu de la distribution des paramètres de la base de Le Moine (2008), il sera possible de re-définir la distribution des paramètres sur nos propres échantillons de bassins versants.

### 4.2.2.3 Fonction objectif

La fonction objectif est utilisée pour évaluer l'erreur du modèle lors de l'optimisation de ses paramètres. L'utilisation de fonctions objectif différentes peut mener à des solutions différentes. Gupta *et al.* (2009) ont montré que le critère de Nash-Sutcliffe (NSE) utilisé comme fonction objectif donne trop peu de poids aux erreurs de bilan par rapport aux autres composantes (corrélation et variabilité) dans le cas des bassins présentant des débits très variables, et tend à favoriser des jeux de paramètres sous-estimant la variance.

C'est pourquoi nous choisissons d'optimiser les paramètres du modèle pluie-débit GR5 avec le critère de Kling-Gupta (KGE) qui permet de trouver un meilleur compromis entre différentes qualités attendues sur les simulations (biais, variance, corrélation, relativement aux observations) par rapport au critère NSE :

$$r = \frac{\text{cov}(Q^{obs}, Q^{sim})}{(\sigma_{sim} \cdot \sigma_{obs})} \quad \text{Eq. 17}$$

$$\alpha = \frac{\sigma_{sim}^2}{\sigma_{obs}^2} \quad \text{Eq. 18}$$

$$\beta = \frac{\mu_{sim}^2}{\mu_{obs}^2} \quad \text{Eq. 19}$$

$$KGE = 1 - [(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2]^{1/2} \quad \text{Eq. 20}$$

avec *KGE* le critère de Kling-Gupta,  $\alpha$  le rapport des variances,  $\beta$  les erreurs de volume (ou le biais),  $r$  le coefficient de corrélation entre les débits observés et simulés  $Q^{obs}$  et  $Q^{sim}$ ,  $\mu_{obs}$  et  $\mu_{sim}$  les débits moyens observés et simulés,  $\sigma_{obs}$  et  $\sigma_{sim}$  les écarts-types des débits observés et simulés et  $\text{cov}()$  l'opérateur de covariance.

## 4.2.3 Méthodologie d'évaluation du modèle pluie-débit

### 4.2.3.1 Stratégie d'évaluation

Pour évaluer les modélisations pluie-débit, nous suivons une procédure de calage-contrôle (Klemeš 1986) sur un grand nombre de bassins versants :

- (i) Les dix années de données (1997-2006) sont scindées en deux périodes indépendantes de cinq ans (1997-2001 et 2002-2006) ;
- (ii) un jeu de paramètres est calé sur chaque période de cinq ans et pour chaque bassin ;
- (iii) les performances du modèle sont ensuite calculées sur la période qui n'a pas été utilisée pour le calage des paramètres (contrôle ou validation).

Les performances du modèle sont évaluées en validation, sur **deux périodes indépendantes de 5 ans**, en termes de **précision** et **robustesse**. La précision est la mesure de la qualité des simulations par rapport au débit observé à l'exutoire des bassins versants. La robustesse est la mesure de la stabilité des performances et des jeux de paramètres entre les deux périodes d'évaluation (1997-2001 et 2002-2006). Par ailleurs, puisque nous nous intéressons à l'impact de la variabilité spatiale des précipitations sur les crues, les simulations seront aussi évaluées sur les **événements de crue** sélectionnés.

#### 4.2.3.2 Critères d'évaluation

Le Tableau 5 présente les critères d'évaluation utilisés dans notre travail de recherche pour évaluer la précision des simulations de débit. Les critères KGE (Gupta et al. 2009), NSE (Nash and Sutcliffe 1970) et  $C_{2M}$  (Mathevet et al. 2006) mesurent la qualité générale des simulations de débits sur l'ensemble de la chronique simulée. L'erreur d'amplitude du pic de crue  $\Delta Q_p$ , le décalage du pic de crue  $\Delta t_p$  et l'erreur de volume de crue  $\Delta V$  sont des critères événementiels calculés sur les événements de crue uniquement : ils mesurent la qualité des simulations de débit sur le pic de crue, la phase du pic de crue et le volume de crue. Nous rappelons que le pic de crue a été défini comme le débit maximum sur l'événement de crue : il y a un seul pic de crue par événement et si plusieurs pics de crue sont observés pour un même événement, seul le pic de crue le plus fort (observé et simulé) est considéré pour l'évaluation.

Le critère NSE est le critère d'évaluation le plus utilisé dans la littérature : il correspond au critère d'erreur quadratique normalisé par l'erreur d'un modèle de référence défini par la moyenne des débits et il varie entre  $-\infty$  et 1. Le critère  $C_{2M}$  est une version bornée du critère NSE qui permet de compenser certains des problèmes du critère NSE (Mathevet et al. 2006). En effet, les bassins difficiles à modéliser peuvent engendrer des valeurs fortement négatives du critère NSE ou KGE : la moyenne des performances sur un échantillon de bassins n'est alors plus significative, ce qui complique l'évaluation du modèle pluie-débit. C'est pourquoi, nous utiliserons aussi le critère  $C_{2M}$  qui est mieux adapté pour comparer les performances sur un grand nombre de bassins versants puisqu'il a l'avantage d'être borné entre -1 et 1. Notons que les critères NSE et  $C_{2M}$  ont la même signification, la valeur nulle correspondant à la même erreur que celle du modèle de référence, et ils sont reliés par les formules suivantes (Mathevet 2005) :

