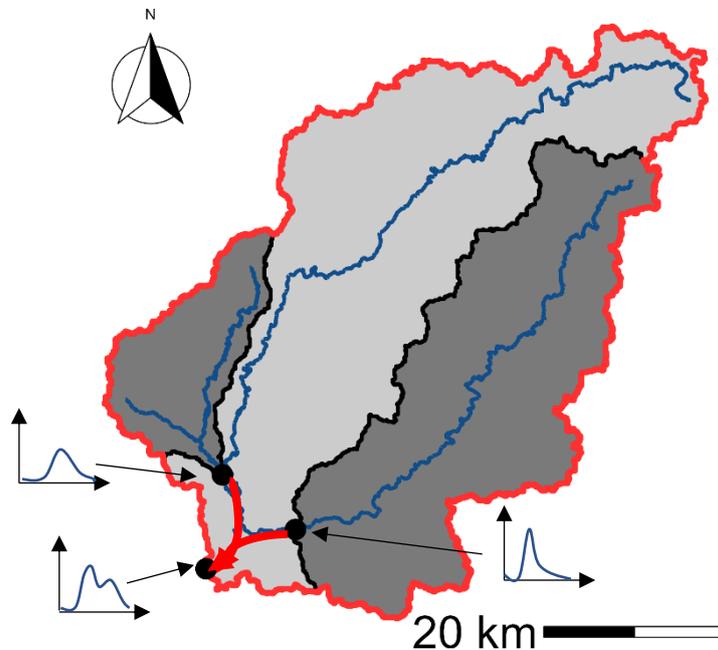


Hydrosystèmes et Bassins Versants : diagnostic et risque environnemental

Rapport de stage de fin d'études pour l'obtention
de la 2nde année de Master

Quelle fonction de propagation choisir pour relier les différentes mailles d'un modèle hydrologique semi-distribué ?



Henrotin Enola

22 août 2022

Année universitaire : 2021 - 2022

Encadrement : Cyril Thébault & David Dorchie

Organisme d'accueil : INRAE Antony

(1 Rue Pierre Gilles de Gennes, 92160 Antony)

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé à la réalisation de ce stage et pour l'écriture de ce rapport.

Je remercie tout d'abord mon maître de stage Cyril Thebault qui a toujours pris le temps qu'il fallait pour répondre à mes questions et qui m'a guidé tout au long de ce stage. Je remercie aussi David Dorchies, co-encadrant de ce stage pour son aide précieuse à la compréhension du modèle et sur les questions de programmation.

Je tiens à signifier ma gratitude pour toute l'équipe de l'INRAE d'Antony pour leur accueil chaleureux et qui m'ont permis de vivre une expérience dans une équipe dynamique et soudée. Merci également à la CNR, co-financeur de ce stage, pour leur expertise sur les cas d'études réels des affluents du Rhône.

Pour finir je remercie aussi ma famille pour son soutien et les relectures de mon rapport.

Table des matières

1	Introduction.....	1
2	Contexte	2
2.1	Contexte général	2
2.2	Contexte scientifique.....	3
3	Matériel et méthode	3
3.1	Fonctions de propagation utilisées	3
3.1.1	Lag – Fonction de référence	4
3.1.2	Lag & route – Fonctions implémentées	4
3.2	Étude hydraulique	6
3.2.1	Modèle hydraulique	6
3.2.2	Cas d'études hydrauliques	6
3.2.3	Méthodologie de tests hydrauliques.....	8
3.3	Étude hydrologique	9
3.3.1	Modèle hydrologique	9
3.3.2	Zone d'étude hydrologique et données hydroclimatiques	11
3.3.3	Méthodologie de tests hydrologiques	14
4	Résultats	15
4.1	Étude hydraulique	15
4.2	Étude hydrologique	21
4.2.1	Résultats à l'échelle des chroniques	21
4.2.2	Résultats à l'échelle événementielle.....	24
5	Discussions	29
6	Perspectives.....	32
	Conclusion	32
7	Références Bibliographiques.....	34
8	Liste des illustrations	36
9	Liste des tableaux	36
	Annexes	37
	Annexe 1 : Caractéristiques des cas d'études hydrauliques	37
	Annexe 2 : Caractéristiques des cas d'études hydrologiques	37
	Annexe 3 : Compléments des résultats.....	38

1 Introduction

Les sociétés humaines ont toujours été soumises aux aléas des cours d'eau, et ont dû vivre au gré des crues et des étiages. Ces problématiques sont d'autant plus importantes de nos jours avec l'intensification de l'urbanisation des bassins versants et le changement climatique.

Un bassin versant est un territoire irrigué par un même réseau hydrographique, c'est-à-dire où l'ensemble des eaux reçues se retrouvent à son exutoire. Il s'agit donc d'un système complexe où de nombreux échanges entre l'atmosphère, le sol et les nappes se produisent, et où les influences anthropiques se font de plus en plus présentes.

Un modèle hydrologique est une représentation simplifiée du système complexe qu'est un bassin versant. Il s'agit donc d'un outil de choix pour toute étude hydrologique (e.g. irrigation, qualité de l'eau, prévision des crues, changement climatique). Il permet de simuler des variables hydrologiques (e.g. le débit d'une rivière) à partir d'observations climatiques (e.g. les précipitations, les températures). Afin de décrire les différents phénomènes mis en jeu, plusieurs simplifications du système sont nécessaires : sur la dimension temporelle, sur la dimension spatiale et dans la description des processus (Perrin 2000).

Dans le cadre de ce stage, nous nous sommes intéressés à la dimension spatiale. Avec la disponibilité croissante d'informations spatialisées (e.g. précipitations, caractéristiques physiques), la volonté de scinder un bassin versant en sous-unités plus fines (e.g. en sous-bassins pour la semi-distribution, en grille pour une distribution totale) se fait de plus en plus grande. Afin de relier ces différentes mailles, i.e. de propager des débits de l'amont vers l'aval au sein du réseau hydrographique, une méthode de propagation (aussi appelée routage) est nécessaire.

L'objectif ici est donc de répondre à la question suivante : quelle fonction de propagation choisir dans le cadre d'études hydrologiques semi-distribuées au pas de temps horaire (e.g. gestion d'ouvrages hydroélectriques, prévision des crues) ? Ce stage a permis de sélectionner et de tester différentes fonctions de propagation adaptées.

Le présent rapport dresse l'état du travail fourni sur ce sujet. Il conviendra donc dans un premier temps de présenter le contexte de ce stage. Il sera ensuite question de présenter les différentes fonctions testées ainsi que les études hydrauliques et hydrologiques réalisées. Les résultats obtenus seront ensuite expliqués et discutés avant de conclure.

2 Contexte

2.1 Contexte général

Ce stage s'est déroulé au sein de l'INRAE (Institut National de la Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement) d'Antony et plus précisément au sein de l'équipe HYDRO, spécialisée dans la modélisation hydrologique (e.g. la prévision des crues et des étiages, les changements climatiques et environnementaux). Les réflexions amont sur le sujet ont été faites en association avec la CNR (Compagnie Nationale du Rhône) qui ont pour objectifs d'utiliser la semi-distributions sur certains affluents du Rhône afin de mieux prévoir les débits à courte échéance pour une meilleure gestion de leurs barrages hydroélectriques.

Pour cela, une bonne compréhension du phénomène de propagation des sous-bassins amont vers l'exutoire aval est nécessaire. Succinctement, la propagation d'une onde de crue présente une réduction d'intensité ainsi qu'un étalement du débit dans le temps entre l'amont et l'aval d'un système (Figure 1). Les méthodes de routage sont donc des procédures mathématiques pour prévoir la magnitude, la forme et la vitesse d'une onde de crue (Bentura, 1996).

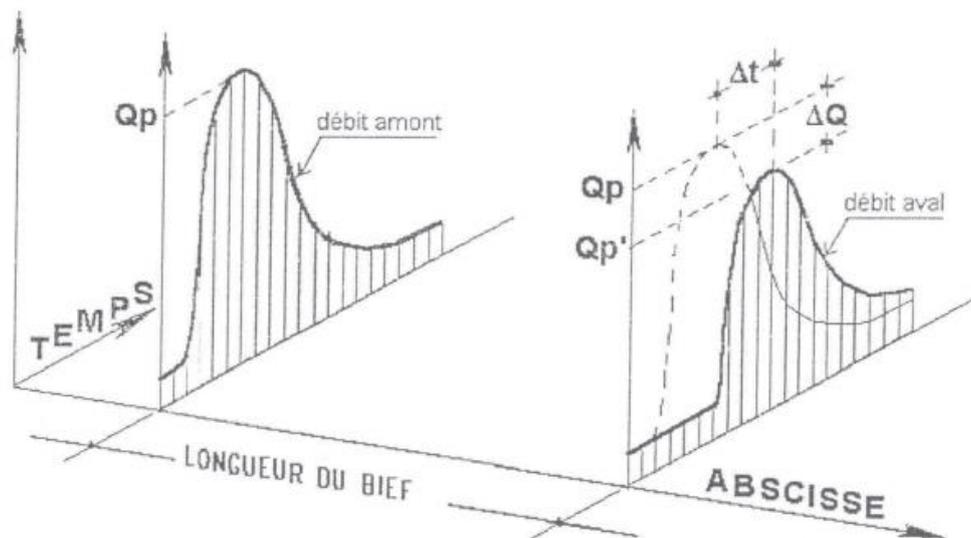


Figure 1 Propagation d'une crue (Bentura, 1996)

Cependant, le modèle de propagation utilisé par la CNR et l'INRAE dans un cadre semi-distribué ne prend pas en compte ce phénomène d'atténuation. L'objectif de ce travail est donc d'implémenter de nouvelles fonctions de routage afin de combler cette limite physique. Ces fonctions seront ajoutées au package airGR (Coron et al. 2017; 2021), incorporant les outils de modélisation hydrologique développés au sein d'INRAE Antony dans le logiciel R (<https://www.r-project.org/>).

2.2 Contexte scientifique

Les fonctions de routage répertoriées dans la littérature sont nombreuses et présentent des niveaux de complexité très variés. Elles peuvent être divisées en trois catégories : les méthodes à base physique, conceptuelles et hybrides. Les méthodes dites à base physique correspondent à la transcription des processus par les équations physiques provenant souvent de la simplification des équations de Saint-Venant. Elles demandent un grand nombre de mesures (largeur du cours d'eau, pente, rugosité, ...) qui ne sont pas forcément connues sur l'ensemble d'un bassin. La méthode des ondes cinématiques, des ondes diffusantes ou des ondes dynamiques sont des fonctions à base physique.

Les méthodes conceptuelles sont de bons substituts puisqu'elles permettent de représenter les phénomènes de manière simple (remplissage et vidange de réservoirs le plus souvent), sans les décrire de manière physique par les équations de Saint-Venant. Les méthodes conceptuelles explorées durant ce stage sont les hydrogrammes unitaires, les cascades de Nash (Nash 1957; Moramarco *et al.* 1999), les méthodes de lag & route (Bentura et Michel, 1997) et la méthode des réservoirs parallèles (Guinot *et al.*, 2015).

Les fonctions de propagation hybrides correspondent à un compromis entre les méthodes conceptuelles et à bases physiques. En effet, celles-ci ont été élaborées en partant des équations de Saint-Venant et en les simplifiant par le biais de réservoirs conceptuels. Les différentes méthodes de Muskingum (Cunge, McCarthy...), le modèle de Hayami, le routage grâce à la loi gamma (Jay-Allemand 2021) sont de bons exemples de fonctions de propagation hybrides.

3 Matériel et méthode

3.1 Fonctions de propagation utilisées

Les paragraphes suivants détaillent les différentes fonctions de propagation utilisées dans le cadre de cette étude. On distinguera notamment le lag qui est la méthode déjà implémentée dans airGR, des fonctions de type lag & route, qui elles ont été implémentées lors de ce stage. Ces nouvelles fonctions ont été choisies pour leurs données d'entrée limitées et simples d'obtention (longueurs hydrauliques, tailles des bassins), ainsi que leur parcimonie (2 paramètres maximum). En effet, un point limitant de la modélisation hydrologique est le temps de calcul lors de la recherche des paramètres optimaux, réduire la complexité est donc un enjeu important. En toute rigueur, il serait nécessaire de caler un modèle de propagation pour chaque bassin amont. Dans un but d'optimisation du temps de calcul, une astuce peut être utilisée. Celle-ci consiste à définir un jeu de paramètres de transfert global à l'échelle du bassin, qui sera ensuite différencié pour chacun des bassins versants amonts en fonction d'un descripteur physique (ici,

la longueur hydraulique). Cependant, la mise en place d'une telle conversion est très rarement décrite dans la littérature scientifique et n'est pas toujours évidente à déterminer.

3.1.1 Lag – Fonction de référence

La fonction de propagation « lag » est régulièrement utilisée en modélisation hydrologique semi-distribuée. Cette méthode est d'ailleurs la seule disponible pour le moment dans le package airGR et servira de référence. Cependant le « lag » est une représentation très simplifiée du déplacement d'une onde de crue puisqu'elle consiste en un décalage constant T des chroniques provenant de l'amont vers l'aval sans atténuation.

$$Q_{aval}(t + T) = Q_{amont}(t) \quad (1)$$

avec Q_{aval} et Q_{amont} , respectivement le débit à l'exutoire et les débits amont propagés, et T le temps de retard.

Dans ce cas, T est un paramètre distribué puisqu'il est différent pour chaque sous-bassin amont. Rappelons que dans un contexte de modélisation hydrologique semi-distribuée sur de nombreux bassins, le nombre de paramètres à caler devient rapidement un facteur limitant et un paramètre global doit donc être déterminé. Le décalage temporel engendré par la propagation entre l'amont et l'aval correspond au ratio entre la distance amont-aval parcourue par l'onde de crue et sa vitesse d'écoulement. En supposant que la vitesse d'écoulement est uniforme sur le bassin intermédiaire, il est possible de déterminer un paramètre global unique, noté C_0 , tel que :

$$T = \frac{d}{C_0} \quad (2)$$

avec T le temps de retard en secondes, d la distance amont-aval en mètres et C_0 un paramètre global représentant une vitesse moyenne d'écoulement sur le bassin intermédiaire en m/s.

3.1.2 Lag & route – Fonctions implémentées

Les fonctions « lag & route » ont pour objectif de reprendre le délai engendré par la propagation mais également de prendre en compte le phénomène d'écèlement lié à différentes caractéristiques physiques des cours d'eau (e.g. pente, rugosité, forme). Plusieurs fonctions de ce type ont été implémentées et comparées lors de ce travail.

3.1.2.1 Lag & route linéaire de Bentura et Michel

Bentura et Michel (1997) proposent une méthode conceptuelle où le débit est retardé via l'équation 2 puis amorti grâce à un réservoir linéaire. Le débit sortant est ainsi exprimé de la manière suivante :

$$Q_{aval}(t + \Delta t + T) = P_0 Q_{aval}(t + T) + P_1 Q_{amont}(t) + P_2 Q_{amont}(t + \Delta t) \quad (3)$$

avec Δt le pas de temps d'étude, $P_0 = \exp\left(-\frac{\Delta t}{K}\right)$, $P_1 = \frac{K}{\Delta t}(1 - P_0) - P_0$ et $P_2 = 1 - \frac{K}{\Delta t}(1 - P_0)$, où K représente l'atténuation en heure.

Cependant, les auteurs précisent que l'atténuation est calculée pour chaque sous-bassin amont. Laganier *et al.* (2014) proposent une alternative avec un paramètre global unique en reliant le retard et l'atténuation de la manière suivante :

$$K = K_0 \times T \quad (4)$$

avec K_0 un paramètre global adimensionné représentant l'atténuation.

