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

Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie

Parcours Hydrologie-Hydrogéologie

Sensibilité des performances et des paramètres d'un modèle Pluie-Débit distribué à sa résolution spatiale et son pas de temps de fonctionnement

Laure Lebécherel

Directrice de recherche : Marie Bourqui

Co-encadrants : Nicolas Le Moine (UMR Sisyphe) & Thibault Mathevet (EDF-DTG)

EDF-Recherche & Développement
Laboratoire National d'Hydraulique et d'Environnement
Chatou, France

8 septembre 2011

Abstract

The choice of spatial and temporal resolutions of hydrological models is a current and capital debate for the optimization and the use of these tools. The aim of this study is to evaluate the sensitivity of performances, robustness and parameters of the hydrological model rainfall-runoff CEQUEAU, to these different resolutions. The study watersheds are six French basins and provide diversified characteristics. Three levels of spatial distribution of a same structure model have been considered: a lumped model and two other spatial resolutions, 10 and 100 sub-basins. Two temporal resolutions of the model are studied, hourly and daily time scale. Results show that the performance and robustness of the model are little sensitive to the temporal resolutions of the model. The high spatial distribution seems to improve the performance and robustness of the outlet runoff modeling, particularly for mountain basins. This gain of performance is principally attributed to the spatial resolution of input data of the model, particularly of the temperature, essential for the snow routines. Furthermore, an optimization of parameters with a criterion on outlet runoff only, provides performances at interior points closed to the ones obtained with an optimization on runoff at interior points. Then, for some watersheds, in the case of ungauged interior points, an optimization on the outlet runoff would allow to model well the runoffs of ungauged stations, situated upstream. Finally, parameters of CEQUEAU model don't seem to be transferable from the hourly time step towards the daily one, but the transfer from daily time step towards the hourly one seems to be more feasible. This result is interesting and confortant because the daily data are clearly more abundant. However, the results of this study remain very dependent on the watershed studied.

Remerciements

Mes remerciements vont en premier lieu vers mes trois encadrants, Marie Bourqui, Nicolas Le Moine et Thibault Mathevet, qui ont su m'orienter et me conseiller tout au long de ces six mois. Leur disponibilité, leur bonne humeur, leurs conseils avisés et leurs regards critiques m'ont permis d'effectuer ce stage dans un cadre de travail constructif et très agréable.

Je remercie également Laurent Pérotin et Jean-Daniel Mattei, directeurs successifs du LNHE, de m'avoir accueilli au sein du laboratoire pour effectuer ce stage, ainsi que les différents groupes du laboratoire et en particulier ceux du second étage pour leur agréable accueil.

Je tiens aussi à remercier Martine Lachaume et Pascale Polledri d'avoir participé au bon déroulement de ce stage.

Un merci tout particulier pour mes collègues de bureau : Frédéric Hendrickx pour le partage de ses connaissances en modélisation hydrologique; Côme pour les longues discussions et petites astuces de Scilab ; et enfin pour mon dernier mois de stage, Arthur, qui a su supporter mes petits moments de fatigue lors de la rédaction de ce mémoire.

Enfin, je remercie bien évidemment tous les stagiaires, prestataires et thésards que j'ai pu rencontrer au cours de ces six mois, pour les très bons moments passés ensemble, ainsi que leur partage d'expérience et soutien permanent. Cette bonne entente nous a permis de passer six mois très agréables.

Table des matières

1 INTRODUCTION 7

2 PRESENTATION DU LABORATOIRE NATIONAL D'HYDRAULIQUE ET ENVIRONNEMENT (LNHE) 8

3 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE 9

3.1 Distribution spatiale 9

3.2 Distribution temporelle 11

3.3 Sensibilité des paramètres aux résolutions spatiales et temporelles 13

3.4 Bilan de la revue bibliographique 14

4 METHODOLOGIE 15

4.1 Le modèle hydrologique : CEQUEAU 15

4.1.1 Présentation 15

4.1.2 Maillage du modèle et spatialisation des données de forçage 18

4.1.3 Optimisation des paramètres du modèle CEQUEAU 19

4.1.4 Evaluation du modèle CEQUEAU 21

4.2 Présentation des bassins versants 23

4.3 Données climatiques et hydrologiques 25

4.3.1 Données climatiques 25

4.3.2 Données hydrométriques 27

5 RESULTATS ET INTERPRETATIONS 28

5.1 Evaluation et sensibilité des performances et de la robustesse du modèle 28

5.1.1 Etude des fronts de Pareto 28

5.1.2 La modélisation du débit à l'exutoire 31

5.1.3 La modélisation du débit au niveau des points intérieurs du bassin 35

5.1.4 Synthèse 39

5.2 Sensibilité des paramètres du modèle au pas de temps de fonctionnement 40

5.2.1 Résultats 40

5.2.2 Discussion 43

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES 44

7 BIBLIOGRAPHIE 46

8 ANNEXES 48

Liste des figures

Figure 1: Fonction de production et fonction de transfert d'une maille du modèle CEQUEAU 16
Figure 2: Fonction de transfert du modèle CEQUEAU 18
Figure 3: Schéma du front de Pareto représentant le critère NSE_{RQ} composite (points intérieurs) en fonction du critère NSE_{RQ} à l'exutoire. La croix rouge représente les critères NSE_{RQ} composite et NSE_{RQ} à l'exutoire avec le jeu de paramètres ayant le même rang dans chaque liste de critères. 22
Figure 4: Procédure de split sample test 23
Figure 5: Localisation géographique des bassins versants étudiés 24
Figure 6: Superficies des bassins versants étudiés 24
Figure 7: Courbes hypsométriques des bassins versants étudiés 25
Figure 8: Densité de postes pluviométriques pour 100 km² en fonction de la superficie des bassins versants ; La courbe noire représente la limite conseillée par Schaake et al. (2000), les croix bleues le réseau journalier et les croix rouges le réseau horaire. 26
Figure 9: NSE_{RQ} au niveau des points intérieurs en fonction de NSE_{RQ} à l'exutoire pour le bassin de la Durance à la Clapière 29
Figure 10: Critère de Nash et Sutcliffe sur la racine des débits à l'exutoire pour chaque bassin versant, avec le jeu de paramètres présentant le meilleur compromis entre NSE_{RQ} sur les points intérieurs et NSE_{RQ} à l'exutoire. Les croix représentent les performances en calage et les points, en validation..... 31
Figure 11: Schéma représentant le critère NSE_{RQ} composite (points intérieurs) en fonction du critère NSE_{RQ} à l'exutoire. C1 représente le jeu de paramètre optimisant NSE_{RQ} composite, C2 le jeu de paramètre optimisant NSE_{SQ} à l'exutoire et C1-C2 présentant le meilleur compromis entre ces deux critères. 34
Figure 12: NSE_{RQ} à l'exutoire dans le cas où le critère NSE_{RQ} composite était optimisé (PI) et dans le cas où le critère NSE_{RQ} à l'exutoire était optimisé (Exutoire) pour les six bassins versants étudiés. Les croix représentent les performances en calage et les points en validation. 35
Figure 13: NSE_{RQ} sur les points intérieurs du bassin versant pour chaque bassin versant, avec le jeu de paramètres présentant le meilleur compromis entre NSE_{RQ} sur les points intérieurs et NSE_{RQ} à l'exutoire, aux pas de temps horaire et journalier. Les croix représentent les performances en calage et les points, en validation.. 36
Figure 14: NSE_{RQ} (Points Intérieurs) pour la Meuse et la Moselle, avec le jeu de paramètres présentant le meilleur compromis entre NSE_{RQ} (Points intérieurs) et NSE_{RQ} (Exutoire), au pas de temps journalier. Les croix représentant les performances en calage et les points, en validation. Le graphique de gauche représente le cas où les modèles à 100 mailles ont été calés et validés avec plus de 10 points de contrainte et le graphique de droite avec 10 points de contrainte, soit le même nombre que pour le modèle à 10 mailles. 37
Figure 15: NSE_{SQ} (Exutoire) pour la Meuse et la Moselle, avec le jeu de paramètres présentant le meilleur compromis entre NSE_{RQ} (Points intérieurs) et NSE_{RQ} (Exutoire), au pas de temps journalier. Les croix représentant les performances en calage et les points, en validation. Le graphique de gauche représente le cas où les modèles à 100 mailles ont été calés et validés avec plus de 10 points de contrainte et le graphique de droite avec 10 points de contrainte, soit le même nombre que pour le modèle à 10 mailles..... 37
Figure 16: NSE_{RQ} composite dans le cas où le critère NSE_{RQ} composite était optimisé (PI) et dans le cas où le critère NSE_{RQ} à l'exutoire était optimisé (Exutoire) pour les six bassins versants étudiés, au pas de temps horaire. Les croix représentent les performances en calage et les points en validation..... 39
Figure 17: NSE_{RQ} (Exutoire) lorsque les paramètres calés au pas de temps horaire sont validés au pas de temps horaire (croix) et au pas de temps journalier (point) (figure de gauche). NSE_{RQ} (Exutoire) lorsque les paramètres calés au pas de temps journalier sont validés au pas de temps journalier (croix) et au pas de temps horaire (point) (figure de droite)..... 41
Figure 18:NSE_{RQ} (Points intérieurs) lorsque les paramètres calés au pas de temps horaire sont validés au pas de temps horaire (croix) et au pas de temps journalier (point) (figure de gauche). NSE_{RQ} (Points intérieurs) lorsque les paramètres calés au pas de temps journalier sont validés au pas de temps journalier (croix) et au pas de temps horaire (point) (figure de droite). 41
Figure 19: Chronique de débits observés et simulés du bassin versant de la Durance à la Clapière obtenus en utilisant les paramètres calés au pas de temps horaire (figures de gauche) et ceux calés au pas de temps journalier (figures de droite). Les figures du haut sont obtenues par validation avec le même pas de temps que ceux du calage des paramètres, alors que celles du bas sont obtenues par validation avec le second pas de temps. 42

Liste des tableaux

Tableau 1: Tableau récapitulatif des surfaces moyennes de maille et des écart-types associés, pour chaque bassin et chaque distribution spatiale..... 19
Tableau 2: Comparaison des performances et robustesses des critères NSE_{RQ} (Points intérieurs) NSE_{RQ} (Exutoire) obtenus entre les deux pas de temps et les trois distributions spatiales pour les six bassins versants (Tableau du haut). Légende associée au tableau de performances et robustesses (Tableau du bas). 30
Tableau 3: NSE_{RQ} à l'exutoire en pourcentage en validation pour les différentes simulations et les six bassins versants. Ces résultats ont été moyennés entre les deux périodes de validation. 32
Tableau 4: Ecart relatif de performance NSE_{RQ} à l'exutoire en pourcentage entre calage et validation pour les différentes simulations et pour les six bassins versants. Ces résultats sont la moyenne de l'écart relatif des deux périodes de calage-validation. 33
Tableau 5: NSE_{RQ} (Points Intérieurs) en pourcentage, en validation pour les différentes simulations et les six bassins versants, aux pas de temps horaire et journalier. 36
Tableau 6: Ecart relatif de performance NSE_{RQ} composite en pourcentage entre calage et validation pour les différentes simulations et pour les six bassins versants. 38

Table des annexes

Annexe 1 : Liste des paramètres du modèle CEQUEAU (avec en gras les paramètres fixés) 48
Annexe 2 : Cartes représentant les postes pluviométriques, hydrométriques et de température pour chaque bassin versant, ainsi que les différents maillages étudiés (global, 10 (trait gras) et 100 mailles (trait fin). 49

1 INTRODUCTION

Actuellement, dans le domaine de la modélisation hydrologique, de nombreuses études sont menées afin de mieux concevoir les modèles hydrologiques et d'améliorer leurs capacités à reproduire les débits observés. Cette recherche passe avant tout par une bonne compréhension des différents processus mis en place lors de l'infiltration, l'évapotranspiration et l'écoulement de l'eau, jusqu'à son arrivée à l'exutoire.

Toutefois, le choix du degré de spatialisation et du pas de temps de fonctionnement ne fait l'objet d'aucun consensus. En effet, la littérature hydrologique se compose d'un large choix de modèles, utilisant des distributions spatiales et temporelles diverses. De nombreuses études visent à évaluer l'impact de ces distributions sur les performances des modèles induites par ce choix.
En effet, l'évolution constante de la disponibilité des données d'entrée des modèles, qui deviennent de plus en plus fines spatialement, peut laisser penser que les modèles hydrologiques distribués pourraient mieux représenter la variabilité de comportements du bassin et ainsi représenter les processus hydrologiques de ce dernier à l'échelle adéquate.
D'autre part, cette évolution de disponibilité des données d'entrée des modèles hydrologiques est également remarquable d'un point de vue temporel. Ainsi, utiliser un pas de temps fin, de l'ordre de l'horaire par exemple, pourrait permettre de représenter de façon plus correcte les processus climatiques et hydrologiques pour certains bassins versants.
A l'opposé, un haut degré de discrétisation spatiale ou temporelle pourrait rendre la complexité de ces modèles plus forte, et pourrait dégrader leur robustesse. En effet, un haut degré de complexification des modèles pourrait rendre les paramètres trop dépendants de leur période de calibration, et donc peu réutilisables pour une période très contrastée de celle utilisée pour le calage des paramètres.
De manière complémentaire, il serait intéressant de déterminer comment, pour un même modèle, les paramètres s'adaptent au degré de spatialisation et au pas de temps pour lequel il a été utilisé, et si des relations existent entre les paramètres et ces différentes résolutions spatiales et temporelles.
De façon générale, les degrés spatiaux et temporels à adopter pourraient également être fortement dépendants des bassins versants, et en particulier de leurs durées caractéristiques de fonctionnement.

Le but de ce stage effectué au Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement d'EDF Recherche et Développement, est de comparer les performances, la robustesse et les paramètres du modèle hydrologique pluie-débit distribué CEQUEAU, selon diverses résolutions spatiales et temporelles. Dans un premier temps, une revue bibliographique sera présentée afin de dresser un bilan des recherches réalisées jusqu'à maintenant sur ces sujets. La méthodologie adoptée lors de ce stage sera ensuite exposée. Par la suite, l'analyse de sensibilité de cette étude menée sur six bassins versants avec deux pas de temps de fonctionnement (horaire et journalier) et trois distributions spatiales (globale, dix et cent mailles) sera présentée. Cette analyse permettra d'obtenir des premières conclusions sur la sensibilité des performances, de la robustesse et des paramètres d'un modèle pluie-débit à ses résolutions spatiales et temporelles.

2 PRESENTATION DU LABORATOIRE NATIONAL D'HYDRAULIQUE ET ENVIRONNEMENT (LNHE)

Le Laboratoire National d'Hydraulique Environnement est l'un des 15 départements techniques du groupe Electricité De France Recherche & Développement (EDF R&D). Sa mission principale est de contribuer à protéger les ouvrages de production EDF contre les actions et les menaces de l'environnement aquatique (crues, inondations, tempêtes, étiages,…) mais également de maîtriser l'impact de ces ouvrages sur cet environnement (eaux de surface et eaux souterraines) et sur la santé, via les impacts sur la qualité de l'eau. Pour effectuer cette mission, le laboratoire est organisé selon 3 pôles : sciences du vivant, sciences en hydraulique et partage de la ressource en eau.

Ce stage a été effectué au sein du groupe Modélisation des Apports Hydriques et des TRansferts Hydro-Sédimentaires, du pôle Science en hydraulique, sous le tutorat de Marie Bourqui, chercheur en hydrologie, de début février à fin juillet 2011 sur le site d'EDF R&D de Chatou. Ce stage a également été encadré par Nicolas Le Moine, maître de conférences à l'UMR Sisyphe et Thibault Mathevet, ingénieur chercheur en hydrologie d'EDF-DTG.

Les missions de l'équipe hydrologique du LNHE sont de développer des outils de modélisation pour la conception et l'exploitation des ouvrages hydroélectriques mais également d'étudier l'impact du changement climatique par la compréhension de ses effets pour EDF en termes d'hydrologie des rivières. L'équipe s'intéresse également à la modélisation des usages et de la demande de la ressource en eau.
Ce stage s'inscrit alors dans le cadre de leur mission de développer et d'améliorer leurs outils de modélisation hydrologique, afin de mieux répondre aux enjeux du groupe EDF.
La problématique des échelles pertinentes en hydrologie intéresse également au sein d'EDF, les ingénieurs d'EDF- Direction Technique régionale de Grenoble (DTG) qui sont amenés à utiliser des modèles hydrologiques dans le cadre de missions de surveillance des ouvrages en temps réel.

3 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Les résolutions spatiales et temporelles des modèles hydrologiques et plus particulièrement des données d'entée telles que la pluie, sont des facteurs très importants dans la modélisation pluie-débit des bassins. Toutefois, le choix de ces résolutions ne fait l'objet d'aucun consensus et fait encore débat dans la littérature hydrologique.

3.1 Distribution spatiale

Afin de réaliser de bonnes simulations du comportement hydrologique des bassins versants, la qualité des données d'entrée est tout aussi importante que le travail de modélisation. Ceci est d'autant plus vrai dans les zones de montagne, où les gradients de pluie et de température au sein des bassins versants, peuvent s'avérer élevés dans certains cas. L'intérêt de l'utilisation de modèles distribués peut également s'expliquer par une expansion de la quantité des données spatiales, rendue notamment possible par les données des radars, ou des géosatellites permettant un plus fort balayage spatial des données, mais également par une amélioration de la capacité des modèles numériques de terrain, qui deviennent plus précis. Ainsi, spatialiser les données d'entrée des modèles hydrologiques pourrait s'avérer judicieux. Toutefois, on peut supposer qu'un haut degré de spatialisation rendrait la complexité des modèles plus forte, et pourrait dégrader leur robustesse. De plus, bien que les données semblent se multiplier quantitativement, ces dernières ne sont pas toujours fiables d'un point de vue qualitatif. Les résultats de modélisation distribuée se trouveraient alors dégradés.
C'est ainsi que de nombreuses études ont eu pour but de déterminer quelle spatialisation était la mieux adaptée pour répondre aux besoins de modélisation. La littérature concernant cette problématique est ainsi très abondante mais également contradictoire.

- ***Les modèles distribués plus performants que les modèles globaux***

Tout d'abord, de nombreuses études affirment que les modèles distribués donnent de meilleures performances que les modèles globaux.

- L'étude de Booij (2004) consiste à étudier l'impact du changement climatique sur le débit de la Meuse en utilisant trois résolutions spatiales différentes (1 maille, 15 mailles et 118 mailles) du modèle hydrologique conceptuel HBV. Le débit moyen et les extrêmes du bassin à l'exutoire sont bien reproduits par les trois versions du modèle hydrologique en calage et en validation, les résultats deviennent quelque peu meilleurs en augmentant la résolution du modèle. De plus, les différences entre le débit moyen des sous bassins modélisés par les deux modèles distribués est faible. Les débits extrêmes sont généralement mieux simulés par le modèle distribué à 118 mailles pour le calage, et par celui à 15 mailles pour la validation.
- Carpenter et Georgakakos (2006) ont mené également une étude de comparaison d'un modèle global et de modèles distribués pour la simulation d'événements au sein de deux bassins versants situés dans la région semi-aride de l'Oklahoma aux Etats-Unis. L'étude a permis de constater que pour la majorité des évènements sélectionnés, les modèles à haute et faible résolutions spatiales donnent des résultats statistiquement différents pour le

débit de pointe. La version distribuée présente de meilleures performances pour la simulation de ces débits, notamment pour modéliser la magnitude du pic de débit (pour 60% des événements, contre 25 % de surpassement de performance pour le modèle global par rapport au distribué). Le modèle distribué permet également de mieux modéliser le « timing » du pic de crue.

