Modélisation hydrologique semi-distribuée

5.1 Introduction

Afin d'étudier l'impact de la spatialisation des précipitations sur la simulation des débits, nous souhaitons utiliser une modélisation (semi-)distribuée. En effet, comme nous l'avons discuté dans le premier chapitre, l'une des caractéristiques des modèles distribués est leur aptitude à prendre en compte explicitement la variabilité spatiale des précipitations (Beven 1985; Obled et al. 1994), qui ne peut être représentée qu'implicitement avec une modélisation globale (Bourqui 2008).

Les premières notions d'un modèle distribué ont été formulées par Freeze et Harlan (1969) en se basant sur la physique des processus hydrologiques. Depuis, une multitude de modèles distribués ont été développés, à partir d'approches à base physique ou conceptuelles, avec des structures très différentes et souvent très complexes qui nécessitent différents types de données (Kampf and Burges 2007). Malheureusement, en pratique (lorsque ces modèles distribués doivent être appliqués sur des bassins sur lesquels ils n'ont pas été développés), les données nécessaires ne sont pas toujours disponibles, ce qui entraîne des difficultés pour l'utilisation du modèle distribué et peut significativement affecter la précision des simulations. De plus, lorsque la connaissance des processus hydrologiques qui agissent sur chaque bassin est insuffisante, le choix du modèle à employer pour les représenter peut s'avérer encore plus difficile (Refsgaard 2000).

Dans le cadre de cette thèse, notre approche fondée sur un grand échantillon de bassins versants très variés nous conduit à adopter une structure conceptuelle prenant en compte explicitement l'espace, à partir d'un modèle connu dont nous comprenons bien le fonctionnement et les limites : le modèle pluie-débit global GR5. Il s'agit de construire une version semi-distribuée à partir de la structure globale de ce dernier. Or, la distribution du modèle global n'est pas triviale puisque plusieurs choix sont possibles pour distribuer les processus hydrologiques représentés dans le modèle pluie-débit GR5.

Dans ce chapitre, nous testons différentes versions semi-distribuées du modèle global GR5. Nous passons brièvement en revue les modèles semi-distribués de la littérature développés à partir d'une structure globale avant de détailler les stratégies de spatialisation du modèle GR5. Le modèle semi-distribué est ensuite évalué en comparant les débits simulés par rapport aux débits observés à l'exutoire et sur des points intérieurs des bassins, pour différents degrés de spatialisation et différents forçages des précipitations. A l'aide de ces tests, nous analysons séparément les erreurs induites par la structure semi-distribuée du modèle et les améliorations apportées par la spatialisation des précipitations. De cette manière, nous cherchons à valider et déterminer la meilleure structure semi-distribuée du modèle GR5 pour la simulation des débits.

5.2 Vers une version semi-distribuée du modèle pluie-débit global GR5

5.2.1 Spatialisation d'un modèle pluie-débit global

5.2.1.1 Structure des modèles distribués

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux modèles hydrologiques distribués fondés sur une approche conceptuelle. Il s'agit des modèles pluie-débit semi-distribués ou « distribués intégralement » selon le terme introduit par Clarke (1973). Dans ce cas, le modèle pluie-débit semi-distribué est défini comme un réseau de modèles conceptuels globaux interconnectés par un modèle de propagation hydraulique : le bassin versant est divisé en un ensemble d'entités, la transformation pluie-débit est calculée sur chaque élément du bassin par une modélisation globale, puis les débits sont propagés en aval jusqu'à l'exutoire du bassin.

L'abondante littérature sur ce sujet révèle une multitude de modèles semi-distribués qui présentent des structures très différentes. Elles se différencient selon la stratégie de discrétisation du bassin versant (sous-bassin, maille carré régulière, classe, HRU …), l'approche conceptuelle employée pour reproduire la transformation pluie-débit sur chaque maille du bassin (méthode SCS, modèles conceptuels globaux), la méthode de routage pour transférer les débits en aval jusqu'à l'exutoire du bassin (hydrogramme unitaire, modèles hydrodynamiques …) et le paramétrage du modèle (spatialisé ou uniforme). Quelques exemples sont donnés en annexe 5.

- Naden (1992) divise le bassin versant du Thames (7000 km²) selon l'organisation du réseau hydrographique caractérisé par rapport à l'éloignement à l'exutoire du bassin. La réponse du bassin versant à l'exutoire est calculée par un double produit de convolution entre la pluie nette, la réponse des versants et la réponse du réseau hydrographique. La réponse des versants est calculée par un hydrogramme unitaire et la réponse du réseau hydrographique est calculée pour chaque classe du réseau hydrographique (définie selon la distance à l'exutoire) en pondérant la fonction de routage (solution analytique d'advection-diffusion pour un canal rectangulaire sans apports latéraux) par un coefficient qui dépend des caractéristiques du sol et du nombre de cours d'eau. Le paramétrage est uniforme sur le bassin et la variabilité spatiale des précipitations est explicitement prise en compte dans le calcul de la réponse du réseau hydrographique.
- Olivera et Maidment (1999) proposent une méthode très simple pour router l'excès des précipitations (calculé par la méthode SCS) spatialisés sur les pixels du MNT. Ils définissent un hydrogramme unitaire distribué sur chaque pixel en fonction de la distance à l'exutoire pour propager les débits de maille en maille et calculer la fonction de réponse à travers le plan de drainage. Les réponses de chaque pixel sont ensuite sommées pour calculer l'hydrogramme à l'exutoire du bassin. Cependant, ils indiquent qu'il est difficile de distribuer

les paramètres de routage parce qu'ils dépendent d'un trop grand nombre de variables pour définir une relation consistante avec les descripteurs des bassins.

- Dans la version semi-distribuée du modèle global SAC-SMA (SACramento Soil Moisture Accounting) développé par Koren et al. (2004), le bassin est discrétisé en mailles carrées régulières de 16 km². Chaque maille est ensuite re-divisée selon la densité de drainage en un ensemble de tronçons (ou versants conceptuels), de taille équivalente, qui génère un débit d'apport à la rivière principale de la maille. La réponse pluie-débit de chaque versant conceptuel est calculée par le modèle global SAC-SMA. L'approximation de l'onde cinématique est ensuite utilisée pour router la réponse des versants sur la maille et de maille à maille jusqu'à l'exutoire du bassin. Les précipitations et les paramètres du modèle sont distribués sur les mailles (16 km²) mais ils sont identiques entre les versants conceptuels d'une même maille. Afin de prendre en compte la variabilité spatiale des caractéristiques du bassin, les paramètres sont d'abord *a priori* estimés à partir de relations empiriques avec les caractéristiques topologiques du bassin (Koren et al. 2000) avant d'être calés par rapport au débit observé à l'exutoire. Les premiers tests du modèle montrent que la précision des simulations distribuées de débit est comparable à celle du modèle global.
- Le modèle HYPE correspond à la version semi-distribuée du modèle conceptuel global HBV (Lindström et al. 2010). Le bassin versant est divisé en sous-bassins connectés par le réseau hydrographique : les rivières (et lacs) principales, qui relient les sous-bassins, reçoivent les débits propagés de l'amont et la réponse pluie-débit des versants du sous-bassin. Sur chaque sous-bassin, un ensemble de classes est défini à partir des données spatialisées d'occupation du sol, de la végétation et de l'altitude. Dans chaque classe, le sol est divisé verticalement en une ou plusieurs couches superposées. Les précipitations sont distribuées sur les sous-bassins et les paramètres sont distribués sur les classes. Le routage sur les versants et la propagation dans les rivières sont effectués par un « Lag and Route » : les débits sont propagés par un décalage temporel (déterminé par la célérité et la longueur des tronçons) et atténués à travers un réservoir linéaire.
- Moussa et al. (2007) construisent le modèle semi-distribué ModSpa pour les bassins méditerranéens montagneux. Ils divisent le bassin en sous-bassins définis à partir du réseau hydrographique : ils correspondent aux sous-bassins amont ou aux sous-bassins des rives gauches et droites des cours d'eau. L'écoulement généré sur chaque sous-bassin est la somme du ruissellement, de l'écoulement sous-terrain des aquifères et de l'écoulement de base calculés par un modèle pluie-débit conceptuel. La réponse pluie-débit des sous-bassins amont et des rives sont respectivement transférés en aval (jusqu'à l'exutoire du bassin) en tant qu'apport ponctuel et latéral par la solution analytique d'Hayami (1951) au problème de l'onde diffusante avec apports latéraux (Moussa 1996). Les paramètres du schéma de

routage (coefficients de célérité et diffusivité) sont distribués en fonction de la pente et distinguent la célérité des versants de la célérité des cours d'eau.

- De nombreux auteurs ont développé une version semi-distribuée du modèle global TOPMODEL (Beven and Kirkby 1979) sur des bassins versants français :
  - Obled et al. (1994) divisent le bassin méditerranéen du Réal Collobrier (71 km²) en vingt unités hydrologiques qu'ils définissent en fonction de la topographie et des bandes isochrones. Les données de précipitation sont distribuées sur les unités hydrologiques du bassin mais les paramètres du modèle sont uniformes sur le bassin.
  - Le Lay et Saulnier (2007) divisent trois bassins cévenols en sous-bassins de 50 km². Ils utilisent une fonction de transfert géomorphologique pour router la réponse pluie-débit de chaque maille et estimer le débit en n'importe quel point du réseau hydrographique. Les temps de transfert sont calculés à partir des distances hydrauliques entre chaque pixel, la vitesse de propagation dans les rivières et la vitesse d'écoulement sur les versants. Ils augmentent peu à peu le niveau de spatialisation des précipitations et des paramètres du modèle : ils observent que la spatialisation des précipitations améliore la précision des simulations de débit tandis que la distribution des paramètres du modèle a un impact moins important.
  - Sur les bassins des Cévennes, Saulnier et Le Lay (2009) simplifient le schéma de routage par un simple décalage temporel qui ne tient pas compte de la diffusion hydraulique dans les cours d'eau et de la relation entre célérité moyenne et hauteur d'eau. Ils indiquent que la vitesse d'écoulement des versants est arbitrairement fixée au dixième de la vitesse d'écoulement dans les rivières pour limiter l'équifinalité induite par la redondance de ces paramètres de transfert.
  - Sur le bassin des Gardons, Bonnifait et al. (2009) utilisent un schéma de routage plus complexe : il s'agit d'un modèle hydrodynamique 1D qui résout numériquement les équations de Barré Saint-Venant pour la propagation dans le réseau hydrographique. Ils observent que la vitesse d'écoulement sur les versants n'est pas un paramètre sensible dû à la petite taille des versants.

Ces exemples sont loin d'être exhaustifs puisqu'il existe autant de modèles semi-distribués que de modèles conceptuels globaux. Par exemple, il existe plusieurs modèles semi-distribués basés sur la méthode SCS (Krajewski et al. 1991; Seliga et al. 1991; Michaud and Sorooshian 1994b; Arnold et al. 1998; Olivera and Maidment 1999; Tramblay et al. 2011). De nombreux autres modèles semi-distribués sont recensés dans les revues de Grayson et Blöschl (2000), Singh et Woolhiser (2002), Kampf et Burges (2007) et les travaux de comparaison de modèles distribués (expérimentations DMIP) menés par Reed et al. (2004) et Smith et al. (2012) au National Weather Service (Etats-Unis).

5.2.1.2 Objectifs de la modélisation distribuée

Les modèles distribués sont non seulement très utiles pour étudier l'impact de la variabilité spatiale des précipitations sur la réponse des bassins versants (Obled et al. 1994), mais permettent aussi d'accéder à des simulations de débit à l'intérieur du bassin où les observations de débit ne sont pas disponibles (Koren et al. 2004; Pechlivanidis et al. 2010).

Il existe, comme nous l'avons vu, de nombreuses méthodes de modélisation pour distribuer les processus hydrologiques à l'échelle des bassins versants. Néanmoins, il est important d'adapter la complexité de la modélisation aux objectifs fixés afin de développer un modèle applicable à des cas réels (Grayson and Blöschl 2000). Dans ce sens, Singh et Woolhiser (2002) conseillent d'utiliser un modèle semi-distribué dont la structure est la plus simple possible. Refsgaard (2000) recommande de définir la structure semi-distribuée en fonction de la disponibilité des données spatialisées et souligne l'importance de valider le modèle avec des données qui n'ont pas été utilisées pour son élaboration, par un protocole de validation temporelle (Klemeš 1986) et spatiale (évaluation des simulations à l'intérieur du bassin versant).

Nous rappelons ci-dessous les contraintes afférentes au développement d'un modèle distribué dans le cadre de cette thèse :

(i) Le modèle doit être capable de prendre en compte la variabilité spatiale des données d'entrée de précipitation ;
(ii) La structure du modèle doit être la plus simple possible pour être facilement utilisable sur notre échantillon de bassins versants et limiter les problèmes de paramétrage dus à l'équifinalité (Beven 1996) ;
(iii) La cohérence spatiale de la structure semi-distribuée doit être vérifiée en termes de précision des simulations de débit à l'intérieur du bassin ;
(iv) Les performances du modèle semi-distribué ne doivent pas être dégradées par rapport au modèle global GR5 qui est considéré par la suite comme le modèle de référence.

5.2.1.3 Comment spatialiser le modèle global GR5 ?

Lorsque la modélisation est semi-distribuée, le bassin versant est constitué d'un ensemble de plusieurs entités (ou mailles). La représentation globale du bassin est un cas particulier de la représentation semi-distribuée : il n'y a qu'une seule maille.