3.1.2.2 Lag & route quadratique de Bentura et Michel

Bentura et Michel (1997) proposent également une seconde version du « lag & route » en utilisant une nouvelle fois un délai défini via l'équation 2 mais en utilisant cette fois-ci une équation de vidange de réservoir quadratique. Le débit sortant est ainsi exprimé de la manière suivante :

$$Q_{aval}(t + T + \Delta t) = \left[\frac{Q_{aval}(t + T)^{0,5} + Q^{*0,5} \times \tanh\left(\frac{Q^{*0,5} \times \Delta t}{K}\right)}{1 + \left(\frac{Q_{aval}(t + T)}{Q^*}\right)^{0,5} \times \tanh\left(\frac{Q^{*0,5} \times \Delta t}{K}\right)} \right]^2 \quad (5)$$

avec K l'atténuation en $m^{3/2} h^{1/2}$ et Q^* le débit amont moyen entre t et $t + \Delta t$ en m^3/h défini ici tel que $Q^* = \frac{Q_{amont}(t + \Delta t) + Q_{amont}(t)}{2}$

Une nouvelle fois, il est nécessaire de trouver un paramètre global pour le calcul de l'atténuation. Cependant, aucune relation n'a été trouvée dans la littérature à ce propos. Nous sommes ainsi repartis de l'équation 4 proposée par Laganier et al. (2014) en l'adaptant après une analyse dimensionnelle afin de respecter l'homogénéité de la formule. La relation entre le retard et l'atténuation est ainsi défini de la manière suivante :

$$K = \sqrt{K_0 \times A \times 10^{-3} \times T} \quad (6)$$

avec K_0 un paramètre global $mm \cdot h^{-1}$ représentant l'atténuation et A l'aire du bassin versant amont en m^2 .

3.1.2.3 Lag & route linéaire de Munier

Munier (2009) propose une approche originale permettant d'obtenir un modèle simple de type « lag & route » basé sur les équations physiques de Saint-Venant. Le débit à l'exutoire est exprimé de la manière suivante :

$$Q_{aval}(t + T + \Delta t) = (1 - a) \times Q_{aval}(t + T) + a \times Q_{amont}(t) \quad (7)$$

avec $a = 1 - e^{-\left(\frac{\Delta t}{K}\right)}$ et K l'atténuation en heures.

L'auteur propose ainsi de définir 2 paramètres globaux C_0 (représentant la vitesse d'écoulement en m/s) et K_0 (représentant la vitesse de vidange du réservoir d'amortissement en m/s) tels que:

$$K = \sqrt{x} \times K_0' \quad (8)$$

$$T = x \times (T_0' + K_0') - K_0' \sqrt{x} \quad (9)$$

avec $x = \frac{d}{d_{max}}$, $T_0' = \frac{d_{max}}{C_0 \times \Delta t}$ et $K_0' = \frac{d_{max}}{K_0 \times \Delta t}$ où d_{max} représente la longueur du plus long bief séparant les bassins amont de l'exutoire aval.

Notons qu'avec cette équation le cas où $T < 0$ peut apparaître. En conséquence, on fixera alors $T = 0$ et $K = x \times (T_0' + K_0')$.

3.2 Étude hydraulique

L'étude hydraulique sert à tester et observer le comportement de chaque fonction de routage dans un cadre de propagation pure, i.e. ne présentant pas d'apports de débits latéraux le long du réseau hydrographique (notamment dans le bassin intermédiaire).

3.2.1 Modèle hydraulique

Le modèle hydraulique utilisé dans le cadre de cette étude est le modèle SIC²-2 (Simulation Intégrée des Canaux et de leur Contrôle) développé par l'UMR G-EAU d'INRAE Montpellier (Dorchies, Baume, et Malaterre 2013). Il s'agit d'un modèle unidimensionnel d'hydraulique à surface libre basé sur la résolution des équations de Saint-Venant conçu pour modéliser les rivières naturelles.

3.2.2 Cas d'études hydrauliques

Les cas d'études créés sont synthétiques mais correspondent à différentes configurations de réseaux hydrographiques qui peuvent être rencontrées dans la réalité. On fera alors varier différentes caractéristiques physiques telles que la rugosité, la pente, la longueur ou la largeur du bief. Les débits entrants correspondent à un unique hydrogramme suivant une loi normale avec une moyenne $\mu = 36 * 3600$ correspondant au temps pour lequel le pic est atteint et un écart-type $\sigma = 6 * 3600$ (Figure 2).

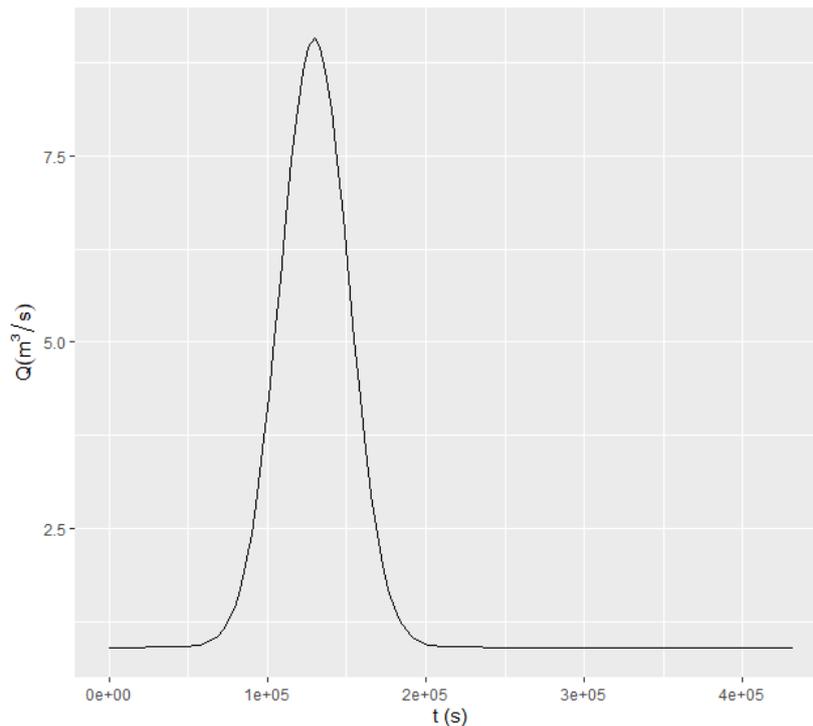


Figure 2 Hydrogramme suivant la loi normale injecté aux stations amonts des cas d'études

Ainsi 5 cas d'études judicieusement choisis ont été créés (Figure 3). Un tableau recensant leurs caractéristiques physiques peut être trouvé en Annexe 1 : Caractéristiques des cas d'études hydrauliques.

1. Le premier cas est constitué d'un nœud à l'amont connecté au nœud aval avec une géométrie de chenal uniforme. Ce cas a pour objectif de tester la capacité des fonctions à reproduire une déformation d'un pic de crue.
2. Le deuxième cas est constitué de deux nœuds à l'amont : le premier à l'extrême amont et le second sur le dernier tiers du bief, l'objectif étant de reproduire les deux pics et une intensification de la déformation dus à une plus grande distance entre les nœuds amont.
3. Le troisième cas est constitué de deux nœuds amont situés à égale distance de la confluence.
4. Le quatrième cas lui aussi est dérivé du précédent avec une variation des paramètres des caractéristiques (pente, largeur du chenal, rugosité) ce qui mène à l'apparition de deux pics.
5. Le dernier cas est dérivé du quatrième avec une confluence directement à l'aval. Les deux biefs amont ont des caractéristiques différentes mais une longueur identique.

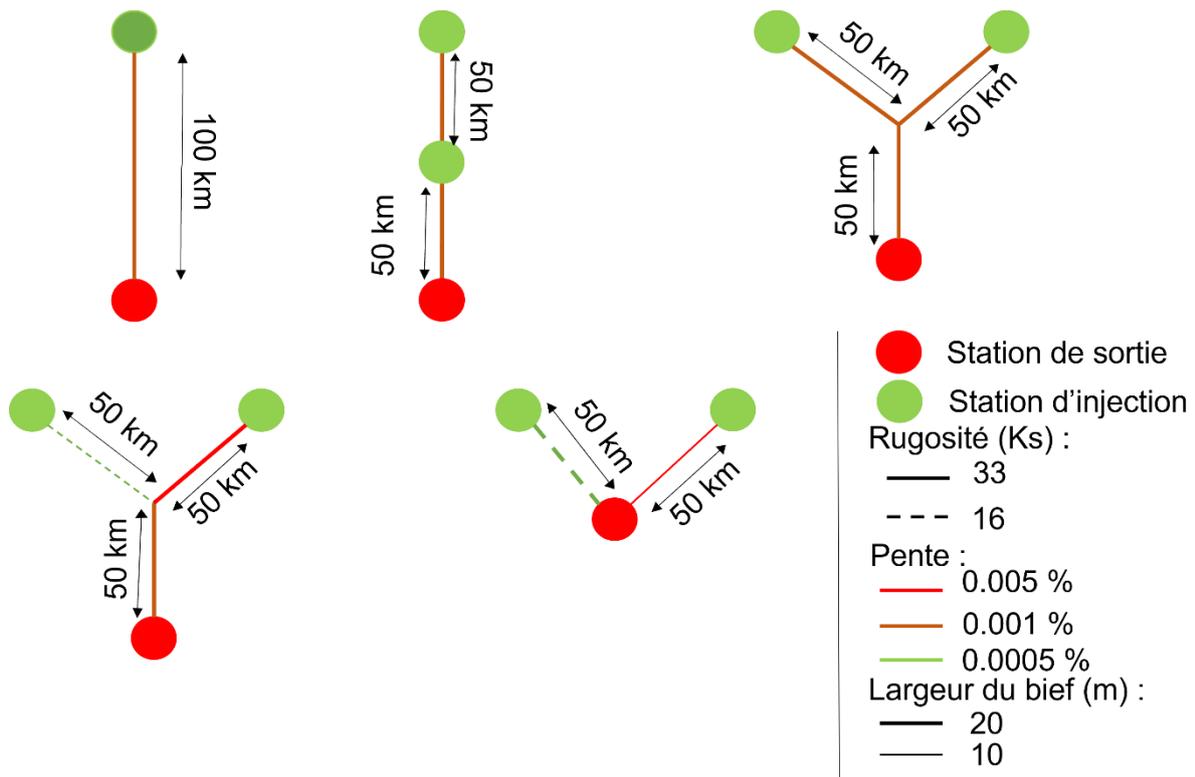


Figure 3 schéma des cinq configurations choisies pour l'étude de la propagation hydraulique seule.

3.2.3 Méthodologie de tests hydrauliques

Dans ce cadre de tests hydrauliques, le débit obtenu à l'exutoire pour chacun de ces cas tests avec le modèle hydraulique servira d'« observation » puisqu'aucune mesure n'est disponible. L'objectif pour les différentes fonctions implémentées (Partie 3.1) est donc de reproduire de façon la plus fiable possible le comportement du modèle SIC-2. Pour cela, une première étape d'optimisation des paramètres est nécessaire. Le critère à maximiser ici est le KGE (Kling – Gupta Efficiency) (Gupta *et al.* 2009). Ce critère, usuellement utilisé pour des chroniques de débits, permet de calculer la performance d'une série simulée par rapport à une série d'observations et est défini tel que :

$$KGE(sim \sim obs) = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (10)$$

avec r la corrélation, α le ratio des écarts-types et β le biais entre un débit simulé et un débit observé.

Le KGE est donc un critère variant dans l'intervalle $]-\infty ; 1]$ où 1 représente l'optimal à atteindre.

Notons que ce critère a été utilisé sur la racine des débits afin d'obtenir un compromis sur le poids accordé aux hauts et bas débits.

Une fois les différents modèles de propagation calés, une évaluation de leurs capacités à reproduire le débit à l'exutoire doit être faite. Pour cela trois critères différents seront utilisés :

- 1) Le KGE issu du calage. Il s'agit d'un bon indicateur de la performance d'ensemble des modèles mais n'est pas suffisant à l'échelle événementielle.
- 2) Le débit de pointe Q_{max} . Ce critère permet de savoir si les modèles ont réussi à représenter le maximum de débit atteint lors du pic de crue.
- 3) La date du pic T_{max} , représentant l'heure à laquelle Q_{max} est atteint.

Un écart en pourcentage, normé, entre la valeur simulé et observé sera appliqué sur chacun de ces critères afin de faciliter l'analyse :

$$Q_{max\%} = \frac{Q_{max}(sim) - Q_{max}(obs)}{Q_{max}(obs)} \times 100 \quad (11)$$

$$T_{max\%} = \frac{T_{max}(sim) - T_{max}(obs)}{T_{max}(obs)} \times 100 \quad (12)$$

$$V_{\%} = \frac{V(sim) - V(obs)}{V(obs)} \quad (13)$$

$$KGE_{\%} = (KGE - 1) \times 100 \quad (14)$$

Le $KGE_{\%}$ correspond à un écart en pourcentage par rapport à l'optimal. Cette valeur sera donc inférieure à 0. On admettra que la performance est bonne lorsque le $KGE_{\%}$ se situera entre -20% et 0% (soit un KGE supérieur à 0.8). Pour les autres critères ($Q_{max\%}$, $T_{max\%}$ et $V_{\%}$), une valeur positive de ces taux correspond à une surestimation de la simulation par rapport à l'observé et une valeur négative à une sous-estimation.

3.3 Étude hydrologique

3.3.1 Modèle hydrologique

Le modèle hydrologique utilisé dans le cadre de cette étude est le modèle GR5H (Le Moine 2008a; Ficchi 2017; Ficchi *et al.* 2019) développé par l'UR HYCAR d'INRAE Antony et disponible dans le package airGR (Coron *et al.* 2017; 2021). Il s'agit d'un modèle global conceptuel à réservoirs à 5 paramètres fonctionnant au pas de temps horaire (Tableau 1, Figure 4).

Tableau 1 Paramètres du modèle GR5H

Paramètres	Description	Unité	Valeurs usuelles en France
X1	Capacité du réservoir de production	mm	100 to 400
X2	Coefficient d'échange avec la nappe	mm·h ⁻¹	-0.4 to 0.0
X3	Capacité du réservoir de routage	mm	40 to 390
X4	Constante de temps de l'hydrogramme unitaire	h	2 to 27
X5	Seuil d'échange inter-bassins	-	0.1 to 0.3

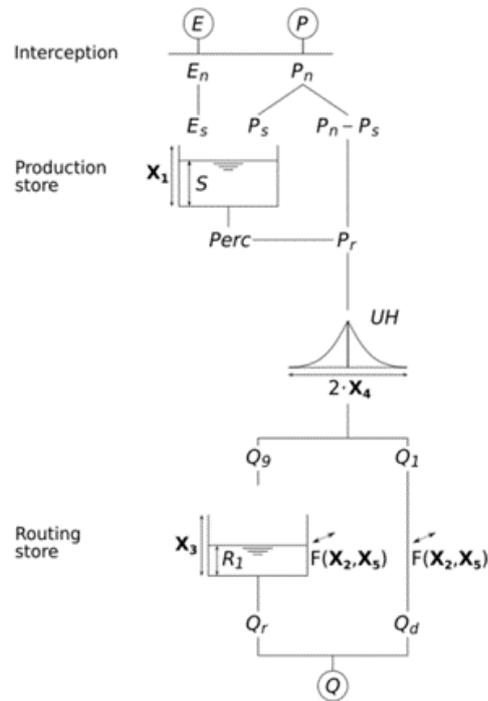


Figure 4 Schéma conceptuel du modèle GR5H

La version semi-distribuée de ce modèle consiste à modéliser dans un premier temps chaque sous-bassin amont puis à propager les débits simulés de l'amont vers l'aval par un modèle de propagation, tout en intégrant les apports du bassin versant intermédiaire pour obtenir le débit simulé à l'exutoire aval (Figure 5).