- L'étude de Smith et al. (2004) a permis d'évaluer la réponse du débit à la variabilité spatiale des pluies, au sein du projet Distributed Model Intercomparison Project (DMIP), sur les mêmes bassins versants que l'étude précédente. Les résultats ont alors indiqué qu'un bassin avec un fort degré de variabilité de pluie, suggère l'utilisation d'un modèle distribué.

Lors de l'utilisation de modèles distribués, l'utilisation d'autres points de contrôle de débit à l'intérieur du bassin versant pour le calage des paramètres, peut également être intéressante et pourrait augmenter la précision des performances de simulation de débit à l'exutoire.

- Andersen et al. (2001) ont évalué l'apport de cette information sur la modélisation des débits d'un bassin situé sur la rivière du Sénégal. Ils ont ainsi montré que l'approche consistant à utiliser les données de débit aux points intérieurs pour le calage, pourraient aider à améliorer les simulations à l'exutoire du bassin.
- Une autre étude, celle de Khakbaz et al. (2009)**,** a également évalué l'apport de cette information intérieure des points de contrôle de débit sur les performances des simulations à l'exutoire du bassin versant de la rivière de l'Illinois aux Etats-Unis. Ainsi, leurs résultats montrent également une amélioration des performances du modèle semi-distribué dans la simulation du débit à l'exutoire, lorsque les points intérieurs sont utilisés pour la calibration des paramètres du modèle.

❖ ***Les modèles globaux plus performants que les modèles distribués***

Toutefois, certaines études ont montré au contraire que des modèles à haute résolution spatiale, n'amélioraient pas systématiquement les performances des modèles.

- L'étude de Reed et al. (2004) résume les résultats obtenus lors du projet Distributed Model Intercomparison Project (DMIP). Lors de cette étude les performances de 12 modèles distribués et d'un modèle global ont été évaluées et confrontées sur de nombreux bassins versants aux Etats-Unis. Pour la majorité des bassins, les performances du modèle global dépassent celle des modèles distribués dans beaucoup plus de cas que le contraire. Certains modèles distribués montrent des résultats comparables aux modèles globaux dans beaucoup de bassin et de nettes améliorations dans un ou plusieurs bassins.
- McIntyre et Al-Qurashi (2009) ont testé les performances de modèles pluie-débit sur un bassin versant montagneux et aride. Pour cela, ils ont comparé les résultats du modèle conceptuel IHACRES dans sa version distribuée et dans sa version globale. Ces résultats ont alors montré que la variabilité des pluies permettait d'obtenir de meilleures performances dans la simulation des débits de pointe et des volumes. Les résultats ont également indiqué que les modèles avec le plus petit nombre de paramètres étaient les plus performants et les plus robustes.
- L'étude de Das et al. (2008) a comparé les performances du modèle conceptuel HBV selon différentes résolutions sur un bassin versant d'Allemagne de l'Ouest ayant une altitude moyenne de 550m. Ils ont ainsi utilisé quatre structures différentes du modèle : « globale »

(bassin versant divisé en sous bassins avec des caractéristiques météorologiques (pluie, température, évapotranspiration), de neige, de fonte et d'humidité du sol identiques à l'intérieur de chaque sous bassin), semi-globale (sous bassin divisé en zones avec des valeurs de neige, de fonte et d'humidité du sol identiques pour toutes les zones de chaque sous bassin, mais des variables météorologiques propres à chaque zone des sous bassins) , semi-distribuée (variables météorologiques et valeurs de neige, fonte et humidité du sol différentes entre les zones du sous bassin) et distribuée (sous bassin divisé en cellules d'1km² auxquelles sont attribuées des valeurs uniques aux variables météorologiques ainsi qu'à la neige, la fonte et l'humidité du sol). La spatialisation des données météorologiques a été réalisée en utilisant un krigeage en dérive externe à partir de stations de mesure disposées sur le bassin ou à proximité de ce-dernier. Les résultats de cette étude ont montré que les structures semi-distribuées et semi-globales du modèle donnent de meilleures performances que les structures distribuées et globales. Il attribue cette baisse de performance des modèles distribués à la spatialisation des pluies par krigeage, qui reflèterait alors peu la réelle variabilité des précipitations.

Enfin, Kling et Nachtnebel (2009) ont, quant à eux, montré lors de leur étude sur un bassin versant autrichien (altitude entre 600 et 2700m), portant sur la comparaison spatio-temporelle du bilan hydrique que les deux modèles utilisés (l'un avec une discrétisation semi-distribuée au pas de temps journalier, et le second, une discrétisation distribuée au pas de temps mensuel) fournissent de hauts niveaux de performance pour la simulation de débits et peuvent être considérés comme équivalents en terme d'efficacité pour reproduire des observations. De plus, pour la simulation des dynamiques temporelles, les modèles s'accordent bien pour les principales données et sorties du système, avec des accords légèrement moins bons pour les sous-composants, comme la fonte de neige par exemple. Dans le domaine spatial, la corrélation entre les modèles est significativement plus mauvaise. Les différences sont principalement reliées aux différentes approches de calage et ne sont pas dépendantes de la discrétisation spatio-temporelle.

3.2 Distribution temporelle

La résolution temporelle des données d'entrée telles que les pluies, jouent un rôle déterminant dans la réponse hydrologique des bassins versants fournie par le modèle.
Le degré de distribution temporelle le plus utilisé par les modèles hydrologiques, est le pas de temps journalier, plus pour des raisons de disponibilité des mesures plutôt que pour des raisons hydrologiques. Cependant, l'évolution de la qualité et la quantité des données hydro-climatiques nécessaires en entrée des modèles hydrologiques, peut laisser penser qu'un pas de temps plus fin aurait peut-être un meilleur potentiel pour simuler des débits. En effet, ces résolutions temporelles plus fines pourraient mieux représenter les processus hydrologiques complexes et donc pourraient permettre des modélisations de débit plus performantes, notamment dans la modélisation des débits de pointe (représentation de la dynamique du bassin versant à un pas de temps mieux adapté).

Toutefois, même si la résolution spatiale à adopter pour la modélisation des débits a été largement analysée et étudiée, rares sont les études évaluant la variabilité temporelle des modèles, notamment au sujet des données d'entrée telles que la pluie.

La thèse de Mathevet (2005) a eu pour but de déterminer quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire étaient les mieux adaptés. La première étape de sa thèse était de comparer les performances de vingt modèles hydrologiques au pas de temps horaire, afin d'en dégager ceux présentant les meilleures performances. Il a ainsi remarqué une forte baisse des performances entre calage (critères de performance de type Nash et Sutcliffe (1970) entre 50 et 70%) et validation (critères baissant de 20 à 40%), attribuable à la faible durée des chroniques de calage (2 à 3 ans). Cela témoigne d'une faible robustesse de ces modèles (faible capacité des modèles à s'adapter à une période indépendante de celle de calage), accentuée par l'effet du pas de temps, puisqu'au pas de temps horaire, la variance des débits est plus forte qu'à des pas de temps plus grands. Il a également comparé ces résultats avec ceux obtenus par des modèles au pas de temps journalier de la thèse de Perrin (2000) portant sur une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Mathevet (2005) a constaté que la robustesse des modèles testés au pas de temps horaire était plus faible que celle des modèles de Perrin (2000) au pas de temps journalier. Cependant, les modèles, les bases de données et les durées de période de calage utilisés dans les deux études sont différents.
D'autre part, un second chapitre de la thèse de Mathevet (2005) porte sur l'évaluation des performances de ces vingt modèles horaires, au pas de temps journalier. Cela avait pour but de déterminer si les structures des modèles étaient efficaces aux deux pas temps ou si au contraire elles étaient uniquement adaptées à un seul pas de temps. Ces nouvelles simulations donnent des critères en calage semblables aux résultats horaires (performance entre 50 et 70%) et une chute de ces performances en validation de l'ordre de 20 à 30%, soit une très légère, voire inexistante, amélioration de la robustesse.
Enfin, le but ultime de cette thèse était de construire un modèle hydrologique pouvant fonctionner au pas de temps horaire et au pas de temps journalier. Ce modèle est finalement capable d'obtenir d'aussi bons résultats aux deux pas de temps.

D'autres études ont également eu pour but de comparer les performances obtenues à différents pas de temps.
Finnerty et al. (2009) a mené une étude évaluant la sensibilité du modèle Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC-SMA) aux résolutions spatiales (4x4 km² à 256x256 km²) et temporelles (une, trois et six heures) des données de pluie issues du radar Next Generation Weather Radar (NEXRAD). Les résultats ont montré que les différents composants du modèle sont sensibles aux échelles spatiales et temporelles de pluie provenant du radar NEXRAD. L'étude a révélé une augmentation générale du débit de surface, des flux internes, du débit de base, et de l'afflux total du canal, lorsque l'on passe à des résolutions spatiales et temporelles plus fines. Cette augmentation est compensée par une évapotranspiration plus faible. Toutefois, il s'agit du débit de surface qui est le plus sensible aux échelles spatiales et temporelles. Cette augmentation de débit lorsque l'on passe à des résolutions spatiales et temporelles plus fines du modèle hydrologique est attribuée à une prise en compte de moyennes, dans l'espace ou dans le temps, de certaines caractéristiques du bassin comme l'intensité, la durée de la pluie et le débit généré par les événements pluviométriques. Le pas de temps plus fin permettrait ainsi de modéliser avec plus de précision les caractéristiques physiques des processus pluie-débit dans la zone d'étude.

Wang et al. (2009) ont étudié l'impact de la résolution temporelle du modèle hydrologique sur la prévision d'événements de crue. Ces résultats ont montré que des données de pluies

de haute résolution temporelle permettent de meilleures performances pour l'estimation du débit à long et court termes, en particulier en cas d'événements orageux (utilisation de données au pas de temps 10 minutes). Les résultats démontrent donc que les données de pluie à haute résolution sont cruciales pour modéliser le débit, précisément pour l'analyse des débits à court terme.
Toutefois, cette étude fut discutée par Littlewood et al. (2011), qui ont comparé les résultats de Wang et al. (2009) à leur propre étude (Littlewood et Croke (2008)). En effet, les performances entre les deux études diffèrent. Les résultats de Littlewood et al. (2008) donnent de très bonnes performances (meilleures que Wang et al. (2009)) et assez similaires entre les pas de temps journalier, 12h, 6h, 4h, 2h et 1h. Inversement, Wang et al. (2009) trouvaient des résultats très contrastés entre les différents pas de temps.
Wang et al. (2011) ont justifié ces écarts de performance entre les deux études par des différences de contexte (topologie, surface, couvert végétal et processus hydrologiques des bassins versants). La diversité des résultats proviendraient également selon eux, d'une utilisation de périodes de simulation totalement différentes, puisque d'une part (Wang et al. (2009)) dix événements orageux étaient étudiés (correspondant à une durée totale de 24h par événement) et de l'autre (Littlewood et al. (2008)) une période continue de sept mois était utilisée. Pour une étude d'événements orageux, une intensité et une distribution précises de pluie sont cruciales pour prédire correctement les pics de crue dus à ces événements. Ce qui permet à Wang et al. (2011) d'expliquer pourquoi le modèle utilisant des données à 10 minutes d'intervalle peut prédire plus précisément les débits d'orage, en comparaison aux données horaires.

Ainsi, les études visant à évaluer la sensibilité d'un modèle à sa résolution temporelle donnent des résultats contradictoires. Certaines ont montré que les modèles étaient peu sensibles, d'autres davantage. Toutefois, ces résultats restent très dépendants des contextes d'études ainsi que de la structure des modèles utilisés.

3.3 Sensibilité des paramètres aux résolutions spatiales et temporelles

Ces choix de résolutions spatiale et temporelle peuvent avoir un impact sur les paramètres. Des études ont essayé de comprendre les liens et la dépendance entre ces résolutions et la détermination des paramètres afin de pouvoir mieux les comprendre et les estimer avec une moindre incertitude.
Ces dernières études (Wang et al. (2009) et Littlewood et al. (2008)) ont également étudié les effets de la résolution temporelle sur les paramètres des modèles hydrologiques. Une nouvelle fois, leurs résultats divergent et sont discutés dans les articles Littlewood et al. (2011) et Wang et al. (2011).
Wang et al. (2009) considèrent que les paramètres ayant une dimension non temporelle et ceux à réponse très lente dans les réservoirs les plus bas, ne sont pas dépendants du pas de temps et doivent ainsi être constants entre ces derniers. A contrario, les paramètres à réponse rapide qui représentent principalement les processus hydrologiques dans les couches les plus hautes du sol dépendent de la résolution temporelle. Il a également été conclu que les valeurs des paramètres du modèle sont influencées non seulement par la résolution temporelle du calcul mais aussi par la relation intensité–durée de la pluie.
Les paramètres de Littlewood et al. (2008) dépendent du pas de temps, y compris ceux avec une faible réponse et ceux sans dimension de temps. Ils ont constaté des bonnes

corrélations entre les paramètres et le pas de temps (delta t) pour tous les paramètres, même ceux ne dépendant pas du temps.
D'autres études ont également étudié la sensibilité des paramètres aux résolutions spatiales et temporelles :

- Ostrowski et al. (2010) a mené une étude conduisant à des résultats très proches de ceux de Wang et al. (2009). Il a partiellement confirmé que les paramètres sans dimension de temps sont indépendants du pas de temps. Son étude l'a également amené à la conclusion qu'il est logique que les paramètres avec une dimension temporelle dépendent du pas de temps et que si ces derniers ont la même dimension que l'intensité de la pluie, la dépendance serait plus forte.
- L'étude de Cullmann et al. (2006) a eu pour objectif d'analyser la sensibilité des paramètres d'un modèle à différentes échelles spatiales (sept grilles de résolution allant de 500 m à 3500 m de côté) et temporelles (horaire et journalier). Il s'est essentiellement intéressé aux paramètres influant sur le module sol du modèle. Ses résultats ont permis de montrer que le modèle est très sensible aux résolutions spatiales et temporelles et que les paramètres ne peuvent pas être transférés entre résolutions sans être recalibrés.
- Tang et al. (2007) compare différentes méthodes d'analyse de sensibilité du modèle global Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC-SMA), et applique ces méthodes à différentes résolutions temporelles (1h, 6h et 24h) sur deux bassins versants. Les résultats de cette étude ont montré que les paramètres du modèle étaient tout aussi largement impactés par la méthode d'analyse utilisée que par la résolution temporelle adoptée. Toutefois, les différences obtenues entre les deux bassins, suggèrent de fortes influences des caractéristiques physiques locales sur la sensibilité des résultats des méthodes.

Au final, ces résultats sont encore une fois fortement dépendants de la façon dont le modèle a été construit. En effet, le calcul du débit moyen sur un pas de temps Δt peut résulter soit de l'intégration d'une équation instantanée sur Δt, soit d'une équation directement écrite à la résolution Δt. Dans ce dernier cas, les paramètres et les performances du modèle seraient alors totalement dépendants du pas de temps de fonctionnement, alors que dans le cas d'équations instantanées intégrées sur Δt, ils le seront probablement moins.

3.4 Bilan de la revue bibliographique

La revue bibliographique a permis de dresser un état des études menées dernièrement, et de remarquer que les avis divergent concernant les résolutions spatiales et temporelles à adopter. De plus, les relations entre ces résolutions et les paramètres ne semblent pas être clairement définies, les études pouvant très nettement s'opposer.
Toutefois, les résultats dépendent fortement du contexte d'étude, influencé par la structure des modèles utilisés, la disponibilité des données, les caractéristiques physiographiques et hydrologiques du bassin versant et de l'objectif de l'étude.
De plus, cette revue bibliographique a montré que le problème de résolutions spatio-temporelles a souvent été traité de façon indépendante alors que ces deux types de problèmes peuvent être liés. L'étude d'Obled et al. (2008) a révélé que pour la modélisation hydrologique des crues, les échelles d'espace et de temps sont liées par la variabilité (spatiale/temporelle) des pluies et par les caractéristiques fonctionnelles des bassins versants qui filtrent plus ou moins fortement les fréquences des entrées.

4 METHODOLOGIE

L'objectif de ce stage est d'évaluer la sensibilité des performances, de la robustesse et des paramètres d'un modèle pluie-débit à sa résolution spatiale et temporelle. Trois degrés de discrétisation spatiale ont alors été envisagés: un modèle global (à une maille, représentant le bassin versant dans toute sa superficie), un modèle distribué à dix mailles et un modèle distribué à cent mailles. Ces choix ont été établis de façon à avoir un facteur 10 entre chaque distribution spatiale du modèle.
Concernant la résolution temporelle, deux pas de temps de fonctionnement ont été comparés : horaire et journalier, le pas de temps horaire étant très utilisé dans la prévision et l'estimation des débits de pointe, et le pas de temps journalier dans la modélisation des débits de façon générale.

4.1 Le modèle hydrologique : CEQUEAU

4.1.1 Présentation

- ***Présentation générale du modèle***

Le modèle utilisé lors de ce stage effectué au laboratoire LNHE d'EDF-R&D, est le modèle hydrologique Pluie-Débit distribué, CEQUEAU. Ce dernier est un modèle hydrologique initialement développé à l'Institut National de la Recherche Scientifique – INRS - Eau à la ville de Québec, Canada par Morin et al. (1981). Le modèle permet de simuler en sortie un ou plusieurs débits situés au sein du bassin versant étudié, à partir de données d'entrées de pluie et de température de l'air. Par la suite, ce modèle pluie-débit a été repris et développé à EDF R&D depuis une dizaine d'années.

Le modèle CEQUEAU comporte deux parties principales qui sont la fonction de production et la fonction de transfert. Ces deux fonctions décrivent les différents processus ayant lieu au cours de l'écoulement de l'eau, depuis sa chute sous forme de précipitations jusqu'à son écoulement vers l'exutoire du bassin versant. Ces fonctions sont schématisées dans la Figure 1. Dans ce modèle, le bassin versant est découpé en mailles (voir 4.1.2), au sein desquelles ces différents processus ont lieu. Ces mailles sont aussi liées par la fonction de transfert.

La fonction de production effectue un bilan en eau sur chaque maille et à chaque pas de temps. Les principaux composants de ce bilan sont la pluie, la fonte de neige, l'évapotranspiration, l'infiltration ainsi que les échanges avec les réservoirs superficiels (sol) et plus profonds (nappe).

A la suite de cette fonction de production, on obtient un débit de production pour chaque maille, disponible pour le transfert en rivière. La fonction de transfert permet alors de répartir temporellement mais aussi de propager les débits de production au sein du bassin versant, de maille en maille jusqu'à son exutoire.