La spatialisation du modèle global GR5 consiste à déterminer la stratégie de discrétisation du bassin versant, la transformation pluie-débit et le modèle hydraulique de propagation (modèle débit-débit) pour router les débits calculés sur chaque maille vers l'exutoire du bassin :

- Le modèle global GR5 calcule la transformation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Nous choisissons donc de discrétiser le bassin versant en un ensemble de sous-bassins.
- Dans la littérature, de nombreuses études ont comparé des modèles hydrauliques de propagation simplifiés avec un modèle hydrodynamique complet (cf. annexe 5) :
    - Bentura et Michel (1997) ont comparé avec succès les modèles « Lag-and-Route » linéaires et quadratiques avec une résolution numérique implicite du modèle de Saint-Venant dans une grande diversité de configurations.
    - Butts et al. (2004) ont montré que le modèle de Muskingum était équivalent à une résolution complète du système de Saint-Venant sur la Blue River.
    - Moussa (1996, 1997) et Lerat (2009) ont montré que la solution d'Hayami était aussi performante qu'un modèle hydrodynamique complet sur un grand nombre d'applications réelles.
    - La méthode grossière du délai pur a aussi permis d'obtenir des simulations pluie-débit semi-distribuées tout à fait satisfaisantes (Lindström et al. 1997; Pechlivanidis et al. 2010; Saulnier and Le Lay 2009; Lerat et al. 2012a).

  Ces études suggèrent que le bénéfice d'un modèle hydrodynamique complet n'est pas déterminant pour un modèle hydrologique semi-distribué. L'utilisation d'un modèle hydraulique de propagation simple nous paraît donc justifiée.
- Nous choisissons de calculer la réponse pluie-débit des sous-bassins à partir du modèle global pluie-débit GR5.

Dans ses travaux de thèse, Lerat (2009) a développé une modèle semi-distribué à partir du modèle global pluie-débit GR4 et a proposé de simplifier la structure semi-distribuée afin de limiter la redondance du routage entre le modèle hydrologique (pluie-débit) et le modèle hydraulique de propagation (débit-débit). De même, nous testerons différentes configurations du modèle pluie-débit GR5 en cherchant le meilleur compromis entre simplicité de la structure semi-distribuée, robustesse et précision des simulations de débit à l'exutoire et sur les points intérieurs du bassin versant.

5.2.2 Présentation des structures semi-distribuées testées

Il est important de rappeler que le modèle global GR5 ne prétend pas représenter explicitement au sein de sa structure le fonctionnement du sol, du compartiment souterrain ou des nappes. Il s'agit d'une structure qui doit être perçue dans sa globalité, et de ce fait, la distribution du modèle GR5 global est un exercice qui ne peut se concevoir que par essai-erreur. La principale difficulté est de déterminer les fonctions du modèle qui doivent être spatialisées : plusieurs choix sont possibles pour distribuer les processus hydrologiques du modèle global GR5.

La Figure 24 présente quatre structures semi-distribuées testées qui ont été établies à partir de la structure globale du modèle GR5, en augmentant petit à petit la complexité du modèle. Nous détaillons ci-dessous les caractéristiques et les différences de chaque version.

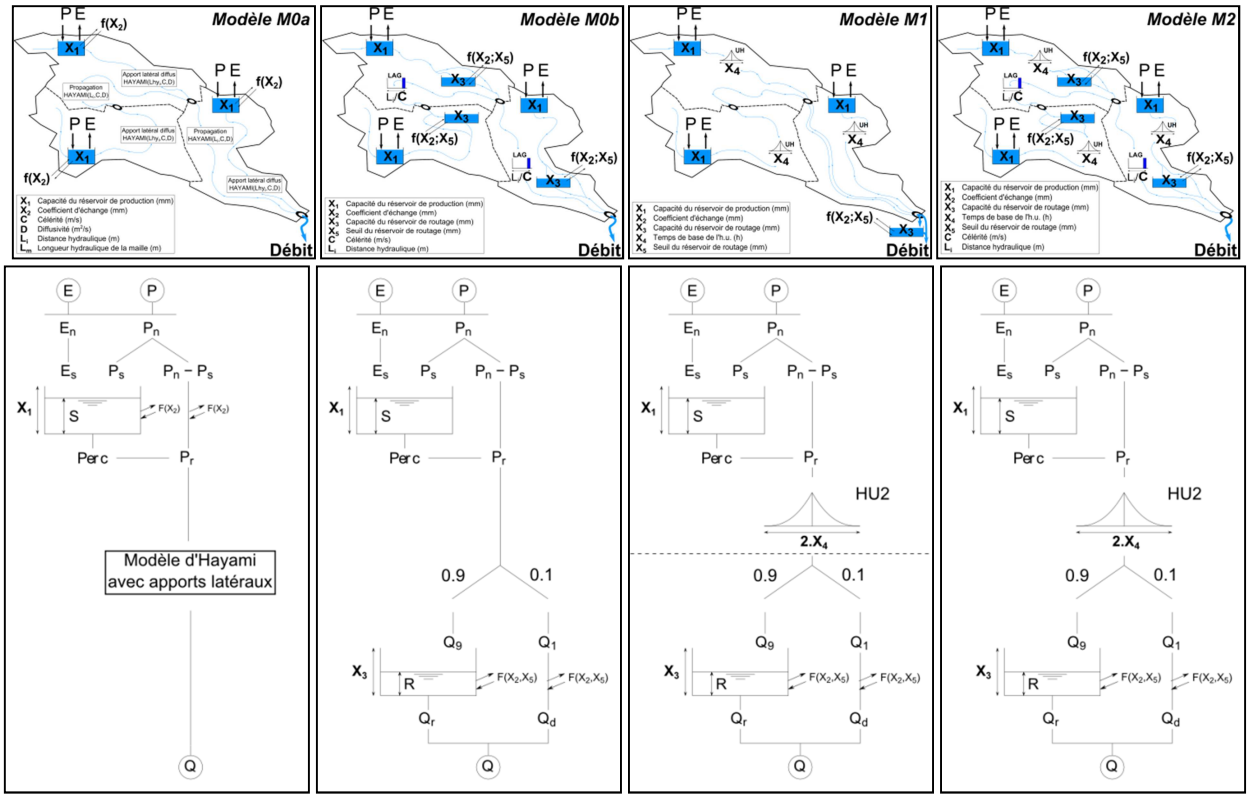

Figure 24 : Les quatre versions (M0a, M0b, M1 et M2) semi-distribuées testées pour la spatialisation du modèle pluie-débit global GR5 : (haut) illustration sur un bassin discrétisé en trois sous-bassin ; (bas) modèle pluie-débit appliqué sur chaque sous-bassin.

Paramètres	$M0_a$	$M0_b$	M1	M2
Capacité du réservoir de production X_1 (mm)	X_1	X_1	X_1	X_1
Coefficient d'échange X_2 (.)	X_2	X_2	X_2	X_2
Capacité du réservoir de routage X_3 (mm)	-	X_3	X_3	X_3
Temps de base de l'hydrogramme unitaire X_4 (h.)	-	-	X_4	X_4
Seuil dans le réservoir de routage X_5 (.)	-	-	X_5	X_5
Célérité C ($m.s^{-1}$)	C	C	-	C
Diffusivité D ($m^2.s^{-1}$)	D	-	-	-

Tableau 7 : Liste des paramètres des quatre modèles hydrologiques semi-distribués testés (M0a, M0b, M1 et M2) .

5.2.2.1 Modèle semi-distribué M0a

Dans cette première version, la structure du modèle global GR5 est drastiquement simplifiée. Seule la **fonction de production** est conservée : le module de routage (hydrogramme unitaire et réservoir du routage) est supprimé et remplacé par la **solution analytique d'Hayami** de l'onde diffusante avec apports latéraux (Moussa 1996) comportant deux paramètres (célérité et diffusivité). Le routage sur les versants (transformation pluie-débit) est distingué du routage dans les cours d'eau (propagation débit-débit) :

- Dans un premier temps, sur chaque sous-bassin, la pluie efficace est calculée en réponse aux données de précipitation et d'évapotranspiration (résultat de la vidange du réservoir de production et du ruissellement). Puis, elle est transférée par le modèle d'Hayami vers l'exutoire du sous-bassin en tant qu'apport latéral réparti uniformément sur la longueur hydraulique moyenne du sous-bassin.
- Dans un second temps, le débit obtenu à l'exutoire des sous-bassins est propagé vers les exutoires des mailles en aval en suivant le réseau de drainage : la longueur de propagation correspond à la distance hydraulique entre les exutoires des sous-bassins amont et aval.
- Notons que les échanges du bassin sont appliqués au réservoir de production (dimensionné par le paramètre X_1) parce que le réservoir de routage a été supprimé. Plusieurs fonctions d'échange ont été testées (cf. annexe 6) et **celle représentant une fraction constante de la pluie efficace** (paramétrée par un coefficient multiplicatif X_2) a été retenue.
- Le modèle semi-distribué M0a nécessite l'estimation de **quatre paramètres** (Tableau 7).

L'avantage de cette configuration semi-distribuée réside dans sa simplicité structurelle avec une fonction de routage basée sur une version simplifiée de la physique des écoulements hydrodynamiques (cf. annexe 5). Cependant, il conviendra de vérifier que la suppression du réservoir de routage ne dégrade pas les performances par rapport au modèle global GR5 de référence. De plus, Lerat (2009) a montré sur une base de 50 rivières françaises que le paramètre de diffusivité n'est pas un paramètre sensible et qu'il peut être fixé à $D = 0$ m²/s sans dégrader les performances du modèle semi-distribué. Ces résultats sous-entendent que la diffusivité n'est pas nécessaire et que le modèle M0a pourrait être encore simplifié.

5.2.2.2 Modèle semi-distribué M0b

La structure du modèle global GR5 est simplifiée en supprimant l'hydrogramme unitaire dans le module de routage. En contrepartie, un modèle de propagation est ajouté après le processus de routage (qui est réduit au réservoir de routage et à la branche directe) :

- Sur chaque sous-bassin, la transformation pluie-débit est assurée par le **réservoir de production** et le **réservoir de routage** avec des **échanges identiques au modèle global GR5**.

- Les contributions de chaque sous-bassin sont ensuite propagées vers l'aval à travers le réseau de drainage par un simple **décalage temporel**. Le temps de propagation est calculé en fonction du paramètre de célérité et de la longueur du bief qui correspond à la somme de la longueur hydraulique moyenne de la maille et de la distance hydraulique entre les exutoires amont et aval.
- Le modèle semi-distribué M0b nécessite l'estimation de **5 paramètres** (Tableau 7).

Par rapport au modèle M0a, le modèle semi-distribué M0b a l'avantage de conserver le réservoir de routage du modèle global GR5 de référence avec un schéma de routage très simple (décalage temporel dimensionné par un seul paramètre) qui ne représente pas les mécanismes de diffusion hydraulique dans les cours d'eau.

5.2.2.3 Modèle semi-distribuée M1

La **structure complète du modèle global GR5** est conservée et appliquée au cas semi-distribué. Dans ce cas, le réservoir de production et l'hydrogramme unitaire sont distribués sur les sous-bassins tandis que le réservoir de routage et les échanges sont globaux : il n'y a qu'un seul réservoir de routage et une seule fonction d'échange pour l'ensemble du bassin versant.

- Sur chaque sous-bassin, la pluie efficace est calculée en réponse aux données de précipitation et d'évapotranspiration (résultat de la vidange du réservoir de production et du ruissellement) avant d'être transférée via l'hydrogramme unitaire jusqu'à l'exutoire du bassin. Le temps de base de l'hydrogramme unitaire est distribué sur les sous-bassins en fonction de l'éloignement à l'exutoire du bassin :

$$x_{4_i} = \left(\frac{L_i}{L_m}\right)^{0.5} . X_4 \qquad \textbf{Eq. 25}$$

  avec x_{4i} le paramètre de l'hydrogramme unitaire qui contrôle le temps de transfert de la réponse pluie-débit sur le sous-bassin i, L_i la somme de la longueur hydraulique moyenne du sous-bassin et de la distance entre les exutoires, L_m la longueur hydraulique moyenne du bassin versant et X_4 le paramètre calé sur le bassin versant. Cette relation a été définie empiriquement au chapitre 4.
- Les productions de chaque sous-bassin contribuent au même réservoir de routage à l'exutoire du bassin. Notons qu'une partie alimente le réservoir de routage tandis que l'autre partie contribue directement au débit à l'exutoire (séparation fixe 90% / 10%).
- Le modèle semi-distribué M1 nécessite l'estimation de **5 paramètres** (Tableau 7).

Notons que cette structure a été pensée pour les besoins de l'assimilation en mode prévision (cf. chapitre 8). En effet, le modèle global de prévision GRP assimile le débit observé à l'exutoire du

bassin par correction du niveau du réservoir de routage. Si la structure semi-distribuée M1 s'avère performante en simulation, l'application de ce modèle en prévision est directe puisqu'un unique réservoir de routage commun à tous les sous-bassins facilite la mise à jour du modèle semi-distribué avec l'assimilation des débits observés à l'exutoire.

