



HAL
open science

Prise en compte de l'évolution de l'occupation du sol

Reyhaneh Hashemi, Pierre Javelle, Patrick Arnaud

► **To cite this version:**

Reyhaneh Hashemi, Pierre Javelle, Patrick Arnaud. Prise en compte de l'évolution de l'occupation du sol. Inrae. 2020, pp.5793-5816. hal-03972463

HAL Id: hal-03972463

<https://hal.inrae.fr/hal-03972463v1>

Submitted on 3 Feb 2023

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.



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET SOLIDAIRE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**
*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE

Programme MTES (DGPR/SRNH) – INRAE 2020

Connaissance et prévention des risques naturelles et hydrauliques

Ces travaux bénéficient du soutien du ministère chargé de la transition écologique par décision de subvention n°210897179.



SHYREG

4.2.2 – Prise en compte de l'évolution de l'occupation du sol

Auteur : Reyhaneh HASHEMI
Relecteur : Pierre JAVELLE

Table des matières

1	CONTEXTE ET OBJECTIFS	5
1.1	Problématique	5
1.2	Travaux précédents réalisés dans le cadre de la convention BRIL	5
1.3	Objectifs	7
2	DONNÉES	8
2.1	Données météorologiques pour le modèle GRD	8
2.2	Données météorologique pour le modèle GR4H	8
2.3	Données hydrométriques	8
2.4	Autres données	8
2.4.1	Les données de feux	8
2.4.2	Les données d'occupation du sol	8
2.5	L'échantillon de bassins versants	8
2.5.1	L'approche de construction de l'échantillon initial des bassins versants incendiés (Mas, 2018)	9
2.5.2	L'approche de construction de l'échantillon initial des bassins versants urbains (Mas et Arnaud, 2019)	9
2.5.3	Bassins retenus	10
3	MODÈLES UTILISÉS	13
3.1	Le modèle distribué GRD	13
3.1.1	Fonctionnement	13
3.1.2	Calage des différentes configurations	16
3.2	Le modèle global GR4H	17
3.2.1	Fonctionnement	17
3.2.2	Calage du modèle	18
4	RÉSULTATS	19
4.1	Performance globale	19
4.1.1	En distinguant le débit de base du débit de crue	21
4.1.2	En fonction des débits de référence de QA, QMNA5, et VCN10	21
4.1.3	En fonction de paramètre d'échange du modèle GR4H	23
4.2	Paramètres optimums obtenus	23
5	CONCLUSION	27
	BIBLIOGRAPHIE	28
	ANNEXES	30
A	Débits moyens annuels journaliers observés et simulés par GR4H et par GRD configurations S1, S2, S3 pour les bassins incendiés	30
B	Débits moyens annuels journaliers observés et simulés par GR4H et par GRD configurations S1, S2, S3 pour les bassins urbains	36
C	Critères de KGE et de NSE sur chaque période de calage en fonction de gamme de débits pour les différentes configurations du modèle GRD	42

Table des figures

1	Représentation schématique de la méthode d'extraction des événements exploitables. 1) Comparaison des données de feux et hydrométéorologiques et sélection des périodes. 2) Regroupement des incendies et élimination des surfaces brûlées inférieures au seuil 3) Extraction des incendies isolés qui pourront être étudiés (Mas, 2018).	10
2	Localisation des bassins versants d'étude incendiés et urbains. En violet les bassins versants incendiés et en jaune les bassins versants urbains.	12
3	Schéma complet de principe du modèle GRD. Les symboles en rouge constituent les paramètres du modèle (Documentation de GRD, 2020).	13
4	Schéma structurel et les équations du modèle global GR4H (Le Moine, 2008). . .	17
5	Comparaison de la distribution des critères de performance KGE et NSE calculés pour chaque bassin de l'étude et pour chaque période de calage. Chaque distribution représente une des différentes configurations du modèle GRD ainsi que le modèle GR4H.	19
6	Cartographie de KGE moyenné entre les deux périodes de calage pour les différentes structures du modèle distribué GRD et le modèle global GR4H au travers des bassins incendiés et urbanisés d'étude.	20
7	Comparaison des critères de performance KGE et NSE sur chaque période de calage pour les différentes structures testées du modèle distribué à travers de l'ensemble des bassins incendiés et urbanisés d'étude.	21
8	Comparaison de la distribution des critères de performance KGE et NSE dans l'ensemble des échantillons incendiés et urbanisés en fonction de la gamme de débits entre les différentes structures du modèle distribué ainsi que le modèle GR4H. Pour chaque bassin, KGE et NSE des deux périodes de calage sont pris en compte individuellement.	22
9	Comparaison de performance en KGE des différentes structures du modèle distribué avec le modèle global GR4H en investiguant la grandeur et la direction d'échange souterrain présenté par le paramètre X2 optimum du modèle global GR4H. Pour chaque bassin, KGE et NSE des deux périodes de calage sont pris en compte individuellement. L'ensemble des bassins incendiés et urbanisés sont pris en compte.	24
10	Distribution des paramètres optimaux des différentes structures du modèle distribué pour l'ensemble des bassins incendiés et urbanisés. Pour chaque bassin, les paramètres optimaux de chaque période de calage sont pris en compte individuellement.	25
11	Scatterplot des paramètres optimaux issus des différentes structures du modèle distribué sur les deux périodes de calage pour l'ensemble des bassins incendiés et urbanisés.	26
12	Comparaison des critères de performance KGE et NSE sur chaque période de calage en fonction de gamme de débits pour pour la configuration S1 du modèle GRD à travers de l'ensemble des bassins incendiés et urbanisés d'étude.	42
13	Comparaison des critères de performance KGE et NSE sur chaque période de calage en fonction de gamme de débits pour pour la configuration S2 du modèle GRD à travers de l'ensemble des bassins incendiés et urbanisés d'étude.	42