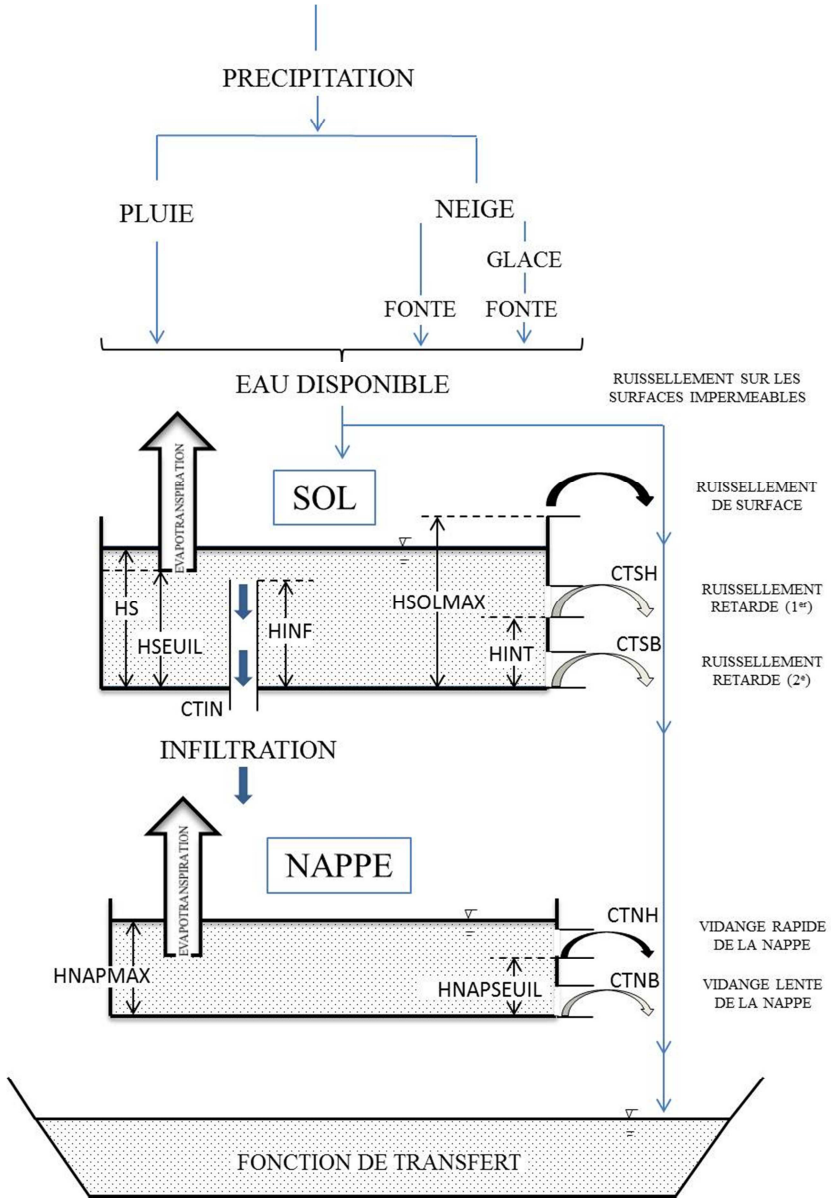


Figure 1: Fonction de production et fonction de transfert d'une maille du modèle CEQUEAU

- ***Fonction de production :***

La fonction de production décrit l'écoulement vertical de l'eau, à partir du moment où elle précipite jusqu'à son écoulement dans la rivière. L'eau atmosphérique peut précipiter sous deux formes possibles : pluie ou neige. La discrimination pluie/neige est modélisée grâce aux données de pluies et de température de l'air. La modélisation de l'accumulation et de la fonte de la neige est effectuée par un module spécifique. Le module neige habituellement utilisé avec le modèle CEQUEAU a été remplacé par le module CEMANEIGE de la thèse de Valéry (2010), car les équations composant ce module sont plus faciles à écrire au pas de temps horaire. Le module CEMANEIGE permet une distribution spatiale en bandes d'altitude. Pour chaque zone, la température et la précipitation du bassin sont extrapolées à l'aide des corrections altitudinales. Dans notre cas, une seule bande d'altitude par maille a été considérée.

Toutefois, toute la précipitation atmosphérique ne va pas participer à l'écoulement. En effet, une partie de cette précipitation va repartir à l'atmosphère sous forme d'évapotranspiration. Cette dernière est obtenue à partir de la formule de Oudin (2004) qui calcule l'évapotranspiration potentielle à partir de la température et du rayonnement.

$$ETP = \begin{cases} \frac{Re(\varphi, J)}{\lambda\,\rho}\left(\frac{T+5}{100}\right) & si\ T > -5°C \\ 0 & sinon \end{cases}$$

Avec Re : rayonnement extraterrestre ($MJ.m^{-2}.jr^{-1}$)

- ϕ : latitude (rad)
- J : jour calendaire
- T : température moyenne (en °C) qui constitue une donnée d'entrée du modèle
- λ : chaleur latente de vaporisation de l'eau ($MJ.kg^{-1}$)
- ρ : masse volumique de l'eau ($kg.m^{-3}$)

On notera que la formule de Thornthwaite, habituellement utilisée avec le modèle CEQUEAU pour calculer l'ETP, a été remplacée par la formule de Oudin (2004), qui permet de calculer plus facilement l'ETP à différents pas de temps.

L'eau ainsi disponible à l'écoulement transite au sein de la fonction de production dans différents réservoirs (sol et nappe) connectés entre eux. La Figure 1 ci-dessus, montre la représentation des différents processus ayant lieu au cours de la fonction de production, et qui permettent aux deux réservoirs (sol et nappe) de communiquer. C'est au sein de ces deux réservoirs qu'ont lieu les principaux mécanismes menant à l'établissement du bilan hydrique de chaque maille.

- ***Fonction de transfert***

A la suite de la fonction de production, on obtient un volume d'eau disponible pour l'écoulement pour chaque maille du modèle. Ces volumes vont être transférés au sein de la maille (transfert intra-maille) et de maille amont vers maille aval jusqu'à l'exutoire en suivant le réseau hydrographique, via la fonction de transfert (Figure 2). Ainsi à chaque maille, le volume disponible pour être transité est le volume de production ajouté au volume d'eau venant de la maille amont. Cette propagation est effectuée à partir de l'équation 1D de l'onde diffusante (solution d'Hayami à célérité et diffusivité indépendantes du débit), différemment de la structure originelle de CEQUEAU (« cascade » de réservoirs linéaires).

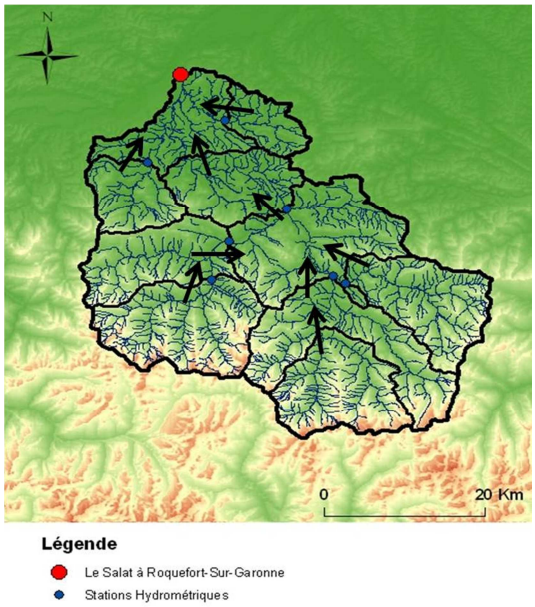


Figure 2: Fonction de transfert du modèle CEQUEAU

4.1.2 Maillage du modèle et spatialisation des données de forçage

Dans le modèle distribué CEQUEAU, selon le degré de discrétisation spatiale adopté, un découpage du bassin versant en un ensemble de surfaces élémentaires, appelés mailles, est nécessaire au modèle. Les données d'entrée de pluie et de température de l'air utilisées ici, sont des données ponctuelles et ne sont disponibles qu'en certains points du bassin versant ou à proximité de celui-ci. Ces données doivent alors être spatialisées selon l'échelle de spatialisation choisie. Ainsi, à chaque maille du modèle, seront calculées et attribuées, une pluie, une température de l'air et une évapotranspiration potentielle au pas de temps horaire ou journalier.

En premier lieu, afin de découper chaque bassin versant en dix et cent mailles, un outil a été utilisé permettant de réaliser le maillage correspondant, utilisable par CEQUEAU, à partir des points de contrainte (mesures hydrométriques à l'intérieur du bassin versant) et la surface moyenne des mailles imposés. Cet outil utilise un Modèle Numérique de Terrain (ici au pas de 100m) pour effectuer le maillage.
Le Tableau 1 répertorie les surfaces moyennées de la maille pour chaque bassin et chaque distribution. Pour les bassins de la Meuse et de la Moselle, les surfaces des mailles pour les distributions spatiales à 10 et 100 mailes, ont un écart-type plus important que pour les autres bassins. Cela provient du fait que pour ces deux bassins, plus de dix points de contrainte (mesures hydrométriques internes) étaient disponibles. Il a ainsi fallu faire un choix dans les postes hydrométriques pour la réalisation du maillage à 10 mailles. En effet, le maillage doit obligatoirement passer par les points de contraintes donnés. Quand le nombre de points de contrainte disponibles par bassin versant était supérieur à 10, ceux permettant d'avoir des mailles avec des surfaces relativement homogènes ont été sélectionnés, afin de construire le maillage à 10 mailles. Pour la distribution à 100 mailles, tous les points de contraintes ont été utilisés puisque leur nombre n'excédait pas 100.

Bassin Versant	Distributions spatiales	Moyenne (km²)	Ecart-Type (km²)
Alagnon	Global	993.5	N.A
	D10	99.4	27.3
	D100	9.9	0.9
Arroux	Global	3180.9	N.A
	D10	318.1	137.4
	D100	31.8	2.8
Durance	Global	2282.9	N.A
	D10	228.3	58.1
	D100	22.8	1.6
Meuse	Global	7795.2	N.A
	D10	779.5	392.8
	D100	78	12
Moselle	Global	9384	N.A
	D10	938.4	234.6
	D100	93.8	23.2
Salat	Global	1579.5	N.A
	D10	158	52.5
	D100	15.8	1.6

Tableau 1: Tableau récapitulatif des surfaces moyennes de maille et des écart-types associés, pour chaque bassin et chaque distribution spatiale

Pour construire des forçages météorologiques (pluie et température) adaptés à l'échelle des mailles du modèle, une méthode de spatialisation est nécessaire. La méthode de spatialisation utilisée avec le modèle CEQUEAU est le krigeage en dérive externe, permettant une modélisation de l'effet orographique. Ce dernier spatialise les données de forçage en deux dimensions mais également selon l'altitude. Les paramètres du modèle de spatialisation sont estimés en même temps que ceux du modèle hydrologique.

4.1.3 Optimisation des paramètres du modèle CEQUEAU

Le modèle CEQUEAU développé à EDF R&D possède une trentaine de paramètres libres (Annexe 1). Ce jeu de paramètres est unique pour toutes les mailles du modèle. Afin de minimiser les écarts entre les débits observés et les débits simulés, ces paramètres doivent être calés selon des critères de performance, qui sont les fonctions objectifs pour l'optimisation. Ces fonctions objectifs évaluent la capacité des modèles à simuler des débits, en les comparant aux débits observés.

- ***La procédure multi-objectifs CARAMEL***

La procédure de calage des paramètres utilisée dans le modèle CEQUEAU est la procédure multi-objectifs CARAMEL (CAlage RApide Multi-objectif EvoLutionnaire). Il s'agit d'un algorithme dit « génétique », visant à faire évoluer un ensemble de vecteurs de paramètres selon un schéma itératif. Cette procédure consiste, à partir d'une population initiale de jeux de paramètres, à calculer les critères de performance associés. L'algorithme sélectionne par la suite un certain nombre de vecteurs de paramètres « candidats ». La nouvelle génération de vecteurs de paramètres est alors mise à jour en fonction des performances de ces

nouveaux jeux. Cette procédure permet ainsi de balayer une large gamme de jeux de paramètres et ainsi d'éviter d'atteindre des optimums locaux.

❖ ***Choix des fonctions objectifs***

Des fonctions objectifs ont été sélectionnées pour effectuer cette procédure de calage. D'après Gupta et al. (2009), l'un des critères les plus largement utilisés dans le calage et l'évaluation des modèles hydrologiques est le critère de Nash et Sutcliffe (1970). Les valeurs de ce critère sont comprises entre -∞ et 1. La simulation de débit est optimale quand le critère de Nash et Sutcliffe (NSE) (Eq.1) est égal à 1 (les débits simulés sont égaux aux débits observés). Lorsque ce critère est nul, cela signifie que la simulation n'est pas meilleure qu'un modèle dit naïf pour lequel la moyenne observée est appliquée comme prédiction de débit pour toute la chronique simulée. Et enfin dans le cas où ce critère est négatif, la simulation est pire que celle obtenue avec le modèle naïf.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i^n \left(Q_{obs}^i - Q_{sim}^i\right)^2}{\sum_i^n (Q_{obs}^i - \overline{Q_{sim}})^2} \qquad \text{Eq. 1}$$

Avec i : le pas de temps utilisé pour la simulation
Q_{obs} : le débit observé
Q_{sim} : le débit simulé
$\overline{Q_{sim}}$: le débit simulé moyen

Trois fonctions objectifs ont été utilisées lors de ce stage :

- Le critère de Nash sur la racine des débits au niveau des points intérieurs $\left(NSE_{\sqrt{Q}}\right)$

Ce critère permet d'obtenir de bons résultats à la fois pour les débits d'étiage et les débits de crue. Il s'agit également d'un critère composite dont le poids de chaque simulation est fonction de la superficie du sous-bassin versant.

- Le critère de Nash et Sutcliffe sur le régime de l'exutoire $\left(NSE_{régime}\right)$

L'optimisation sur le régime à l'exutoire permet au modèle de respecter le bilan hydrique annuel.
Une optimisation à la fois à l'exutoire et au niveau des points intérieurs du bassin, pourrait permettre au modèle d'être plus précis dans sa modélisation du débit à l'exutoire, en étant aidé du calage des débits au niveau des points intérieurs du bassin, qui alors mieux modélisés pourraient permettre une meilleure modélisation du débit à l'exutoire.

- Le critère de Nash sur le débit à l'exutoire combiné à un critère de biais sur le volume à l'exutoire $\left(NSE_Q \ \& \ C_{biais}\right)$ (Eq.2).

$$NSE_Q \ \& \ C_{Biais} = \left(1 - NSE_Q\right)^2 \times \left(1 + \left|\frac{\overline{Q_{sim}}}{\overline{Q_{obs}}} - 1\right|\right) \qquad \text{Eq. 2}$$

Ce troisième critère est largement utilisé à EDF-DTG, pour évaluer leurs simulations. Ses valeurs sont comprises entre 0 et + ∞. Dans le cas où cette combinaison de critères vaut 0, le critère NSE_Q est égal à 1 (la simulation de débit est parfaite). Au contraire, si la combinaison de critères tend vers + ∞, cela indique que soit la valeur de NSE_Q est très négative, soit que $\frac{\overline{Qsim}}{\overline{Qobs}}$ tend vers une valeur extrêmement grande (donc que $Q_{sim} > Q_{obs}$) ou petite ($Q_{sim} < Q_{obs}$), ou la combinaison de ces deux facteurs. Dans ces derniers cas, cela signifie que la simulation est de mauvaise qualité.

- **Stratégie de calage : Création d'une bibliothèque de paramètres afin de faciliter et de rendre plus rapide l'optimisation**

Lors de la mise en route de l'optimisation du modèle CEQUEAU, la procédure utilisée généralement est de créer une population initiale de paramètres de façon aléatoire, mais comprise entre des bornes, afin d'obtenir les premiers candidats. Cependant, cette procédure peut être très couteuse en temps, notamment pour le pas de temps horaire. Ainsi, dans le but de vouloir rendre les calculs plus rapides, une liste de jeux de paramètres a été créée, de façon à ne pas influencer de manière trop importante le modèle et le rendre trop dépendant de la population initiale. Pour ceci, des premières optimisations ont été lancées sur chaque bassin versant (maillage 10, au pas de temps journalier, et avec 5000 runs). Ces optimisations ont fourni alors une série de jeux de paramètres par bassin. Une liste de dix jeux de paramètres par bassin versant, a par la suite été sélectionnée au hasard, permettant de constituer une bibliothèque de paramètres formant la population initiale de chaque modèle, utilisable pour tous les bassins versants de cette étude.

4.1.4 Evaluation du modèle CEQUEAU

A la suite de la phase de calage, le modèle CEQUEAU rend une série de jeux de paramètres jugés « meilleurs » en terme de performance (fonctions objectifs). Cette série est appelée le front de Pareto. Celui-ci contient une série de jeux de paramètres classés selon les valeurs de performance des différentes fonctions objectifs. Ces jeux de paramètres ne peuvent être dominés en termes de performances par d'autres jeux, sans que l'un des autres critères n'en soit dégradé (Figure 3).
Pour la suite de ce mémoire, les jeux de paramètres présentant le meilleur compromis entre le critère de Nash sur la racine des débits moyennés sur les points de contrôle du bassin (NSE_{RQ} composite), et ce même critère mais sur la racine des débits à l'exutoire (NSE_{RQ} à l'exutoire), seront étudiés. En effet, le critère de Nash sur les régimes et le critère de Nash associé à un critère de biais sur le volume ont été écartés des interprétations. Ils étaient intéressants pour le calage des paramètres afin de prendre en compte divers objectifs de calage, mais très compliqués à interpréter et ne permettant pas de répondre aux objectifs du stage.
Comparer ces deux critères permet aussi de répondre à une autre attente du stage qui est d'évaluer la capacité d'un modèle à simuler des débits à l'exutoire en étant calé avec un critère composite (sur les débits aux points intérieurs du bassin). Les critères de performance parmi ceux du front de Pareto, qui regroupaient les meilleurs jeux de paramètres en terme

de performance NSE_{RQ} composite et NSE_{RQ} à l'exutoire ont alors été sélectionnés dans un premier temps.
Dans un second temps, un seul jeu de paramètres a été sélectionné pour les interprétations. Ce critère de compromis a été obtenu en prenant le point se situant au même rang de chaque liste de critères. Il y a ainsi autant de jeux de paramètres de part et d'autre de ce point (Figure 3). Ceci permet de normaliser leur poids puisque ces deux critères ne sont pas bornés de la même façon.

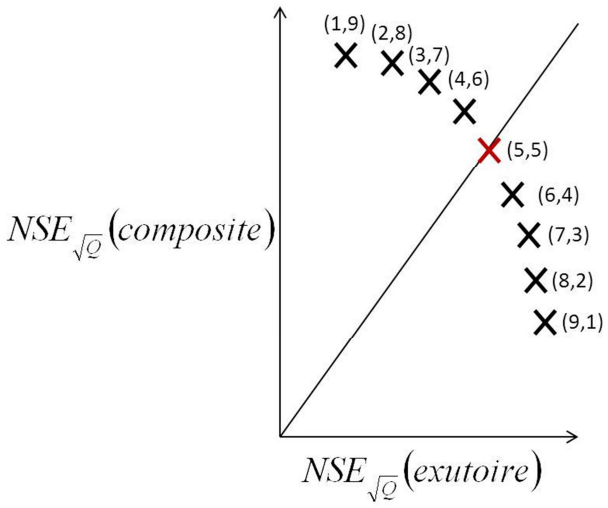


Figure 3: Schéma du front de Pareto représentant le critère NSE_{RQ} composite (points intérieurs) en fonction du critère NSE_{RQ} à l'exutoire. La croix rouge représente les critères NSE_{RQ} composite et NSE_{RQ} à l'exutoire avec le jeu de paramètres ayant le même rang dans chaque liste de critères.

Il est important de noter que pour le modèle global, le critère NSE_{RQ} composite obtenu à partir des débits des points intérieurs du bassin et le critère NSE_{RQ} à l'exutoire, obtenu à partir du débit à l'exutoire, sont les mêmes, puisque seul le débit à l'exutoire est pris en compte dans ce cas-là.

Une comparaison de ces critères obtenus avec les six différents schémas spatio-temporels de modélisation a alors été réalisée. Toutefois, afin de se placer dans les mêmes conditions pour les deux pas de temps, et de pouvoir comparer des critères équivalents, les critères au pas de temps horaire ont été calculés sur les débits journaliers obtenus en moyennant les débits horaires de chaque jour.

