

**Université Pierre et Marie Curie, MinesParisTech
& AgroParisTech**

**Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie
Parcours Hydrologie-Hydrogéologie**

**Les SUMO (SUper MOdèles) feront-ils le poids en
modélisation hydrologique ?**

José Manuel Tunqui Neira

Directeur(s) de recherche : Guillaume Thirel



**Institut national de
recherche en sciences et
technologies pour
l'environnement et
l'agriculture
Antony-France**

30 juin 2015



Remerciements

Je remercie Guillaume THIREL pour l'encadrement de mon stage, pour son immense patience, sa persévérance, sa disponibilité et l'enthousiasme qu'il a pu me communiquer. Tu as été à chaque étape de ton encadrement, un merveilleux guide pour l'avancée de mes travaux et pour l'aboutissement à ce document.

Je souhaite également remercier la contribution et la collaboration du personnel de l'unité de recherche de Hydrosystèmes et Bioprocédés -Hydrologie d' Antony, le cadre fut convivial, accompagné d'une ambiance favorable à l'avancement des travaux.

Enfin tous mes respects et ma reconnaissance vont à l'égard de ma famille, source de ma motivation et de mes espoirs. À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, qui m'ont montré leur intérêt et qui ont contribué à la réalisation de ce présent rapport.

Abstract

In recent years, hydrological models had an impressive development. The interest of the models is, among others, for simulation and forecasting of hydrological events for the short-, medium- and long-terms. Generally, hydrologists work with a multi-model approach: they use either a single model with different objective-functions or different hydrological models, and the results of each are combined afterwards. However, this approach showed failures for reproducing observed flows. For this reason, in this internship I applied the SUMO (SUper-MOdel) approach, created originally in the field of climatology, to field of hydrology. The difference with the standard multi-model approach is that the super-model works with a dynamic concept; this means that an exchange of information is created between internal variables in real-time. Thanks to this, the internal variables of the least efficient models will be brought back to a range of values potentially allowing for improved performances. Therefore, we hope to improve the simulated flows, helping to develop better tools to better estimate the risks associated to water.

As this is the first time that SUMO is applied to the field of hydrology, we will use only one hydrological model, GR4J, with two versions of the objective-function: high flows and low flows. We will do the performance comparison between the results produced by the original model GR4J (high and low flows) and those produced by our super model; and finally, we will also compare the super-model performance with a simple multi-model approach.

Table de matières

Remerciements	2
Abstract.....	3
Liste des Figures.....	5
Liste des Tableaux	6
1 Introduction.....	7
2 L'approche super-modèle (SUMO)	8
2.1 Objectifs de l'approche SUMO	8
2.2 Première application : climatologie	9
2.2.1 L'approche du SUMO avec le modèle type Lorenz 63.....	9
2.2.2 Résultats	9
2.3 Approche envisagée pour l'hydrologie.....	10
2.3.1 Modélisation hydrologique.....	11
2.3.2 Forçages climatiques	13
2.3.3 Zone d'étude	13
3 Application de la méthodologie SUMO à l'hydrologie avec GR4J.....	14
3.1 Variables internes à échanger	14
3.1.1 Optimisation du Coefficient de connexion.....	15
3.1.2 Coupleur OpenPALM	15
4 Résultats de l'approche SUMO au domaine de l'hydrologie.....	20
4.1 Introduction.....	20
4.2 Comparaison de la performance entre les débits simulés modifiés, débit SUMO et les débits simulés originaux.	21
4.2.1 Résultats des modèles GR4J originaux sur la période de calage (1973-1991). 21	
4.2.2 Comparaison de la performance entre les débits simulés modifiés pour SUMO, l'approche SUMO et les débits simulés avec les modèles GR4J originaux sur la période de calage (1973-1991).	21
4.2.3 Résultats modèle GR4J originaux pour la période de contrôle (1992-2009). 28	
4.3 Comparaison de la performance SUMO aux approches multi-modèles habituelles : l'étude faite par Oudin et al. (2006)	35
4.3.1 Introduction	35
4.3.2 Comparaison des performances entre l'approche SUMO et l'approche multi-modèle Oudin et al. (2006).....	35
5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES	37

6	Références bibliographiques	39
7	ANNEXES	41
7.1	Informations supplémentaires bassin versant de l'III à Didenheim	41
7.2	Informations supplémentaires bassin versant du Verdoble à Tautavel.....	42
7.3	Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe sur la période de calage pour le bassin versant de l'III à Didenheim	43
7.4	Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe sur la période de calage pour le bassin versant du Verdoble à Tautavel	44
7.5	Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe pour la période de contrôle pour le bassin versant de l'III à Didenheim	45
7.6	Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe pour la période de contrôle pour le bassin versant du Verdoble à Tautavel.	46
7.7	Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe : comparaison de l'approche SUMO et de l'approche multi-modèle proposée par Oudin et al. (2006), période de contrôle pour le bassin versant de l'III à Didenheim.....	47
7.8	Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe : comparaison de l'approche SUMO et de l'approche multi-modèle proposée par Oudin et al. (2006), période de contrôle pour le bassin versant du Verdoble à Tautavel..	47
7.9	Nomenclature	48
8	RESUME.....	49

Liste des Figures

<i>Figure 1: Approche multi-modèle habituelle</i>	<i>8</i>
<i>Figure 2: trajectoires des 3 modèles imparfaits sans connexions entre eux [van den Berge et al. (2011)].....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 3: Trajectoire du super-modèle (noir) et du Lorenz 63 (gris). [van den Berge et al. (2011)]</i>	<i>10</i>
<i>Figure 4: Schéma de l'approche SUMO (Super-Modèle)</i>	<i>11</i>
<i>Figure 5 schéma modèle pluie-débit GR4J [Perrin et al. (2003)]</i>	<i>12</i>
<i>Figure 6: application OpenPALM de super-modèle fait dans PrePALM</i>	<i>17</i>
<i>Figure 7: Schéma de communication en temps réel entre les modèles GR4J et le SUMO avec OpenPALM.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 8: Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les deux versions originales (i.e. coordonnées (0,0)) de GR4J (hauts et bas débits) et les deux GR4J modifiés avec l'approche SUMO, Bassin versant de l'III à Didenheim. En ligne les graphes pour chaque version des modèles, en colonne les graphes pour chaque critère utilisé pour l'évaluation.</i>	<i>22</i>
<i>Figure 9: Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les deux versions originales (i.e. coordonnées (0,0)) de GR4J (hauts et bas débits) et les deux GR4J modifiés avec l'approche SUMO, Bassin versant du Verdoble à Tautavel. En ligne les graphes pour</i>	

chaque version des modèles, en colonne les graphes pour chaque critère utilisé pour l'évaluation.	23
Figure 10: courbe débits classés pour les Bassins versants de l'étude. Dans la légende : Qobs : débit observé, QGR4JHD,BD :débits classés simulé original ,SUMO : débit SUMO.	25
Figure 11: hydrogrammes d'évènements extrêmes: étiage de l'année 1976 (a,b) et crue observé dans l'année 1983 (c,d) BV de l'III à Didenheim. Dans la légende : P : pluie, Qobs : débit observé, QcalOHD,BD : débit simulé original hauts(HD) et bas (BD) débits, QcalSMHD,BD : débit simulé modifié, SUMO : débit SUMO.....	26
Figure 12: hydrogrammes d'évènements extrêmes: étiage de l'année 1976 (a,b) et crue observé dans l'année 1983(c,d) BV du Verdoble à Tautavel. Dans la légende : P : pluie, Qobs : débit observé, QcalOHD,BD : débit simulé original hauts(HD) et bas (BD) débits, QcalSMHD,BD : débit simulé modifié, SUMO : débit SUMO.....	27
Figure 13: Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les deux versions originales (i.e. coordonnées (0,0)) de GR4J (hauts et bas débits) et les deux GR4J modifiés avec l'approche SUMO, Bassin versant de l'III à Didenheim.....	29
Figure 14: Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les deux versions originales (i.e. coordonnées (0,0)) de GR4J (hauts et bas débits) et les deux GR4J modifiés avec l'approche SUMO, Bassin versant du Verdoble à Tautavel	30
Figure 15: courbe débits classés pour les Bassins versants de l'étude Dans la légende : Qobs : débit observé, QGR4JHD,BD :débits classés simulé original ,SUMO : débit SUMO.	32
Figure 16: hydrogrammes d'évènements extrêmes: étiage de l'année 2003 (a,b) et crue observé dans l'année 2007 (c,d) BV de l'III à Didenheim. Dans la légende : P : pluie, Qobs : débit observé, QcalOHD,BD : débit simulé original hauts(HD) et bas (BD) débits, QcalSMHD,BD : débit simulé modifié, SUMO : débit SUMO.....	33
Figure 17: hydrogrammes d'évènements extrêmes: étiage de l'année 2003 et crue observé dans l'année 1993 BV du Verdoble à Tautavel	34
Figure 18: Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour l'approche d'Oudin et al.(2006)(i.e. coordonnées (0,0)) sur GR4J original (hauts et bas débits) et les moyennes de l'approche SUMO, Bassin versant de l'III à Didenheim.....	36
Figure 19: Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour l'approche d'Oudin et al.(2006)(i.e. coordonnées (0,0)) sur GR4J original (hauts et bas débits) et les moyennes de l'approche SUMO, Bassin versant du Verdoble à Tautavel.....	36

Liste des Tableaux

Tableau 1: Valeurs de paramètres et critères Nash-Sutcliffe GR4J originales pour le calage	21
Tableau 2: Valeurs de RMSE calculées pour les deux bassins versants.....	24
Tableau 3: Valeurs de critères Nash-Sutcliffe GR4J originales pour le période de contrôle	28
Tableau 4: Valeurs RMSE calculés pour le deux bassins versants	31

1 Introduction.

La modélisation a une place centrale dans l'hydrologie moderne. Les modèles pluie-débit ont, à de nombreuses reprises, prouvé leur efficacité. En effet, la simulation des débits est indispensable à de nombreux secteurs économiques et pour la sécurité civile. Les attentes sont fortes, car ils nous servent à prédire les débits futurs (à partir de données observées), les événements extrêmes (crues et étiages), la probabilité d'apparition de ces événements (souvent les valeurs extrêmes de crue ou d'étiage), et à déterminer les impacts probables de changements climatique ou anthropique.

Pour répondre à ces problématiques, des approches différentes se sont développées, allant des modèles hydrologiques conceptuels aux modèles hydrologiques à bases physiques. Tous ces modèles comportent un nombre plus ou moins important de paramètres, dont il faut déterminer les valeurs. Si les paramètres ne sont pas mesurables ou quantifiables à partir des propriétés physiques du bassin, il convient de déterminer leurs valeurs par optimisation, c'est-à-dire celles permettant les meilleures simulations de débits possibles.

Les modèles, par nature, ne sont que le reflet de l'état de nos connaissances d'un système. Or, il convient de reconnaître que cette connaissance est pour le moins incomplète. A cela s'ajoutent les approximations inhérentes à la description mathématique (i.e. la conceptualisation). Les modèles, y compris les plus complexes ne sont que des grossières approximations de la réalité, à cause du manque de théories adéquates ou par une incorporation inadéquate de théories existantes. Les sciences hydrologiques souffrent encore d'un manque d'information pour certains processus comme l'interaction nappe-rivière. En plus de ces simplifications théoriques, il faut ajouter la simplification d'ordre numérique puisque dans certains modèles les équations différentielles non linéaires qui décrivent la plupart des processus sont résolues par des algorithmes discrétisant l'espace et le temps.

Pour essayer de résoudre ces soucis, de plus en plus, les hydrologues travaillent en opérationnel avec une **approche multi-modèle** : les débits simulés de modèles différents, calculés de manière indépendante, sont, a posteriori, moyennés arithmétiquement ou avec une moyenne pondérée. L'objectif principal de cette approche est de représenter, d'une manière aussi précise que possible, les simulations faites pour prévoir des événements hydrologiques importants, qui sont généralement les crues (hauts débits) et les étiages (bas débits). Cependant, l'inconvénient de cette méthode est qu'il est difficile d'obtenir une simulation qui soit efficace dans les deux domaines : elle l'est le plus souvent soit pour les hauts débits, soit pour les bas débits, mais rarement dans les deux cas, ce qui signifie qu'il n'existe pas un modèle hydrologique « parfait » [Sittner (1976), Perrin et al. (2001)].

Un autre problème est que la majorité des modèles hydrologiques n'est pas capable de reproduire les impacts du changement climatique. En effet, plusieurs études [Vaze et al. (2010), Coron et al. (2012)] ont montré le manque de robustesse des modèles, produisant des forts biais entre les débits simulés et observés. La robustesse est souvent définie comme la capacité d'une méthode d'avoir de bons résultats dans une vaste gamme de situations et dans des conditions non optimales [Ouarda and Ashkar (1998)]; dans le cas de l'hydrologie, les causes de ces conditions non optimales viennent de la qualité et de disponibilité de données (séries courtes, données manquantes, faible densité spatiale, etc.) ou de changements anthropique ou climatique. Afin d'améliorer la robustesse des modèles hydrologiques, nous proposons dans ce stage de coupler dynamiquement plusieurs modèles hydrologiques suivant l'approche SUMO, pour un échange simultané d'information. La notion de super-modèles a ses origines dans le domaine de la climatologie, où le projet européen SUMO

(<http://www.sumoproject.eu/>, 2012-2014) a visé à développer une nouvelle stratégie de modélisation pour améliorer les simulations climatiques. L'idée nouvelle développée dans ce projet est de passer d'une forme quelconque de moyenne des projections climatiques de différents modèles (méthode classiquement utilisée), à une stratégie d'interaction entre ces modèles.

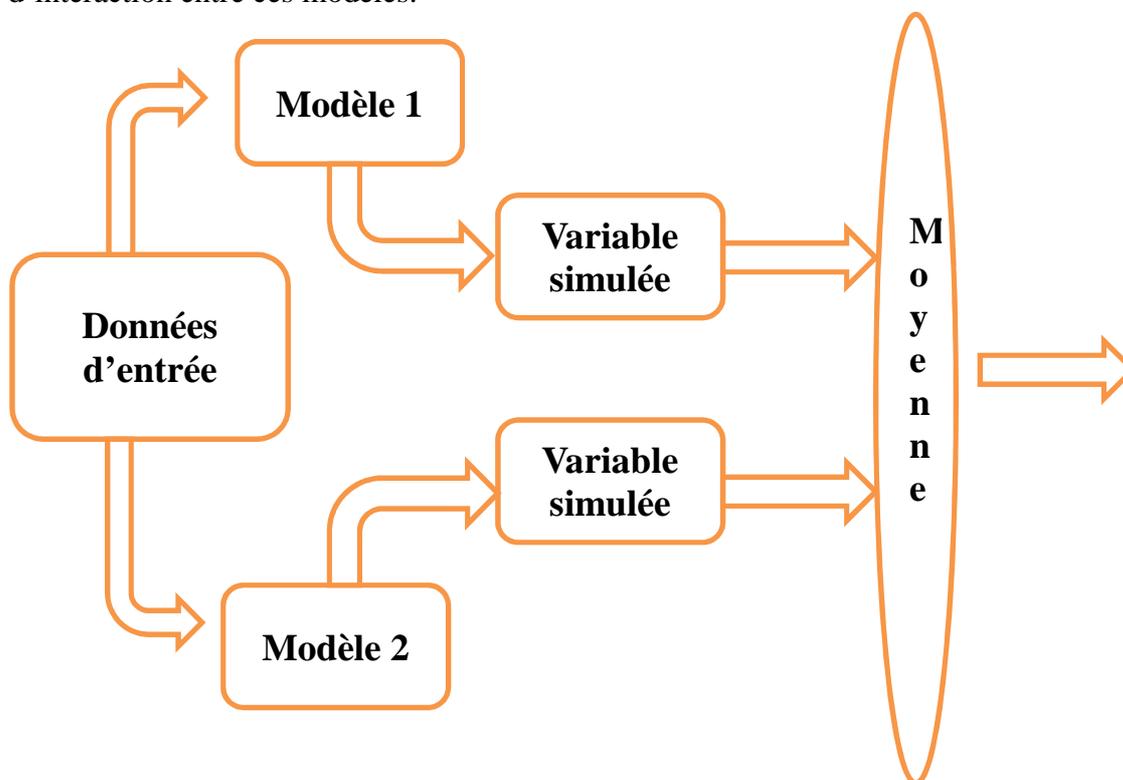


Figure 1: Approche multi-modèle habituelle

L'objectif principal de mon stage est l'application du concept de super-modèle, appliqué avec succès dans le domaine de la climatologie, au domaine de l'hydrologie. Pour se conformer à cet objectif, nous utiliserons le modèle hydrologique GR4J [Perrin et al. (2003)], un modèle simple mais efficace. Les modèles considérés pour réaliser le super modèle seront deux versions de GR4J : l'une calée pour représenter au mieux les hauts débits, l'autre pour les faibles débits. Une fois ces modèles calés, il faudra réaliser le super modèle. Pour cela, le coupleur dynamique de codes de calcul OpenPALM du CERFACS¹ sera utilisé. Cet outil permet de réaliser de manière simple des couplages. Une fois le super-modèle implémenté et appliqué, il sera comparé aux modèles GR4J originaux, pour évaluer la performance du super-modèle hydrologique, et finalement nous ferons une comparaison avec une approche multi-modèle simple proposée par Oudin et al. (2006)

2 L'approche super-modèle (SUMO)

2.1 Objectifs de l'approche SUMO

Le principe de SUMO se base sur le travail de deux modèles différents, non d'une manière indépendante, mais de façon dynamique, c'est-à-dire, en échangeant des informations sur les variables internes communes en temps réel. Le but visé est d'améliorer ainsi les déficiences qu'elles comportent. Le super-modèle pourrait donc

¹ CERFACS : Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique

avoir des capacités renforcées par rapport aux modèles individuels en permettant l'apprentissage de chacun des modèles qui le composent par rapport aux autres.

2.2 Première application : climatologie

Ce sont les climatologues qui, en premier, ont utilisé la méthode SUMO ; jusqu'alors, les modèles climatiques utilisant l'approche multi-modèle n'arrivaient pas bien à simuler les conditions climatiques réelles, en particulier ceux liés au changement climatique [Solomon et al. (2007)]. Puis, dans les études de van den Berge et al. (2011) et Wiegnerink et al. (2013), l'approche Super-modèle a été proposée. Ils proposent dans leur étude qu'au lieu de l'approche standard (qui est aussi utilisée dans le domaine de l'hydrologie) qui consiste à prendre la moyenne arithmétique ou pondérée des résultats individuels de chaque modèle, de permettre aux modèles d'échanger des informations nécessaires pendant la simulation même. Ils proposent donc de faire la combinaison des modèles individuels dans un super-modèle par des connexions entre les modèles. Les coefficients de connexion sont optimisés grâce à des comparaisons à des observations historiques ; ainsi, le super-modèle apprend à combiner les forces des différents modèles afin de reproduire au mieux le climat historique. Dans le cas de la climatologie les variables internes utilisées pour les modèles sont la température moyenne et l'advection de glace de mer [Johns et al. (1997)]. Pour démontrer leur idée, ils ont travaillé avec trois différents types de modèles chaotiques. Ici nous montrerons seulement ce qu'ils ont fait avec le modèle chaotique type Lorenz 63 [Lorenz (1963)].

