



HAL
open science

Les SUMO (SUperMOdèles) feront-ils le poids en modélisation hydrologique ?

José Manuel Tunqui Neira

► **To cite this version:**

José Manuel Tunqui Neira. Les SUMO (SUperMOdèles) feront-ils le poids en modélisation hydrologique ?. Sciences de l'environnement. 2015. hal-02601728

HAL Id: hal-02601728

<https://hal.inrae.fr/hal-02601728>

Submitted on 16 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**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 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. More and more, hydrologists work with a multi-model approach: they use either a single model with different objective-functions or different hydrological models, the results of each being 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 the 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, in two scenarios: the first one with two versions of the objective-function favouring: high flows and low flows, and the second one with three versions of the objective-function favouring: high flows, medium flows and low flows. The comparison of the performance between the results produced by the original model GR4J (high, root and low flows) and those produced by our super model will be done. 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.....	6
Liste des Tableaux.....	8
1 Introduction.	9
2 L'approche super-modèle (SUMO).....	11
2.1 Objectifs de l'approche SUMO.....	11
2.2 Première application : climatologie	11
2.2.1 L'approche du SUMO avec le modèle type Lorenz 63	11
2.2.2 Résultats.....	12
2.3 Approche envisagée pour l'hydrologie.	13
2.3.1 Simplification de l'équation SUMO produit dans le domaine de la climatologie	13
2.3.2 Modélisation hydrologique	14
2.3.3 Forçages climatiques	16
2.3.4 Zone d'étude	16
3 Application de la méthodologie SUMO à l'hydrologie avec GR4J.....	17
3.1 Variables internes à échanger.....	17
3.1.1 Scénario n° 1 : deux versions de GR4J (hauts et bas débits).....	17
3.1.2 Scénario n° 2 : trois versions de GR4J (hauts, intermédiaires et bas débits).....	18
3.1.3 Optimisation du Coefficient de connexion.....	18
3.1.4 Coupleur OpenPALM.....	18
4 Résultats de l'approche SUMO au domaine de l'hydrologie.....	23
4.1 Introduction	23
4.2 Comparaison de la performance entre les débits simulés modifiés, débit SUMO et les débits simulés originaux Scénario n°1.	24
4.2.1 Résultats des modèles GR4J originaux sur la période de calage (1973-1991)....	24
4.2.2 Comparaison de la performance de l'approche SUMO et les débits simulés avec les modèles GR4J originaux sur la période de calage (1973-1991).....	25
4.2.3 Résultats modèles GR4J originaux pour la période de contrôle (1992-2009). ...	32
4.3 Comparaison de la performance entre les débits simulés modifiés, débit SUMO et les débits simulés originaux Scénario 2.	39
4.3.1 Résultats des modèles GR4J originaux sur la période de calage (1973-1991)....	39
4.3.2 Comparaison de la performance de l'approche SUMO et les débits simulés avec les modèles GR4J originaux sur la période de calage (1973-1991).....	39

4.3.3	Résultats modèle GR4J original pour la période de contrôle (1992-2009).....	42
4.3.4	Conclusion et Discussion	45
4.4	Comparaison de la performance SUMO du scénario 1 (version pour les hauts et bas débits) aux approches multi-modèles habituelles : l'étude d'Oudin et al. (2006).....	45
4.4.1	Introduction.....	45
4.4.2	Comparaison des performances entre l'approche SUMO et l'approche multi-modèle Oudin et al. (2006)	45
5	CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	47
6	Références bibliographiques	49
7	ANNEXES.....	51
7.1	Informations supplémentaires bassin versant de l'III à Didenheim.....	51
7.2	Informations supplémentaires bassin versant du Verdoble à Tautavel	52
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 Scénario 1	53
7.4	Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe sur la période de calage pour le bassin versant du Verdoble à Tautavel Scénario 1.....	54
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 Scénario 1.....	55
7.6	Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe pour la période de contrôle pour le bassin versant du Verdoble à Tautavel Scénario 1	56
7.7	Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe sur la période de calage pour le bassin versant de l'III à Didenheim Scénario 2	57
7.8	Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe sur la période de calage pour le bassin versant du Verdoble à Tautavel Scénario 2.....	58
7.9	Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe pour la période de contrôle pour le bassin versant de l'III à Didenheim Scénario 2.....	59
7.10	Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe pour la période de contrôle pour le bassin versant du Verdoble à Tautavel Scénario 2	60
7.11	Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe : comparaison de l'approche SUMO (Scénario 1) et de l'approche multi-modèle proposée par Oudin et al. (2006), période de contrôle pour le bassin versant de l'III à Didenheim.....	61
7.12	Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe : comparaison de l'approche SUMO (Scénario 1) et de l'approche multi-modèle proposée par Oudin et al. (2006), période de contrôle pour le bassin versant du Verdoble à Tautavel.	61
7.13	Nomenclature	62
8	RESUME.....	63

Liste des Figures

Figure 1 : Approche multi-modèle habituelle	10
Figure 2 : trajectoires des 3 modèles imparfaits sans connexions entre eux [van den Berge et al. (2011)]	12
Figure 3 : Trajectoire du super-modèle (noir) et du modèle Lorenz 63 (gris) [van den Berge et al. (2011)]	12
Figure 4 : Schéma de l'approche SUMO appliqué à deux modèles hydrologiques.....	13
Figure 5 : Schéma du modèle pluie-débit GR4J [Perrin et al. (2003)].....	15
Figure 6 : application OpenPALM du super-modèle hydrologique dans PrePALM mise en place lors de ce stage pour le scénario 1.	20
Figure 7 : Schéma de communication en temps réel entre les modèles GR4J et le SUMO avec OpenPALM.....	22
Figure 8 : Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les deux versions originales (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.	25
Figure 9 : Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les deux versions originales (coordonnées (0,0)) de GR4J (hauts et bas débits) et les deux GR4J modifiés avec l'approche SUMO. Bassin versant du Verdouble à Tautavel. En ligne les graphes pour chaque version des modèles, en colonne les graphes pour chaque critère utilisé pour l'évaluation.	27
Figure 10 : courbes des débits classés et BIAIS pour le bassin versant de l'III à Didenheim. Dans la légende : Qobs : débit observé, QcalcHD : débits classés simulés originaux pour les hauts débits, QcalcBD : débits classés simulés originaux pour les bas débits, QSUMO : Moyens des débits (hauts et bas débits) simulés modifiés par l'approche SUMO, BIAISHD : biais produit par la différence entre les débits observés et les débits simulés pour le modèle GR4J version hauts débits , BIAISBD : biais produit par la différence entre les débits observés et les débits simulés pour le modèle GR4J version bas débits, BIAISSUMO : biais produit par la différence entre les débits observés et les moyens des débits simulés (hauts et bas débits) par l'approche SUMO	28
Figure 11 : courbes des débits classés et BIAIS pour le bassin versant de l'III à Didenheim. Dans la légende : Qobs : débit observé, QcalcHD : débits classés simulés originaux pour les hauts débits, QcalcBD : débits classés simulés originaux pour les bas débits, QSUMO : Moyens des débits (hauts et bas débits) simulés modifiés par l'approche SUMO, BIAISHD : biais produit par la différence entre les débits observés et les débits simulés pour le modèle GR4J version hauts débits , BIAISBD : biais produit par la différence entre les débits observés et les débits simulés pour le modèle GR4J version bas débits, BIAISSUMO : biais produit par la différence entre les débits observés et les moyens des débits simulés (hauts et bas débits) par l'approche SUMO	29
Figure 12 : Hydrogrammes d'évènements extrêmes : étiage de l'année 1976 (a,b) et crue de 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.....	30
Figure 13 : hydrogrammes d'évènements extrêmes : étiage de l'année 1976 (a,b) et crue observée de l'année 1983 (c,d). BV du Verdouble à Tautavel. Dans la légende : P :	

<i>pluie, Qobs : débit observé, QcalOHD,BD : débit simulé original hauts (HD) et bas (BD) débits, QcalSMHD,BD : débit simulé modifié, SUMO : débit SUMO.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 14 : Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les deux versions originales (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.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 15 : Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les deux versions originales (coordonnées (0,0)) de GR4J (hauts et bas débits) et les deux GR4J modifiés avec l'approche SUMO. Bassin versant du Verdoube à Tautavel.</i>	<i>34</i>
<i>Figure 16 : courbes des débits classés et BIAIS pour le bassin versant de l'III à Didenheim. Dans la légende : Qobs : débit observé, QcalcHD : débits classés simulés originaux pour les hauts débits, QcalcBD : débits classés simulés originaux pour les bas débits, QSUMO : Moyens des débits (hauts et bas débits) simulés modifiés par l'approche SUMO, BIAISHD : biais produit par la différence entre les débits observés et les débits simulés pour le modèle GR4J version hauts débits , BIAISBD : biais produit par la différence entre les débits observés et les débits simulés pour le modèle GR4J version bas débits, BIAISSUMO : biais produit par la différence entre les débits observés et les moyens des débits simulés (hauts et bas débits) par l'approche SUMO</i>	<i>35</i>
<i>Figure 17 : courbes des débits classés et BIAIS pour le bassin versant de l'III à Didenheim. Dans la légende : Qobs : débit observé, QcalcHD : débits classés simulés originaux pour les hauts débits, QcalcBD : débits classés simulés originaux pour les bas débits, QSUMO : Moyens des débits (hauts et bas débits) simulés modifiés par l'approche SUMO, BIAISHD : biais produit par la différence entre les débits observés et les débits simulés pour le modèle GR4J version hauts débits , BIAISBD : biais produit par la différence entre les débits observés et les débits simulés pour le modèle GR4J version bas débits, BIAISSUMO : biais produit par la différence entre les débits observés et les moyens des débits simulés (hauts et bas débits) par l'approche SUMO</i>	<i>36</i>
<i>Figure 18 : hydrogrammes d'évènements extrêmes : étiage de l'année 2003 (a,b) et crue observée de 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.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure 19 : hydrogrammes d'évènements extrêmes : étiage de l'année 2003 et crue observée de l'année 1993. BV du Verdoube à Tautavel.</i>	<i>38</i>
<i>Figure 20 : Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les trois versions originales (coordonnées (0,0)) de GR4J (hauts, intermédiaires et bas débits) et les trois 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>40</i>
<i>Figure 21 : Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les trois versions originales (coordonnées (0,0)) de GR4J (hauts, intermédiaires et bas débits) et les trois GR4J modifiés avec l'approche SUMO. Bassin versant du Verdoube à Tautavel. En ligne les graphes pour chaque version des modèles, en colonne les graphes pour chaque critère utilisé pour l'évaluation.</i>	<i>41</i>
<i>Figure 22 : Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les trois versions originales (coordonnées (0,0)) de GR4J (hauts, intermédiaires et bas débits) et les trois 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>43</i>

<i>Figure 23 : Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les trois versions originales (coordonnées (0,0)) de GR4J (hauts, intermédiaires et bas débits) et les trois GR4J modifiés avec l'approche SUMO. Bassin versant du Verdoube à Tautavel. En ligne les graphes pour chaque version des modèles, en colonne les graphes pour chaque critère utilisé pour l'évaluation.</i>	<i>44</i>
<i>Figure 24 : Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour l'approche d'Oudin et al. (2006) (coordonnées (0,0)) sur GR4J original (hauts et bas débits) et les moyennes de l'approche SUMO. Bassin versant de l'Ille à Didenheim.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure 25 : Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour l'approche d'Oudin et al. (2006) (coordonnées (0,0)) sur GR4J original (hauts et bas débits) et les moyennes de l'approche SUMO. Bassin versant du Verdoube à Tautavel.</i>	<i>46</i>

Liste des Tableaux

<i>Tableau 1 : Valeurs de paramètres et critères Nash-Sutcliffe GR4J originales pour le calage</i>	<i>24</i>
<i>Tableau 2 : Valeurs de critères Nash-Sutcliffe GR4J originaux pour la période de contrôle.....</i>	<i>32</i>
<i>Tableau 3 : Valeurs de paramètres et critères Nash-Sutcliffe GR4J originaux période du calage</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 4 : Critères de Nash-Sutcliffe pour GR4J originaux pour la période de contrôle 3 versions de GR4J</i>	<i>42</i>

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 les modèles 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 approximations de la réalité, par 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 nappes-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 de l'hydrologue 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, 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 super-modèles (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.

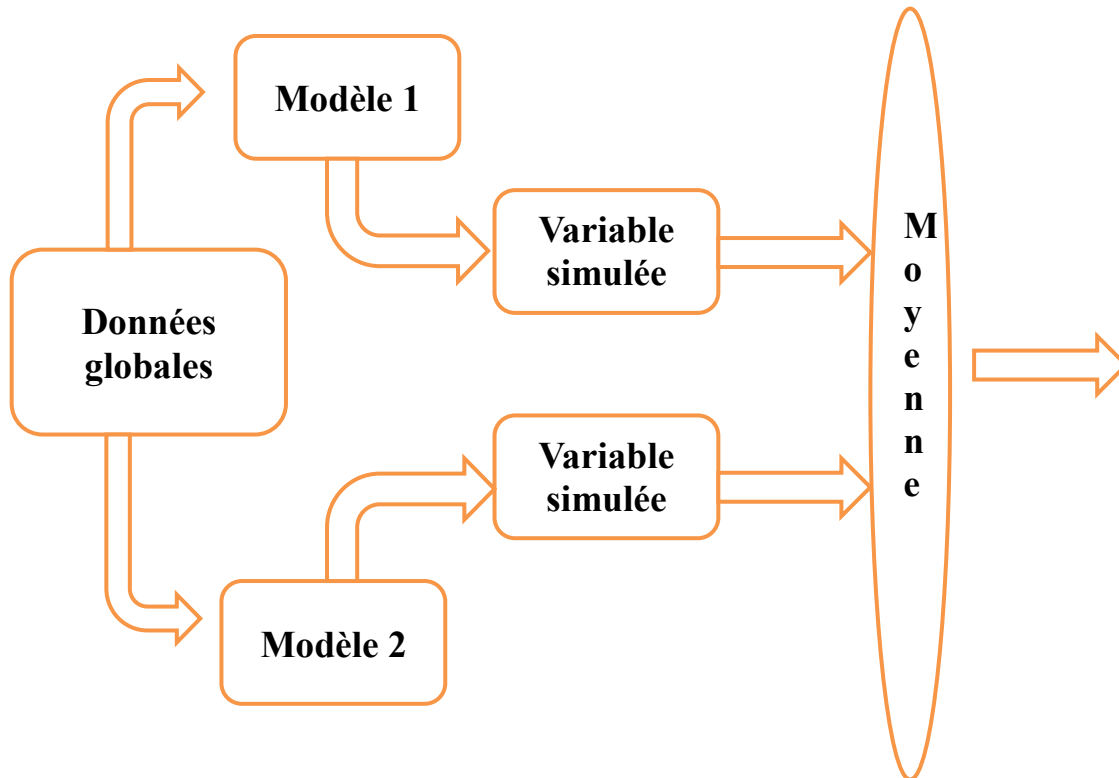


Figure 1 : Approche multi-modèle habituelle

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. La réalisation du super modèle seront mise en œuvre selon deux scénarios : dans le premier, on va utiliser deux versions de GR4J : l'une calée pour représenter au mieux les hauts débits, l'autre pour les faibles débits. La seconde utilisera trois versions de GR4J : l'une calée pour représenter au mieux les hauts débits, l'autre pour les débits intermédiaires et finalement une dernière pour les bas débits. Une fois ces modèles calés, il faudra implémenter 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. Enfin, pour le premier scénario, nous ferons une comparaison avec une approche multi-modèle simple proposée par Oudin et al. (2006).

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

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 peuvent comporter. Le super-modèle pourrait donc 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 Wiegerinck et al. (2013), l'approche Super-modèle a été proposée. Ils proposent dans leur étude, 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 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 qui pourraient être utilisées pour coupler les modèles sont par exemple 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 grise 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 connexions entre les variables internes communes des trois modèles. L'équation de l'approche SUMO est la suivante pour chacune des variables :

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

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

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

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 :

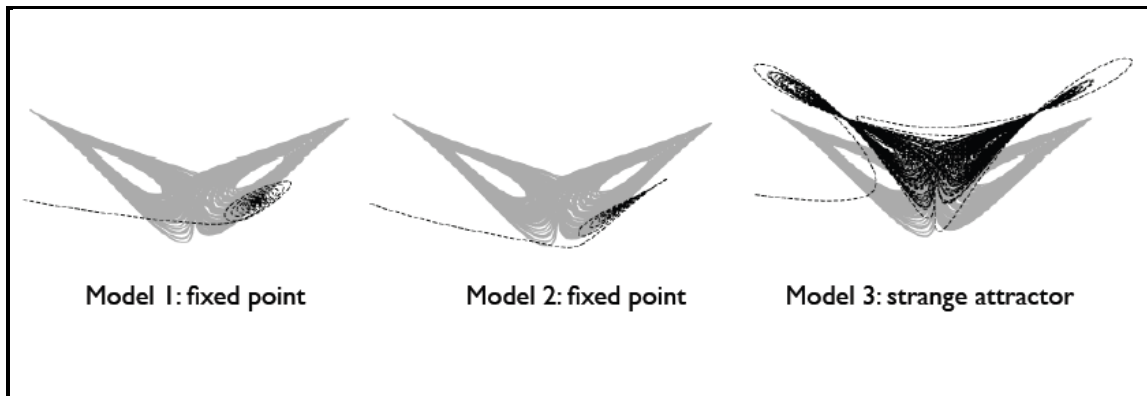


Figure 2 : trajectoires des 3 modèles imparfaits sans connexions entre eux [van den Berge et al. (2011)]

Les résultats montrent que s'il n'y a aucun échange d'information, aucun des trois modèles (lignes noires) n'arrive à suivre la trajectoire originale du modèle Lorenz 63 (lignes grises). 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 montre les résultats avec l'échange d'information entre les trois modèles, c'est-à-dire le super-modèle :

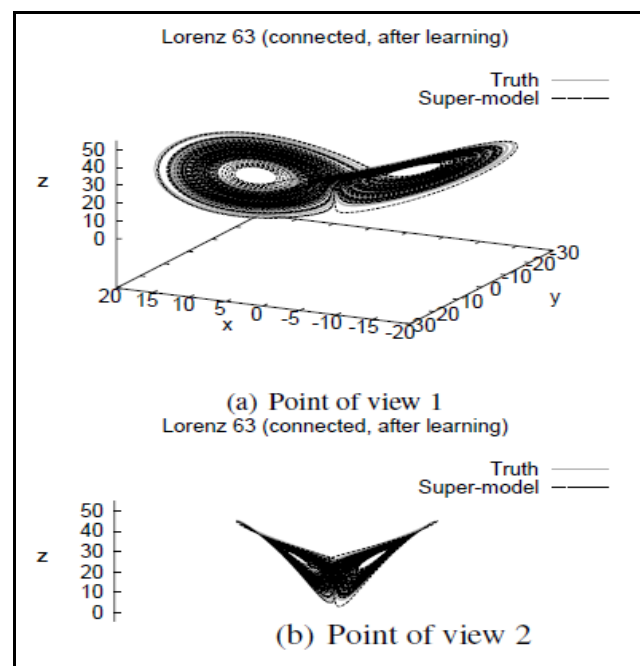


Figure 3 : Trajectoire du super-modèle (noir) et du modèle Lorenz 63 (gris) [van den Berge et al. (2011)]

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)** ont utilisé cette approche dans le modèle barocline quasi-géostrophique T5 [Houtekamer (1991)]. Les résultats montrent que le super-modèle a eu, ici aussi, une performance positive.