$$NSE = \frac{2 \cdot C_{2M}}{1 + C_{2M}} \quad \text{Eq. 21}$$

Critère d'évaluation	Formulation	Limites	Valeur optimale
Nash-Sutcliffe	$NSE = 1 - \frac{\sum (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum (Q_i^{obs} - \overline{Q^{obs}})^2}$	$[-\infty ; 1]$	$NSE = 1$
$C_{2M}$	$C_{2M} = \frac{1 - \sum (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2 / \sigma_{obs}^2}{1 + \sum (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2 / \sigma_{obs}^2}$	$[-1 ; 1]$	$C_{2M} = 1$
Erreur d'amplitude du pic de crue	$\Delta Q_p = \frac{ Q_p^{sim} - Q_p^{obs} }{Q_p^{obs}}$	$[0 ; +\infty]$	$\Delta Q_p = 0$
Décalage du pic de crue	$\Delta t_p = \frac{ t(Q_p^{obs}) - t(Q_p^{sim}) }{t_{fin} - t_{deb}}$	$[0 ; +\infty]$	$\Delta t_p = 0$
Erreur de volume de crue	$\Delta V = \frac{\sum_{i=i_1}^{i_2}  Q_i^{sim} - Q_i^{obs} }{\sum_{i=i_1}^{i_2} Q_i^{obs}}$	$[0 ; +\infty]$	$\Delta V = 0$

Tableau 5: Critères d'évaluation des simulations de débit avec :  $Q_i^{obs}$  et  $Q_i^{sim}$  les débits observé et simulé au pas de temps  $i$ ,  $\mu_{obs}$  et  $\sigma_{obs}^2$  respectivement la moyenne et la variance des débits observés,  $Q_p^{sim}$  et  $Q_p^{obs}$  les pics de crue simulés et observés respectivement,  $t(Q_p^{sim})$  et  $t(Q_p^{obs})$  les ordonnées temporelles du pic de crue observé et simulé, avec  $t_{deb}$  et  $t_{fin}$  le début et la fin de l'événement de crue et  $i_1$  et  $i_2$  les pas de temps correspondants.

L'indice de performance relative introduit par Lerat et al. (2012) sera utilisé pour comparer les performances une option de modélisation  $b$  par rapport à une option  $a$ . Cet indice permet de comparer deux simulations par rapport à une référence indépendante (le débit observé dans notre cas) :

$$R_m[b|a] = \frac{\mathbf{m}[Q^{obs}, Q^a] - \mathbf{m}[Q^{obs}, Q^b]}{\mathbf{m}[Q^{obs}, Q^a] + \mathbf{m}[Q^{obs}, Q^b]} \quad \text{Eq. 22}$$

avec  $R_m[a/b]$  l'indice de performance relative entre le modèle  $a$  et  $b$ ,  $Q^{obs}$  le débit observé,  $Q^a$  et  $Q^b$  les débits calculés respectivement par le modèle  $a$  et  $b$ , et  $\mathbf{m}$  un critère de performance pour évaluer la qualité des débits simulés par rapport au débit observé. L'indice de performance  $R_m[./.]$  varie entre -1 et 1 ( $m=0$  quand l'erreur est nulle), ce qui limite les problèmes de comparaison sur un échantillon de bassins versants par rapport à un critère non-borné (Mathevet et al. 2006; Schaeffli and Gupta 2007; Seibert 2001). Dans notre cas le critère  $\mathbf{m}$  peut être le critère 1-NSE, 1-KGE, 1- $\Delta T_p$ , 1- $\Delta Q_p$  ou 1- $\Delta V$ . Le Tableau 6 donne plus de détails sur son interprétation.

$R_m[b a]$	$m[Q^{obs}, Q^b] / m[Q^{obs}, Q^a]$	Interprétation
1	0	b est parfait avec $m[Q^{obs}, Q^b] = 0$
1/2	1/3	$m[Q^{obs}, Q^b]$ est 3 fois plus petit (meilleur) que $m[Q^{obs}, Q^a]$
0	1	a et b sont équivalents $m[Q^{obs}, Q^a] = m[Q^{obs}, Q^b]$
-1/2	3	$m[Q^{obs}, Q^b]$ est 3 fois plus grand (moins bon) que $m[Q^{obs}, Q^a]$
-1	+ Inf	a est parfait avec $m[Q^{obs}, Q^a] = 0$

Tableau 6 : Interprétation de l'indice de performance relative  $R_m[.|.]$  entre le modèle b et le modèle de référence a.

#### 4.2.3.3 Evaluation de la robustesse

En termes de précision, la robustesse est définie comme la chute de performance, sur une période donnée, entre le calage et la validation. On considère aussi que le modèle est robuste si les paramètres optimisés entre les deux périodes indépendantes (1997-2001 et 2002-2006) sont proches. Afin d'évaluer la robustesse des jeux de paramètre, nous définissons un critère de robustesse  $RSSE$  comme la distance euclidienne entre les valeurs optimisées des paramètres, normalisée par la valeur moyenne.

$$\Delta NSE = \frac{NSE_{calage} - NSE_{validation}}{NSE_{calage}} \quad \text{Eq. 23}$$

$$RSSE = \left| \frac{\sqrt{(X_{Per1} - X_{Per2})^2}}{\frac{1}{2}(X_{Per1} + X_{Per2})} \right| \quad \text{Eq. 24}$$

avec  $\Delta NSE$  et  $RSSE$  le critère de robustesse des performances et des paramètres du modèle respectivement,  $NSE_{calage}$  et  $NSE_{validation}$  le critère de performance obtenu en calage et validation respectivement,  $X_{Per1}$  et  $X_{Per2}$  le paramètre obtenu sur chaque période indépendante de simulation.

Notons qu'il est difficile d'évaluer un modèle par sa robustesse seule, dans la mesure où le modèle simulant une valeur constante quelle que soit le pas de temps serait parfaitement robuste mais très peu représentatif de la réalité. La robustesse des modèles est affectée à la fois par les erreurs structurelles induites par le modèle lui-même et par des données d'observation erronées, indépendamment du modèle utilisé. Ce critère ne peut donc être utilisé qu'en complément de critère évaluant la performance du modèle en validation de manière stricte. Toutefois, nous présenterons les distributions du critère de robustesse à titre indicatif. De plus, ce critère sera utile pour comparer différentes structures de modèle afin d'identifier et discriminer celles qui sont les mieux adaptées à notre recherche (cf. Chapitre 5).