2.2.1 L'approche du SUMO avec le modèle type Lorenz 63

Les équations du model Lorenz 63 sont les suivantes :

$$\begin{cases} x' = \sigma(x - y) \\ y' = x(\rho - z) - y \\ z' = xy - \beta z \end{cases} \quad (1)$$

Les valeurs standards des paramètres de l'équation (1) sont : $\sigma=10$, $\rho=28$ et $\beta= 8/3$. La résolution de l'équation (1) nous donne comme résultat les courbes de couleur gris qu'on peut voir dans la Figure 2. Ensuite, ils ont créé trois modèles imparfaits en perturbant les paramètres σ , ρ et β . Puis, le super-modèle a été créé par l'ajout de termes correctifs dépendant des coefficients de connections entre les variables internes communes des trois modèles. L'équation de l'approche SUMO est la suivant :

$$x'_k = f_k(x_k) + \sum_{j \neq k} C_{kj}^x (x_j - x_k) \quad (2)$$

C'est l'équation centrale de l'approche SUMO. Cette équation a été introduite dans l'équation du system Lorenz 63 originale :

$$\begin{cases} x'_k = \sigma_k(y_k - x_k) + \sum_{j \neq k} C_{kj}^x (x_j - x_k) \\ y'_k = x_k(\rho_k - z_k) + \sum_{j \neq k} C_{kj}^y (y_j - y_k) \\ z'_k = x_k y_k - \beta_k z_k + \sum_{j \neq k} C_{kj}^z (z_j - z_k), \quad k = 1,2,3 \end{cases} \quad (3)$$

2.2.2 Résultats

D'abord, nous montrons les résultats trouvés par van den Berge et al. (2011) avec les trois modèles imparfaits sans aucun échange d'informations entre eux :

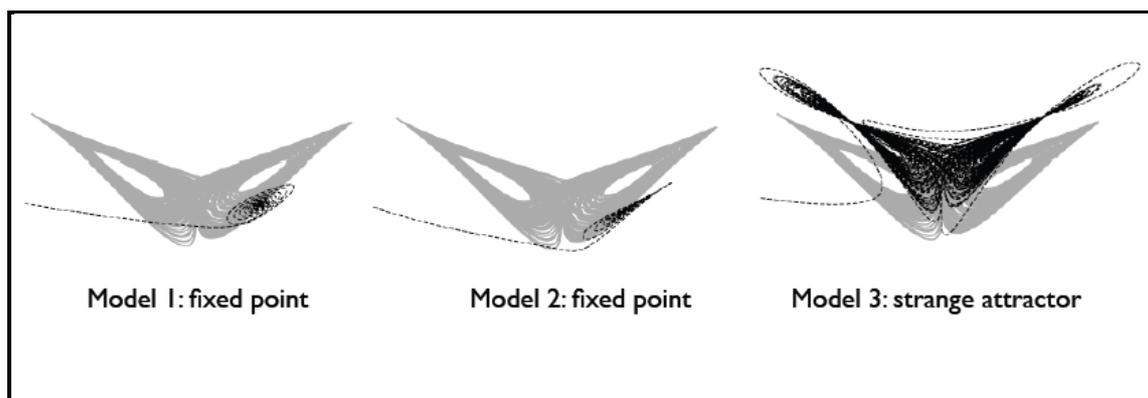


Figure 2: trajectoires des 3 modèles imparfaits sans connexions entre eux [van den Berge et al. (2011)]

Les résultats montrent que s'il n'y a aucun échange d'information, aucun des trois modèles (ligne noire) n'arrive à suivre la trajectoire originale du modèle Lorenz 63 (ligne grise). Ceci nous montre aussi que l'approche standard de calculer la moyenne pondérée des résultats individuels de chaque modèle n'est pas nécessairement la procédure la plus efficace afin d'obtenir des simulations plus proches de la réalité. La Figure 4 est montrée les résultats avec l'échange d'information entre les trois modèles, c'est-à-dire le super-modèle :

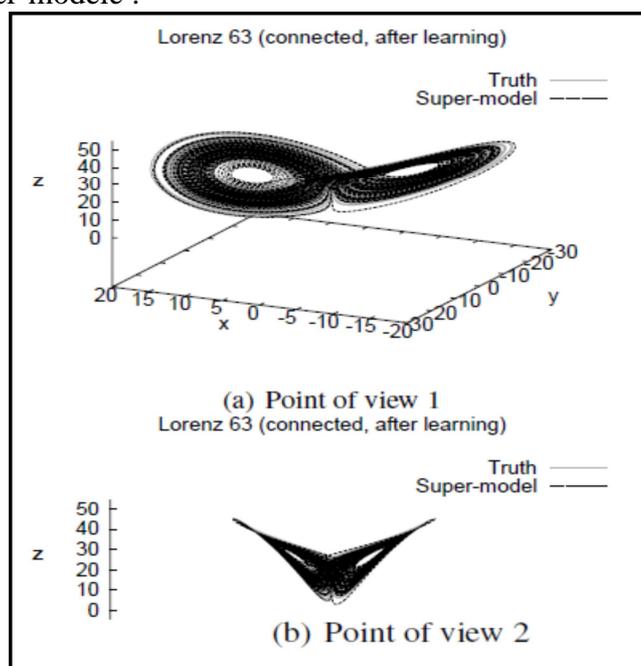


Figure 3: Trajectoire du super-modèle (noir) et du Lorenz 63 (gris). [van den Berge et al. (2011)]

Notons dans la Figure 3 que le super-modèle arrive à se rapprocher des trajectoires du modèle original (Lorenz 63), donc l'hypothèse que l'échange d'informations entre modèles peut améliorer les simulations a été corroborée. Aussi, afin de vérifier si le super-modèle fonctionne également bien dans un vrai modèle climatologie, **Wiegerinck et al. (2013)** a utilisé cette approche dans le modèle barocline quasi-géostrophique T5 [Houtekamer (1991)]. Les résultats nous montrent que le super-modèle a eu, aussi, une performance efficace.

2.3 Approche envisagée pour l'hydrologie

Dans ce chapitre, nous montrons les éléments nécessaires à l'élaboration de la méthodologie SUMO dans le domaine de l'hydrologie. Ci-dessous, le schéma de

fonctionnement de SUMO que l'on envisage pour les modèles hydrologiques est montré :

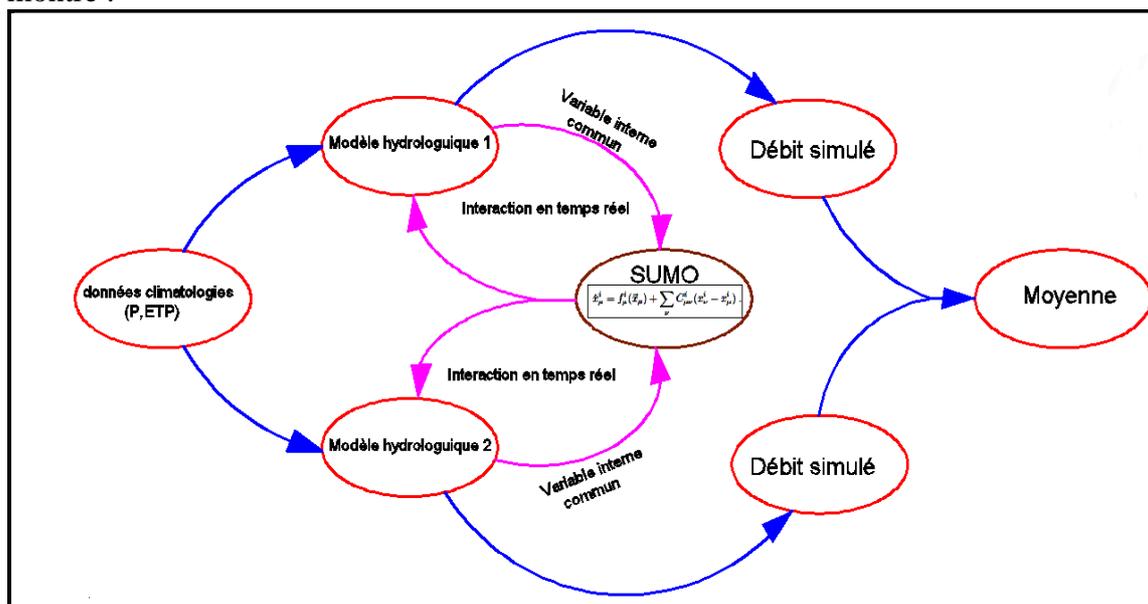


Figure 4: Schéma de l'approche SUMO (Super-Modèle)

A la différence de la Figure 1, on peut voir la communication en temps réel des variables internes communes des modèles hydrologiques. Cela est possible grâce à la fonction de SUMO (ellipse brune) où l'équation (2) développée dans le domaine de la climatologie a été configurée pour exécuter l'action de l'échange d'informations entre les variables internes.

2.3.1 Modélisation hydrologique

De nombreux modèles hydrologiques existent dans le monde. Pour sa simplicité et l'expérience acquise par l'équipe d'accueil à Irstea Antony dans le développement de ce modèle, j'ai choisi d'utiliser GR4J² [Perrin et al. (2003)] pour une première application de SUMO à l'hydrologie.

2.3.1.1 Principe et fonctionnement du modèle GR4J

Un modèle dit conceptuel décompose le fonctionnement des bassins versants en plusieurs sous-processus. Le plus souvent, le bassin est représenté comme un assemblage de réservoirs interconnectés (donc on peut aussi l'appeler modèle à réservoirs) décrits par des équations de bilan et des lois de vidanges. On distingue en général :

- Un module de production, assurant les bilans en eau (rapport stockage/évapotranspiration/écoulements)
- Un module de transfert, gérant la participation temporelle des écoulements sur le bassin.

S'ils permettent de simuler de façon globale les différentes composantes du cycle de l'eau (évapotranspiration, recharge et contribution des nappes, stockages hydriques, débits), ils constituent, cependant, une représentation très simplifiée du fonctionnement réel du bassin. L'interconnexion des réservoirs et les lois de vidanges utilisées sont le plus souvent issues d'une approche empirique, et les paramètres sont sans grande signification physique.

La méthodologie du modèle GR4J se base sur les concepts suivants :

- Le bassin versant est vu comme une entité globale.

² Génie Rural à 4 paramètres Journalier

- L'approche adoptée est empirique (pas d'usage a priori d'équations physiques).
- Les structures des modèles sont développées à partir de structures simples, progressivement complexifiées.
- La complexité du modèle est conditionnée par la capacité à reproduire la transformation pluie-débit.
- On recherche les structures les plus générales possibles.
- Les modèles sont évalués de manière relative (pas de bons modèles, seulement des modèles meilleurs que d'autres).

La mise en œuvre de GR4J nécessite un nombre réduit des données hydrométriques et d'information sur le bassin, dans la mesure où seuls doivent être renseignés :

- Les pluies journalières moyennées sur le bassin.
- L'ETP journalière moyennée sur le bassin.
- Les débits moyens journaliers à l'exutoire.
- La superficie du bassin versant.

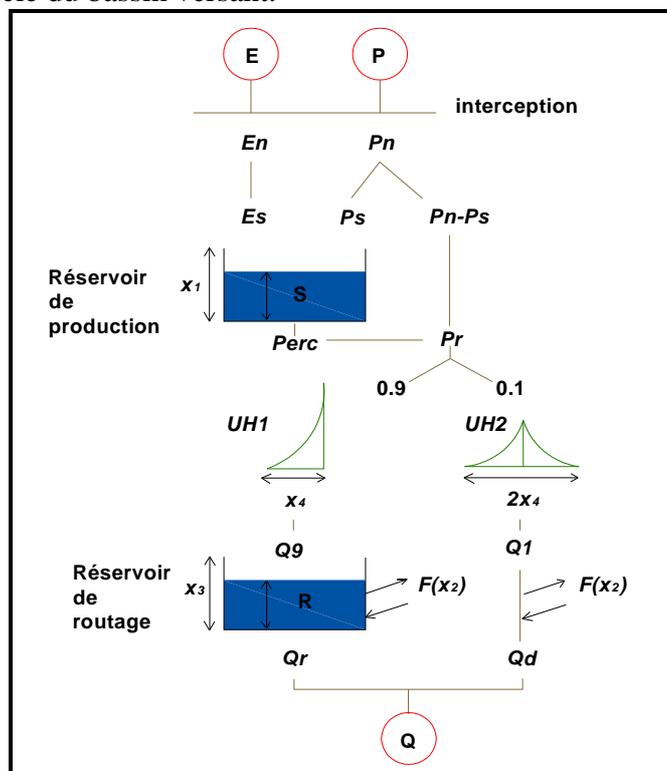


Figure 5 schéma modèle pluie-débit GR4J [Perrin et al. (2003)]

Le nombre de degrés de liberté du modèle est limité, puisque seuls quatre paramètres sont optimisés :

X_1 : capacité maximale du réservoir de production (mm).

X_2 : coefficient d'échange souterrain (mm).

X_3 : capacité maximale du réservoir de routage (mm).

X_4 : base de temps de l'unité hydrogramme UH1 (jours).

Une des originalités de la structure de GR4J est de considérer le bassin versant comme une entité ouverte, en utilisant un terme source/puits censé représenter les échanges avec les nappes profondes. Elle joue un double rôle, car elle permet de compenser les erreurs d'estimation sur les variables de forçage et l'inéquation éventuelle de la fonction de rendement du modèle.

2.3.1.2 Calage et évaluation du modèle GR4J

Le plus souvent, un split-sample test [Klemeš (1986)] est mis en place pour caler GR4J, c'est-à-dire que pour chaque bassin versant, les données de séries chronologiques sont divisées en deux sous-périodes indépendantes (calibration et validation), en fonction de la longueur de jeu total de données disponibles. Puis, le modèle est calé sur la première sous-période et contrôlé sur la seconde sous-période, et vice-versa.

L'optimisation (calage) des paramètres du modèle nécessite la définition d'une fonction-objectif quantifiant l'erreur du modèle, c'est-à-dire la différence entre les débits simulés et les débits observés. Pour notre cas d'étude, nous avons choisi les critères proposés par Nash and Sutcliffe (1970), qui est basé sur la somme d'erreurs quadratiques :

$$Nash(Q) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{cal,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (4)$$

Ce critère a tendance à donner une grande importance aux écarts entre les débits de crue simulés et observés. Pour connaître les évolutions du système hydrologique en période d'étiage, et pour représenter de manière plus efficace les bas débits, le second critère utilisé sera le critère de Nash sur le logarithme des débits qui donne un poids plus grand aux erreurs commises sur les faibles gammes de valeurs :

$$Nash(\ln(Q)) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_{obs,i} + \varepsilon) - \ln(Q_{cal,i} + \varepsilon))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_{obs,i} + \varepsilon) - \ln(\bar{Q}_{obs} + \varepsilon))^2} \quad (5)$$

Avec $\varepsilon = \bar{Q}_{obs} / 40$ pris au cas où il existerait un débit nul [Perrin (2000)].

Finalement, nous utiliserons aussi le critère de Nash sur la racine carrée des débits, car ce critère donne un poids similaire à la simulation des débits de crues et d'étiages.

$$Nash(\sqrt{Q}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{Q_{cal,i}})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{\bar{Q}_{obs}})^2} \quad (6)$$

2.3.2 Forçages climatiques

En ce qui concerne les données climatiques (Pluie, ETP) la base de données SAFRAN³ [Durand et al. (1993), (1999), Vidal et al. (2010)] fournie par Météo-France sera utilisée. SAFRAN est un système d'analyse atmosphérique méso-échelle, originalement créé pour améliorer la prévention du risque d'avalanches sur régions montagneuses. Il fonctionne sur des zones géographiques considérées comme homogènes du point de vue météorologique, c'est-à-dire que les variables atmosphériques de cette zone ne dépendent que de l'altitude [Quintana-Segui et al. (2008)]. Zone par zone, les observations de terrain, et les données calculées par le modèle de prévision ARPEGE⁴ sont interpolées pour fournir des forçages atmosphériques au pas de temps horaire : précipitations (pluie et neige), température, humidité, vitesse du vent, pression, 2 types de rayonnement : rayonnement atmosphérique (J/cm²) et rayonnement visible (J/cm²). Ces variables sont ensuite interpolées sur une grille régulière (8x8 km) couvrant toute la France. L'évapotranspiration potentielle utilisée vient de l'utilisation de la formule d'Oudin, [Oudin et al. (2005)]. Pour les débits observés, les données fournies par la Banque HYDRO (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>), seront utilisés.

2.3.3 Zone d'étude

La méthodologie SUMO sera appliquée, pour commencer, sur deux bassins versants. Cela rendra plus facile une tentative de compréhension de l'impact de l'approche SUMO sur les modèles GR4J.

³ Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige

⁴ Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle

2.3.3.1 L'Ill à Didenheim (Code banque HYDRO : A1080330).

L'Ill est une rivière qui baigne la plaine d'Alsace. Important affluent du Rhin, elle coule dans les départements du Haut-Rhin (68) et du Bas-Rhin (67), en région Alsace. Ce bassin versant a une surface de **668.47 km²**, et une altitude médiane de **382 m**. Les valeurs de débits observés, fournis par la banque HYDRO, se trouvent entre les années **1974 et 2010**, et les données climatologies (SAFRAN) entre les années **1958 et 2010**. (Pour plus d'informations voir l'annexe 6.1)

2.3.3.2 Le Verdoube à Tautavel (Code banque hydro : Y0655010).

Le Verdoube est une rivière qui coule dans les départements de l'Aude et des Pyrénées-Orientales, dans la région Languedoc-Roussillon. C'est un affluent du fleuve Agly en rive gauche. Ce bassin versant a une surface de **308.53 km²**, et une altitude médiane de **382 m**. Les valeurs de débits observés, fournis par la banque HYDRO, se trouvent entre les années **1967 et 2010**, et les données climatologies (SAFRAN) entre les années **1958 et 2010**. (Pour plus d'informations voir l'annexe 6.2).

Pour nos deux bassins versants les données de séries chronologiques ont été divisés en deux sous-périodes indépendants du même taille [Klemeš (1986)] qui sont les suivantes :

- Période de calage : **années 1973 à 1991**.
- Période de validation : **années 1992 à 2009**.

Nous avons choisi ces deux bassins versants, parce que d'abord nous voulons voir si notre modèle peut avoir une bonne performance avec des conditions météorologiques différentes ; si ceci n'est pas le cas, nous voulons savoir et quantifier l'influence de ces conditions sur notre super-modèle. Une autre raison est que dans ces deux bassins versants, les flux observés ne sont pas fortement influencés par des procédés non naturels tels que l'imperméabilisation des sols et de grands ouvrages hydrauliques comme les barrages et les retenues d'eau.

3 Application de la méthodologie SUMO à l'hydrologie avec GR4J

La méthodologie du super-modèle se base sur le fonctionnement de l'approche multi-modèle : on a besoin au minimum de deux versions du même modèle ou 2 modèles hydrologiques différents. Les modèles considérés pour réaliser le super-modèle dans le cadre de ce stage seront deux versions de GR4J : l'une calée pour représenter au mieux les hauts débits (Nash(Q), l'autre pour les bas débits (Nash (ln(Q))). Nous utiliserons GR4J car c'est un modèle assez simple qui n'a pas beaucoup de paramètres à caler, tout en conservant une bonne performance [Perrin et al. (2001)].

Comme on l'a expliqué précédemment, l'échange d'informations doit être reproduit en temps réel. Nous avons donc besoin d'un coupleur qui soit capable de réaliser ce processus car le couplage de modèles peut s'avérer difficile. Le choix s'est porté sur le coupleur OpenPALM développé par CERFACS (http://www.cerfacs.fr/globc/PALM_WEB/index.html). Nous avons choisi ce coupleur car il a déjà été utilisé avec succès dans plusieurs études liées au domaine de l'hydrologie [cf. thèse de Thirel (2009), chapitre 5.4 et Thirel et al. (2010)]. Sans ce coupleur (OpenPALM), il serait très difficile de faire communiquer les modèles. L'utilisation concrète d'OpenPALM sera détaillée dans la section 3.1.2.