14	Comparaison des critères de performance KGE et NSE sur chaque période de calage en fonction de gamme de débits pour pour la configuration S3 du modèle GRD à travers de l'ensemble des bassins incendiés et urbanisés d'étude.	43
----	--	----



Liste des tableaux

1	Période d'étude des bassins urbains.	10
2	Caractéristiques des bassins incendiés et la période d'étude associée à chaque bassin.	11
3	Caractéristiques des bassins urbains.	11
4	Les caractéristiques des trois configurations testées du modèle GRD. Les paramètres en gras représentent les paramètres de calage.	16
5	Les débits de référence utilisés pour l'évaluation de performance globale des modèles testés.	22
6	Synthèse des critères de KGE et de NASH sur la restitution des débits de référence.	23

1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

1.1 Problématique

Le développement rapide de l'urbanisation et l'augmentation du nombre des incendies entraînent des modifications dans la réponse hydrologique d'un bassin versant en provoquant l'accroissement du ruissellement et la réduction des effets de stockage superficiel due à la réduction du couvert végétal et à l'augmentation des surfaces imperméables. Ces modifications étant peu connues, leur degré varie selon la surface de la zone urbanisée / incendiée (Mas, 2018, Mas et Arnaud, 2019). L'imperméabilisation des sols suite à l'urbanisation a pour conséquences d'augmenter les volumes et les débits de pointe (Chen et al., 2017), ce qui active notamment des processus d'érosion. Le feu de forêt, quant à lui, bouleverse le comportement du bassin incendié. Il s'agit d'une brusque accélération des flux des cours d'eau drainant la partie incendiée du bassin versant, ce qui provoque du ruissellement fort et rend le sol vulnérable à l'érosion en l'absence de végétation. L'étude des éventuelles corrélations entre l'urbanisation / l'incendie et le phénomène physique de la réponse hydrologique d'un bassin versant s'impose donc pour limiter les éventuelles conséquences négatives.

1.2 Travaux précédents réalisés dans le cadre de la convention BRIL

Afin d'étudier l'influence des modifications d'occupation du sol, par des feux de forêts ou par de l'extension de la surface urbanisée, sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants français, Mas (2018) et Mas et Arnaud (2019) ont constitué un échantillon de bassins versants touchés par un incendie, et un autre constitué de bassins versants dont la surface urbanisée a augmenté de manière significative ces dernières années. Ils ont ensuite calé le modèle hydrologique GR4J¹ (Perrin et al., 2003) sur la période pré-modification, puis, en gardant ce paramétrage, simulés des débits sur la période post-modification. Les auteurs ont ensuite fait l'hypothèse que l'effet de la modification de l'occupation des sol pouvait être déterminé en comparant les débits observés et simulés sur la période post-modification. Ainsi, un certain nombre d'approches statistiques ont été appliquées pour détecter et quantifier d'éventuelles différences. Pour les bassins incendiés de son échantillon, Mas (2018) a calculé des descripteurs de Q_m ², Q_{05} ³, Q_{10} ⁴, Q_{90} ⁵, et Q_{95} ⁶ au pas de temps mensuel à partir de données journalières. En plus des séries mensuelles complètes, il a également analysé les descripteurs par saison. A cet effet et pour chaque bassin, il a sélectionné les quatre mois de plus basses eaux pour l'étude du descripteur de bas débit et les quatre mois de plus hautes eaux pour l'étude du descripteur de hauts débits. Du fait du caractère ponctuel des incendies, il a supposé que la modification du régime hydrologique du bassin, si elle existait, apparaissait sous forme de rupture dans les séries de descripteurs étudiés. Il a donc réalisé et comparé deux types de test :

- Tests de rupture sur les séries d'écarts relatifs entre les chroniques observées et les chroniques simulées par le modèle hydrologique. Pour chaque descripteur, les dates probables de rupture dans la série obtenues avec trois tests statistiques différents (test de Pettitt, test de Lepage, test de Chow) étaient comparées à la date de l'incendie. Ces trois tests étaient non-paramétriques du fait de la non-normalité des séries d'écarts et analy-

1. Génie Rural à 4 paramètres Journalier

2. débit moyen

3. débit non dépassé 5% du temps, représentatif des périodes de basses eaux

4. débit non dépassé 10% du temps.

5. débit non dépassé 90% du temps

6. débit non dépassé 95% du temps, représentatif des périodes de hautes eaux

saient chacun un paramètre de distribution différent. Un test supplémentaire pour lequel la date de rupture était imposée (test de Mann Whitney) était effectué et apportait une information sur la significativité de la rupture supposée.