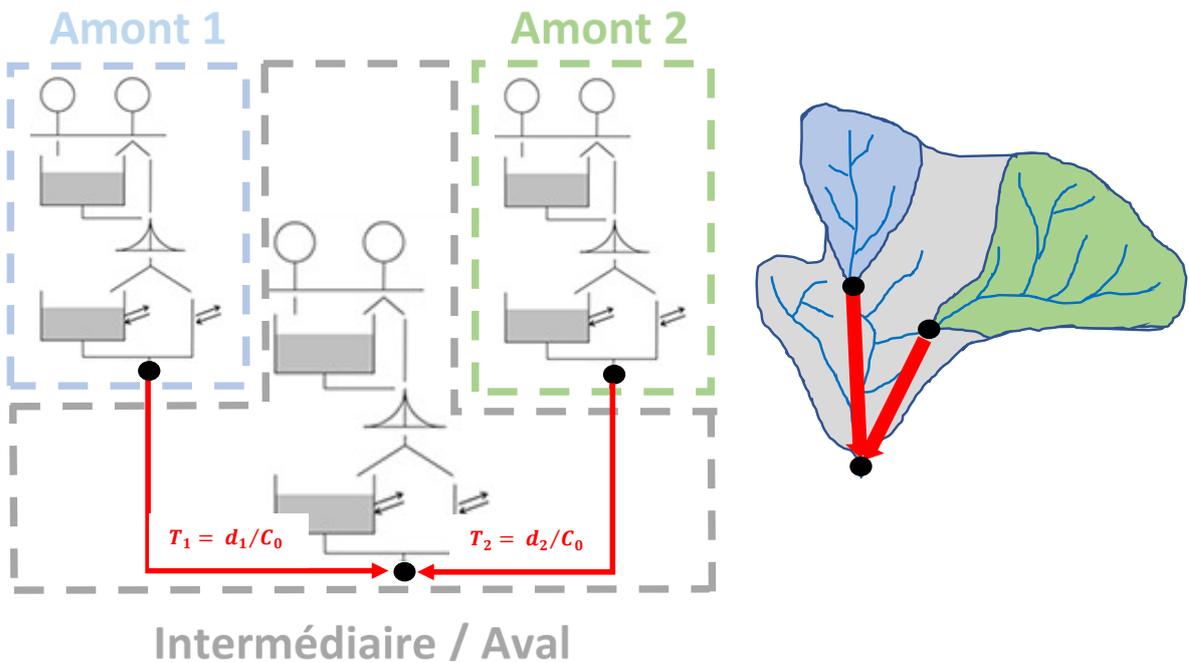


Figure 5 Schéma représentant le fonctionnement des modèles GR en contexte semi-distribué.

3.3.2 Zone d'étude hydrologique et données hydro-climatiques

Ce travail a été réalisé au pas de temps horaire en utilisant des chroniques de précipitations, d'évapotranspiration potentielle et de débits sur la période 1998-2018 (Delaigue et al. 2020).

Les données de précipitation sont issues de la réanalyse COMEPHORE produite par Météo-France (Tabary et al. 2012) qui fournit l'information de manière continue et spatialisée à une résolution de 1km².

L'évapotranspiration potentielle est calculée avec la formule proposée par (Oudin et al. 2005). Cette équation a été choisie pour sa simplicité, car la seule entrée requise est la température journalière de l'air (issue de la réanalyse SAFRAN de Météo-France, cf.(Vidal et al. 2010)) et le rayonnement extra-terrestre (qui ne dépend que de la latitude). Une fois calculée, l'évapotranspiration potentielle journalière a été désagrégée au pas de temps horaire en utilisant une simple parabole (Lobligeois, 2014).

Les chroniques de débit proviennent majoritairement du service nationale de la BanqueHydro (Leleu et al. 2014) mais également de la CNR (Compagnie Nationale du Rhône) pour quelques stations du Rhône ou de ses affluents.

Finalement, ce sont 153 bassins versants semi-distribués simples (i.e. présentant un ou plusieurs sous-bassins amont mais un unique bassin intermédiaire) et ayant des chroniques complètes (moins de 5% de lacune par an dans les données de débit) qui ont été sélectionnés sur l'ensemble de la France métropolitaine (Figure 6).

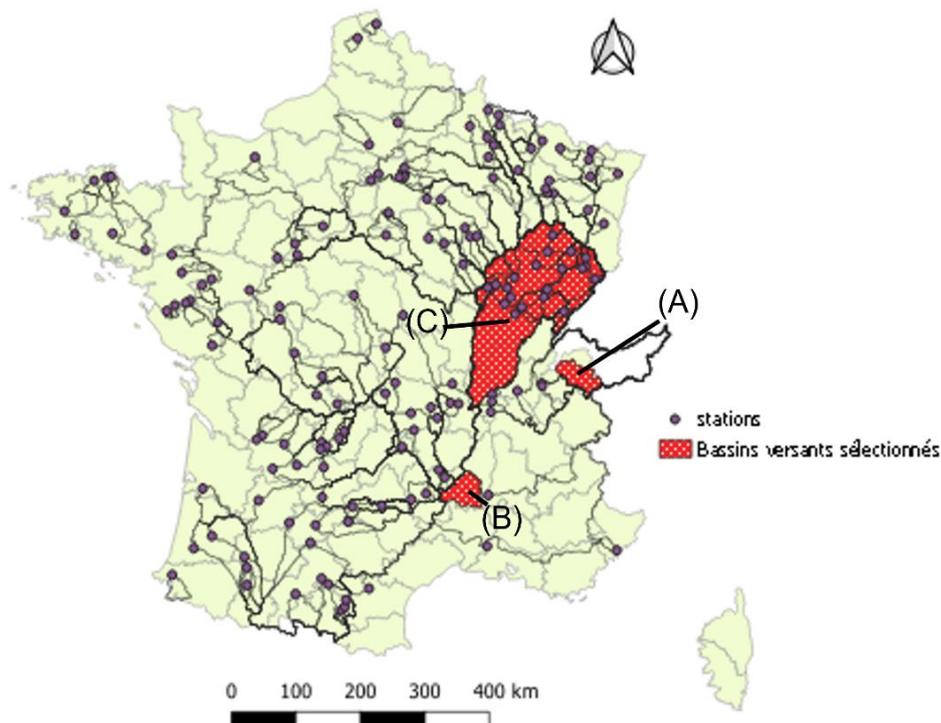


Figure 6 Bassins versants étudiés avec A l'Arve, B l'Ardèche et C la Saône.

Une sélection d'évènements a également été réalisé sur trois affluents du Rhône aux comportements hydrologique différents :

- (A) L'Arve est un cours d'eau de haute altitude prenant sa source dans le massif du Mont-Blanc et suivant un régime Nival (Figure 7 B).
- (B) L'Ardèche un cours d'eau situé dans le département éponyme. Le fleuve suit un régime pluvial et est connu pour des fortes crues, dites cévenoles, durant l'automne. Notons également que ce bassin est en partie influencé par des ouvrages hydrauliques permettant le soutien d'étiage (Figure 7 A).
- (C) La Saône est l'un des plus grands cours d'eau situé dans l'Est de la France. Il s'agit du principal affluent de la rive droite du Rhône. La Saône suit un régime pluvial.

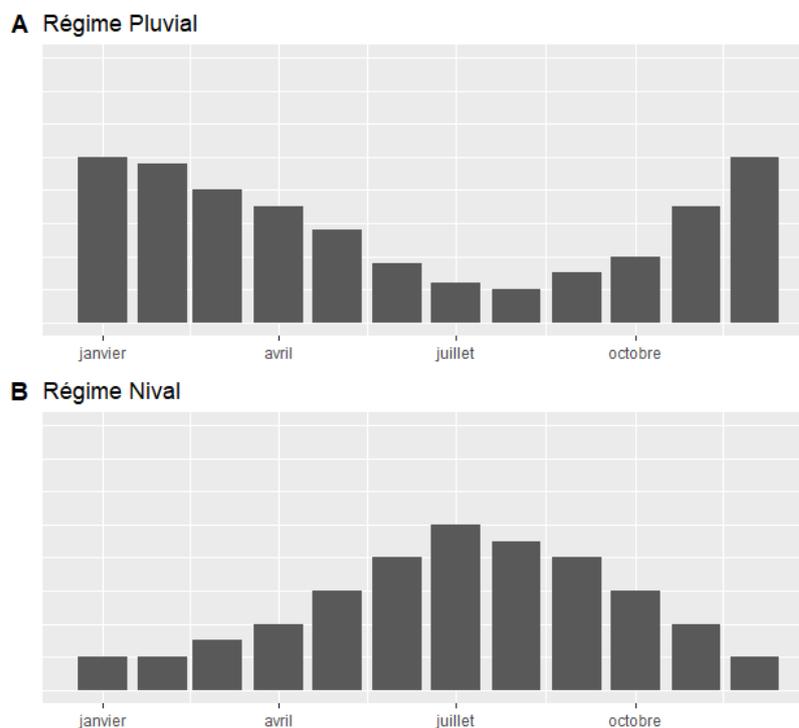


Figure 7 Schématisation des régimes hydrologiques

Les détails de modélisation sur ces trois bassins sont fournis en Annexe 2 : Caractéristiques des cas d'études hydrologiques. En tout ce sont 304 évènements qui ont été recensés depuis la fin du XIX^{ème} siècle sur ces affluents. Notons que cette sélection d'évènement a été réalisée de manière automatique sur les données de pluie uniquement. Nous détaillerons dans ce rapport trois d'entre eux, présentant des comportements contrastés (Figure 9 à Figure 10).

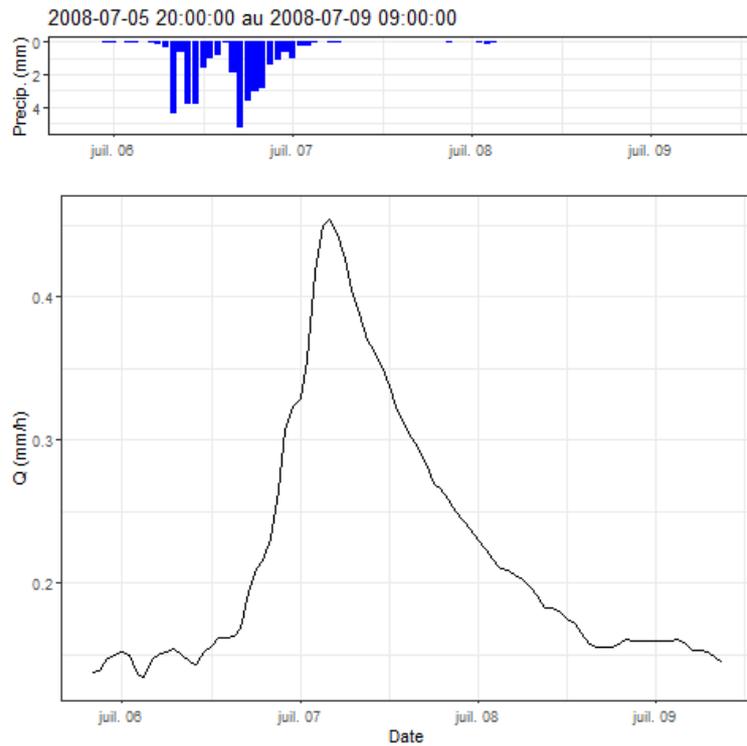


Figure 9 Évènement du 05 juillet 2008 au 09 juillet 2008 de l'Arve à Bout-du-Monde.

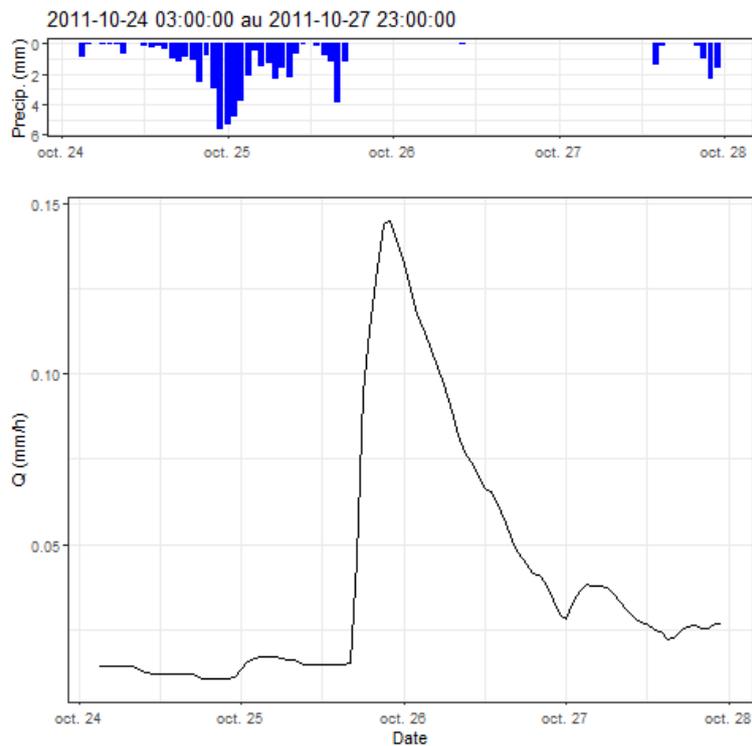


Figure 8 Évènement du 24 octobre 2011 au 27 octobre 2011 de l'Ardèche à Sauze.

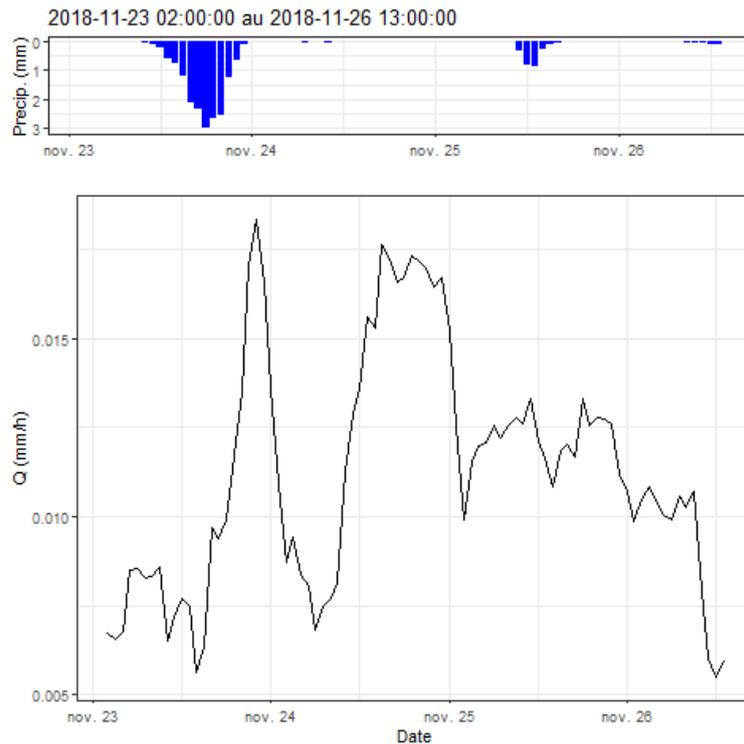


Figure 10 Évènement du 23 novembre 2018 au 26 novembre 2018 de la Saône à Couzon.