3.1 Variables internes à échanger

Nous avons choisi de travailler avec les réservoirs parce que, comme nous l'avons vu dans la Figure 5, ces variables internes sont essentielles. En effet, les réservoirs sont impliqués dans presque tous les processus pour la simulation des débits dans le modèle hydrologique GR4J. Aussi il convient de noter que lorsque, même en travaillant avec les

l'échange de données entre les codes en fait un logiciel portable et optimisé sur toutes machines du monde unix/linux .

OpenPALM présente de nombreuses fonctionnalités de couplage allant jusqu'à des fonctionnalités d'interpolation géométrique de tous types de maillages.

OpenPALM travaille avec scripts codés sur fortran 77 et 90 (notre cas) ainsi que C, C++ et python. La seule chose à faire pour qu'OpenPALM puisse reconnaître et travailler avec notre code est d'ajouter une carte d'identité tout au début du script. Par exemple, la carte d'identité utilisée pour qu'OpenPALM travaille avec le code GR4J sur fortran est la suivante :



Les éléments plus importants au moment d'utiliser le coupleur OpenPALM sont les fonctions **PALM_Get** et **PALM_Put**. Ces deux fonctions sont responsables de la réception et de la mise à disposition d'objets à échanger avec d'autres éléments de l'application aux endroits du code opportuns. Ces deux éléments sont à placer à l'intérieur du programme, c'est-à-dire dans le code FORTRAN original.

3.1.2.2 Interface utilisateurs PrePALM.

La mise au point d'une application OpenPALM passe nécessairement par l'interface graphique PrePALM. Il est très important d'en maîtriser toutes les subtilités pour tirer parti au maximum des fonctionnalités du coupleur. On passe en général plus de temps dans l'outil PrePALM que dans la modification du code source des programmes à coupler. La raison principale vient du fait que l'algorithme du couplage est entièrement décrit dans l'interface graphique et que la plupart des fonctionnalités du coupleur sont définies via l'interface graphique qui contrôle la cohérence des données saisies.

PrePALM est vraiment là où nous construisons notre application dans OpenPALM. Pour faire l'application, PrePALM nous offre beaucoup d'outils comme les branches, où sont introduits les codes de calculs type fortran. On y trouve aussi les éléments classiques d'un algorithme, à savoir des boucles (while, do), des conditions (if, then, else), etc. L'interface graphique et les processus nécessaires pour faire tourner les modèles sur l'interface sont très intuitifs et assez simples à faire.

On montre dans la Figure 6 l'application OpenPALM que j'ai mise en place dans l'interface PrePALM pour le super-modèle :

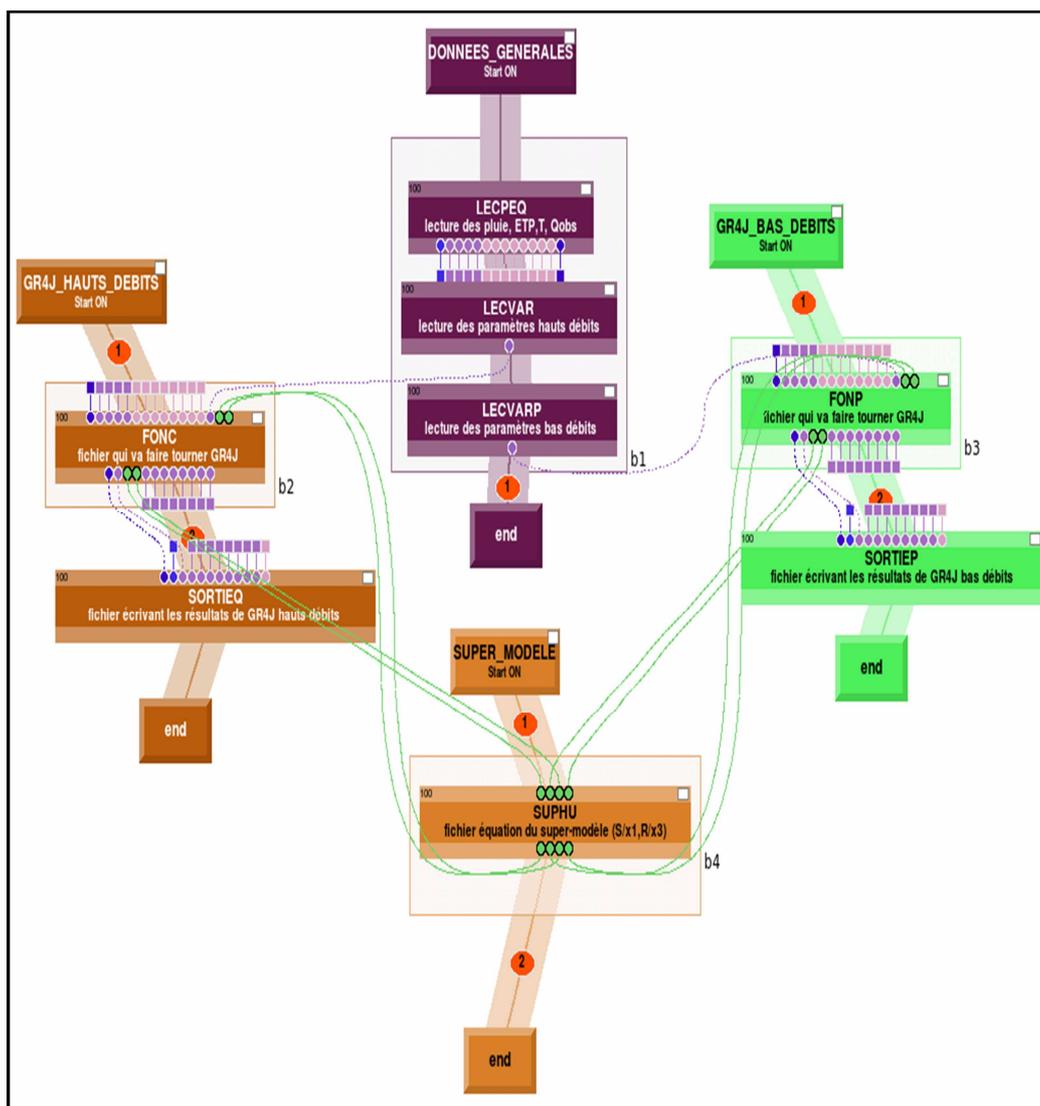


Figure 6: application OpenPALM de super-modèle fait dans PrePALM

On peut remarquer que l'application OpenPALM pour créer notre super-modèle est similaire à l schéma de l'approche SUMO (Figure 3). Dans la branche appelée DONNEES GENERALES, se trouvent les données climatologiques nécessaires pour la mise en œuvre du modèle GR4J (pluie, ETP), et les 4 paramètres optimisés pour les hauts (LECVAR) et bas (LECVARP) débits. Dans les branches marron et verte (« GR4J_HAUTS_DEBITS » et « GR4J_BAS_DEBITS ») se trouve le code FORTRAN du modèle GR4J pour les hauts et bas débits, dans les boîtes appelées FONC et FONP. Ici, nous calculons à partir des formules mathématiques de notre modèle hydrologique (GR4J) nos variables internes, qui sont les ratios α et β . Ensuite, elles sont envoyées en temps réel (c'est le processus de communication) à la branche bleue appelée SUPER_MODELE, spécifiquement à la boîte SUPHU, où se trouve, en code FORTRAN, l'équation du super-modèle proposée dans l'item 2.3.3.1. Les nouvelles valeurs des ratios calculées par le super-modèle sont renvoyées au modèle GR4J, et on recommence le processus jusqu'à finir la série temporelle, qui pour notre cas sera le nombre total de jours proposés pour la période de calibration. Dans PrePALM (Figure 6), les communications qui viennent d'être présentées sont représentées par les traits reliant les ronds de couleur verte.

Une fois la démarche finie, les résultats trouvés (débit simulé, capacité des réservoirs de production (S) et routage (R), ratios S/x_1 et R/x_3) sont envoyées aux boîtes appelées SORTIEQ (hauts débits) et SORTIEP (bas débits), pour qu'ils puissent être mis sous forme d'un fichier .txt.

D'autres éléments visibles de cet algorithme, à part les branches et les traits, sont les blocs, des rectangles grisés qui se trouvent sur les boîtes LECPEC, LECVAR, LECVARP, FONC et FONP. L'objectif des blocs est l'optimisation du temps de calcul des processus numériques réalisés à l'intérieur de ces boîtes, car le même exécutable peut être lancé plusieurs fois avec plusieurs jeux de données d'entrées différents. Les petits cercles et carrés de couleurs violette, rose et bleue représentent les variables internes stockées dans la mémoire interne du logiciel (BUFFER). Ces variables sont les données climatiques, les quatre paramètres optimisés de GR4J, etc.

Voici un autre schéma (Figure 7) pour montrer comment fonctionne la communication des variables internes à travers des fonctions Palm_Put et Palm_Get :

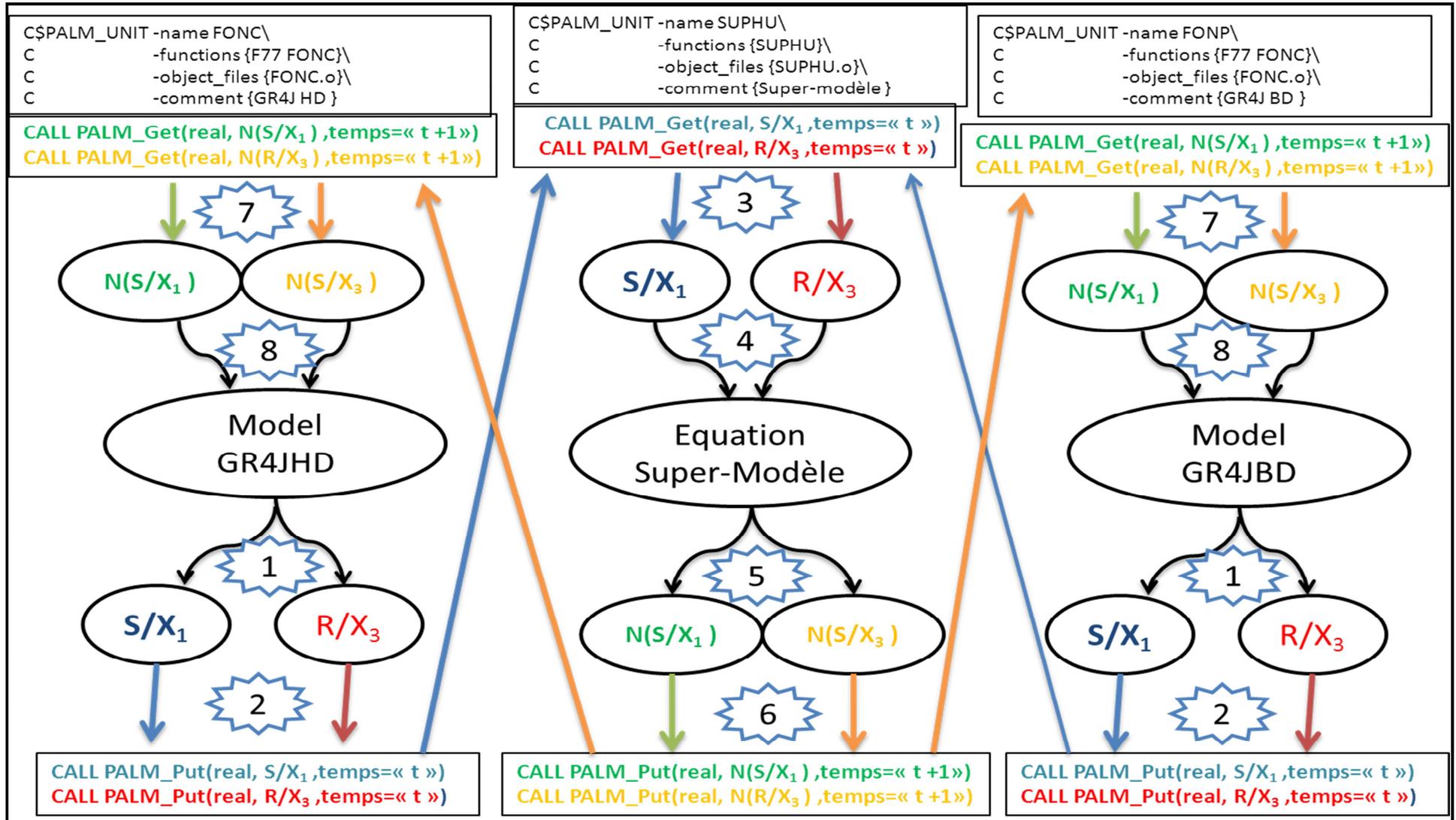


Figure 7: Schéma de communication en temps réel entre les modèles GR4J et le SUMO avec OpenPALM

La Figure 7 nous présente comment travaille l'application OpenPALM pour faire le couplage entre nos deux modèles hydrologiques (GR4J hauts et bas débits) et l'équation du super-modèle. D'abord nous voyons les cartes d'identités dans nos trois fichiers FORTRAN, afin qu'OpenPALM puisse fonctionner. Pour mieux comprendre le schéma, on va utiliser les numéros qui se trouvent dans les étoiles dans la Figure 7. Ces numéros nous indiquent les étapes suivies pour le modèle GR4J, pour que les variables internes puissent être communiquées comme expliqué ci-dessous :

1. Les modèles GR4J pour les hauts et bas débits, au premier pas de temps, et encore sans utiliser le super-modèle, calculent les ratios S/x_1 et R/x_3 .
2. Une fois les ratios calculés, on utilise la fonction **PALM_Put**, afin de que nos variables internes soient envoyées à la boîte où se trouve l'équation du super-modèle (équation (2)). Dans la Figure 7, notons que **PALM_Put** nous demande trois informations pour commencer l'envoi des informations à coupler : le type de variable, qui pour notre cas est une variable du type REAL, le nom de la variable indiqué dans la carte d'identité (dans notre figure ceci n'est pas montré), et finalement le pas de temps, qui sera toujours « t »
3. Les valeurs de nos variables internes ont été envoyées depuis les boîtes de GR4J, vers la boîte de l'équation du super-modèle. Pour pouvoir récupérer ces valeurs, l'utilisation de la fonction **PALM_Get** est nécessaire.
4. Après la récupération des valeurs des variables internes produites par GR4J, elles sont utilisées dans l'équation du super-modèle pour calculer les nouvelles valeurs de S/x_1 et R/x_3 .
5. que nous appelons $N(S/x_1)$ et $N(R/x_3)$
6. Les nouveaux ratios doivent être envoyés à la boîte du modèle GR4J. Pour cela, on utilise une autre fois la fonction d'OpenPALM **PALM_Put**, mais le pas de temps ici sera « t+1 » à chaque fois.
7. Les nouvelles valeurs de nos variables internes calculées avec l'équation du super-modèle sont renvoyées aux boîtes de GR4J. Pour pouvoir récupérer ces valeurs, il est nécessaire d'utiliser la fonction **PALM_Get** au nouveau pas de temps t', qui est maintenant égal à t+1.
8. Finalement, $N(S/x_1)$ et $N(R/x_3)$ entrent aux modèles GR4J dits « originaux » et on recommence le processus. Il faut remarquer qu'il continuera jusqu'à ce que la boucle temporelle soit terminée.

4 Résultats de l'approche SUMO au domaine de l'hydrologie

4.1 Introduction

Dans cette section, nous montrerons les résultats de l'approche SUMO pour les deux versions du modèle GR4J (hauts et bas débits). De cette interaction entre le SUMO et les deux modèles, on aura des deux débits simulés modifiés pour SUMO : un débit simulé pour la version de hauts débits modifiée et un autre pour la version bas débits modifiée. Ces deux jeux de résultats seront comparés aux valeurs originales calculées avec les deux modèles GR4J dit « traditionnels ». Aussi on montrera l'approche SUMO proprement dit, c'est-à-dire la moyenne des deux débits simulés modifiés pour SUMO. D'abord on montrera les premiers résultats des 2 versions de GR4J (4 paramètres, critères de Nash, débit simulé, etc.) calculés par les modèles originaux (i.e. sans l'utilisation de super-modèle). Puis ceux-ci seront comparés à ceux calculés par le super-modèle avec les deux hypothèses proposées dans le 3.1.1. pour le coefficient C ($C_{1HD}=C_{1BD}=C_{2HD}=C_{2BD}$ et $C_{1HD}=C_{1BD}\neq C_{2HD}=C_{2BD}$). Enfin, la moyenne des résultats

trouvés par les deux modèles hydrologiques composant le super-modèle sera comparée avec les débits originaux simulés par le modèle GR4J on va dire « habituelle » et les approches proposées par **Oudin et al. (2006)**. A partir d'ici et pour éviter des problèmes de compréhension, **aux débits simulés calculés par les deux versions de GR4J original (i.e. hauts et bas débits) on l'appellera débit simulé original haut et /ou bas débits, aux débits simulés modifiés pour SUMO pour les deux versions GR4J original, on l'appellera débits simulés modifiés, et finalement à la moyenne des débits simulés modifiés pour SUMO, on l'appellera simplement débit SUMO.**

4.2 Comparaison de la performance entre les débits simulés modifiés, débit SUMO et les débits simulés originaux.

4.2.1 Résultats des modèles GR4J originaux sur la période de calage (1973-1991).

Le tableau récapitulatif avec les 4 paramètres et les 3 critères de Nash (équations 4, 5 et 6) des deux versions de GR4J (hauts et bas débits) est présenté ci-dessous :

Tableau 1: Valeurs de paramètres et critères Nash-Sutcliffe GR4J originales pour le calage

Station	A1080330		Y0655010	
Bassin versant	L'Ille à Didenheim		Le Verdouable à Tautavel	
Période du calage	1973-1991		1973-1992	
Modèle hydrologique	GR4J		GR4J	
Paramètres	hauts débits	bas débits	hauts débits	bas débits
X_1 (mm)	406.60	632.70	393.40	1085.72
X_2 (mm)	-0.77	-1.01	-2.48	-3.86
X_3 (mm)	22.77	31.19	45.14	60.34
X_4 (jours)	2.20	1.99	1.60	1.63
fonction objectif	Critères Nash- Sutcliffe		Critères Nash- Sutcliffe	
$C(Q)$	0.673	0.616	0.536	0.284
$C(\ln(Q))$	0.727	0.714	0.539	0.520
$C(\sqrt{Q})$	0.652	0.728	0.347	0.585

Comme nous pouvons voir dans le Tableau 1, la différence entre les valeurs des 4 paramètres (X_1 , X_2 , X_3 et X_4) pour la même période de calage entre les deux versions du modèle hydrologique GR4J est remarquable ce qui provoque, à mon avis, que les valeurs des critères de Nash-Sutcliffe pour les débits ($C(Q)$) et les logarithmes de débits ($\ln(Q)$) soient différents aussi. Par contre le critère sur les racines carrés ($C(\sqrt{Q})$) se trouve dans la même fourchette pour les deux versions.

4.2.2 Comparaison de la performance entre les débits simulés modifiés pour SUMO, l'approche SUMO et les débits simulés avec les modèles GR4J originaux sur la période de calage (1973-1991).