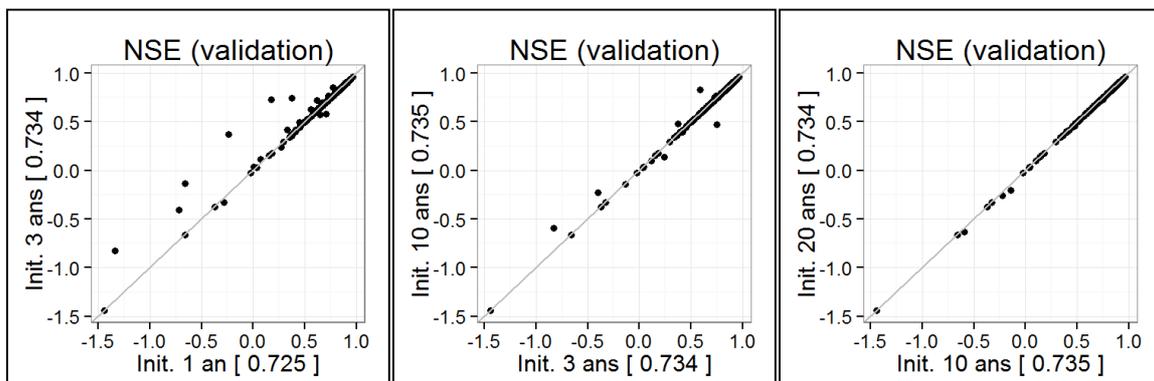
### 4.3 Analyse des simulations hydrologiques pluie-débit globales

#### 4.3.1 Evaluation du modèle pluie-débit sur l'échantillon de 181 bassins versants

##### 4.3.1.1 Tests sur l'initialisation

Afin de limiter les temps de calculs, nous souhaitons déterminer la durée la plus courte possible pour initialiser les états du modèle sans impacter ses performances. Notons que pour chaque période de simulation (1997-2001) et (2002-2006), les données nécessaires à l'initialisation sont d'origines différentes : elles sont issues de la base de donnée SAFRAN avant 1997 tandis que ce sont les données de la réanalyse qui sont utilisées avant 2002. Nous considérons néanmoins que ces deux options sont quasiment équivalentes pour un objectif d'initialisation du modèle puisque dans les deux cas, il s'agit de données réellement observées.

Les modélisations hydrologiques pluie-débit sont évaluées en validation sur l'échantillon de 181 bassins versants pour quatre périodes de mise en route différentes : 1, 3, 10 et 20 ans. Nous précisons que les paramètres du modèle sont recalés pour chaque test. La Figure 18 présente la comparaison des performances obtenues sur chaque bassin et pour chaque période d'évaluation en validation : il y a deux périodes d'évaluation par bassin, soit 362 points de comparaison.



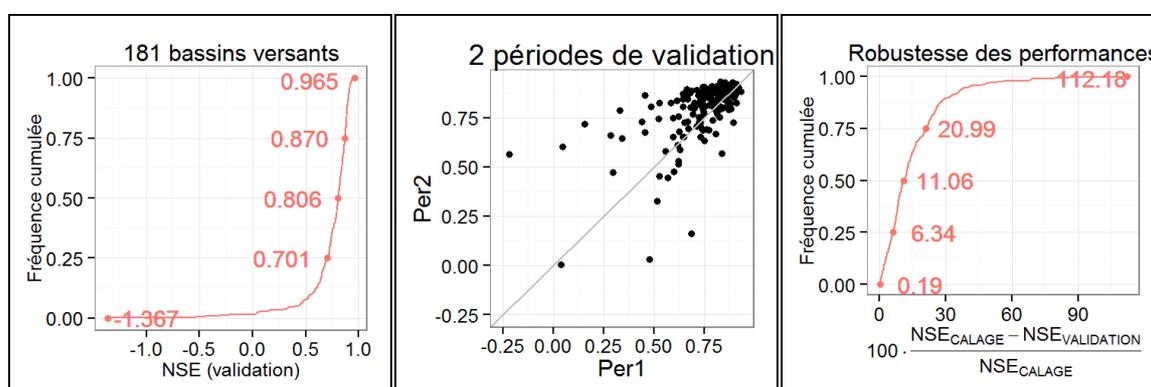
**Figure 18** : Comparaison des performances obtenues en validation sur 181 bassins versants entre 1 et 3 ans de mise en route (gauche) ; 3 et 10 ans de mise en route (milieu) ; 10 et 20 ans de mise en route (droite). Les performances moyennes sur l'échantillon sont indiquées entre crochet sur chaque axe.

Une période de préchauffage de 1 an est trop courte puisqu'elle engendre de fortes dégradations des performances sur plusieurs bassins versants de notre échantillon tandis qu'une période de préchauffage de 10 ans est suffisante pour l'ensemble des bassins de notre échantillon (Figure 18). On remarque qu'une période de 3 ans est convenable pour initialiser 172 bassins : seuls 8 bassins affichent une dégradation des performances du modèle par rapport à une période de préchauffage de 10 ans (Figure 18). Il s'agit des bassins dominés par l'activité souterraine de la nappe0, notamment les rivières Essonne, Thérain, Epte, Aubette et Iton, dont le débit de base est très important (BFI > 0.83).

Afin d'économiser les temps de calculs, nous choisissons de fixer une période d'initialisation de 3 ans sauf pour les 8 bassins fortement alimentés par la nappe pour lesquels la durée de préchauffage sera spécifiquement fixée à 10 ans. De cette manière, nous sommes sûrs que l'initialisation du modèle pluie-débit GR5 n'a pas d'impact sur les simulations de débit de notre échantillon de 181 bassins versants.