Le modèle semi-distribué M1 a l'avantage de conserver la structure du modèle global GR5 de référence sans augmenter sa complexité par l'utilisation d'un module hydraulique de propagation. Néanmoins, cette structure semi-distribuée ne permet pas – en principe – de calculer un débit en un point intérieur du bassin versant. En effet, le réservoir de routage, qui est global au bassin versant et alimenté par l'ensemble des productions des mailles amont, est indispensable pour assurer la transformation complète pluie-débit. Ceci-dit, afin de comparer les simulations aux observations sur des points intérieurs des bassins, un réservoir de routage et une fonction d'échange seront ajoutés à l'exutoire de chaque sous-bassin où l'on souhaite simuler un débit, et ils seront paramétrés par des valeurs identiques à celles déterminées à l'exutoire du bassin versant.

5.2.2.4 Modèle semi-distribué M2

Il s'agit d'un **ensemble de modèles globaux GR5 reliés par un modèle de propagation** :

- La structure du modèle global GR5 est conservée et appliquée à chaque sous-bassin du modèle semi-distribué. La transformation pluie-débit est donc calculée par une simulation globale GR5 appliquée à l'échelle du sous-bassin. Le temps de base de l'hydrogramme unitaire (paramètre X4) est distribué sur les sous-bassins par la relation suivante :

$$x_{4_i} = \left(\frac{S_i}{S_{bv}}\right)^{0.3} . X_4 \qquad \textbf{Eq. 26}$$

  avec x_{4i} le paramètre de l'hydrogramme unitaire qui contrôle le temps de transfert de la réponse pluie-débit sur le sous-bassin *i*, S_i la surface du sous-bassin *i*, S_{bv} la surface totale du bassin versant et X4 le paramètre calé sur le bassin versant. Cette relation a été définie empiriquement au chapitre 4.
- Le débit calculé à l'exutoire de chaque sous-bassin est ensuite propagé vers les exutoires des sous-bassins en aval par un simple décalage temporel déterminé en fonction de la distance hydraulique entre les exutoires des sous-bassins et le paramètre de célérité.
- Le modèle semi-distribué M2 nécessite l'estimation de **6 paramètres** (Tableau 7).

Le modèle semi-distribué M2 présente l'avantage de conserver une transformation pluie-débit GR5 complète sur chaque sous-bassin. Cependant, l'ajout d'un modèle de propagation hydraulique entraîne une redondance des paramètres de routage (Lerat 2009; Saulnier and Le Lay 2009) : le para-

mètre X4 qui dimensionne le routage sur les versants entre en interaction avec le paramètre de célérité qui dimensionne le routage dans les cours d'eau.

Afin de limiter les problèmes d'équifinalité entre les deux paramètres de routage, nous choisissons de fixer l'un des deux. Dans la configuration semi-distribuée, le paramètre X4 est fixé à la valeur déterminée pour la configuration globale (qui ne bénéficie pas du module hydraulique de propagation). De cette manière, le routage sur les versants est déterminé auparavant selon le rapport de surface et seule la célérité doit être estimée par optimisation. L'impact de ce paramétrage particulier a été analysé (cf. annexe 7) : il améliore la robustesse du modèle semi-distribué M2 sans dégrader ses performances.

5.2.3 Paramétrage des modèles semi-distribués

5.2.3.1 Comment paramétrer un modèle pluie-débit semi-distribué ?

Le modèle semi-distribué nécessite une estimation de ses paramètres sur chaque élément de discrétisation du bassin versant. L'estimation des paramètres du modèle peut être effectuée par optimisation par rapport à des données d'observation (généralement le débit) ou à partir de relations établies avec les descripteurs (caractéristiques physiques, morphologiques ou climatiques) des bassins versants.

Le calage d'un modèle distribué est une tâche complexe (Carpenter and Georgakakos 2006; Pechlivanidis et al. 2010; Pokhrel and Gupta 2011) parce que le nombre d'inconnues est trop important par rapport aux données d'observation disponibles, ce qui mène à des problèmes de surparamétrage, d'équifinalité et non-identification des jeux de paramètres (Beven 1996, 2001b, 1993; Kirchner 2006; Götzinger and Bárdossy 2007). Pokhrel et Gupta (2011) soutiennent que le calage des jeux de paramètres spatialisés sur les mailles du bassin versant est impossible parce que les erreurs induites par la structure du modèle et les données utilisées sont plus importantes que l'impact de la variabilité spatiale.

Une alternative fréquente au problème d'optimisation consiste à utiliser les méthodes de régionalisation : des relations entre les descripteurs des bassins versants et les des paramètres des modèles sont établies et un nombre limité de paramètres « globaux » (définis pour l'ensemble du bassin) est optimisé (Bandaragoda et al. 2004; Pokhrel and Gupta 2010; Koren et al. 2003; Moreda et al. 2006; Zhang et al. 2012; Koren et al. 2000; Hundecha and Bárdossy 2004; Samaniego et al. 2010; Pokhrel et al. 2008).

Cependant, ces relations sont toujours définies *a priori* (Götzinger and Bárdossy 2007), ce qui peut dégrader significativement les performances des modèles régionalisés (Sivapalan et al. 2003). Par ailleurs, elles sont généralement de qualité limitée (Hundecha et al. 2008; Ali et al. 2012; Oudin et

al. 2006a; Parajka et al. 2005), notamment parce que les paramètres optimisés peuvent varier dans l'espace sans aucune explication physique du fait des incertitudes induites par l'interaction des paramètres ou aux erreurs de mesure des données d'observation (Koren et al. 2003; Kling and Gupta 2009; Hundecha and Bárdossy 2004). La pertinence limitée des descripteurs disponibles pour expliquer les paramètres des modèles peut également expliquer la faiblesse des relations de regionalisation mises au point.

Enfin, bien que des paramètres spatialement uniformes ne permettent pas de représenter l'hétérogénéité des bassins, de nombreux travaux ont montré que l'amélioration des performances des modèles liée à la prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations est bien plus importante que celle obtenue par la distribution des paramètres (Boyle et al. 2001; Ajami et al. 2004; Andréassian et al. 2004a; Le Lay and Saulnier 2007). Par ailleurs, d'autres études sur les stratégies de calage des modèles distribués ont montré qu'un jeu de paramètre identique sur les mailles améliore la robustesse du modèle sans dégrader les simulations par rapport à un calage de paramètres distribués (Boyle *et al.*, 2001, Ajami *et al.*, 2004, Khakbaz *et al.*, 2012, Lerat *et al.*, 2012).

Pour toutes ces raisons, nous pensons que la variabilité spatiale des précipitations a un impact plus important que la spatialisation des paramètres du modèle. Comme nous l'avons vu au chapitre 4, il est difficile d'établir des relations entre les descripteurs du bassin et les paramètres du modèle pluie-débit GR5 (cf. annexe 4) du fait de sa parcimonie et de l'approche conceptuelle. En effet, chaque paramètre du modèle conceptuel est potentiellement lié à plusieurs processus hydrologiques et il est difficile d'identifier leur influence pour estimer correctement des relations.

5.2.3.2 Paramétrage des modèles semi-distribués par optimisation

Nous rappelons que, dans le cas des structures M1 et M2, le paramètre de routage des sous-bassins (temps de base de l'hydrogramme unitaire) est distribué sur les sous-bassins par une relation empirique qui dépend de la taille des sous-bassins et d'un paramètre global X_4 à déterminer pour l'ensemble du bassin. De cette manière, la variabilité d'échelle entre les sous-bassins est prise en compte et le modèle semi-distribué peut être appliqué avec des tailles de sous-bassin différentes. Nous n'avons pas réussi à identifier de lois cohérentes pour les autres paramètres de notre modèle pluie-débit GR5 (cf. annexe 4). C'est pourquoi seul le temps de base de l'hydrogramme unitaire est distribué sur les sous-bassins, les autres paramètres sont uniformes sur le bassin versant.

Le jeu de paramètres est optimisé pour chaque bassin par rapport au débit observé à son exutoire. Dans les cas particuliers où des observations de débit supplémentaires sont disponibles à l'intérieur des bassins, différentes stratégies de calage seront testées (cf. 0).

5.2.3.3 Algorithme d'optimisation des paramètres des modèle semi-distribués

Un unique jeu de paramètres (entre 4 et 6 paramètres selon les structures testées) est optimisé par rapport au débit observé à l'exutoire des bassins versants pour chaque bassin versant et chaque structure semi-distribuée. Le jeu de paramètre est aussi re-calé pour chaque forçage des précipitations (uniforme ou distribué) et chaque maillage (cf. 5.3.1) pour s'affranchir des effets de compensation liés aux erreurs des données d'entrée et de la sensibilité des paramètres au problème d'échelle (Bárdossy and Das 2008; Samaniego et al. 2010; Kumar et al. 2013).

Nous utilisons la même procédure d'optimisation qui a été définie pour la modélisation globale (cf. Chapitre 4). Il s'agit d'une méthode « pas-à-pas » développée par Michel (1989) avec le pré-filtrage des paramètres proposé par Mathevet (2005). Nous utilisons ici le critère de Kling-Gupta (KGE) (Gupta et al. 2009) comme fonction objectif.

En ce qui concerne le pré-filtrage des paramètres, la distribution des paramètres du modèle semi-distribué n'est pas connue. Dans ce cas, ils sont initialisés par le jeu de paramètres déterminé pour la configuration globale avant d'être calés par l'algorithme de calage « pas-à-pas ». Ces points de départ sont tout à fait acceptables puisque plusieurs études ont montré que les jeux de paramètres d'un modèle semi-distribué sont proches des paramètres d'un modèle global lorsque le paramétrage est uniforme sur le bassin (Andréassian et al. 2004a; Lerat et al. 2012a).

Les paramètres supplémentaires du modèle semi-distribué (dont nous ne connaissons pas la distribution) sont quant à eux préfiltrés sur neuf valeurs déterminées *a priori*. Par exemple, la célérité dans le cas des structures semi-distribuées M0b et M2 est préfiltrée sur la distribution suivante : 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 2.00, 3.00, 6.00 (en m/s). De cette manière, nous sommes certains de bien explorer l'espace des paramètres dans le cas des modèles semi-distribués.

5.3 Validation du modèle semi-distribué

5.3.1 Méthodologie

5.3.1.1 Bassins versants avec points intérieurs jaugés

Une validation approfondie du modèle semi-distribué nécessite de vérifier la cohérence spatiale du modèle par l'évaluation des simulations de débit obtenues à l'intérieur du bassin (Refsgaard 2000). Les différentes versions semi-distribuées sont donc évaluées sur les bassins versants pour lesquels des observations de débit sont disponibles à l'intérieur du bassin.

Parmi notre échantillon test (cf. Chapitre 3), 45 bassins versants ont au moins deux stations de jaugeage (1 station exutoire et 1 station à l'intérieur du bassin). Il y a 91 stations de jaugeage dont 45 stations qui mesurent le débit à l'exutoire des bassins versants et 86 stations qui permettent d'obtenir une observation du débit à l'intérieur des bassins versants (Figure 25) : 21 bassins versants contiennent une seule station de jaugeage à l'intérieur du bassin, 17 bassins versants contiennent 2 stations de jaugeage intérieures, 3 bassins versants contiennent 3 stations de jaugeage intérieures et 4 bassins versants contiennent respectivement 4, 5, 6 et 7 stations de jaugeage intérieures.

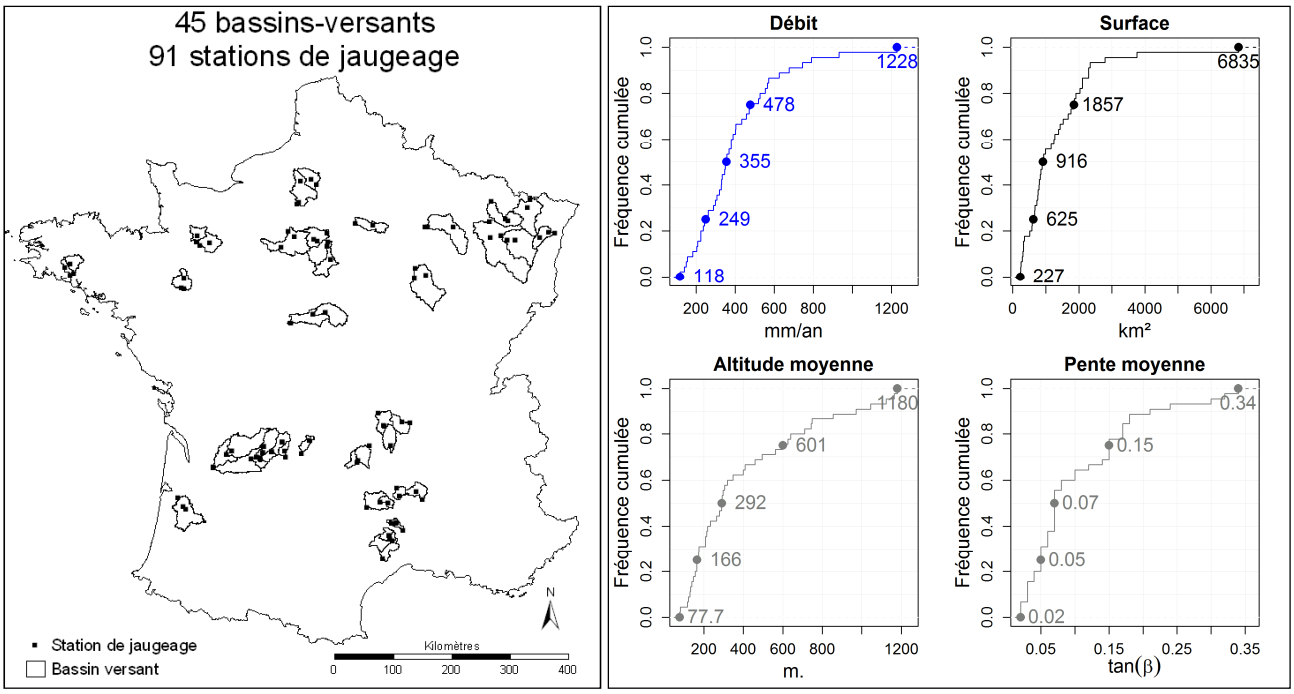

Figure 25 : Base de 45 bassins versants avec au moins une station de jaugeage à l'intérieur du bassin (gauche) et la distribution de leurs caractéristiques morphologiques et hydrométriques à l'exutoire (droite).