- Comparaison des régressions entre débit observé et débit simulé sur les deux périodes par une méthode de type ANCOVA (pour chaque descripteur également). Afin d'assurer la validité des conclusions issues des régressions, les données ont été modifiées par une transformation de type Box Cox.

Pour la quantification de la variation de la réponse hydrologique, il a estimé que lorsqu'une différence significative entre les périodes pré et post incendie était détectée, la variation du descripteur était quantifiée en comparant les régressions entre descripteurs observés et simulés avant et après l'incendie et en calculant l'écart à une valeur spécifique (Harr et al., 1975). Il a conclu que les résultats étaient en accord avec les conclusions issues de la revue de littérature. Il a constaté des différences jugées significatives (et cohérentes avec les observations) sur plusieurs descripteurs hydrologiques et pour plusieurs bassins. Cependant, les écarts pré/post étaient variables d'un bassin à l'autre, avec un impact attribué à l'incendie entraînant une augmentation ou une diminution des grandeurs analysées qui n'a, à priori, pas de lien systématique avec la taille du bassin ou l'étendue de la zone incendiée. Les résultats tendaient à montrer l'existence de deux typologies d'impacts :

- Les événements pour lesquels l'incendie avait eu pour effet de transformer le fonctionnement du bassin d'intermittent à continu, ce qui s'était traduit par une augmentation significative des débits en été et une stabilité des débits en hiver.
- Les événements pour lesquels l'incendie avait entraîné une diminution du débit pour toutes les phases de l'écoulement dans des proportions similaires.

Il a constaté de plus que les événements pour lesquels l'impact de l'incendie était jugé significatif concernaient des bassins dont la taille variait de 8 à 200 [km²] et dont la proportion incendiée était comprise entre 11 et 40 [%].

Pour les bassins urbains, Mas et Arnaud (2019) ont fait des modélisations à deux pas de temps différents (journalier et horaire) afin de se focaliser sur différents aspects du fonctionnement hydrologique d'un bassin. L'approche horaire était utilisée pour l'analyse événementielle des crues. L'analyse horaire était effectuée sur des descripteurs classiques de crues, à savoir le débit de pointe, le volume de crue, et le temps de montée. Les averses associées étaient également décrites par le volume total précipité (V), l'intensité maximale (I_{\max}) et la forme ($\frac{I_{\max}}{V}$). L'approche journalière était utilisée dans le but de décrire de manière plus générale le fonctionnement du bassin. L'analyse journalière était effectuée sur les quantiles annuels à 10%, 50%, et 90% traduisant chacun le comportement global du bassin sur les débits bas, moyens, et hauts, ainsi que sur des statistiques descriptives des basses eaux (QMNA5), du débit moyen (module) et des hautes eaux (débits maximums annuels de période de retour de 2, 5 et 10 ans). En ce qui concerne la détection des changements :

- en approche horaire, les jeux de paramètres obtenus sur les deux périodes extrêmes étaient utilisés pour simuler le débit sur toute la plage de disponibilité des données. La chronique observée était analysée pour identifier un nombre égal d'événements de crues sur les deux périodes extrêmes. Les descripteurs détaillés précédemment étaient ensuite extraits de la série observée et des deux séries simulées et les écarts entre eux étaient analysés. En cas de modification du régime de crues, les tests statistiques devaient détecter une différence dans la distribution des écarts.
- en approche journalière, deux types de tests étaient utilisés. Les tests de tendance étaient effectués sur la série des écarts entre variables hydrologique observées et simulées avec

les paramètres calés sur la période dite « pré-urbanisation ». En cas de changement progressif de l'hydrologie du bassin, la série des écarts entre variables observées et simulées devraient exhiber une tendance à la hausse ou à la baisse. Les variables utilisées ici étaient les quantiles annuels à 10%, 50%, et 90%. Les résultats des tests de Mann Kendall, Spearman et Sen étaient comparés.

Ils ont conclu que les résultats étaient en accord avec les conclusions issues de la revue de littérature. Ils ont constaté des différences jugées significatives et cohérentes avec les observations sur plusieurs descripteurs hydrologiques et pour plusieurs bassins. Cependant, les écarts entre périodes étaient variables d'un bassin à l'autre, avec un impact attribué à l'urbanisation entraînant une augmentation ou une diminution des grandeurs analysées qui n'avait, à priori, pas de lien systématique avec la taille du bassin ou l'extension de la surface urbanisée. La modélisation journalière a montré une tendance majoritaire à la hausse des débits d'étiages représentés par le QMNA5 et une diminution des débits moyens représentés par le module. Les hauts débits représentés par les maximums annuels de période de retour 2, 5, et 10 ans évoluaient majoritairement à la baisse. Sur les bassins où ils étaient en hausse, l'augmentation restait relativement faible avec un maximum de +10% par rapport à la valeur pré-urbanisation. L'étude horaire a mis en lumière des impacts variables sur les événements de crues. Les bassins avaient tendances à réagir plus rapidement dans l'ensemble, mais l'écart n'était statistiquement significatif que pour quatre d'entre eux et restait très faible. Les débits de pointe étaient fortement affectés pour six bassins (trois à la hausse, trois à la baisse) avec des écarts absolus estimés entre 30 et 40% de la valeur pré-urbanisation. Ils n'ont constaté aucun lien entre cet écart et l'extension de la surface urbanisée.