2.3 Approche envisagée pour l'hydrologie.

2.3.1 Simplification de l'équation SUMO produit dans le domaine de la climatologie

Dans ce chapitre, nous montrons les éléments nécessaires à l'élaboration de la méthodologie SUMO dans le domaine de l'hydrologie. Comme nous avons pu voir dans la section 2.2, l'équation SUMO du domaine de la climatologie utilise un modèle très complexe (modèle Lorenz 63) pour son développement. Dans le domaine de l'hydrologie, les modèles sont plus simples que dans le domaine de la climatologie. Cependant, dans l'étude présente, nous n'appliquerons pas exactement l'équation du SUMO de la climatologie, mais nous mettrons en place une petite variante pour simplifier les choses : au lieu d'appliquer le terme correctif à la fonction mathématique produisant la variable interne commune ($f_k(x_k)$), on va appliquer le terme correctif à la variable interne. Donc si on se base sur cette hypothèse l'équation du SUMO pour le domaine de l'hydrologie deviendra :

$$x_k^{t+1} = x_k^t + \sum_{j \neq k} C_{kj}^x (x_j^t - x_k^t) \quad (4)$$

Ci-dessous, le schéma de fonctionnement de SUMO que l'on envisage pour les modèles hydrologiques est montré :

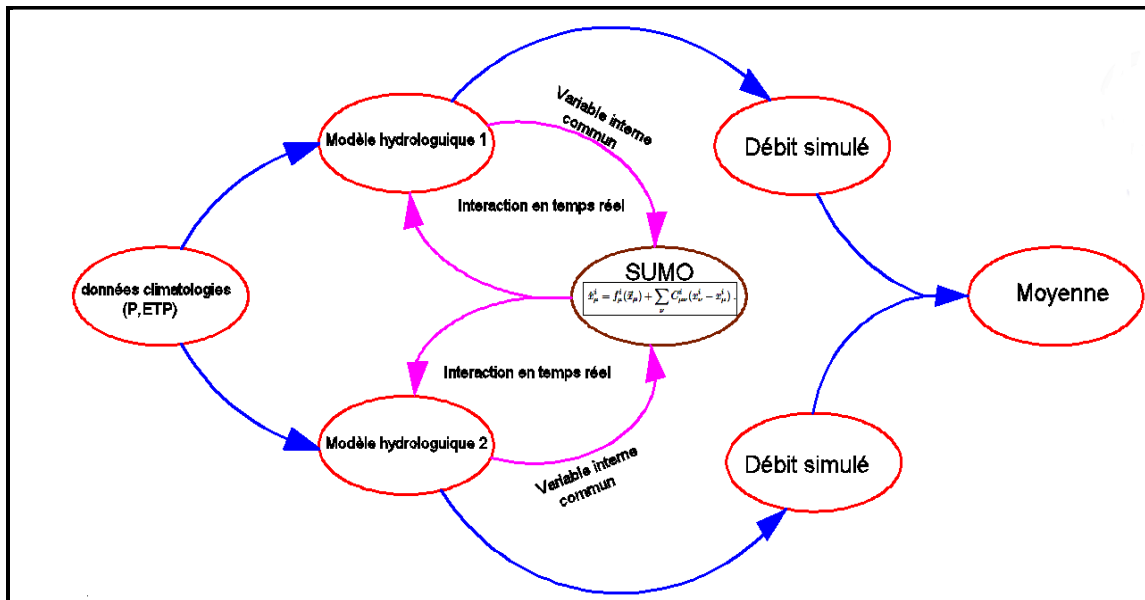


Figure 4 : Schéma de l'approche SUMO appliqué à deux modèles hydrologiques

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.

2.3.2 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.

2.3.2.1 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 (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.
- 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.

² Génie Rural à 4 paramètres Journalier

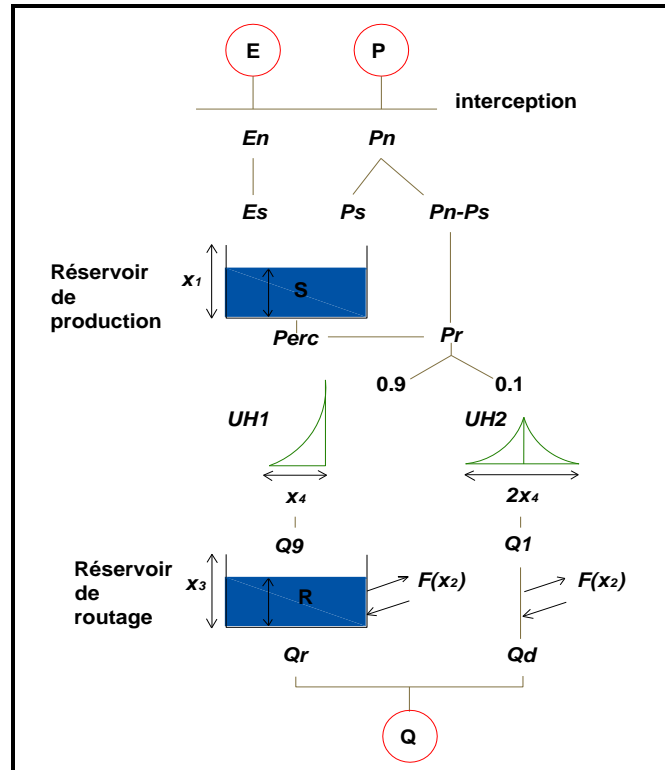


Figure 5 : Schéma du modèle pluie-débit GR4J [Perrin et al. (2003)]

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'hydrogramme unitaire 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. Ce terme joue un double rôle, car il permet de compenser les erreurs d'estimation sur les variables de forçage et l'inéquation éventuelle de la fonction de rendement du modèle.

2.3.2.2 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, qu'il convient de minimiser. Pour notre cas d'étude, nous avons choisi le critère proposé par Nash and Sutcliffe (1970), qui est basé sur la somme d'erreurs quadratiques :

$$Nash(Q) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{cal,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (5)$$

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 :

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

Avec $\varepsilon = \overline{Q_{obs}} / 40$ 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 équivalent à la simulation des débits de crues et d'étiages.

$$Nash(\sqrt{Q}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{Q_{cal,i}})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{Q_{obs,i}})^2} \quad (7)$$

2.3.3 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, à l'origine créé pour améliorer la prévention du risque d'avalanches sur les 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, deux 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 utilisées.

2.3.4 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.

2.3.4.1 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 climatiques (SAFRAN) entre les années **1958** et **2010**. Pour plus d'informations voir l'annexe 6.1.

2.3.4.2 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 climatiques (SAFRAN) entre les années **1958** et **2010**. Pour plus d'informations voir l'annexe 6.2.

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

⁴ Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle

Pour nos deux bassins versants, les séries de données chronologiques ont été divisées en deux sous-périodes indépendantes de 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 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 de deux modèles hydrologiques différents. Les modèles considérés pour réaliser le super-modèle dans le cadre de ce stage seront divisés en deux scénarios qui sont les suivants :

- Scénario 1 : 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))).
- Scénario 2 : trois versions de GR4J, l'une calée pour représenter au mieux les hauts débits (Nash(Q)), les débits intermédiaires (Nash (\sqrt{Q})), et la dernière 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 le 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, qui est non intrusif, 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

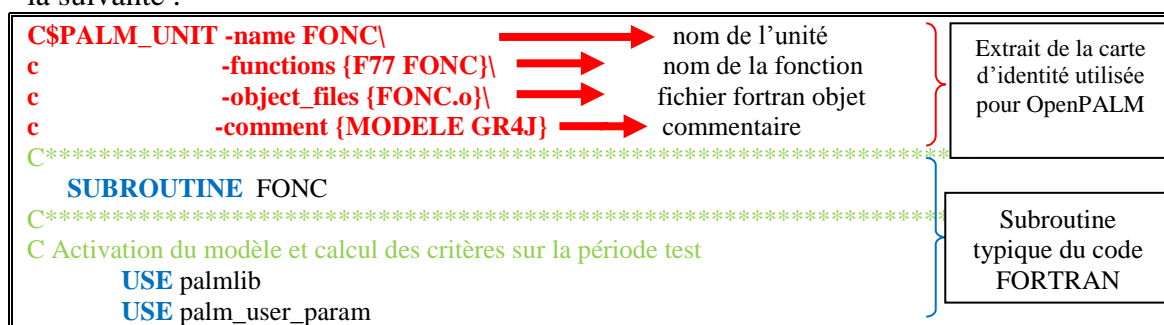
3.1.1 Scénario n° 1 : deux versions de GR4J (hauts et bas débits)

Dans ce premier scénario, nous avons choisi de travailler avec les niveaux de remplissage des 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 mêmes données météorologiques, et que les modèles sont calés avec différentes fonctions-objectif (hauts et bas débits, par exemple) les valeurs de R et S (i.e. hauteur de remplissage des réservoirs de routage et de production, respectivement, qui dépendent du temps) sont assez distantes l'une de l'autre. En d'autres termes, les valeurs S et R calculées pour la

3.1.4.1 Principes généraux

Le coupleur OpenPALM est issu du coupleur dynamique de codes de calcul PALM⁵ [Lagarde et al. (2001)], développé au CERFACS depuis 1998 et de la bibliothèque d'interpolation CWIPI développée à l'ONERA⁶ DSNA/ELCI. C'est un logiciel libre distribué sous licence LGPL, il est co-développé par le CERFACS et l'ONERA depuis janvier 2011. Son originalité tient à ses possibilités de définition d'algorithmes complexes autour des codes à coupler, et à son efficacité et sa souplesse pour transférer des données d'un code à l'autre. La technologie MPI sur laquelle il s'appuie pour le lancement de processus et 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 chose principale 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 les 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.

3.1.4.2 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 l'endroit 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 du scénario 1 :

⁵ Parallel Assimilation with a Lot of Modularity

⁶ L'Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales

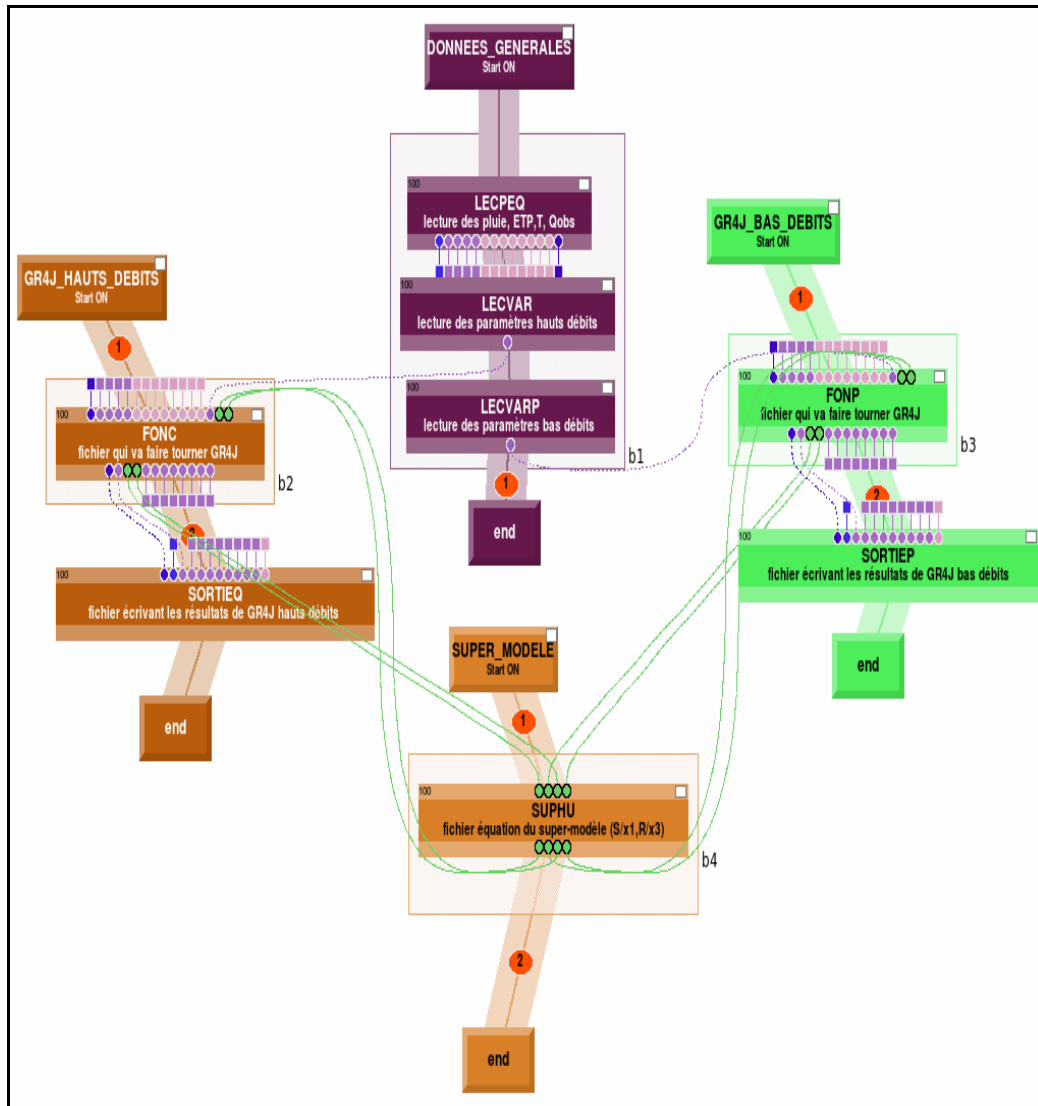


Figure 6 : application OpenPALM du super-modèle hydrologique dans PrePALM mise en place lors de ce stage pour le scénario 1.

On peut remarquer que l'application OpenPALM pour créer notre super-modèle est similaire au schéma de l'approche SUMO (Figure 3). Dans la branche appelée `DONNEES_GENERALES`, se trouvent la lecture des données climatiques nécessaires pour la mise en œuvre du modèle GR4J (pluie, ETP), et des 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 S/x_1 et R/x_3 . 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 calage. 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 envoyés 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 :

Il faut remarquer que dans le cas avec les trois versions de GR4J, le processus ultérieurement expliqué, est le même. La seule différence est que pour ce scénario, on ajoutera dans la branche des DONNEES_GENERALES la fonction LECVARV, et on va créer une nouvelle branche appelé « GR4J_RACINE_DEBITS ». Aussi les variables internes vont changer, elles ne seront plus les ratios S/x_1 et R/x_3 mais Q9 et Q1.

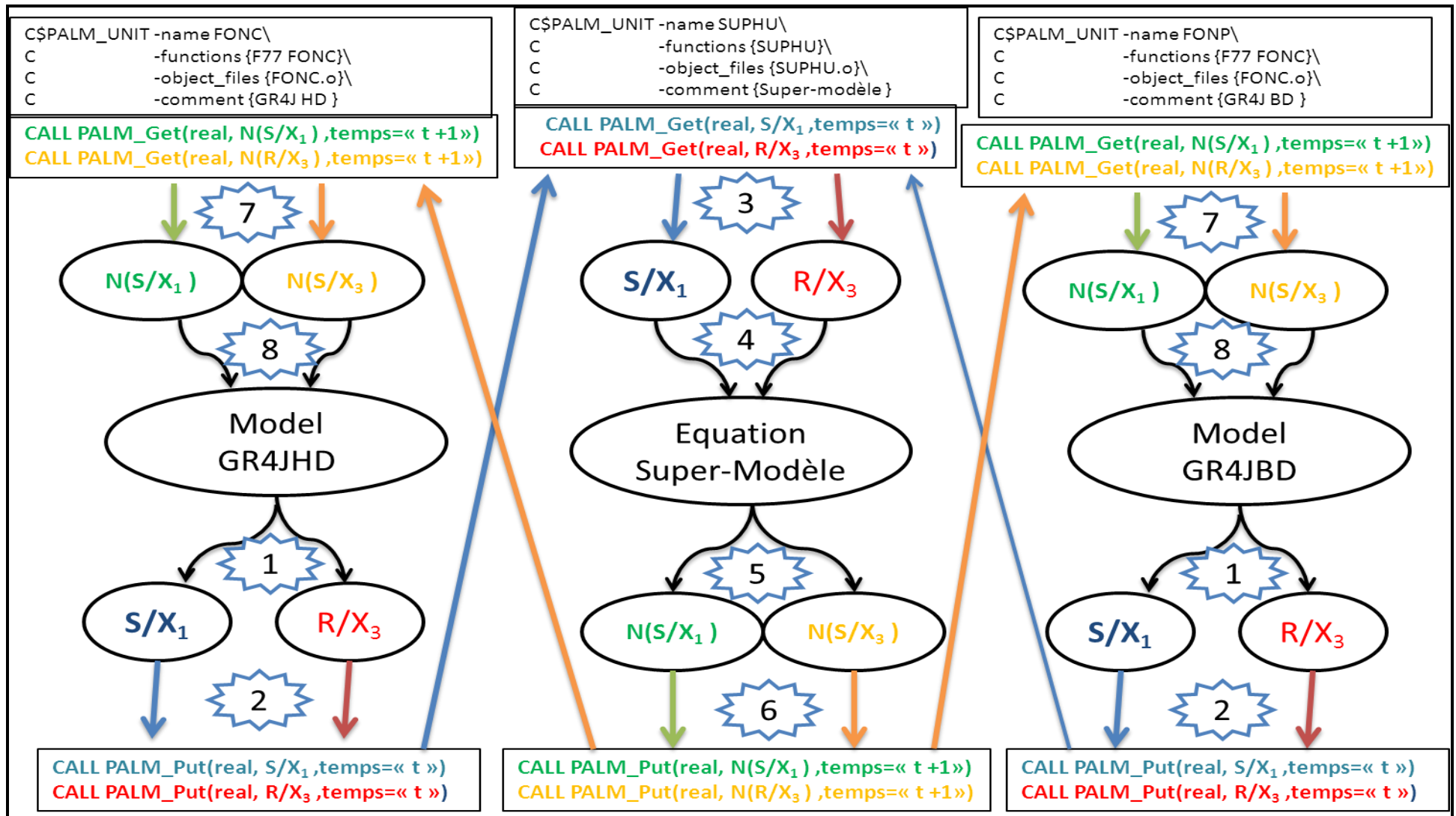


Figure 7 : Schéma de communication en temps réel entre les modèles GR4J et le SUMO avec OpenPALM

La Figure 7 nous présente comment travaille l'application OpenPALM pour faire le couplage du scénario 1, entre nos deux modèles hydrologiques (GR4J hauts et bas débits) et l'équation du super-modèle. D'abord, nous voyons les cartes d'identités de nos trois fichiers FORTRAN, insérées dans le code 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 super-modèle :

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 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 (non montré ici), 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 , que nous appelons $N(S/x_1)$ et $N(R/x_3)$
5. 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.
6. 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.
7. Finalement, $N(S/x_1)$ et $N(R/x_3)$ entrent dans les 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 scénarios : deux versions du modèle GR4J (hauts et bas débits) et trois versions du modèle GR4J (hauts, intermédiaires et bas débits). De cette interaction entre le SUMO et les modèles, on aura des débits simulés modifiés pour SUMO : un débit simulé pour la version de hauts débits, un débit simulé modifié pour la version des débits intermédiaires et une autre pour la version bas débits modifiée. Ces jeux de résultats seront comparés aux valeurs originales calculées avec les trois modèles GR4J dit « traditionnels ». Ainsi, on évaluera l'approche SUMO proprement dite, c'est-à-dire la moyenne des deux débits (premier scénario) et trois débits (deuxième scénario) simulés modifiés pour SUMO. D'abord on montrera les résultats calculés sans l'application du SUMO (4 paramètres, critères de Nash, débit simulé, etc.) pour chaque scénario. Puis,

ceux-ci seront comparés à ceux calculés par le super-modèle avec les hypothèses proposées dans le 3.1.1. pour le coefficient C (scénario 1 : $C_{1HD}=C_{1BD}=C_{2HD}=C_{2BD}$ et $C_{1HD}=C_{1BD}\neq C_{2HD}=C_{2BD}$ et scénario 2 : $C_{1HD}=C_{1ID}=C_{1BD}=C_{2HD}=C_{2ID}=C_{2BD}$ et $C_{1HD}=C_{1ID}=C_{1BD}\neq C_{2HD}=C_{2ID}=C_{2BD}$). Enfin, la moyenne des résultats trouvés par les modèles hydrologiques composant le super-modèle sera comparée avec les débits originaux simulés par le modèle GR4J « de base », pour chaque scénario. Il faut remarquer que seulement le premier scénario (hauts et bas débits) sera comparé aux approches proposées par **Oudin et al. (2006)**.

A partir d'ici et pour éviter des problèmes de compréhension, **on appellera débits simulés originaux haut et/ou bas débits les débits simulés calculés par les deux versions de GR4J originales (i.e. hauts et bas débits), , on appellera débits simulés modifiés les débits simulés modifiés pour SUMO pour les deux versions GR4J originales, et finalement on appellera simplement débit SUMO la moyenne des débits simulés modifiés pour SUMO.**

4.2 Comparaison de la performance entre les débits simulés modifiés, débit SUMO et les débits simulés originaux Scénario n°1.

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'Ill à Didenheim		Le Verdoube à Tautavel	
Période de calage	1973-1991		1973-1991	
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
$C(\sqrt{Q})$	0.727	0.714	0.539	0.520
$C(\ln(Q))$	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. En revanche, 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 de 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 aux coefficients correctifs C en terme de performance globale entre les débits simulés originaux, 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

Les méthodes utilisées pour comparer la performance de l'approche SUMO et les deux modèles hydrologiques GR4J sont les suivantes :

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

Nous montrons dans la figure ci-dessous les trois critères trouvés en utilisant les équations du super-modèle (équation (8)) 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.