L'objectif principal de ce stage est d'évaluer les performances et la robustesse des différents schémas spatio-temporels de modélisation. Une procédure de split sample test (Klemes, 1986) a été effectuée (Figure 4). A partir de toute la durée de chronique disponible (1995-2005), cette procédure consiste à séparer les chroniques de données en deux périodes de durée égale, 1995-2000 qu'on nommera P1, et 2000-2005 qu'on nommera P2. Dans un premier temps, des calibrations de séries de paramètres sur la période P1 et sur la période P2 (phases de calage) ont été réalisées séparément. Puis les paramètres de la période P1 sont utilisés pour simuler les débits de la période P2 et inversement pour les paramètres de la période P2 servant à simuler les débits de P1 (phase de validation). Afin d'évaluer la robustesse du modèle, c'est-à-dire la capacité du modèle à s'adapter à un changement de

données, les performances obtenues pendant la phase calage et celles obtenues en phase de validation sont comparées.

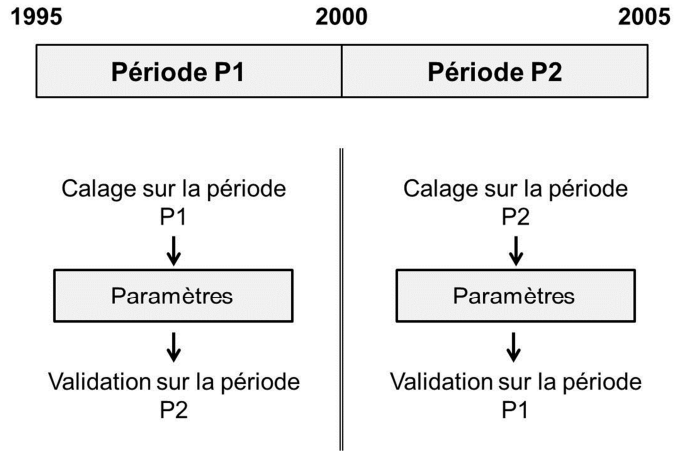


Figure 4: Procédure de split sample test

4.2 Présentation des bassins versants

La sensibilité des performances, de la robustesse et des paramètres selon divers schémas spatio-temporels du modèle CEQUEAU, a été effectuée sur un échantillon de six bassins versants. Les influences de l'Homme sur cet échantillon sont considérées comme peu significatives (pas de présence de barrage, de canal…). Les bassins versants retenus pour ce stage sont ceux de l'Alagnon à Lempdes (Haute-Loire (43)), de l'Arroux à Digoin (Saône et Loire (71)), de la Durance à la Clapière (Hautes-Alpes (05)), de la Meuse à Montcy-Notre-Dame (Ardennes (08)), de la Moselle à Hauconcourt (Moselle (57)) et enfin du Salat à Roquefort-sur-Garonne (Haute-Garonne (31)).

- ***Intérêts du choix de ces bassins versants pour EDF***

Ce panel de bassins intéresse tout particulièrement EDF, puisque dans le cadre de leur mission de protection d'ouvrages de production situés à proximité de cours d'eau, mais également de maitrise de leurs impacts sur l'environnement, la modélisation de débit peut s'avérer primordiale. En effet, certains bassins se situent en zones de montagne (la Durance, le Salat et l'Alagnon), à l'amont d'installations hydrauliques, telles que des barrages hydroélectriques. Sur d'autres, comme ceux de la Meuse et de la Moselle, des centrales nucléaires d'EDF sont installées le long des rives (centrales de Chooz et de Cattenom).

- ***Répartition géographique et diversité morphologique et de surfaces***

La répartition géographique (Figure 5) des bassins versants permet de couvrir des conditions climatiques diverses (continental, de montagne et océanique).
Ce choix est également intéressant du fait que cet ensemble permet de balayer une large gamme de superficies de bassins versants (entre 900 et 10000 km²) (Figure 6). La Figure 7

montre également que les bassins se trouvent dans des contextes morphologiques variés puisque l'échantillon de bassins versants contient des bassins de montagne (Durance, Salat et Alagnon) et de plaine (Arroux, Meuse et Moselle).
Cette diversité permet d'obtenir des résultats assez généraux, bien que le faible nombre de bassins versants limitera la généralité des conclusions.

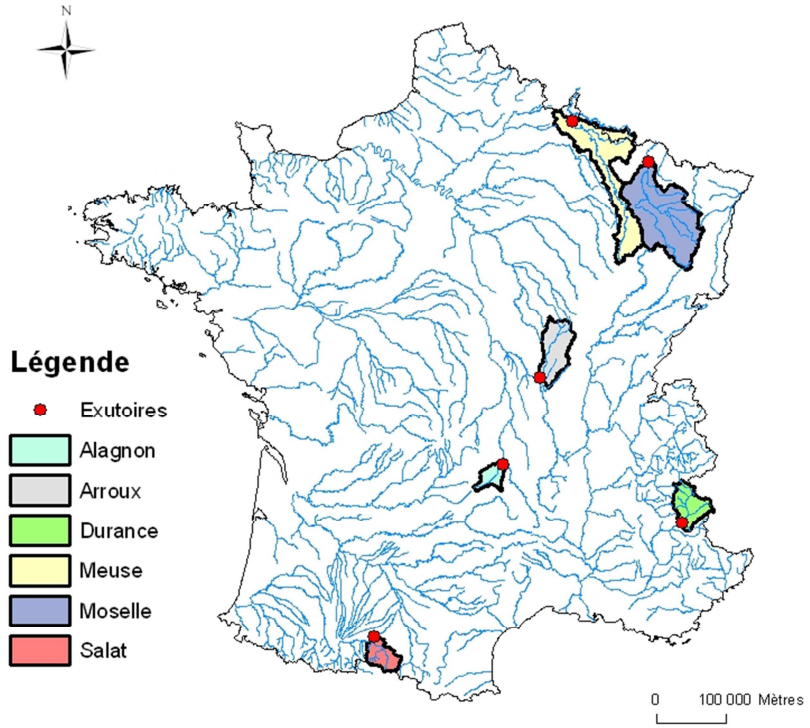


Figure 5: Localisation géographique des bassins versants étudiés

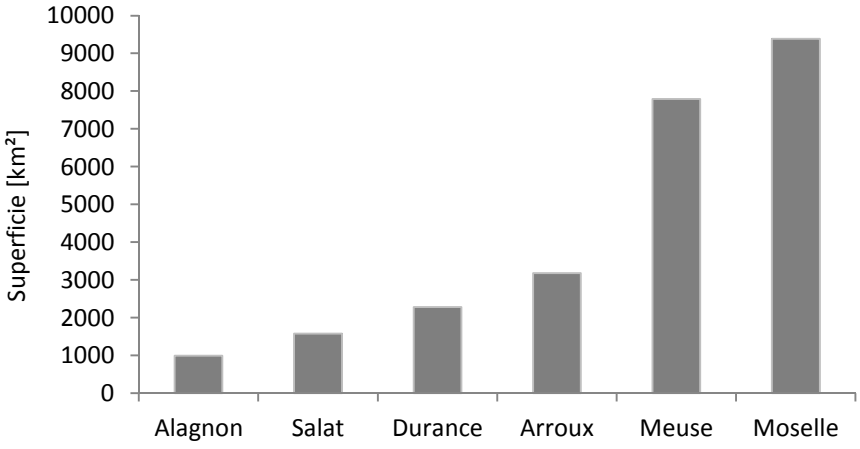


Figure 6: Superficies des bassins versants étudiés

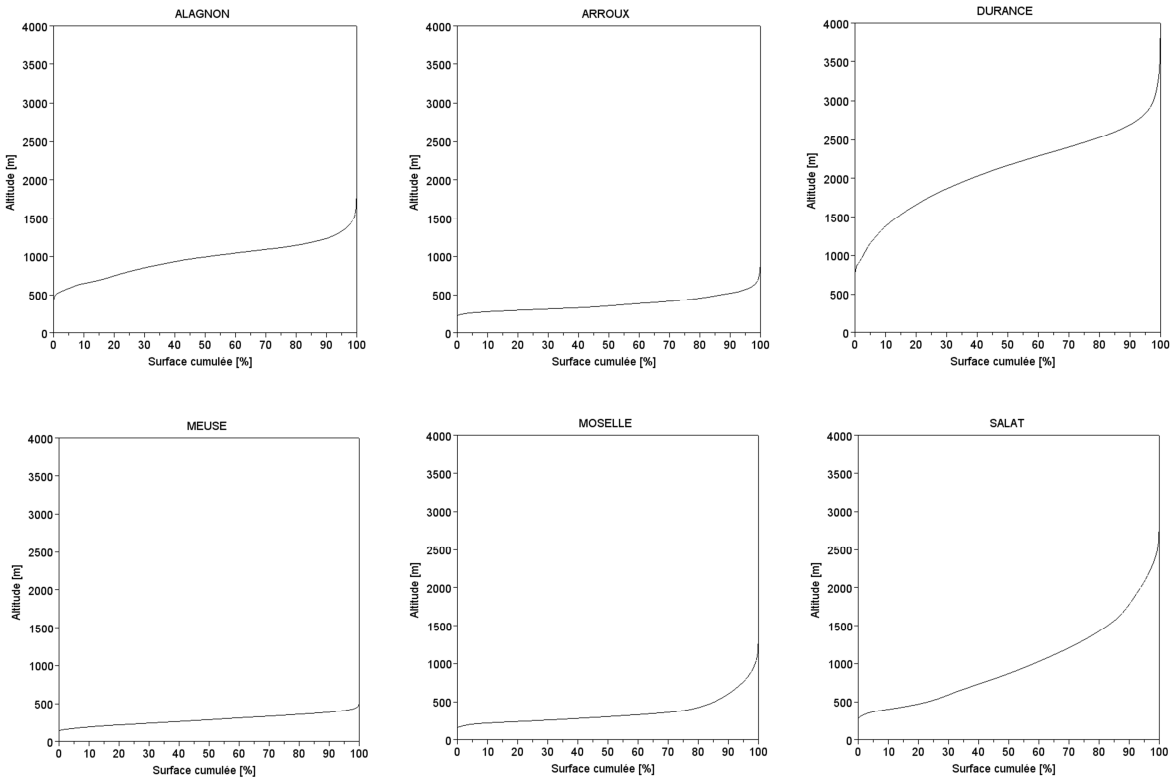


Figure 7: Courbes hypsométriques des bassins versants étudiés

4.3 Données climatiques et hydrologiques

Les données utilisées en entrée du modèle CEQUEAU sont des données ponctuelles de pluie, de température (données de forçage) et de débit (données pour la calibration du modèle) au pas de temps horaire et journalier. Ces données s'étendent sur dix ans, du 01 /08/1995 et le 31/07/2005 (années hydrologiques). L'une des conditions concernant les données est que les postes utilisés au pas de temps horaire doivent être également présents au pas de temps journalier. Cependant, il peut y avoir un ajout de postes pour ce dernier pas de temps (pour les postes pluviométriques), les données disponibles étant plus denses.
Le schéma des six bassins versants et la position des postes de pluie, de température et de débit pour chacun est disponible en Annexe 2.

4.3.1 Données climatiques

❖ ***Les données pluviométriques***

Les données de pluie au pas de temps horaire, proviennent de postes pluviométriques de Météo France. Ces dernières ont été également agrégées au pas de temps journalier, pour la modélisation à ce pas de temps. Des données provenant de la base de données d'EDF-DTG ont été également ajoutées pour ce pas de temps.
La Figure 8 représente la densité de postes pluviométriques pour 100 km² par rapport à la superficie. Cette figure indique ainsi que pour le pas de temps journalier (en bleu) tous les

bassins sont au-dessus de la limite conseillée par Schaake et al. (2000) d'après Oudin (2004). Cette limite indique le nombre minimal de pluviomètres nécessaires en fonction de la superficie du bassin versant afin d'avoir une connaissance suffisante de la pluie. Pour le pas de temps horaire (en rouge), deux bassins sont en dessous de cette limite, l'Alagnon à Lempdes et le Salat à Roquefort-Sur-Garonne. Le modèle horaire a été alors quelque peu modifié de sortes de pouvoir intégrer à ce pas de temps, les précipitations moyennes annuelles des postes pluviométriques utilisés au pas de temps journalier. En effet, n'ayant pas assez de postes pluviométriques pour certains bassins, les pluies spatialisées par maille ne sont pas suffisamment représentatives de la pluie réelle tombant sur le bassin, risquant de dégrader très clairement les simulations du modèle horaire. Les précipitations moyennes annuelles des postes journaliers ont alors été prises en compte. Ainsi, dans un premier temps, les pluies moyennes annuelles sont krigées par dérive externe. On effectue ensuite une correction interannuelle par rapport au poste journalier le plus proche (application du rapport Pluie annuelle locale/Pluie moyenne annuelle du poste journalier le plus proche). Par la suite, on calcule le cumul journalier de chaque maille par rapport à celui du poste journalier le plus proche. Et enfin, afin d'obtenir la dynamique temporelle horaire, pour chaque maille, on établit la dynamique temporelle de la maille à partir de celle du poste horaire le plus proche.

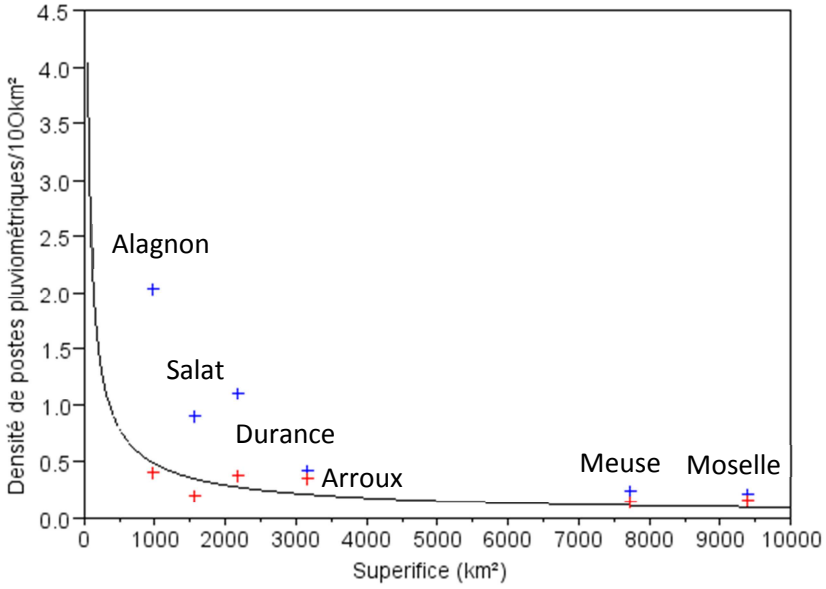


Figure 8: Densité de postes pluviométriques pour 100 km² en fonction de la superficie des bassins versants ; La courbe noire représente la limite conseillée par Schaake et al. (2000), les croix bleues le réseau journalier et les croix rouges le réseau horaire.

D'autre part, pour le bassin versant de la Durance, quelques séries de pluie journalières et horaires comportaient des lacunes. Pour pouvoir les compléter, un modèle de critique de données d'EDF, basé sur des ellipses de Bois et d'un test de rupture, a été utilisé. Celui-ci compare les séries de pluie entre plusieurs postes pluviométriques, vérifie celles ayant des ruptures, et donne les coefficients de corrélation entre les différents postes pour la correction. Les pluies manquantes ont alors été corrigées en utilisant les relations entre les différents postes pluviométriques.

❖ ***Les données de température de l'air***

Les données de température de l'air utilisées dans le modèle CEQUEAU sont nécessaires pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle et pour le module neige. Elles se présentent sous la forme de données minimales et maximales journalières. Celles utilisées au cours de cette étude proviennent de la base de données journalière d'EDF-DTG. Pour le pas de temps horaire, les températures ont été interpolées à partir des températures minimales et maximales journalières (la température minimale journalière étant fixée à 6h et la température maximale à 14h).
Les données de températures de la Meuse et la Moselle sont des données Météo France. Cependant, certaines présentant des ruptures, ont également dû être corrigées grâce à l'outil précédemment présenté pour la correction des pluies.

4.3.2 Données hydrométriques

Les débits utilisés pour les six bassins versants de cette étude, sont des chroniques ponctuelles observées au pas de temps horaire issues de la BANQUE HYDRO. Ces débits ont ensuite été moyennés afin d'obtenir des débits au pas de temps journalier. Une vérification de la présence d'un minimum de deux ans de données par demi-période de calage-contrôle (1995-2000 et 2000-2005 ans), a été préalablement réalisée. La base de données permet de disposer au minimum de cinq points de contrôle intérieurs au bassin (Durance à la Clapière). Ce nombre pouvant aller jusqu'à 49 (Moselle à Hauconcourt).
Pour les distributions spatiales à 10 et 100 mailles, le nombre de postes hydrométriques est le même, sauf pour les bassins de la Meuse et de la Moselle, où ce nombre était supérieur à dix. Pour le modèle à 10 mailles, dix postes étaient alors disponibles, alors que pour celui à 100 mailles, les bassins de la Meuse et de la Moselle comportaient respectivement 22 et 49 postes.

5 RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Les objectifs de ce stage sont d'évaluer la sensibilité des performances, de la robustesse et des paramètres du modèle selon la discrétisation spatiale adoptée ou le pas de temps de fonctionnement. Pour cela, des études de comparaison des résultats obtenus sur l'échantillon de bassin versant, vont être présentées au cours de cette partie.
Un second objectif de ce stage est également d'évaluer l'apport de l'information intérieure de débit du bassin versant sur les performances et la robustesse de ce modèle.
Enfin, le dernier point à aborder dans ce mémoire portera sur la sensibilité des paramètres à ces différentes spatialisations et pas de temps de fonctionnement, dans le but d'évaluer la capacité « intrinsèque » des paramètres de production et de transfert.

5.1 Evaluation et sensibilité des performances et de la robustesse du modèle

Les diverses simulations (calage et validation) ont tout d'abord été évaluées en tenant compte des points de mesure intérieurs de débit au sein du bassin versant, pour les modèles distribués à 10 et 100 mailles. Cependant, afin de pouvoir évaluer si la perte ou le gain de performance entre un modèle global et un modèle distribué est engendré par la distribution spatiale des données du modèle ou par la prise en compte des points de contrainte lors de la calibration des paramètres du modèle, une étude en tenant compte des points intérieurs sera dans un premier temps effectuée. Puis, une comparaison des résultats lors d'une calibration des paramètres en optimisant le débit uniquement à l'exutoire, sera réalisée.

5.1.1 Etude des fronts de Pareto

Pour commencer l'analyse, les performances et robustesses obtenues en calage et validation avec l'ensemble des jeux de paramètres acquis après la phase de calibration seront étudiées. Toutefois, dans cette partie, contrairement aux procédures de calage-validation classiques, visant à déterminer la capacité du modèle à s'adapter à un changement de données d'entrée (robustesse des jeux de paramètres), c'est la robustesse de la structure du modèle qui sera évaluée sur une même période, le but étant de rendre l'évaluation du modèle indépendante de la période de simulation. En effet, la disponibilité des données au pas de temps horaire contraint à travailler avec des chroniques de courte durée (5 ans). La phase de calage des paramètres sera alors très influencée par les conditions climatiques de la période. Ainsi, de meilleurs ou de moins bons résultats entre un calage sur P1 et une validation sur P2 pourraient être obtenus en utilisant les mêmes paramètres, sans pour autant que cela justifie la robustesse ou non du modèle. Les périodes P1 et P2 pouvant être très contrastées en terme de conditions climatiques ou d'aléas hydrologiques, une période pourrait être plus facile à modéliser par rapport à l'autre.
Ainsi, dans le but d'évaluer la robustesse de la structure du modèle, la phase de calage P1 a été comparée avec la phase de validation sur la période P1 simulée avec les paramètres calés sur P2, rendant les résultats indépendants de la période.