#### 4.3.1.2 Performance du modèle global en validation

Nous évaluons en validation les performances du modèle global initialisé avec la méthode décrite ci-dessus sur notre échantillon de 181 bassins versants. La Figure 19 présente la distribution des performances en validation, la comparaison des performances pour les deux périodes de simulation et la différence des performances entre ces deux périodes.

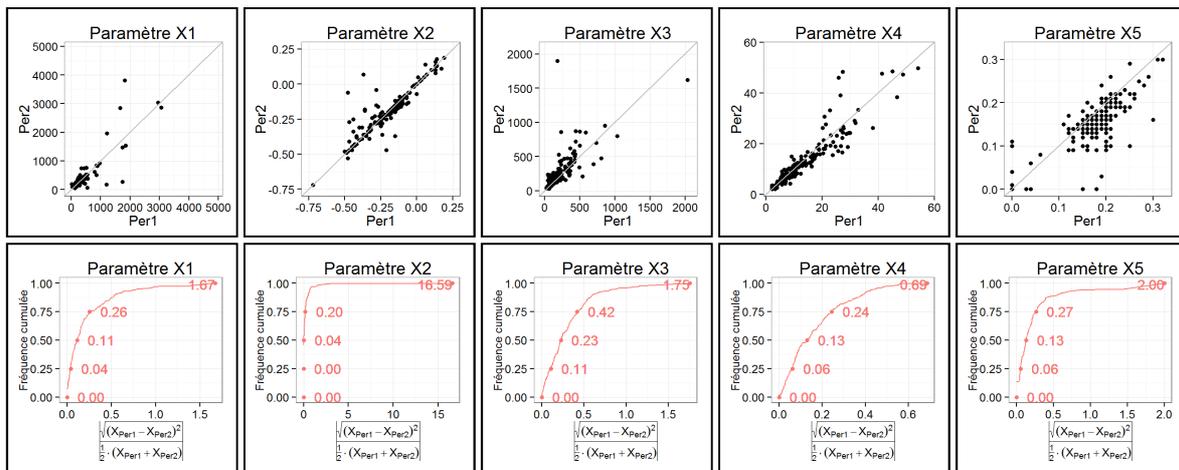


**Figure 19 : Performance en validation du modèle global GR5H sur 181 bassins : (gauche) distribution du critère NSE calculé en validation sur les deux périodes de simulation; (milieu) comparaison du critère NSE entre la période 1 (Per1 : 1997-2001) et la période 2 (Per2 : 2002-2006) ; (droite) distribution des chutes de performance du critère NSE entre le calage et la validation sur les deux périodes d'évaluation.**

Les performances du modèle global GR5H sont satisfaisantes sur notre échantillon de 181 bassins versants en termes de précision et robustesse : le critère NSE est supérieur à 0.70 pour 75% des bassins avec une médiane de 0.806 et les performances sont peu dégradées en validation avec une chute moyenne de 15% sur l'échantillon (Figure 19). Pour quelques bassins, les performances sont meilleures sur la période 2 : ce sont des bassins sur lesquels le contraste climatique est très fort entre nos deux périodes de test (1997-2001 est plus humide que la période 2002-2006 qui est plus sèche). Toutefois, pour la plupart des bassins, les performances sont assez stables d'une période à l'autre. Ceci montre que le modèle est capable de simuler les débits à l'exutoire des bassins versants sur une période qui n'a pas servi à son optimisation.

### 4.3.1.3 Robustesse des jeux de paramètres

Nous présentons l'évolution des paramètres entre les deux périodes indépendantes (1997-2001 et 2002-2006) sur lesquelles ils ont été optimisés par rapport au débit observé à l'exutoire des 181 bassins versants (Figure 20). Pour la plupart des bassins de notre échantillon, les paramètres optimisés du modèle sont semblables entre les deux périodes, bien qu'ils ne convergent pas exactement vers les mêmes valeurs (Figure 20). Le paramètre le plus stable du modèle GR5H est le temps de base de l'hydrogramme unitaire (paramètre  $X_4$ ) (Figure 20). Ce résultat s'explique en partie par le rôle de ce paramètre dans la synchronisation des pointes de crues simulées avec les observées, le critère de calage étant sensible au décalage des pointes.



**Figure 20 : Résultat de l'optimisation des cinq paramètres du modèle global GR5H sur 181 bassins versants : (haut) comparaison des paramètres optimisés sur la période 1 (Per1 : 1997-2001) et la période 2 (Per2 : 2002-2006) ; (bas) distribution des distances euclidiennes normalisées des paramètres entre chaque période.**

Certains bassins présentent des valeurs des paramètres optimisés très différentes entre les deux périodes (Figure 20). Ceci peut-être dû à une déficience de l'algorithme de calage qui a été piégé par un extremum local, à une structure de modèle inadaptée au fonctionnement du bassin (Fencia et al. 2011) et/ou à des conditions climatiques très contrastées entre les deux périodes (Coron et al. 2012). Il est difficile d'identifier les causes exactes des instabilités des paramètres puisque plusieurs processus peuvent interagir. C'est d'une certaine façon la rançon du succès des modèles conceptuels, dont les paramètres ne peuvent être déduits uniquement des propriétés physiques du bassin versant et doivent être optimisés par rapport aux données d'observation (Sivapalan 2003).

Même si la robustesse d'un modèle hydrologique conceptuel en termes de stabilité de ses jeux de paramètres est difficile à évaluer, nos tests montrent que les paramètres sont relativement stables entre les deux périodes d'optimisation (Figure 20). Nous considérons (très subjectivement) que la structure du modèle global GR5H est assez robuste pour être appliquée à notre échantillon de 181 bassins.

### 4.3.2 Peut-on identifier à partir des caractéristiques des bassins versants les cas où le modèle hydrologique est performant ?