3.3.3 Méthodologie de tests hydrologiques

Dans ce cadre de tests hydrologiques, sont utilisées comme « observation » les chroniques de débit mesuré et expertisé par la Banque Hydro à l'exutoire de chacun des bassins versants. L'objectif pour les différentes fonctions implémentées (Partie 3.1) est donc de reproduire de façon la plus fiable possible le débit réel avec la prise en compte des débits latéraux.

Une procédure de type calage-contrôle, usuellement utilisée en hydrologie, a été mise en place. Cette pratique consiste à séparer une chronique de débit en deux périodes distinctes, la première pour le calage et la seconde pour l'évaluation.

Les deux périodes choisies dans le cadre de ce travail sont 1999 – 2008 et 2009 – 2018. Une période de plus de 2 ans a été prévue avant chaque procédure de calage pour l'initialisation du modèle hydrologique.

Le calage se fait de manière séquentielle, i.e. de l'amont vers l'aval. Dans un premier temps, les jeux de paramètres des sous-bassins amont sont optimisés afin d'obtenir une chronique de débits simulés à l'exutoire de chaque sous-bassin. Dans un second temps, le modèle hydrologique du bassin intermédiaire est optimisé conjointement à la fonction de propagation afin d'obtenir le débit d'intérêt à l'exutoire du bassin total.

L'optimisation des paramètres est faite par maximisation du critère KGE (Equation 10) sur la racine carrée des débits.

Le processus d'évaluation a été divisé en deux parties. Tout d'abord un contrôle a été fait à l'échelle de la chronique. Pour cela, le critère de performance KGE sur la racine carrée des débits a une nouvelle fois été utilisé sur les périodes de calage et de validation. Les différences de performances entre ces deux modèles permettent de vérifier la robustesse des modèles entre les deux périodes étudiées :

$$dif_{KGE} = KGE_{val} - KGE_{cal} \quad (15)$$

Ainsi, une différence de KGE négative correspondra à une performance plus faible en validation qu'en calage. Les différents paramètres des fonctions de propagation seront également analysés.

La seconde étape du processus d'évaluation consiste à s'intéresser à l'échelle événementielle. Dans ce cas, le $KGE\%$ (Equation 14), le débit de pointe Q_{max} (Equation 11), la date de pic T_{max} (Equation 12) et également le volume de crue V (Equation 13) seront étudiés.

4 Résultats

Dans cette partie les noms des fonctions seront abrégés de la manière suivante : « LLR » pour le lag & route linéaire, « QLR » pour le lag & route quadratique et simplement « MLR » pour le lag & route linéaire tiré de la thèse de Munier. Pour rappel, L'étude hydraulique servira à tester et observer le comportement des fonctions en propagation pure (sans apports du bassin intermédiaire) et l'étude hydrologique à tester les fonctions dans des bassins versants réels. La fonction « lag » servira de référence pour comparer les résultats.

4.1 Étude hydraulique

Le cas 01 (Figure 11) correspond à un bassin versant présentant un seul nœud à l'amont et un exutoire situé 100 km en aval avec une pente, une rugosité et une largeur de bief constante sur l'ensemble du réseau hydraulique. Dans ces conditions, le modèle hydraulique montre qu'une déformation du pic de crue devrait être observé mais sans réelle atténuation que seul le lag a réussi à reproduire, les lag & route écrêtant systématiquement le signal. Les KGE obtenus d'une fonction à l'autre sont très proches, variant de 0.89 à 0.95. Le lag simple a réussi à reproduire le débit de pointe avec une intensité similaire avec une surestimation de 1%. Le QLR présente une atténuation moindre avec une sous-estimation de 8% contre 15 et 16% pour les deux fonctions précédentes. Dans tous les cas le retard est plus important dans les débits simulés que dans le débit observé avec une différence de 6 heures (pour les lag & route) à 7 heures (pour le lag).

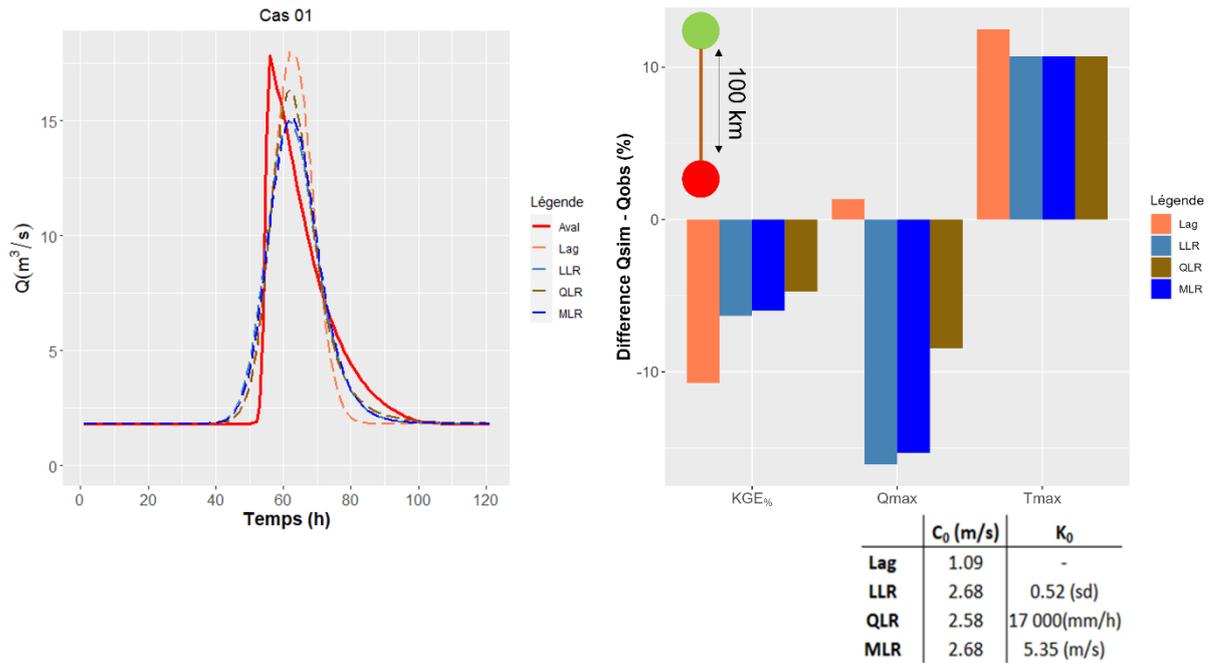


Figure 11 Résultats des modélisations du cas d'étude 01

Le cas 02 (Figure 12) est composé de deux nœuds à l'amont situés à 50 et 100 km de l'exutoire avec une pente, une rugosité et une largeur de bief constante sur l'ensemble du réseau hydraulique. Le modèle hydraulique montre la création de deux pics de crue déformés avec une atténuation du second pic. Toutes les fonctions ont réussi à recréer ces deux pics. Le MLR est celui qui atténue le plus le premier pic, et le LLR écrête surtout le second. Le KGE obtenu par le lag est moins bon que les KGE des lag & route avec une différence de 15 points. Le débit maximum étudié dans la correspond au débit maximum atteint par le premier pic. Le QLR obtient un résultat proche de l'observé avec une sous-estimation inférieure à 1%, contre une sous-estimation de 4% pour le LLR et 8% pour le MLR. Le Lag surestime ce pic de 4%. Toutes les fonctions de propagations surestiment le retard avec un retard supérieur de 8% par rapport à l'observée pour le Lag, le LLR et le QLR contre 6% pour le MLR.

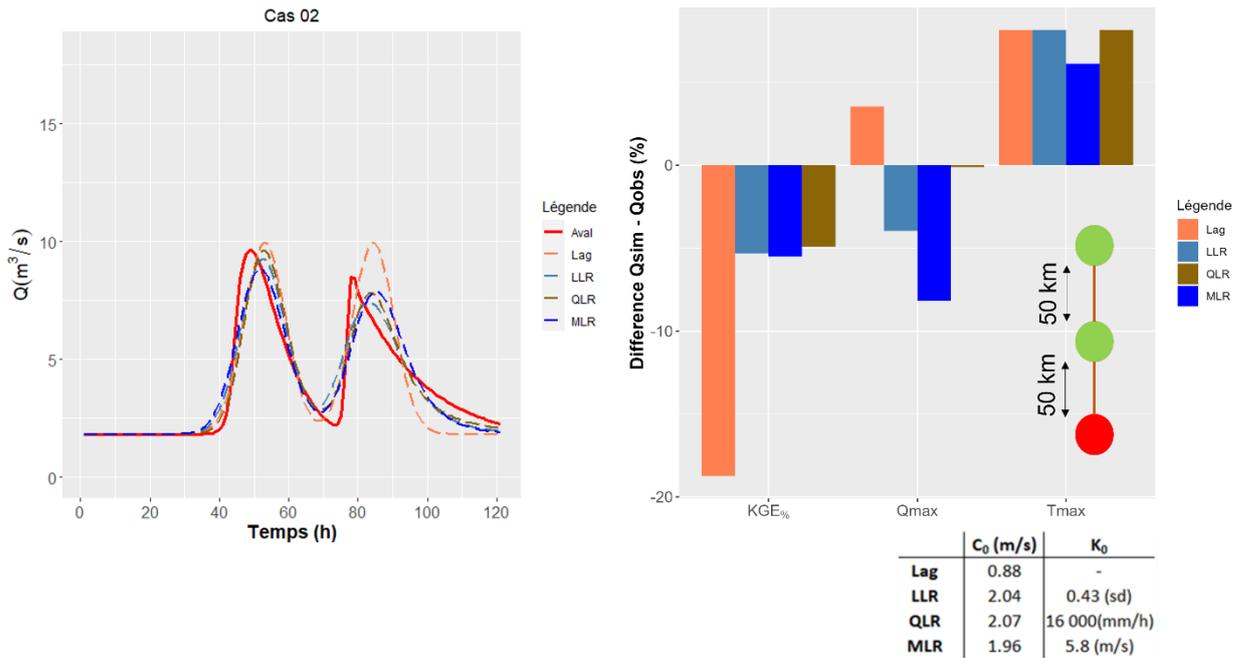


Figure 12 Résultats des modélisations du cas d'étude 02

Le cas 03 (Figure 13) est dérivé du premier mais les nœuds amonts sont plus éloignés de la confluence avec une pente, une rugosité et une largeur de bief constante sur l'ensemble du réseau hydraulique. Avec ces conditions, un seul pic de crue doit être formé sans atténuation. Tout comme pour le premier cas, seul le Lag a réussi à correctement reproduire ce pic, les autres fonctions écrêtant l'onde de crue. Malgré cela, les KGE sont supérieurs pour les propagations faites par les lag & route que pour celle faite par le lag avec une différence de 6 points. Le lag surestime le pic de 3% contre une sous-estimation de 11 à 16% pour les lag & route. Tout comme pour le cas 01 les retards sont surestimés de 10% pour le LLR, 11% pour le Lag et le MLR et de 7% pour le QLR.

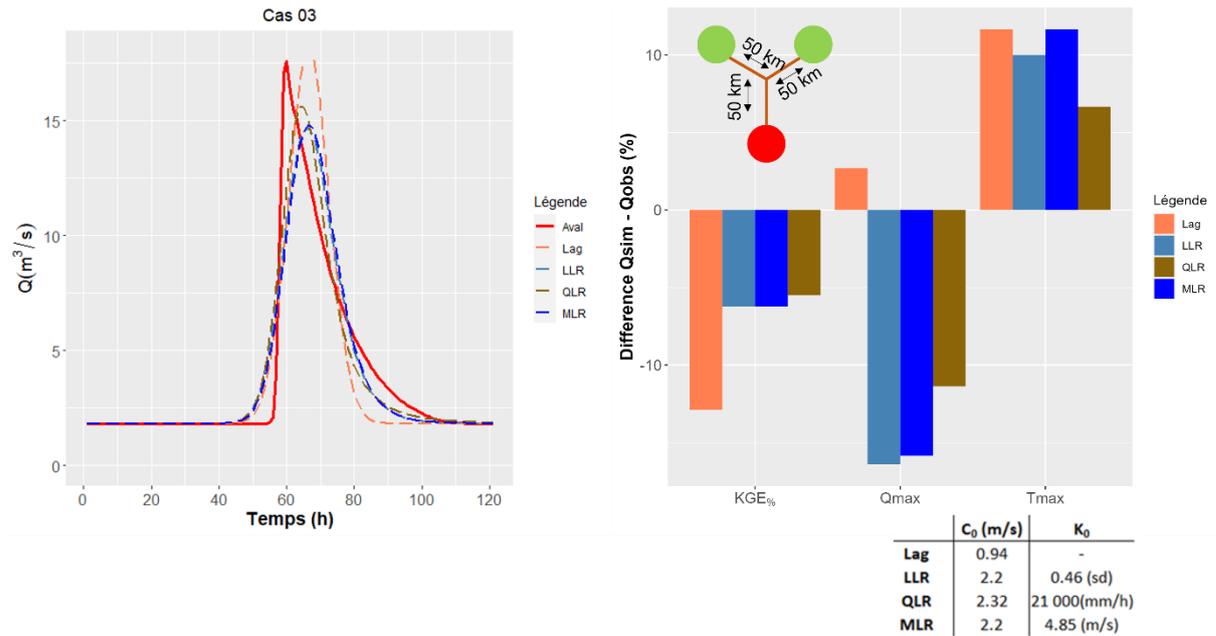


Figure 13 Résultats des modélisations du cas d'étude 03

Le cas 04 (Figure 14) est similaire au précédent mais avec une variation de pente, de rugosité et de largeur du chenal sur l'ensemble du réseau hydraulique. Cela a pour effet de former deux pics de crue à l'aval. Les fonctions n'arrivent pas à les reproduire, ce qui était attendu comme le modèle ne prend pas en compte les caractéristiques susmentionnées. Le lag crée donc un pic similaire à celui du cas 03 et les fonctions de lag & route écrêtent l'onde de crue pour atteindre un débit maximum plus proche de la réalité. Cela se reflète sur le KGE obtenu par le Lag inférieur à celui des lag & route avec une différence allant jusqu'à 34 points. Le débit maximum est donc largement surestimé avec une augmentation de 84 % par rapport aux pic observé, contre une surestimation de 8 à 17% pour les lag & route. Les retards sont aussi surestimés de 13 % pour le LLR et le QLR, de 20% pour le MLR et de 24% pour le Lag.