Les critères étudiés dans cette partie, ont été sélectionnés dans le front de Pareto de façon à avoir les meilleures performances en optimisant à la fois le critère NSE_{RQ} composite et le critère NSE_{RQ} exutoire. Les résultats selon les distributions spatiales et pas de temps utilisés ont été confrontés pour chaque bassin. Les performances et robustesses ont été évaluées à partir des graphiques exprimant le critère de Nash et Sutcliffe sur la racine des débits au niveau des points intérieurs en fonction du critère de Nash et Sutcliffe sur la racine des débits à l'exutoire. On rappelle que les critères au pas de temps horaire ont été calculés sur les débits journaliers obtenus en moyennant les débits horaires de chaque jour.
La Figure 9 donne un exemple de fronts de Pareto obtenus avec le bassin de la Durance à la Clapière. Ces graphiques indiquent que les performances semblent meilleures pour le pas de temps journalier. Les performances et les robustesses semblent également être meilleures pour le modèle distribué à 100 mailles et le modèle global. Toutefois, on peut noter une légère hausse de robustesse lorsqu'on augmente le degré de discrétisation.

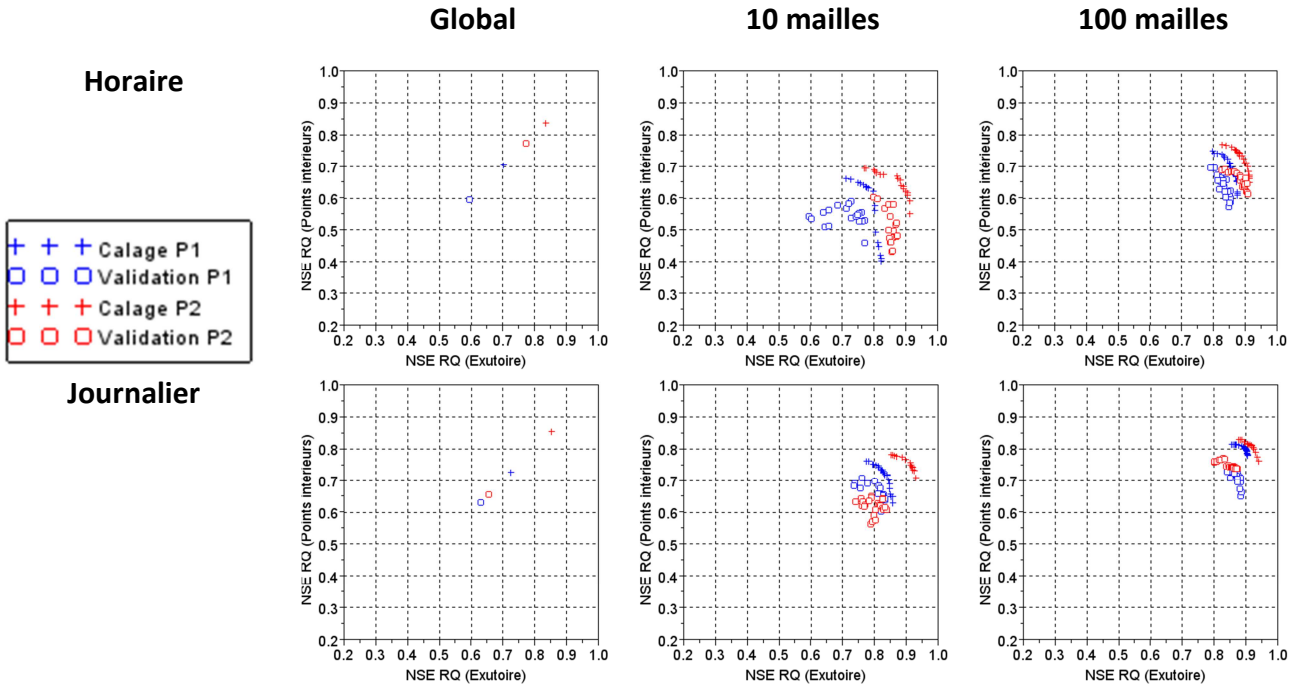


Figure 9: NSE_{RQ} au niveau des points intérieurs en fonction de NSE_{RQ} à l'exutoire pour le bassin de la Durance à la Clapière

Il est également intéressant de savoir si ces observations sont valables pour tous les autres bassins versants, ou si elles sont propres au bassin de la Durance.
Le Tableau 2 donne un récapitulatif des résultats trouvés en interprétant les fronts de Pareto pour les six bassins. En terme de performance en période de calage, et de robustesse de la structure du modèle, les résultats indiquent que les performances des deux pas de temps de fonctionnement sont globalement les mêmes. Le modèle serait ainsi peu sensible à ce dernier.
D'autre part, concernant les distributions spatiales, l'interprétation est nettement moins tranchée. En effet, les performances pour les deux critères selon le maillage utilisé varient selon les bassins versants et aucune tendance ne se dessine clairement. Toutefois, le modèle semble plus robuste pour la simulation des débits à l'exutoire et au niveau des points intérieurs lorsqu'il est utilisé avec des résolutions spatiales plus élevées.

De plus, les performances du modèle à simuler les débits à l'exutoire sont plus élevées que celles à simuler les débits des points intérieurs du bassin. Ce résultat semble normal puisque le calcul du NSE_{RQ} composite engendre une plus grande variance due à un nombre plus élevé de points intérieurs (le débit n'est pas forcément bien modélisé pour tous ces points), par rapport au NSE_{RQ} exutoire, où ce calcul ne tient compte que d'un seul débit. De plus, les petits bassins versants sont généralement plus difficiles à modéliser. Or, le critère du NSE_{RQ} composite est calculé à partir de débits de plusieurs petits bassins versants, ce qui expliquerait les plus faibles performances obtenues par rapport à NSE_{RQ} exutoire.

		NSE_{RQ} (Points intérieurs)				**NSE_{RQ} (Exutoire)**			
		Performance - Calage		**Robustesse**		**Performance - Calage**		**Robustesse**	
Bassin Versant	**Distributions spatiales**	**Horaire**	**Journalier**	**Horaire**	**Journalier**	**Horaire**	**Journalier**	**Horaire**	**Journalier**
Alagnon	**Global**	+++	++	-	-	+++	++	-	-
	D10	++	+++	++	++	++++	++++	+++	+++
	D100	+++	+++	+++	++	++++	++++	+++	+++
Arroux	**Global**	++++	++++	++	++	++++	++++	++	++
	D10	++++	++++	++++	++++	++++	++++	+++	+++
	D100	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	+++
Durance	**Global**	+++	+++	++	++	+++	+++	++	++
	D10	++	+++	+++	+++	++++	++++	++	+++
	D100	+++	++++	+++	+++	++++	++++	++++	++++
Meuse	**Global**	+++	+++	--	--	+++	+++	--	--
	D10	+++	+++	++++	++++	++++	++++	++++	+++
	D100	++	++	++++	++++	++++	++++	+++	++++
Moselle	**Global**	++++	++++	+++	+++	++++	++++	+++	+++
	D10	++	++	-	-	++++	++++	++++	+++
	D100	+	+	++	+++	++++	++++	++++	++++
Salat	**Global**	+++	+++	+	+++	+++	+++	+	+++
	D10	++	++	+++	+++	++++	++++	+++	++++
	D100	++	+++	+++	+++	++++	++++	++++	++++

Performance en période de calage		**Robustesse (Ecart de performance entre calage et validation)**	
++++	**>80%**	**++++**	**<5%**
+++	**70%-80%**	**+++**	**5%-10%**
++	**60%-70%**	**++**	**10%-15%**
+	**50%-60%**	**+**	**15%-20%**
-	**40%-50%**	**-**	**20%-30%**
--	**30%-40%**	**--**	**30%-40%**

Tableau 2: Comparaison des performances et robustesses des critères NSE_{RQ} (Points intérieurs) NSE_{RQ} (Exutoire) obtenus entre les deux pas de temps et les trois distributions spatiales pour les six bassins versants (Tableau du haut). Légende associée au tableau de performances et robustesses (Tableau du bas).

Toutefois, ces performances en période de calage sont le résultat de critères moyennés sur les deux périodes, des différences existant entre ces dernières. La période 2000-2005 (P2) obtient des meilleurs résultats en calage et validation par rapport à la période 1995-2000 (P1). Ceci pourrait peut-être être expliqué par une augmentation temporelle de la densité des données.

5.1.2 La modélisation du débit à l'exutoire

Afin de faciliter les interprétations, un point précis du front de Pareto a été choisi. Il s'agit de celui qui présente le meilleur compromis entre le critère NSE_{RQ} sur les points intérieurs et le critère NSE_{RQ} à l'exutoire (cf. Figure 3 en 4.1.4.). Pour chaque période, ce point a été sélectionné, puis moyenné avec la seconde période.

5.1.2.1 En intégrant les débits observés des points intérieurs dans la calibration des paramètres

La Figure 10 représente pour chaque bassin et pour chaque simulation, le critère NSE_{SQ} à l'exutoire du point optimal en période de calage (croix) et en validation (rond) aux deux pas de temps. Cette figure servira d'élément principal pour l'analyse et l'interprétation des résultats.

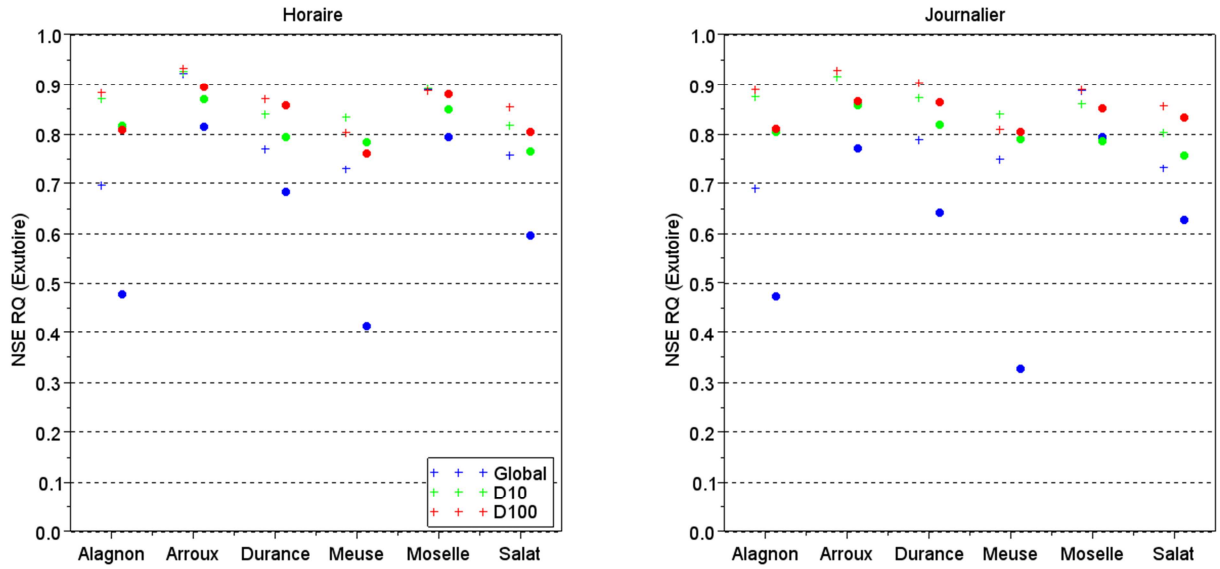


Figure 10: Critère de Nash et Sutcliffe sur la racine des débits à l'exutoire pour chaque bassin versant, avec le jeu de paramètres présentant le meilleur compromis entre NSE_{RQ} sur les points intérieurs et NSE_{RQ} à l'exutoire. Les croix représentent les performances en calage et les points, en validation.

❖ ***Performances des simulations***

Dans un premier temps, une comparaison des performances du critère NSE_{RQ} à l'exutoire obtenues en validation entre les deux pas de temps et les trois distributions spatiales de l'ensemble des bassins versants, sera réalisée.

La Figure 10 et le Tableau 3 indiquent que les performances du modèle dépendent peu du pas de temps utilisé, puisque ces dernières sont semblables entre les pas de temps horaire et journalier.

En validation, le modèle global donne les moins bonnes performances pour tous les bassins versants. Pour la grande majorité des simulations, le modèle distribué à 100 mailles fournit de meilleures performances que les autres distributions spatiales. Toutefois, les critères de performance des simulations des modèles à 10 et 100 mailles sont très proches pour tous les bassins versants, avec un écart un peu plus marqué pour les bassins de l'Alagnon, de la

Durance, du Salat et de la Meuse. L'écart de performance entre modèle global et modèles distribués est surtout remarquable pour les bassins de montagne (Alagnon, Durance et Salat). Cet écart peut s'expliquer par une spatialisation de la pluie et de la neige selon l'altitude pour les modèles distribués, et donc une meilleure modélisation des stocks de neige, qui représente une part très importante du comportement hydrologique de ce type de bassins. Néanmoins, il sera important de vérifier si ce gain de performance est dû à la spatialisation des données d'entrées ou à l'apport de l'information intérieure du bassin en terme de débit. Cet écart de performance est également observable pour le bassin de la Meuse. Ceci peut s'expliquer par un réseau de postes pluviométriques peu dense, et assez mal réparti sur le bassin. Une spatialisation des données par les modèles distribués pourrait peut-être permettre de mieux répartir la pluie, et donc mieux modéliser le débit de ce bassin.

Le faible écart de performance entre les modèles distribués à 10 et 100 mailles pourrait amener à penser qu'une distribution spatiale à 10 mailles suffirait à simuler de manière correcte un débit. Effectivement, à partir du moment où on n'a pas un nombre suffisant de pluviomètres pour justifier une discrétisation spatiale à 100 mailles, le modèle ne peut se différencier nettement du modèle à 10 mailles. Une amélioration des performances pour le modèle à 100 mailles et une différenciation entre les deux distributions seraient probablement observées si l'on disposait d'une plus grande densité de postes pluviométriques et de température. Toutefois, les temps de modélisation pour une distribution à 100 mailles pouvant s'avérer très importants (supérieurs à 5 jours et pouvant aller jusqu'à 10 jours selon les performances du matériel utilisé), utiliser un modèle distribué à 10 mailles serait peut-être suffisamment satisfaisant et judicieux lorsque le bassin versant ne justifie pas d'avoir une distribution plus fine (sauf le cas des bassins de montagne, avec des contrastes d'altitude et donc de température et de pluie plus marqués).

Pas de temps	Pas d'espace	Alagnon	Arroux	Durance	Meuse	Moselle	Salat
Horaire	**Global**	47.8	81.5	68.3	41.3	79.4	59.8
	D10	81.6	87.0	79.3	78.4	85.0	76.5
	D100	80.9	89.4	85.8	76.2	88.1	80.5
Journalier	**Global**	47.3	77.1	64.2	32.7	79.5	62.8
	D10	80.4	85.8	81.9	79.1	78.6	75.8
	D100	81.1	86.7	86.4	80.4	85.2	83.4

Tableau 3: NSE_{RQ} à l'exutoire en pourcentage en validation pour les différentes simulations et les six bassins versants. Ces résultats ont été moyennés entre les deux périodes de validation.

Enfin, afin de se placer dans un contexte de comparaison et d'avoir les mêmes conditions pour toutes les distributions spatiales, le module neige CEMANEIGE a été utilisé en ne considérant qu'une seule bande d'altitude par maille, alors qu'il est utilisé en temps normal avec cinq bandes d'altitude. Cette modification désavantage le modèle global, puisque le module CEMANEIGE n'a pas été construit pour donner de bonnes performances dans ces conditions. De plus, aucun modèle global de bassin de montagne ne fonctionne de cette manière. En effet, ces modèles présentent généralement au moins une spatialisation selon l'altitude, pour ce type de bassin. Ceci peut alors expliquer les faibles performances du modèle global de cette étude, en comparaison avec celles des modèles distribués.

❖ ***Robustesse des jeux de paramètres***

La robustesse des jeux de paramètres d'un modèle hydrologique est sa capacité à rester stable face à des changements de conditions climatiques, entre autres. Evaluer cette robustesse consiste à comparer les performances obtenues en calage et en validation.
Le Tableau 4 représente les écarts relatifs calculés entre la phase de calibration et la phase de validation des paramètres.
Dans un premier temps, ce tableau indique que les robustesses du modèle sont globalement équivalentes entre les pas de temps horaire et journalier, avec une légère diminution de robustesse pour le pas de temps journalier.
Il indique également que le modèle global semble moins robuste que les autres spatialisations, et en particulier pour la Meuse et l'Alagnon. Ceci est remarquable pour les deux pas temps de fonctionnement. Cependant, la Meuse est un bassin particulier dû à sa forme longiligne (voir Annexe 2). Ainsi, une discrétisation spatiale à 10 ou 100 mailles, permettrait de caler de façon correcte et rendre le modèle plus robuste à un changement de conditions climatiques pour ce type de bassin.
Concernant les discrétisations spatiales à 10 et 100 mailles, les robustesses semblent être très proches entre ces pas d'espace. Toutefois, la robustesse du modèle distribué à 100 mailles tend globalement à dépasser celle de celui à 10 mailles.

Pas de temps	Pas d'espace	Alagnon	Arroux	Durance	Meuse	Moselle	Salat
Horaire	**Global**	31.2	11.5	11.2	43.3	10.6	21.0
	D10	6.1	6.1	5.6	5.9	4.7	6.5
	D100	8.4	4.0	1.5	5.1	0.8	5.7
Journalier	**Global**	31.4	15.7	18.6	56.3	10.3	14.1
	D10	8.0	6.2	6.1	5.8	8.7	5.6
	D100	8.8	6.7	4.3	0.6	4.1	2.5

Tableau 4: Ecart relatif de performance NSE_{RQ} à l'exutoire en pourcentage entre calage et validation pour les différentes simulations et pour les six bassins versants. Ces résultats sont la moyenne de l'écart relatif des deux périodes de calage-validation.

5.1.2.2 Le gain de performance entre modèles global et distribué est-il dû à la distribution spatiale des données ou à l'apport des débits intérieurs au bassin versant ?

Les modèles distribués présentent de meilleures performances que la même structure utilisée en version globale. Cependant, lors du calage des paramètres avec les versions distribuées, la spatialisation des données mais aussi le calage des paramètres en tenant compte des débits au niveau des points intérieurs du bassin étaient pris en compte. Il est alors difficile de savoir si le gain de performance provient de la spatialisation des données ou de cet apport d'information lors du calage des paramètres. Pour répondre à cette question, le critère NSE_{SQ} à l'exutoire dans le cas où le critère NSE_{RQ} composite était optimisé (le point C1 sur la Figure 11) a été comparé au critère NSE_{RQ} à l'exutoire dans le cas où le critère NSE_{RQ} à l'exutoire était optimisé (le point C2 sur la Figure 11). Cela revient à comparer le cas où les paramètres sont calés en prenant comme fonction objectif le NSE_{RQ} composite et le cas en ayant comme critère de calage NSE_{RQ} à l'exutoire. On rappelle que le critère C1-C2 de la Figure 11 est le critère analysé dans la partie 5.1.2.1.