Les 45 bassins versants présentent une bonne diversité climatique et géomorphologique et sont bien répartis sur le territoire métropolitain français (Figure 25). Leur superficie varie entre 227 et 6835 km², avec une valeur médiane de 916 km². Le module médian sur l'échantillon est de 10 m^3/s avec un module maximum de 114 m^3/s pour le bassin de la Moselle à Custines (6835 km²). La pente moyenne est supérieure à 1.15° (soit 0,02 %) et l'influence de la neige est considérée comme négligeable puisque la majorité des bassins présente une altitude moyenne inférieure à 1000 m.

5.3.1.2 Maillage des bassins versants

Le maillage du bassin versant désigne la division du bassin versant en sous-bassins. Les bassins versants sont maillés selon les directions d'écoulement (O'Callaghan and Mark 1984). Au final, ces mailles « suivent les écoulements » et correspondent à des sous-bassins (Figure 26). De cette manière, il est possible d'accéder au débit simulé en n'importe quel point intérieur du bassin versant à condition qu'il s'agisse d'un exutoire de maille. Nous étudions deux configurations :

(i) Modélisation globale
(ii) Modélisation semi-distribuée

Plusieurs maillages sont possibles. Dans ce chapitre, nous étudions quatre maillages différents (Figure 26) :

- **Global** : Il s'agit de la représentation globale du bassin versant, il n'y a qu'une seule maille. Les précipitations sont uniformes sur le bassin et il n'est pas possible d'accéder aux simulations de débit aux points intérieurs du bassin.

- **Maillage A** : Seuls les sous-bassins jaugés sont considérés. Une maille correspond à un sous-bassin amont ou intermédiaire dont les débits sont mesurés à son exutoire. Dans ce cas, les mailles du modèle semi-distribué ont des tailles très différentes. Il y a autant de mailles que de stations de jaugeage comprises dans le bassin (entre 2 et 8 stations) et la taille des sous-bassins jaugés varie entre 61 km² et 1367 km² avec une valeur médiane de 377 km².

- **Maillage B** : Le bassin versant est divisé en un ensemble de sous-bassins de taille équivalente. La surface de la maille correspond à la surface du plus petit sous-bassin jaugé. Toutes les mailles ne disposent pas de stations de mesure mais la relation pluie-débit est modélisée à la même échelle puisque les sous-bassins sont de taille équivalente. Sur l'échantillon de 45 bassins versants, le nombre de mailles varie entre 3 et 34 (Figure 27) et leur taille varie entre 27 km² et 637 km² avec une valeur médiane de 118 km².

- **Maillage C** : Il s'agit d'un raffinement du Maillage B. Les mailles sont de taille équivalente et la taille de maille choisie correspond au quart de la surface du plus petit sous-bassin jaugé. Sur l'échantillon de 45 bassins versants, le nombre de mailles varie entre 6 et 135 (Figure 27) et leur taille varie entre 7 km² et 195 km² avec une valeur médiane de 37 km².

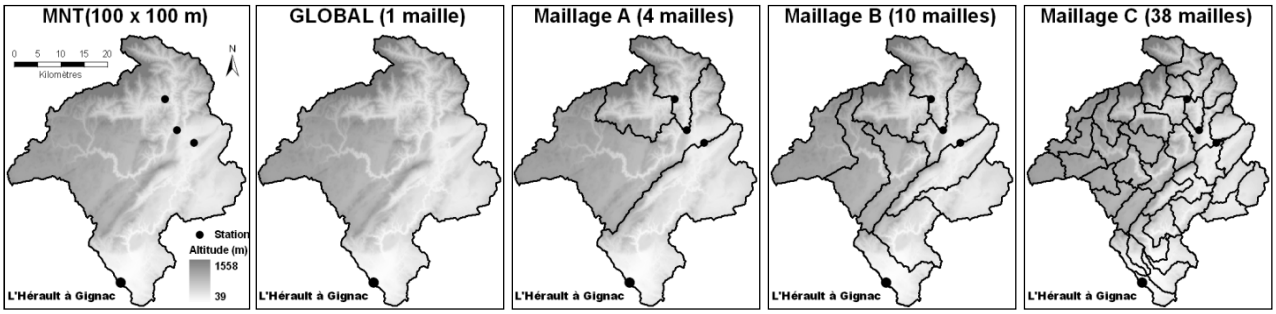

Figure 26 : Exemple de maillage sur le bassin versant de l'Héraut à Gignac (1430 km²)

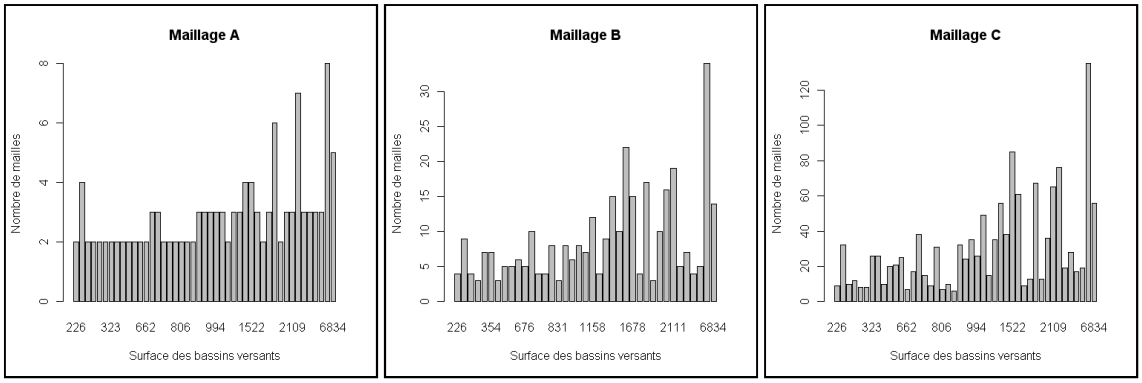

Figure 27 : Nombre de mailles pour chaque maillage des 45 bassins versants pour la modélisation semi-distribuée (échelle des ordonnées différentes sur les trois graphiques).

5.3.1.3 Forçage des précipitations

Il est important d'analyser séparément les erreurs liées à la structure du modèle hydrologique pluie-débit et celles liées à la spatialisation des précipitations. Les simulations semi-distribuées sont effectuées pour les deux configurations suivantes (Figure 28 et Figure 29) :

(i) **Les précipitations sont uniformes** : elles sont moyennées sur le bassin versant et sont identiques pour toutes les mailles des modèles semi-distribués. Dans ce cas, la variabilité spatiale des précipitations n'est pas prise en compte, le forçage des précipitations entre la représentation globale et semi-distribuée est identique (Figure 28).

(ii) **Les précipitations sont spatialisées** : elles sont moyennées indépendamment sur chaque maille du bassin versant. La variabilité spatiale des précipitations est prise en compte dans les modèles semi-distribués et les champs de précipitations sont d'autant mieux représentés que le nombre de mailles augmente (Figure 29).

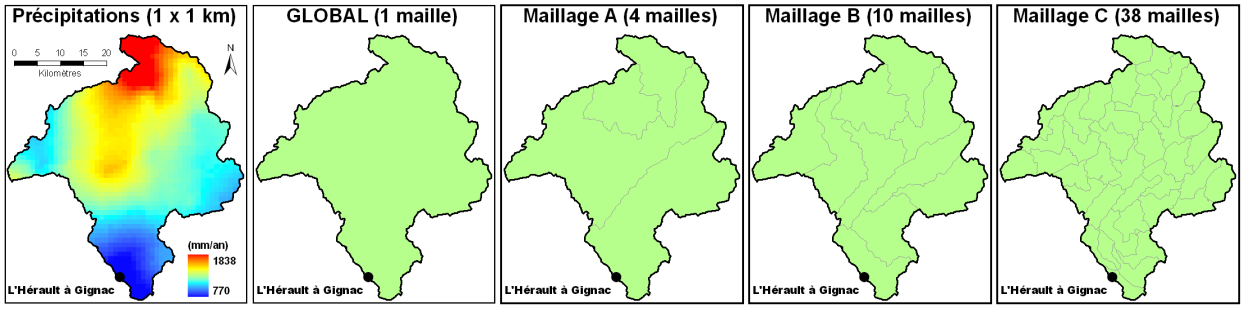

Figure 28 : Exemple du forçage uniforme des précipitations pour quatre maillages de l'Héraut à Gignac.

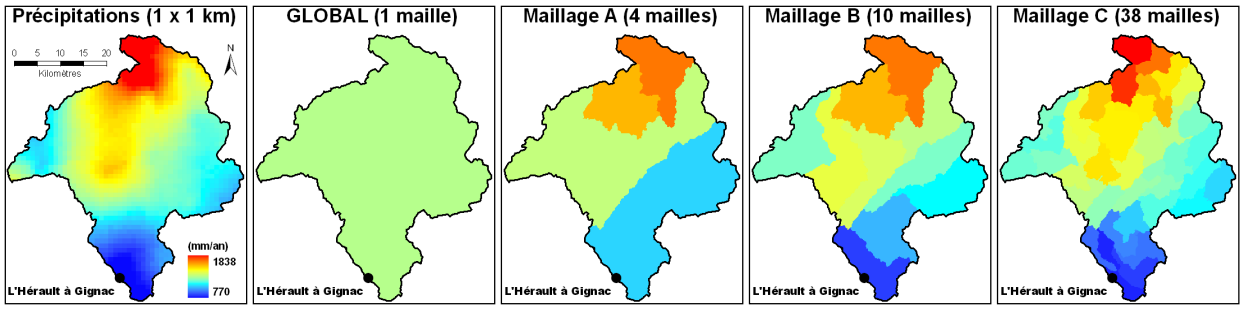

Figure 29 : Exemple du forçage distribué des précipitations pour quatre maillages de l'Héraut à Gignac.

En comparant les simulations obtenues avec les différents maillages, nous pouvons analyser la sensibilité du modèle au problème d'échelle (Koren et al. 1999; Merz et al. 2009) en termes de précision des simulations et de robustesse des paramètres. Par ailleurs, en appliquant différentes stratégies de forçage climatique sur les modèles globaux et semi-distribués, il est possible d'étudier l'impact de la variabilité spatiale des précipitations sur la simulation des débits.

5.3.2 Evaluation des modèles pluie-débit semi-distribuées

5.3.2.1 Performances des modèles semi-distribués

Les simulations semi-distribuées de débit sont évaluées pour chaque structure étudiée (M0a, M0b, M1, M2) par rapport au débit observé à l'exutoire et aux points intérieurs des bassins versants pour quatre maillages (GLOBAL, A, B, C) et chaque stratégie de forçage des précipitations (Figure 30).

Rappelons que le modèle pluie-débit global de référence GR5 correspond aux configurations globales (1 seule maille) des modèles M1 et M2 tandis que les configurations globales des modèles M0a et M0b sont différentes du modèle pluie-débit global de référence GR5 (cf. 5.2.2). Le critère C2M (cf. Chapitre 4) calculé sur les cinq années pour chacune des deux périodes de validation a été choisi parce qu'il est borné entre -1 et 1, ce qui permet de faciliter la lecture et la comparaison des distributions des performances.