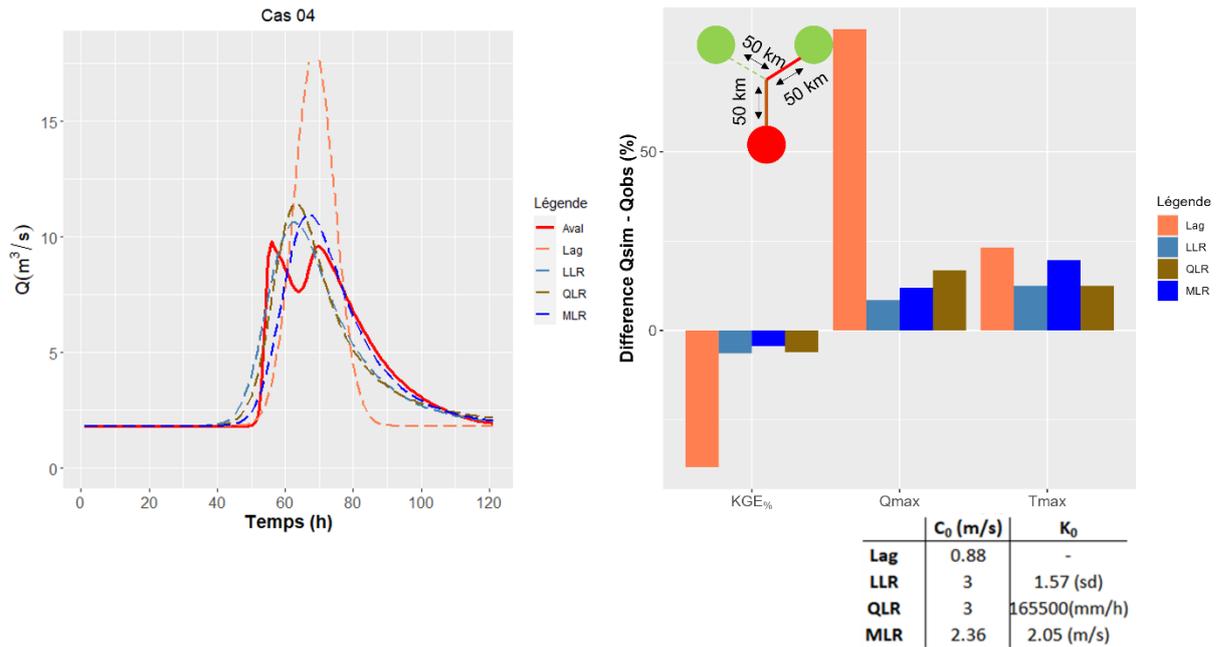


Figure 14 Résultats des modélisations du cas d'étude 04

Le dernier cas (Figure 15) est dérivé du précédent avec la confluence située directement à l'aval et des variations de pente, de rugosité et de largeur du bief au sein du bassin versant, ce qui permet la création de deux pics de crue. De même toutes les fonctions n'ont pu reproduire les deux pics de débits, et seuls les lag & route ont atténué le signal. Les KGE sont donc nettement meilleurs pour les fonctions implémentées avec une différence pouvant aller jusqu'à 30 points avec le KGE obtenu pour le Lag. Le lag surestime les débits avec un pic supérieur à l'observé de 84% contre une surestimation de 2% pour le MLR, et 26 et 34% pour le LLR et le QLR. Le retard est plus surestimé pour les lag & route avec une différence de 21 % entre le retard simulé et observé pour le LLR et le MLR, contre 16% pour le QLR et 7% pour le lag.

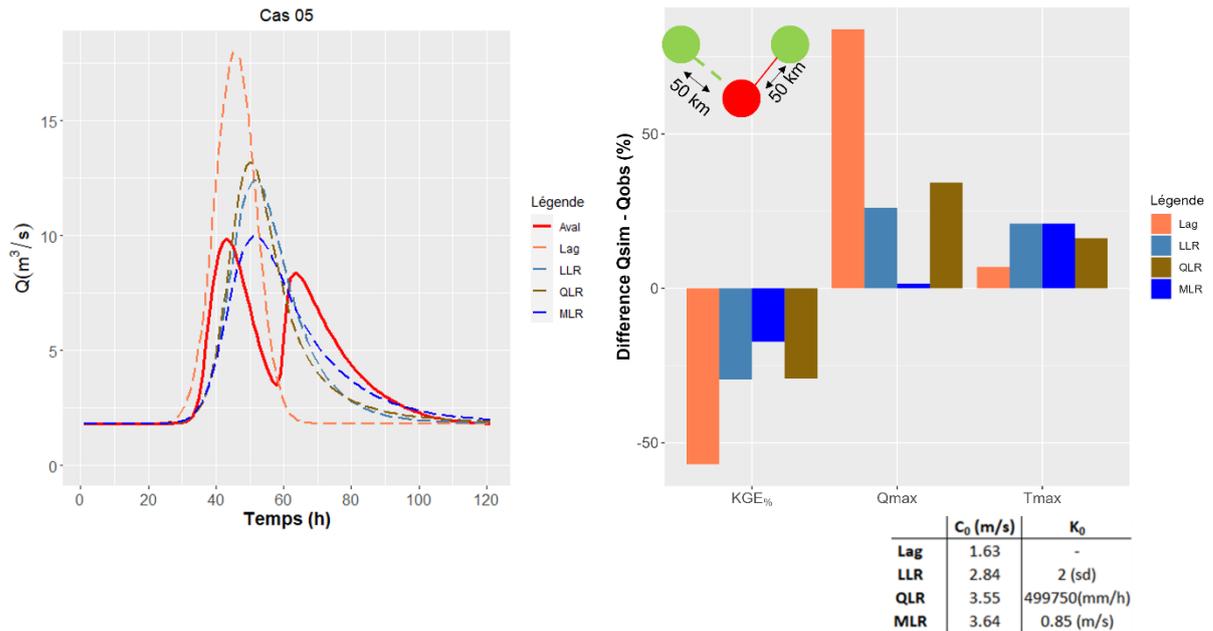


Figure 15 Résultats des modélisations du cas d'étude 05

Il est compliqué de faire une analyse des paramètres obtenus par l'étude hydraulique car seuls les C_0 des différentes fonctions sont comparables entre eux et il n'y a pas assez de cas pour réaliser une étude statistique. Cependant les valeurs de vitesse obtenues sont cohérentes d'un point de vue physique. Les K_0 sont totalement différents car ils permettent de prendre en compte l'atténuation de manière différente. Les différents paramètres obtenus sont présentés dans un souci de reproductibilité des résultats. Pour les cas d'étude 01 et 03, les fonctions de routage et plus particulièrement le LLR et le MLR ne réussissent pas à ne pas écrêter pour passer en retard pur. Cela peut être dû à l'équation de routage en elle-même mais il est probable que ce soit aussi lié à l'algorithme de calage, qui lors de sa recherche de paramètres, compare les résultats du KGE pour chaque set de paramètres testés et sélectionne le meilleur. Il est possible que, pour améliorer le KGE de quelques dixièmes de points, des paramètres de réservoirs plus élevés soient sélectionnés par l'algorithme, augmentant en même temps l'atténuation de la courbe.

L'ajout d'un paramètre d'atténuation avec les méthodes de lag & route permet d'améliorer le comportement en propagation par rapport à la fonction de référence « lag », notamment pour les cas 02, 04 et 05. Notons tout de même que, comme attendu, le déphasage des pics n'arrive pas à être représenté lorsqu'il est dû à des variations de caractéristiques physiques non prises en compte par la fonction de propagations telles que la pente, la rugosité ou la largeur du lit. Bien que les performances soient meilleures pour les fonctions de type lag & route que pour le lag, il semble assez surprenant que le paramètre d'atténuation s'active lorsque ce phénomène ne semble pas apparaître comme pour le cas 01 et 03. Dans ces deux cas, le paramètre K semble

s'activer pour compenser un phénomène de déformation, qui n'est pas pris en compte par ces types de routage hydraulique.

4.2 Étude hydrologique

4.2.1 Résultats à l'échelle des chroniques

Ce paragraphe présente les résultats obtenus sur l'échantillon de 153 bassins versants. Les distributions des paramètres globaux C_0 , K_0 et des KGE obtenus seront regardés. Les temps de calibrations sont de 3min environ pour le lag de base. Cette durée augmente à 30 min en moyenne pour le LLR et le QLR et 10 min pour le MLR.

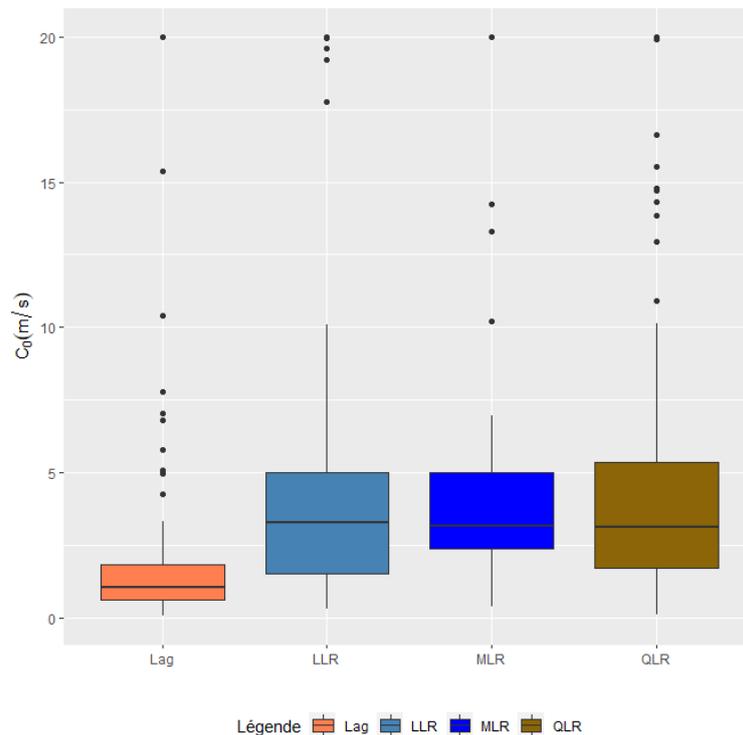


Figure 16 Distribution des paramètres C_0 obtenus sur l'échantillon de bassin versant

Les paramètres de vitesse globales obtenues par le lag simple (Figure 16) ont une médiane de 1.03 m/s avec un quantile 25% et 75% respectivement de 0.61 et 1.81 m/s ainsi qu'un minimum de 0.05 m/s et un maximum de 19.99. Une vitesse aussi élevée signifie qu'il n'y a pas de délai. Ces vitesses très élevées sont en général dues à une distance trop faible entre l'amont et l'aval (inférieure à 50 km), avec un bassin intermédiaire de moins de 450 km². Les vitesses globales obtenues par les fonctions de routage sont plus élevées avec une médiane de 3.26, 3.15 et 3.16 m/s pour le LLR, le QLR et le MLR. Leur distribution est aussi plus étendue avec un quantile 25% et 75% respectivement de 1.50 m/s et 4.98 m/s pour LLR, et de 1.71 m/s et 5.35 m/s pour QLR et 2.37 m/s et 5 m/s pour le MLR. Enfin, le nombre d'extremums est moins important entre les nouvelles fonctions et le lag. Les valeurs de vitesse obtenues par la

fonction de référence « lag » sont globalement plus faibles que celles obtenues pour les lag & routes. Le lag n'a qu'un seul paramètre influant sur le retard du pic de crue, contrairement aux lag & route qui ont le paramètre de vitesse C_0 et d'atténuation K_0 . L'écroulement d'une crue induit un léger retard du pic, pour le compenser les vitesses obtenues par les lag & route augmentent.

Les paramètres de réservoir obtenus pour le LLR sont en moyenne de 0.98 (sans dimension) avec des quantiles 25 % et 75% de 0.37 et de 1.66 (Figure 17). L'étendue de ce paramètre est beaucoup plus grande pour le QLR avec une médiane de 58 750.05 mm, un quantile 25% de 250 mm et un quantile 75% de 499 750 mm/h. Les K_0 obtenus par le MLR ont une médiane de 6.33 m/s avec un quantile 25% et 90% de 1.25 m/s et 50 m/s. Il est difficile de comparer les différentes distributions des K_0 entre elles, les réservoirs étant très différents les uns des autres. Cependant, les valeurs de K_0 de QLR plafonnent à 499 750 mm/h. Cela veut dire que les bornes de recherche du paramètre entrées dans l'algorithme de calage doivent être modifiées pour permettre au paramètre de prendre des valeurs supérieures.

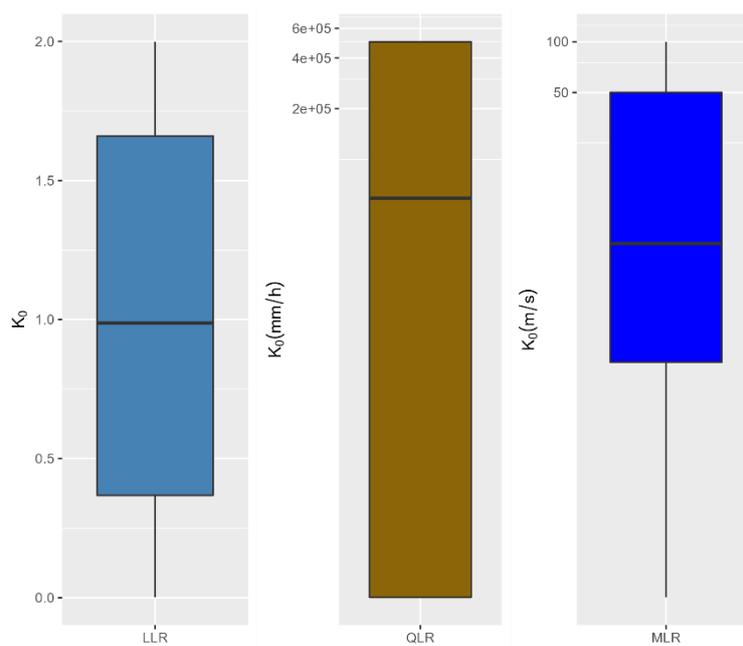


Figure 17 Distribution des paramètres K_0 obtenus sur l'échantillon de bassin versant

Les KGE obtenus (Figure 18) sont similaires avec une moyenne d'environ 0.93 pour chacune des fonctions et des étendues très similaires avec un quantile 25 % et 75 % respectivement de 0.92 et 0.96 pour toutes les fonctions. Le Tableau 4 dans l'Annexe 3 :

Compléments des résultats récapitule les distributions des paramètres C_0 , K_0 et du KGE pour chacune des fonctions.

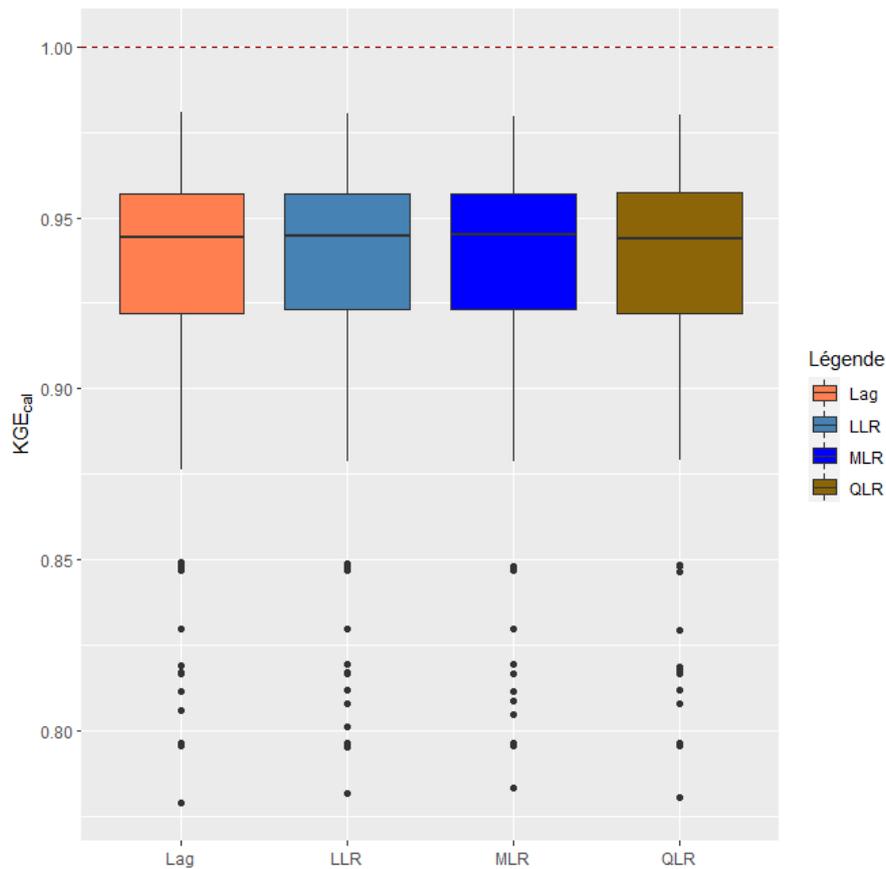


Figure 18 KGE obtenus sur l'échantillon de bassin versant

La différence entre les KGE obtenus lors de la période de validation et de calage est présentée Figure 19 pour chaque fonction de propagation. Les résultats sont similaires entre toutes les fonctions avec une diminution du KGE à la validation avec une baisse médiane de -0.017 points et des quantiles 25 et 75% de -0.035 et -0.002. Cette perte reste faible, le modèle est donc robuste et les périodes climatiques sont similaires entre les périodes de calage et de validation. Les critères KGE obtenus et la baisse de performance similaire pour toutes les fonctions entre le calage et la validation montrent que le choix de la fonction n'impacte pas les performances de la modélisation hydrologique.