Nous avons choisi d'utiliser le même modèle hydrologique pluie-débit pour l'ensemble de l'échantillon de bassins versants afin d'étudier l'impact de la variabilité spatiale sur la simulation des débits. Certains bassins pourraient peut-être tirer profit d'une structure spécifique "sur mesure" (Kavetski and Fenicia 2011) parce qu'« *un modèle ne peut pas contenter tous les paradigmes* » (Fenicia et al. 2011). Nous assumons les limites de notre approche basée sur une structure unique de modèle appliquée à un grand nombre de bassins versants variés. Il est donc important de bien comprendre le fonctionnement du modèle pluie-débit utilisé et son domaine d'application avant d'en analyser les résultats.

#### 4.3.2.1 Evaluation du modèle global GR5H en fonction des caractéristiques des bassins

Les performances du modèle hydrologique global GR5H sont analysées en fonction des descripteurs morphologiques et hydro-climatiques des bassins versants. Il s'agit de mettre en évidence les descripteurs de bassins qui pourraient permettre d'expliquer l'aptitude (ou l'incapacité) du modèle hydrologique à reproduire les débits à l'exutoire des bassins. Il convient de tester le modèle sur un assez grand nombre de cas pour obtenir des conclusions générales. C'est pourquoi nous choisissons de travailler avec l'échantillon étendu de 989 bassins établi au Chapitre 3. Une modélisation pluie-débit est effectuée sur chaque bassin versant, en calage-et validation sur les deux périodes de 5 ans. Les performances du modèle sont évaluées avec le critère  $C_{2M}$  parce qu'il est borné entre -1 et 1, ce qui facilite la comparaison des distributions de performance (Figure 21).

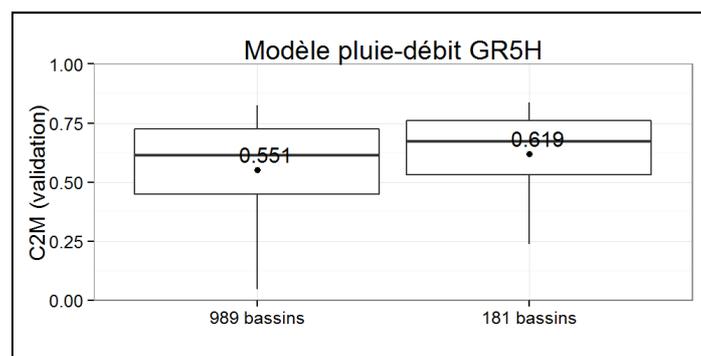


Figure 21 : Distribution des performances du modèle global GR5H sur les échantillons de 989 et 181 bassins versants.

Les performances du modèle pluie-débit sont meilleures sur le sous-ensemble de 181 bassins versants par rapport à l'échantillon étendu de 989 bassins versants (Figure 21). Nous allons voir si ceci peut être dû aux faibles performances obtenues sur les bassins de montagne (absents dans l'échantillon de 181 bassins) qui nécessitent un traitement particulier des précipitations solides dans la modélisation pluie-débit (Figure 23), alors que nous n'avons pas utilisé de module neige ici. Notons que le critère  $C_{2M}$  moyen sur l'ensemble des 989 bassins vaut  $C_{2M}=0.551$  (Figure 21).