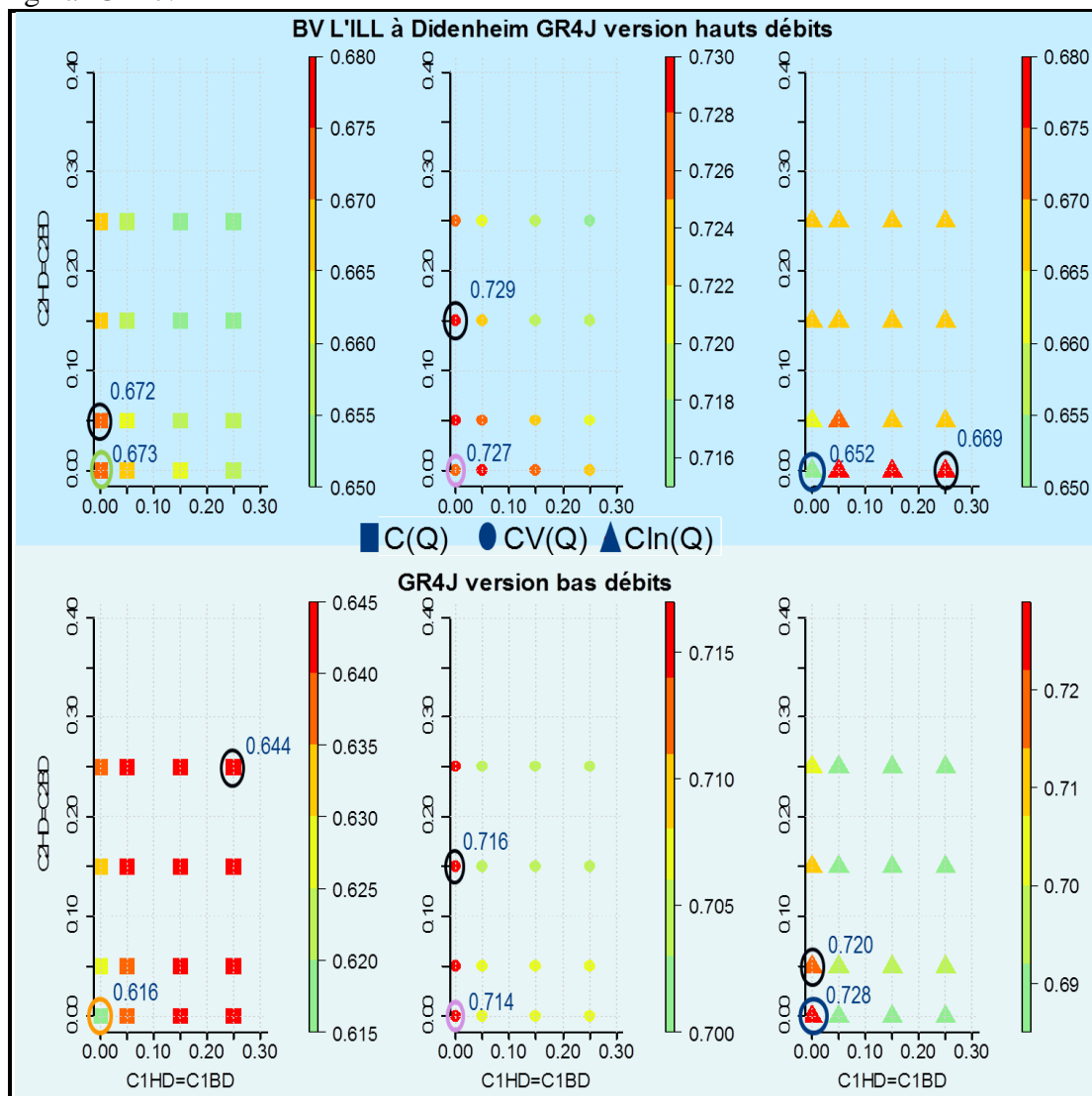


Figure 8 : Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les deux versions originales (coordonnées (0,0)) de GR4J (hauts et bas débits) et les deux GR4J modifiés avec l'approche SUMO. Bassin versant de l'III à Didenheim. En ligne les graphes pour chaque version des modèles, en colonne les graphes pour chaque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

Dans la Figure 8, nous pouvons observer les critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir du débit SUMO (moyenne des débits simulés modifiés par l'équation du SUMO) pour les deux versions de GR4J version hauts débits (3 graphes sur la surface couleur turquoise) et bas débits (3 graphes sur la surface couleur vert d'eau). Notons que les valeurs de NSE trouvées en utilisant les différentes valeurs des coefficients de couplage entre les variables internes (C1HD, C1BD et C2HD, C2BD); mis en tant que coordonnées X et Y, sont comparées aux critères Nash-Sutcliffe calculés dans les deux versions originales de GR4J (hauts et bas débits) représentées dans la figure pour les coordonnées X=0 et Y=0. Chaque colonne représente le critère Nash-Sutcliffe utilisé pour faire la comparaison (carrés pour le critère sur les débits (C(Q)), ronds pour le critère sur les racines carrés de débits (C(\sqrt{Q})) et triangles pour le critère sur le logarithme des débits (C(ln(Q))). Le but de ce graphique est qu'à partir de l'échelle de couleur, nous pouvons voir les différentes valeurs trouvées pour chaque critère NSE, faire la comparaison avec les critères NSE originaux (X=Y=0) et définir quelles sont les performances les plus hautes (couleurs foncées) et les plus faibles (couleurs claires). De plus, dans chaque graphe on a entouré la performance pour la coordonnée (0,0) et la plus haute trouvée avec l'équation SUMO.

D'une manière générale, les valeurs de critères NSE trouvés à partir de SUMO n'ont pas pu améliorer les critères NSE trouvés à partir des GR4J originaux lorsqu'on regarde comme critère d'évaluation le même qui a servi pour le calage (i.e. la fonction objectif principal dans la version GR4J pour les hauts débits est le critère sur les débits (C(Q))); par contre, les critères différents de la fonction-objectif principale (i.e. dans la version GR4J pour les hauts débits ces critères sont (C(\sqrt{Q})) et (C(ln(Q)))) ont été améliorés.

Maintenant nous montrons la figure correspondant au bassin versant du Verdoube à Tautavel :

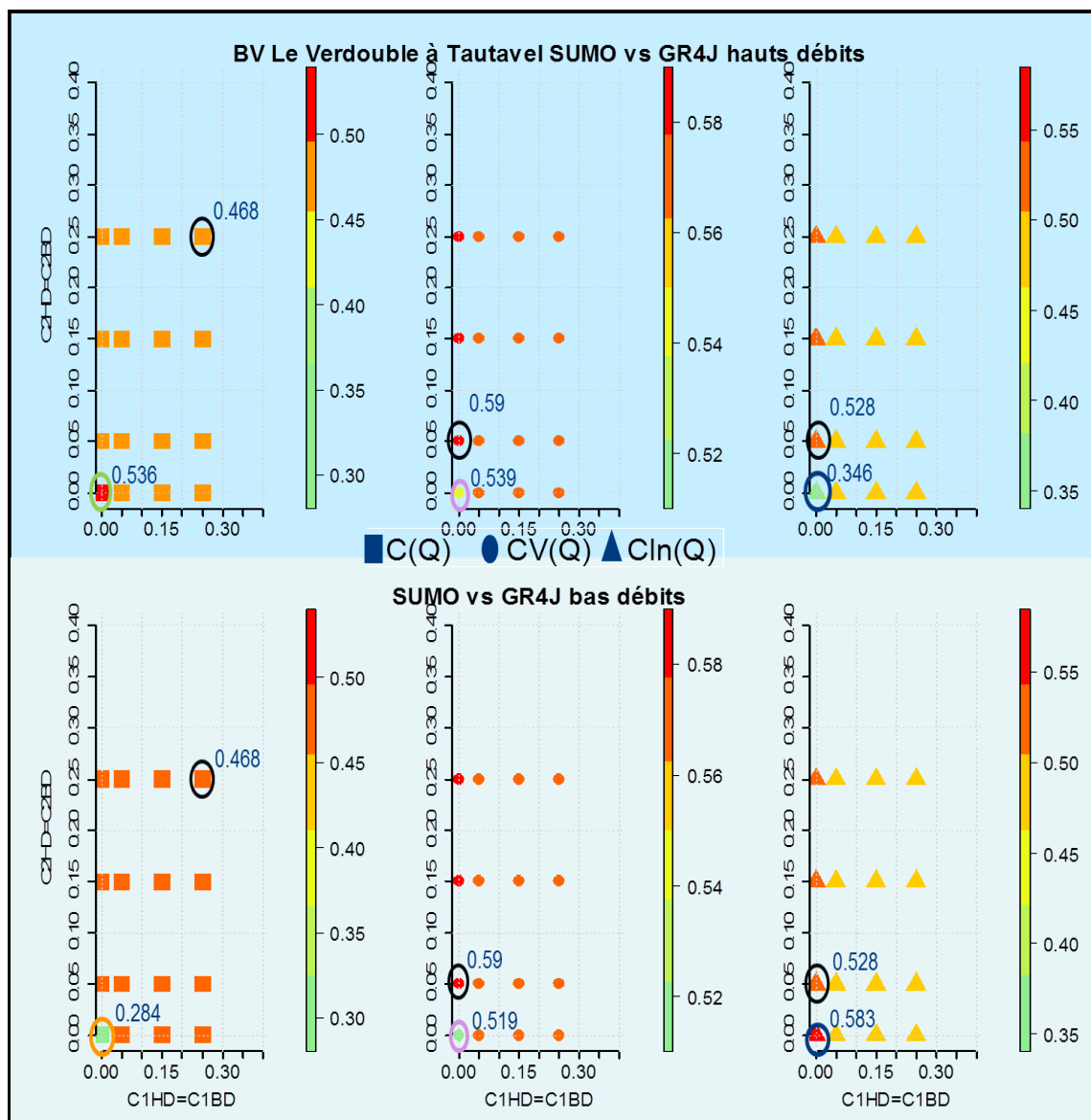


Figure 9 : Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les deux versions originales (coordonnées (0,0)) de GR4J (hauts et bas débits) et les deux GR4J modifiés avec l'approche SUMO. Bassin versant du Verdoble à Tautavel. En ligne les graphes pour chaque version des modèles, en colonne les graphes pour chaque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

Dans la Figure 9, on voit les mêmes évolutions que pour le bassin versant de l'Ill à Didenheim. La seule chose à commenter pour ce graphe c'est qu'à part les critères NSE sur les débits ($C(Q)$), les meilleures performances du débit SUMO ont été trouvées lorsque les coefficients de connexion pour la variable interne représentant le ratio du réservoir de production ($C1HD$ et $C1BD$) sont zéro.

Pour connaître toutes les valeurs des critères de Nash-Sutcliffe des figures 8 et 9, voyez les annexes 7.3 et 7.4 du présent rapport de stage.

Dans le cas des critères NSE calculés à partir des débits simulés modifiés par SUMO, qui n'apparaît pas dans les figures 8 et 9 mais dans les tableaux des annexes 7.3 et 7.4, ils ont le même comportement que ceux calculés avec le débit SUMO, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas pu battre les critères NSE trouvés avec les versions originales de GR4J (hauts et bas débits) pour la fonction-objectif principale, mais pour les critères différentes à elle, les critères NSE calculés à partir des débits simulés modifiés par SUMO ont une meilleure performance.

• BIAIS

Une autre manière d'évaluer la performance de SUMO, à part l'utilisation des critères de Nash-Sutcliffe, peut être réalisée avec les BIAIS en pourcentage (erreur absolue relative), calculés entre les débits classés observés et simulés pour chaque jour, donnés respectivement par :

$$BIAIS = \frac{|Q_{obs,i} - Q_{calc,i}|}{Q_{obs,i}} * 100 \quad (12)$$

Pour notre cas d'étude, et pour voir d'une façon plus détaillée la performance du débit SUMO par rapport à ceux calculés à partir des GR4J originaux et le débit observé respectivement, on calculera le BIAIS de nos deux bassins versants pour une année hydrologique. Dans le cas du bassin versant de l'III à Didenheim, l'année hydrologique 1982-1983 a été choisie, et pour le bassin versant du Verdoube à Tautavel on travaillera sur l'année hydrologique 1981-1982.

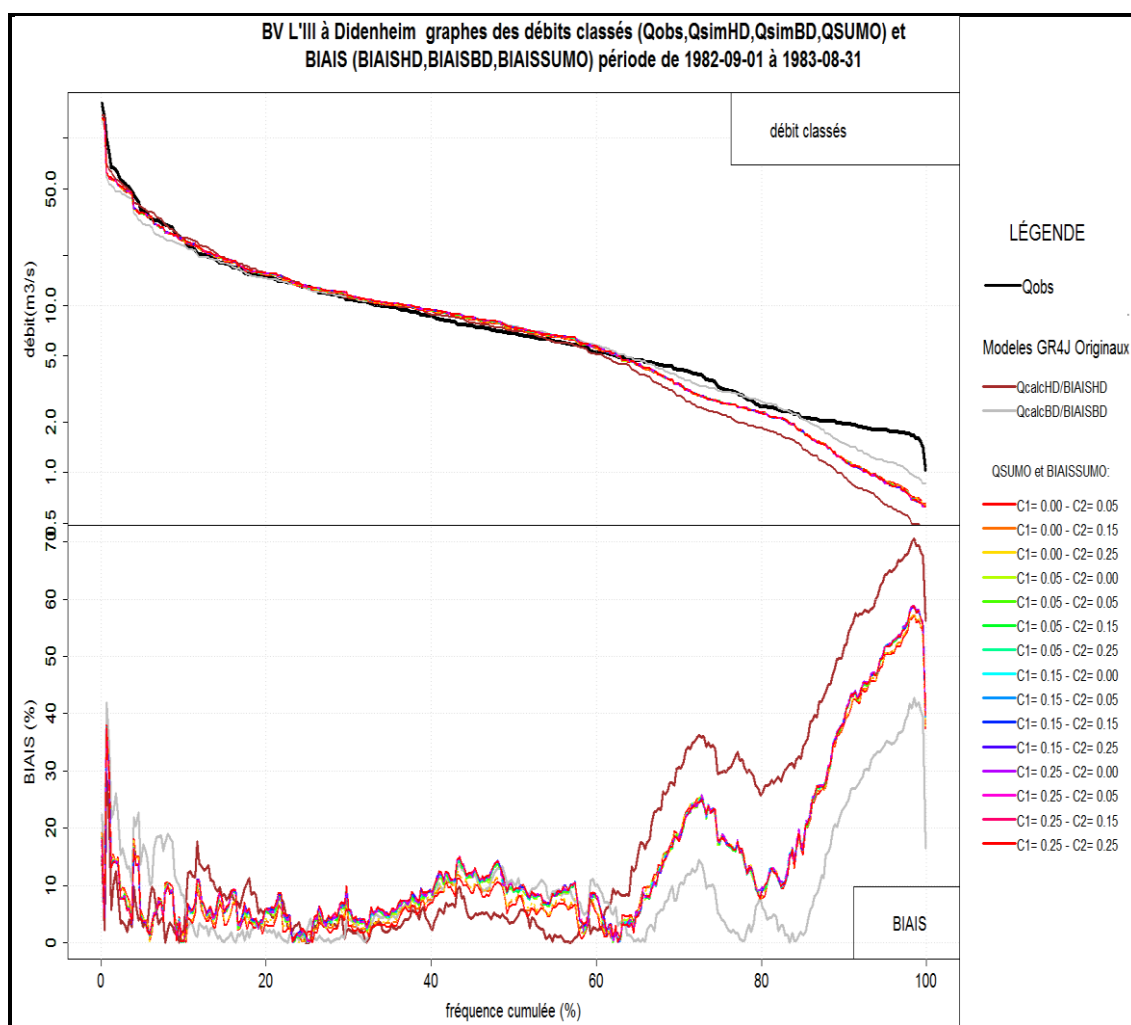


Figure 10 : courbes des débits classés et BIAIS pour le bassin versant de l'III à Didenheim. Dans la légende : Qobs : débit observé, QcalcHD : débits classés simulés originaux pour les hauts débits, QcalcBD : débits classés simulés originaux pour les bas débits, QSUMO : Moyens des débits (hauts et bas débits) simulés modifiés par l'approche SUMO, BIAISHD : biais produit par la différence entre les débits observés et les débits simulés pour le modèle GR4J version hauts débits, BIAISBD : biais produit par la différence entre les débits observés et les débits simulés pour le modèle GR4J version bas débits, BIAISSUMO : biais produit par la différence entre les débits observés et les moyens des débits simulés (hauts et bas débits) par l'approche SUMO.

Ici, dans le premier graphe, on a comparé la performance de tous (15 au total) les débits classés SUMO et les débits simulés pour les hauts (courbe jaune) et bas débits (courbe gray) et leurs BIAIS respectifs (deuxième graphe) par rapport au débit observé (courbe noire). Nous pouvons voir que dans le cas de simulation de hauts débits (fréquence cumulée entre 0 et 5 %), les courbes du débit SUMO et les courbes des débits simulés pour les hauts débits ont un fort biais (jusqu'à 40%) ce qui nous dit qu'ils ont une faible performance par rapport au débit observé. Pour les débits moyens (entre les 5 et 80% de la fréquence cumulée), on peut observer que nos débits SUMO ont une performance acceptable (biais entre 10 et 25%) par rapport au débit observé. Par contre, on voit qu'au moment de simuler les bas débits (fréquence cumulée entre 80 et 100%), la performance est assez basse (biais jusqu'à 55%). La simulation GR4J original pour les bas débits montre aussi de forts biais (40%).

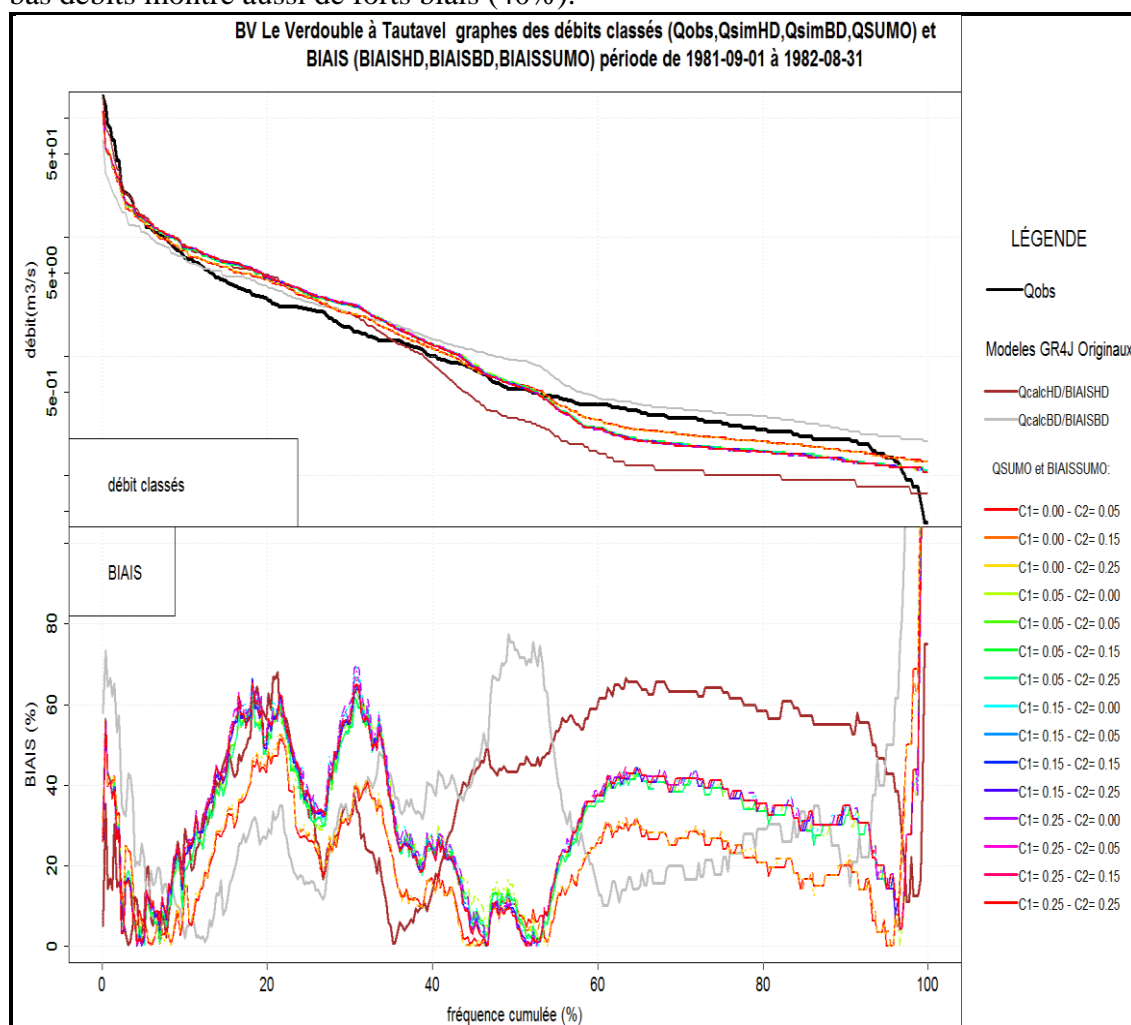


Figure 11 : courbes des débits classés et BIAIS pour le bassin versant de l'Il à Didenheim. Dans la légende : **Qobs** : débit observé, **QcalcHD** : débits classés simulés originaux pour les hauts débits, **QcalcBD** : débits classés simulés originaux pour les bas débits, **QSUMO** : Moyens des débits (hauts et bas débits) simulés modifiés par l'approche SUMO, **BIAISHD** : biais produit par la différence entre les débits observés et les débits simulés pour le modèle GR4J version hauts débits, **BIAISBD** : biais produit par la différence entre les débits observés et les débits simulés pour le modèle GR4J version bas débits, **BIAISSUMO** : biais produit par la différence entre les débits observés et les moyens des débits simulés (hauts et bas débits) par l'approche SUMO.