1.3 Objectifs

A la suite des travaux de Mas (2018) et de Mas et Arnaud (2019), le présent rapport cherche à montrer s'il serait possible de mieux identifier les changements de régime hydrologique en partant d'une modélisation distribuée plutôt que globale. Pour cela, nous comparerons les simulations de la réponse hydrologique du bassin versant au pas de temps horaire entre un modèle conceptuel global (GR4H⁷ (Perrin et al., 2003)) et un modèle conceptuel distribué à la résolution de 1-km (GRD (Jay-Allemand et al., 2019)) sur un échantillon de bassins versants incendiés et urbains, dont la taille varie entre 15 et 642 (avec les valeurs médiane et moyenne de 52 et de 118) [km²], sur le territoire français métropolitain. Nous testerons différentes configurations en comparant les simulations de débit aux observations à l'exutoire du bassin. Il s'agit d'une application semi-globale dans laquelle les paramètres seront calés de manière uniformes sur le bassin versant mais des données d'entrée sont spatialisées.

7. Génie Rural à 4 paramètres Horaire

2 DONNÉES

2.1 Données météorologiques pour le modèle GRD

Les données de pluie Les données de pluie utilisées dans ce travail sont les lames d'eau horaires COMEPHORE spatialisées à la résolution de 1 [km²] établies sur la période du 1997-01-01 au 2015-12-31 et sur l'ensemble du territoire métropolitain français.

Les données d'évapotranspiration potentielle Nous ne disposons pas de données d'évapotranspiration au pas de temps horaire à la résolution kilométrique. Pour l'obtenir, l'évapo-transpiration potentielle (ETP) est d'abord calculée sur une grille régulière de 8×8 [km²] au pas de temps journalier par la formule d'Oudin et al. (2005) pour laquelle il faut seulement connaître la température journalière de l'air et le jour julien de l'année. Les données de température journalière sont issues du produit SAFRAN de Météo-France (Vidal et al., 2010). Ensuite, l'ETP journalière est désagrégée au pas de temps horaire en suivant une répartition empirique et au pas d'espace de 1 [km²] tout simplement en mettant la même valeur dans les 8 mailles de 1×1 [km²].

2.2 Données météorologique pour le modèle GR4H

Les données de pluie et d'évapotranspiration sont les mêmes données que pour le modèle GRD mais sont moyennées à l'échelle du bassin versant à chaque pas de temps.

2.3 Données hydrométriques

Les données hydrométriques à pas de temps variable, mesurées à l'exutoire des bassins versants, sont issues du produit QTVAR de la Banque HYDRO et sont agrégées au pas de temps horaire.

2.4 Autres données

2.4.1 Les données de feux

Les données d'incendies ont été fournies par l'équipe EMR (Ecosystèmes Méditerranéens et Risques) de l'unité de recherche RECOVER dont l'un des axes de travail couvre l'étude des feux de forêts. L'ensemble des données initiales représente un total de 857 incendies, majoritairement localisés sur les départements des Bouches du Rhône, du Var, des Alpes Maritimes, et de la Corse. La base de données comporte une centaine de feux non datés, le reste couvre une fenêtre temporelle de 37 ans, de 1973 à 2010 (Mas, 2018).

2.4.2 Les données d'occupation du sol

Les statistiques d'occupation du sol sont issues des données Corine Land Cover (CLC) à la résolution de 50 [m]. Elles permettent de suivre l'évolution de la surface urbanisée entre 1990 et 2018, avec des données intermédiaires en 2000, 2006 et 2012 (Mas et Arnaud, 2019).

2.5 L'échantillon de bassins versants

L'approche élaborée par Mas (2018), Mas et Arnaud (2019) pour la construction de l'échantillon des bassins versants incendiés et urbains et la définition des périodes d'étude associées sont

présentées dans les sous parties suivantes.

2.5.1 L'approche de construction de l'échantillon initial des bassins versants incendiés (Mas, 2018)

1. Le croisement des données bassins-incendies afin d'exclure les bassins qui n'ont jamais été touchés par un incendie.
2. Choisir les incendies répondant à deux critères portant respectivement sur la surface incendiée et sur leur répartition temporelle. Plusieurs études ont montré qu'au-dessous d'un certain seuil de surface incendiée (exprimée en pourcentage de surface du bassin versant) les effets de l'incendie sur l'hydrologie sont négligeables. Ce seuil étant variable selon les études, il a été décidé de le fixer à 5%. Le deuxième critère porte sur la chronologie des incendies. Pour être exploitable, un incendie doit être isolé temporellement afin de définir des périodes pré et post feu assez longues sans autre évènement pour i) garantir la stationnarité des caractéristiques physiques du bassin et la représentativité des conditions climatiques avant l'incendie sur une période assez longue afin de permettre un calage valide du modèle et ii) limiter l'influence d'autres évènements durant la période post-incendie et le retour à un état représentatif des caractéristiques physiques avant incendie. Un incendie est considéré exploitable s'il remplit les conditions suivantes :
 - incendie précédent ayant eu lieu au moins 8 ans avant et disponibilité des données sur 5 ans avant,
 - incendie suivant ayant eu lieu au moins 5 ans après et disponibilité des données 5 ans après.