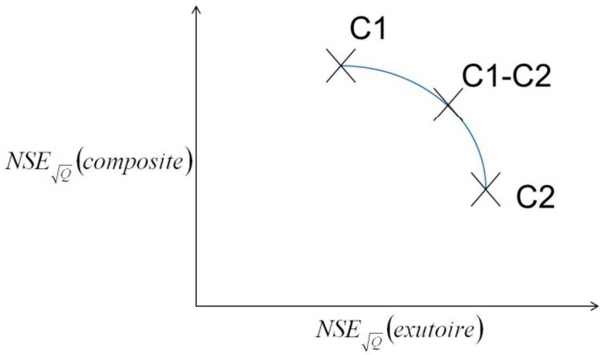


Figure 11: Schéma représentant le critère NSE_{RQ} composite (points intérieurs) en fonction du critère NSE_{RQ} à l'exutoire. C1 représente le jeu de paramètre optimisant NSE_{RQ} composite, C2 le jeu de paramètre optimisant NSE_{SQ} à l'exutoire et C1-C2 présentant le meilleur compromis entre ces deux critères.

Les chapitres précédents ont permis de constater que les performances entre les pas de temps étaient très similaires. Pour cette partie, les résultats présentés en Figure 12 seront alors uniquement ceux obtenus au pas de temps horaire. Cette figure indique que pour tous les bassins versants étudiés, le critère NSE_{RQ} à l'exutoire en validation pour les modèles distribués, lorsque l'on cale les paramètres exclusivement en tenant compte du critère NSE_{RQ} à l'exutoire, n'est jamais dépassé par celui calé sur les points intérieurs du bassin. Le bassin de l'Arroux, où les points intérieurs aident le modèle à simuler le débit à l'exutoire, fait figure d'exception.

Ainsi, la calibration des paramètres du modèle avec un critère de Nash calculé sur les débits des points intérieurs du bassin versant n'améliore pas la modélisation du débit à l'exutoire mais elle ne la dégrade pas non plus. La principale raison du gain de performance des modèles distribués par rapport au modèle global reste majoritairement la spatialisation des données.

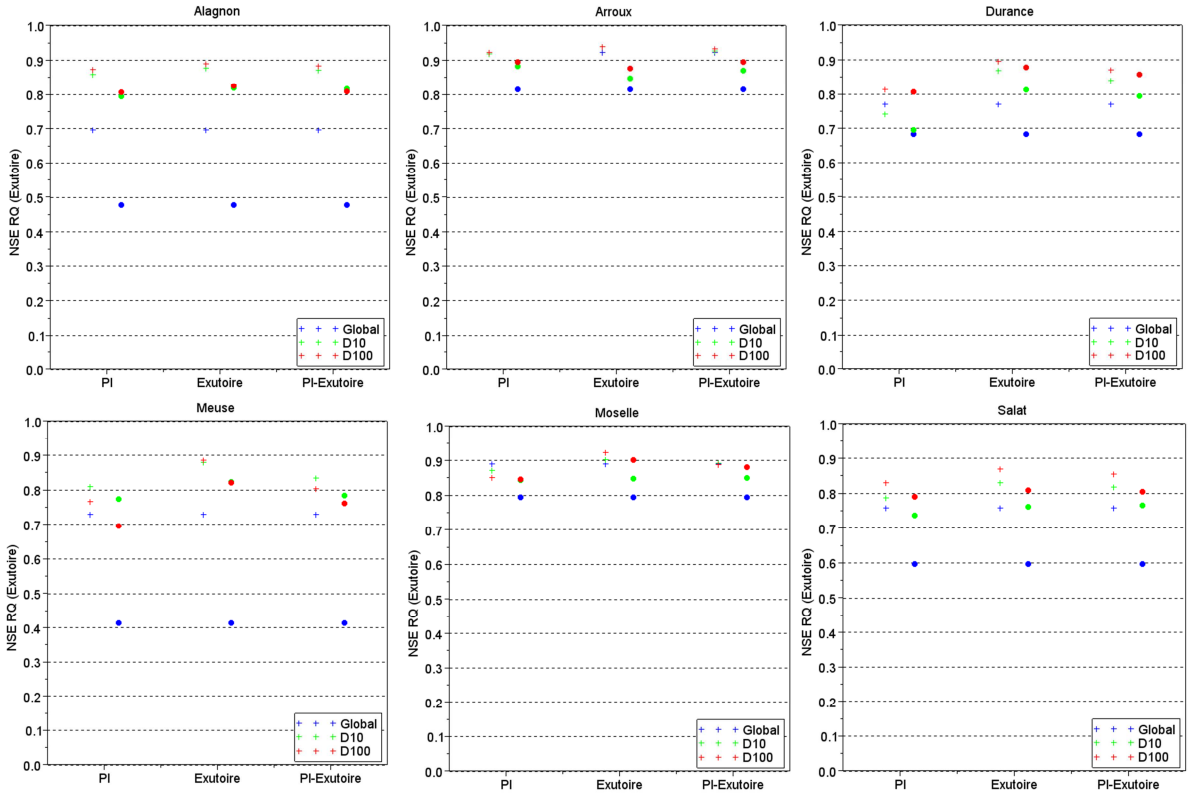


Figure 12: NSE_{RQ} à l'exutoire dans le cas où le critère NSE_{RQ} composite était optimisé (PI) et dans le cas où le critère NSE_{RQ} à l'exutoire était optimisé (Exutoire) pour les six bassins versants étudiés. Les croix représentent les performances en calage et les points en validation.

5.1.3 La modélisation du débit au niveau des points intérieurs du bassin

Après avoir étudié les performances et les robustesses du modèle dans la simulation des débits à l'exutoire, il est également intéressant d'observer ses mêmes résultats pour la modélisation des débits des points intérieurs du bassin versant.

❖ ***Performances des simulations***

La Figure 13 et le Tableau 5 présentent les résultats du critère NSE_{RQ} composite obtenus en calage et en validation par bassin versant, pour les deux pas de temps et les trois distributions spatiales. On rappelle que pour le modèle global, ce critère est calculé que pour un seul point intérieur, l'exutoire, et que les critères des autres distributions sont des moyennes des critères évalués sur tous les débits intérieurs du bassin. Le modèle global sera alors écarté pour la suite de nos interprétations. On rappelle également que les critères du modèle horaire sont calculés à partir des débits journaliers, afin de pouvoir comparer les mêmes critères pour les deux modèles.

Les résultats indiquent d'une part, que le modèle au pas de temps horaire, semble être faiblement plus performant que celui au pas de temps journalier, en validation.
D'autre part, de meilleures performances sont obtenues lors de l'utilisation du modèle distribué à 100 mailles pour tous les bassins versants, à l'exception de celui de la Meuse et

de la Moselle. Cependant, il est important de rappeler que pour ces deux bassins, un nombre plus important de postes hydrométriques est utilisé pour la modélisation à 100 mailles. Ainsi, le critère NSE_{RQ} (Points intérieurs) de ces deux bassins, est calculé sur un plus grand nombre de postes, et donc apporte une plus grande variance au calcul de ce critère, en comparaison à celui calculé pour le modèle à 10 mailles.

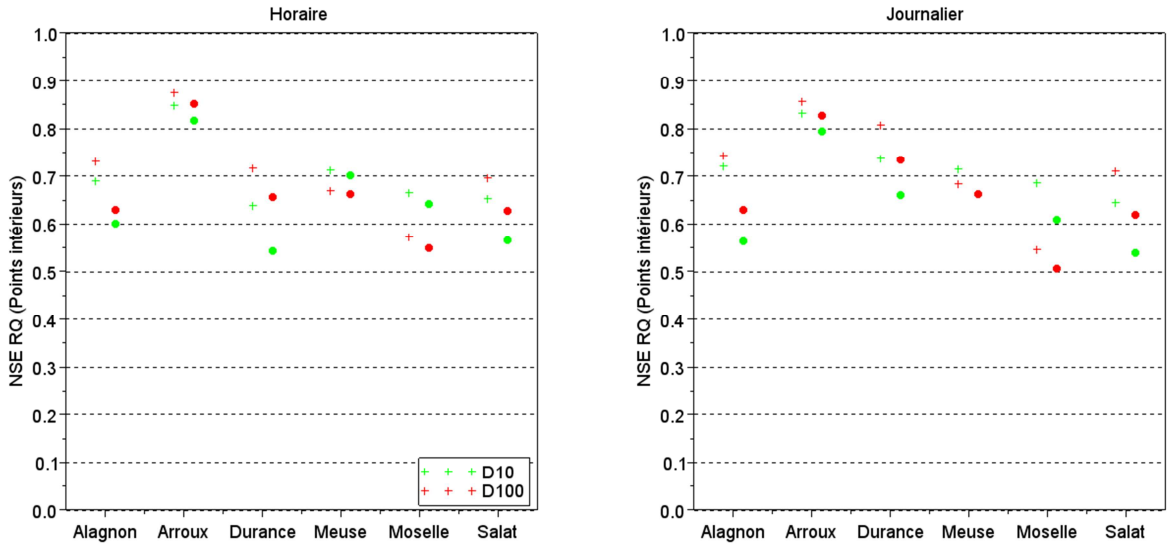


Figure 13: NSE_{RQ} sur les points intérieurs du bassin versant pour chaque bassin versant, avec le jeu de paramètres présentant le meilleur compromis entre NSE_{RQ} sur les points intérieurs et NSE_{RQ} à l'exutoire, aux pas de temps horaire et journalier. Les croix représentent les performances en calage et les points, en validation.

Pas de temps	Pas d'espace	Alagnon	Arroux	Durance	Meuse	Moselle	Salat
Horaire	**D10**	60.0	81.7	54.4	70.2	64.3	56.6
	D100	63.0	85.3	65.6	66.2	54.9	62.8
Journalier	**D10**	56.4	79.4	66.1	66.3	61.0	54.0
	D100	62.9	82.8	73.5	66.2	50.6	61.9

Tableau 5: NSE_{RQ} (Points Intérieurs) en pourcentage, en validation pour les différentes simulations et les six bassins versants, aux pas de temps horaire et journalier.

La Figure 14 présente les résultats du critère NSE_{RQ}(Points intérieurs) au pas de temps journalier obtenus pour les bassins de la Meuse et de la Moselle, dans un premier cas où le nombre de contraintes pour le modèle distribué à 100 mailles est supérieur à 10 (alors que celui pour le modèle à 10 mailles est de 10), et dans un second cas, où ce nombre est égal à 10 comme pour le modèle à 10 mailles (les points de contrainte utilisés étant les mêmes que pour le modèle à 10 mailles). Ces résultats en calage et validation indiquent donc que la baisse de performance du modèle à 100 mailles par rapport au modèle à 10 mailles lorsqu'un plus grand nombre de points de contraintes est utilisé, est dû à cet ajout de points de contrôle pour le modèle à plus haute résolution. Ainsi, dans les mêmes conditions, le modèle distribué à 100 mailles est plus performant que celui à 10.
Toutefois, il est intéressant de connaître l'impact de cette réduction du nombre de points de contrainte sur la modélisation du débit à l'exutoire (Figure 15). L'ajout de ces points de contrainte pour le modèle à 100 mailles a une faible répercussion sur la modélisation du

débit à l'exutoire en validation et en calage. Dans le cas de la Meuse, la performance diminue très légèrement lors de cet ajout, alors que dans le cas de la Moselle, elle augmente faiblement.

Ainsi, dans le cas de ces deux bassins, un ajout de points de contrainte au modèle distribué à 100 mailles diminue très nettement le critère NSE_{RQ} au niveau des points de contrainte, dû à une plus grande variance lors du calcul de ce critère (certains points de contrainte pouvant être très mal modélisés), alors que pour la modélisation du débit à l'exutoire, cet ajout a peu de répercussion.

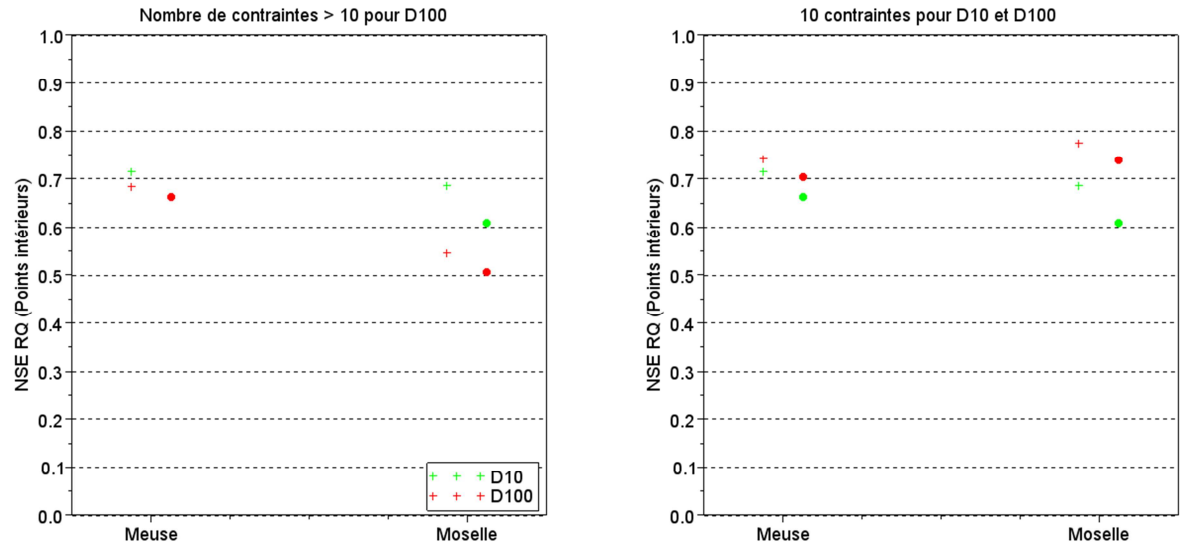


Figure 14: NSE_{RQ} (Points Intérieurs) pour la Meuse et la Moselle, avec le jeu de paramètres présentant le meilleur compromis entre NSE_{RQ} (Points intérieurs) et NSE_{RQ} (Exutoire), au pas de temps journalier. Les croix représentant les performances en calage et les points, en validation. Le graphique de gauche représente le cas où les modèles à 100 mailles ont été calés et validés avec plus de 10 points de contrainte et le graphique de droite avec 10 points de contrainte, soit le même nombre que pour le modèle à 10 mailles.

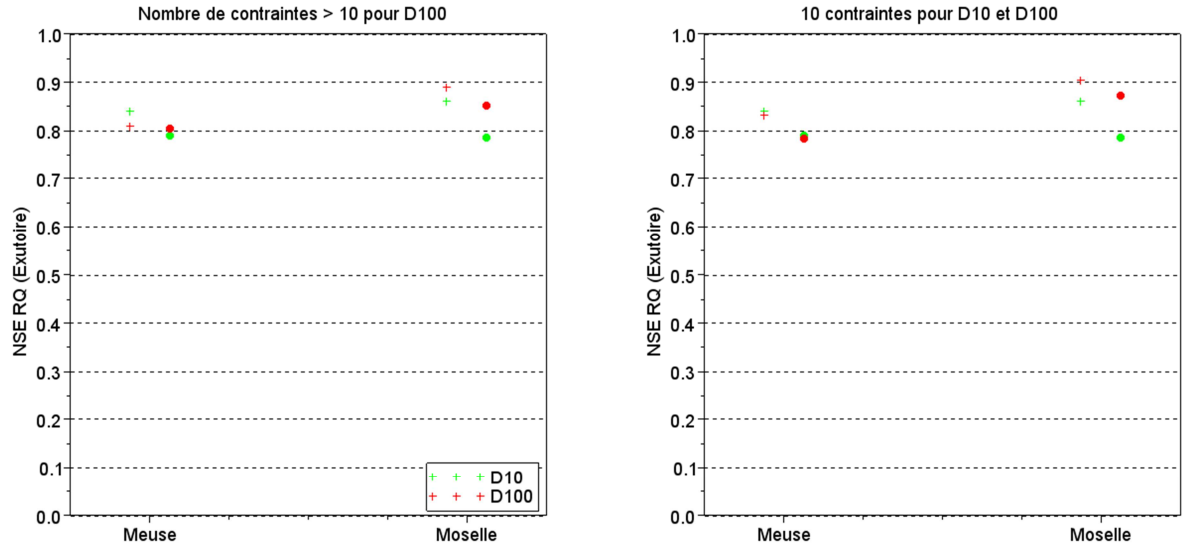


Figure 15: NSE_{SQ} (Exutoire) pour la Meuse et la Moselle, avec le jeu de paramètres présentant le meilleur compromis entre NSE_{RQ} (Points intérieurs) et NSE_{RQ} (Exutoire), au pas de temps journalier. Les croix représentant les performances en calage et les points, en validation. Le graphique de gauche représente le cas où les modèles à 100 mailles ont été calés et validés avec plus de 10 points de contrainte et le graphique de droite avec 10 points de contrainte, soit le même nombre que pour le modèle à 10 mailles.

❖ *Robustesse des jeux de paramètres*

Le Tableau 6 présente les écarts relatifs calculés entre la phase de calibration des paramètres et la phase de validation pour le critère NSE_{RQ} composite. Il permet de constater dans un premier temps, que la robustesse semble, de manière générale, être légèrement plus forte au pas de temps horaire.
Ce tableau indique également, tout comme pour les modélisations de débit à l'exutoire, que les modèles distribués, et en particulier le modèle à 100 mailles, sont plus robustes que le modèle global.
Les bassins du Salat et de l'Alagnon semblent présenter des robustesses un peu plus faibles que les autres bassins versants, et en particulier au pas de temps journalier.

Pas de temps	Pas d'espace	Alagnon	Arroux	Durance	Meuse	Moselle	Salat
Horaire	**D10**	12.9	3.6	14.7	1.5	3.2	13.2
	D100	13.8	2.5	8.3	1.2	4.2	9.5
Journalier	**D10**	21.8	4.4	10.3	7.1	10.9	16.2
	D100	15.2	3.4	9.0	3.0	7.2	12.9

Tableau 6: Ecart relatif de performance NSE_{RQ} composite en pourcentage entre calage et validation pour les différentes simulations et pour les six bassins versants.

❖ *Performances du modèle lors d'un calage à l'exutoire*

Après avoir évalué la performance du modèle à simuler des débits à l'exutoire en calant les paramètres à partir d'un critère composite, une évaluation des performances du modèle à simuler des débits aux points intérieurs en utilisant des paramètres calés sur des débits à l'exutoire a été effectuée.
Il a été montré précédemment que les performances et la robustesse du modèle pour la simulation des débits des points intérieurs étaient meilleures au pas de temps horaire. Ce pas de temps sera alors utilisé dans les résultats suivants.
La Figure 16 indique que lorsqu'on cale les paramètres selon un critère optimisant le débit à l'exutoire, la performance calculée sur les débits au niveau des points intérieurs chute. Cette dernière peut dépasser 10% pour certains bassins, tels que la Durance et la Moselle. De plus, cette figure montre que les bassins dont la baisse de performance est significative entre les deux méthodes de calage sont ceux où la différence de performances entre les deux modèles distribués est la plus importante.
Ainsi, dans le cadre de simulation de débits au niveau de points intérieurs, une optimisation des paramètres en tenant compte de ces derniers dans les fonctions objectifs, permet d'obtenir de meilleures performances sur ces débits, que s'ils avaient été calés avec des critères tenant compte uniquement du débit à l'exutoire. Ce résultat se retrouve en particulier pour les bassins de la Durance et de la Moselle. Dans ces cas, ce ne serait alors pas la spatialisation des données qui entraineraient de meilleures performances, mais bien la prise en compte des débits au niveau des points intérieurs, lors du calage des paramètres.
Toutefois, la différence de performances entre les deux méthodes de calage pour les bassins de l'Alagnon, l'Arroux et la Meuse, n'est pas très importante (entre 0 et 5 %). Ainsi, dans le cadre de bassin versant intérieur non jaugé mais avec un débit jaugé plus à l 'aval, une optimisation en tenant compte uniquement des débits à l'exutoire permettrait de modéliser de façon correcte le débit des points intérieurs, pour ce type de bassins versants.