Dans le cas du bassin versant du Verdoube au Tautavel (Figure 11), on voit une performance assez mauvaise des débits SUMO et les débits simulés originaux (GR4J version hauts et bas débits). On arrive à des biais très hauts, comme dans le cas des bas débits (entre 80 et 100% de la fréquence cumulée) où le biais dépasse largement le

100%. La seule chose à remarquer dans ce jeu de graphes est qu'on a eu la meilleure performance de nos débits SUMO entre les 40 et 60 % de la fréquence cumulée, avec un biais entre 0 et 15 % environ, et qu'elle est meilleure que les deux débits simulés avec les GR4J originaux.

Finalement, nous pouvons dire que pour nos deux bassins versants nous avons obtenu des résultats assez différents, puisque, dans le cas du BV de l'Ill à Didenheim, on a eu un comportement assez uniforme, mais par contre dans le cas du BV du Verdouble au Tautavel, le comportement a été très erratique.

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'Ill à Didenheim, la crue du 26 mai 1983 sera affichée, et pour le Verdouble 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, c'est-à-dire pour le bassin versant de l'Ill à Didenheim avec $C_{1HD}=C_{1BD}=0.00$ et $C_{2HD}=C_{2BD}=0.25$ et pour le bassin versant du Verdouble à Tautavel avec $C_{1HD}=C_{1BD}=0.00$ et $C_{2HD}=C_{2BD}=0.05$.

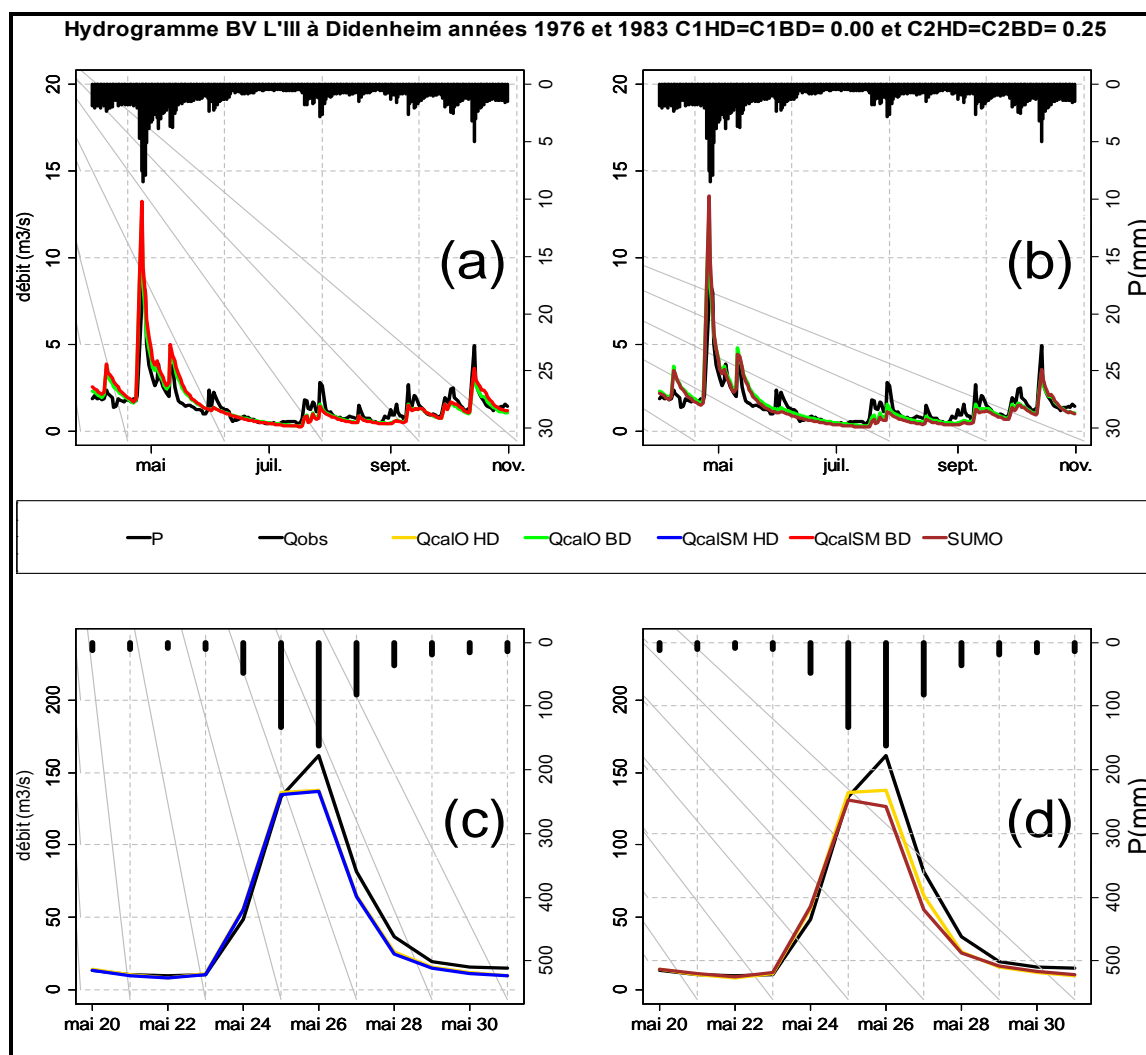


Figure 12 : Hydrogrammes d'évènements extrêmes : étiage de l'année 1976 (a,b) et crue de l'année 1983 (c,d). BV de l'ill à Didenheim. Dans la légende : P : pluie, Qobs : débit observé, QcalOHD,BD : débit simulé original hauts (HD) et bas (BD) débits, QcalSMHD,BD : débit simulé modifié, SUMO : débit SUMO

Notons dans la Figure 12(a), la comparaison des courbes des débits simulés originaux GR4J pour les bas débits (trait vert) et débits simulés modifiés (trait rouge pour les bas débits), par rapport au débit observé (trait noir). Nous pouvons remarquer que les débits simulés modifiés pour les bas débits ont une performance assez similaire à celle du débit simulé original 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 12(b), on a essayé de voir la performance de notre débit SUMO (trait marron) et des débits simulés originaux de GR4J pour les bas débits par rapport aux débits observés. On voit que la simulation du débit SUMO est plus basse que le débit simulé original pour les bas débits et le débit observé.. Dans la Figure 11(c), dans le cas de la crue, on voit que les deux modèles (i.e. débits simulé original hauts débits et simulés modifiés pour SUMO) ont la même performance, mais malheureusement aucune ne peut simuler le pic de crue. Dans la Figure 11(d), on observe la performance de notre débit SUMO et le débit simulé original pour les hauts débits, mais le débit SUMO se trouve en-dessous du débit simulé original et du débit observé.

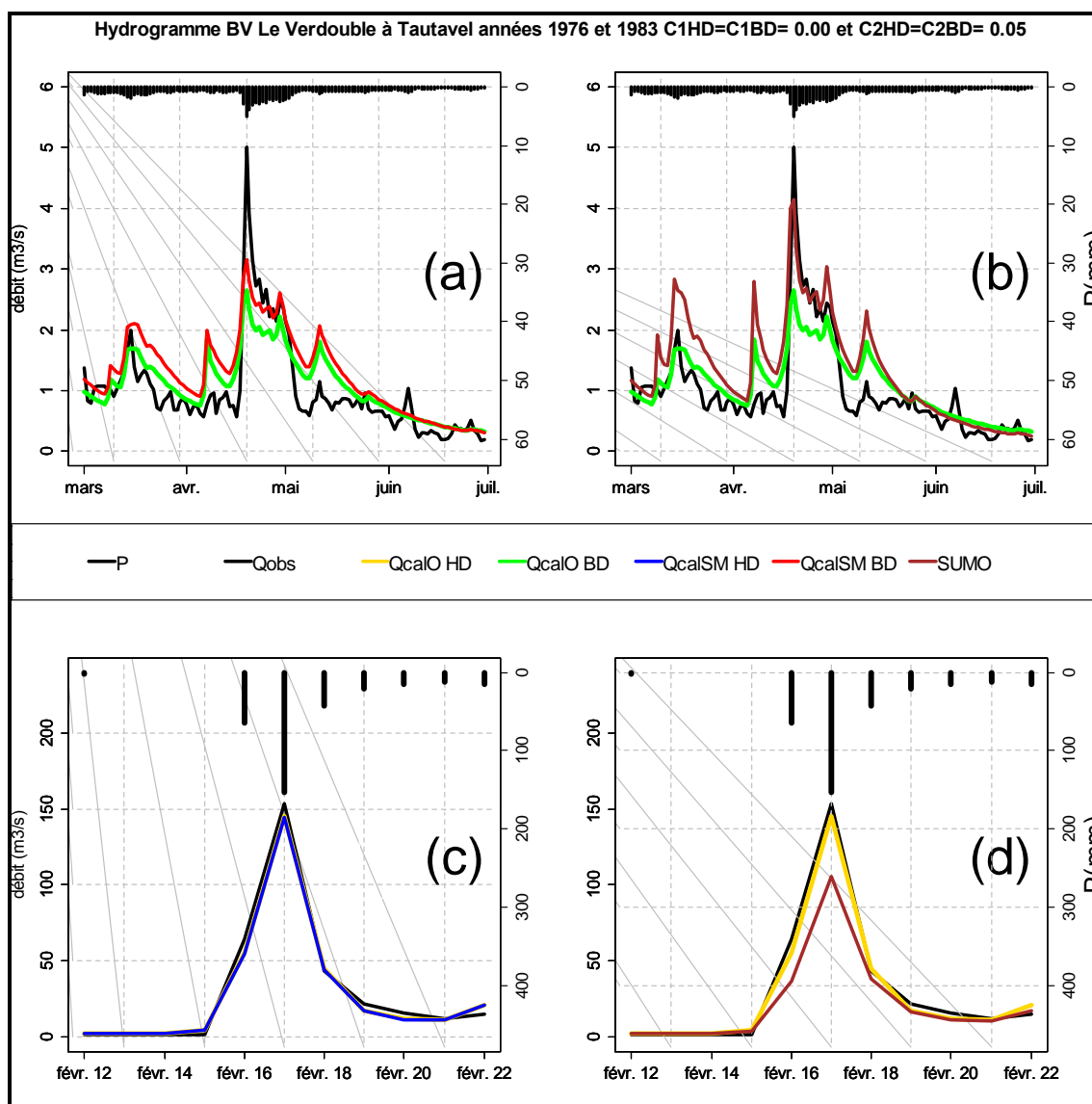


Figure 13 : hydrogrammes d'évènements extrêmes : étiage de l'année 1976 (a,b) et crue observée de l'année 1983 (c,d). BV du Verdouable à Tautavel. Dans la légende : P : pluie, Qobs : débit observé, QcalOHD,BD : débit simulé original hauts (HD) et bas (BD) débits, QcalSMHD,BD : débit simulé modifié, SUMO : débit SUMO

Notons dans la Figure 13(a) que tous les débits simulés surestiment les valeurs du débit observé. Il est donc très difficile de juger qui a la meilleure performance pour cet épisode d'étiage. Dans la Figure 12(b), on observe le même problème, même s'il y a un moment où le débit SUMO arrive à suivre parfaitement la courbe du débit observé (mois de mai environ). La Figure 12(c) nous montre que le débit simulé original pour les hauts débits et le débit simulé modifié par SUMO réussit presque à reproduire le pic de la crue étudiée. Finalement, dans la Figure 12(d), on observe que notre débit SUMO continue à être très éloigné du débit simulé original pour les hauts débits, qui a la meilleure performance.

4.2.2.3 Conclusion et Discussion

Dans cette partie, nous avons fait la comparaison des critères NSE entre les modèles GR4J originaux et débit 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 plus faible est le critère sur les logarithmes ($C(\ln Q)$). Aussi, on a pu observer la performance de notre débit simulé SUMO, par rapport au biais. On a pu voir que notre débit SUMO est, en général, assez performant, surtout dans le BV de l'Ill à Didenheim ; en revanche, au moment de faire la comparaison pour des événements extrêmes, il n'a pas montré une performance assez efficace.

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

Ici la seule chose qui change est que l'on calcule les trois critères de Nash (équations 4, 5 et 6) des deux versions de GR4J (hauts et bas débits) sur la période de contrôle :

Tableau 2 : Valeurs de critères Nash-Sutcliffe GR4J originaux pour la période de contrôle

Station	A1080330		Y0655010	
Bassin versant	L'Ill à Didenheim		Le Verdoube à Tautavel	
Période du contrôle	1992-2009		1992-2009	
Modèle hydrologique	GR4J		GR4J	
Versions	hauts débits	bas débits	hauts débits	bas débits
$C(Q)$	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

Pour mieux remarquer la performance de SUMO, on divisera l'étude de la performance en deux grandes parties : une analyse de sensibilité aux coefficients correctifs C en terme de performance globale entre les débits simulés originaux, 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.

4.2.3.1 Analyse de sensibilité globale

Les méthodes utilisées pour comparer la performance de l'approche SUMO et les deux modèles hydrologiques GR4J sont les suivantes :

- Graphiques des critères de Nash-Sutcliffe

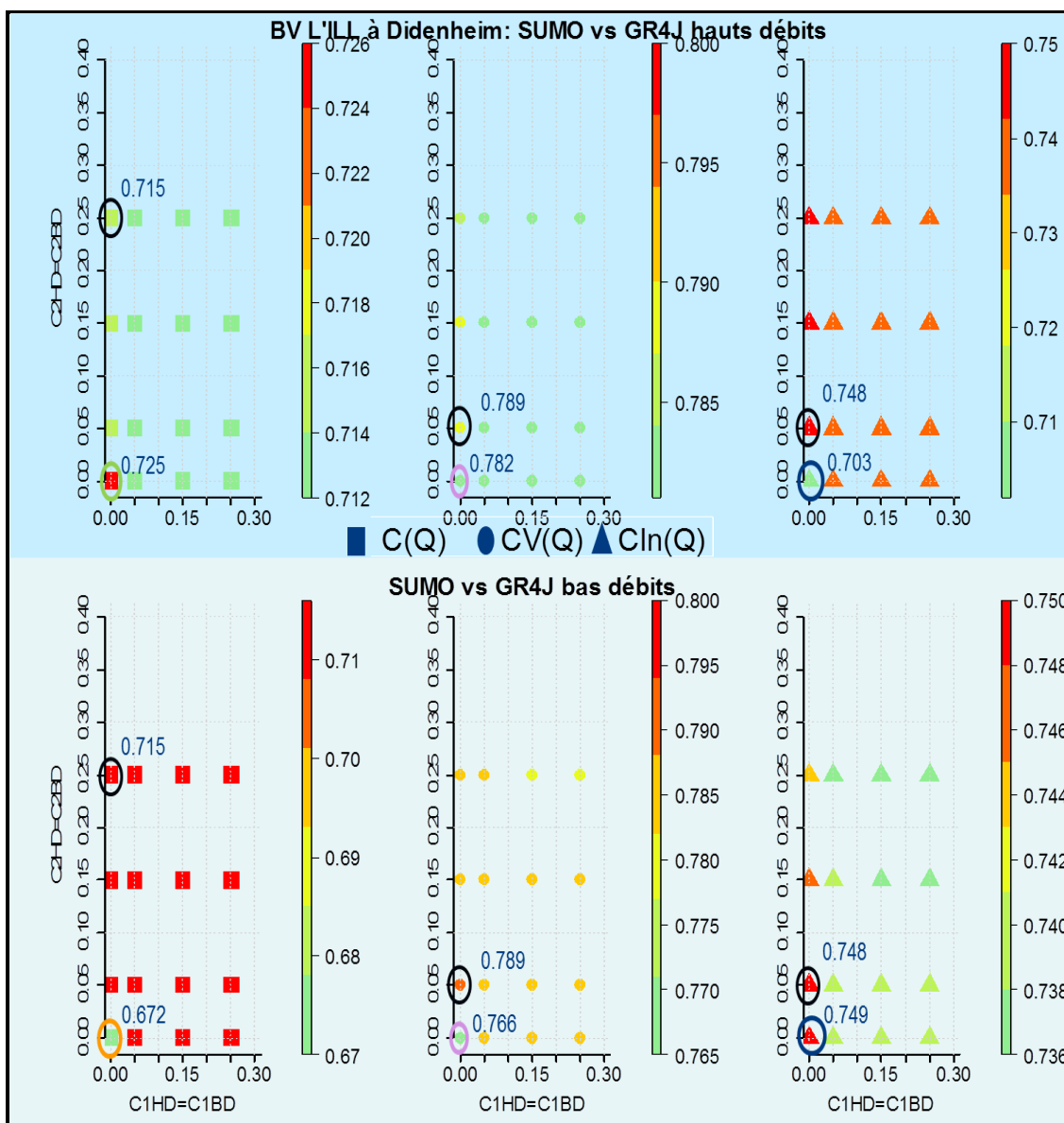


Figure 14 : Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les deux versions originales (coordonnées (0,0)) de GR4J (hauts et bas débits) et les deux GR4J modifiés avec l'approche SUMO. Bassin versant de l'Ille à Didenheim.

Dans la Figure 14, nous pouvons observer les critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir du débit SUMO (moyenne des débits simulés modifiés par l'équation du SUMO) pour les deux versions utilisés de GR4J version hauts débits (3 graphes sur la surface couleur turquoise) et bas débits (3 graphes sur la surface couleur vert d'eau). On voit le même comportement que pour la période de calage : les valeurs de critères NSE obtenus à partir de SUMO n'ont pas pu battre les critères NSE trouvés à partir des GR4J originaux pour la fonction-objectif principale (la fonction-objectif principale dans la version GR4J pour les hauts débits est le critère sur les débits (C(Q))). En revanche, les critères différents de la fonction-objectif principale (qui dans la version GR4J pour les hauts débits sont (C(\sqrt{Q})) et (C(ln(Q)))) ont été battus.

La remarque la plus intéressante à faire est que dans la totalité des critères testés, les débits SUMO ont une meilleure performance si C1HD et C1BD sont égaux à zéro, donc on peut supposer que pour notre bassin versant, la fonction GR4J du réservoir de production simule assez bien ce qui se passe au niveau du sous-sol.