Pour mieux remarquer la performance de SUMO, on divisera l'étude de la performance en deux grandes parties : une analyse de sensibilité à la performance globale entre les débits simulés originaux, les débits simulés modifiés, et le débit SUMO et une tentative d'identifier quelle approche est la meilleure au moment de simuler des événements extrêmes tels que les étiages et les crues.

4.2.2.1 Analyse de sensibilité globale des méthodologies étudiées

Ici les méthodes utilisées pour comparer la performance entre les résultats des simulations des deux méthodologies sont les suivants :

- **Graphiques des critères de Nash-Sutcliffe**

Nous montrons dans la figure ci-dessous les résultats des trois critères trouvés en utilisant les équations du super-modèle (équation 7) et avec les deux hypothèses décrites dans l'équation 8. Il faut remarquer que les résultats se trouvant aux coordonnées (0,0) (i.e. pas de correction des variables internes) équivalent aux performances du modèle original GR4J

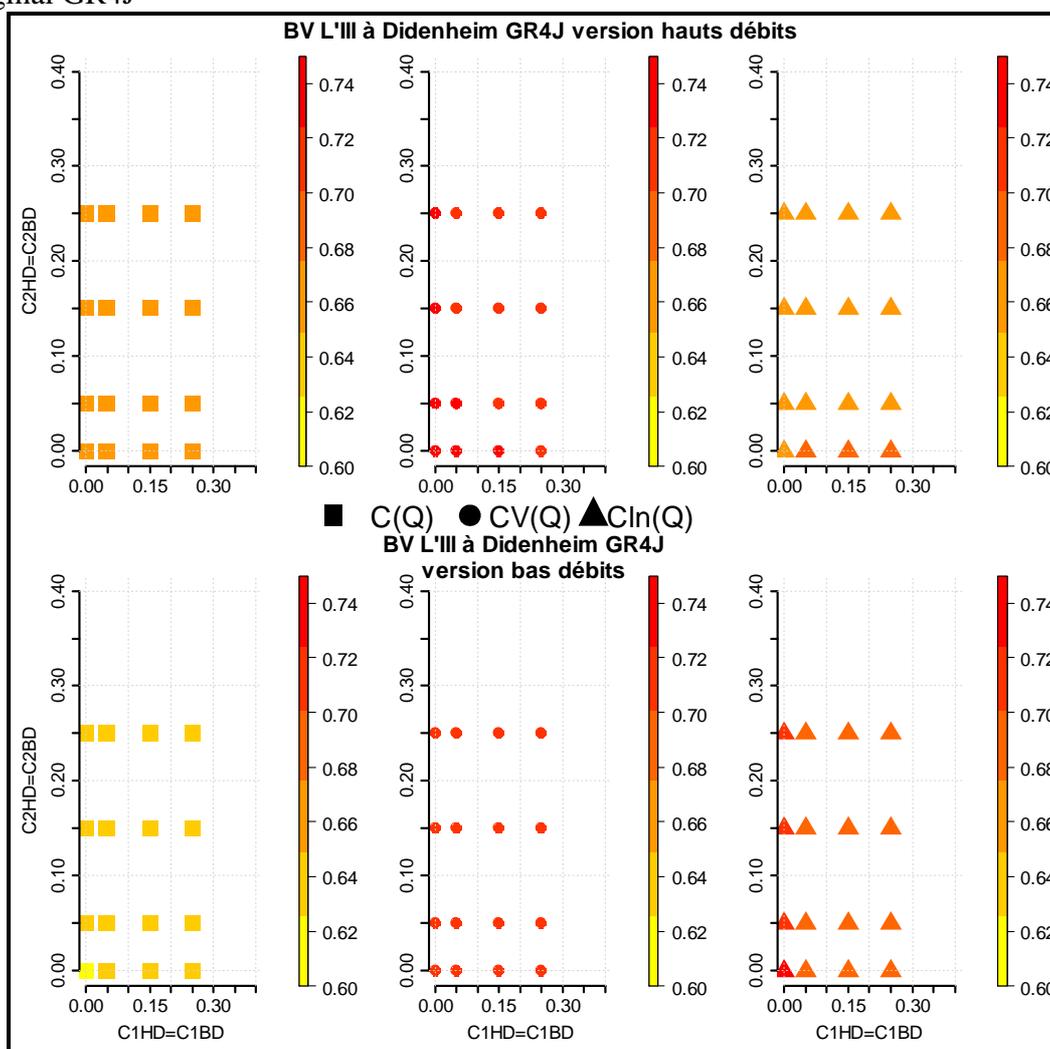


Figure 8: Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les deux versions originales (i.e. coordonnées (0,0)) de GR4J (hauts et bas débits) et les deux GR4J modifiés avec l'approche SUMO, Bassin versant de l'Ille à Didenheim. En ligne les graphes pour chaque version des modèles, en colonne les graphes pour chaque critère utilisé pour l'évaluation.

Dans la Figure 8, nous pouvons observer que les critères trouvés à partir des débits simulés modifiés pour les hauts (les trois graphes trouvant dans la partie supérieure) et bas débits (les trois graphes trouvant dans la partie inférieure) ; pour les trois critères Nash-Sutcliffe (petits carrés pour le critère sur les débits, petits arrondis pour le critère sur les racines carrés de débits et petits triangles pour le critère sur le logarithme des débits). Il est à noter que les valeurs qui maintiennent les coordonnées (0,0) dans chaque graphique correspondent aux débits simulés originaux, c'est-à-dire sans la participation de l'approche SUMO. Notons qu'à partir des couleurs, on a défini quelles sont les performances les plus hautes (couleurs foncées) et les plus faibles (couleurs claires).

Il faut dire qu'en ce qui concerne le critère sur les racines carrées, ($C(\sqrt{Q})$), il n'y a pas une grande différence entre les débits simulés originaux et les débits simulés modifiés. Au contraire, nous voyons que dans les deux autres critères étudiés, il est possible de remarquer les différences entre les débits simulés originaux de GR4J et les débits simulés modifiés pour SUMO.

Dans le critère sur les débits (petits carrés), pour la version GR4J hauts débits, aucune critères des débits simulés, dépasse la valeur originale (i.e. coordonnée 0,0) ; certaines valeurs lui sont égales, mais aucune ne peut l'améliorer. Mais dans la version GR4J pour les bas débits, nous pouvons voir que tous les critères calculés à partir des débits simulés modifiés dépassent la valeur originale.

Dans le critère sur les logarithmes des débits GR4J pour les bas débits, c'est l'opposé de ce qui s'est passé dans le critère sur les débits ($C(Q)$) ; car ici, dans la version pour GR4J pour les hauts débits, nous voyons que les valeurs calculées avec l'approche SUMO dépassent la valeur originale étant dans les coordonnées (0,0), alors que, dans la version GR4J pour les bas débits; aucune chiffre dépasse cette valeur.

Et maintenant nous montrons la figure correspondant au bassin versant Le Verdoble à Tautavel :

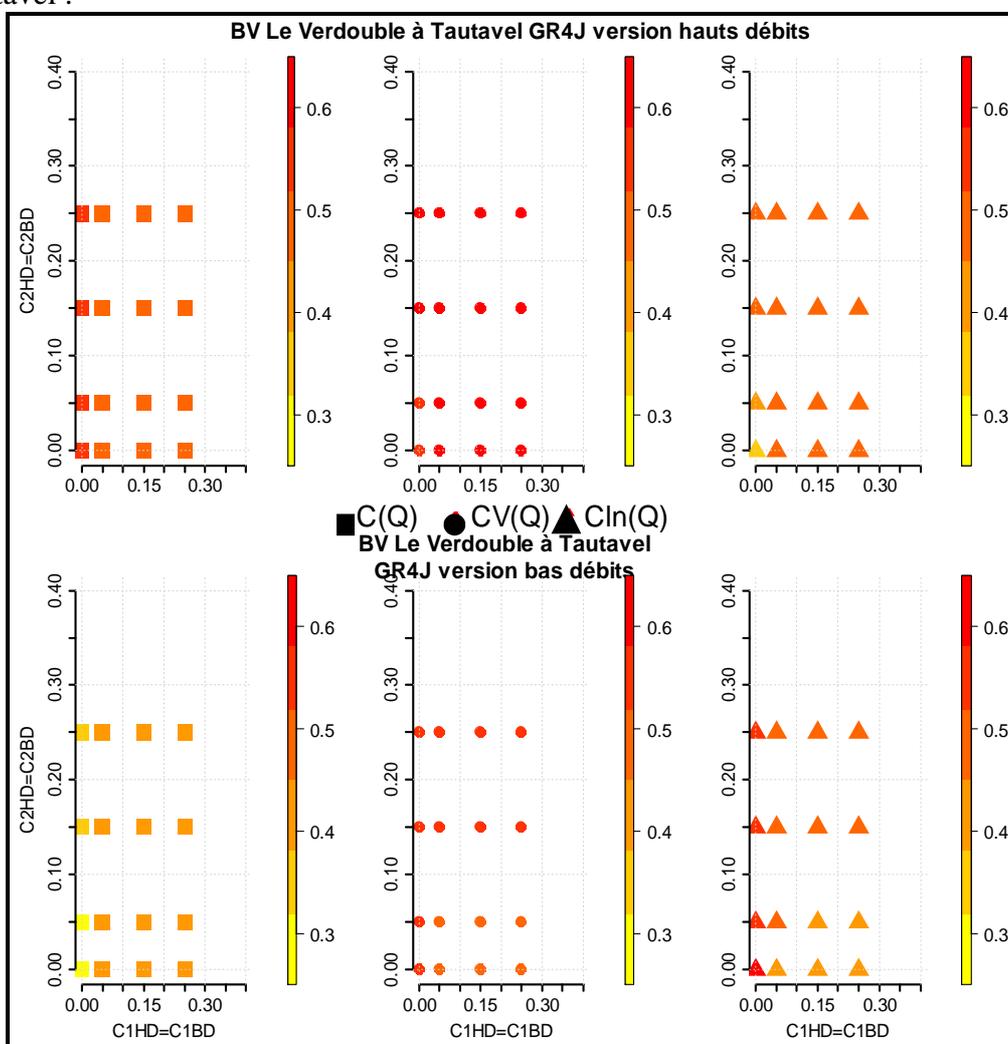


Figure 9: Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les deux versions originales (i.e. coordonnées (0,0)) de GR4J (hauts et bas débits) et les deux GR4J modifiés avec l'approche SUMO, Bassin versant du Verdoble à Tautavel. En ligne les graphes pour chaque version des modèles, en colonne les graphes pour chaque critère utilisé pour l'évaluation.

Dans la Figure 9, il faut dire qu'on voit presque la même situation que pour le bassin versant de l'III à Didenheim. Par rapport aux valeurs correspondant aux fonctions-objectif principales pour chaque version (c'est-à-dire par exemple, pour le modèle GR4J version hauts débits, la fonction-objectif principale est le critère pour les débits ($C(Q)$)), il n'y a pas une grande différence entre les performances originales de GR4J et celles obtenues avec les débits simulés modifiés. Au contraire, nous voyons que dans les critères différents de la fonction-objectif pour chaque version de GR4J (critère sur les débits pour la version GR4J bas débits et critère sur le logarithme des débits pour la version GR4J hauts débits), il est possible de remarquer les différences entre les critères des débits simulés originaux et les critères calculés à partir des débits simulés modifiés. Aussi il faut dire que dans le critère sur les racines carrées correspondant aux versions de GR4J hauts débits il y a une différence considérable favorable aux valeurs de SUMO par rapport à la valeur original.

Dans le critère sur les débits (colonne de gauche), pour la version GR4J bas débits, presque toutes les valeurs trouvées à partir des débits simulés modifiés dépassent la valeur originale (i.e. coordonnée 0,0).

Dans le critère sur les logarithmes des débits (colonne de droite), pour la version GR4J hauts débits, nous voyons que les critères calculés à partir des débits simulés modifiés dépassent le critère original originale (coordonnées (0,0)), alors que, dans la version GR4J pour les bas débits; aucun chiffre ne dépasse cette valeur.

En conclusion, nous pouvons dire que les débits simulés pour les deux bassins versants a bien fonctionné, car grâce à la communication entre les variables internes, les déficiences des critères vues dans les versions originaux de GR4J, ont été réduites.

Pour connaître les valeurs des critères de Nash-Sutcliffe des figures 10 et 11 voyez les annexes 6.3 et 6.4 du présent rapport de stage.

- **RMSE :**

Le root mean square error (racine carrée de l'erreur quadratique moyenne), est un critère utile pour mesurer la performance d'un modèle simulant les débits d'un cours d'eau sur une certaine période de temps. L'équation est la suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{cal,i})^2}{n}} \quad (9)$$

Les résultats ne sont que présentés pour les débits simulés modifiés et les débits simulés originaux de GR4J(hauts et bas débits) ; sous forme de tableau ci-dessous :

Tableau 2: Valeurs de RMSE calculées pour les deux bassins versants

bassin versant		L'III à Didenheim		Le Verdoble à Tautavel	
Hypothèse		Hauts débits	Bas débits	Hauts débits	Bas débits
$C_{1HD}=C_{1BD}$	$C_{2HD}=C_{2BD}$	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE
0	0	4.072	4.484	3.147	4.278
0	0.05	4.080	4.420	3.132	4.193
0	0.15	4.101	4.352	3.139	4.102
0	0.25	4.120	4.314	3.155	4.037
0.05	0	4.127	4.335	3.234	3.797
0.05	0.05	4.149	4.315	3.245	3.771
0.05	0.15	4.180	4.297	3.265	3.735
0.05	0.25	4.202	4.289	3.284	3.705
0.15	0	4.162	4.310	3.271	3.739

0.15	0.05	4.183	4.297	3.281	3.717
0.15	0.15	4.210	4.287	3.299	3.685
0.15	0.25	4.230	4.284	3.315	3.659
0.25	0	4.173	4.302	3.297	3.703
0.25	0.05	4.193	4.291	3.305	3.683
0.25	0.15	4.220	4.283	3.322	3.653
0.25	0.25	4.239	4.281	3.338	3.628

Notons dans le Tableau 2 que dans les deux bassins versants, les débits simulés par l'approche SUMO obtiennent un RMSE supérieur au RMSE calculé pour le modèle GR4J version originale hauts débits ($C1HD=C1BD=C2HD=C2BD=0$). Dans le cas de la version de bas débits, il se passe le contraire, les valeurs du RMSE du super-modèle sont inférieures à la valeur originale, mais aussi il est plus grand que zéro.

- **Courbes des débits classés**

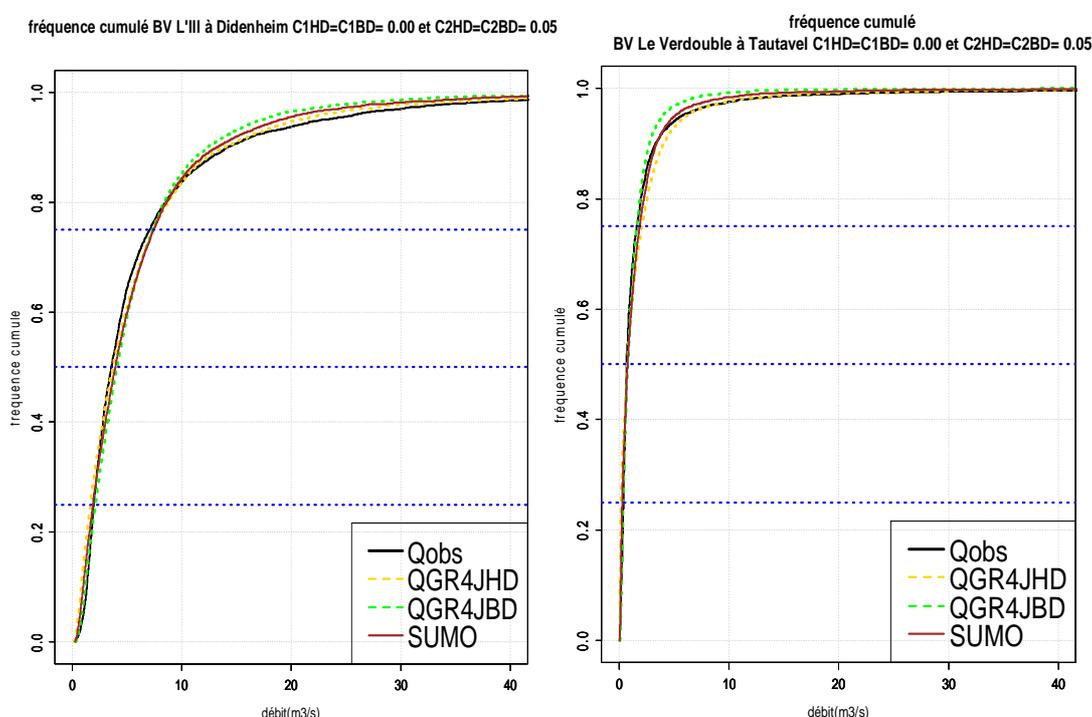


Figure 10: courbe débits classés pour les Bassins versants de l'étude. Dans la légende : Qobs : débit observé, QGR4JHD,BD : débits classés simulé original, SUMO : débit SUMO.

Ici, on a comparé la performance du débit SUMO et les débits simulés pour les hauts et bas débits ; nous pouvons voir la courbe de débits classé SUMO arrive à suivre la courbe des débits observés, et surtout dans le cas du bassin versant du Verdoble à Tautavel, améliore de manière significative, celles simulées par les modèles originaux. Notez que nous ne montrons que les résultats des simulations qui ont les meilleures performances pour chaque bassin versant.