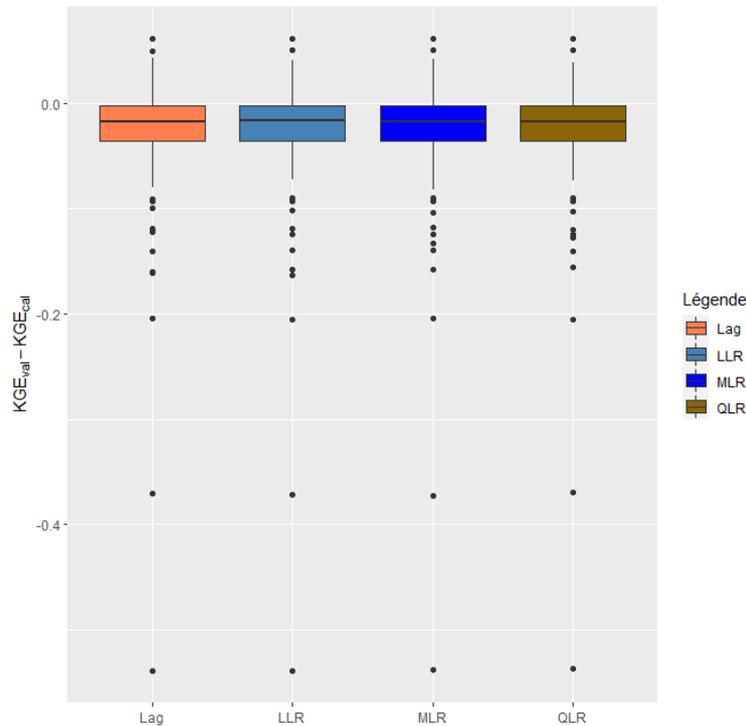


Figure 19 Différence entre les KGE obtenus à la validation et au calage

4.2.2 Résultats à l'échelle évènementielle

La modélisation à l'échelle évènementielle a pour objectif d'observer les réactions du modèle et des fonctions de propagations à l'échelle d'un évènement climatique. Ces évènements sont sélectionnés sur les pluies enregistrées.

4.2.2.1 L'Arve à Bout-du-Monde

La Figure 20 montre les différents critères calculés sur l'ensemble des évènements ayant été recensés sur l'Arve à Bout-du-Monde sur notre période d'étude. Les KGE obtenus à l'échelle évènementielle sont assez faibles, avec une médiane aux alentours de 0.53 points. Les simulations effectuées avec le modèle MLR semblent toutefois fournir de meilleures performances. Sur ce bassin, le débit maximal atteint semble être généralement sous-estimés (environ -30 %). Le temps de retard semble être quant à lui très bien représenté même si le modèle de type lag présente une très légère anticipation. Enfin, le volume de crue est sous-estimé d'environ 25% par le modèle hydrologique, quelle que soit la fonction de propagation utilisée. Cependant, le routage MLR semble donner de meilleurs résultats.

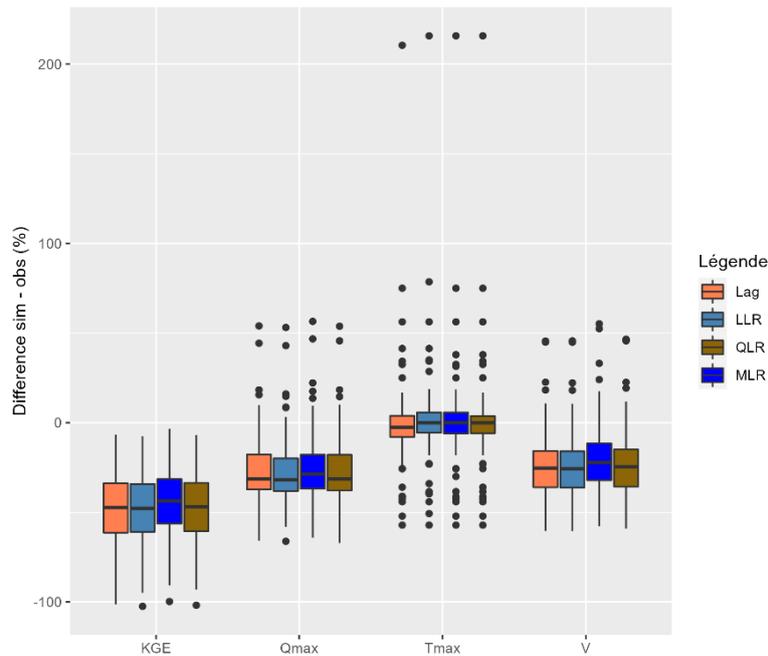


Figure 20 Résultats des modélisations des évènements sélectionnés sur le bassin de l'Arve

L'évènement détaillé ici correspond à une crue ayant lieu du 05 juillet 2008 au 09 juillet 2008 avec un maximum observé de 0.45 mm atteint le 07 juillet. La Figure 21 montre l'évènement en question et les hydrogrammes obtenus à la suite de la modélisation hydrologique selon les différentes fonctions de propagation utilisées.

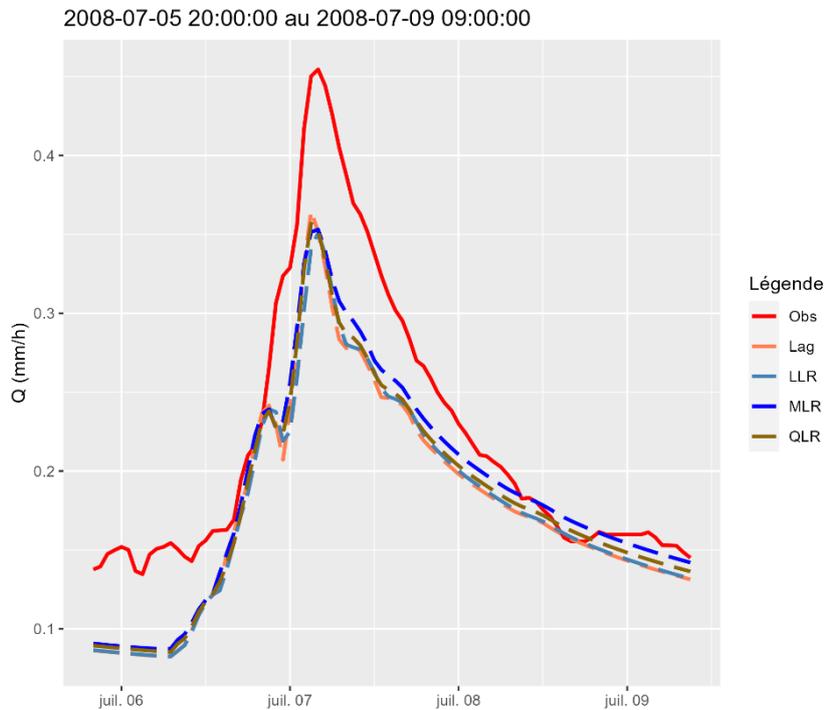


Figure 21 Résultats sur l'évènement de l'Arve détaillé dans le cadre de ce rapport

La simulation montre que sur cet évènement le modèle hydrologique sous-estime le pic de crue. En revanche, la forme de l'évènement semble respectée, bien que le modèle paraisse lisser les variations de débits des basses eaux. Le retard est très proche de la réalité avec dans le pire des cas une sous-estimation de seulement 1 heure. Le comportement du modèle est peu sensible à la fonction de transfert utilisée.

4.2.2.2 L'Ardèche à Sauze

La Figure 22 montre les différents critères calculés sur l'ensemble des évènements ayant été recensés sur l'Ardèche à Sauze sur notre période d'étude. Les KGE obtenus à l'échelle événementielle sont encore assez faibles, avec une médiane aux alentours de 0.55 points quelle que soit la fonction de propagation utilisée. Sur ce bassin, le débit de pointe semble être globalement bien représenté (sur-estimation inférieur à 5%) et le temps de retard est en moyenne identique à ce qui est observé. Enfin, le volume de crue simulé est très proche du volume de crue mesuré lors des évènements.

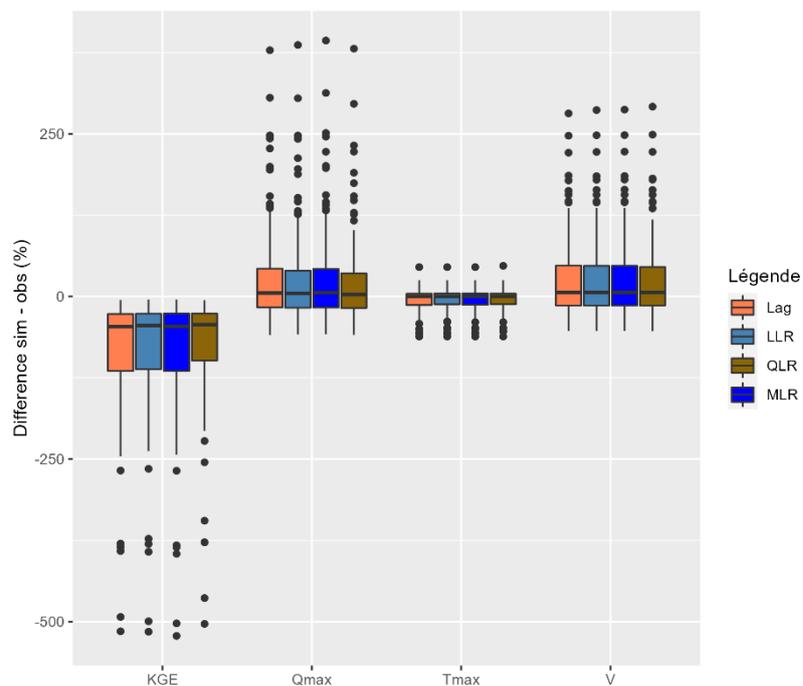


Figure 22 Résultats des modélisations des évènements sélectionnés sur le bassin versant de l'Ardèche

L'évènement détaillé sur ce bassin correspond à une crue ayant eu lieu du 24 octobre 2011 au 27 octobre 2011 avec un maximum observé de 0.14 m le 25 octobre. La Figure 23 montre l'évènement en question et les hydrogrammes obtenus à la suite de la modélisation hydrologique selon les différentes fonctions de propagation utilisées.

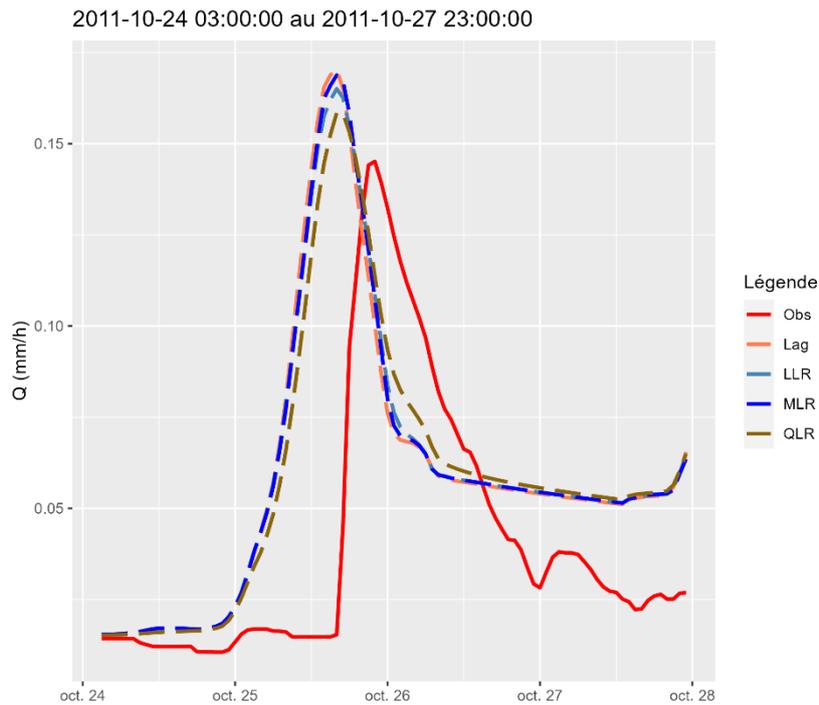


Figure 23 Résultats sur l'évènement de l'Ardèche détaillé dans ce rapport

La simulation montre que sur cet événement le modèle hydrologique surestime légèrement le pic de crue. En revanche, le retard est largement sous-estimé puisque le pic est atteint 6h en avance par rapport à l'observation. Malgré tout, la forme de l'évènement semble respectée dans son ensemble. Le comportement du modèle reste peu sensible à la fonction de transfert utilisée.

4.2.2.3 La Saône à Couzon

La Figure 24 montre les différents critères calculés sur l'ensemble des événements ayant été recensés sur la Saone à Couzon sur notre période d'étude. Les KGE obtenus à l'échelle événementielle sont très faibles, avec une majorité de KGE négatifs. De telles performances traduisent une impossibilité du modèle à représenter les événements ou un problème de sélection des crues. Logiquement, les autres critères traduisent eux aussi cette impossibilité.

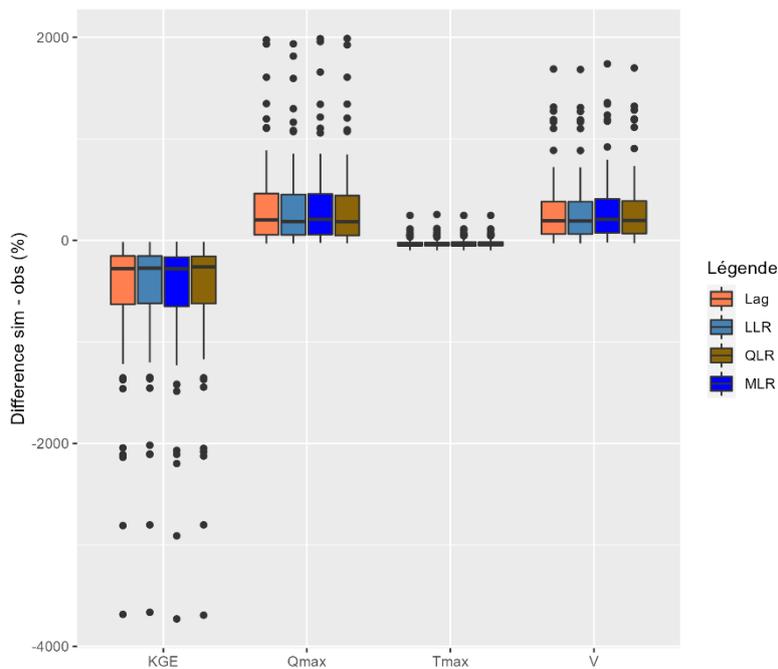


Figure 24 Résultats des modélisations des évènements sélectionnés sur le bassin versant de la Saône

En regardant plus en détail, de nombreux événements pluviométriques recensés ont entraînés une absence de réaction de la Saône à Couzon. C'est le cas notamment de l'événement détaillé ci-après, s'étant déroulé entre le 23 novembre 2018 au 26 novembre 2018, où le maximum observé est inférieur à 0.02 mm le 25 octobre malgré des précipitations de l'ordre de 3mm (Figure 10). La Figure 25 montre l'événement en question et les hydrogrammes obtenus à la suite de la modélisation hydrologique selon les différentes fonctions de propagation utilisées.