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

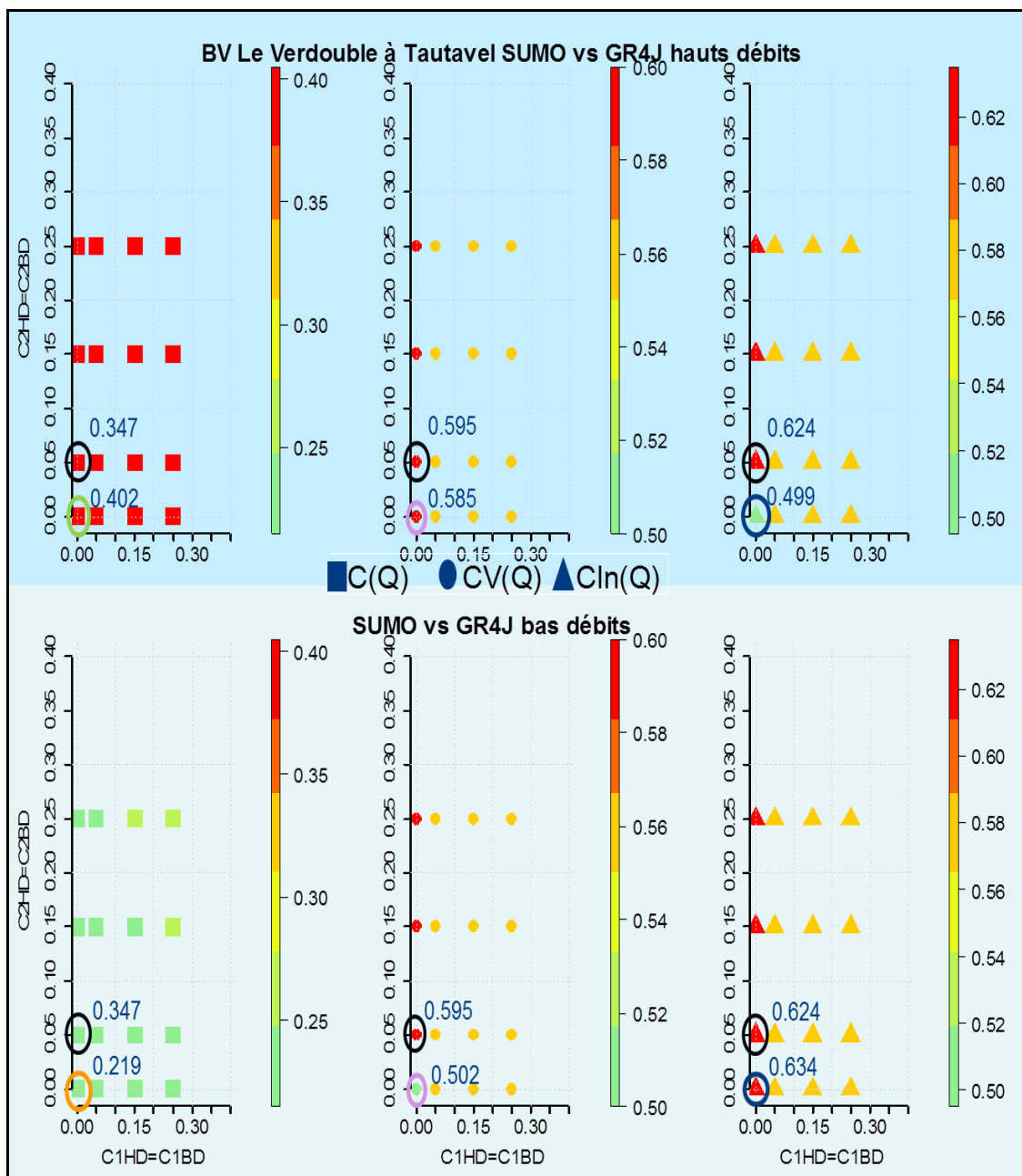


Figure 15 : Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les deux versions originales (coordonnées (0,0)) de GR4J (hauts et bas débits) et les deux GR4J modifiés avec l'approche SUMO. Bassin versant du Verdouble à Tautavel.

Dans la Figure 15, nous pouvons dire que l'on voit presque la même situation que dans le bassin versant de l'Ille à Didenheim. La seule chose qui change est que les critères NSE les plus hauts, trouvés à partir du débit SUMO, sont pour les coordonnées $X=0$ et $Y=0.05$, donc très proches des coordonnées $X=0$, $Y=0$ représentant les critères NSE trouvés à partir des modèles GR4J originaux.

En conclusion, nous pouvons dire que l'approche super-modèle pour les deux bassins versants a fonctionné d'une manière régulière, 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 14 et 15 voyez les annexes 7.5 et 7.6 du présent rapport de stage.

• BIAIS

En utilisant le même processus que pour le période du calage, on obtient les résultats suivants lorsque l'on observe le biais :

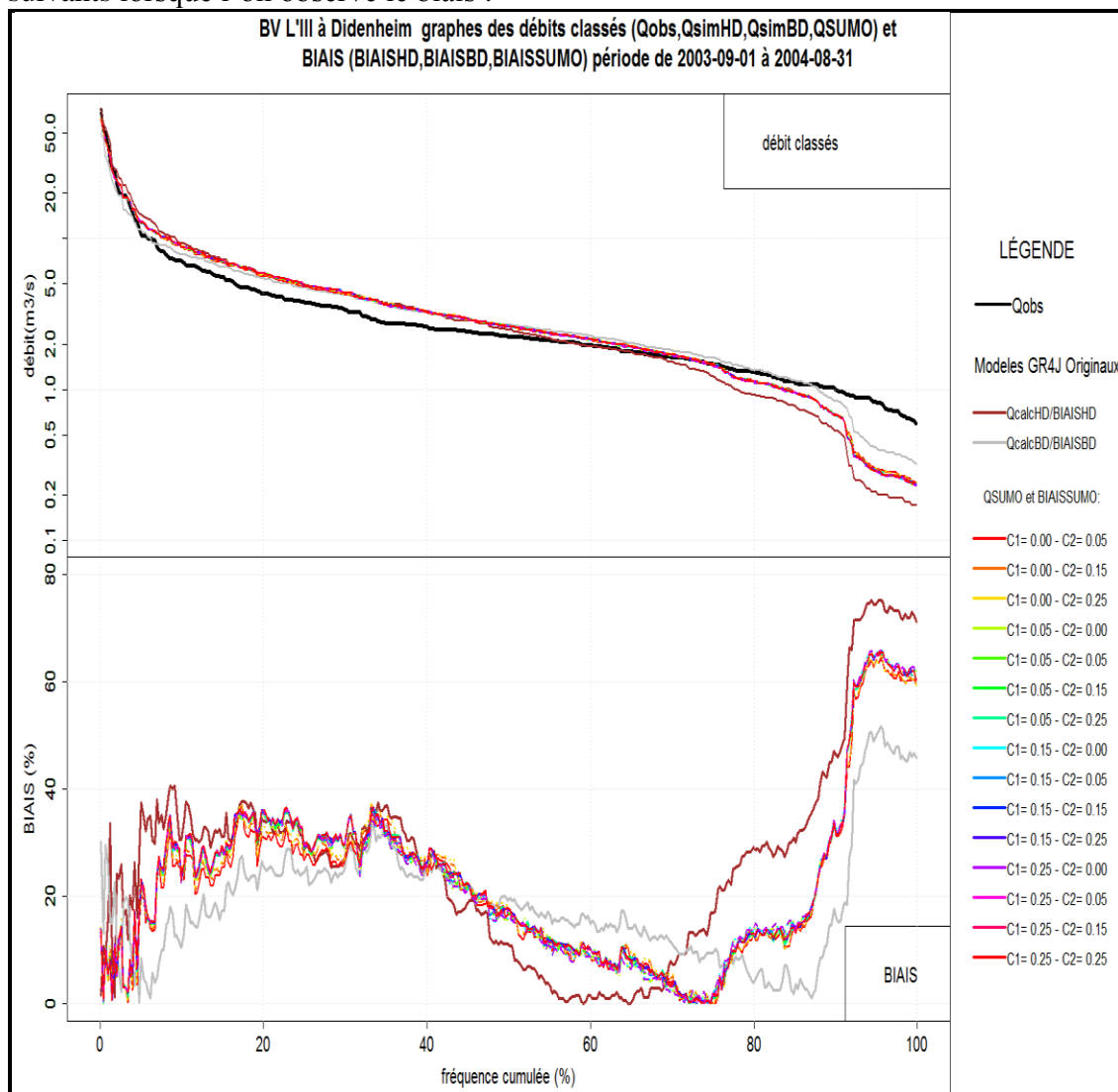


Figure 16 : courbes des débits classés et BIAIS pour le bassin versant de l'III à Didenheim. Dans la légende : Qobs : débit observé, QcalcHD : débits classés simulés originaux pour les hauts débits, QcalcBD : débits classés simulés originaux pour les bas débits, QSUMO : Moyens des débits (hauts et bas débits) simulés modifiés par l'approche SUMO, BIAISHD : biais produit par la différence entre les débits observés et les débits simulés pour le modèle GR4J version hauts débits, BIAISBD : biais produit par la différence entre les débits observés et les débits simulés pour le modèle GR4J version bas débits, BIAISSUMO : biais produit par la différence entre les débits observés et les moyens des débits simulés (hauts et bas débits) par l'approche SUMO.

Ici nous pouvons voir que les biais trouvés pour le débit SUMO, entre les 0 et 50% de la fréquence cumulée, le biais sont considérables (entre 15 et 40%) mais il commence à descendre jusqu'à presque 0% (70-75% fréquence cumulée), signifiant une meilleure performance que celles des modèles GR4J originaux. Malheureusement, pour la simulation de bas débits on a une mauvaise performance du débit SUMO produisant des biais élevés (60% environ). Par rapport aux débits classés nous pouvons voir qu'aucune des simulations de débits n'arrive à suivre d'une manière convaincante la courbe des débits observés pour cette année hydrologique.

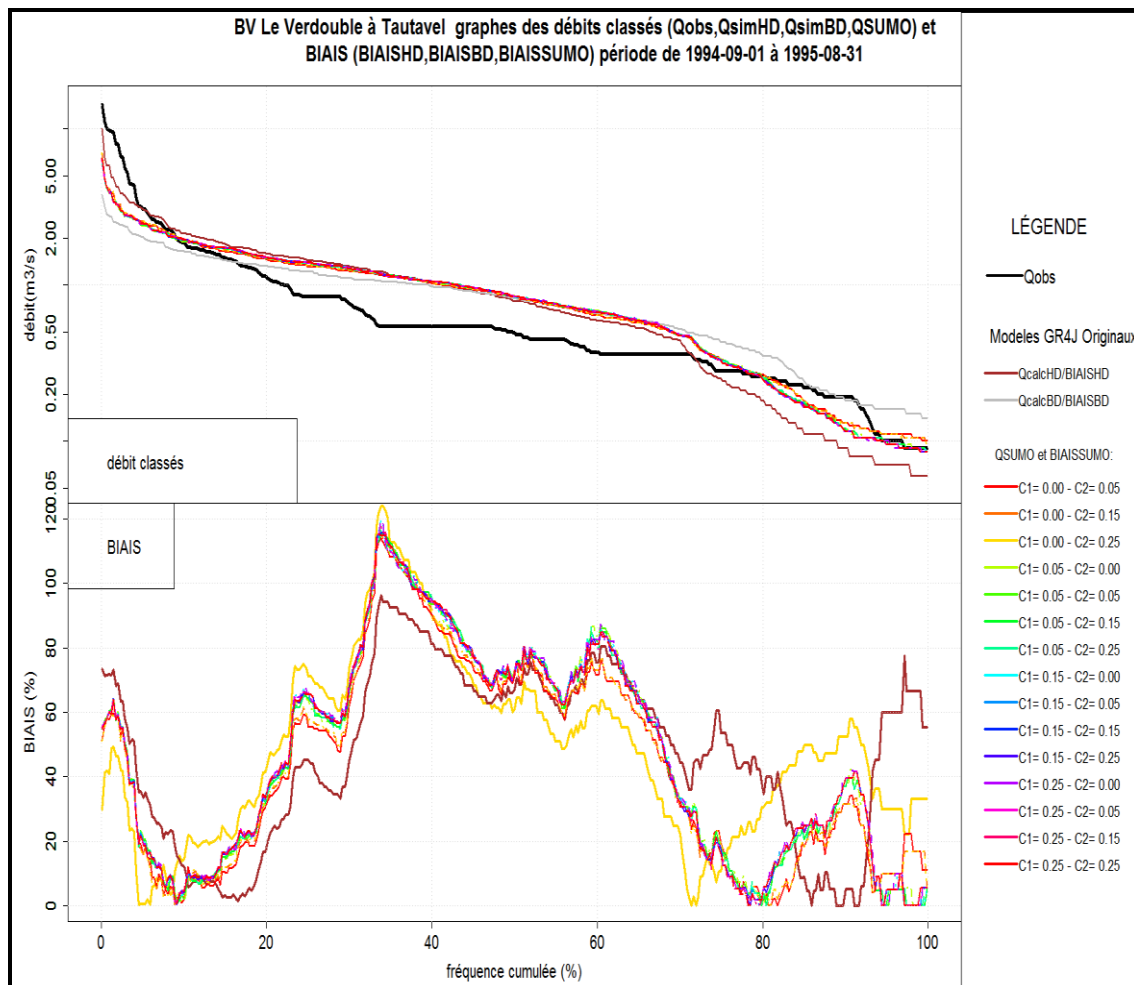


Figure 17 : courbes des débits classés et BIAIS pour le bassin versant de l'Ill à Didenheim. Dans la légende : Qobs : débit observé, QcalcHD : débits classés simulés originaux pour les hauts débits, QcalcBD : débits classés simulés originaux pour les bas débits, QSUMO : Moyens des débits (hauts et bas débits) simulés modifiés par l'approche SUMO, BIAISHD : biais produit par la différence entre les débits observés et les débits simulés pour le modèle GR4J version hauts débits, BIAISBD : biais produit par la différence entre les débits observés et les débits simulés pour le modèle GR4J version bas débits, BIAISSUMO : biais produit par la différence entre les débits observés et les moyens des débits simulés (hauts et bas débits) par l'approche SUMO.

La Figure 17 nous montre d'une façon générale que toutes les simulations de débits faites pour l'année hydrologique choisie ont une réponse très mauvaise, car on a obtenu dans tous les cas, des biais très élevés (120%). Dans le graphe des débits classés, aucune des simulations n'a pu suivre correctement la courbe de débits classés observés (courbe noire). Par contre la partie positive est que pour la première fois on voit que les débits SUMO ont eu une meilleure performance au moment de simuler les bas débits (biais entre 0 et 15%) par rapport au débit simulé trouvé avec la version GR4J pour les 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. Pour les crues, dans le cas de l'Ill, la date choisie est le 09 août 2007; et le 28 avril 1993 dans le cas du bassin versant du Verdoube. Comme on ne peut pas montrer tous les hydrogrammes pour chaque coefficient C, pour des raisons de concision, on ne montrera qu'un hydrogramme, qui pour le bassin versant de l'Ill à Didenheim est $C_{1HD}=C_{1BD}=0.00$ et $C_{2HD}=C_{2BD}=0.05$ et pour le bassin versant du Verdoube à Tautavel est $C_{1HD}=C_{1BD}=0.00$ et $C_{2HD}=C_{2BD}=0.05$.

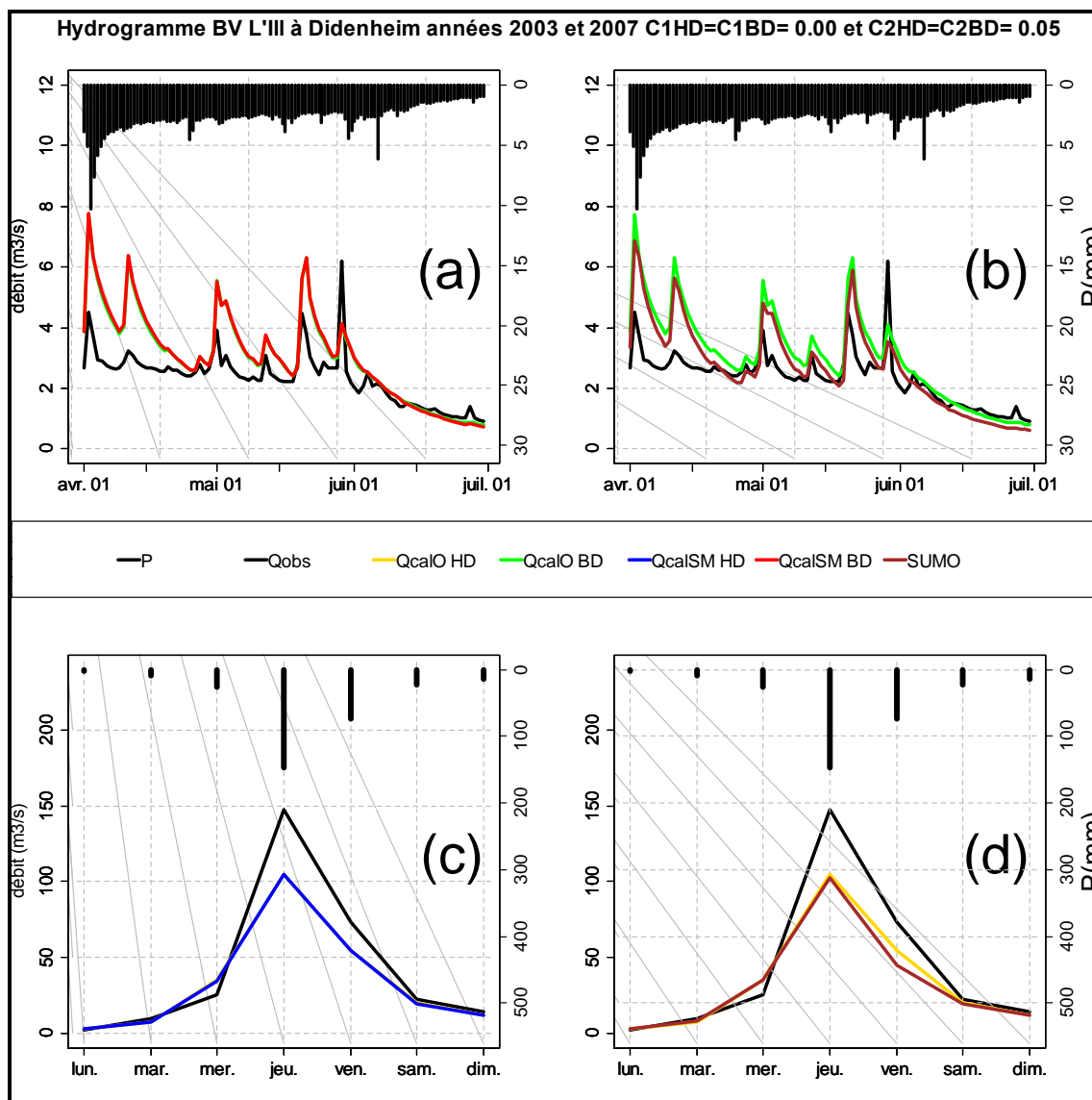


Figure 18 : hydrogrammes d'évènements extrêmes : étiage de l'année 2003 (a,b) et crue observée de l'année 2007 (c,d). BV de l'III à Didenheim. Dans la légende : P : pluie, Qobs : débit observé, QcalOHD,BD : débit simulé original hauts (HD) et bas (BD) débits, QcalSMHD,BD : débit simulé modifié, SUMO : débit SUMO.

Notons dans la Figure 18(a) que pour la période d'étiage, il n'y a pas de différence entre les performances des deux types de débits (simulé original et simulés modifiés pour bas débits). De nouveau, aucun des deux débits simulés n'arrive à reproduire correctement le débit observé. Dans la Figure 19(b), le débit SUMO est en-dessous du débit simulé pour les bas débits, mais il est loin de reproduire de manière exacte la courbe de débits observés (couleur noire). Dans le cas de la crue dans la Figure 19(c), aucun des débits simulés n'arrive à reproduire le débit observé. La même chose se passe dans la Figure 19(d) avec le débit SUMO.

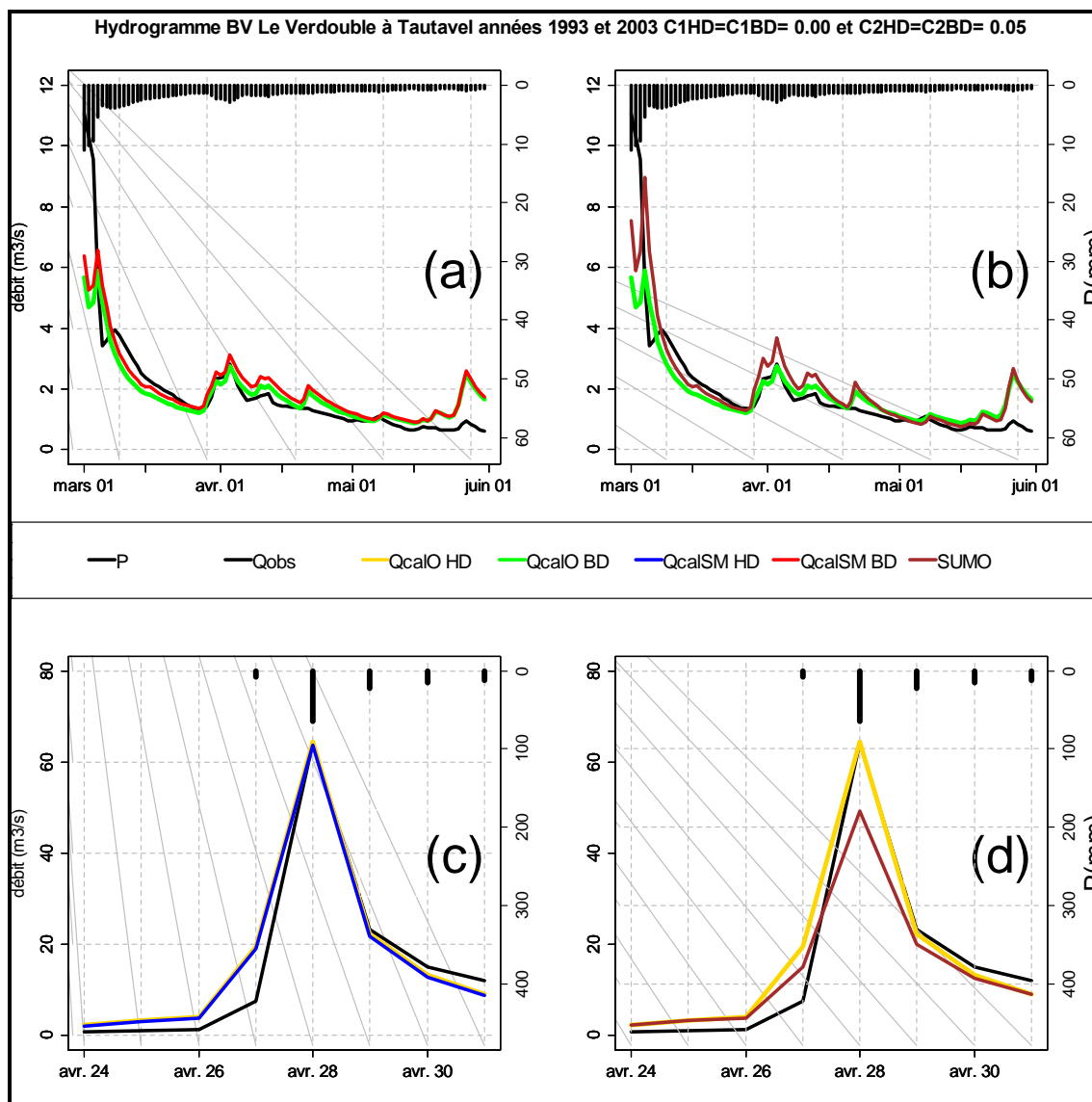


Figure 19 : hydrogrammes d'événements extrêmes : étiage de l'année 2003 et crue observée de l'année 1993. BV du Verdoubte à Tautavel.