De cette manière, on garantit la stabilité des caractéristiques physiques avant incendie et leur représentativité de conditions « non incendié », ainsi que l'absence d'évènement perturbateur dans la période post-incendie jusqu'au retour estimé aux conditions pré-incendie.

3. Afin d'obtenir un échantillon plus large, les incendies touchant un bassin la même année sont agrégées et considéré comme un seul évènement (Figure 1). En effet, l'intervalle maximal entre incendies d'une même année est suffisamment court (2 mois en moyenne) pour considérer que le processus de retour aux caractéristiques physiques pré-incendie des surfaces brûlées en début de saison est très peu avancé en fin de saison. De plus, l'incendie ne sera caractérisé dans un premier temps que par la surface totale brûlée et pas par sa localisation dans le bassin versant.

2.5.2 L'approche de construction de l'échantillon initial des bassins versants urbains (Mas et Arnaud, 2019)

1. En faisant l'hypothèse que l'acquisition et le traitement des données d'occupation du sol n'est pas immédiat, on part du principe que les données CLC publiées à une date n sont représentatives de l'occupation du sol entre la date n et la publication antérieure. Les dates de fin des sous périodes sont donc calées sur les dates de publication des données CLC (cf. Sous-partie 2.4.2).
2. Les dates de début sont choisies pour maximiser la longueur des sous-périodes sans qu'il n'y ait de chevauchement et que les sous-périodes soient de longueur égale (Tableau 1).
3. L'hypothèse relative à la représentativité des dates de CLC n'est pas vérifiée pour la période 1 en analyse horaire. Il a cependant été décidé de la conserver pour ne pas réduire la

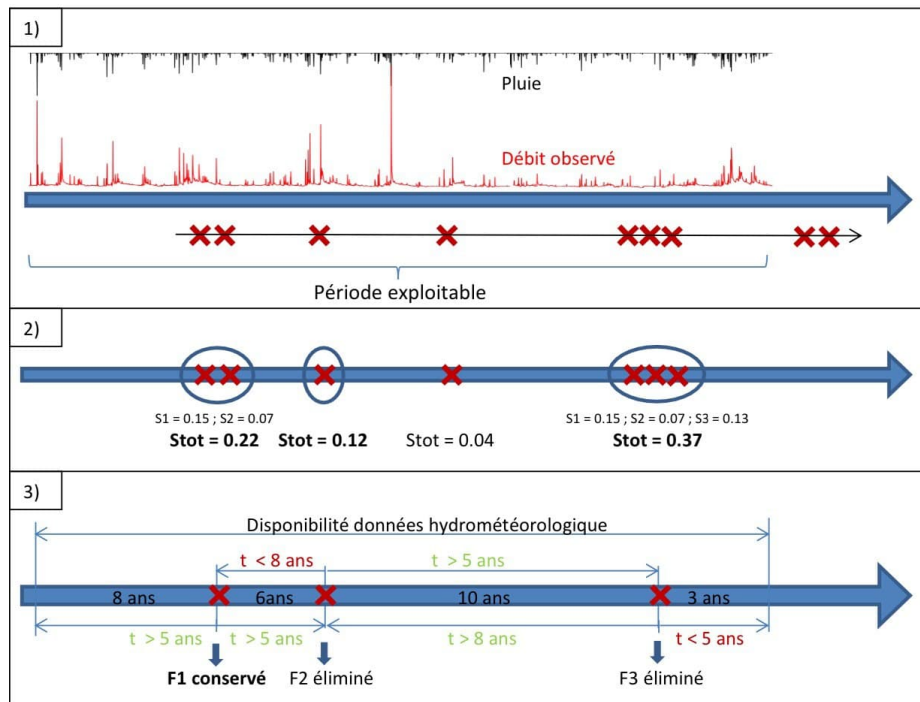


FIGURE 1 – Représentation schématique de la méthode d'extraction des évènements exploitables. 1) Comparaison des données de feux et hydrométéorologiques et sélection des périodes. 2) Regroupement des incendies et élimination des surfaces brûlées inférieures au seuil 3) Ex-traction des incendies isolés qui pourront être étudiés (Mas, 2018).

taille de l'échantillon, dans la mesure où l'information quantitative de proportion de surface urbanisée ne sera considérée qu'en fin d'analyse pour explorer les relations potentielles entre changements dans la réponse hydrologique et variation de la surface urbanisée.

4. Les bassins pour lesquels les données ne sont disponibles que sur une période ou deux périodes consécutives sont éliminés de l'échantillon.
5. Pour les autres, l'augmentation de la surface urbanisée est calculée entre les deux périodes de disponibilité des données les plus éloignées. Seuls les bassins pour lesquels cette augmentation est supérieure à 5% de la surface du bassin sont conservés.

Période	Date CLC associée	Date début	Date fin
1	2000	1998-08-01	2002-07-31
2	2006	2002-08-01	2006-07-31
3	2012	2006-08-01	2012-07-31
4	2018	2012-08-01	2016-07-31

Tableau 1 – Période d'étude des bassins urbains.