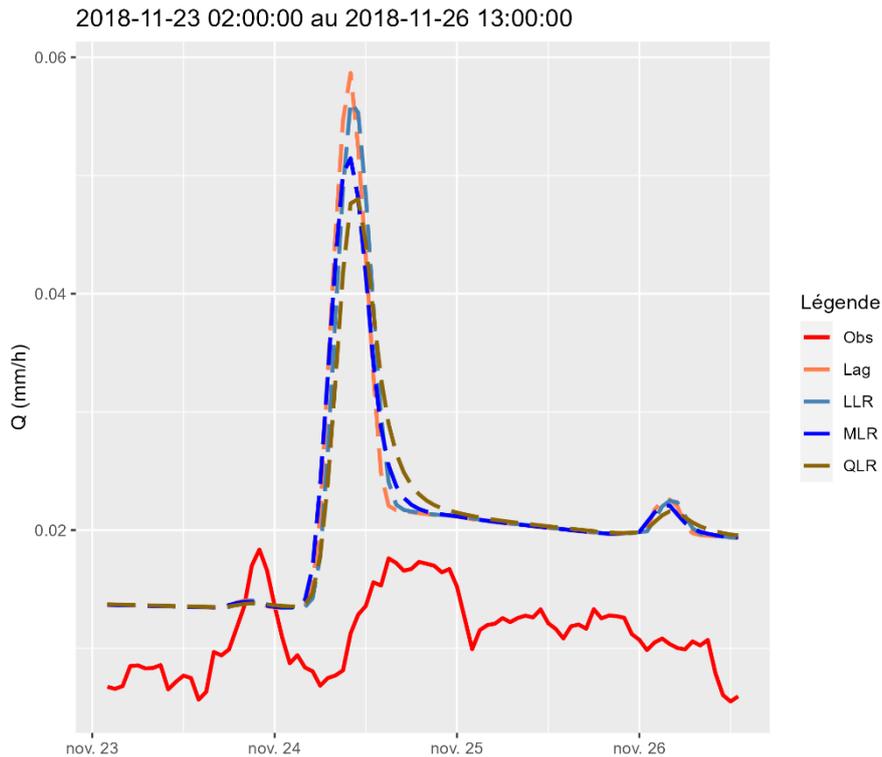


Figure 25 Résultats sur l'évènement de la Saône détaillé dans ce rapport

Ici la simulation montre une légère réaction du bassin versant non souhaitée. Cependant, ce phénomène peut être expliqué par la connaissance des caractéristiques du bassin. En effet, différents casiers d'inondations sont présents sur la partie aval de la Saône. Ces casiers permettent de contrôler les crues fréquentes d'importance limitée, ce qui est le cas de l'évènement sélectionné ici et de la majorité des événements recensés sur le bassin. Notons cependant que pour des crues plus importantes leur impact devient négligeable. Ces ouvrages n'étant pas pris en compte dans le modèle, le débit simulé correspond à ce qui pourrait être observé sans la présence de ces ouvrages anthropiques.

5 Discussions

La différence entre les KGE obtenus par le lag et par les lag & route sur les cas d'étude n'est pas observées sur les modélisations hydrologiques avec des performances très similaires sur l'échantillon de bassin versant qui restent très satisfaisantes avec des valeurs de 0.93 points en moyenne. Cela prouve la capacité de d'adaptation du modèle GR5H utilisé. Les KGE obtenus à la validation diminue légèrement mais les performances restent bonnes avec une moyenne de 0.029 points de diminution. Cette diminution est normale, les paramètres étant calés sur une période différente de la validation, le jeu de paramètres retenu n'est pas forcément idéal pour la période de validation. Ces résultats montrent que bien que les routages soient meilleurs pour

modéliser les cas d'étude, la complexité des systèmes réels atténue leurs performances et il n'y a pas de différence avec le lag simple.

De plus les KGE sont d'autant plus faibles que le nombre de données par évènements est réduit, ce critère réalisant une régression linéaire entre les débits simulés et les débits observés, un nombre de points réduit peut donc mener à une baisse de ce critère.

Les évènements traités proviennent de bassins versants situés dans le bassin versant du Rhône. Les évènements de l'Ardèche et ceux de la Saône plus particulièrement sont sujets à de fortes surestimations avec des débits simulés jusqu'à 4 fois supérieurs à la réalité. Cela peut être dû à plusieurs raisons : le bassin versant peut être influencé, avec la présence de barrage à l'amont de la station aval, modifiant le signal enregistré en fonction des périodes de vidange ou de retenue. Les pompages de l'eau pour un usage agricole, domestique ou industriel en période d'étiage (notamment l'été), influe grandement le débit à l'aval peuvent aussi expliquer ce phénomène, et ne sont pas pris en compte par le modèle. Le bassin versant de l'Ardèche est un bassin versant du Sud-Est de la France, en cours d'aridification avec des sécheresses de plus en plus récurrentes pendant l'été et le début de l'automne (à partir du mois de juillet et qui peut perdurer jusqu'au mois d'octobre pour les années les plus sèches) et des crues violentes durant la fin de l'été et l'automne. L'acquisition de données fiables est plus difficile durant ces périodes et les évènements les moins bien représentés sont pour la plupart dans ce laps de temps, ce qui montre que le modèle n'a pas réussi à représenter correctement cette période. La sous-estimation des débits sur les évènements de l'Arve peut être due à une sous-estimation de la contribution aval ou des apports amonts par le modèle puisque la position des pics reste proche de la réalité. Pour valider ou non cette théorie, les modélisations pourraient de nouveau être effectués en utilisant les débits observés amont à la place des débits simulés amont.

Les mauvais résultats obtenus à l'échelle évènementielle peuvent aussi être dus à des modélisations de mauvaise qualité à l'amont, il est donc difficile de déterminer si l'origine des mauvaises performances sont les fonctions de propagation ou le modèle utilisé à l'amont.

Le retard T_{max} observé est calculé en fonction de la position du débit maximum atteint par la crue. Pour une crue possédant plusieurs pics, cette méthode atteint ses limites. Si ces deux maximums sont provoqués par des caractéristiques physiques non prises en compte par le modèle (i.e. cas d'étude 04 et 05) les fonctions ne pourront en recréer qu'un seul, qui sera positionné de manière à couvrir au mieux tout l'évènement. La différence entre le T_{max} observé et le T_{max} simulé peut donc être très surestimée ou très sous-estimée en fonction de la position du maximum observé.

Il peut être important d'attribuer un sens physique aux paramètres obtenus afin de mieux expliquer les résultats ou de mieux comprendre les phénomènes en jeu. Cependant, il n'est pas possible de donner un sens physique réaliste aux valeurs de K_0 obtenues par QLR que ce soit pour les cas de référence ou sur l'échantillon de bassin versant traité. L'équation de conversion du K_0 en K a été déterminée en adaptant la formule de transformation du K_0 à l'aide d'une analyse dimensionnelle. La méthode est conceptuelle avec un K en $m^{3/2} h^{1/2}$ (équation 7) ce qui n'a pas de sens physique réel dans un système fluvial, il est donc difficile d'obtenir un paramètre global ayant un sens dans la réalité observée.

La réalité physique des paramètres de chacune des fonctions pouvant être un des critères principaux pour la sélection de la fonction la plus adaptée au routage de débit. Dans ce cas, le QLR ne peut être utilisé malgré ses bons résultats du QLR sur les cas d'étude, ainsi que ses meilleurs résultats sur la modélisation des événements de l'Ardèche. Les valeurs de son paramètre K_0 ne permettent pas de le sélectionner. Les paramètres C_0 et K_0 du LLR et du MLR et le paramètre C_0 du lag ont une réalité physique assez tangible pour pouvoir être utilisés. Ces deux dernières fonctions semblent produire des résultats assez similaires avec cependant de meilleurs résultats du MLR pour la modélisation des événements de l'Arve. Toutefois, le paramètre C_0 du LLR se distribue sur une plus grande étendue de valeurs que les deux autres fonctions. Cela peut permettre de mieux représenter la diversité des différents bassins versants modélisés. Le lag, le LLR et le MLR obtiennent des résultats corrects sur les modélisations au pas de temps horaires, et hydrauliquement le LLR et le MLR sont à privilégier.

Le MLR a un temps de calage bien plus court que le LLR, ce qui pourrait être un facteur de sélection. Les temps de calculs augmentent nettement avec la complexité de la fonction et intrinsèquement avec le nombre de paramètre. Sur de gros bassins versants avec plusieurs bassins intermédiaires le lag pourrait donc être utilisé. De plus, s'il n'y a pas le besoin de changer le concept du modèle ou d'améliorer la réalité physique du paramètre C_0 , il n'est pas forcément nécessaire d'utiliser les deux nouvelles fonctions. Cela dit, l'ajout d'un réservoir peut être intéressant dans les modélisations conceptuelles, en rajoutant de la complexité au système simplifié pour le rendre plus semblable à la réalité. Finalement, le plus pertinent est probablement de tester les fonctions selon ses besoins sur le bassin versant d'intérêt pour déterminer quelle est celle qui obtient de meilleurs résultats et qui convient le mieux à l'utilisation.

6 Perspectives

Une autre méthode de routage grâce à la loi de gamma a été explorée durant ce stage mais n'a pas pu être concrétisée par manque de temps. La courbe de distribution de cette loi est très similaire à celle d'une crue. Il est donc intéressant de considérer cette option dans le cadre du routage comme cela a été fait par (Jay-Allemand 2021) dans sa thèse avec la répartition des débits dans des cellules mémoires en fonction de la loi gamma, ou bien en utilisant la loi de gamma en tant qu'hydrogramme unitaire pour répartir les débits comme démontré dans l'article de Haktanir et Sezen 1990.

Par manque de temps, certains résultats n'ont pas pu être exploités, comme la distribution des paramètres C_0 et K_0 en fonction de l'aire du bassin versant. Il aurait aussi été possible d'étudier l'évolution des paramètres de GR5H du bassin intermédiaire selon les fonctions utilisées, ce qui aurait permis de mieux quantifier la résilience du modèle. De plus la robustesse du modèle aurait pu être mise à l'épreuve par la mise en place d'une procédure de calage-contrôle croisée (Klemeš 1986). Cette pratique consiste à séparer une chronique de débit en deux période distincte, la première pour le calage et la seconde pour l'évaluation, puis à échanger ces deux périodes pour vérifier la robustesse de la modélisation.

Il aurait aussi été souhaitable d'améliorer les temps de calage des trois fonctions implémentées en les codant en fortran ou bien en optimisant le code sous R.

Conclusion

En définitive, ce stage a permis d'implémenter 3 fonctions de propagation de type « lag & route » à deux paramètres dans le package airGR.

La comparaison avec un modèle hydraulique sur différents cas d'études a permis de mettre en avant les avantages et limites de chacune des méthodes. En effet, l'ajout d'un paramètre d'atténuation permet une meilleure représentation du comportement de propagation pour un réseau hydraulique présentant des caractéristiques physiques variable mais ne permet pas toujours de bien représenter la forme de l'onde.

Dans le cadre de l'étude hydrologique réalisée sur 153 bassins versants, l'ajout d'un paramètre d'atténuation ne semble pas impacter les performances du modèle GR5H. En effet, celui-ci semble réussir à compenser ce phénomène hydraulique par un autre moyen. L'analyse à l'échelle événementielle a permis de montrer que malgré les bonnes performances globales du modèle (KGE supérieur à 0.92 sur plus de 75% des bassins), certains événements peuvent être mal représentés.

L'objectif de ce stage était de répondre à la question suivante : Quelle fonction de propagation choisir pour relier les différentes mailles d'un modèle hydrologique semi-distribué ?

D'un point de vue hydrologique, il semblerait qu'un modèle à un paramètre de type « lag » suffise puisque la complexité du modèle de propagation ne semble pas impacter la performance de la simulation du débit à l'exutoire alors qu'elle engendre un temps de calcul plus conséquent. En revanche, pour assurer une certaine cohérence physique un modèle de type « lag & route » présente un net avantage dans la représentation du comportement hydraulique. En conséquence, le choix parmi les trois fonctions de propagation implémentées se tournera vers la méthode MLR. En effet, celle-ci semble être plus proche de la réalité physique et engendre un temps de calcul plus faible que les méthodes LLR et QLR.

7 Références Bibliographiques

- Bentura, P. L. F., et C Michel. 1997. « Flood routing in a wide channel with a quadratic lag-and-route method ». *Hydrological Sciences Journal* 42 (2): 169-89.
<https://doi.org/10.1080/02626669709492018>.
- Coron, L., O. Delaigue, G. Thirel, D. Dorchies, C. Perrin, et C. Michel. 2021. « airGR: suite of GR hydrological models for precipitation-runoff modelling. R package version 1.6.12. » Portail Data INRAE. <https://doi.org/10.15454/EX11NA>.
- Coron, L., G. Thirel, O. Delaigue, C. Perrin, et V. Andréassian. 2017. « The suite of lumped GR hydrological models in an R Package ». *Environmental Modelling & Software* 94: 166-71.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.05.002>.
- Dorchies, D., J. P. Baume, et P. O. Malaterre. 2013. « SIC-2, un logiciel pour la gestion des canaux, rivières et fleuves ». *Sciences Eaux & Territoires* Numéro 11 (2): 48-49.
<https://doi.org/10.3917/set.011.0048>.
- Ficchi, A. 2017. « An adaptive hydrological model for multiple time-steps: diagnostics and improvements based on fluxes consistency ». Phdthesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01619102>.
- Ficchi, A., C. Perrin, et V. Andréassian. 2019. « Hydrological modelling at multiple sub-daily time steps: model improvement via flux-matching ». *Journal of Hydrology* 575 (août): 1308-27.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.084>.
- Guinot, V., M. Savéan, H. Jourde, et L. Neppel. 2015. « conceptual rainfall-runoff model with a two-parameter, infinite characteristic time transfer function: conceptual model with infinite characteristic time ». *Hydrological Processes* 29 (22): 4756-78.
<https://doi.org/10.1002/hyp.10523>.
- Gupta, Hoshin V., H. Kling, K. K. Yilmaz, et G. F. Martinez. 2009. « Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling ». *Journal of Hydrology* 377 (1): 80-91.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>.
- Haktanir, T., et N. Sezen. 1990. « suitability of two-parameter gamma and three-Parameter beta distributions as synthetic unit hydrographs in anatolia ». *Hydrological Sciences Journal* 35 (2): 167-84. <https://doi.org/10.1080/02626669009492416>.
- Jay-Allemand, M. 2021. « Estimation variationnelle des paramètres d'un modèle hydrologique distribué ». Université d'Aix-Marseille.
- Klemeš, V. 1986. « Operational testing of hydrological simulation models ». *Hydrological Sciences Journal* 31 (1): 13-24. <https://doi.org/10.1080/02626668609491024>.
- Laganier, O., P. A. Ayrat, D. Salze, et S. Sauvagnargues. 2014. « A coupling of hydrologic and hydraulic models appropriate for the fast floods of the Gardon river basin (France) ». *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14 (11): 2899-2920. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2899-2014>.
- Le Moine, N. 2008. « Le bassin versant de surface vu par le souterrain : une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit? » These de doctorat, Paris 6.
<https://www.theses.fr/2008PA066468>.
- Leleu, I., I. Tonnelier, R. Puechberty, P. Gouin, I. Viquendi, L. Cobos, A. Foray, M. Baillon, et P. O. Ndimba. 2014. « La refonte du système d'information national pour la gestion et la mise à disposition des données hydrométriques ». *La Houille Blanche*, n° 1: 25-32.
<https://doi.org/10.1051/lhb/2014004>.
- Lobligeois, F. 2014. « Mieux connaître la distribution spatiale des pluies améliore-t-il la modélisation des crues ? Diagnostic sur 181 bassins versants français ». These de doctorat, AgroParisTech.
- Moramarco, T., Y. Fan, et R. L. Bras. 1999. « Analytical solution for channel routing with uniform lateral inflow ». *Journal of Hydraulic Engineering* 125 (7): 707-13.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:7\(707\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:7(707)).
- Munier, S. 2009. « Modélisation intégrée des écoulements pour la gestion en temps réel d'un bassin versant anthropisé ». AgroParisTech.