Notons dans la Figure 19(a) que le débit simulé modifié par SUMO et le débit original GR4J pour les bas débits tendent à surestimer le débit observé. Dans la Figure 20(b), on peut observer la même chose que dans la Figure 20(a). Dans la Figure 20(c) dans le cas de la crue, on voit de bonnes performances des deux débits simulés pour les hauts débits (i.e. débits simulés originaux et débit simulé modifié par SUMO pour les hauts débits). Enfin, dans la Figure 20(d), on voit une amélioration du débit SUMO, mais il continue à être très bas par rapport au débit simulé original pour les 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 (débit SUMO) dans la période de validation pour nos deux bassins versants. En regardant les Figures 14 et 15, et comme on l'avait vu pour la période de calage, on remarque une amélioration des critères différents de la fonction-objectif principale. 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 entre les débits simulés modifiés, débit SUMO et les débits simulés originaux Scénario 2.

4.3.1 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 trois versions de GR4J (hauts, racine et bas débits) est présenté ci-dessous :

Tableau 3 : Valeurs de paramètres et critères Nash-Sutcliffe GR4J originaux période du calage

Station	A1080330			Y0655010		
Bassin versant	L'III à Didenheim			Le Verdouable à Tautavel		
Période de calage	1973-1991			1973-1991		
Modèle hydrologique	GR4J			GR4J		
Paramètres	hauts débits	débits intermédiaires	bas débits	hauts débits	débits intermédiaires	bas débits
X_1 (mm)	406.6	462.66	632.7	393.4	462.66	1085.72
X_2 (mm)	-0.77	-0.77	-1.01	-2.48	-0.77	-3.86
X_3 (mm)	22.77	27.29	31.19	45.14	27.29	60.34
X_4 (jours)	2.2	2.1	1.99	1.6	2.1	1.63
fonction-objectif	Critères Nash-Sutcliffe			Critères Nash-Sutcliffe		
$C(Q)$	0.673	0.667	0.616	0.536	0.503	0.284
$C(\sqrt{Q})$	0.727	0.735	0.714	0.539	0.482	0.52
$C(\ln(Q))$	0.652	0.704	0.728	0.347	0.382	0.585

La seule différence par rapport au Tableau 1 est qu'on a ajouté les valeurs correspondant à la version sur les racines de débits. Par rapport aux paramètres trouvés pour cette version, il faut dire qu'effectivement, la version pour les racines des débits représente un compromis entre la version pour les hauts débits et la version pour les bas débits.

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

Nous ferons une analyse de sensibilité à la performance globale des critères NSE calculés à partir du débit SUMO et on va les comparer à ceux trouvés à partir de GR4J originaux (hauts, intermédiaires et bas débits).

4.3.2.1 Analyse de sensibilité globale.

Les méthodes utilisées pour comparer la performance de l'approche SUMO et les trois modèles hydrologiques GR4J sont les suivantes :

- **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 pour le scénario 2 (équation (9)) et avec les deux hypothèses décrites dans l'équation (12). Le même concept de graphique des échelles de couleur appliqué dans le scénario 1 sera de nouveau utilisé, car il a montré être la meilleure option, mais au lieu de montrer deux jeux de graphes, on montrera trois graphes différents: le premier (trois graphes sur la surface couleur turquoise) va représenter les résultats pour la version de hauts débits, le deuxième (trois graphes sur la

surface couleur blanche) pour la version des débits intermédiaires, et le troisième (trois graphes sur la surface couleur vert d'eau) pour la version des bas débits. 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.

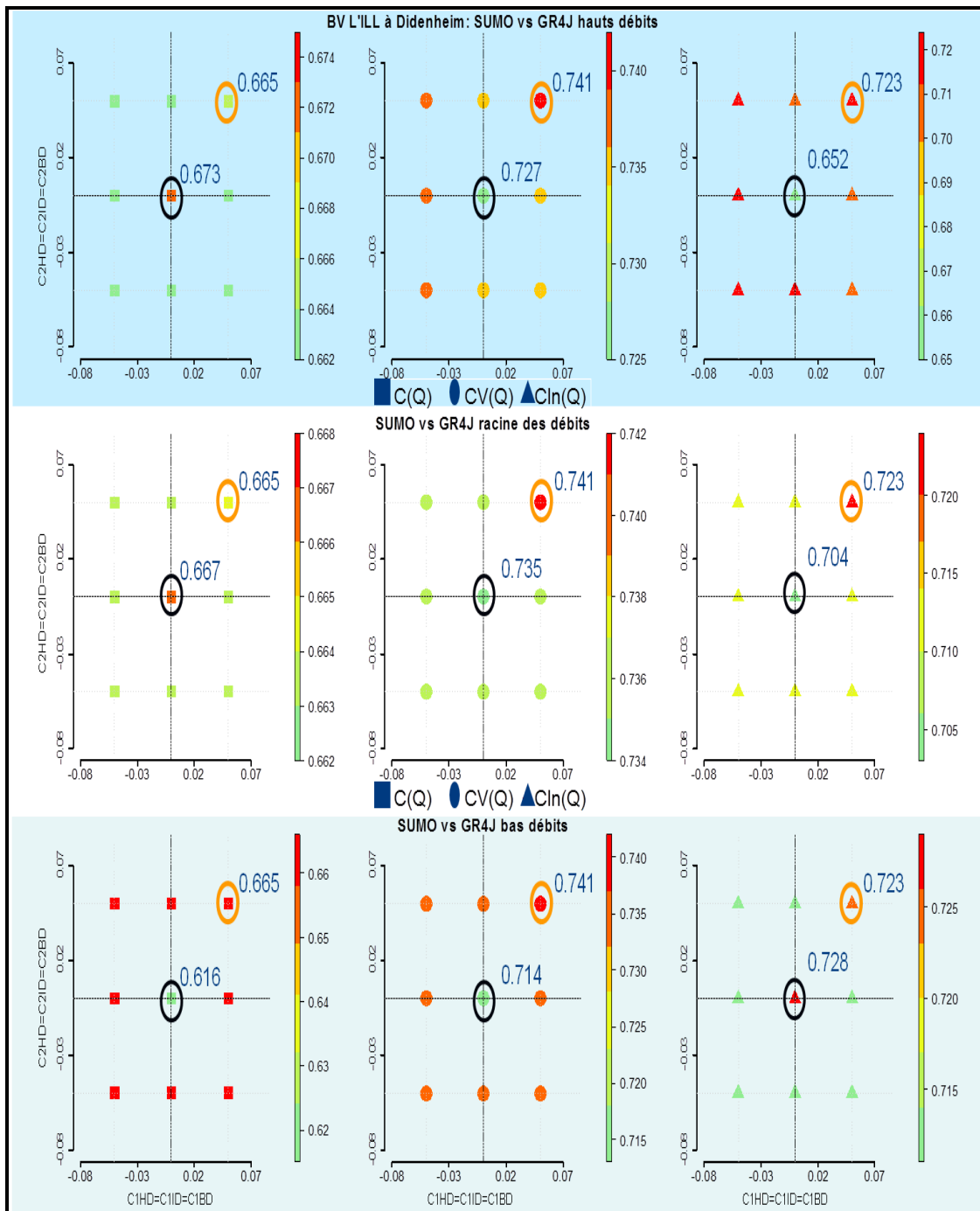


Figure 20 : Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les trois versions originales (coordonnées (0,0)) de GR4J (hauts, intermédiaires et bas débits) et les trois GR4J modifiés avec l'approche SUMO. Bassin versant de l'Ill à Didenheim. En ligne les graphes pour chaque version des modèles, en colonne les graphes pour chaque critère utilisé pour l'évaluation.

Comme nous pouvons voir dans la Figure 20, comme pour le scénario 1, SUMO ne peut pas battre le critère NSE du fonction-objectif principal produit pour les modèles hydrologiques GR4J originaux. En revanche, on voit que pour les critères NSE produits par le débit SUMO, différents de la fonction-objectif principale, nous avons une

efficacité supérieure par rapport aux critères NSE produits par les modèles originaux de GR4J. La nouveauté dans ce scénario est qu'on a testé des coefficients négatifs pour voir la performance due à ce type de coefficient. Une autre chose important à dire est qu'au moment de faire les tests avec les différents coefficients C_{1i} et C_{2i} , les critères NSE les plus hauts trouvés à partir du débit SUMO, sont des valeurs (X,Y) plus proches de la coordonnée (0,0), dans ce dans la coordonné (0.05, 0.05). Ceci nous indiquerait que s'il y a plus de versions qui participent dans l'approche SUMO, la gamme de valeurs des coefficients C pourrait se réduire.

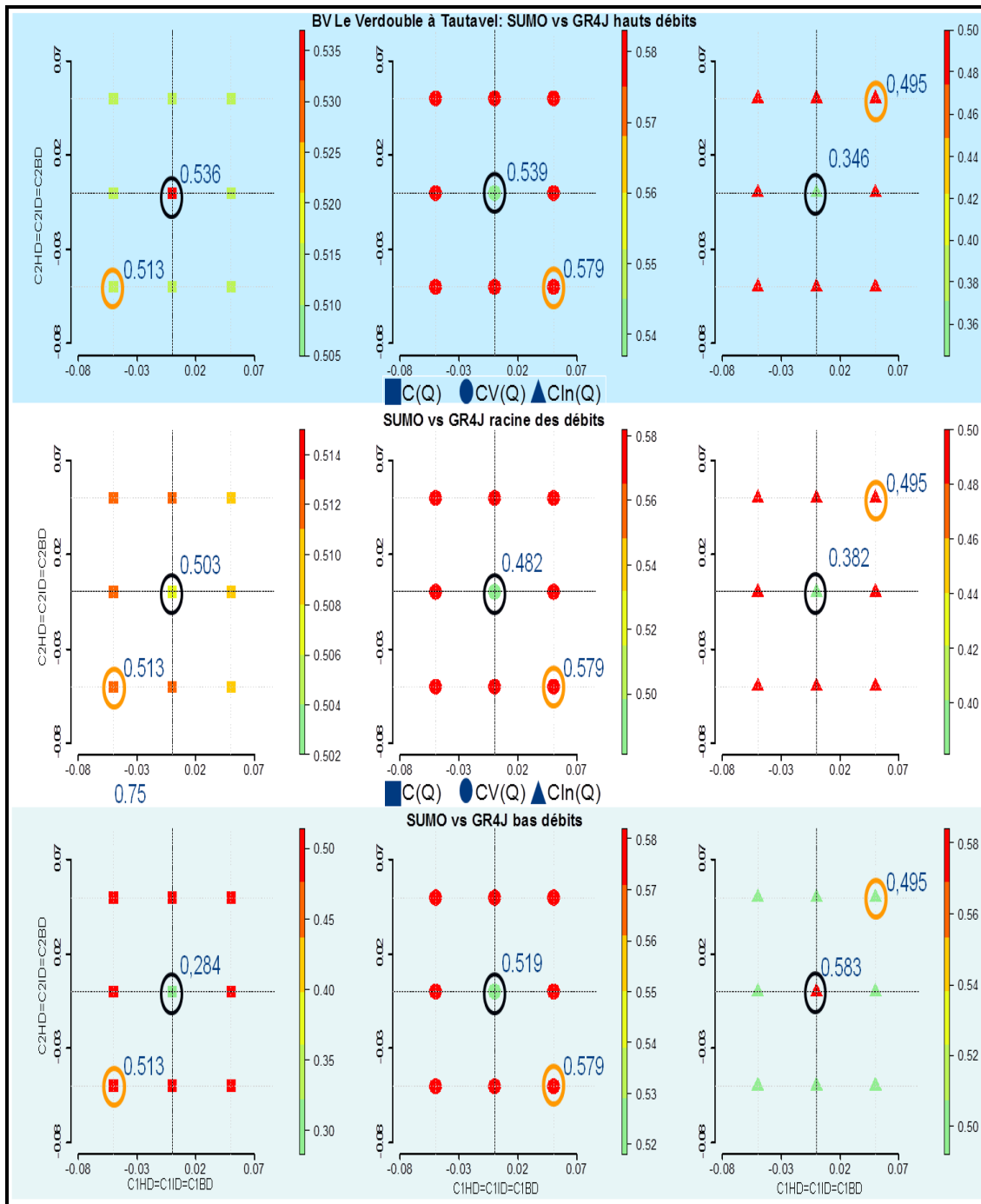


Figure 21 : Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les trois versions originales (coordonnées (0,0)) de GR4J (hauts, intermédiaires et bas débits) et les trois GR4J modifiés avec l'approche SUMO. Bassin versant du Verdoube à Tautavel. En ligne les graphes pour chaque version des modèles, en colonne les graphes pour chaque critère utilisé pour l'évaluation.

Dans le cas du BV du Verdouble à Tautavel (Figure 21), on ne voit pas la même uniformisation que dans le bassin versant de l'Ill à Didenheim (valeur la plus élevée aux coordonnées $X=0.05$, $Y=0.05$). Aussi, dans le cas du critère NSE pour les débits ($C(Q)$), des trois versions représentées dans la Figure 21, les valeurs les plus performantes ont été calculées avec des coefficients négatifs.

Il faut remarquer que dans la version pour les racines des débits, les coefficients NSE trouvés à partir des débits SUMO ont battu ceux calculés à partir du modèle original GR4J pour les racines des débits.

Pour finir, à la différence des débits SUMO, dans le cas des critères NSE calculés à partir des débits simulés modifiés par l'approche SUMO, une meilleure performance a été observée par rapport à celle des modèles originaux GR4J (hauts, racines et bas débits) ; ces résultats sont montrés dans les annexes 7.7 et 7.8.

4.3.3 Résultats modèle GR4J original pour la période de contrôle (1992-2009).

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

Tableau 4 : Critères de Nash-Sutcliffe pour GR4J originaux pour la période de contrôle 3 versions de GR4J

Station	A1080330			Y0655010		
Bassin versant	L'Ill à Didenheim			Le Verdouble à Tautavel		
Période de contrôle	1992-2009			1992-2009		
Modèle hydrologique	GR4J			GR4J		
Versions	hauts débits	débits intermédiaires	bas débits	hauts débits	débits intermédiaires	bas débits
$C(Q)$	0.725	0.72	0.672	0.402	0.359	0.219
$C(\sqrt{Q})$	0.782	0.784	0.766	0.585	0.498	0.502
$C(\ln(Q))$	0.703	0.735	0.749	0.499	0.478	0.634

4.3.3.1 Analyse de sensibilité globale

Comme dans le cas précédent, nous utiliserons les graphes d'échelle de couleur des critères Nash-Sutcliffe pour comparer les résultats entre les modèles originaux GR4J et l'approche SUMO afin de déterminer entre les deux méthodologies laquelle a eu la meilleure performance. Il faut préciser que seulement les résultats des débits SUMO (moyenne des débits simulés modifiés par l'approche SUMO) sont montrés :

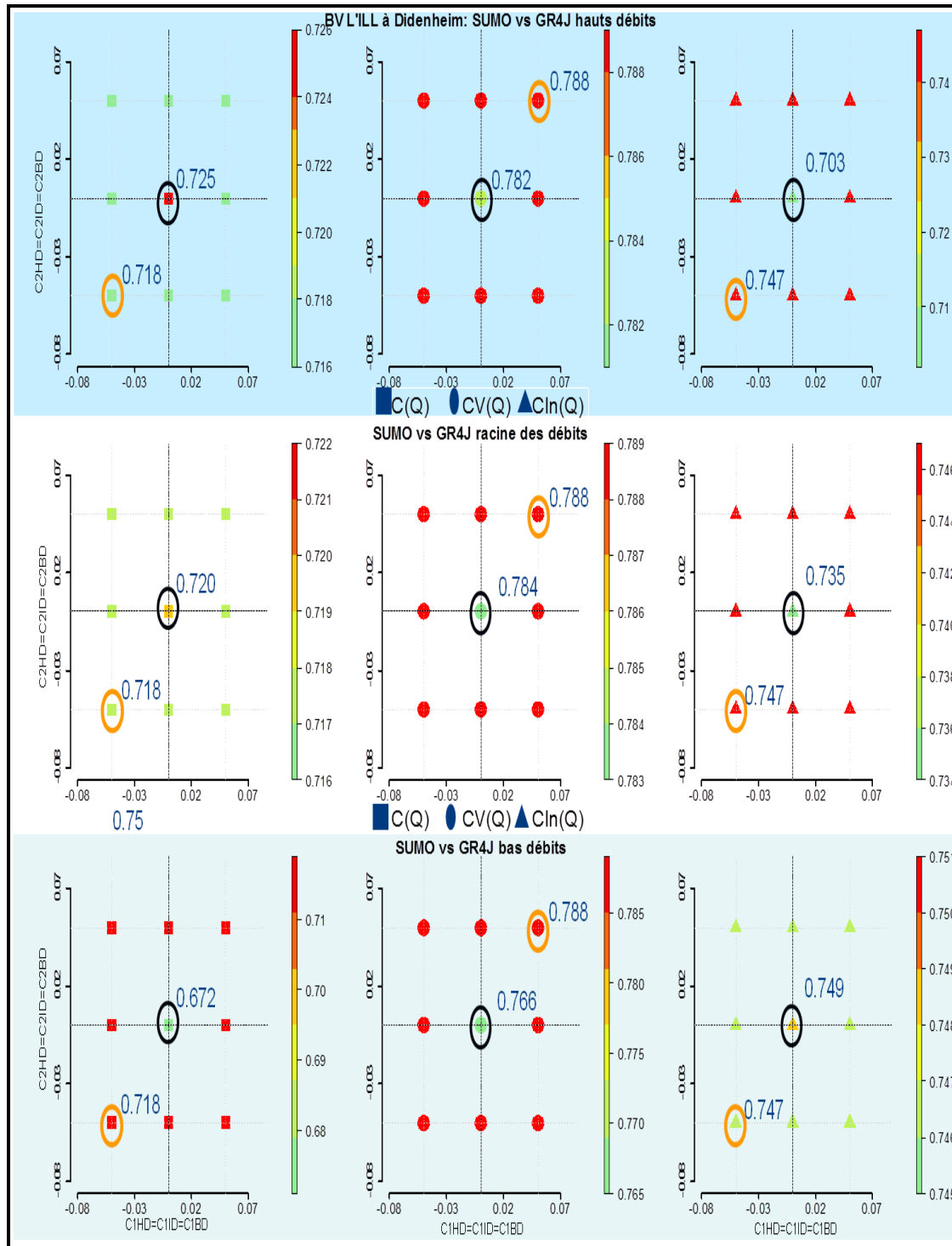


Figure 22 : Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les trois versions originales (coordonnées (0,0)) de GR4J (hauts, intermédiaires et bas débits) et les trois GR4J modifiés avec l'approche SUMO. Bassin versant de l'Ill à Didenheim. En ligne les graphes pour chaque version des modèles, en colonne les graphes pour chaque critère utilisé pour l'évaluation.