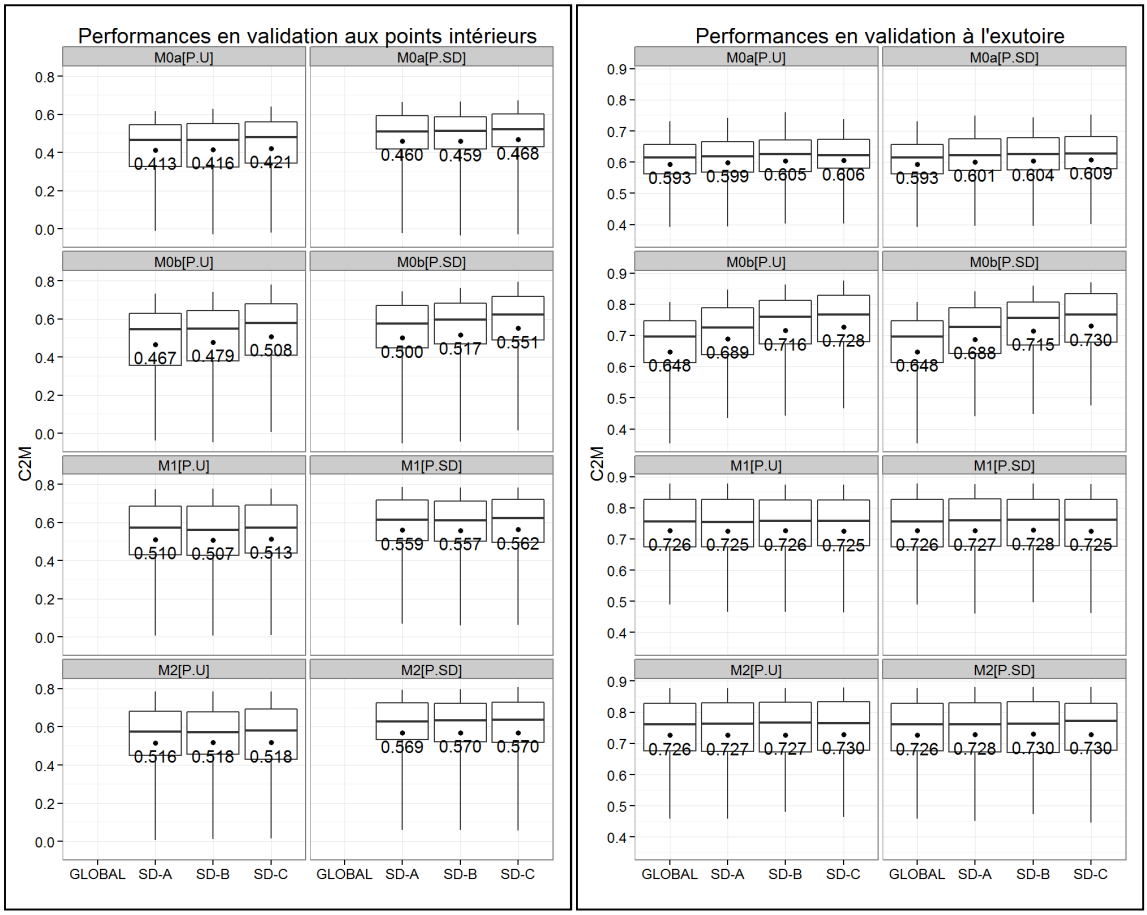

Figure 30 : Performances en validation des quatre modèles semi-distribués testés (M0a, M0b, M1, M2) obtenus sur 86 points intérieurs (gauche) et à l'exutoire de 45 bassins versants (droite) pour quatre maillages différents (GLOBAL, SD-A, SD-B, SD-C) avec un forçage des précipitations uniforme (P.U) et distribué sur les sous-bassins (P.D).

Dans un premier temps, nous analysons l'impact des simplifications effectuées sur la structure du modèle pluie-débit global GR5. Pour cela, nous comparons les performances obtenues entre les différents modèles avec un forçage des précipitations uniforme. Les précipitations sont identiques entre les sous-bassins, seule la structure varie entre les modèles (et les maillages), et les erreurs induites par les modifications et la spatialisation de la structure peuvent être quantifiées (Figure 30)

- Les meilleures performances sont obtenues avec les modèles semi-distribués M1 et M2 qui ont conservé la structure complète du modèle pluie-débit global de référence GR5 (Figure 30). De plus, nous constatons que leurs structures semi-distribuées sont stables par rapport à la spatialisation puisque les performances sont équivalentes (en moyenne C2M = 0.73 à l'exutoire et C2M = 0.51 aux points intérieurs) entre les différents maillages testés avec un forçage des précipitations identique sur chaque maille. Notons que les performances des configurations globales à l'exutoire des bassins sont strictement égales parce que, dans ce cas-là (1 seule maille), les modèles pluie-débit M1 et M2 sont parfaitement identiques : il s'agit du modèle global de référence GR5.

- Le modèle M0b présente un comportement surprenant : plus la structure du modèle est spatialisée, plus les scores calculés par le critère C2M augmentent. Or, les gains de performance observés ne peuvent pas être la conséquence de la spatialisation des précipitations puisqu'elles sont uniformes sur le bassin. La comparaison des modèle M0b et M2 permet d'expliquer ce résultat (cf. 5.2.2) :
    - La seule différence entre les modèle M0b et M2 correspond à la suppression de l'hydrogramme unitaire (qui traduit le temps de réponse des sous-bassins) dans la structure M0b.
    - Lorsque le maillage est suffisamment fin, les performances sont similaires entre le modèle M0b (C2M = 0.728 à l'exutoire et C2M = 0.508 sur les points intérieurs) et le modèle M2 (C2M = 0.730 à l'exutoire et C2M = 0.518 sur les points intérieurs).
    - Les performances du modèle semi-distribué M0b diminuent lorsque la résolution du modèle est trop grossière tandis qu'elles sont stables avec le modèle M2.

  En fait, lorsque le maillage des bassins augmente, la taille des sous-bassins diminue, le temps de réponse des sous-bassins diminue, le rôle de l'hydrogramme unitaire devient négligeable face à celui de la fonction de propagation et la structure du modèle M0b converge vers la structure du modèle M2. Ainsi, les améliorations du modèle M0b sont directement liées à la structure du modèle : la spatialisation des processus hydrologiques représentés dans le modèle M0b parvient à compenser les erreurs induites par les simplifications appliquées à la structure du modèle pluie-débit global de référence GR5.
- Les résultats obtenus avec le modèle M0a montrent que la suppression du réservoir de routage impacte lourdement la qualité des simulations de débit : les performances moyenne du modèle M0a sont significativement dégradées (C2M = 0.42 sur les points intérieurs et C2M = 0.60 à l'exutoire) par rapport à celles des autres modèles dans lesquels le réservoir de routage a été conservé. Notons que les mauvaises performances du modèle M0a peuvent aussi être induites par la fonction d'échange qui est appliquée à la production au lieu d'être appliquée au processus de routage.

Dans un second temps, la comparaison entre un forçage des précipitations uniforme et distribué, pour un même modèle, permet d'étudier l'impact de la variabilité spatiale des précipitations sur la simulation des débits (Figure 30) :

- Sur les points intérieurs, quel que soit le modèle utilisé, les simulations de débit sont fortement améliorées lorsque les précipitations sont distribuées sur les sous-bassins : le critère C2M augmente de 0.050 par rapport aux performances obtenues avec des précipitations uniformes sur le bassin versant (Figure 30). Ce résultat n'est pas surprenant et était attendu. Effectivement, le forçage des précipitations uniforme sur le bassin versant n'est pas trans-

posable aux sous-bassins intérieurs puisque les précipitations ont été moyennées sur la surface du bassin versant et non pas sur celle du sous-bassin. Le forçage des précipitations uniforme sur le bassin versant ne respecte pas le volume de précipitation réellement reçu par un sous-bassin, contrairement au forçage des précipitations distribué sur les sous-bassins.

- A l'exutoire des bassins versants, quel que soit le maillage et/ou le modèle utilisé, les différences entre un forçage des précipitations uniforme et distribué sont très faibles sur les performances des modèles :
    - A la plus fine résolution (SD-C), le critère C2M moyen augmente de 0.606 à 0.609 pour le modèle M0a et de 0.728 à 0.730 pour le modèle M0b.
    - Aux résolutions grossières (SD-A et SD-B), le critère C2M moyen augmente de 0.726 à 0.728 pour le modèle M1 et de 0.727 à 0.730 pour le modèle M2 tandis que les performances moyennes sont stables à la plus fine résolution (SD-C).

Enfin, nous remarquons que les performances des modèles semi-distribués obtenues sur les points intérieurs sont très faibles par rapport à celles obtenues à l'exutoire des bassins (Figure 30). Nous précisons qu'une comparaison entre des stations différentes (exutoires et points intérieurs) n'est scientifiquement pas rigoureuse, mais la différence est tellement importante (écart de 0.200 sur le critère C2M moyen quels que soient le modèle et le maillage) qu'elle mérite une explication. Ceci est la conséquence du paramétrage puisque les paramètres ont été optimisés par rapport au débit observé à l'exutoire des bassins versants, sans tenir compte des observations aux points intérieurs qui sont donc considérés comme non jaugés (Refsgaard 1997). Ce point sera étudié en détail par la suite, notamment en testant différentes stratégies d'optimisation des paramètres (cf. 0).

Ces premiers résultats confirment que les performances des modèles pluie-débit dépendent de leur structure et montrent que ceux-ci peuvent avoir des comportements « nuisibles » lorsqu'ils sont spatialisés. Le modèle M0a n'est pas satisfaisant au vu des faibles performances par rapport aux autres modèles. Le modèle M0b est un modèle performant dans une configuration semi-distribuée (avec un maillage suffisamment fin), mais il n'est pas adapté pour étudier l'impact de la résolution spatiale de la modélisation pluie-débit parce que sa structure est trop sensible à l'échelle de modélisation. Pour ces raisons, nous choisissons d'exclure les structures M0a et M0b et nous conservons uniquement les modèles M1 et M2 dans la suite de notre recherche.

5.3.2.2 Robustesse des modèles semi-distribués

Dans le chapitre 4, nous avons montré que le modèle global de référence GR5 est robuste en termes de paramétrage et de performance. Il convient de vérifier que la spatialisation de la structure pluie-débit ne dégrade pas la stabilité du modèle. La Figure 31 présente l'évolution des paramètres des modèles semi-distribués M1 et M2 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 45 bassins versants.

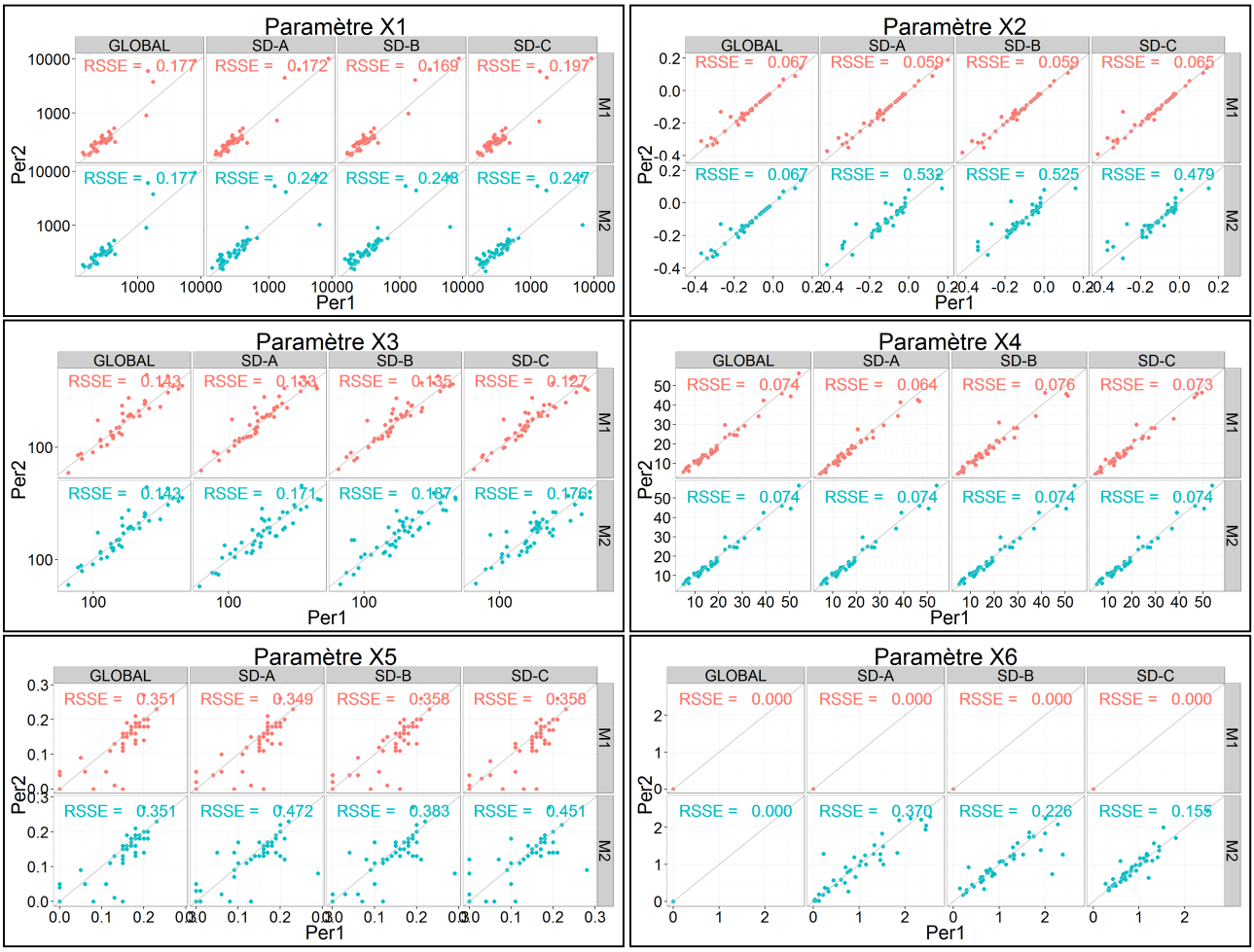

Figure 31 : Comparaison des paramètres du modèle semi-distribué optimisés entre la période 1 (Per1 : 1997-2001) et la période 2 (Per2 : 2002-2006) sur 45 bassins versants pour les modèles M1 et M2 avec 4 maillages (Global, SD-A, SD-B, SD-C). La moyenne du critère de robustesse *RSSE* est indiquée pour chaque paramètre modèle et maillage.