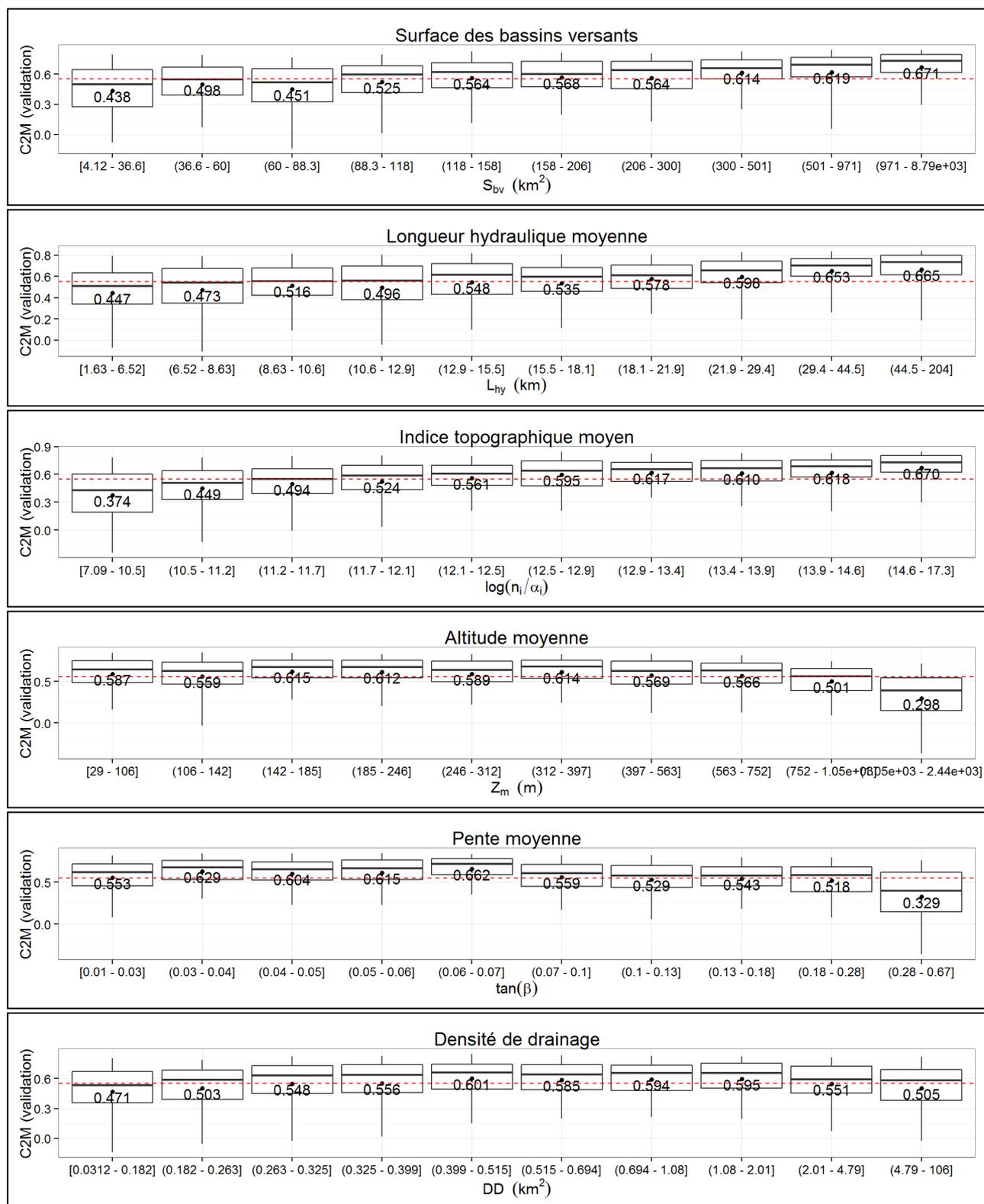
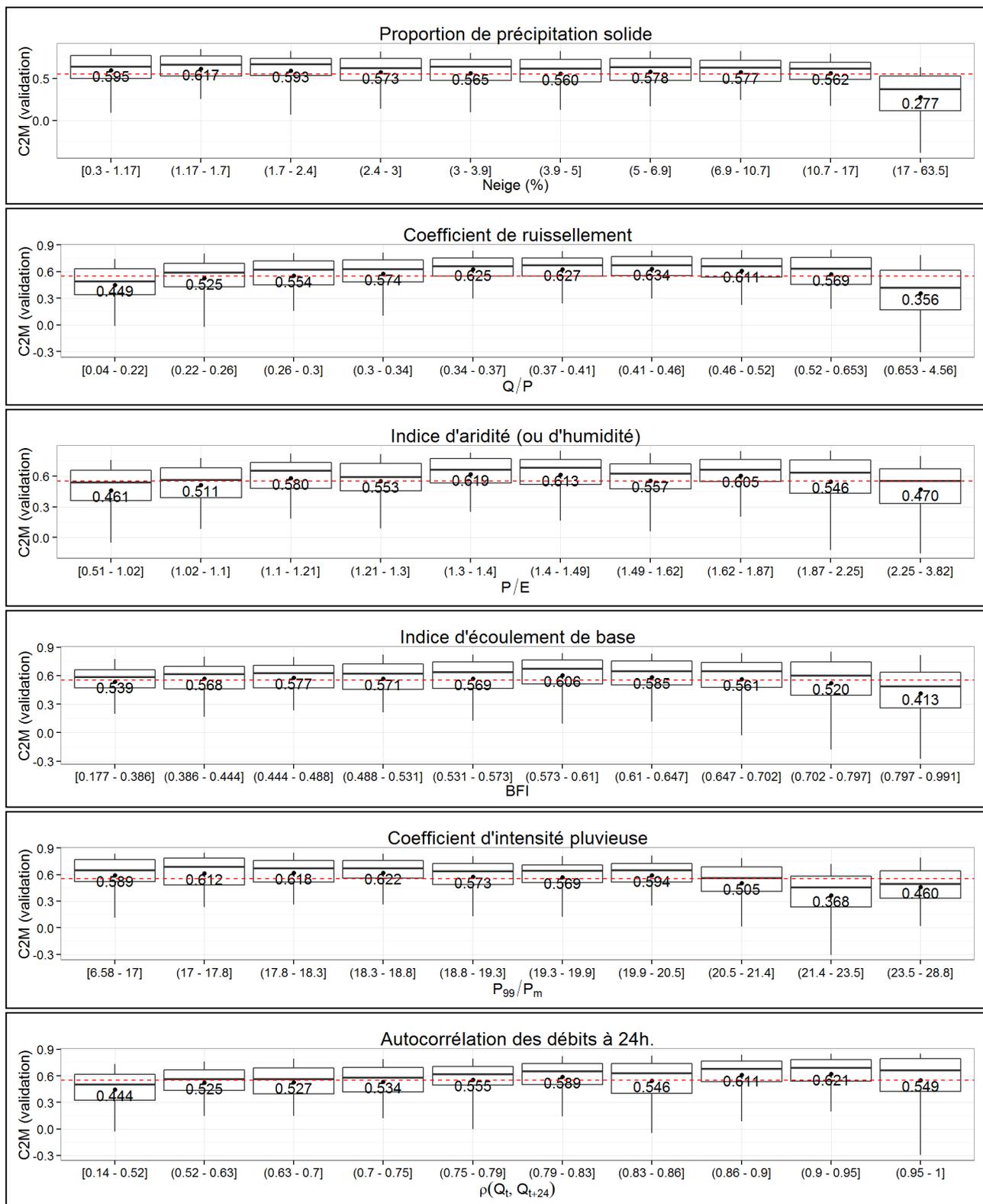


Figure 22 : Performance du modèle pluie-débit GR5H sur l'échantillon de 989 bassins en fonction des caractéristiques morphologiques des bassins. La distribution des performances est présentée pour dix groupes de bassins (contenant le même nombre de bassins) classés selon le descripteur considéré. La ligne pointillée rouge indique les performances moyennes sur l'échantillon entier de 989 bassins versants ( $C_{2M}=0.551$ ).