- Nash, J. E. 1957. « The form of the instantaneous unit hydrograph ». *Journal of Hydraulic Engineering International Association of Hydrological Sciences* (45): 114-21.
- Oudin, L., F. Hervieu, C. Michel, C. Perrin, V. Andréassian, François Anctil, et Cécile Loumagne. 2005. « Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? : Part 2— Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling ». *Journal of Hydrology* 303 (1): 290-306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>.
- Perrin, C. 2000. « Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative ». <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1051/lhb/2002089>.
- Soentoro, E. A. 1991. « Comparison of flood routing methods ».
- Tabary, P., P. Dupuy, G. L'Henaff, C. Gueguen, Laetitia Moulin, O. Laurantin, C. Merlier, et J.-M Soubeyroux. 2012. « A 10-year (1997-2006) reanalysis of quantitative precipitation estimation over France: methodology and first results ». *IAHS-AISH Publication* 351 (janvier): 255-60.
- Vidal, J. P., E. Martin, L. Franchistéguy, M. Baillon, et J. M. Soubeyroux. 2010. « A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the safran system ». *International Journal of Climatology* 30 (11): 1627-44. <https://doi.org/10.1002/joc.2003>.

8 Liste des illustrations

Figure 1 Propagation d'une crue (Bentura, 1996).....	2
Figure 2 Hydrogramme suivant la loi normale injecté aux stations amonts des cas d'études	7
Figure 3 schéma des cinq configurations choisies pour l'étude de la propagation hydraulique seule. .	8
Figure 4 Schéma conceptuel du modèle GR5H	10
Figure 5 Schéma représentant le fonctionnement des modèles GR en contexte semi-distribué.	10
Figure 6 Bassins versants étudiés avec A l'Arve, B l'Ardèche et C la Saône.....	11
Figure 7 Schématisation des régimes hydrologiques.....	12
Figure 9 Évènement du 24 octobre 2011 au 27 octobre 2011 de l'Ardèche à Sauze.	13
Figure 8 Évènement du 05 juillet 2008 au 09 juillet 2008 de l'Arve à Bout-du-Monde.....	13
Figure 10 Évènement du 23 novembre 2018 au 26 novembre 2018 de la Saône à Couzon.	14
Figure 11 Résultats des modélisations du cas d'étude 01	16
Figure 12 Résultats des modélisations du cas d'étude 02.....	17
Figure 13 Résultats des modélisations du cas d'étude 03	18
Figure 14 Résultats des modélisations du cas d'étude 04.....	19
Figure 15 Résultats des modélisations du cas d'étude 05.....	20
Figure 16 Distribution des paramètres C_0 obtenus sur l'échantillon de bassin versant	21
Figure 17 Distribution des paramètres K_0 obtenus sur l'échantillon de bassin versant	22
Figure 18 KGE obtenus sur l'échantillon de bassin versant.....	23
Figure 19 Différence entre les KGE obtenus à la validation et au calage.....	24
Figure 20 Résultats des modélisations des événements sélectionnés sur le bassin de l'Arve	25
Figure 21 Résultats sur l'évènement de l'Arve détaillé dans le cadre de ce rapport.....	25
Figure 22 Résultats des modélisations des événements sélectionnés sur le bassin versant de l'Ardèche.....	26
Figure 23 Résultats sur l'évènement de l'Ardèche détaillé dans ce rapport	27
Figure 24 Résultats des modélisations des événements sélectionnés sur le bassin versant de la Saône	28
Figure 25 Résultats sur l'évènement de la Saône détaillé dans ce rapport	29
Figure 26 Morphologie des bassins versants dont les événements seront traités.....	38

9 Liste des tableaux

Tableau 1 Paramètres du modèle GR5H	9
Tableau 2 Caractéristiques pour chacun des bassins versants amonts (1 et 2) et le bassin versant intermédiaire pour chacun des cas de référence. S : la pente, L : la longueur du bief, B : La largeur du bief, K : le coefficient de Strickler.....	37
Tableau 3 Caractéristiques des bassins versants sélectionnés	37
Tableau 4 Distribution des paramètres globaux et des KGE obtenus sur les bassins versants de l'échantillon étudié.....	38

Annexes

Annexe 1 : Caractéristiques des cas d'études hydrauliques

Tableau 2 Caractéristiques pour chacun des bassins versants amonts (1 et 2) et le bassin versant intermédiaire pour chacun des cas de référence. S : la pente, L : la longueur du bief, B : La largeur du bief, K : le coefficient de Strickler.

	S1	L1	B1	K1	S2	L2	B2	K2	S3	L3	B3	K3
N°1	1 ^e -03	1	20	33	0.001	1	20	33	0.001	100	20	33
N°2	1 ^e -03	100	20	33	0.001	1	20	33	0.001	50	20	33
N°3	1 ^e -03	50	20	33	0.001	50	20	33	0.001	50	20	33
N°4	5 ^e -04	50	10	16	0.005	50	20	33	0.001	50	20	33
N°5	5 ^e -04	50	20	16	0.005	50	10	33	0.001	1	20	33

Annexe 2 : Caractéristiques des cas d'études hydrologiques

Tableau 3 Caractéristiques des bassins versants sélectionnés

Bassin Versant	Longueur du bief			
	Stations	Aire (km²)	Station aval	(km)
L'Arve à bout du Monde	CNR00045	2000.48	-	-
	V0032010	564.72	CNR00045	67.27
L'Ardèche à Sauze	CNR00036	2264.35	-	-
	V5045030	496.04	CNR00036	70.15
	V5035020	201.05	CNR00036	53.18
	V5014010	619.87	CNR00036	60.53
La Saône à Couzon	CNR00020	29320.41	-	-
	CNR00018	7346.16	CNR00020	194.04
	CNR00023	11692.77	CNR00020	190.97

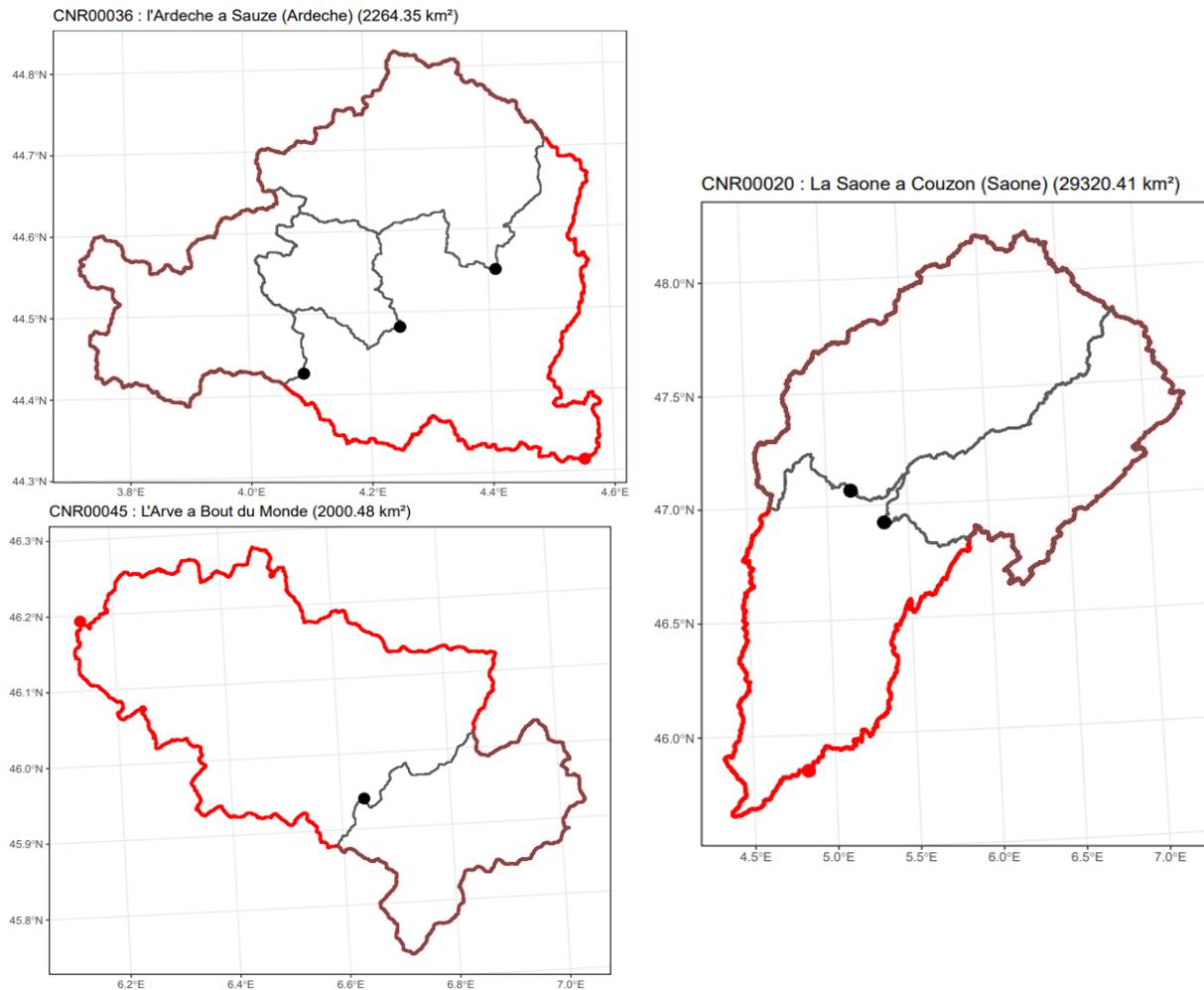


Figure 26 Morphologie des bassins versants dont les évènements seront traités

Annexe 3 : Compléments des résultats

Tableau 4 Distribution des paramètres globaux et des KGE obtenus sur les bassins versants de l'échantillon étudié

	Fonction	Min.	Q10	Q25	Q50	Moyenne	Q75	Q90	Max.
KGE	lag	0.7789784	0.8806067	0.9221985	0.9442689	0.9310844	0.9571222	0.9664462	0.9806297
	LLR	0.7818864	0.8806453	0.9233324	0.9444919	0.9313835	0.9570342	0.9673484	0.9805914
	QLR	0.7804316	0.885623	0.9219584	0.9436917	0.9314588	0.9571681	0.9665089	0.9798526
	Munier	0.7834365	0.8804942	0.923157	0.9448821	0.9310908	0.9570506	0.9663198	0.979781
CO	lag	0.05	0.3300897	0.6103864	1.0287498	2.139092	1.8076662	3.1934308	19.99
	LLR	0.2900588	0.8241664	1.5048976	3.2576861	4.752636	4.9777228	9.7111207	19.99
	QLR	0.1055556	0.9812501	1.7145188	3.1338112	4.437244	5.3579186	9.1381224	19.99
	Munier	0.3805193	1.218335	2.376266	3.157899	3.844242	5	5.621975	19.99
KO	LLR	0.001	0.03083713	0.36798049	0.98725826	1.053528	1.660023	1.999	1.999
	QLR	250	250	250	58750.05	199794.7	499750	499750	499750
	Munier	0.05	0.4310839	1.2482942	6.328445	28.44157	50	99.95	99.95

Résumé

La semi-distribution consiste en un découpage des bassins versants en sous-unité pour mieux prendre en compte leurs variabilités spatiales. L'objectif de ce stage est de sélectionner et de tester différentes fonctions pour transférer le débit modélisé sur les sous-bassins amont jusqu'à l'aval. L'importance de cette fonction augmente avec l'affinement du pas de temps. La fonction implémentée pour le moment dans le package airGR est un simple « lag », i.e. que le débit modélisé à l'amont est propagé tel quel avec un retard dépendant de la longueur du bief. Trois fonctions de type « lag & route » ont été implémentées dans le but de prendre en compte le phénomène d'atténuation lors du transfert. Ces fonctions ont été étudiées d'un point de vue hydraulique (i.e. sans apports d'eau entre l'amont et l'aval), sur cinq cas typiques bien choisis, par comparaison avec un modèle à base physique. Une étude hydrologique a ensuite été menée sur un échantillon de 153 bassins versants situés en France métropolitaine. Une analyse complémentaire à l'échelle événementielle sur trois affluents du Rhône a également été réalisée. Les nouvelles fonctions de routage implémentées présentent de bien meilleurs résultats d'un point de vue hydraulique par rapport à la méthode initiale « lag » mais les performances des modélisations hydrologiques sont similaires. Ce résultat met en avant la capacité d'adaptation du modèle GR5H. Bien que le modèle hydrologique semble performant sur l'ensemble des chroniques, l'analyse événementielle a permis de mettre en avant certaines crues pour lesquelles le modèle présente des difficultés. Finalement, le choix de la fonction de propagation est laissé au modélisateur suivant l'importance qu'il accorde à la réalité physique et au temps de calcul qui augmente avec la complexité. Une fonction simple et parcimonieuse sera alors à privilégier.

Mots clés : Modélisation hydrologique, propagation hydraulique, semi-distribution, airGR, débit horaire, délai – stockage.

Abstract

Semi-distribution is a way to discretize a catchment into subunit to include a spatial variability. The objective of this internship is to select and test different functions to transfer modeled upstream flow to downstream. The importance of this function grows with the timestep refinement. The function implemented in airGR is a simple “lag”, i.e., a propagation of an upstream flows without modifications with only a delay time depending on the reach length. Three lag & route functions have been implemented to consider the attenuation phenomenon. These functions have been studied from a hydraulic point of view (i.e., without a water input between upstream and downstream) on 5 cases wisely chosen compared with a physical based model. Then, a hydrological study has been carried out on 153 French catchment. A complementary analysis has been made at the event scale on three Rhone's tributaries. The new functions have better results on the hydraulic point of view in comparison of the basic function, but the performances are similar in the hydrological study which shows the GR5H capacity of adaptation. Although the hydrological model seems performant, the event analysis shows some flood for which the model displays some difficulties. Finally, the function choice is left to the modeler, following the importance he grants to the physical reality of parameters and to the calculation time which increases with complexity. Then, a simple and parsimonious function will be prioritized.

Key words: Hydrological modeling, hydraulic propagation, semi-distribution, airGR, hourly flow, lag & route.