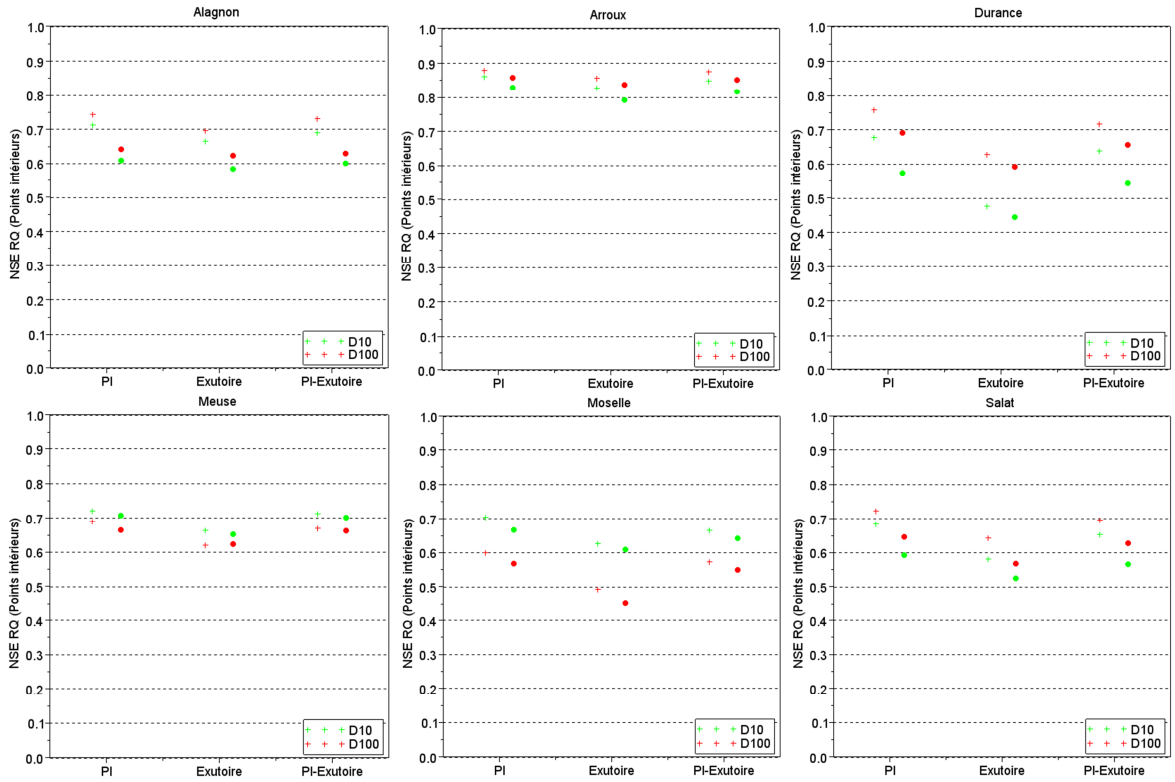


Figure 16: NSE_{RQ} composite dans le cas où le critère NSE_{RQ} composite était optimisé (PI) et dans le cas où le critère NSE_{RQ} à l'exutoire était optimisé (Exutoire) pour les six bassins versants étudiés, au pas de temps horaire. Les croix représentent les performances en calage et les points en validation.

5.1.4 Synthèse

La structure de modèle utilisée dans cette étude est dans l'ensemble peu sensible, en termes de robustesse et de performance, au pas de temps utilisé. Un léger gain de performance et de robustesse pour le pas de temps horaire est toutefois notable pour la simulation des débits aux points intérieurs.

D'autre part, la modélisation des débits à l'exutoire semble être plus performante et plus robuste lors de l'utilisation de modèles distribués, notamment pour les bassins de montagne. Ce gain de performance pour les modèles distribués est principalement dû à la spatialisation des données d'entrée dans le modèle, et surtout de la température qui est très importante pour la modélisation des stocks et de la fonte de neige. Aussi, la calibration des paramètres en tenant compte des débits à l'intérieur du bassin, permet de mieux modéliser ces débits aux points intérieurs, et ne désavantage pas de façon importante la modélisation du débit à l'exutoire.

Cependant, le modèle global ne tient compte d'aucune spatialisation des données. Pour la modélisation des bassins de montagne, il est normal qu'il soit le moins performant, puisque le module neige CEMANEIGE n'a pas été construit pour fonctionner sans distribution d'altitude. Pour les bassins davantage de plaine, cet écart de performance est beaucoup moins marqué.

Pour la modélisation des débits au niveau des points intérieurs du bassin versant, le modèle distribué à 100 mailles semble également être le plus performant, en comparaison au modèle distribué à 10 mailles. De plus, lorsque l'on cale les paramètres du modèle en tenant

compte uniquement du débit à l'exutoire, la modélisation du débit aux points intérieurs chute de façon importante pour les bassins de la Durance et de la Moselle. La prise en compte des débits au niveau des points intérieurs lors de la calibration des paramètres est alors nécessaire pour ces bassins lorsque l'on souhaite modéliser des débits à ces points. Cependant, pour les autres bassins, la différence de performance entre les deux méthodes d'optimisation, n'est jugée que peu significative (inférieure à 5%). Ce qui pourrait laisser penser que pour certains bassins versants, dans le cadre de la modélisation de points intérieurs non jaugés, une optimisation sur les débits à l'exutoire permettrait de modéliser de façon correcte les débits des points intérieurs. Ainsi, la stratégie de calibration peut dépendre des objectifs finaux de modélisation (simulation ou non des points intérieurs).

5.2 Sensibilité des paramètres du modèle au pas de temps de fonctionnement

Après avoir étudié la sensibilité des performances et de la robustesse du modèle à ses résolutions spatiales et temporelles, une étude de sensibilité des paramètres du modèle au pas de temps de fonctionnement est réalisée, dans le but d'évaluer si la structure du modèle est dépendante de celui-ci.

5.2.1 Résultats

Le modèle CEQUEAU a été construit de sorte que sa structure ainsi que ses paramètres soient peu dépendants du pas de temps de fonctionnement. En effet, les équations amenant à la modélisation du débit sont intégrées sur Δt. Dans la partie 5.1, il a été montré que les performances du modèle CEQUEAU étaient peu dépendantes du pas de temps de fonctionnement. Une analyse de ces paramètres en fonction du pas de temps de fonctionnement serait alors intéressante.
Les paramètres du modèle étant très nombreux, l'analyse détaillé de la sensibilité de ces derniers, paramètre par paramètre, serait beaucoup trop laborieuse et coûteuse en temps. L'étude consistera donc à évaluer la sensibilité du modèle au transfert d'un jeu de paramètres d'un pas temps à un autre, c'est-à-dire utiliser les paramètres calés sur un pas de temps, et les valider sur un autre pas de temps. Ceci permettra de savoir si ces derniers sont transférables d'un pas de temps à un autre sans avoir besoin de les recalibrer mais aussi d'évaluer la dépendance des paramètres au pas de temps de fonctionnement.

Les figures suivantes comparent respectivement les critères NSE_{RQ} (Exutoire) et NSE_{RQ} (Points intérieurs) obtenus lorsque les paramètres calés au pas de temps horaires sont validés à ce pas de temps et au pas de temps journalier, mais également lorsque ceux calés au pas de temps journalier sont validés à ce pas de temps et au pas de temps horaire. Les résultats des deux périodes ont été moyennés. La Figure 17 représente les performances à l'exutoire et la Figure 18 celles des points intérieurs.
La Figure 17 indique que lorsque les paramètres calés sur le pas de temps horaire sont validés au pas de temps journalier (figure de gauche), les performances du NSE_{RQ} (Exutoire) ont tendance à décroitre, par rapport à ceux du pas de temps horaire. Cette baisse est particulièrement remarquable pour les bassins de montagne de l'Alagnon, de la Durance et du Salat. Pour les paramètres calés au pas de temps journalier et validés au pas de temps

horaire (figure de droite), la baisse de performance semble moins marquée, en particulier pour l'Arroux, la Moselle et l'Alagnon.
D'autre part, les résultats de la Figure 18 permettent de constater les mêmes tendances pour le critère NSE_{RQ} (Points intérieurs). Toutefois, pour les bassins de l'Arroux, la Meuse et la Moselle, les paramètres du pas de temps journalier validés au pas de temps journalier et au pas de temps horaire donnent des performances quasi-équivalentes. La figure indique également pour le bassin de la Durance, une baisse très importante de performance en validation entre les deux pas de temps de fonctionnement, et pour les jeux de paramètres des deux pas de temps. Une analyse complémentaire des chroniques de débits de ce bassin serait alors intéressante pour comprendre cette chute de performance (Figure 19).

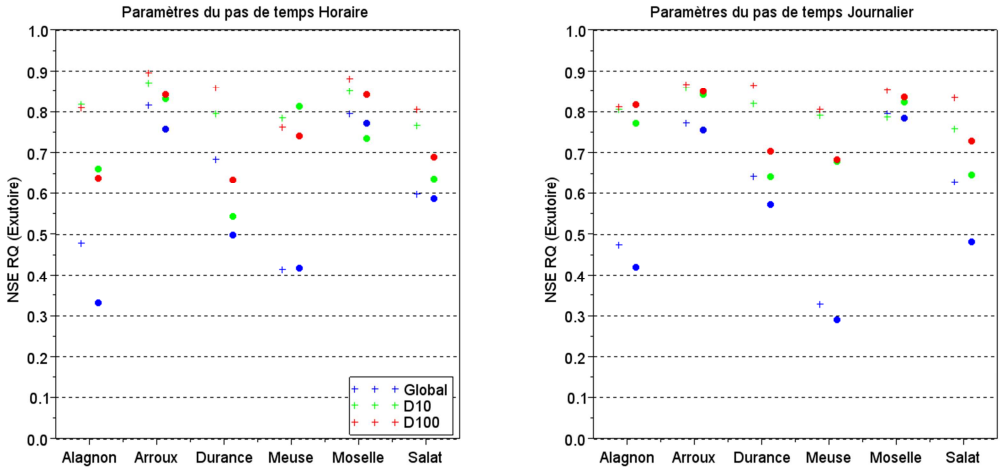


Figure 17: NSE_{RQ} (Exutoire) lorsque les paramètres calés au pas de temps horaire sont validés au pas de temps horaire (croix) et au pas de temps journalier (point) (figure de gauche). NSE_{RQ} (Exutoire) lorsque les paramètres calés au pas de temps journalier sont validés au pas de temps journalier (croix) et au pas de temps horaire (point) (figure de droite).

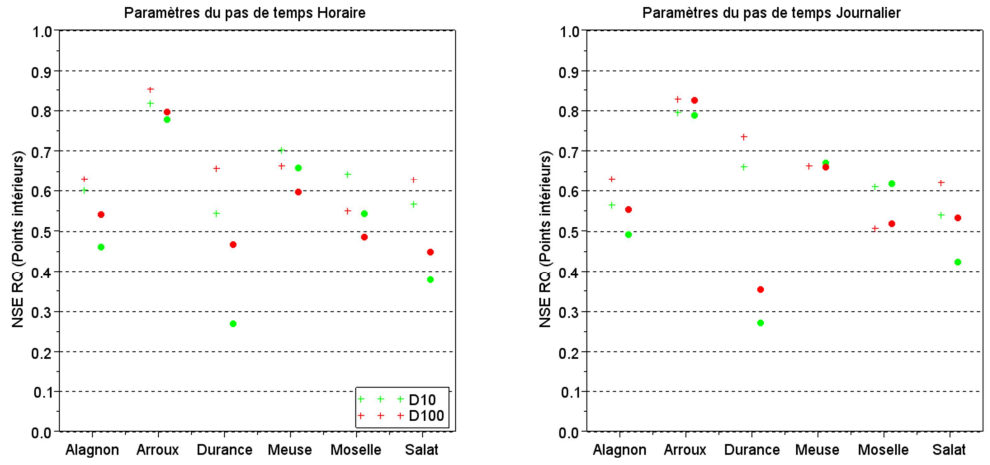


Figure 18:NSE_{RQ} (Points intérieurs) lorsque les paramètres calés au pas de temps horaire sont validés au pas de temps horaire (croix) et au pas de temps journalier (point) (figure de gauche). NSE_{RQ} (Points intérieurs) lorsque les paramètres calés au pas de temps journalier sont validés au pas de temps journalier (croix) et au pas de temps horaire (point) (figure de droite).

La Figure 19 représente les chroniques observées et simulées du bassin versant de la Durance à la Clapière entre Aout 2001 et Aout 2002, obtenues en utilisant les paramètres calés au pas de temps horaire (figures de gauche) et ceux calés au pas de temps journalier (figures de droite). Pour chaque cas, les débits sont obtenus avec le même pas de temps que celui utilisé pour le calage des paramètres, mais également avec le second pas de temps. Les résultats précédents indiquaient que pour ce bassin, un transfert de jeux de paramètres d'un pas de temps à un autre n'était pas possible puisque cela engendrait une perte de performance très importante. La représentation des chroniques de simulation permet d'identifier les événements moins bien simulés par ce transfert de paramètres. Sur la figure en bas à gauche, l'utilisation du pas de temps journalier, avec les paramètres calés au pas de temps horaire, aurait tendance à engendrer une surestimation des débits, que ce soit en période de bas débits, qu'en période de crue. Alors que la figure en bas à droite, représentant les chroniques de débits obtenus par la validation des paramètres calés au pas de temps journalier, et validées au pas de temps horaire indiquent une sous-estimation de ces débits, et en particulier pendant la période de fonte entre avril et aout. Toutefois, les débits d'étiage semblent être mieux modélisés avec le pas de temps horaire.
On notera que ces chroniques sont données à titre d'exemple et ne peuvent être présentées comme une interprétation générale des résultats.

Paramètres calés au pas temps Horaire *Paramètres calés au pas de temps Journalier*

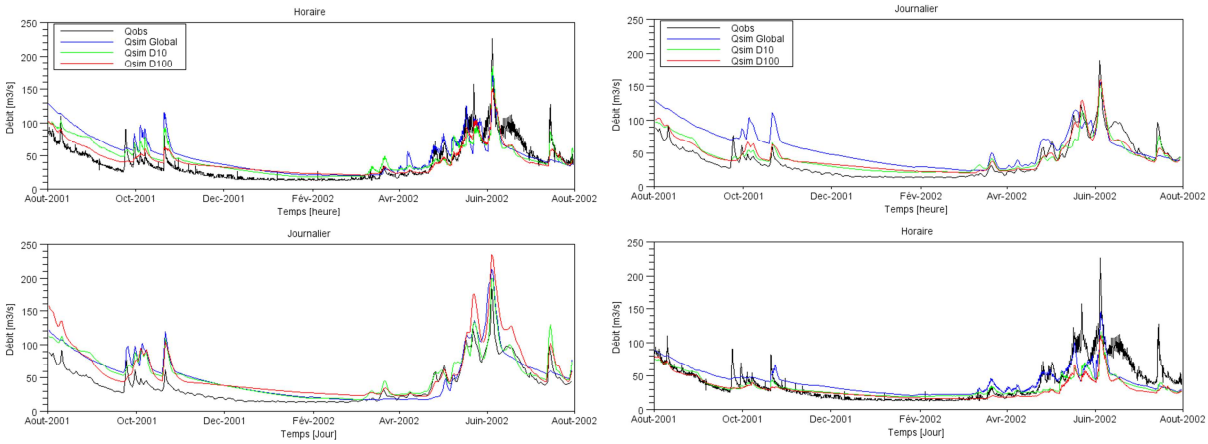


Figure 19: Chronique de débits observés et simulés du bassin versant de la Durance à la Clapière obtenus en utilisant les paramètres calés au pas de temps horaire (figures de gauche) et ceux calés au pas de temps journalier (figures de droite). Les figures du haut sont obtenues par validation avec le même pas de temps que ceux du calage des paramètres, alors que celles du bas sont obtenues par validation avec le second pas de temps.

Ainsi, les paramètres calés au pas de temps horaire ne semblent pas être transférables au pas de temps journalier, notamment pour les bassins de montagne. Les modèles et les paramètres calés au pas temps horaire seraient peut-être trop spécifiques et trop dynamiques pour que les paramètres fonctionnent à un pas de temps plus large. Cependant, ceux calés au pas de temps journalier seraient davantage transférables au pas de temps horaire. Ce qui est très intéressant puisque, les données météorologiques et hydrométriques sont beaucoup plus abondantes au pas de temps journalier qu'au pas de temps horaire. Une calibration des paramètres de modèle pourrait alors être effectuée au pas de temps journalier, puis utilisée au pas de temps horaire, sans pour autant dégrader de

façon trop importante les simulations. Toutefois, ces résultats sont fortement dépendants du bassin considéré.

Dans le 5.1, il a cependant était montré que les performances dépendaient peu du pas de temps. Ainsi, bien que les paramètres soient dépendants du pas de temps de fonctionnement, il semblerait que les performances du modèle ne le soient pas.

5.2.2 Discussion

Le modèle CEQUEAU est construit de façon à ce que les paramètres et les performances ne dépendent pas du pas de temps de fonctionnement, puisque les équations amenant à la modélisation du débit sont intégrées sur l'intervalle de temps Δt. Toutefois, le modèle peut être sensible et dépendant à d'autres pas de temps, qui sont la résolution des données forçages et le pas de temps du critère pris en compte pour évaluer les performances du modèle. En effet, des résolutions temporelles fines de données de forçage, pourraient permettre de mieux décrire les événements hydrologiques et donc mieux modéliser les débits. De la même façon, les critères de performance peuvent varier, si l'on évalue le modèle sur les débits à des pas de temps fin (horaire par exemple) ou plus large (journalier).
Dans le cadre de cette étude, les pas de temps de fonctionnement et les pas de temps des données de forçage sont confondus. Il est alors difficile de savoir si cette dépendance des paramètres du modèle est à attribuer au pas de temps du modèle ou à celui des données. Afin de pouvoir comprendre toutes ces dépendances aux différents pas de temps, il faudrait tester toutes les combinaisons de résolution des forçages, pas de temps de fonctionnement et pas de temps des critères de performance.

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le sujet du choix des résolutions spatiales et temporelles à adopter en modélisation hydrologique reste un débat actuel et capital pour l'optimisation et l'utilisation de ces outils. Le but de de cette étude a été ainsi d'évaluer les sensibilités des performances, de la robustesse et des paramètres du modèle pluie-débit CEQUEAU à ces différentes résolutions spatio-temporelles, pour six bassins versants aux caractéristiques variées. Trois degrés de spatialisation d'une même structure de modèle ont alors été envisagés : un modèle global, des modèles distribués à 10 mailles et 100 mailles ; ainsi que deux pas de temps : horaire et journalier.