**Figure 23 : Performance du modèle pluie-débit GR5H sur l'échantillon de 989 bassins en fonction des caractéristiques hydro-climatiques des bassins. La distribution des performances est présentée pour dix groupes de bassins (contenant le même nombre de bassins) classés selon le descripteur considéré. La ligne pointillée rouge indique les performances moyennes sur l'échantillon entier de 989 bassins versants ( $C_{2M}=0.551$ ).**

Les performances du modèle GR5H obtenues en validation sur l'échantillon de 989 bassins sont présentées pour dix groupes de bassins, contenant le même nombre de bassins (avec 98 ou 99 bassins par groupe), classés selon leurs caractéristiques morphologiques (Figure 22) et hydro-climatiques (Figure 23). Nous rappelons que les caractéristiques des bassins utilisées ici ont été présentées au Chapitre 3 et les proportions des précipitations solides (Figure 23) sont issues de la base de donnée journalière SAFRAN. En comparant les performances obtenues pour les différents groupes de bassins, nous sommes capables d'identifier les bassins versants qui sont plus ou moins bien modélisés par le modèle global GR5H (Figure 22 et Figure 23) :

- Les performances du modèle global GR5H augmentent avec la taille des bassins versants en fonction de la **surface** ou de la **longueur hydraulique** (Figure 22). Ceci peut-être la conséquence du lissage des variabilités spatio-temporelles du signal d'entrée par le bassin, et de l'interaction entre les processus hydrologiques qui se compensent sur les grandes surfaces. De ce fait, le modèle global, qui ne représente pas explicitement les variabilités spatiales et qui intègre les processus hydrologiques à l'échelle du bassin, reproduit mieux les débits à l'exutoire des bassins versants de grande taille. Des résultats similaires ont été reportés par Merz et al. (2009) sur une base de 269 autrichiens avec le modèle HBV.
- Nous rappelons que l'**indice topographique** est corrélé à la surface des bassins versants par construction : l'augmentation des performances du modèle global GR5H avec l'indice topographique (Figure 22) reflète l'impact de l'échelle de modélisation sur la simulation des débits à l'exutoire des bassins versants, déjà mis en évidence par la surface ou la longueur hydraulique du bassin (Figure 22).
- Nous n'avons pas cherché à adapter le modèle pluie-débit GR5H aux bassins où l'influence des **précipitations solides** est importante. En effet, les performances du modèle chutent brutalement lorsque les précipitations solides excèdent 17% des précipitations totales (Figure 23). Ce résultat n'est pas surprenant puisque le cas spécifique des précipitations solides nécessite un traitement particulier (voir par exemple Valéry 2010) qui n'est pas pris en compte dans le modèle hydrologique pluie-débit utilisé.
- Notons que les bassins dont la réponse est fortement influencée par la neige (i.e. précipitations solides) sont des bassins de montagne situés en **altitude** où les **pentés** des versants sont importantes. Ces bassins d'altitude présentent des **indices d'humidité élevés** (induits par d'importants cumuls de précipitation avec des évapotranspirations faibles, dus aux gradients altitudinaux), ainsi que des **coefficients de ruissellement importants** et une **forte densité de drainage** (i.e. une faible surface des zones sources) parce que l'écoulement est favorisé par les fortes pentes. Ainsi, la présence des bassins montagneux dans les groupes de bassins de plus haute altitude ( $Z_m > 1050$  m), de plus forte pente ( $\tan(\beta) > 0.28$ ), de plus petite zone source ( $DD < 0.18$  km<sup>2</sup>) (Figure 22), ainsi que pour les groupes de bassins dont

les coefficients de ruissellement et indice d'humidité sont les plus élevés (respectivement  $Q/P > 0.65$  et  $P/E > 2.25$ ) (Figure 23) explique la dégradation des performances du modèle GR5H pour ces groupes de bassins.

- Le modèle pluie-débit GR5H est moins performant pour simuler les débits à l'exutoire des bassins versants dont l'**écoulement de base** est important (BFI élevé) : le critère  $C_{2M}$  moyen chute de 10 points pour les bassins dont le BFI est supérieur à 0.797 ( $C_{2M}=0.413$  en moyenne) par rapport aux autres groupes de bassins ( $C_{2M} > 0.520$  en moyenne) (Figure 23). Par ailleurs, ce constat explique la diminution des performances du modèle pluie-débit GR5H observée pour le groupe de bassins avec une **faible densité de drainage** ( $DD > 4.79 \text{ km}^2$ ) (Figure 22) : une grande surface des zones sources indique une forte contribution des eaux souterraines à l'écoulement qui se traduit généralement par un fort débit de base à l'exutoire des bassins (et un BFI élevé).
- De même, un **coefficient de ruissellement faible** (Figure 23) désigne un bassin dont le débit de base est important, ou à l'inverse, il s'agit d'un bassin intermittent (le débit est nul la majorité du temps). Ceci explique la diminution des performances du modèle observée sur ce groupe de bassins ( $Q/P < 0.22$  et  $C_{2M}=0.449$ ) parce qu'il est plus difficile pour le modèle GR5H de simuler un débit de base important ou un débit majoritairement nul.
- Les performances du modèle GR5H chutent pour les groupes de bassins dont les **coefficients d'intensité pluvieuse** sont les plus importants ( $P_{99}/P_m > 21.4$ ) (Figure 23). Il s'agit des bassins situés autour des régions méditerranéennes et cévenoles exposées à des orages convectifs à forte variabilité spatiale. Ce résultat est lié à la diminution des performances du modèle GR5H sur les groupes de bassins de **faible indice d'humidité** ( $P/E < 1.02$  et  $C_{2M}=0.461$ ) : les températures des bassins méditerranéens sont élevées, ce qui entraîne une évapotranspiration importante et un faible indice d'humidité.
- Les performances du modèle GR5H augmentent sensiblement avec l'**autocorrélation de débit à 24 h** mais la tendance n'est pas très claire. C'est parce qu'il y a une compétition entre les bassins de grande taille (qui affichent de bonnes performances) et les bassins dont le débit de base est important (qui est difficilement simulé par le modèle GR5H). En effet, l'autocorrélation des débits est à la fois liée à la taille du bassin et au BFI. Les bassins « rapides » (faible autocorrélation des débits) sont généralement des bassins de petite taille (où les précipitations sont moins bien estimées), ce qui explique la diminution des performances pour ce groupe de bassin ( $\rho(Q_t, Q_{t+24}) < 0.52$  et  $C_{2M}=0.444$ ) (Figure 23). A l'inverse, les bassins avec un débit de base important (qui résulte de l'activité lente des écoulements souterrains) et les bassins de grande taille ont des réponses plus lissées, ce qui entraîne une forte autocorrélation des débits.