4.2.2.2 Simulation des événements extrêmes

La sécheresse choisie pour les deux bassins versants sera celle de 1976. Dans le cas des crues, pour le bassin de l'III à Didenheim, la crue du 26 mai 1983 sera affichée, et pour

le Verdoble à Tautavel la crue du 17 Février 1982. Il faut remarquer que l'on montrera seulement l'hydrogramme de l'approche SUMO qui en général a eu la meilleure performance globale, que pour le bassin versant de l'III à Didenheim est $C_{1HD}=C_{1BD}=0.00$ et $C_{2HD}=C_{2BD}=0.15$ et pour le bassin versant du Verdoble à Tautavel est $C_{1HD}=C_{1BD}=0.25$ et $C_{2HD}=C_{2BD}=0.05$

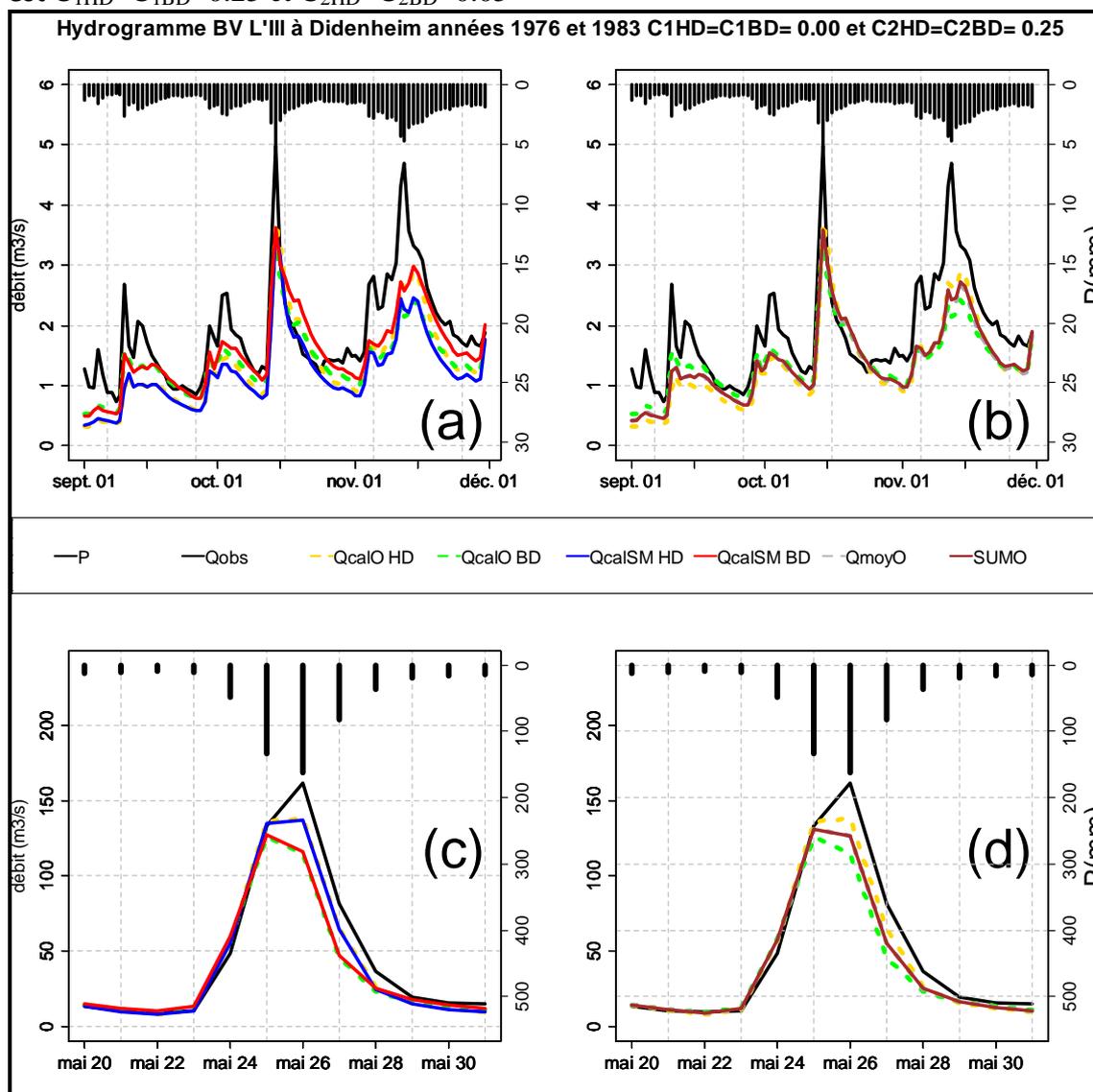


Figure 11: hydrogrammes d'événements extrêmes: étiage de l'année 1976 (a,b) et crue observé dans l'année 1983 (c,d) BV de l'III à Didenheim. Dans la légende : P : pluie, Qobs : débit observé, QcalOHD,BD : débit simulé original hauts(HD) et bas (BD) débits, QcalSMHD,BD : débit simulé modifié, SUMO : débit SUMO

Notons dans la Figure 11a la performance des débits simulés originaux (trait pointillé vert pour le bas débits et trait pointillé jaune pour les hauts débits) et débits simulés modifiés (trait rouge pour les bas débits et trait bleu pour les hauts débits), Nous pouvons remarquer que les débits simulés modifiés pour les bas débits ont une meilleure performance pour les coefficients C montrés($C_{1HD}=C_{1BD}=0.00$ et $C_{2HD}=C_{2BD}=0.25$) même si il n'arrive pas à suivre d'une façon exacte la courbe des débits observés. Dans la Figure 11b, on a essayé de voir la performance de notre débit SUMO (trait marron) par rapport aux débits simulés originaux de GR4J pour les hauts et bas débits. On voit que le débit SUMO améliore la performance du débit simulé original pour les hauts débits mais, pour le moment il ne peut pas avoir une meilleure performance par rapport

au débit simulé original pour les bas débits. Dans la Figure 11C, dans le cas de la crue, on voit que les 4 modèles montrés (i.e. débits simulés originaux et simulés modifiés pour SUMO) ont la même performance, et malheureusement aucune ne peut arriver à simuler le pic de la crue. Dans la Figure 11d, on observe la performance de notre débit SUMO et les débits simulés originaux, toujours notre débit SUMO se trouve en dessous, dans ce cas du débit simulé originale pour les hauts débits.

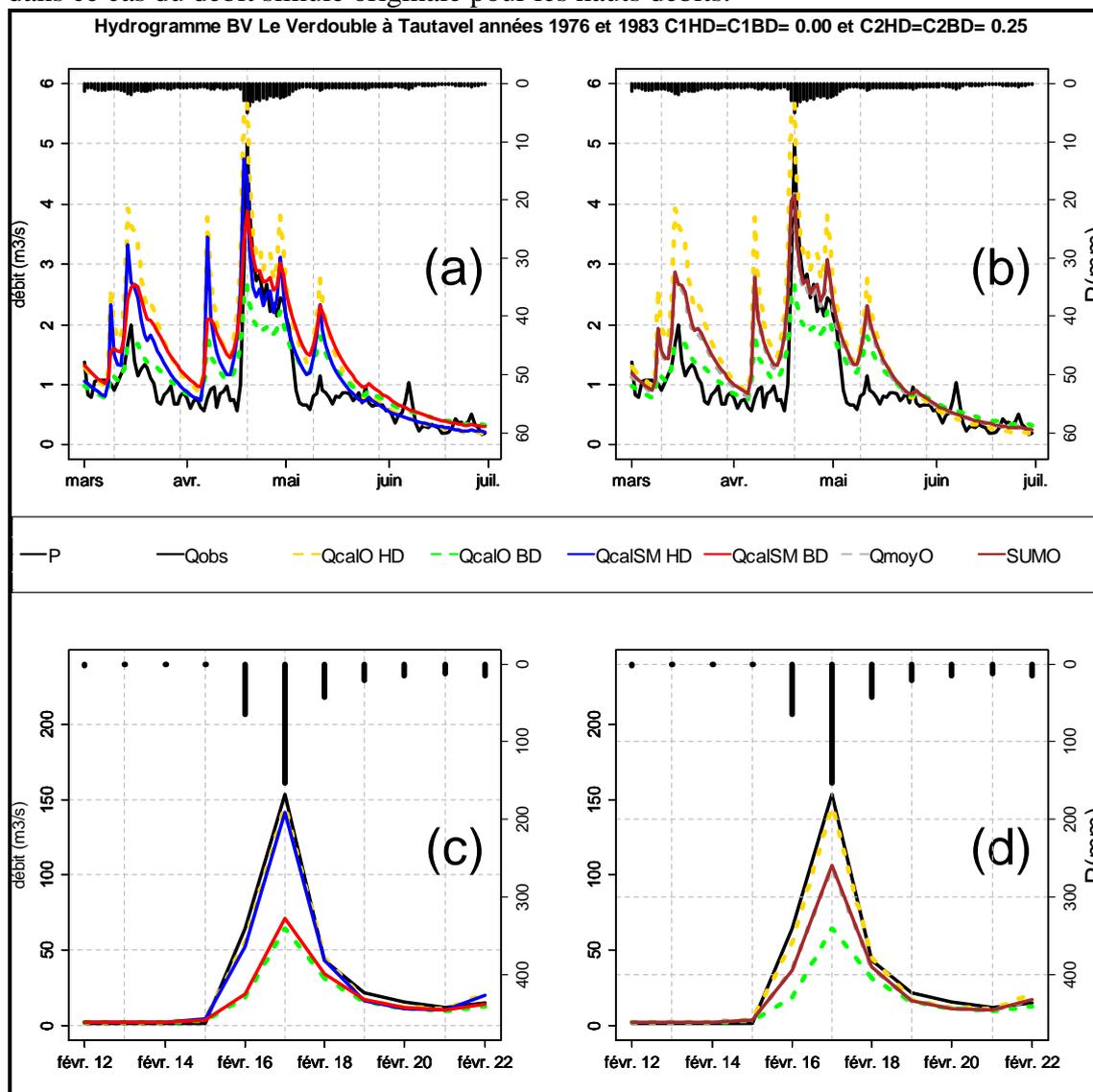


Figure 12: hydrogrammes d'évènements extrêmes: étiage de l'année 1976 (a,b) et crue observée dans l'année 1983(c,d) BV du Verdouable à Tautavel. Dans la légende : P : pluie, Qobs : débit observé, QcalOHD,BD : débit simulé original hauts(HD) et bas (BD) débits, QcalSMHD,BD : débit simulé modifié, SUMO : débit SUMO

Notons dans la Figure 12a que tous les débits simulés surestiment les valeurs du débit observé, alors il est très difficile de juger qui a la meilleure performance cette épisode de l'étiage. Dans la Figure 12b, aussi passe le même problème indique ultérieurement, même si il y a un moment où le débit SUMO arrive à suivre parfaitement le trait du débit observé. La Figure 12c nous montre que le débit simulé original et le débit simulé modifié pour les hauts débits sont arrivés presque à reproduire le pic de la crue étudiée. Finalement dans la Figure 12d, on observe que notre débit SUMO continue très éloigné du débit simulé original pour les hauts débits, qui a la meilleure performance.

Conclusion et Discussion

Dans cette partie, nous avons fait la comparaison entre les modèles GR4J originaux et les simulations avec les nouvelles valeurs modifiées par l'approche de SUMO. Nous avons vu qu'il y a effectivement une amélioration des critères Nash-Sutcliffe en particulier dans les critères différents de la fonction-objectif principale (par exemple, sur la version GR4J hauts débits, le principal critère est le critère sur les débits $C(Q)$ et le faible est le critère sur les logarithmes ($C(\ln(Q))$). Aussi on a pu observer la performance de notre débit SUMO, d'abord dans la comparaison des débits classés, où on a pu voir que notre débit SUMO est assez performant, mais par contre au moment de faire la comparaison pour des événements extrêmes, il n'a pas montré une performance assez efficace.

4.2.3 Résultats modèle GR4J originaux pour la période de contrôle (1992-2009).

Ici la seule chose changeant est les trois critères de Nash (équations 4, 5 et 6) des deux versions de GR4J (hauts et bas débits) :

Tableau 3: Valeurs de critères Nash-Sutcliffe GR4J originales pour le période de contrôle

Station	A1080330		Y0655010	
Bassin versant	L'Il à Didenheim		Le Verdoble à Tautavel	
Période du contrôle	1992-2009		1992-2009	
Modèle hydrologique	GR4J		GR4J	
Paramètres	hauts débits	bas débits	hauts débits	bas débits
fonction objectif	Critères Nash- Sutcliffe		Critères Nash- Sutcliffe	
$C(Q)$	0.725	0.672	0.402	0.219
$C(\sqrt{Q})$	0.782	0.766	0.585	0.502
$C(\ln(Q))$	0.703	0.749	0.499	0.634

Aussi il faut remarquer que le même processus utilisé dans 4.2.2 sera appliqué.

4.2.3.1 Analyse de sensibilité globale des méthodologies étudiées

Ici les méthodes utilisées pour comparer la performance entre les résultats des simulations des deux méthodologies sont les suivantes :

- Graphiques des critères de Nash-Sutcliffe

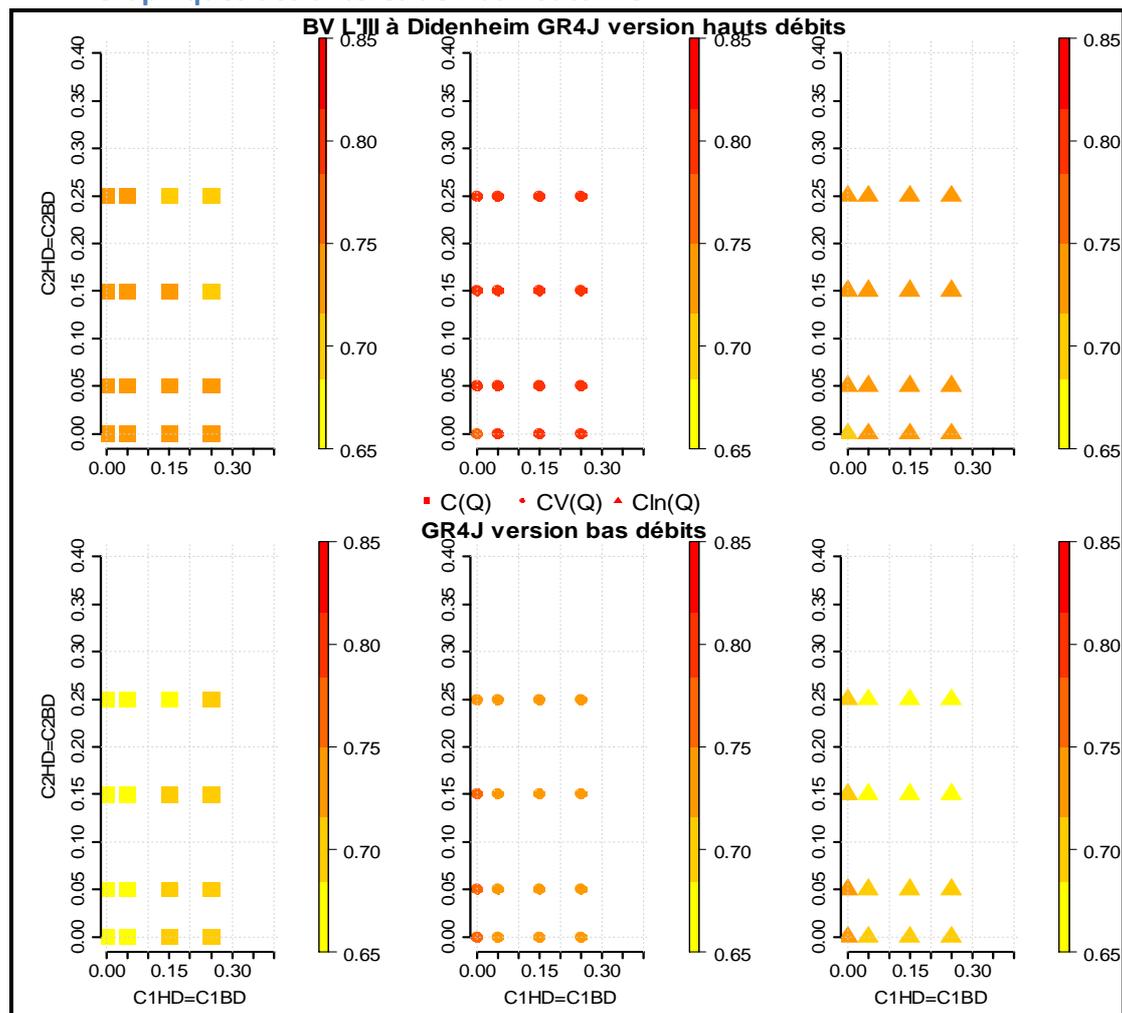


Figure 13: Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les deux versions originales (i.e. coordonnées (0,0)) de GR4J (hauts et bas débits) et les deux GR4J modifiés avec l'approche SUMO, Bassin versant de l'Il à Didenheim.

Dans la Figure 13 nous pouvons observer les critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir des débits simulés modifiés par l'approche SUMO sur le modèle GR4J pour les version de hauts débits (les trois graphes se trouvant dans la partie supérieure) et bas débits (les trois graphes se trouvant dans la partie inférieure) ; pour les trois critères Nash-Sutcliffe (petits carrés pour le critère sur les débits, petits arrondis pour le critère sur les racines carrées de débits et petits triangles pour le critère sur le logarithme des débits).

Il faut dire qu'en ce qui concerne le critère sur les racines carrées ($C(\sqrt{Q})$), il y a une différence entre les critères calculés à partir du débit simulé originale de GR4J hauts débits et celles calculées à partir des débits simulés modifiés..

Dans le critère sur les débits (petits carrés), pour la version GR4J hauts débits, aucune des valeurs calculées par l'approche de SUMO ne dépasse la valeur originale (i.e. coordonnée 0,0) ; certaines valeurs lui sont égales, mais aucune ne peut l'améliorer. Mais dans la version GR4J pour les bas débits, nous pouvons voir que beaucoup des valeurs calculées par l'approche SUMO dépassent la valeur originale.

Dans le critère sur les logarithmes des débits, c'est l'opposé de ce qui s'est passé dans le critère sur les débits ($C(Q)$) ; car ici, dans la version pour GR4J pour les hauts débits, nous voyons que les valeurs calculées avec l'approche SUMO dépassent la valeur originale étant dans les coordonnées (0,0), alors que, dans la version GR4J pour les bas débits, aucun chiffre ne dépasse cette valeur.

Et maintenant nous montrons la figure correspondant au bassin versant du Verdouble à Tautavel :

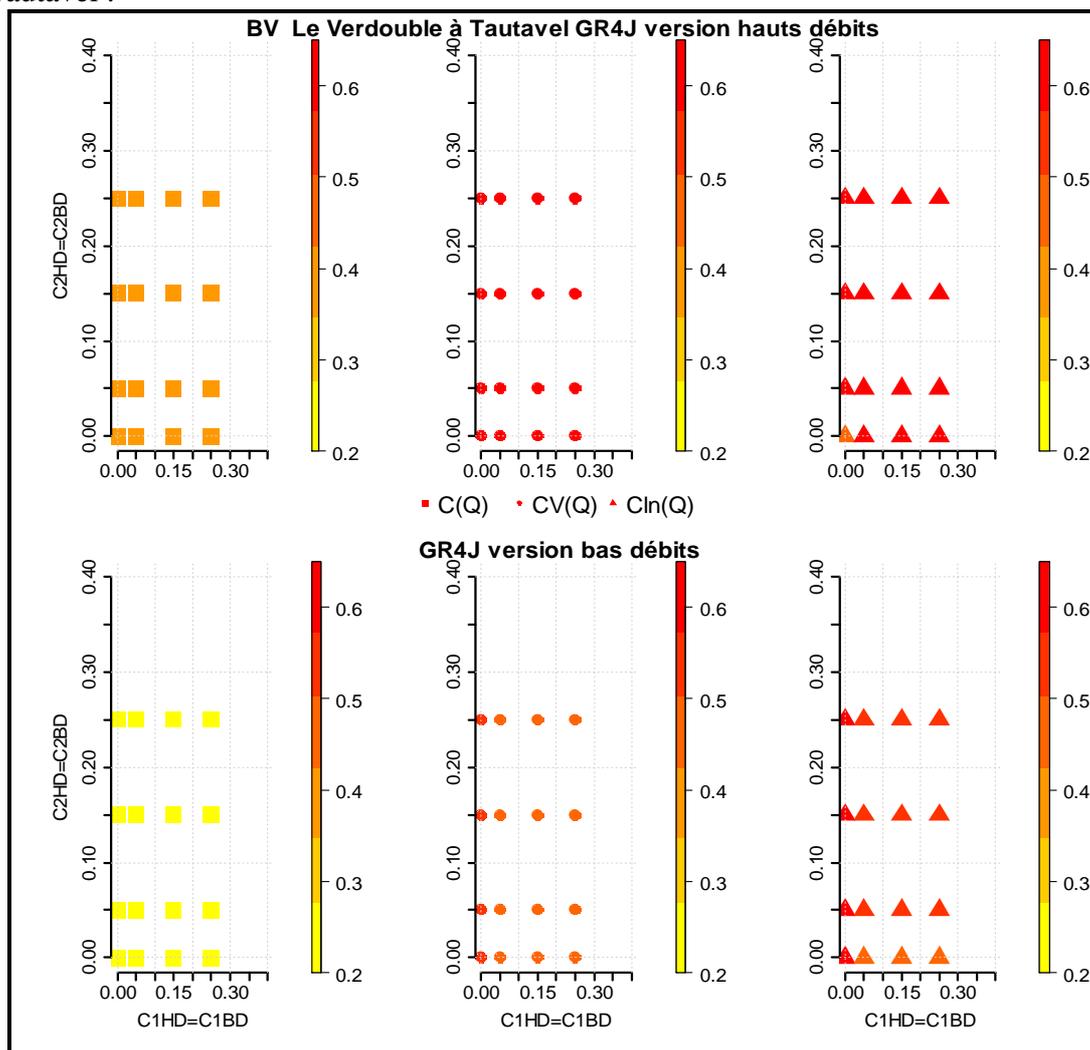


Figure 14: Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les deux versions originales (i.e. coordonnées (0,0)) de GR4J (hauts et bas débits) et les deux GR4J modifiés avec l'approche SUMO, Bassin versant du Verdouble à Tautavel

Dans la Figure 14 il faut dire qu'on voit presque la même situation passant dans le bassin versant de l'ILL à Didenheim, par rapport aux valeurs correspondants aux fonctions objectives principales pour chaque version (c'est-à-dire par exemple, pour le modèle GR4J version hauts débits, la fonction-objectif principale est le critère pour les débits ($C(Q)$)) il n'y a pas une grande différence entre les valeurs originales de GR4J et celles calculées avec l'approche SUMO, Au contraire, nous voyons que dans les critères différents au fonction-objectif principal pour chaque version de GR4J, il est possible de remarquer les différences entre les critères calculés à partir des débits simulés originales de GR4J et l'approche SUMO. Aussi il faut dire que dans le critère sur les racines carrées correspondant aux versions de GR4J hauts débits il y a une différence considérable favorable aux les valeurs de SUMO par rapport à la valeur original ayant au (0,0) ;

Dans le critère sur les débits (petits carrés), pour la version GR4J bas débits, presque tous les valeurs trouvés par l'approche SUMO dépasse la valeur originale (i.e. coordonnée 0,0).