Cette étude a été traitée en deux temps. Pour commencer, des tests ont permis d'évaluer cette sensibilité du modèle pour la simulation des débits à l'exutoire, puis des débits au niveau des points intérieurs du bassin versant. Ces résultats ont permis de montrer que les performances et la robustesse du modèle étaient peu impactées par le choix du pas de temps de fonctionnement, les résultats aux pas de temps horaire et journalier étant très proches. Un léger gain de performance et de robustesse est toutefois notable au pas de temps horaire pour la simulation des débits aux points intérieurs. D'autre part, la modélisation des débits à l'exutoire semble plus performante et robuste lors de l'utilisation de modèles distribués, et plus particulièrement pour les bassins de montagne. Ce gain de performance pour les modèles distribués est principalement dû à la spatialisation des données d'entrée dans le modèle, et en particulier de la température, essentielle pour la modélisation des stocks et de la fonte de neige. Cependant, il est important de garder à l'esprit que le modèle global ne tient compte d'aucune discrétisation d'altitude pour le module neige. Pour la modélisation des bassins de montagne, il peut alors sembler normal qu'il soit nettement moins performant que les modèles distribués, puisque le module neige CEMANEIGE n'a pas été construit pour fonctionner sans distribution d'altitude, et que généralement aucun modèle global ne fonctionne au minimum sans cette information. Le choix d'utiliser un tel module neige s'explique par la volonté de vouloir comparer la sensibilité de la structure du modèle. Pour les bassins de plaine, cet écart de performance est beaucoup moins marqué.
Pour la modélisation des débits aux points intérieurs, le modèle distribué à 100 mailles semble plus performant que celui à 10 mailles. De plus, la calibration des paramètres en tenant compte des débits à l'intérieur du bassin, permet de mieux modéliser ces débits aux points intérieurs, et ne désavantage pas la modélisation du débit à l'exutoire. En outre, lorsque l'on cale les paramètres du modèle en tenant compte uniquement du débit à l'exutoire, la modélisation du débit aux points intérieurs chute pour deux bassins, la Durance et la Moselle. La prise en compte des débits au niveau des points intérieurs lors de la calibration des paramètres est alors nécessaire pour ces bassins lorsque l'on souhaite modéliser des débits à ces points. Cependant, pour les autres bassins, cet écart de performance est moins significatif (inférieur à 5%), suggérant ainsi que dans le cadre de la modélisation de points intérieurs non jaugés, une optimisation sur les débits à l'exutoire permettrait de modéliser de façon correcte des débits situés en amont, pour certains bassins versants.

Le second point de cette étude a été d'évaluer la sensibilité des paramètres du modèle au pas de temps de fonctionnement. Cette étude de sensibilité a été réalisée en comparant les performances en validation obtenues à l'aide des paramètres calés sur un pas de temps donné, pour ce pas de temps et pour le second pas de temps. Les résultats ont montré que les paramètres calés au pas de temps horaire ne semblent pas être transférables au pas de journalier, notamment pour les bassins de montagne, alors que ceux calés au pas de temps journalier le seraient davantage au pas de temps horaire. Cela est très intéressant puisque davantage de données sont disponibles au pas de temps journalier. Ces résultats sont cependant fortement dépendants du bassin versant considéré.
Toutefois, le modèle CEQUEAU a été construit de façon à ce que les performances et les paramètres ne dépendent pas du pas de temps de fonctionnement, par l'intermédiaire d'équations amenant à la modélisation du débit, intégrées selon Δt. Dans cette étude le pas de temps de fonctionnement et celui de la résolution des forçages sont confondus. Il devient alors difficile de déterminer si la dépendance des paramètres du modèle au pas de temps est engendrée par l'un ou l'autre des pas de temps. Ainsi, afin d'évaluer réellement cette sensibilité au pas de temps, toutes les combinaisons de pas de temps des résolutions des données de forçages, de pas de temps de fonctionnement et de pas de temps des critères d'évaluation devraient être réalisées.

Afin de compléter l'étude, d'autres tests pourraient être également effectués. En effet, l'échantillon de bassins versants de cette étude étant assez limité, principalement causé par la longue durée de certaines simulations, notamment au pas de temps horaire, les résultats restent très dépendants des bassins versants étudiés. Une plus vaste étude permettrait de pouvoir généraliser les résultats.
De plus, l'étude bibliographique a également révélé, que les résultats étaient fortement dépendants de la structure du modèle utilisé. Ainsi, afin de rendre l'étude plus complète, l'utilisation de modèles hydrologiques ayant des structures variées permettraient de pouvoir identifier la sensibilité des performances, des paramètres et de la robustesse à la structure des modèles.
En outre, afin de pouvoir établir des relations entre performances et paramètres du modèle et le pas de temps de fonctionnement, l'utilisation d'un plus grand nombre de pas de temps pourrait être judicieuse et intéressante. L'étude de sensibilité des paramètres aurait également pu être complétée en transférant les paramètres entre les distributions spatiales, et ainsi étudier la dépendance de ces derniers à cette résolution. Il aurait été intéressant de savoir si les paramètres du modèle global donnent des performances équivalentes lorsqu'ils sont utilisés dans une version distribuée du modèle, et inversement, si ceux des modèles distribués améliorent les performances du modèle global.

Ainsi, cette étude permet de montrer que le débat sur la sensibilité des modèles hydrologiques à leurs résolutions spatiales et temporelles reste très ouvert. Un certain nombre de pistes de recherche intéressantes pourraient être approfondies, afin d'identifier et de comprendre toutes les sensibilités des modèles et ainsi optimiser au mieux leurs utilisation.

7 BIBLIOGRAPHIE

Andersen, J., Refsgaard, J. C. et Jensen K. H., 2001. Distributed hydrological modelling of the Senegal River Basin -- model construction and validation. *Journal of Hydrology* 247, 200-214. doi:16/S0022-1694(01)00384-5.

Booij, M.J., 2004. Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions. *Journal of Hydrology* 303, 176-198. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.07.013.

Carpenter, T. M., et Georgakakos, K. P., 2006. Intercomparison of lumped versus distributed hydrologic model ensemble simulations on operational forecast scales. *Journal of Hydrology* 329, 174-185. doi:16/j.jhydrol.2006.02.013.

Cullmann, J., Mishra, V. et Peters, R., 2006. Flow analysis with WaSiM-ETH? model parameter sensitivity at different scales. *Advances in Geosciences* 9, 73–77.

Das, T., Bárdossy, A., Zehe, E. et He, Y., 2008. Comparison of conceptual model performance using different representations of spatial variability. *Journal of Hydrology* 356, 106–118.

Finnerty, B. D., Smith, M. B., Seo, D.-J. , Koren, V. et Moglen, G., 2009. Sensitivity of the Sacramento Soil Moisture Accounting Model to Space-Time Scale Precipitation Inputs from NEXRAD. *Office of hydrology, NOAA/National Weather Service*. http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/papers/distmodel/sacbstg3.htm.

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K. et Martinez, G. F., 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377, 80-91. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.003.

Khakbaz, B., Imam, B., Hsu, K. et Sorooshian , S., 2009. From lumped to distributed via semi-distributed: Calibration strategies for semi-distributed hydrologic models. *Journal of Hydrology*. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.02.021.

Klemes, V., 1986. Operational Testing of Hydrological Simulation Models. *Hydrological Sciences Journal* 31, no. 1.

Kling, H., et Nachtnebel, H. P., 2009. A spatio-temporal comparison of water balance modelling in an Alpine catchment. *Hydrological Processes* 23, 997–1009.

Littlewood, I., et Croke, B., 2008. Data time-step dependency of conceptual rainfall—streamflow model parameters: an empirical study with implications for regionalisation. *Hydrological Sciences Journal* 53 (4), 685-695. doi:10.1623/hysj.53.4.685.

Littlewood, I., Croke, B. et Young, P., 2011. Discussion of Effects of temporal resolution on hydrological model parameters and its impact on prediction of river discharge. *Hydrological Sciences Journal* 56 (3), 521–524.

Mathevet, T., 2005. Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Thèse de doctorat, ENGREF (Paris) / Cemagref(Antony).

McIntyre, N., et Al-Qurashi, A., 2009. Performance of ten rainfall-runoff models applied to an arid catchment in Oman. *Environmental Modelling & Software* 24, 726-738. doi:16/j.envsoft.2008.11.001.

Morin, G., Fortin, J. P., Lardeau, J. P. et Sochanska, W., 1981. Modèle CEQUEAU: manuel d'utilisation. *Université du Québec*.

Nash, J. E., et SutcliffeJ. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, no. 3: 282-290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.

Obled, C., Zin, I. et Hingray, B., 2008. Choix des pas de temps et d'espace pour des modélisations parcimonieuses en hydrologie des crues. Congrès "Prévisions Hydrométéorologiques". 191ème session du Comité Scientifique et Technique de la Société Hydrotechnique de France. Lyon, 18-19 Novembre 2008.

Ostrowski, M., Bach, M., Gamerith, V. et De Simone, S., 2010. Analysis of the time-step dependency of parameters in conceptual hydrological models. Report. http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2099/.

Oudin, L., 2004. Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de doctorat, ENGREF (Paris) / Cemagref(Antony).

Perrin, C., 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Terre, Univers, Environnement, INPG, Grenoble.

Reed, S., Koren, V., Smith, M., Zhang, Z., Moreda, F., Seo, D. et DMIP participants, 2004. Overall distributed model intercomparison project results. *Journal of Hydrology* 298, 27-60. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.03.031.

Schaake, J., Duan, Q., Smith, M. et Koren, V., 2000. Criteria to select basins for hydrologic model development and testing. *Conference on Hydrology AMS, Long Beach*.

Smith, M. B, Koren, V. I., Zhang, Z., Reed, S. M., Pan, J. J., et Moreda, F., 2004. Runoff response to spatial variability in precipitation: an analysis of observed data. *Journal of Hydrology* 298, 267–286.

Tang, Y., Reed, P., Wagener, T. et Van Werkhoven, K., 2007. Comparing sensitivity analysis methods to advance lumped watershed model identification and evaluation. *Hydrology and Earth System Sciences* 11, 793–817.

Valéry, A., 2010. Modélisation précipitations-débit sous influence nivale. Elaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. Thèse de doctorat, Cemagref (Antony).

Wang, Y., He, B. et Takase, K., 2009. Effects of temporal resolution on hydrological model parameters and its impact on prediction of river discharge. *Hydrological Sciences Journal* 54 (5), 886-898. doi:10.1623/hysj.54.5.886.

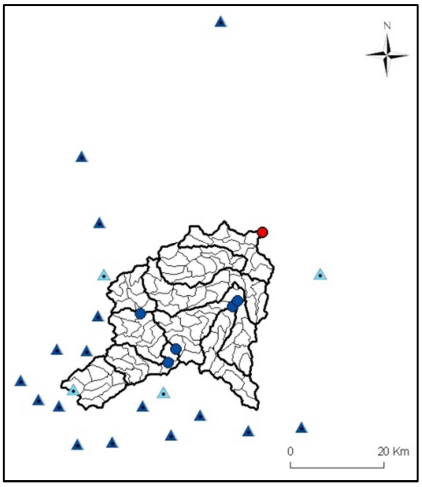
Wang, Y., He, B. et Takase, K., 2011. Reply to the Discussion of « Effects of temporal resolution on hydrological model parameters and its impact on prediction of river discharge » by Littlewood et al . *Hydrological Sciences Journal* 56 (3), 525-528. doi:10.1080/02626667.2011.565770.

8 ANNEXES

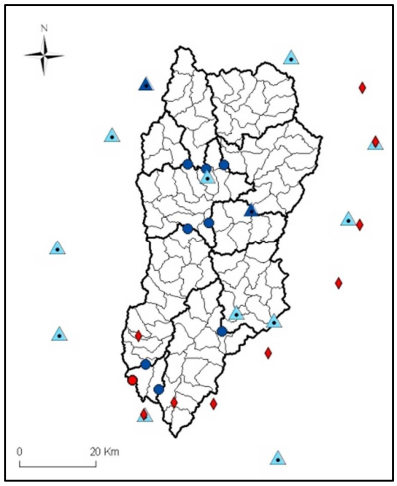
Annexe 1 : Liste des paramètres du modèle CEQUEAU (avec en gras les paramètres fixés)

- La formation et la fonte du stock de neige/glace :
  - STRNE : Seuil de transformation pluie-neige (°C)
  - **JoNei :** Jour de l'année au maximum d'ensoleillement pour la fonte de la neige
  - TFN : Taux potentiel de fonte de la neige (mm/°C/jour)
  - TSN : Seuil de température de fonte de la neige (°C)
  - Constante de temps de mise à l'équilibre avec Tair (jour)
  - **TTS :** Température du murissement du stock de neige (°C)
  - **TFG** : Taux potentiel de fonte de la glace (mm/°C/jour)
  - **TSG** : Seuil de température de fonte de la glace (°C)
  - **CPSolide** : Coefficient de correction des précipitations solides
  - **TNG :** Temps caractéristique de la transformation Neige->Glace
  - **Bonus fonte constant** (apporté par le rayonnement) (°C)
- L'évapotranspiration :
  - Th1: Formule Oudin (ETP = Re/(L*rho)*(T-Th1)/Th2))
  - Th2: Formule Oudin
  - **Culture :** Coefficient cultural moyen (sur tout le bassin)
  - **JoEva :** Jour de l'année au maximum d'ensoleillement pour l'ETP
  - HSeuil : Seuil d'évapotranspiration du réservoir Sol (mm)
  - **EvNap :** Fraction d'ETP prélevée sur la nappe
- Les écoulements dans la zone non saturée (Sol) :
  - **Imper :** Proportion de bassin imperméable (%)
  - HSolMax : Hauteur maximale du réservoir Sol (mm)
  - CTSH : Constante de Temps de vidange Haute du Sol ([T])
  - CTSB : Constante de Temps de vidange Basse du Sol ([T])
  - HInt : Hauteur intermédiaire du réservoir Sol (mm)
  - HInf : Hauteur d'infiltration du réservoir Sol vers le réservoir Nappe (mm)
  - CTIN : Constante de temps d'infiltration Sol->Nappe ([T])
- Les écoulements dans la zone saturée (Nappe) :
  - CTNH : Constante de Temps de vidange Haute de la Nappe ([T])
  - CTNB : Constante de Temps de vidange Basse de la Nappe ([T])
  - HNapMax : Hauteur maximale du réservoir Nappe (mm)
  - **HNapSeuil** : Seuil d'activation/désactivation vidange Basse de la Nappe (mm)
- Les coefficients de correction des pluies et températures en fonction de l'altitude :
  - GradP : Gradient logarithmique de pluie (m)
  - GradT : Gradient linéaire de température (°C/1000m)
  - Portée du variogramme du résidu des Pa (krigeage en dérive externe)
  - **Portée du variogramme du résidu des Ta** (krigeage en dérive externe)
- Les transferts entre mailles (fonction de transfert) :
  - Célérité (m/s)
  - Diffusion (m^2/s)

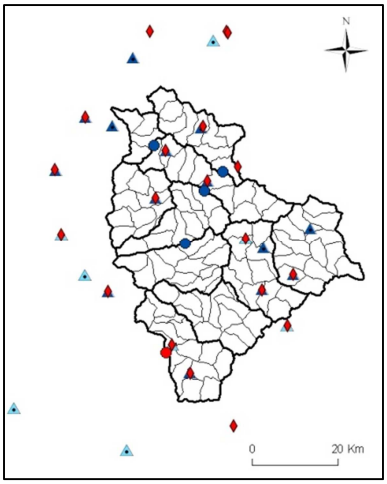
Annexe 2 : Cartes représentant les postes pluviométriques, hydrométriques et de température pour chaque bassin versant, ainsi que les différents maillages étudiés (global, 10 (trait gras) et 100 mailles (trait fin).



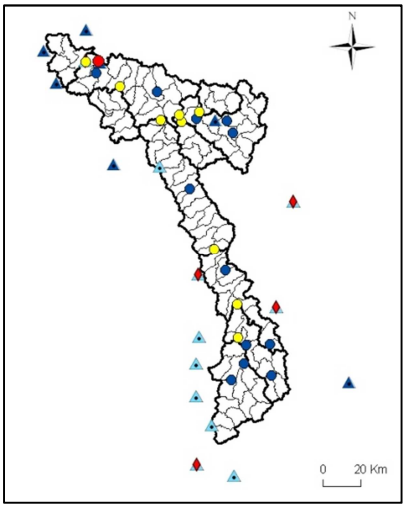
Alagnon à Lempdes



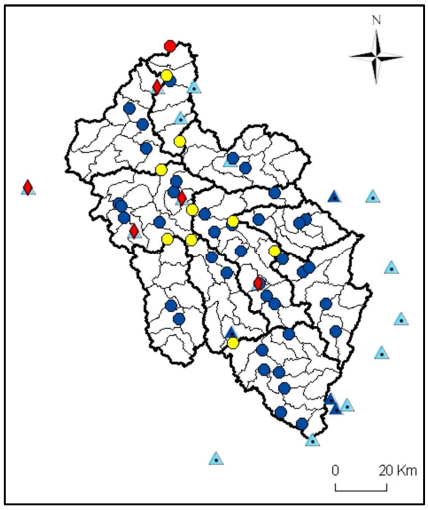
Arroux à Digoin



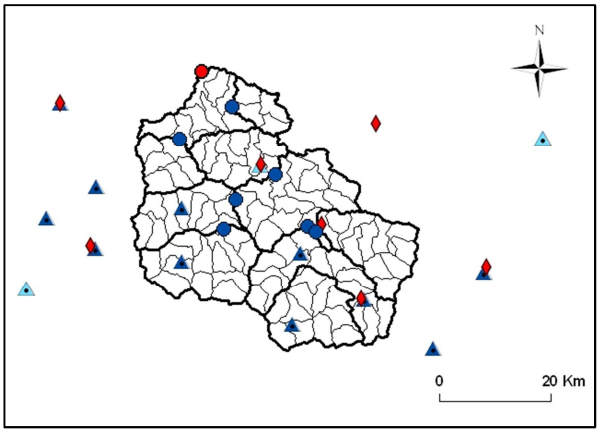
Durance à la Clapière



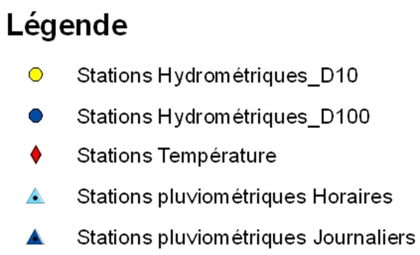
Meuse à Montcy-Notre-Dame



Moselle à Hauconcourt



Salat à Roquefort-sur-Garonne



Résumé

Le choix des résolutions spatiales et temporelles à adopter en modélisation hydrologique reste un débat actuel et capital pour l'optimisation et l'utilisation de ces outils. L'objectif de cette étude a été ainsi d'évaluer les sensibilités des performances, de la robustesse et des paramètres du modèle pluie-débit CEQUEAU à ces différentes résolutions, pour six bassins versants aux caractéristiques variées. Trois degrés de spatialisation d'une même structure de modèle ont alors été envisagés : un modèle global, des modèles distribués à 10 mailles et 100 mailles ; ainsi que deux pas de temps : horaire et journalier.

Les résultats montrent que les performances et la robustesse du modèle sont peu sensibles au pas de temps. La modélisation des débits à l'exutoire semble plus performante et robuste lors de l'utilisation de modèles distribués, et plus particulièrement pour les bassins de montagne. Ce gain de performance est principalement attribué à la spatialisation des données d'entrée du modèle, et en particulier de la température, essentielle pour la modélisation de la neige. De plus, une optimisation des paramètres par un critère tenant compte uniquement du débit à l'exutoire permet d'obtenir pour la majorité des bassins versants, des performances aux points intérieurs proches de celles obtenues avec une optimisation des débits au niveau des points intérieurs. Ainsi, dans le cadre de points intérieurs de débits non jaugés, une optimisation sur le débit à l'exutoire permettrait de modéliser de façon correcte des débits de stations non jaugées situées en amont, pour certains bassins versants.

Enfin, les paramètres du modèle CEQUEAU ne semblent pas être transférables du pas de temps horaire vers le pas de temps journalier, mais le transfert du journalier vers l'horaire semble davantage être réalisable. Ce qui est plutôt confortant, puisque les données journalières sont nettement plus abondantes. Toutefois, les résultats restent sensiblement dépendants du bassin versant considéré.