2.5.3 Bassins retenus

Nous nous sommes limités dès le départ à des bassins versants étudiés dans les travaux précédents par Mas (2018) et Mas et Arnaud (2019). De l'échantillon des bassins versants incendiés construit par Mas (2018), seuls les bassins versants disposant des données hydro-météorologiques pendant au moins 6 ans avant la date d'incendie et 5 ans après la date d'incendie ont été retenus. L'échantillon obtenu se compose de 6 bassins versants dont les caractéristiques et la

Code	Nom	Superficie [km ²]	Pré-incendie		Post-incendie	
			Début	Fin	Début	Fin
Y4225610	La Cadière à Marignane [stade Saint-Pierre]	71.90	1998-07-25	2004-07-24	2004-07-24	2009-07-23
Y5424010	La Giscle à Cogolin	66.10	1997-09-01	2003-08-31	2003-08-31	2008-08-30
Y5444010	La Giscle à Cogolin [Les Ajusts]	201.5	1997-09-01	2003-08-31	2003-08-31	2008-08-30
Y5505410	Le Grenouiller à Saint-Raphaël [Agay]	48.00	1997-07-26	2003-07-25	2003-07-25	2008-07-24
Y7114020	L'Asco à Morosaglia [Ponte-Leccial]	366.3	1997-08-26	2003-08-25	2003-08-29	2008-08-28
Y8324020	La Gravone à Peri	200.8	1997-07-16	2003-07-15	2003-08-08	2008-08-07

Tableau 2 – Caractéristiques des bassins incendiés et la période d'étude associée à chaque bassin.

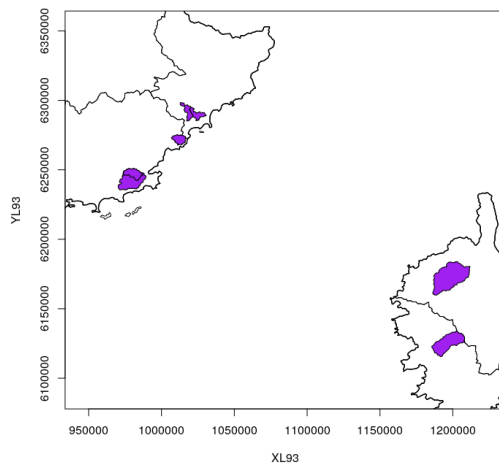
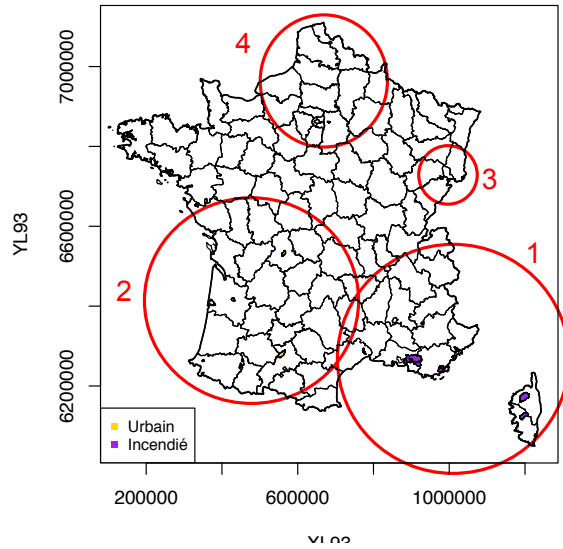
période d'étude associée sont présentées dans le Tableau 2.

De l'échantillon des bassins versants urbains construit par Mas et Arnaud (2019), tous les bassins versants ont été retenus. L'échantillon obtenu se compose de 15 bassins versants dont les caractéristiques sont présentées dans le Tableau 3.

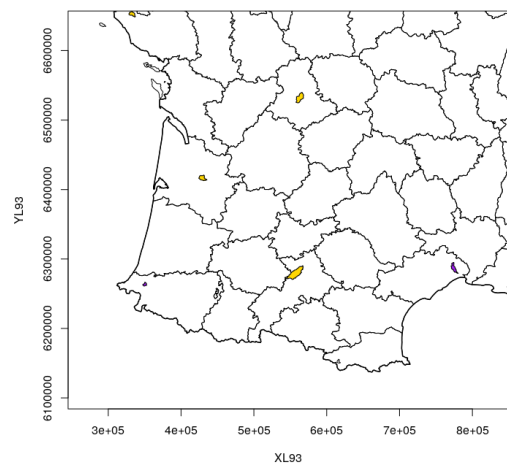
Code	Nom	Superficie [km ²]
N0204210	Le Pont-Habert à Challans	36.70
Q8345910	Le Mendialçu à Hasparren	17.60
A0220200	Le Lertzbach à Hégenheim	15.30
Y4122040	L'Arc à Aix-en-Provence [Roquefavour-Bruet]	642.4
L0614020	L'Aurence à Isle	86.60
U2356610	Le Rupt à Dung	43.00
Y4225610	La Cadière à Marignane [stade Saint-Pierre]	71.90
Y3315080	Le Salaison à Mauguio	51.80
Y4414030	L'Huveaune à Roquevaire [2]	164.9
O9685310	La Pimpine à Cénac	49.30
Y4115020	La Luynes à Aix-en-Provence [Pioline]	52.50
O2034010	L'Aussonnelle à Seilh	191.2
Y5535410	La Mourachonne à Pégomas	43.80
Y5605210	La Brague à Biot [Plan Saint-Jean]	41.40
H5833010	Le ru de la Gondoire à Gouvernes [Deuil]	19.90

Tableau 3 – Caractéristiques des bassins urbains.