Les structures semi-distribuées sont robustes puisque l'optimisation des paramètres converge vers un jeu de paramètre très similaire sur deux périodes indépendantes, quel que soit le maillage, et pour la majorité des 45 bassins versants (Figure 31) :

- Les paramètres optimisés des modèles semi-distribués M1 et M2 sont stables entre la période 1 (1997-2001) et la période 2 (2002-2006).

- L'ajout d'un sixième paramètre (paramètre de célérité X6) dans la structure semi-distribuée M2 ne dégrade pas la stabilité des paramètres. Cela est dû au fait que le paramètre X_4 a été fixé à la valeur obtenue dans la configuration globale pour éviter l'équifinalité induite par la redondance des paramètres de routage (cf. annexe 7).

Enfin, nous remarquons que les paramètres optimisés sont semblables entre la configuration globale et les configurations semi-distribuées (maillages A, B, C). Ces résultats sont en accord avec ceux d'Andréassian et al. (2004) et Lerat et al. (2012a) qui obtiennent des valeurs de paramètres du modèle semi-distribué très proches des paramètres du modèle global lorsque le paramétrage est uniforme sur le bassin. Par conséquent, nous concluons que la robustesse du modèle pluie-débit global de référence GR5 n'est pas affectée par la spatialisation du modèle et les structures M1 et M2 sont bien adaptées à la modélisation pluie-débit semi-distribuée des bassins versants.

5.3.2.3 Quelle structure semi-distribuée du modèle global GR5 ?

Les modèles pluie-débit semi-distribués M1 et M2 sont aussi performants et robustes que le modèle global de référence GR5. Bien que nous constatons une légère supériorité sur les scores du modèle M2 (le critère moyen C2M vaut respectivement 0.725 et 0.730 pour les modèles M1et M2), les différences entre les scores calculés sur les deux périodes de validation de cinq ans sont très faibles et peu significatives (Figure 30).

Afin de comparer plus précisément les modèles semi-distribués, nous calculons l'indice de performance relative entre les modèles M1 et M2 sur l'échantillon d 45 bassins versants (Figure 32). De plus, nous présentons certains événements de crue pour lesquels les simulations de débit semi-distribuées sont très différentes entre les modèles M1 et M2 (Figure 33).

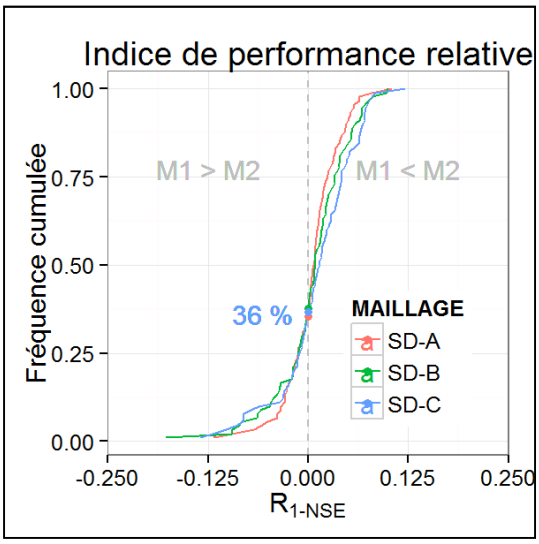

Figure 32 : Distribution de l'indice de performance relative des modèles semi-distribués M1 et M2 calculé à l'exutoire de 45 bassins versants pour deux périodes de validation de cinq ans et trois maillages différents (SD-A, SD-B, SD-C).

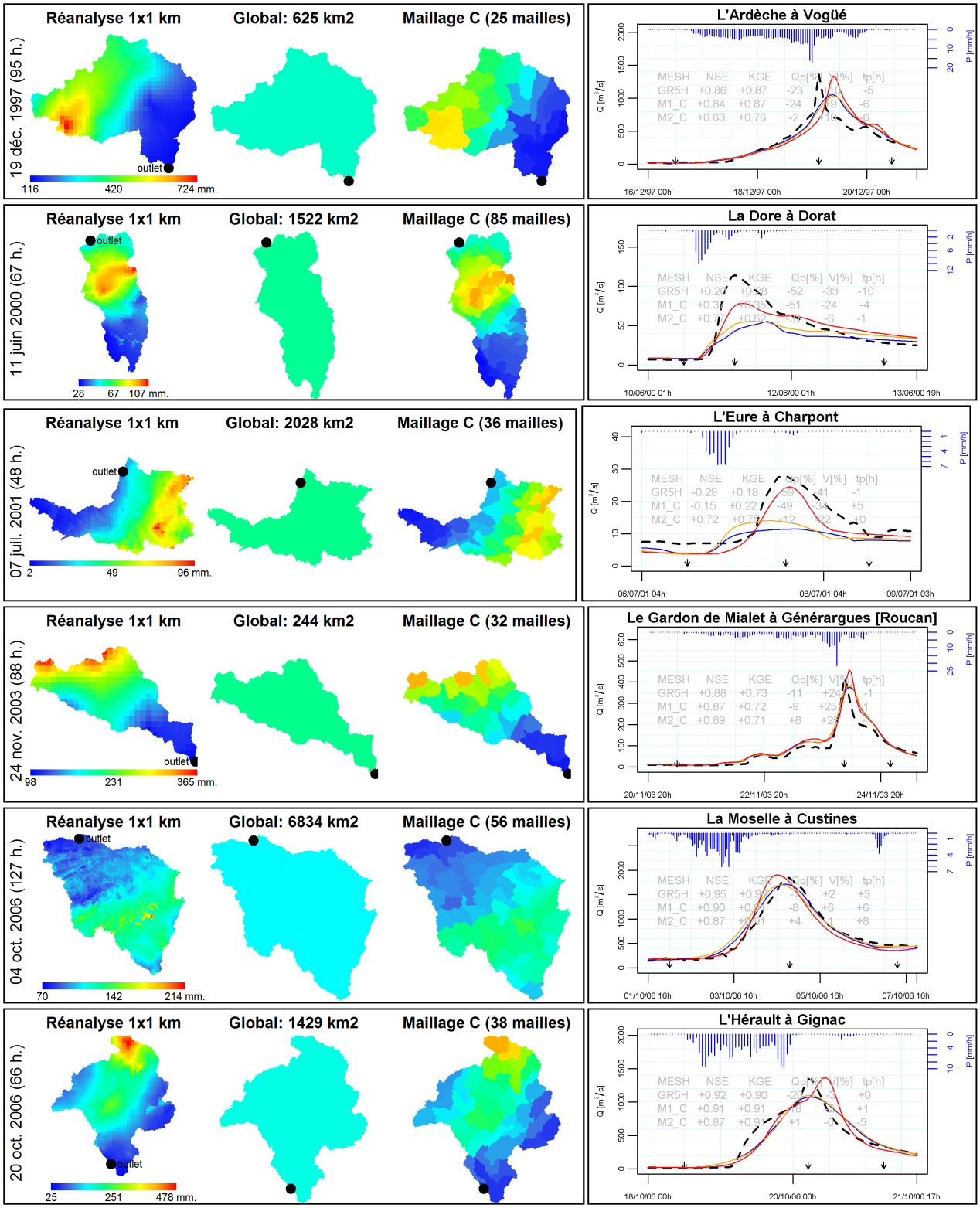

Figure 33 : Exemples d'événements de crue pour lesquels les simulations de débit à l'exutoire des bassins sont remarquablement différentes. Pour chaque événement est représenté le cumul de précipitation à la résolution spatiale de la réanalyse (1x1 km), moyenné spatialement sur le bassin (Global) et à la résolution spatiale du modèle semi-distribué (Maillage C) avec les hydrogrammes des débits observés (tirets noir), simulés par le modèle global de référence GR5H (bleu) et les modèle semi-distribués M1 (orange) et M2 (rouge). Les critères NSE, KGE, les erreurs d'amplitude du pic de crue (Qp), de volume (V) et de déphasage (tp) sont indiqués sur chaque hydrogramme.

En moyenne sur deux périodes de validation de cinq ans, nous constatons que le modèle semi-distribué M2 est plus performant que le modèle M1 dans 64% des cas pour les trois maillages étudiés (Figure 32). Par ailleurs, l'analyse des simulations de débit sur des événements de crue met en évidence un comportement différent des modèles semi-distribués (Figure 33) :

- Les simulations de débit du modèle semi-distribué M2 sont très différentes de celles du modèle global lorsque la variabilité spatiale des champs de précipitation est importante.
- Au contraire, les simulations semi-distribuées M1 ne sont pas impactées, elles restent très semblables à celles du modèle global de référence GR5.

Ainsi, le modèle M1 ne réagit pas à la variabilité spatiale des précipitations puisque les simulations de débit obtenues sont quasi-équivalentes aux sorties du modèle global qui ne tient pas compte de l'hétérogénéité spatiale des données d'entrée de précipitations (Figure 33). Ceci est vraisemblablement la conséquence du réservoir de routage placé à l'exutoire, qui est commun à toutes les mailles du bassin dans la configuration M1 (cf. 5.2.2.3). Effectivement, les réponses des sous-bassins s'écoulent toutes dans le même réservoir de routage, ce qui atténue la variabilité des écoulements existant au sein du bassin versant.

Ces résultats nous contraignent à abandonner la structure semi-distribuée M1 qui se comporte comme le modèle global GR5 et présente peu d'intérêt pour une modélisation semi-distribuée. La structure pluie-débit M2 est mieux adaptée à la modélisation semi-distribuée puisque le modèle réagit à l'hétérogénéité spatiale des précipitations, sans dégrader les performances du modèle global de référence, et améliore la qualité des simulations de débit sur certains événements de crue (Figure 33). Cependant, les améliorations induites par la spatialisation des données de précipitation ne sont pas systématiques, comme le montrent les faibles écarts de performances calculés sur la période complète de validation (Figure 30).

L'impact de la variabilité spatiale des précipitations sur la simulation des débits sera analysé en détail au Chapitre 6. Par la suite, nous utiliserons uniquement le modèle semi-distribué M2 et le modèle global de référence GR5 pour les besoins de notre recherche.

5.4 Stratégies de paramétrage du modèle semi-distribué par optimisation

5.4.1 Méthodologie

Nous avons constaté que les simulations de débit obtenues à l'intérieur des bassins sont de moins bonne qualité que celles obtenues à l'exutoire des bassins (Figure 30). Ce problème a été rencontré dans beaucoup d'études sur la modélisation distribuée lorsque les modèles sont « globalement » calés en utilisant uniquement les observations de débit à l'exutoire des bassins (Refsgaard 1997; Andersen et al. 2001; Ajami et al. 2004; Moussa et al. 2007; Pechlivanidis et al. 2010; Conradt et al. 2013).

Dans le but d'améliorer les simulations de débit sur les points intérieurs, nous cherchons à optimiser les paramètres des modèles semi-distribués en utilisant l'ensemble des observations de débit, à l'exutoire et aux points intérieurs des bassins versants. Pour cela, différentes stratégies d'optimisation sont testées pour caler les paramètres du modèle semi-distribué sur chacun des 45 bassins versants qui contiennent au moins une station hydrométrique intérieure (Figure 25). Pour les besoins des comparaisons, une modélisation globale de référence GR5 est aussi effectuée sur chaque bassin versant (45 stations hydrométriques à l'exutoire) et chaque sous-bassin jaugé (86 stations hydrométriques intérieures) en calant respectivement les paramètres par rapport au débit observé à l'exutoire et aux points intérieurs (qui correspondent aux exutoires des sous-bassins).

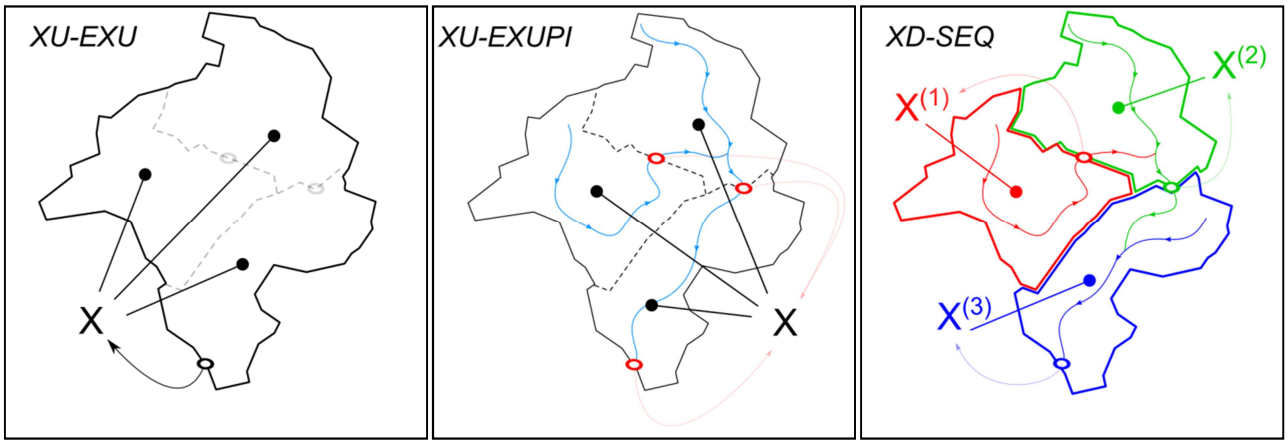

Figure 34 : Stratégie de paramétrage du modèle semi-distribué, illustrée pour un bassin versant avec trois stations de jaugeage (une à l'exutoire et deux sur des points intérieurs). (XU-EXU) : calage par rapport au débit observé à l'exutoire ; (XU-EXUPI) : calage par rapport au débit observé à l'exutoire et aux points intérieurs ; (XD-SEQ) : calage séquentiel distribué sur les sous-bassins par rapport au débit observé aux points intérieurs et à l'exutoire.