Dans le critère sur les logarithmes des débits, pour la version GR4J hauts débits, nous voyons que les valeurs calculées avec l'approche SUMO dépassent la valeur originale

étant dans les coordonnées (0,0), alors que, dans la version GR4J pour les bas débits; aucune chiffre dépasse cette valeur.

En conclusion, nous pouvons dire que l'approche super-modèle pour les deux bassins versants a bien fonctionné, car grâce à la communication entre les variables internes, les déficiences des critères vues dans les versions originaux de GR4J, ont été réduites.

Pour connaître les valeurs des critères de Nash-Sutcliffe des figures 13 et 14 voyez les annexes 6.5 et 6.6 du présent rapport de stage.

- **RMSE :**

En utilisant l'équation 9, les résultats sont présentés sous forme de tableau ci-dessous :

Tableau 4: Valeurs RMSE calculés pour le deux bassins versants

bassin versant		L'III à Didenheim		Le Verdoube à Tautavel	
Hypothèse		Hauts débits	Bas débits	Hauts débits	Bas débits
$C_{1HD}=C_{1BD}$	$C_{2HD}=C_{2BD}$	RMSE	RMSE	RMSE	RMSE
0	0	3.951	4.382	6.364	7.803
0	0.05	3.934	4.348	6.367	7.752
0	0.15	3.925	4.316	6.385	7.677
0	0.25	3.928	4.300	6.403	7.619
0.05	0	3.946	4.299	6.380	7.767
0.05	0.05	3.956	4.296	6.405	7.714
0.05	0.15	3.974	4.298	6.431	7.655
0.05	0.25	3.989	4.302	6.452	7.608
0.15	0	3.983	4.274	6.408	7.699
0.15	0.05	3.994	4.276	6.430	7.651
0.15	0.15	4.010	4.284	6.453	7.598
0.15	0.25	4.024	4.291	6.473	7.555
0.25	0	3.996	4.263	6.417	7.672
0.25	0.05	4.007	4.266	6.438	7.626
0.25	0.15	4.023	4.277	6.461	7.575
0.25	0.25	4.036	4.285	6.480	7.533

Notons dans le Tableau 2 que dans les deux bassins versants, les débits simulés modifiés par l'approche SUMO obtiennent un RMSE supérieur dans la majorité de cas au RMSE calculé pour le modèle GR4J version originale hauts débits ($C_{1HD}=C_{1BD}=C_{2HD}=C_{2BD}=0$). Dans les deux méthodes (GR4J original et GR4J modifié par SUMO), se trouvent ces valeurs se trouvent entre 3 et 6, ce que nous indique que les débits simulés avec les deux méthodologies ont une réponse un peu mauvaise par rapport aux débits observés.

Dans le cas de la version de bas débits, passe le contraire, les valeurs du RMSE du super-modèle sont inférieure à ce qui nous donne la valeur originale, mais aussi il est plus grand que zéro.

- Courbes des débits classés

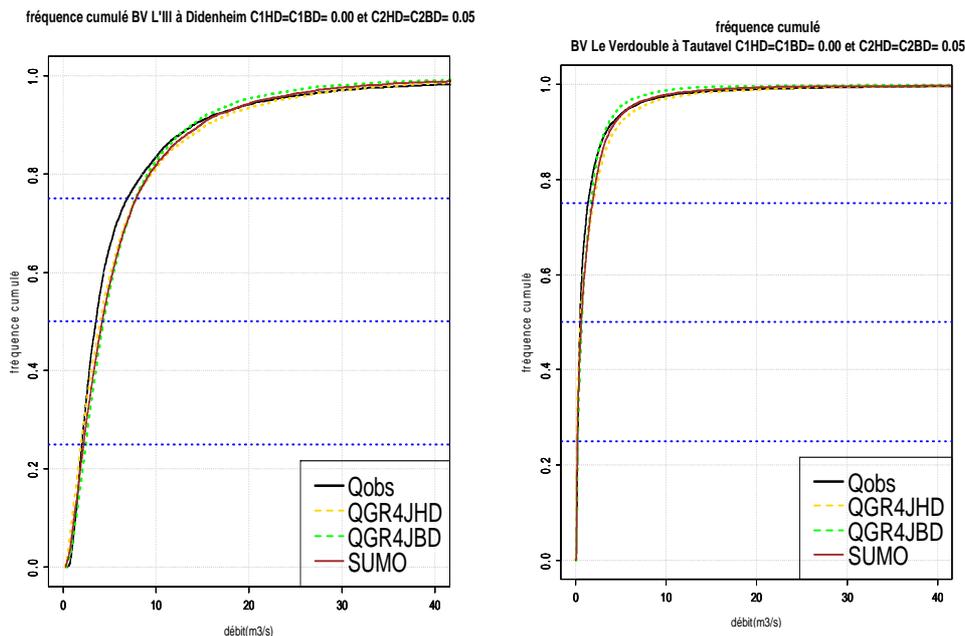


Figure 15: courbe débits classés pour les Bassins versants de l'étude Dans la légende : Qobs : débit observé, QGR4JHD,BD :débits classés simulé original ,SUMO : débit SUMO.

Ici nous pouvons voir que, d'abord sur le bassin versant de l'III à Didenheim, notre débit SUMO se trouve éloigné de la courbe des débits observés, mais aussi les deux débits simulés originaux pour les hauts débits et bas débits. Aussi il faut remarquer que notre débit SUMO dans le cas du bassin versant de l'III à Didenheim est plus performant que le débit simulé original pour les hauts débits. Dans le cas du bassin versant du Verdouble à Tautavel, on voit que la courbe de débit classé SUMO arrive à suivre la courbe pour le débit observé est aussi es plus performante que les deux courbes des débits classés simulés originaux pour les hauts et bas débits.

4.2.3.2 Simulation des événements extrêmes

Pour la période de validation, on affichera l'étiage de l'année 2003 pour les deux bassins versants ; et pour les crues, dans le cas de l'III, la date choisie est le 09 août 2007; et le 28 avril 1993 dans le cas du bassin versant du Verdouble. Comment on ne peut pas montrer tous les hydrogrammes faits pour chaque coefficient C , à cause des raisons de limite de pages, seulement on montrera qu'un hydrogramme, que pour le bassin versant de l'III à Didenheim est $C_{1HD}=C_{1BD}=0.15$ et $C_{2HD}=C_{2BD}=0.00$ et pour le bassin versant du Verdouble à Tautavel est $C_{1HD}=C_{1BD}=0.15$ et $C_{2HD}=C_{2BD}=0.15$

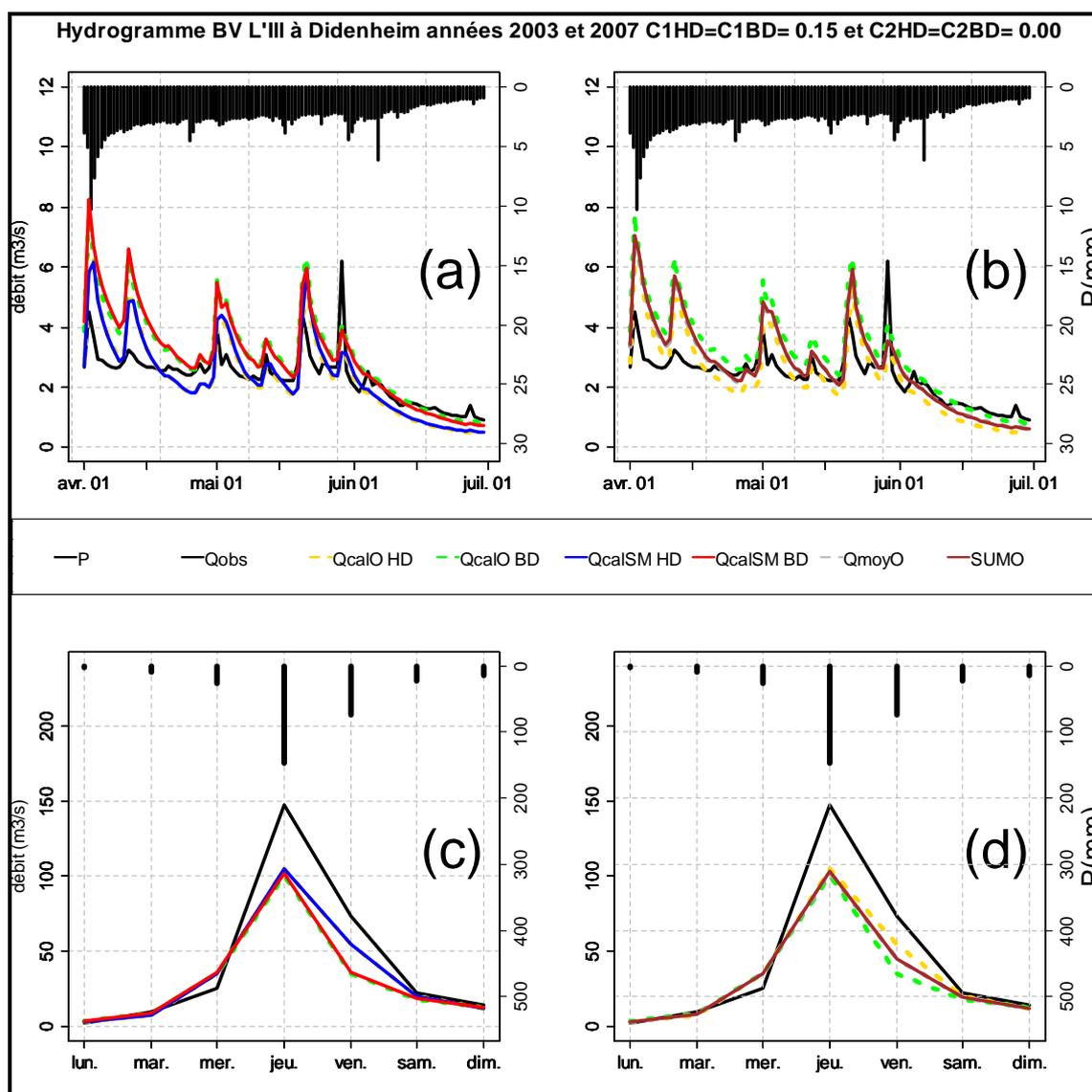


Figure 16: hydrogrammes d'évènements extrêmes: étiage de l'année 2003 (a,b) et crue observé dans l'année 2007 (c,d) BV de l'III à Didenheim. Dans la légende : P : pluie, Qobs : débit observé, QcalOHD,BD : débit simulé original hauts(HD) et bas (BD) débits, QcalSMHD,BD : débit simulé modifié, SUMO : débit SUMO

Notons dans la Figure 16a que pour la période de l'étiage, qu'il n'y a pas aucune différence entre les performances des deux types de débits (simulés originaux et simulés modifiés pour les hauts et bas débits). Encore aucune de quatre débits simulés arrivent à reproduire correctement le débit observé. Dans la Figure 16b, le débit SUMO a une meilleure performance que le débit simulé original pour les hauts débits, mais il est légèrement en dessous du débit simulé original pour les bas débits. Dans le cas de la crue dans la Figure 16c, aucune des débits simulés arrivent à reproduire le débit observé pour la crue. La même chose passe dans la Figure 16d..

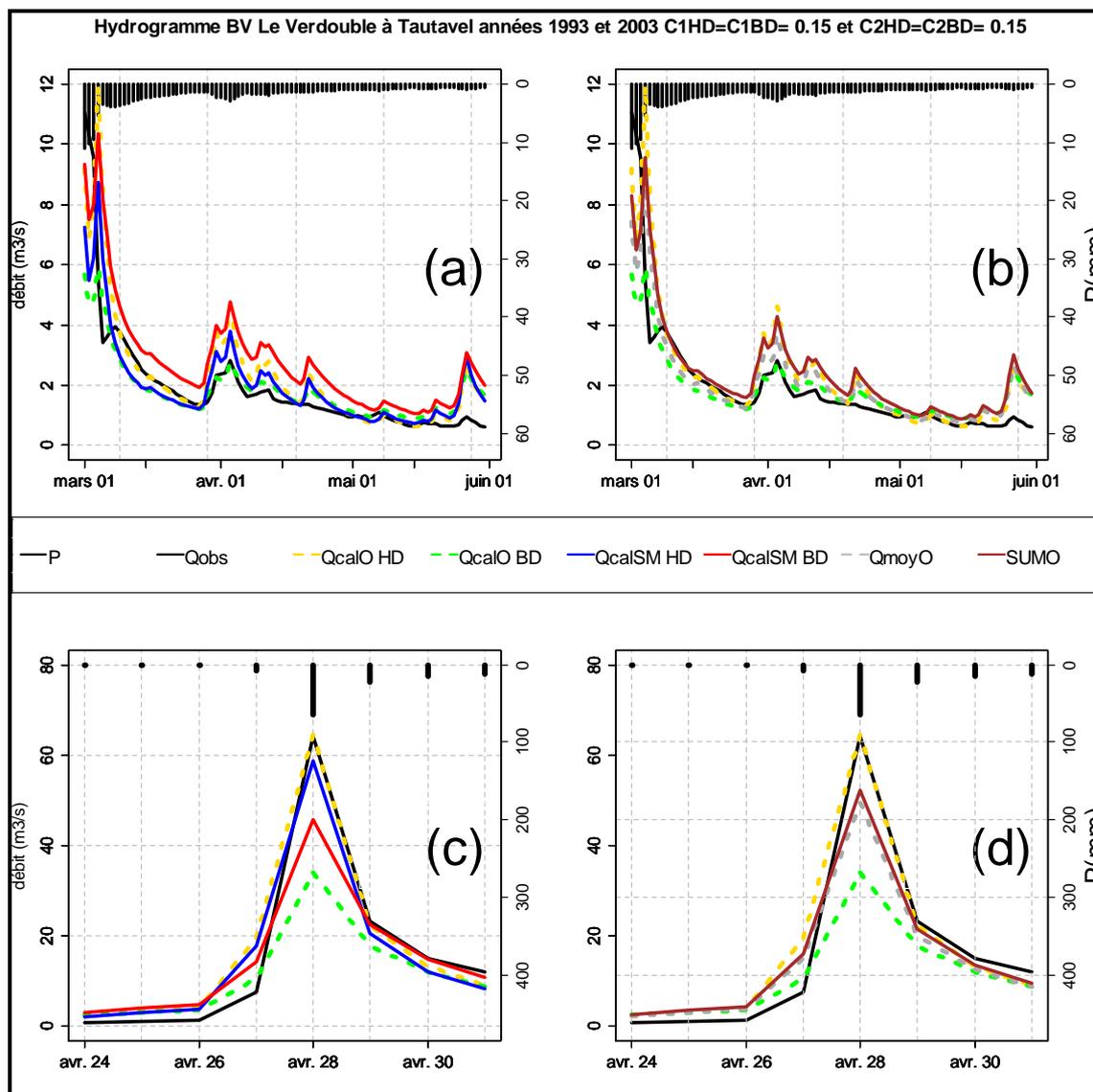


Figure 17: hydrogrammes d'événements extrêmes: étiage de l'année 2003 et crue observé dans l'année 1993 BV du Verdouble à Tautavel

Notons dans la Figure 17a que le débit simulé modifié pour les bas débits tends a surestimer fortement. Dans la Figure 17b, on peut observer que c'est la première fois qu'on voit que le débit SUMO est au-dessus du débit simulé original pour le bas débits, même si les deux se trouvent un peu éloignés de la courbe des débits observés. Dans la Figure 17c dans le cas de la crue, on voit de bonnes performances des deux débits simulés pour les hauts débits (i.e. débits simulés original et débit simulé modifié pour les hauts débits), ils reproduire, surtout celui calculé avec le GR4J version hauts débits, le pic de la crue. Finalement dans la Figure 17c. on voit une amélioration du débit SUMO, mais ils continuent très bas par rapport au débit simulé original pour le hauts débits

4.2.3.3 Conclusion et Discussion

Dans ce chapitre, nous avons traité la performance globale de l'approche SUMO et ses variantes (débits simulés modifiés et débit SUMO) dans la période de validation pour nos deux bassins versants. En regardant la Figure 13 y 14 et comment on avait vu dans le période de calage, on remarque une amélioration des critères différentes à la fonction-objectif principal. Aussi on a pu tester la performance du débit SUMO par rapport aux

débits simulés avec les deux versions de GR4J, mais pour le moment ces derniers continuent à avoir des meilleures performances.

4.3 Comparaison de la performance SUMO aux approches multi-modèles habituelles : l'étude faite par Oudin et al. (2006)

4.3.1 Introduction

Oudin et al. (2006) publient un article présentant une méthode pour combiner des modèles hydrologiques pour produire une simulation des débits plus satisfaisante. Cette approche se fait à posteriori, et seulement en période de validation. Cette étude est idéale pour vérifier les performances de SUMO car ils ont utilisé le modèle GR4J en versions hauts et bas débits. Pour réaliser le processus de leur recherche ils se basent sur l'équation suivante :

$$\overline{Q_{sim}} = \alpha * \overline{Q_{simCQ}} + (1-\alpha) * \overline{Q_{simClnQ}} \quad (10)$$

Le calcul du facteur α , se fait sur la base de 4 propositions, mais dans mon stage j'ai utilisé que 2 :

$$\begin{cases} \alpha = s \\ \alpha = \frac{s^3}{s^3 + (1-s)^3} \end{cases} \quad (11)$$

Afin de faire comparer notre approche SUMO à cette étude, d'abord on fera la moyenne de valeurs modifiées pour l'approche SUMO pour les versions de hauts et bas débits. Par contre, l'approche d'Oudin et al. sera appliquée aux débits calculés avec les versions originales de GR4J pour les hauts et bas débits. Finalement, on fera la comparaison de nos moyennes SUMO, seulement en période de validation, surtout en se basant sur les trois critères de Nash-Sutcliffe, contre les 3 propositions montrées dans l'équation 11.