Dans la période de contrôle du BV de l'Ill à Didenheim, on voit (Figure 22) qu'il se produit le même comportement que dans la période du calage : on n'a pas pu battre avec SUMO le critère calculé pour la fonction-objectif principale pour chaque version. En revanche, les critères différents de la fonction-objectif principale, ont une meilleure performance que les critères NSE calculés à partir des modèles GR4J originaux. Aussi, une différence par rapport à la période de calage dans ce bassin versant, c'est que dans

la période de contrôle, les coefficients négatifs ont été plus performants que les coefficients positifs.

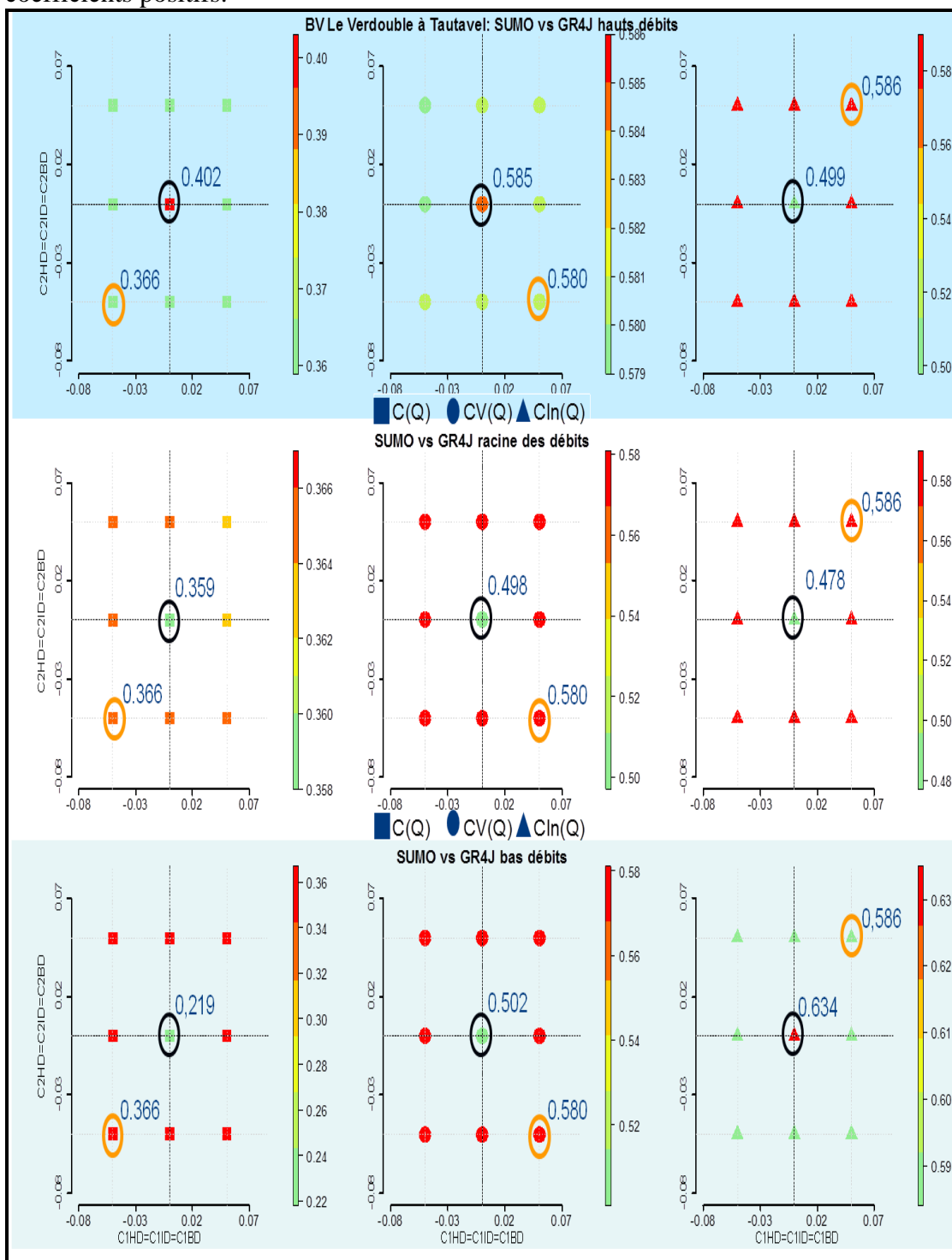


Figure 23 : Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour les trois versions originales (coordonnées (0,0)) de GR4J (hauts, intermédiaires et bas débits) et les trois GR4J modifiés avec l’approche SUMO. Bassin versant du Verdoubre à Tautavel. En ligne les graphes pour chaque version des modèles, en colonne les graphes pour chaque critère utilisé pour l’évaluation.

Dans la Figure 23, nous voyons les valeurs des critères NSE trouvés à partir des modèles GR4J originaux (coordonnées (0,0)) et la moyenne des débits simulés modifiés par l’approche SUMO (débit SUMO) pour la période de contrôle. Ici, comme dans la période de calage, on n’a pu battre que les critères (C(Q), (C(√Q)) et (C(ln(Q)))) comprenant aussi le critère pour la fonction-objectif principale, dans la version de

racines des débits. Par contre, si on fait la comparaison entre les critères NSE trouvés à partir des débits simulés modifiés par l'approche SUMO et les critères calculés à partir des débits simulés originaux (annexes 7.9 et 7.10), on peut remarquer que les premières ont des meilleures performances.

4.3.4 Conclusion et Discussion

Dans ce chapitre, on a montré l'efficacité des résultats de l'approche SUMO mise en place à partir de l'interaction en temps réel des deux variables internes (Q9 et Q1) en utilisant trois versions du modèle GR4J (hauts, intermédiaires et bas débits). Les résultats obtenus sont similaires à ceux du scénario 1 : une amélioration des critères Nash-Sutcliffe 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(lnQ)), sauf dans le cas du BV du Verdoube à Tautavel, où dans les deux périodes (calage et contrôle), on a pu voir que dans la version de racines des débits, les critères calculés à partir du débit SUMO sont plus performants.

4.4 Comparaison de la performance SUMO du scénario 1 (version pour les hauts et bas débits) aux approches multi-modèles habituelles : l'étude d'Oudin et al. (2006)

4.4.1 Introduction

Oudin et al. (2006) ont publié un article présentant une méthode pour combiner des modèles hydrologiques pour produire une simulation des débits plus satisfaisante. Cette approche consiste en une moyenne a posteriori, et seulement en période de validation. Cette étude est idéale pour comparer les performances de SUMO car ils ont utilisé le modèle GR4J en versions hauts et bas débits. Ils se basent sur l'équation suivante :

$$\overline{Q_{sim}} = \alpha * \overline{Q_{simCQ}} + (1-\alpha) * \overline{Q_{simClnQ}} \quad (13)$$

Le calcul du facteur α , se fait sur la base de 4 propositions, mais dans mon stage je n'en ai utilisé que deux :

$$\begin{cases} \alpha = s \\ \alpha = \frac{s^3}{s^3 + (1-s)^3} \end{cases} \quad (14)$$

Afin de comparer notre approche à cette étude, 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. (2006) 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, en période de validation, en se basant sur les trois critères de Nash-Sutcliffe, avec les deux propositions montrées dans l'équation (14).

4.4.2 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 :

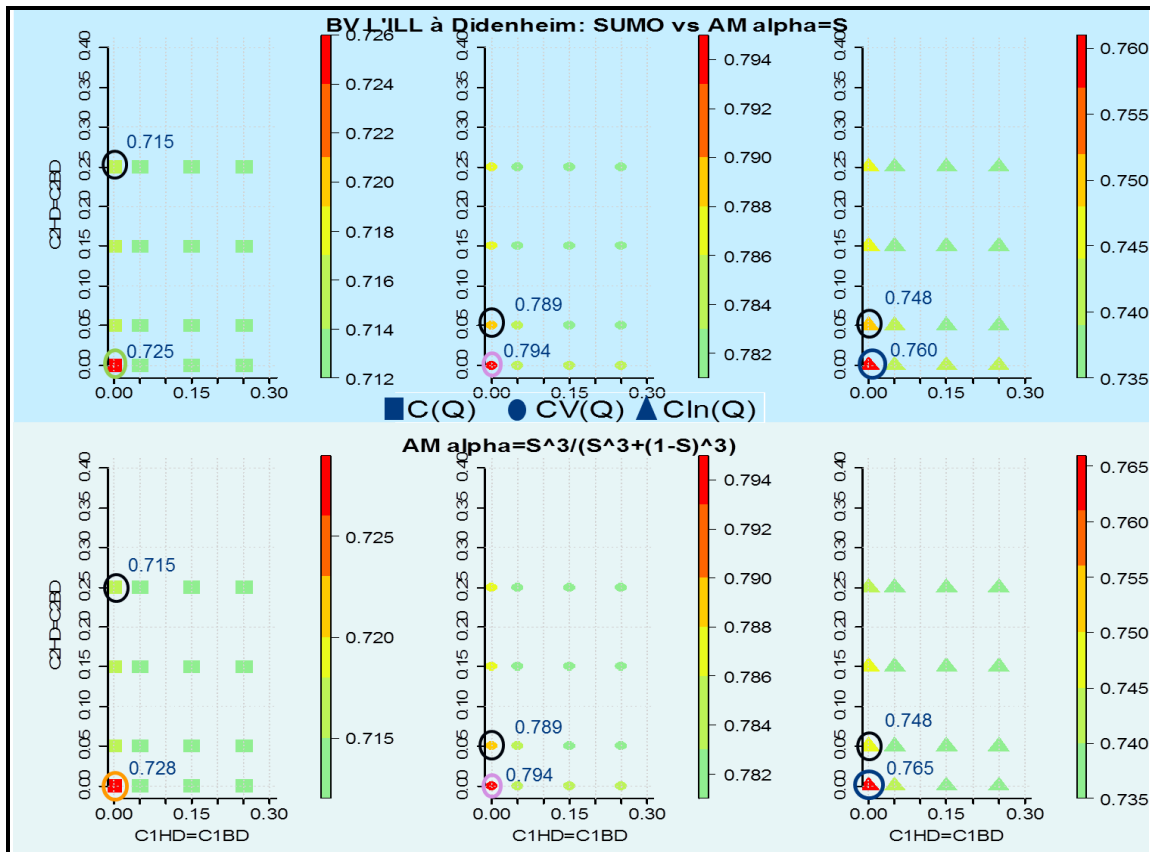


Figure 24 : Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour l'approche d'Oudin et al. (2006) (coordonnées (0,0)) sur GR4J original (hauts et bas débits) et les moyennes de l'approche SUMO. Bassin versant de l'Ill à Didenheim.

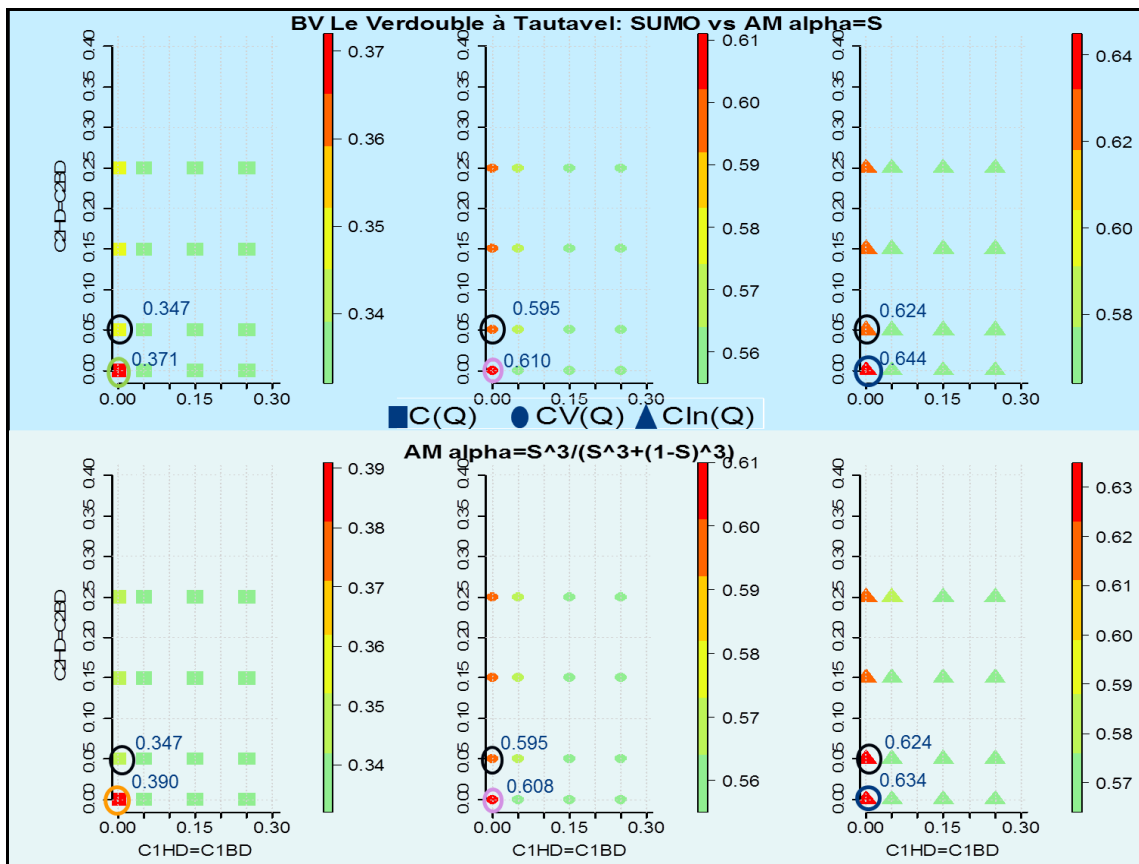


Figure 25 : Critères de Nash-Sutcliffe calculés pour l'approche d'Oudin et al. (2006) (coordonnées (0,0)) sur GR4J original (hauts et bas débits) et les moyennes de l'approche SUMO. Bassin versant du Verdoubie à Tautavel.

Dans la Figure 24 et 25, nous pouvons observer les critères de Nash-Sutcliffe calculés avec l'approche SUMO. Ils sont comparés avec les 3 critères proposés par **Oudin et al. (2006)**, qui sont représentés dans le graphique par la coordonnée (0,0). La première ligne dans chaque figure (18 et 19, surface couleur turquoise et vert d'eau) représente les valeurs de critères de Nash-Sutcliffe pour les débits $C(Q)$ (carrés), racine des débits $C(\sqrt{Q})$ (ronds) et logarithmes de débits $C(\ln(Q))$ (triangles) des super-modèles (coordonnées différentes 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 14.

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 de cette section, regarder les annexes 7.11 et 7.12.

Une des raisons pour lesquelles on ne dépasse pas cette approche est à cause, peut être, de la simplification de l'équation SUMO appliquée dans la climatologie dans le domaine de l'hydrologie (équation (4)).

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 cela, 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 bibliographique, j'ai étudié et appliqué l'équation de super-modèle, développée dans le domaine de la climatologie. On a fait une petite modification à l'équation originale au moment de l'appliquer au domaine de l'hydrologie, puisque les modèles climatiques sont beaucoup plus complexes que les modèles hydrologiques, donc la simplification, a rendu l'équation plus maniable et également applicable au domaine de l'hydrologie.

La deuxième étape a été la mise en place de SUMO sur deux scénarios : le premier avec deux modèles GR4J calés sur les hauts débits et sur les bas débits, et avec comme variables internes échangées les ratios S/X_1 et R/X_3 . 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 ont été le meilleur choix 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. Le deuxième scénario s'est basé sur les hauts, intermédiaires, et bas débits et avec Q_9 et Q_1 comme variables internes. Une fois calés, j'ai fait le couplage de ces 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 dans le premier scénario (deux versions de GR4J), la moyenne des débits simulés modifiés

par l'approche SUMO (débit SUMO), a des meilleures performances lorsque il s'agit des critères Nash-Sutcliffe différents de la fonction-objectif principale. Pour le deuxième scénario (hauts, intermédiaires et bas débits), 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 teste la fonction-objectif principale ? Ce qu'on pense est que cela est dû d'abord au fait qu'on n'a pas utilisé vraiment l'équation SUMO proposée par la climatologie, donc une des solutions pour que l'approche SUMO puisse avoir un fonctionnement correct, sera de trouver une équation qui soit le plus proche de l'équation proposée par **van den Berge et al. (2011)** et **Wiegerinck et al. (2013)**. Pour ce faire, il faudra modifier les équations différentielles de basse du modèle GR4J pour les variables internes choisies (réservoirs, diagrammes unitaires pour le cas de Q9 et Q1). Une autre chose qui peut affecter le correct fonctionnement de l'approche SUMO au moment de tester son efficacité, est 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**.

Enfin, 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 la simplification de l'équation du SUMO pour l'appliquer au domaine de l'hydrologie (équation (4)), ou à une mauvaise connaissance de la vraie valeur du coefficient **C**.

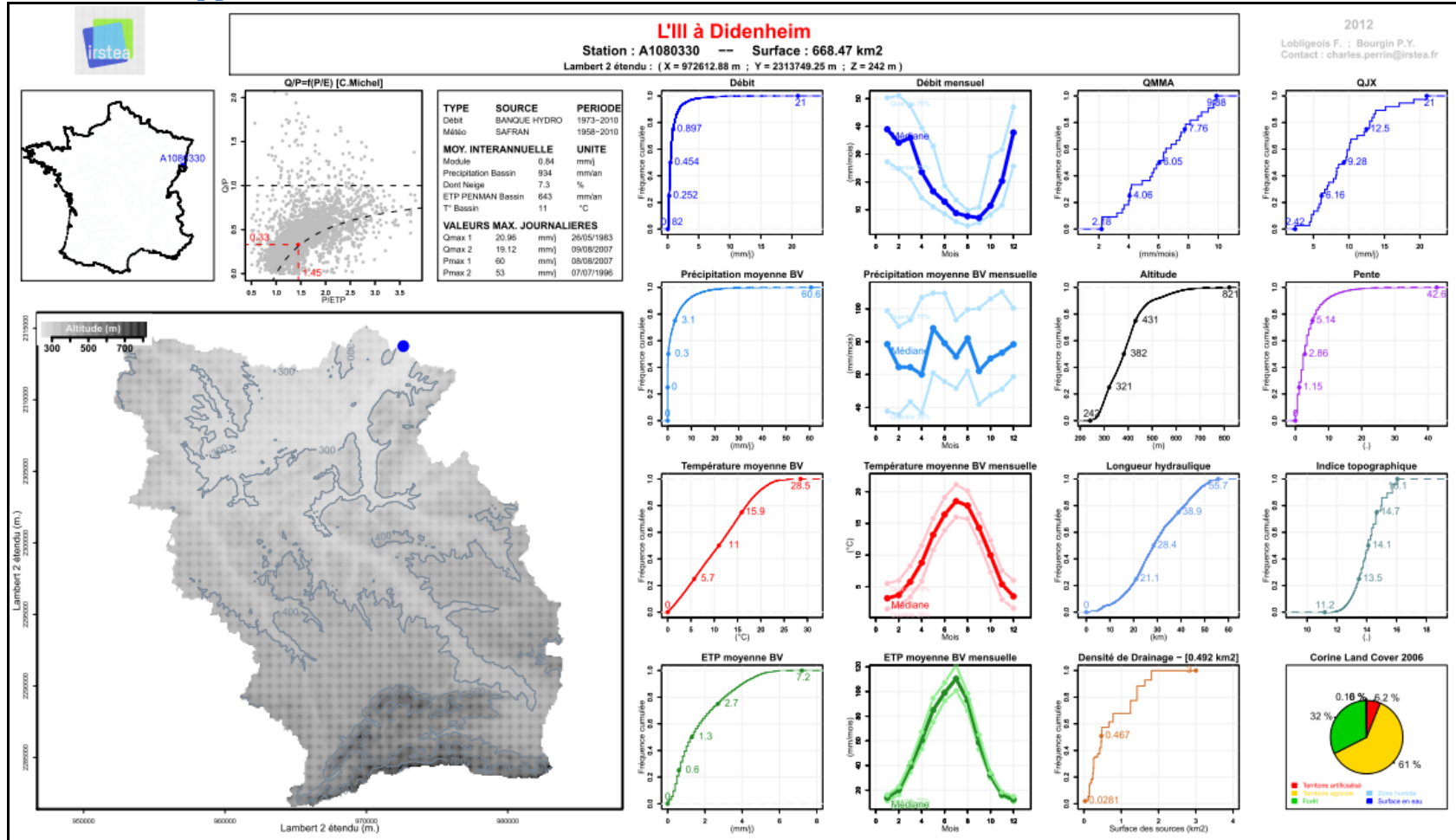
6 Références bibliographiques

- 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.