Chaque stratégie d'optimisation est ensuite évaluée en termes de qualité des simulations de débit par rapport aux débits observés à l'exutoire et aux points intérieurs des bassins. Etant donné les déficiences de certaines structures semi-distribuées (M0a, M0b et M1) et les faibles différences de performance entre les maillages (A, B et C), nous présentons les résultats obtenus pour le modèle semi-distribué M2 et le maillage le plus fin (Maillage C) avec un forçage des précipitations distribué sur les mailles du bassin versant (Figure 29). Nous détaillons ci-dessous les stratégies d'optimisation étudiées (Figure 34).

5.4.1.1 Paramétrage uniforme par un calage à l'exutoire

Il s'agit du calage du modèle semi-distribué qui a été utilisé jusqu'à présent (cf. 5.2.3.2). Les paramètres sont calés en utilisant uniquement le **débit observé à l'exutoire** des bassins versants avec un **paramétrage uniforme** : ils sont identiques sur les mailles du bassin versant (sauf le paramètre X4 qui est distribué sur les mailles). Par la suite, nous nommons cette stratégie ***XU-EXU***.

Le modèle global de référence GR5 est aussi calé par rapport aux débits observés à l'exutoire puisque, par construction, il n'est pas possible d'accéder aux simulations sur des points intérieurs du bassin. Sur chaque point intérieur jaugé, une simulation globale de référence GR5 est effectuée à l'échelle du sous-bassin en calant les paramètres par rapport au débit observé à l'exutoire du sous-bassin (qui est considéré comme un point intérieur pour un bassin aval). De cette manière, les performances du modèle semi-distribué à l'intérieur des bassins peuvent être comparées à celles du modèle global.

5.4.1.2 Paramétrage uniforme par un calage multi-site

Les paramètres sont identiques entre les mailles (sauf le paramètre X4 qui est distribué sur les mailles) et ils sont calés en utilisant le **débit observé à l'exutoire ET sur les points intérieurs** des bassins versants. La fonction objectif utilisée par l'algorithme de calage est la moyenne des critères de calage qui sont calculés sur les points intérieurs jaugés et à l'exutoire des bassins versants. C'est un calage multi-site avec **un paramétrage uniforme** qui utilise la totalité des observations disponibles. Par la suite, nous nommons cette stratégie ***XU-EXUPI***.

Par ailleurs, nous chercherons à valider spatialement cette stratégie d'optimisation : il s'agit d'évaluer les performances du modèle semi-distribué sur des points qui n'ont pas été utilisés pour l'optimisation des paramètres. Pour cela, les paramètres seront calés par rapport aux débits mesurés par l'ensemble des stations de jaugeage sauf une sur laquelle nous évaluerons la précision des simulations de débit. Dans le cas où plusieurs stations de jaugeage sont disponibles, tous les cas possibles seront testés. Par la suite, nous nommons cette stratégie ***VAL-SPA.***

5.4.1.3 Paramétrage semi-distribué par un calage multi-site séquentiel

Il s'agit d'un **calage séquentiel multi-site** avec un **paramétrage distribué sur les sous-bassins** jaugés (Lerat et al. 2012a) :

- On commence par caler un jeu de paramètres sur le sous-bassin jaugé en amont, par rapport aux débits observés à son exutoire (celui du sous-bassin), avec un paramétrage uniforme : les paramètres sont identiques (sauf le paramètre X4 qui est distribué) sur les mailles du sous-bassin.
- Ensuite, un autre jeu de paramètres est calé sur le sous-bassin intermédiaire par rapport au débit observé sur le prochain point intérieur jaugé en aval (qui correspond à l'exutoire du sous-bassin intermédiaire).

On répète cette procédure jusqu'à l'exutoire du bassin versant. Il y a donc autant de calages qu'il y a de stations de jaugeage. Autrement dit, il y autant de jeux de paramètres que de points intérieurs jaugés : **le paramétrage est uniforme sur les mailles appartenant au même sous-bassin jaugé** (amont ou intermédiaire) mais **les paramètres sont différents entre les sous-bassins jaugés**. De cette manière, le paramétrage du modèle semi-distribué est distribué sur les sous-bassins amont et intermédiaires par rapport aux observations de débit disponibles à l'intérieur du bassin versant.

Notons que chaque sous-bassin intermédiaire bénéficie indirectement des observations de débit des stations amont puisque le débit simulé sur le sous-bassin amont jaugé est propagé vers l'exutoire du sous-bassin intermédiaire. Par la suite, nous nommons cette stratégie ***XD-SEQ.***

5.4.2 Evaluation des stratégies de paramétrage du modèle semi-distribué

5.4.2.1 Impact d'un paramétrage uniforme sur la simulation des débits

Les simulations de débit du modèle semi-distribué M2 avec le maillage C sont évaluées par rapport aux débits observés à l'exutoire et aux points intérieurs des bassins versants pour les différentes stratégies d'optimisations testées avec un paramétrage uniforme (Figure 35). On constate que :

- Un paramétrage uniforme du modèle semi-distribué M2 par rapport au débit observé à l'exutoire du bassin versant (XU-EXU) est performant mais les simulations obtenues à l'intérieur du bassin ne sont pas de bonne qualité. Par rapport au modèle global de référence GR5 calé sur les observations de débit de chaque sous-bassin jaugé, le critère C2M chute de 0.090 (de 0.675 à 0.585) en moyenne sur 86 sous-bassins (Figure 35).
- Un paramétrage uniforme du modèle semi-distribué M2 par rapport à l'ensemble des observations de débit disponibles sur le bassin (XU-EXUPI) permet d'obtenir un meilleur compromis en termes de qualité des simulations de débit obtenues à l'exutoire et sur les points intérieurs du bassin. Par rapport à la stratégie de paramétrage XU-EXU, le gain de performance est de 0.053 (de 0.585 à 0.638) sur le critère C2M moyen à l'intérieur du bassin mais

les performances chutent de 0.031 (de 0.730 à 0.699) sur le critère C2M moyen à l'exutoire du bassin (Figure 35).

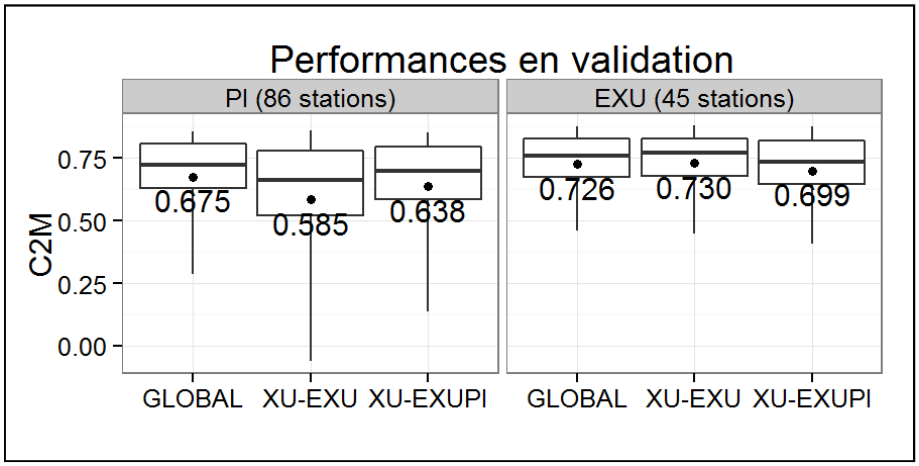

Figure 35 : Performances en validation calculées pour modèle global de référence GR5 (GLOBAL) et pour deux stratégies de paramétrage uniforme du modèle semi-distribué M2 avec le maillage C (XU-EXU et XU-EXUPI) à l'exutoire de 45 bassins versants (EXU) et sur 86 points intérieurs (PI).

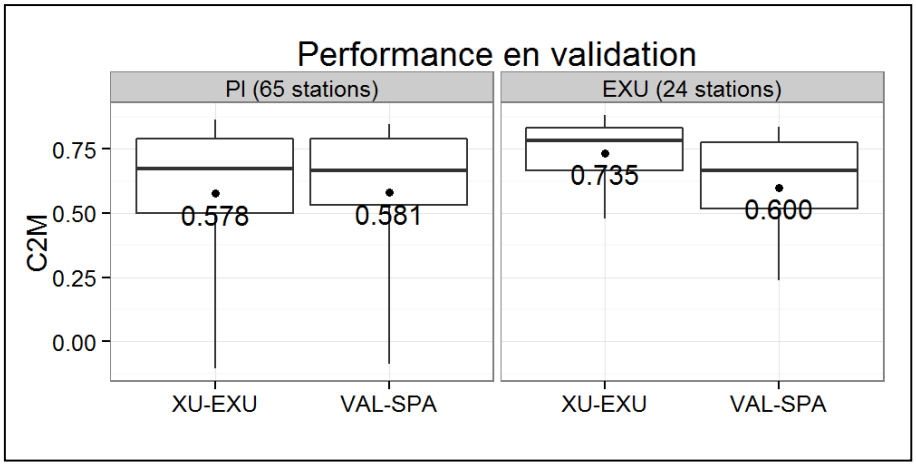

Figure 36 : Performances en validation calculées pour deux stratégies de paramétrage uniforme (XU-EXU, VAL-SPA) du modèle semi-distribué M2 avec le maillage C sur les bassins versants qui contiennent au moins deux stations de jaugeage à l'intérieur du bassin, soient 24 bassins versants (EXU) et 65 points intérieurs (PI).

La Figure 36 présente les performances obtenues en validation avec les stratégies de paramétrage uniformes sur les bassins qui contiennent un minimum de trois stations de jaugeage (une à l'exutoire et au moins deux à l'intérieur). Rappelons que pour la stratégie VAL-SPA les performances sont calculées sur le point intérieur jaugé qui n'a pas été utilisé pour l'optimisation des paramètres. A l'exutoire, la stratégie VAL-SAP correspond au cas où le modèle semi-distribué est calé par rapport aux observations de débit à l'intérieur du bassin, sans utiliser celles de l'exutoire.

Bien que la stratégie de paramétrage XU-EXUPI permette d'obtenir de meilleures simulations de débit sur les points intérieurs jaugés (qui ont été utilisés pour l'optimisation des paramètres), les performances obtenues en d'autres points du bassin sont aussi mauvaises que celles du modèle semi-distribué calé à l'exutoire : le critère C2M moyen sur 65 stations intérieures vaut respectivement 0.578 et 0.581 pour les stratégies XU-EXU et XU-EXUPI (Figure 36). De même, si le modèle semi-distribué est calé par rapport aux observations de débit disponibles à l'intérieur du bassin uniquement, les performances du modèle calculées à l'exutoire des bassins sont comparables à celles obtenues sur les points intérieurs (respectivement 0.600 sur 24 stations et 0.578 sur 65 stations) et elles sont fortement dégradées par rapport à un calage des paramètres à l'exutoire (Figure 36).

Ces résultats montrent qu'il est difficile d'obtenir des simulations de débit de qualité sur les points du bassin versant qui ne sont pas jaugés. Lorsque le paramétrage est uniforme sur le bassin versant, le modèle semi-distribué est performant sur les stations qui ont servi à son optimisation, mais il est difficile d'obtenir d'aussi bonnes performances ailleurs.

5.4.2.2 Impact d'un paramétrage distribué sur la simulation des débits

Les déficiences des modèles (semi-)distribués pour la simulation des débits sur les points intérieurs des bassins sont souvent interprétées comme la conséquence d'une mauvaise méthode de spatialisation des paramètres (Hundecha et al. 2008; Pokhrel and Gupta 2010; Samaniego et al. 2010). Or, la spatialisation des paramètres est la principale difficulté de la modélisation pluie-débit (semi-)distribuée (cf. 5.2.3.1).

Afin d'analyser l'impact d'un paramétrage distribué sur les simulations de débit du modèle semi-distribué M2, nous utilisons un calage séquentiel pour spatialiser les paramètres sur les sous-bassins jaugés (XD-SEQ). La précision des simulations de débit obtenues à l'exutoire et sur les points intérieurs des bassins versants sont comparées à celles du modèle semi-distribué avec un paramétrage uniforme (Figure 37) :

- La distribution des paramètres permet de préserver les performances du modèle global sur les points intérieurs (Figure 37). Ce résultat était attendu puisque, dans le cas du calage séquentiel, les paramètres du modèle global et semi-distribué sont optimisés par rapport aux mêmes données d'observation : le débit mesuré sur chaque point intérieur jaugé.
- L'amélioration des simulations de débit sur les point intérieurs du modèle semi-distribué (grâce à la spatialisation des paramètres) se répercute à l'exutoire des bassins : le critère C2M moyen augmente de 0.730 à 0.738 entre un paramétrage uniforme XU-EXU et un paramétrage distribué sur les sous-bassins jaugés XD-SEQ (Figure 37).