4.3.2 Comparaison des performances entre l'approche SUMO et l'approche multi-modèle Oudin et al. (2006)

Pour réaliser cette comparaison, on utilisera les graphiques montrés dans la Figure 8 sur nos deux bassins :

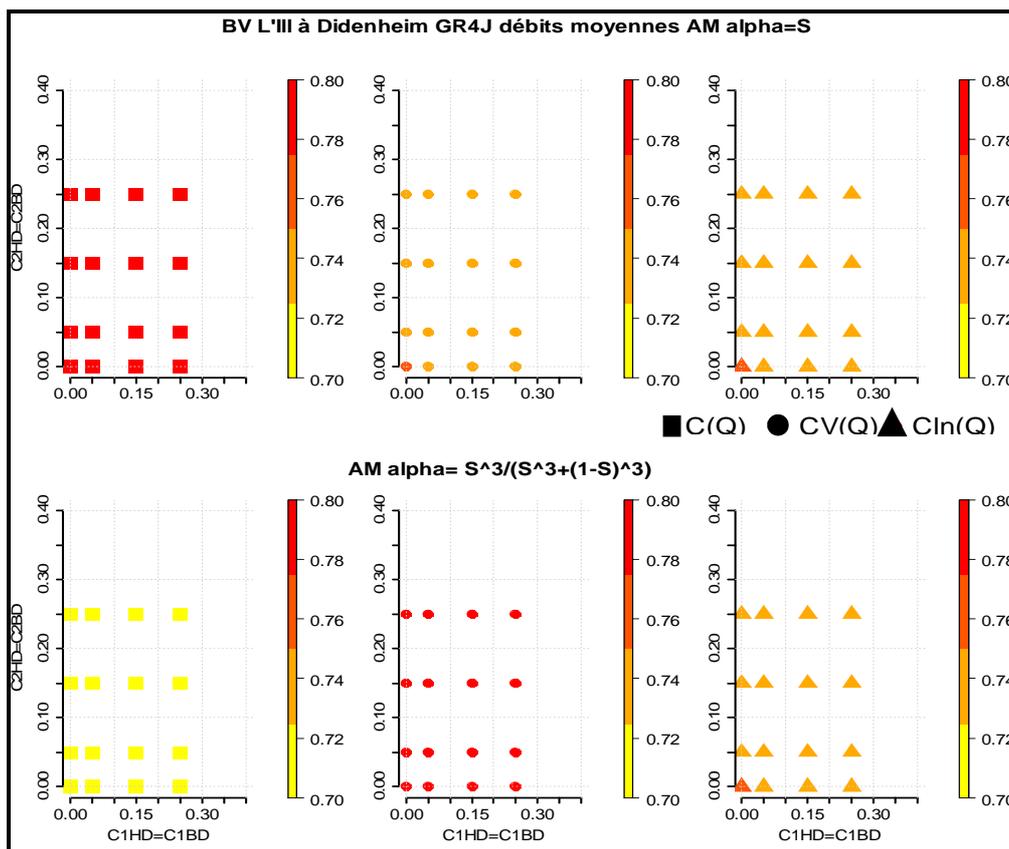


Figure 18: Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour l'approche d'Oudin et al.(2006)(i.e. coordonnées (0,0)) sur GR4J original (hauts et bas débits) et les moyennes de l'approche SUMO, Bassin versant de l'III à Didenheim

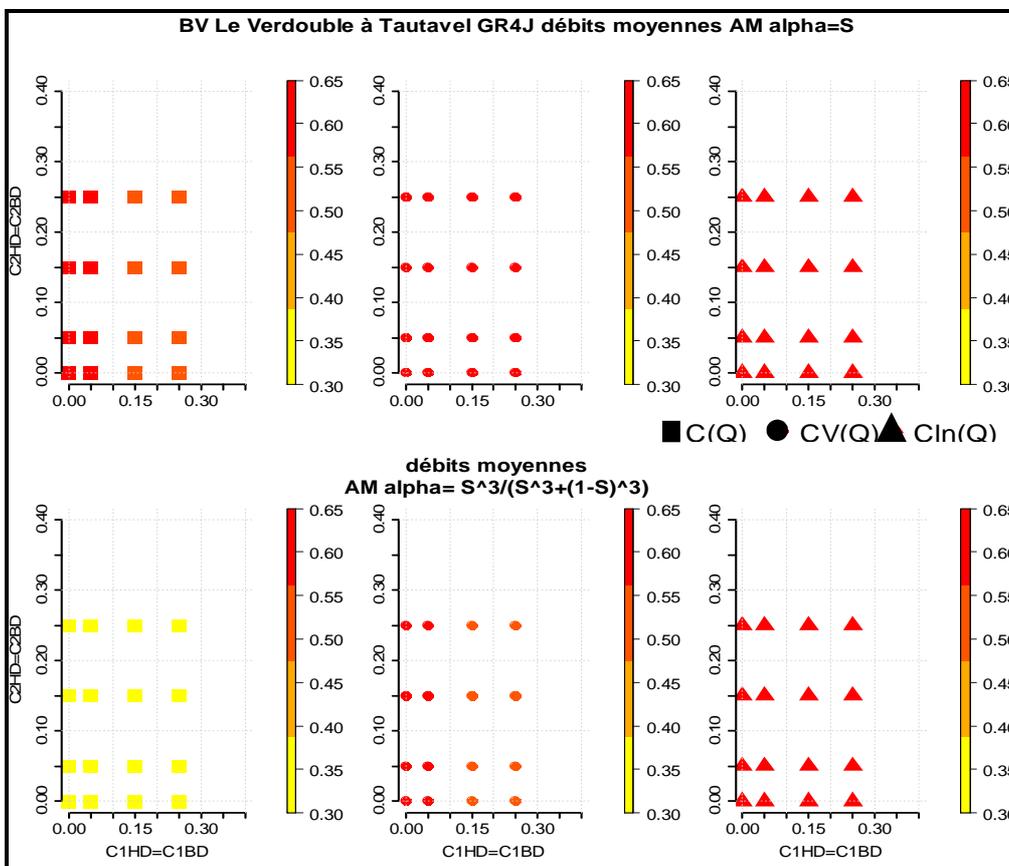


Figure 19: Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour l'approche d'Oudin et al.(2006)(i.e. coordonnées (0,0)) sur GR4J original (hauts et bas débits) et les moyennes de l'approche SUMO, Bassin versant du Verdoble à Tautavel

Dans la Figure 18 et 19, nous pouvons observer les critères de Nash-Sutcliffe calculés avec l'approche SUMO. Ensuite Ils sont comparés avec les 3 critères proposés par **Oudin et al. (2006)**. Ces trois critères sont représentés dans le graphique par la coordonnée (0,0). La première ligne dans chaque figure (18 et 19) représente les valeurs de critères de Nash-Sutcliffe pour les débits $C(Q)$ (petits carrés), racine des débits $C(\sqrt{Q})$ (petits arrondis) et logarithmes de débits $C(\ln(Q))$ (petits triangles) des super-modèles (coordonnées différents de (0,0)) et l'approche multi-modèle (AM) $\alpha=s$, et les deuxièmes lignes de chaque figure représente la comparaison avec la dernière valeur de l'équation 11.

La seule chose à dire c'est que malheureusement, l'approche SUMO n'arrive pas à dépasser les critères de Nash-Sutcliffe obtenus avec les deux propositions de α . Ça nous montre aussi que l'approche proposée dans cette étude est assez robuste, mais en même temps, cela nous donne plus de force pour continuer notre recherche sur l'approche SUMO. Pour voir les valeurs des critères en cette section regarder l'annexe 6.8 et 6.9. Un des raisons pour lequel on ne dépasse pas cette approche est à cause de la hy

5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le but principal de mon stage a été l'application de l'approche SUMO au domaine de l'hydrologie. Pour réussir à faire ça, ma recherche s'est basée sur quatre étapes:

La première a été l'analyse bibliographique sur les SUMO en climat et sur les approches alternatives en hydrologie. Grâce à la recherche bibliographie, j'ai étudié et appliqué l'équation de super-modèle, développée dans le domaine de la climatologie. Au début, il y avait quelques doutes quant à l'applicabilité de cette équation à l'hydrologie, puisque les modèles climatiques sont beaucoup plus complexes que les modèles hydrologiques. En effet, une équation de ce type au lieu de mieux, surtout les choses simples, pourrait compliquer encore plus, mais comme nous l'avons vu dans le présent rapport, cette équation est très maniable et également applicable au domaine de l'hydrologie. Pour cette étape, j'ai choisi les variables internes avec lesquelles j'ai voulu travailler pendant mon stage. À mon avis, le choix des ratios S/x_1 et R/x_3 en tant que variables internes à échanger des informations en temps réel a été le meilleur pour ces tests préliminaires, puisque ces deux variables sont très importantes dans le modèle hydrologique choisi (GR4J). En revanche, elles montrent quelques limitations: comment est-il possible que, pour la même période (calibration, validation), en utilisant les mêmes données climatiques, et en changeant uniquement la fonction-objectif, ces variables peuvent-elles différer parfois grandement? Je souhaite que, avec le développement de l'approche SUMO, ce problème puisse être résolu.

La deuxième étape a été le calage de GR4J sur les hauts débits et sur les bas débits. Une fois calés, j'ai fait le couplage de ces deux modèles dans le cadre de SUMO. Pour réaliser cela, j'ai utilisé le coupleur OpenPALM développé par le CERFACS. Il faut dire que l'implémentation du coupleur OpenPALM basé sur Linux et le code Fortran, a été quelque chose de nouveau pour moi, mais il a été une expérience très agréable car cela m'a aidé à mieux comprendre comment se fait un échange d'informations en temps réel, et de son importance pour le développement de l'approche SUMO.

La troisième étape a été la comparaison de la performance de SUMO aux deux modèles GR4J originaux. Comme j'ai déjà montré dans mon rapport de stage, on a vu que pour le moment, ce sont les débits simulés modifiés par l'approche SUMO, et non le vrai concept de SUMO (la moyenne des débits modifiés) qui montrent une meilleure performance par rapport aux modèles hydrologiques utilisés dans cette étude. Par conséquent la question à se poser est la suivante : si nous voyons des améliorations dans des critères ayant des objectifs différents de la fonction-objectif principale pour les

modèles indépendants modifiés par l'approche SUMO, pourquoi la même chose ne se produit-elle pas lorsqu'on fait la moyenne? Ce qu'on pense est que cela est dû au fait que nous ne savons pas exactement quelles sont les valeurs optimales pour les coefficients **C**. Un des concepts clés à développer dans l'avenir pour voir la véritable performance de l'approche SUMO sera d'effectuer l'optimisation du paramètre **C**.

Enfinement, la dernière étape a été la comparaison éventuelle de SUMO à l'approche d'Oudin et al. (2006). Les résultats montrent que, pour le moment, on n'arrive pas à améliorer les résultats de critères trouvés par cette approche. Mon avis est que cela aussi est dû à une mauvaise connaissance de la vraie valeur du coefficient **C**.

Enfin, il est important de noter qu'il reste une voie à explorer : tester la configuration suivante pour le paramètre **C**: $C_{1HD} \neq C_{1BD} \neq C_{2HD} \neq C_{2BD}$. Cela fera l'objet de mon travail dans les prochaines semaines.

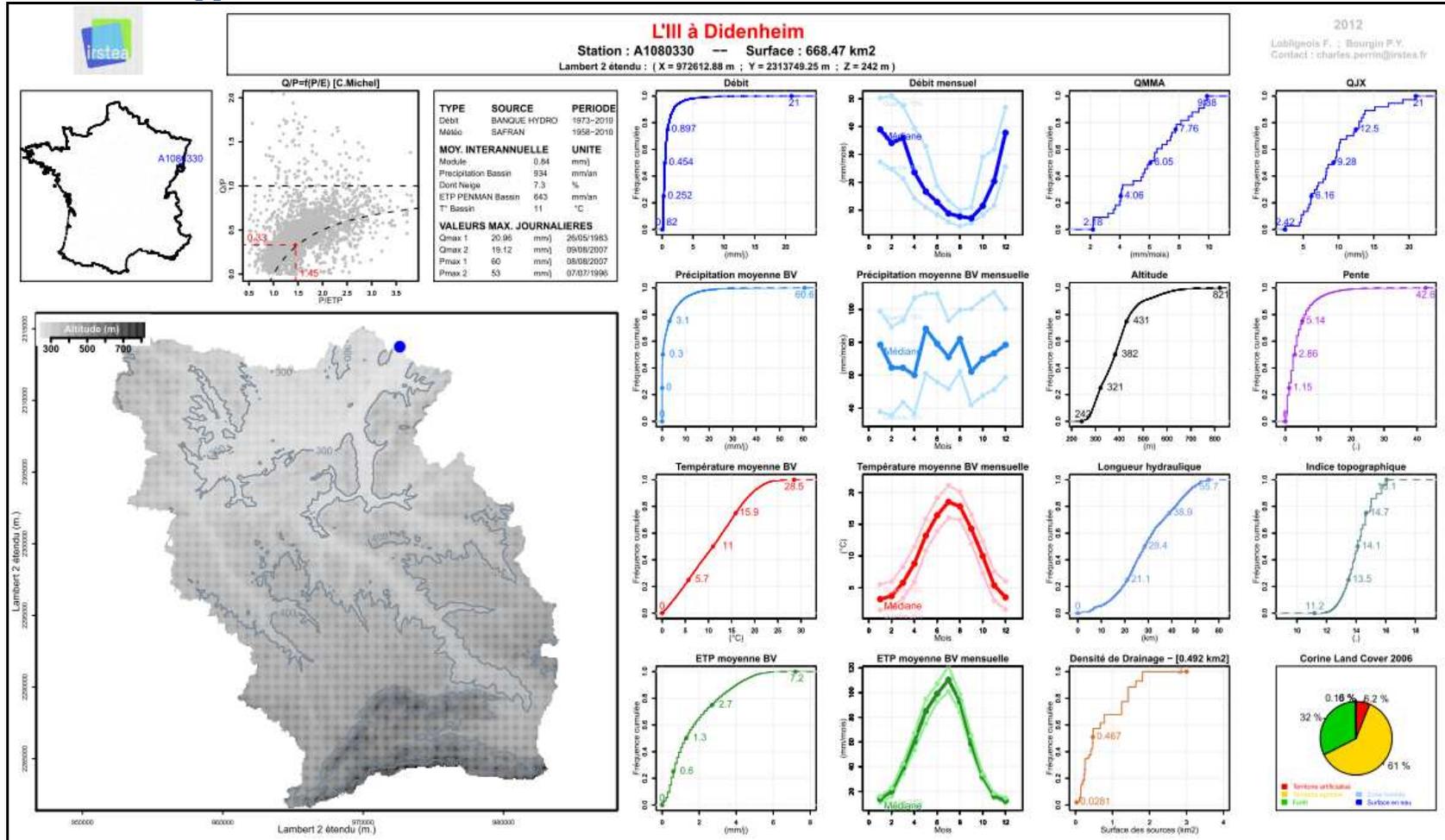
6 Références bibliographiques

- Coron L., Andréassian V., Perrin C., Lerat J., Vaze J., Bourqui M., Hendrickx F. (2012) Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments. *Water Resources Research* 48:1-17. DOI: 10.1029/2011wr011721.
- Durand Y., Brun E., Mérindol L., Guyomarc'h G., Lesaffre B., Martin E. (1993) A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Annals of glaciology* 18:65-71.
- Durand Y., Giraud G., Brun E., Mérindol L., Martin E. (1999) A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting. *Journal of Glaciology* 45:469-484.
- Houtekamer P. (1991) Variation of the predictability in a low-order spectral model of the atmospheric circulation. *Tellus A* 43:177-190.
- Johns T.C., Carnell R.E., Crossley J.F., Gregory J.M., Mitchell J.F., Senior C.A., Tett S.F., Wood R.A. (1997) The second Hadley Centre coupled ocean-atmosphere GCM: model description, spinup and validation. *Climate dynamics* 13:103-134.
- Klemeš V. (1986) Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal* 31:13-24. DOI: 10.1080/02626668609491024.
- Lagarde T., Piacentini A., Thual O. (2001) A new representation of data-assimilation methods: The PALM flow-charting approach. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 127:189-207. DOI: 10.1002/qj.49712757111.
- Lorenz E. (1963) Deterministic non periodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences* 20:130-141.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10:282-290.
- Ouarda T.B., Ashkar F. (1998) Effect of trimming on LP III flood quantile estimates. *Journal of Hydrologic Engineering* 3:33-42.
- Oudin L., Andréassian V., Mathevet T., Perrin C., Michel C. (2006) Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations. *Water Resources Research* 42:n/a-n/a. DOI: 10.1029/2005wr004636.
- Oudin L., Hervieu F., Michel C., Perrin C., Andréassian V., Anctil F., Loumagne C. (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* 303:290-306.
- Perrin C. (2000) Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative, Thèse de doctorat, *soutenue le 20 octobre 2000*, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Perrin C., Michel C., Andréassian V. (2001) Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology* 242:275-301.
- Perrin C., Michel C., Andréassian V. (2003) Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 279:275-289. DOI: 10.1016/s0022-1694(03)00225-7.
- Quintana-Segui P., Le Moigne P., Durand Y., Martin E., Habets F., Baillon M., Canellas C., Franchisteguy L., Morel S. (2008) Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47:92-106. DOI: 10.1175/2007JAMC1636.1.