#### 4.3.2.2 Relations empiriques entre les paramètres et les descripteurs des bassins versants

Un des inconvénients des modèles conceptuels est la nécessité d'optimiser des paramètres du modèle (Sivapalan et al. 2003) parce que les relations entre caractéristiques physiques des bassins et paramètres du modèle ne sont pas connues. Dans cette partie, nous recherchons d'éventuelles relations entre les paramètres du modèle hydrologique global GR5H et les descripteurs morphologiques des bassins versants.

Ce type de relation a fait l'objet de nombreuses recherches dans le but d'obtenir des estimations *a priori* des valeurs des paramètres, sans avoir recours au processus de calage, pour des applications sur les bassins non-jaugés (Seibert 1999; Merz and Blöschl 2004; Parajka et al. 2005; Kling and Gupta 2009; Oudin et al. 2010; Ali et al. 2012) mais aussi pour spatialiser les paramètres des modèles distribués (Koren et al. 2000, 2003; Hundecha and Bárdossy 2004; Göttinger and Bárdossy 2007; Braud et al. 2010; Samaniego et al. 2010). Certains auteurs réussissent à déterminer des relations fiables sans trop dégrader les performances par rapport au modèle conceptuel optimisé (Seibert 1999; Moreda et al. 2006) mais de nombreux autres auteurs indiquent que les relations entre paramètres et caractéristiques physiques des bassins sont faibles et dégradent fortement la qualité des simulations de débit (Koren et al. 2003; Hundecha and Bárdossy 2004; Oudin et al. 2006a) :

- Hundecha and Bárdossy (2004) conseillent de faire l'hypothèse d'une relation *a priori* entre paramètres et caractéristiques du bassin avant l'optimisation du modèle, parce qu'il n'est pas possible de déterminer des relations à partir des méthodes de régression à cause de l'équifinalité des jeux de paramètres.
- Sivapalan et al. (2003) indiquent que le jeu de paramètres est indissociable, la corrélation des paramètres au sein du jeu est essentielle au modèle, et explorer simplement des relations entre un paramètre du modèle et un descripteur du bassin peut mener à de fortes diminutions des performances du modèle.
- D'autres auteurs soulignent que l'un des obstacles à la définition de ce type de relation réside dans la différence d'échelle entre l'unité de modélisation (le bassin versant) et l'échelle de mesure des caractéristiques physiques, généralement ponctuelle (Andersen et al. 2001; Hernandez et al. 2000; Merz et al. 2009).
- Certains travaux ont comparé différentes méthodes de régionalisation par rapport aux performances du modèle optimisé. Les résultats montrent que les relations basées sur la proximité géographique des bassins sont généralement meilleures que celles basées sur les caractéristiques physiques des bassins (Kokkonen et al. 2003; Merz and Blöschl 2004; Oudin et al. 2008)

En se basant sur les résultats de ces différents travaux, nous avons recherché des **relations a priori** entre les paramètres du modèle pluie-débit GR5H et les descripteurs des bassins. Le détail de la méthode employée et les résultats sont présentés en annexe 4.

Au final, il est difficile de mettre en évidence un lien entre les paramètres optimisés du modèle et les descripteurs des bassins. Toutefois, une relation empirique satisfaisante est obtenue entre le temps de base de l'hydrogramme unitaire (paramètre  $X_4$ ) et la taille des bassins versants :

$$\frac{X_4}{X_4^*} = \left( \frac{S_{bv}}{S_{bv}^*} \right)^{0.32}$$

avec  $X$  et  $X^*$  les paramètres du bassin de surface  $S_{bv}$  et celui de son voisin de surface  $S_{bv}^*$  (cf. annexe).

#### 4.4 Synthèse

Le modèle pluie-débit global GR5H a été testé sur une grande diversité de bassins. Les performances du modèle ont été évaluées en termes de qualité des simulations de débit par rapport au débit observé à l'exutoire des bassins. L'analyse des performances du modèle en fonction des caractéristiques morphologiques et hydro-climatiques des bassins versants a permis de mettre en évidence les domaines d'application du modèle GR5H pour la simulation des débits.

En conclusion, nous retiendrons que la qualité des simulations de débit est sensible à l'échelle de modélisation (taille des bassins) et à l'intensité des précipitations ( $P_{99}/P_m$ ). De plus, le modèle pluie-débit est peut-être mal adapté pour simuler les débits à l'exutoire des bassins de nappe dont le débit de base est important. Enfin, la version sur laquelle nous avons travaillé ne comporte pas de module neige, elle n'est donc pas adaptée aux bassins montagneux où l'influence des précipitations solides n'est pas négligeable. Toutefois, le modèle global GR5H est performant et robuste pour la simulation des débits sur notre échantillon test de 181 bassins, pour lesquels les précipitations solides ont un impact négligeable sur les débits.

Dans le cadre de notre recherche, nous choisissons donc d'utiliser le modèle global GR5H comme modèle de référence avec l'échantillon de 181 bassins versants. Notons que nous choisissons délibérément d'utiliser une structure de modèle unique sur notre échantillon de bassins. Or, cette structure n'est pas adaptée à l'ensemble des bassins versants (Kavetski and Fenicia 2011). Néanmoins, il est difficile de déterminer une structure de modèle *a priori* à partir de la connaissance des caractéristiques morphologiques et/ou climatiques d'un bassin versant (van Esse et al. 2013). Aussi, par soucis d'objectivité, nous choisissons de conserver les bassins qui présentent de mauvaises performances avec le modèle global GR5H, et qui sont potentiellement améliorables par la spatialisation du modèle (cf. Chapitre 6).