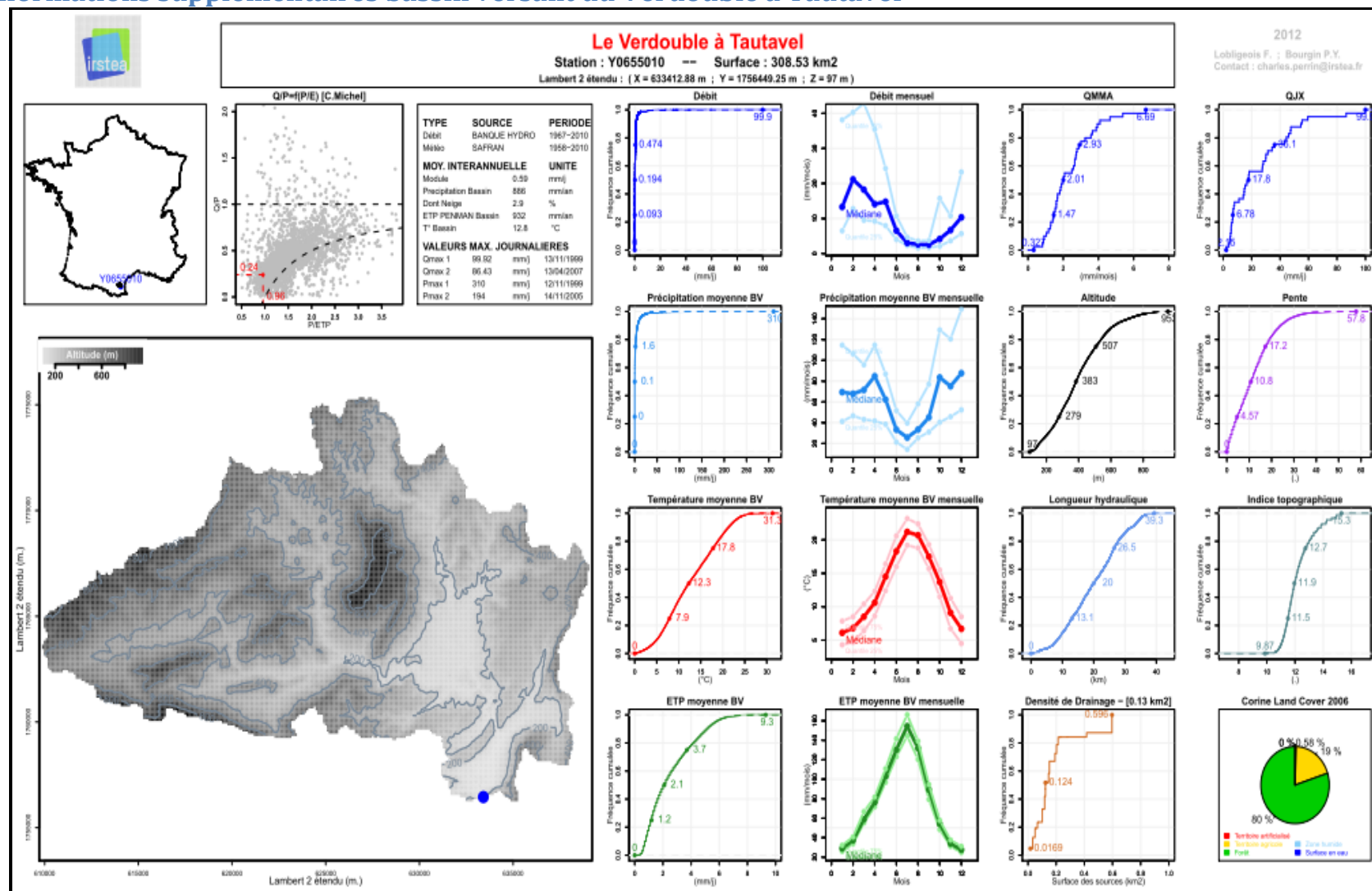
- Sittner W.T. (1976) Wmo Project on Intercomparison of Conceptual Models Used in Hydrological Forecasting. *Hydrological Sciences Bulletin* 21:203-213. DOI: 10.1080/02626667609491617.
- Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K., Tignor M., Miller H.L. (2007) IPCC, Climate change 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 Scénario 1

Hypothèse		NSE calculé 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	C(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
	$C(\sqrt{Q})$	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
	$C(\ln(Q))$	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	C(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
	$C(\sqrt{Q})$	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
	$C(\ln(Q))$	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
Version moyenne des débits (SUMO)	Critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir du débit SUMO (moyenne des débits)																
	C(Q)		0.661	0.662	0.663	0.659	0.660	0.660	0.661	0.660	0.660	0.660	0.661	0.660	0.660	0.660	0.661
	$C(\sqrt{Q})$		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
$C(\ln(Q))$		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

Ici et dans tous les autres tables ci-dessous (annexes 7.4, 7.5, 7.6) nous pouvons voir, d'abord tout au long de la deuxième et troisième ligne les coefficients $C_{1HD}=C_{1BD}$ et $C_{2HD}=C_{2BD}$ utilisés pour faire le test sur SUMO. La colonne verte représente les critères NSE trouvés sans l'application de SUMO, c'est-à-dire, avec les modèles GR4J originaux pour les versions des hauts et bas débits, donc pour les coefficients $C_{1HD}=C_{1BD}=0$ et $C_{2HD}=C_{2BD}=0$. Les lignes 4 à 9 de couleur rose, représentent les valeurs calculées à partir des débits simulés modifiés par l'approche SUMO pour chaque version de GR4J (hauts et bas débits), et pour chaque critère d'évaluation : critère sur les débits (C(Q)), sur les racines de débits ($C(\sqrt{Q})$) et sur les logarithmes des débits ($C(\ln(Q))$). Puis, entre les lignes 11 et 13 de couleur rose du tableau, on voit les valeurs NSE calculées à partir des débits SUMO (moyenne des débits simulés modifiés par l'approche SUMO), c'est-à-dire, le vrai concept de SUMO. Les valeurs ici ont été calculées pour chaque critère d'évaluation : (C(Q)), $C(\sqrt{Q})$, ($C(\ln(Q))$). Finalement, les chiffres de couleur rouge représentent les valeurs qui ont eu une meilleure performance que le critère NSE calculé avec le modèle original GR4J, et les chiffres de couleur bleue sont ceux qui ont eu une performance égale aux valeurs trouvées en utilisant le modèle GR4J original.

7.4 Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe sur la période de calage pour le bassin versant du Verdoube à Tautavel Scénario 1.

Hypothèse		NSE calculé 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	
Version moyenne des débits (SUMO)			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'III à Didenheim Scénario 1.

Hypothèse		NSE calculé GR4J Original	Critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir des débits simulés modifiés par SUMO														
			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
$C_{1HD}=C_{1BD}$		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
Version moyenne des débits (SUMO)			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	0.714	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 Scénario 1

Hypothèse		NSE calculé 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
Version moyenne des débits (SUMO)			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 sur la période de calage pour le bassin versant de l'III à Didenheim Scénario 2

Hypothèse		Critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir des débits simulés modifiés par SUMO				NSE calculé GR4J Original	Critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir des débits simulés modifiés par SUMO						
$C_{1HD}=C_{1ID}=C_{1BD}$		-0.05	-0.05	-0.05	0	0	0	0.05	0.05	0.05	0.1	0.15	0.25
$C_{2HD}=C_{2ID}=C_{2BD}$		-0.05	0	0.05	-0.05	0	0.05	-0.05	0	0.05	0.1	0.15	0.25
GR4J version hauts débits	N(Q)	0.672	0.672	0.672	0.673	0.673	0.673	0.673	0.673	0.675	0.673	0.672	0.669
	$N(\sqrt{Q})$	0.725	0.725	0.725	0.727	0.727	0.727	0.729	0.729	0.736	0.731	0.732	0.733
	$N(\ln(Q))$	0.645	0.645	0.646	0.652	0.652	0.653	0.659	0.659	0.673	0.667	0.673	0.684
GR4J version racine des débits	N(Q)	0.667	0.667	0.667	0.667	0.667	0.667	0.667	0.667	0.668	0.666	0.666	0.666
	$N(\sqrt{Q})$	0.734	0.734	0.734	0.735	0.735	0.735	0.735	0.735	0.741	0.735	0.735	0.736
	$N(\ln(Q))$	0.702	0.702	0.702	0.703	0.704	0.703	0.705	0.705	0.717	0.707	0.708	0.711
GR4J version bas débits	N(Q)	0.609	0.610	0.610	0.616	0.616	0.617	0.622	0.623	0.625	0.630	0.636	0.646
	$N(\sqrt{Q})$	0.710	0.710	0.710	0.714	0.714	0.715	0.718	0.718	0.723	0.722	0.725	0.729
	$N(\ln(Q))$	0.727	0.727	0.727	0.728	0.728	0.728	0.729	0.729	0.738	0.728	0.727	0.724
		Critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir du débit SUMO (moyenne des débits)					Critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir du débit SUMO (moyenne des débits)						
Version moyenne des débits (SUMO)	N(Q)	0.664	0.664	0.664	0.663		0.663	0.663	0.663	0.665	0.663	0.663	0.663
	$N(\sqrt{Q})$	0.736	0.736	0.736	0.736		0.736	0.736	0.736	0.741	0.736	0.736	0.736
	$N(\ln(Q))$	0.712	0.712	0.712	0.712		0.712	0.712	0.712	0.723	0.712	0.712	0.712

Ici et dans tous les autres tables ci-dessous (annexes 7.8, 7.9, 7.10) nous pouvons voir sur les deuxième et troisième lignes les coefficients $C_{1HD}=C_{1ID}=C_{1BD}$ et $C_{2HD}=C_{2ID}=C_{2BD}$ utilisés pour faire le test sur SUMO. La colonne verte représente les critères NSE trouvés sans l'application de SUMO, c'est-à-dire, avec les modèles GR4J originaux pour les versions des hauts, intermédiaires et bas débits, dont les coefficients sont $C_{1HD}=C_{1ID}=C_{1BD}=0$ et $C_{2HD}=C_{2ID}=C_{2BD}=0$. Les lignes 4 à 12 de couleur rose représentent les valeurs calculées à partir des débits simulés modifiés par l'approche SUMO pour les 3 versions de GR4J, et pour chaque critère d'évaluation : critère sur les débits ($C(Q)$), sur les racines de débits ($C(\sqrt{Q})$), et sur les logarithmes des débits ($C(\ln(Q))$). Puis, entre les lignes 14 et 16 de couleur rose du tableau, on voit les

valeurs NSE calculées à partir des débits SUMO (moyenne des débits simulés modifiés par l'approche SUMO), c'est-à-dire, le vrai concept de SUMO. Aussi les valeurs ici ont été calculées pour chaque critère d'évaluation : $C(Q)$, $C(\sqrt{Q})$, $C(\ln(Q))$. Finalement, les chiffres en rouge représentent les valeurs qui ont eu une meilleure performance que le critère NSE calculé avec le modèle original GR4J, et les chiffres de couleur bleu sont ceux qui ont eu une performance égale à la valeur trouvée en utilisant le modèle GR4J original.

7.8 Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe sur la période de calage pour le bassin versant du Verdoube à Tautavel Scénario 2.

Hypothèse		Critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir des débits simulés modifiés par SUMO				NSE calculé GR4J Original	Critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir des débits simulés modifiés par SUMO						
$C_{1HD}=C_{1ID}=C_{1BD}$		-0.05	-0.05	-0.05	0	0	0	0.05	0.05	0.05	0.1	0.15	0.25
$C_{2HD}=C_{2ID}=C_{2BD}$		-0.05	0	0.05	-0.05	0	0.05	-0.05	0	0.05	0.1	0.15	0.25
GR4J version hauts débits	N(Q)	0.536	0.536	0.536	0.536	0.536	0.536	0.536	0.536	0.536	0.535	0.534	0.530
	$N(\sqrt{Q})$	0.533	0.534	0.534	0.539	0.539	0.539	0.544	0.544	0.544	0.549	0.554	0.561
	$N(\ln(Q))$	0.324	0.325	0.325	0.345	0.346	0.347	0.365	0.366	0.367	0.386	0.404	0.435
GR4J version racine des débits	N(Q)	0.500	0.500	0.500	0.507	0.503	0.507	0.513	0.513	0.513	0.518	0.521	0.524
	$N(\sqrt{Q})$	0.469	0.469	0.469	0.482	0.482	0.482	0.493	0.493	0.493	0.504	0.515	0.534
	$N(\ln(Q))$	0.367	0.367	0.367	0.382	0.382	0.382	0.396	0.396	0.396	0.409	0.423	0.448
GR4J version bas débits	N(Q)	0.268	0.266	0.270	0.283	0.284	0.289	0.302	0.307	0.308	0.328	0.348	0.386
	$N(\sqrt{Q})$	0.507	0.505	0.509	0.519	0.519	0.523	0.533	0.536	0.537	0.549	0.559	0.574
	$N(\ln(Q))$	0.579	0.580	0.580	0.584	0.583	0.584	0.586	0.586	0.586	0.585	0.582	0.568
		Critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir du débit SUMO (moyenne des débits)					Critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir du débit SUMO (moyenne des débits)						
Version moyenne des débits (SUMO)	N(Q)	0.513	0.512	0.512	0.511		0.511	0.510	0.511	0.510	0.509	0.508	0.506
	$N(\sqrt{Q})$	0.577	0.577	0.577	0.578		0.578	0.579	0.578	0.578	0.579	0.580	0.581
	$N(\ln(Q))$	0.493	0.494	0.493	0.494		0.494	0.495	0.495	0.495	0.496	0.497	0.499

7.9 Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe pour la période de contrôle pour le bassin versant de l'III à Didenheim Scénario 2.

Hypothèse		Critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir des débits simulés modifiés par SUMO				NSE calculé GR4J Original	Critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir des débits simulés modifiés par SUMO						
$C_{1HD}=C_{1ID}=C_{1BD}$		-0.05	-0.05	-0.05	0	0	0	0.05	0.05	0.05	0.1	0.15	0.25
$C_{2HD}=C_{2ID}=C_{2BD}$		-0.05	0	0.05	-0.05	0	0.05	-0.05	0	0.05	0.1	0.15	0.25
GR4J version hauts débits	N(Q)	0.723	0.723	0.723	0.724	0.725	0.725	0.726	0.726	0.726	0.726	0.726	0.724
	N(\sqrt{Q})	0.779	0.779	0.779	0.782	0.782	0.782	0.785	0.785	0.785	0.787	0.789	0.791
	N(ln(Q))	0.695	0.696	0.696	0.703	0.703	0.704	0.709	0.710	0.710	0.717	0.723	0.735
GR4J version racine des débits	N(Q)	0.720	0.720	0.720	0.720	0.720	0.720	0.720	0.720	0.720	0.719	0.719	0.719
	N(\sqrt{Q})	0.784	0.784	0.784	0.784	0.784	0.784	0.784	0.784	0.784	0.784	0.784	0.784
	N(ln(Q))	0.734	0.734	0.734	0.735	0.735	0.735	0.736	0.736	0.736	0.737	0.738	0.739
GR4J version bas débits	N(Q)	0.664	0.665	0.666	0.671	0.672	0.672	0.677	0.678	0.678	0.685	0.690	0.700
	N(\sqrt{Q})	0.762	0.762	0.762	0.766	0.766	0.767	0.770	0.770	0.770	0.773	0.776	0.780
	N(ln(Q))	0.747	0.747	0.747	0.749	0.749	0.749	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.748
		Critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir du débit SUMO (moyenne des débits)					Critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir du débit SUMO (moyenne des débits)						
Version moyenne des débits (SUMO)	N(Q)	0.718	0.718	0.718	0.718		0.718	0.717	0.717	0.717	0.717	0.717	0.717
	N(\sqrt{Q})	0.788	0.788	0.788	0.788		0.788	0.788	0.788	0.788	0.788	0.788	0.788
	N(ln(Q))	0.747	0.747	0.747	0.746		0.746	0.746	0.746	0.746	0.746	0.746	0.746

7.10 Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe pour la période de contrôle pour le bassin versant du Verdoube à Tautavel Scénario 2

Hypothèse		Critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir des débits simulés modifiés par SUMO				NSE calculé GR4J Original	Critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir des débits simulés modifiés par SUMO						
$C_{1HD}=C_{1ID}=C_{1BD}$		-0.05	-0.05	-0.05	0	0	0	0.05	0.05	0.05	0.1	0.15	0.25
$C_{2HD}=C_{2ID}=C_{2BD}$		0	-0.05	0.05	-0.05	0	0.05	-0.05	0	0.05	0.1	0.15	0.25
GR4J version hauts débits	N(Q)	0.402	0.402	0.402	0.402	0.402	0.402	0.401	0.401	0.401	0.399	0.397	0.392
	N(\sqrt{Q})	0.583	0.583	0.583	0.585	0.585	0.585	0.586	0.586	0.586	0.587	0.587	0.586
	N(ln(Q))	0.484	0.483	0.484	0.498	0.499	0.500	0.512	0.513	0.514	0.526	0.537	0.554
GR4J version racine des débits	N(Q)	0.354	0.354	0.354	0.359	0.359	0.359	0.363	0.363	0.363	0.366	0.369	0.372
	N(\sqrt{Q})	0.488	0.488	0.488	0.498	0.498	0.498	0.507	0.507	0.507	0.517	0.525	0.541
	N(ln(Q))	0.465	0.465	0.465	0.478	0.478	0.478	0.490	0.490	0.490	0.501	0.513	0.534
GR4J version bas débits	N(Q)	0.206	0.205	0.207	0.218	0.219	0.220	0.230	0.231	0.231	0.244	0.256	0.278
	N(\sqrt{Q})	0.489	0.488	0.490	0.501	0.502	0.503	0.513	0.514	0.515	0.526	0.536	0.552
	N(ln(Q))	0.628	0.627	0.628	0.634	0.634	0.635	0.638	0.639	0.639	0.643	0.644	0.641
		Critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir du débit SUMO (moyenne des débits)					Critères de Nash-Sutcliffe calculés à partir du débit SUMO (moyenne des débits)						
Version moyenne des débits (SUMO)	N(Q)	0.366	0.366	0.366	0.365		0.365	0.364	0.364	0.364	0.363	0.362	0.360
	N(\sqrt{Q})	0.580	0.580	0.580	0.580		0.580	0.580	0.580	0.580	0.580	0.580	0.580
	N(ln(Q))	0.585	0.585	0.585	0.585		0.586	0.586	0.586	0.586	0.587	0.588	0.589

7.11 Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe : comparaison de l'approche SUMO (Scénario 1) et de l'approche multi-modèle proposée par Oudin et al. (2006), période de contrôle pour le bassin versant de l'III à Didenheim.

Hypothèse		GR4J	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 $\alpha=S$	$C(Q)$	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 $\alpha = s^3/s^3 + (1-s)^3$	$C(Q)$	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	0.713
	$C(\sqrt{Q})$	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

7.12 Tableau récapitulatif des valeurs des critères de Nash-Sutcliffe : comparaison de l'approche SUMO (Scénario 1) et de l'approche multi-modèle proposée par Oudin et al. (2006), période de contrôle pour le bassin versant du Verdoble à Tautavel.

Hypothèse		GR4J	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 $\alpha=S$	$C(Q)$	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 $\alpha = s^3/s^3 + (1-s)^3$	$C(Q)$	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

Dans les annexes 7.4, 7.5, 7.6 nous pouvons voir, d'abord tout au long de la deuxième et troisième ligne les coefficients $C_{1HD}=C_{1BD}$ et $C_{2HD}=C_{2BD}$ utilisés pour faire le test sur SUMO. La colonne verte représente les critères NSE trouvés en utilisant l'approche proposée par **Oudin et al. (2006)**, avec les deux propositions données par l'équation (14) :

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

Dont les coefficients sont $C_{1HD}=C_{1BD}=0$ et $C_{2HD}=C_{2BD}=0$. Les lignes 4 à 9 de couleur rose, représentent les valeurs calculées à partir des débits SUMO (moyenne des débits simulés modifiés par l'équation SUMO) pour chaque version de GR4J (hauts et bas débits), et pour chaque critère d'évaluation : critère sur les débits ($C(Q)$), sur les racines de débits ($C(\sqrt{Q})$), et sur les logarithmes des débits ($C(\ln(Q))$).

7.13 Nomenclature

- x', y', z' : dérivées par rapport au temps.
- x, y, z : variables.
- 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) du 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) du 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 couplage 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. De plus en plus, 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 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, dans deux scénarios : le premier avec deux versions sur la fonction-objectif : hauts débits et bas débits, et le deuxième avec trois versions sur la fonction-objectif : hauts débits, débits intermédiaires 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. Enfin, nous ferons aussi la comparaison entre le scénario de deux versions de GR4J et de la performance d'une approche multi-modèle simple [Oudin et al. (2006)].