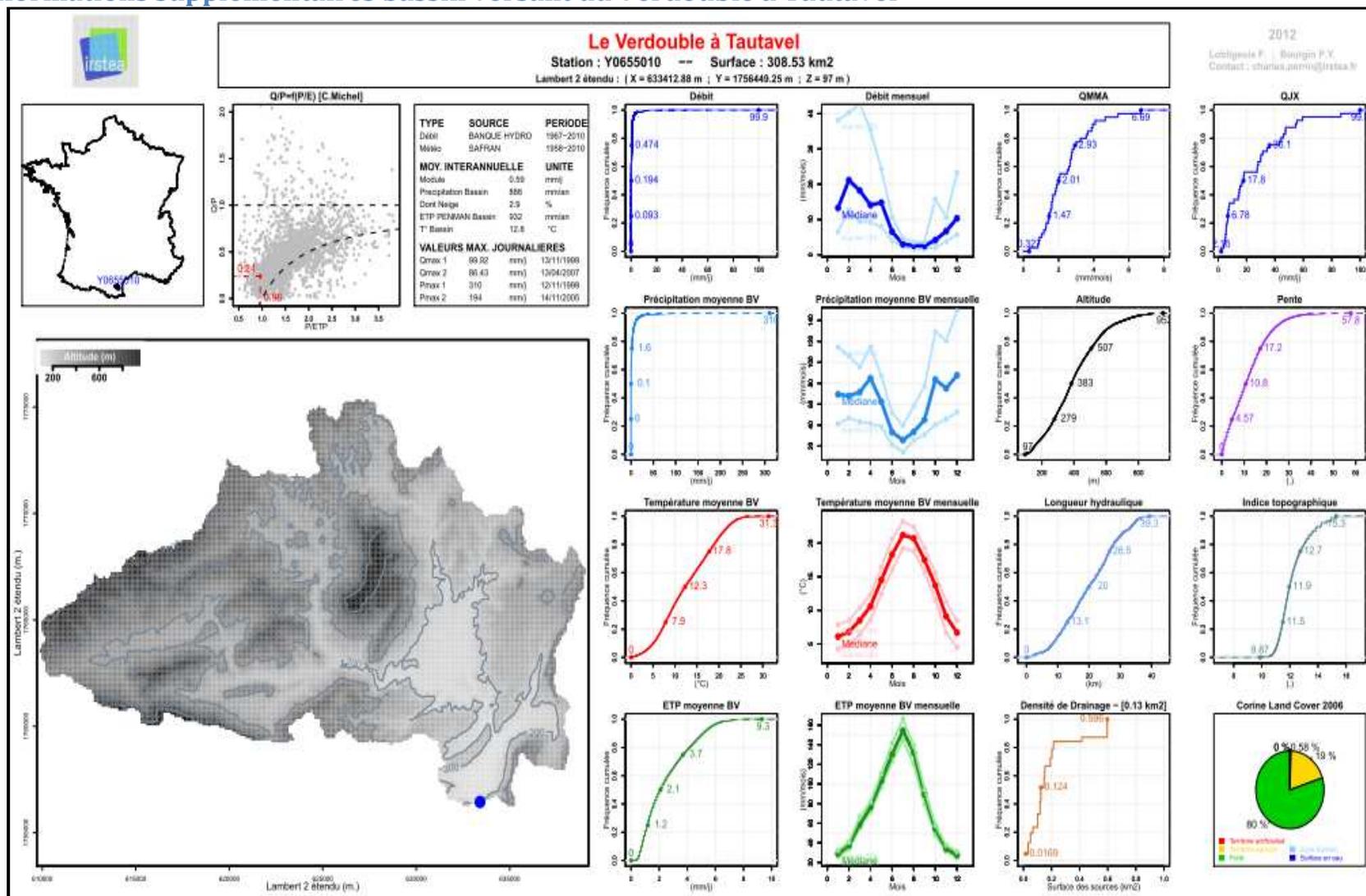
- Sittner W.T. (1976) Wmo Project on Intercomparison of Conceptual Models Used in Hydrological Forecasting. *Hydrological Sciences Bulletin* 21:203-213. DOI: 10.1080/02626667609491617.
- Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K., Tignor M., Miller H.L. (2007) IPCC, *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Thirel G. (2009) Amélioration des prévisions d'ensemble des débits sur la France de SAFRAN-ISBA-MODCOU, Thèse de doctorat, *soutenue le 23 Novembre 2009*.
- Thirel G., Martin E., Mahfouf J.F., Massart S., Ricci S., Habets F. (2010) A past discharges assimilation system for ensemble streamflow forecasts over France – Part 1: Description and validation of the assimilation system. *Hydrology and Earth System Sciences* 14:1623-1637. DOI: 10.5194/hess-14-1623-2010.
- van den Berge L.A., Selten F.M., Wiegnerink W., Duane G.S. (2011) A multi-model ensemble method that combines imperfect models through learning. *Earth System Dynamics* 2:161-177. DOI: 10.5194/esd-2-161-2011.
- Vaze J., Post D.A., Chiew F.H.S., Perraud J.M., Viney N.R., Teng J. (2010) Climate non-stationarity – Validity of calibrated rainfall–runoff models for use in climate change studies. *Journal of Hydrology* 394:447-457. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.09.018.
- Vidal J.P., Martin E., Franchistéguy L., Baillon M., Soubeyroux J.M. (2010) A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology* 30:1627-1644.
- Wiegnerink W., Mirchev M., Burgers W., Selten M. (2013) F. Supermodeling dynamics and learning mechanisms. *Consensus and Synchronization in Complex Networks*:1-29.

7 ANNEXES

7.1 Informations supplémentaires bassin versant de l'Ill à Didenheim



7.2 Informations supplémentaires bassin versant du Verdouble à Tautavel



7.3 Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe sur la période de calage pour le bassin versant de l'III à Didenheim

Hypothèse		GR4J Original	critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir des débits simulés modifiés pour SUMO															
C _{1HD} =C _{1BD}		0	0	0	0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15	0.15	0.25	0.25	0.25	0.25	
C _{2HD} =C _{2BD}		0	0.05	0.15	0.25	0	0.05	0.15	0.25	0	0.05	0.15	0.25	0	0.05	0.15	0.25	
GR4J version hauts débits	N(Q)	0.673	0.672	0.669	0.666	0.665	0.662	0.658	0.655	0.660	0.658	0.654	0.651	0.659	0.656	0.653	0.650	
	N(√(Q))	0.727	0.729	0.729	0.727	0.729	0.726	0.723	0.721	0.725	0.722	0.720	0.718	0.725	0.722	0.719	0.717	
	N(ln(Q))	0.652	0.662	0.666	0.667	0.677	0.670	0.669	0.668	0.677	0.669	0.667	0.667	0.677	0.669	0.667	0.667	
GR4J version bas débits	N(Q)	0.616	0.625	0.635	0.640	0.637	0.640	0.642	0.643	0.640	0.642	0.643	0.644	0.641	0.643	0.644	0.644	
	N(√(Q))	0.714	0.716	0.716	0.715	0.706	0.707	0.705	0.704	0.707	0.707	0.705	0.704	0.708	0.708	0.706	0.704	
	N(ln(Q))	0.728	0.720	0.711	0.706	0.691	0.693	0.689	0.687	0.691	0.692	0.688	0.686	0.691	0.692	0.688	0.685	
Moyenne des débits			critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir du débit SUMO (moyenne des débits)															
	N(Q)		0.661	0.662	0.663	0.659	0.660	0.660	0.661	0.660	0.660	0.660	0.660	0.661	0.660	0.660	0.660	0.661
	N(√(Q))		0.736	0.736	0.736	0.732	0.732	0.732	0.732	0.732	0.732	0.732	0.732	0.732	0.732	0.732	0.732	0.732
	N(ln(Q))		0.714	0.713	0.712	0.707	0.708	0.708	0.707	0.706	0.707	0.707	0.707	0.707	0.706	0.707	0.707	0.707

7.4 Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe sur la période de calage pour le bassin versant du Verdoube à Tautavel

Hypothèse		GR4J Original	critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir des débits simulés modifiés par SUMO															
$C_{1HD}=C_{1BD}$		0	0	0	0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15	0.15	0.25	0.25	0.25	0.25	
$C_{2HD}=C_{2BD}$		0	0.05	0.15	0.25	0	0.05	0.15	0.25	0	0.05	0.15	0.25	0	0.05	0.15	0.25	
GR4J version hauts débits	$C(Q)$	0.536	0.540	0.538	0.534	0.516	0.514	0.509	0.505	0.508	0.506	0.502	0.498	0.502	0.500	0.497	0.493	
	$C(\sqrt{Q})$	0.539	0.574	0.588	0.592	0.598	0.599	0.597	0.596	0.595	0.593	0.591	0.590	0.592	0.591	0.589	0.588	
	$C(\ln(Q))$	0.346	0.446	0.473	0.482	0.468	0.477	0.477	0.477	0.474	0.473	0.471	0.470	0.475	0.472	0.469	0.469	
GR4J version bas débits	$C(Q)$	0.284	0.302	0.322	0.336	0.389	0.395	0.403	0.410	0.402	0.407	0.414	0.420	0.410	0.415	0.422	0.427	
	$C(\sqrt{Q})$	0.519	0.530	0.536	0.539	0.496	0.511	0.520	0.524	0.496	0.510	0.519	0.524	0.498	0.512	0.521	0.525	
	$C(\ln(Q))$	0.583	0.558	0.539	0.531	0.425	0.451	0.461	0.464	0.417	0.444	0.454	0.458	0.417	0.443	0.453	0.457	
Moyenne des débits			critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir du débit SUMO (moyenne des débits)															
	$C(Q)$		0.464	0.465	0.465	0.465	0.466	0.466	0.466	0.466	0.466	0.466	0.467	0.467	0.467	0.467	0.467	0.468
	$C(\sqrt{Q})$		0.590	0.589	0.589	0.575	0.576	0.576	0.576	0.572	0.572	0.573	0.573	0.571	0.572	0.572	0.572	
$C(\ln(Q))$		0.528	0.525	0.525	0.487	0.488	0.489	0.489	0.480	0.481	0.482	0.483	0.478	0.480	0.481	0.481		

7.5 Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe pour la période de contrôle pour le bassin versant de l'Ill à Didenheim

Hypothèse		GR4J Original	critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir des débits simulés modifiés par SUMO															
$C_{1HD}=C_{1BD}$		0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15	0.15	0.25	0.25	0.25	0.25	
$C_{2HD}=C_{2BD}$		0.00	0.05	0.15	0.25	0.00	0.05	0.15	0.25	0.00	0.05	0.15	0.25	0.00	0.05	0.15	0.25	
GR4J version hauts débits	$C(Q)$	0.725	0.727	0.728	0.727	0.725	0.724	0.722	0.720	0.721	0.719	0.717	0.716	0.719	0.718	0.716	0.714	
	$C(\sqrt{Q})$	0.782	0.790	0.796	0.798	0.793	0.795	0.796	0.797	0.791	0.793	0.794	0.794	0.791	0.792	0.793	0.794	
	$C(\ln(Q))$	0.703	0.721	0.732	0.737	0.731	0.734	0.739	0.741	0.734	0.735	0.738	0.740	0.734	0.735	0.738	0.740	
GR4J version bas débits	$C(Q)$	0.672	0.676	0.680	0.682	0.682	0.682	0.682	0.682	0.685	0.685	0.684	0.683	0.686	0.686	0.685	0.684	
	$C(\sqrt{Q})$	0.766	0.760	0.751	0.745	0.743	0.738	0.731	0.727	0.742	0.737	0.730	0.725	0.742	0.737	0.729	0.725	
	$C(\ln(Q))$	0.749	0.730	0.711	0.701	0.702	0.694	0.682	0.676	0.699	0.691	0.680	0.674	0.698	0.690	0.679	0.674	
Moyenne des débits			critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir du débit SUMO (moyenne des débits)															
	$C(Q)$		0.715	0.715	0.715	0.713	0.713	0.713	0.713	0.714	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.714
	$C(\sqrt{Q})$		0.789	0.787	0.787	0.784	0.783	0.783	0.782	0.783	0.783	0.782	0.782	0.783	0.783	0.782	0.782	
$C(\ln(Q))$		0.748	0.746	0.745	0.741	0.740	0.739	0.738	0.740	0.739	0.738	0.737	0.739	0.739	0.738	0.737		

7.6 Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe pour la période de contrôle pour le bassin versant du Verdoube à Tautavel.

Hypothèse		GR4J Original	critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir des débits simulés modifiés par SUMO														
$C_{1HD}=C_{1BD}$		0	0	0	0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15	0.15	0.25	0.25	0.25	0.25
$C_{2HD}=C_{2BD}$		0	0.05	0.15	0.25	0	0.05	0.15	0.25	0	0.05	0.15	0.25	0	0.05	0.15	0.25
GR4J version hauts débits	$C(Q)$	0.402	0.401	0.399	0.397	0.400	0.396	0.393	0.390	0.396	0.393	0.390	0.388	0.395	0.392	0.389	0.387
	$C(\sqrt{Q})$	0.585	0.609	0.621	0.624	0.622	0.618	0.614	0.612	0.616	0.611	0.607	0.605	0.614	0.609	0.605	0.603
	$C(\ln(Q))$	0.499	0.582	0.605	0.612	0.600	0.600	0.597	0.595	0.604	0.595	0.591	0.589	0.604	0.594	0.590	0.588
GR4J version bas débits	$C(Q)$	0.219	0.225	0.234	0.241	0.223	0.229	0.237	0.242	0.231	0.237	0.244	0.249	0.235	0.240	0.247	0.252
	$C(\sqrt{Q})$	0.502	0.508	0.511	0.513	0.449	0.467	0.478	0.484	0.451	0.468	0.479	0.484	0.453	0.469	0.479	0.485
	$C(\ln(Q))$	0.634	0.616	0.602	0.595	0.484	0.513	0.524	0.527	0.481	0.508	0.519	0.523	0.481	0.507	0.518	0.521
Moyenne des débits			critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir du débit SUMO (moyenne des débits)														
	$C(Q)$		0.347	0.346	0.347	0.336	0.336	0.336	0.336	0.334	0.334	0.334	0.334	0.333	0.333	0.334	0.334
	$C(\sqrt{Q})$		0.595	0.593	0.593	0.564	0.564	0.565	0.565	0.559	0.560	0.561	0.561	0.558	0.559	0.560	0.560
	$C(\ln(Q))$		0.624	0.621	0.620	0.572	0.575	0.576	0.576	0.567	0.569	0.570	0.570	0.565	0.567	0.569	0.569

7.7 Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe : comparaison de l'approche SUMO et de l'approche multi-modèle proposée par Oudin et al. (2006), période de contrôle pour le bassin versant de l'Ill à Didenheim.

Hypothèse		GR4J Original	critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir du débit SUMO (moyenne des débits)														
$C_{1HD}=C_{1BD}$		0	0	0	0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15	0.15	0.25	0.25	0.25	0.25
$C_{2HD}=C_{2BD}$		0	0.05	0.15	0.25	0	0.05	0.15	0.25	0	0.05	0.15	0.25	0	0.05	0.15	0.25
Approche Multi- modèle 02	$C(Q)$	0.725	0.715	0.715	0.715	0.713	0.713	0.713	0.714	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.714
	$C(\sqrt{Q})$	0.794	0.789	0.787	0.787	0.784	0.783	0.783	0.782	0.783	0.783	0.782	0.782	0.783	0.783	0.782	0.782
	$C(\ln(Q))$	0.760	0.748	0.746	0.745	0.741	0.740	0.739	0.738	0.740	0.739	0.738	0.737	0.739	0.739	0.738	0.737
Approche Multi- modèle 03	$C(Q)$	0.728	0.715	0.715	0.715	0.713	0.713	0.713	0.714	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.714
	$C(\sqrt{Q})$	0.794	0.789	0.787	0.787	0.784	0.783	0.783	0.782	0.783	0.783	0.782	0.782	0.783	0.783	0.782	0.782
	$C(\ln(Q))$	0.765	0.748	0.746	0.745	0.741	0.740	0.739	0.738	0.740	0.739	0.738	0.737	0.739	0.739	0.738	0.737

7.8 Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe : comparaison de l'approche SUMO et de l'approche multi-modèle proposée par Oudin et al. (2006), période de contrôle pour le bassin versant du Verdoube à Tautavel.

Hypothèse		GR4J Original	critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir du débit SUMO (moyenne des débits)														
$C_{1HD}=C_{1BD}$		0	0	0	0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15	0.15	0.25	0.25	0.25	0.25
$C_{2HD}=C_{2BD}$		0	0.05	0.15	0.25	0	0.05	0.15	0.25	0	0.05	0.15	0.25	0	0.05	0.15	0.25
Approche Multi- modèle 01	$C(Q)$	0.371	0.347	0.346	0.347	0.336	0.336	0.336	0.336	0.334	0.334	0.334	0.334	0.333	0.333	0.334	0.334
	$C(\sqrt{Q})$	0.610	0.595	0.593	0.593	0.564	0.564	0.565	0.565	0.559	0.560	0.561	0.561	0.558	0.559	0.560	0.560
	$C(\ln(Q))$	0.644	0.624	0.621	0.620	0.572	0.575	0.576	0.576	0.567	0.569	0.570	0.570	0.565	0.567	0.569	0.569
Approche Multi- modèle 02	$C(Q)$	0.390	0.347	0.346	0.347	0.336	0.336	0.336	0.336	0.334	0.334	0.334	0.334	0.333	0.333	0.334	0.334
	$C(\sqrt{Q})$	0.608	0.595	0.593	0.593	0.564	0.564	0.565	0.565	0.559	0.560	0.561	0.561	0.558	0.559	0.560	0.560
	$C(\ln(Q))$	0.634	0.624	0.621	0.620	0.572	0.575	0.576	0.576	0.567	0.569	0.570	0.570	0.565	0.567	0.569	0.569

7.9 Nomenclature

x', y', z'	: dérivées par rapport au temps.
x, y, z	: espaces où se produisent les courbes de l'équation (1).
x_k, x_j	: la variable interne commune aux modèles k et j.
x'_k	: dérivée de la variable interne commune par rapport au temps.
$f_k(x_k)$: fonction mathématique produisant la variable interne commune dans le modèle.
C_{kj}	: coefficient de couplage entre les variables internes communes des modèles k et j.
$Q_{obs,i}$: débits observés au pas de temps i.
$Q_{calc,i}$: débits simulés au pas de temps i.
\overline{Q}_{obs}	: moyenne des débits observés sur la période.
n	: nombre total de pas de temps de la période d'étude.
$\left(\frac{S}{X_1}\right)_i^t$: ratio hauteur/capacité maximale du réservoir de production pour l'instant « t » provenant de la version i (hauts ou bas débits) modèle GR4J.
$\left(\frac{R}{X_3}\right)_i^t$: ratio hauteur/capacité maximale du réservoir de routage pour l'instant « t » provenant de la version i (hauts ou bas débits) modèle GR4J.
$\left(\frac{S}{X_1}\right)_i^{t+1}$: nouvelle valeur (i.e. valeur modifiée par le super-modèle) du ratio hauteur/capacité maximale du réservoir de production calculée pour l'instant « t+1 ».
$\left(\frac{R}{X_3}\right)_i^{t+1}$: nouvelle valeur (i.e. valeur modifiée par le super-modèle) du ratio hauteur/capacité maximale du réservoir de routage calculée pour l'instant « t+1 ».
C_{1i}, C_{2i}	: coefficients de connexions entre les variables internes pour la version i (hauts ou bas débits).
α	: poids utilisé pour combiner les deux débits simulés.
Q_{simCQ}	: débit simulé calculé avec le modèle GR4J version hauts débits.
$Q_{simClnQ}$: débit simulé calculé avec le modèle GR4J version bas débits
S	: ratio hauteur/ capacité maximale réservoir de production (S/x_1).

8 RESUME

Au cours des dernières années, les modèles hydrologiques ont eu un développement impressionnant. L'intérêt des modèles concerne, entre autres, la simulation et la prévision des phénomènes hydrologiques à court, moyen et long terme. Généralement, les hydrologues travaillent avec une approche multi-modèle, c'est-à-dire qu'ils utilisent, soit un même modèle avec différentes fonctions-objectif, soit différents modèles hydrologiques, et les résultats de chacun sont combinés a posteriori. Cependant, ce type d'approche a montré des défaillances au moment de reproduire la réalité. Pour cette raison, dans ce stage nous avons appliqué à l'hydrologie l'approche SUMO (SUper-MOdèle), créée originalement dans le domaine de la climatologie. La différence avec l'approche multi-modèle standard, est que le super-modèle travaille avec un concept dynamique ; c'est-à-dire, nous travaillons avec un échange d'informations entre les variables internes en temps réel. Grâce à ceci, les variables internes des modèles les moins performants seront ramenées vers une gamme de valeurs permettant une amélioration des performances. Par conséquent on espère améliorer les débits simulés, contribuant ainsi à développer de meilleurs outils afin de mieux estimer les risques liés à l'eau.

Puisque c'est la première fois qu'on applique SUMO au domaine de l'hydrologie, nous n'utiliserons qu'un seul modèle hydrologique : GR4J, avec deux versions sur la fonction-objectif: hauts débits et bas débits. Nous ferons la comparaison de la performance entre les résultats produits par le modèle GR4J original (hauts et bas débits) et ceux produits par notre super-modèle ; et finalement, nous ferons aussi la comparaison de performance avec une approche multi-modèle simple [Oudin et al. (2006)]