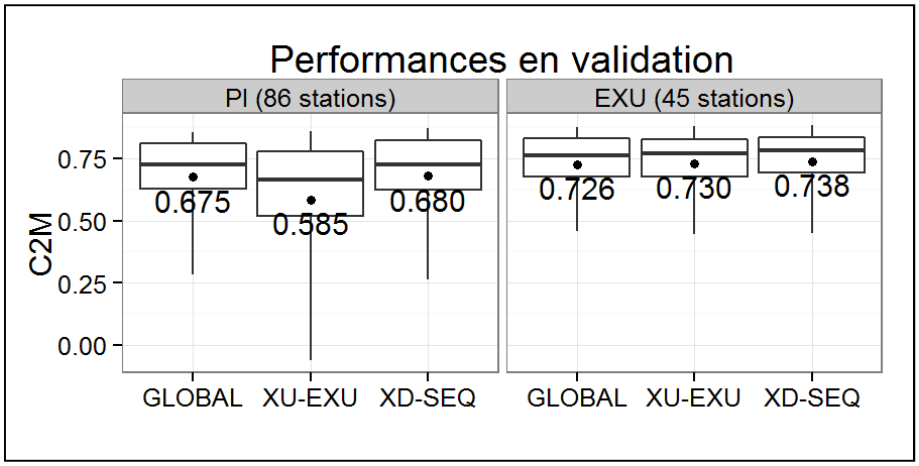

Figure 37 : Performances en validation calculées pour le modèle global de référence GR5 (GLOBAL) et pour des paramétrages uniforme et distribué du modèle semi-distribué M2 avec le maillage C (XU-EXU et XD-SEQ) à l'exutoire de 45 bassins versants (EXU) et sur 86 points intérieurs (PI).

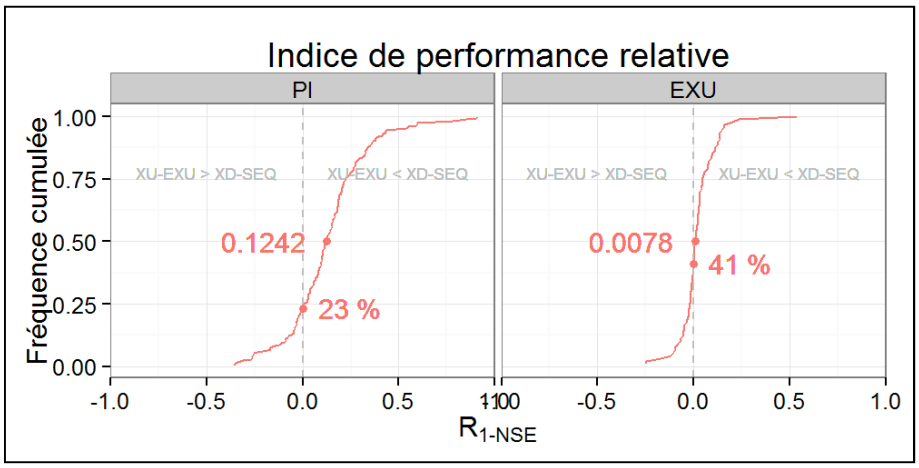

Figure 38 : Indice de performance relative entre un paramétrage uniforme (XU-EXU) et distribué (XD-SEQ) du modèle semi-distribué M2 avec le maillage C à l'exutoire de 45 bassins et sur 86 points intérieurs (PI).

La Figure 38 présente la distribution de l'indice de performance relative $R_{1\text{-}NSE}$ du modèle semi-distribué M2 calculé pour deux périodes de validation de cinq ans entre un paramétrage uniforme et semi-distribué. La Figure 39 présente pour chaque bassin la valeur de l'indice de performance relative calculé sur les points intérieurs et à l'exutoire. Nous constatons que :

- Bien que le paramétrage distribué améliore les simulations de débit à l'exutoire des bassins dans 59% des cas, certains bassins versants restent mieux modélisés avec un paramétrage uniforme (Figure 38). Ceci peut être la conséquence des dégradations des simulations de débits sur les points intérieurs (observées dans 23% des cas) qui impactent les simulations de débit à l'exutoire (Figure 38).

- Les dégradations les plus importantes des performances du modèle semi-distribué induites par la spatialisation des paramètres sont observées à l'exutoire des bassins de l'Essonne, la Bruche, la Saulx, le Grand Morin et la Dronne (Figure 39). Pourtant, les performances sont améliorées sur les points intérieurs de ces bassins (Tableau 8).
- A l'opposé, les plus fortes améliorations sont observées à l'exutoire des bassins de l'Epte, l'Hérault et le Gardon (Figure 39) qui bénéficient d'une meilleure précision des simulations de débit obtenues sur les points intérieurs grâce à la spatialisation des paramètres du modèle semi-distribué (Tableau 8).

Il est difficile d'expliquer les causes des dégradations des performances du modèle semi-distribué entre un paramétrage uniforme et distribué. Ceci peut être la conséquence d'un mauvais paramétrage dû à des erreurs résiduelles dans les données de débit utilisées lors de l'optimisation séquentielle, ou d'une mauvaise performance du modèle pluie-débit sur un sous-bassin dont le comportement hydrologique est complexe et qui ne serait pas convenablement modélisé par le modèle. Par exemple, les bassins de la Bruche et de la Saulx reposent sur des zones de roches fracturées ou karstiques (Tableau 8) qui peuvent entraîner des pertes (ou gain) dans le bilan hydrologique du bassin et qui sont difficiles à prendre en compte dans une modélisation spatialisée. De plus, la structure du modèle GR5 n'est pas bien adaptée aux bassins de nappe (cf. Chapitre 4) sur lesquelles les simulations de débit peuvent être à la fois améliorées (l'Epte) ou dégradées (l'Essonne) par la spatialisation des paramètres du modèle semi-distribué (Tableau 8). Néanmoins, de manière générale, les débits simulés à l'exutoire des bassins rapides bénéficient fortement des améliorations obtenues sur les points intérieurs parce que les phénomènes de propagation hydrauliques y sont prépondérants.

Ces tests montrent que la distribution des paramètres du modèle semi-distribué peut mener à de grandes améliorations sur la simulation des débits (Figure 39 - Tableau 8). Malheureusement, le calage séquentiel n'est pas une méthode robuste à 100% pour spatialiser les paramètres puisqu'il peut déstabiliser les simulations semi-distribuées de débit à l'exutoire de certains bassins versants.

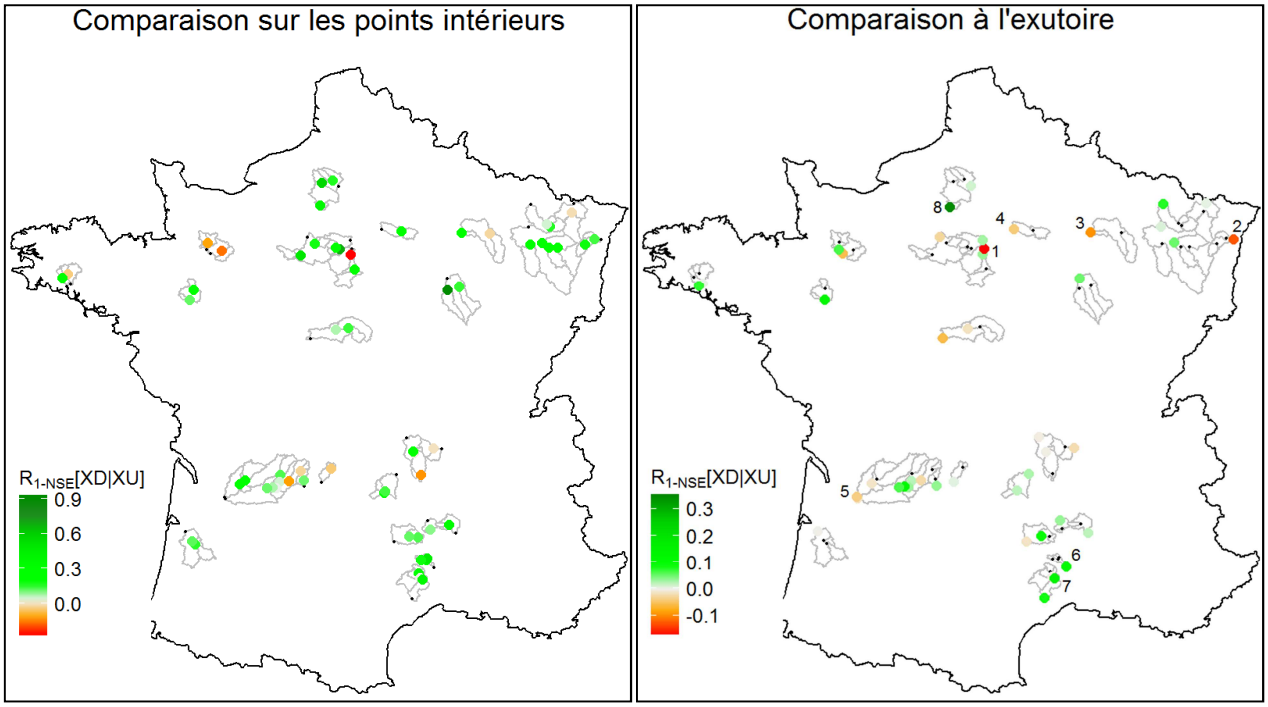

Figure 39 : Répartition géographique de l'indice de performance relative du modèle semi-distribué M2 entre un paramétrage uniforme (XU-EXU) et distribué (XD-SEQ) calculé aux points intérieurs (gauche) et à l'exutoire (droite) des bassins versants. Les numéros identifient des bassins versants particuliers qui sont discutés dans le Tableau 8.

ID	Bassin Versant	Surface (km²)	Points intérieurs NSE[XU – XD]	Exutoire NSE[XU – XD]	Caractéristique
1	L'Essonne à Ballancourt	1858	-0.05 – 0.39 0.64 – 0.38	0.51 – 0.33	Bassin de nappe
2	La Bruche à Holtzheim	677	0.78 – 0.84 0.73 – 0.80	0.87 – 0.82	Roche cristalline facturée*
3	La Saulx à Vitry-en-Perthois	2109	0.89 – 0.89 0.69 – 0.80	0.92 – 0.90	Aquifère karstique*
4	Le Grand Morin à Pommeuse	769	0.76 – 0.85	0.85 – 0.83	-
5	La Dronne à Coutras	2791	0.80 – 0.87 0.87 – 0.92	0.91 – 0.90	-
6	Le Gardon de Mialet	244	0.19 – 0.64 0.20 – 0.74 0.67 – 0.78	0.78 – 0.82	Bassin rapide
7	L'Hérault à Laroque	916	0.83 – 0.83 0.76 – 0.81	0.86 – 0.90	Bassin rapide
8	L'Epte à Fourges	1385	0.49 – 0.86 -5.20 – -0.27	0.65 – 0.83	Bassin de nappe

Tableau 8 : Liste des bassins versants particuliers identifiés sur la Figure 39. Les bassins sont classés par ordre croissant des améliorations. (*) D'après la carte hydrogéologique du BRGM dressées par J. Margat (1978).

5.5 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons cherché à développer une version semi-distribuée du modèle pluie-débit global GR5. Quatre structures différentes ont été proposées et testées sur un échantillon de 45 bassins versants en termes de robustesse du paramétrage et de qualité des simulations de débits évaluées à l'exutoire et à l'intérieur des bassins versants.

Nous avons montré que certaines structures semi-distribuées sont sensibles à l'échelle de discrétisation du bassin versant et ne peuvent pas être appliquées à des résolutions spatiales grossières sans dégrader les performances des simulations de débit. Au contraire, d'autres structures spatialisées sont insensibles à la discrétisation spatiale et se comportent comme le modèle global de référence GR5. Par ailleurs, certaines structures semi-distribuées s'exposent au problème d'équifinalité, ce qui complique l'estimation des paramètres par optimisation, et impacte la robustesse du modèle.

Le meilleur compromis pour la spatialisation du modèle global GR5 consiste en une modélisation pluie-débit globale GR5 appliquée sur chaque sous-bassin, suivie d'un routage des contributions de chaque maille par un simple décalage temporel, à travers le réseau hydrographique jusqu'à l'exutoire du bassin versant. Afin de limiter la redondance des paramètres de routage, le routage sur les versants est déterminé par une loi empirique entre le temps de base de l'hydrogramme unitaire et la taille des sous-bassins. Cette structure est pratique et utilisable sur un grand nombre de bassins versants puisque seulement 6 paramètres doivent être estimés.

Bien que nous n'ayons pas réussi à définir une méthode totalement robuste pour distribuer les paramètres du modèle semi-distribué, cette structure est capable de prendre en compte explicitement la variabilité spatiale de précipitations. Un paramétrage uniforme du modèle semi-distribué ne permet pas de maintenir une qualité optimale des simulations de débit obtenues à l'intérieur des bassins par rapport à un modèle global calé sur ces derniers. Néanmoins, les simulations semi-distribuées de débit restent cohérentes puisque les performances sont relativement bonnes aux points intérieurs du bassin (NSE > 0.50).

Enfin, nous avons montré que les performances du modèle semi-distribué avec un paramétrage uniforme sur le bassin sont aussi bonnes que celles du modèle global GR5 et améliorent significativement les simulations de débit à l'exutoire des bassins versants sur certains événements de crue. De plus, les performances du modèle sont stables entre différentes échelles de spatialisation et restent précises à l'exutoire des bassins. Ainsi, le modèle développé est un modèle semi-distribué bien adapté pour étudier l'impact de la variabilité spatiale des précipitations sur la simulation des débits à l'exutoire des bassins et nous l'utiliserons pour la suite de nos travaux de recherche.