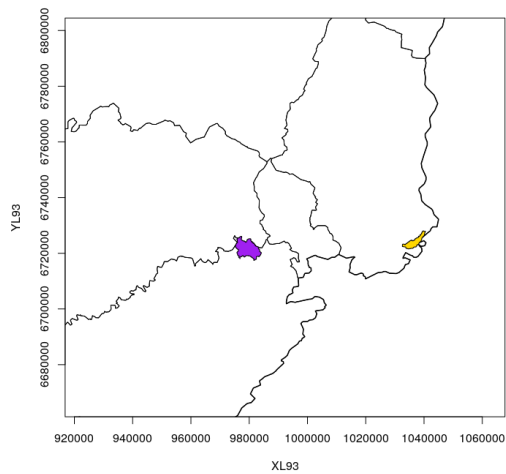
La localisation des bassins versants d'étude incendiés et urbains est précisée sur la Figure 2.



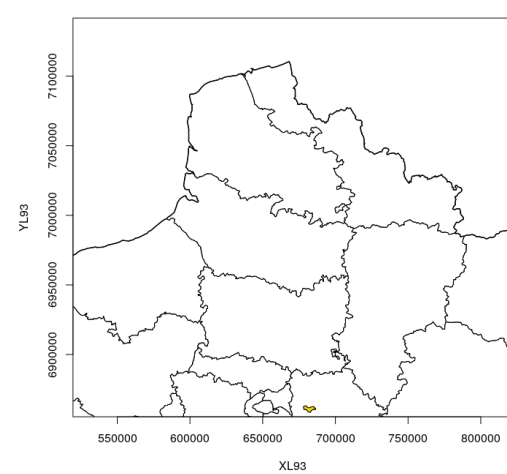
(a) Bassins se situant dans la zone 1.



(b) Bassins se situant dans la zone 2.



(c) Bassins se situant dans la zone 3.



(d) Bassins se situant dans la zone 4.

FIGURE 2 – Localisation des bassins versants d'étude incendiés et urbains. En violet les bassins versants incendiés et en jaune les bassins versants urbains.

3 MODÈLES UTILISÉS

3.1 Le modèle distribué GRD

3.1.1 Fonctionnement

GRD est un modèle pluie-débit :

- conceptuel pour lequel les processus hydrologiques sont conceptualisés et ses paramètres doivent être calés sur des données d'observation.
- entièrement distribué car l'élément de calcul est une grille régulière. Les processus hydrologiques sont représentés à l'échelle spatiale de cette grille. Les données d'entrée de pluie (P) et d'ETP (E) sont aussi définies sur une grille du domaine d'étude (Organde et al., 2018). La taille du maillage sur lequel le modèle est discrétisé dépend de la taille des données spatiales utilisées (généralement 1 [km²]).

La conception de ce modèle a été pensée pour répondre à la modélisation de bassins versants variés avec des régimes d'écoulement différents. Il doit être possible de modéliser les crues et les étiages, de prendre en compte le stockage et la fonte de la neige, de modéliser des bassins versants avec une forte composante d'écoulement souterrains, etc. La modélisation est entièrement distribuée, c'est à dire que les processus sont modélisés à l'échelle du pixel (à priori 1 [km²]). Les données d'entrée pluie (P), ETP (E), neige (N) et température (T) sont définies sur une grille du domaine d'étude. Le débit généré sur chaque pixel est ensuite routé vers les pixels aval. La Figure 3 représente le schéma de principe de la modélisation hydrologique retenue. Les

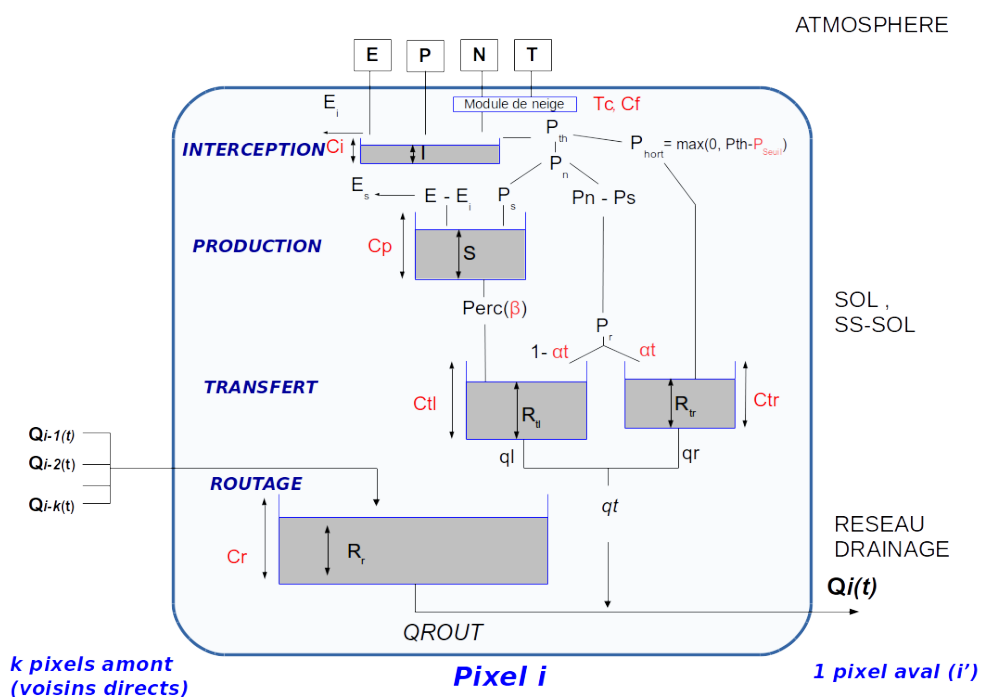


FIGURE 3 – Schéma complet de principe du modèle GRD. Les symboles en rouge constituent les paramètres du modèle (Documentation de GRD, 2020).

équations des différents modules des fonctions de production, de transfert et de routage sont explicitées ci-après. Les caractères en **gras** constituent les paramètres du modèle.

Production (interne au pixel) Le réservoir de production, noté Cp , assure le rôle de fonction de production non linéaire. La pluie est répartie entre les réservoirs de production et de transfert en fonction du niveau du réservoir de production $S(t - 1)$. Soit $Pn(t)$ la pluie nette et $En(t)$ l'évapotranspiration nette :

$$Pn(t) = Pth(t) - Phort(t) \quad (1)$$

$$En(t) = E(t) - Ei(t) \quad (2)$$

Si $Pn(t)$ est supérieure à 0, $En(t) = 0$ et la fraction de la pluie alimentant le réservoir Cp est :

$$Ps(t) = Cp \times \left(1 - \left(\frac{S(t-1)}{Cp}\right)^2\right) \times \frac{\tanh\left(\frac{Pn(t)}{Cp}\right)}{1 + \frac{S(t-1)}{Cp} \tanh\left(\frac{Pn(t)}{Cp}\right)} \quad (3)$$

Au contraire si $En(t)$ est supérieure à 0, $Pn(t) = 0$ et le réservoir se vide selon la formule :

$$Es(t) = Cp \left(2 - \frac{S(t-1)}{Cp}\right) \times \frac{\tanh\left(\frac{En(t)}{Cp}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S(t-1)}{A}\right) \tanh\left(\frac{En(t)}{Cp}\right)} \quad (4)$$

La quantité de pluie alimentant le réservoir de transfert est :

$$Pr(t) = Pn(t) - Ps(t) \quad (5)$$

L'état du réservoir de production évolue selon la formule suivante :

$$S^*(t) = S(t-1) + Ps(t) - Es(t) \quad (6)$$

Le réservoir de production présente aussi une vidange de fond (percolation $Perc(t)$) qui s'exprime de la manière suivante :

$$Perc(t) = Cp \times \left(1 - \left(1 + \left(\frac{S^*(t)}{\beta \times Cp}\right)^4\right)^{-1/4}\right) \quad (7)$$

L'état final du réservoir de production est le suivant :

$$S(t) = S^*(t) - Perc(t) \quad (8)$$

Transfert (interne au pixel) Le transfert est assuré par deux réservoirs l'un modélisant les écoulements rapides Ctr , l'autre les écoulements lents Ctl . La répartition de la pluie ruissemblée $Pr(t)$ est contrôlée par le coefficient α compris entre 0 et 1. Au début du pas de temps, les réservoirs se remplissent :

$$Rtr0 = Rtr(t-1) + Phort(t) + \alpha \times Pr(t) \quad (9)$$

$$Rtl0 = Rtl(t-1) + Perc(t) + (1 - \alpha) \times Pr(t) \quad (10)$$

Le débit sortant de ces deux réservoirs sur un pas de temps, $qr(t)$ et $ql(t)$, est proportionnel à leur niveau de remplissage respectif $Rtr0$ et $Rtl0$ ainsi qu'à leur capacité Ctr et Ctl :

$$qr(t) = Rtr0 - (Rtr0^{-4} + Ctr^{-4})^{-1/4} \quad (11)$$

$$ql(t) = Rtl0 - (Rtl0^{-4} + Ctl^{-4})^{-1/4} \quad (12)$$

Le niveau dans chaque réservoir de transfert devient :

$$Rtr(t) = Rtr0 - qr(t) \quad (13)$$

$$Rtl(t) = Rtl0 - ql(t) \quad (14)$$

Fonction de routage (de pixel en pixel) Alors que les fonctions de production et de transfert concernent chaque pixel indépendamment, la fonction de routage permet de relier les pixels entre eux et de prendre en compte l'écoulement le long du réseau hydrographique. Les directions d'écoulement d'un pixel à l'autre sont obtenues à partir d'un modèle numérique de terrain (M.N.T.) au pas d'espace de 1km. Les débits provenant des pixels amont s'écoulent vers le réservoir linéaire dont le paramètre Cr (en minutes) et le niveau de remplissage $Rr(t)$ conditionnent le débit sortant $Q_{ROUT}(t)$. Pour appliquer les équations de vidange du réservoir de routage, le débit amont $Q_{amont}^{m^3/s}(t)$, somme des débits des k pixels directement à l'amont du pixel courant i , est transformé en mm .

$$Q_{amont}^{m^3/s}(t) = \sum_{j=1}^k Q_j^{m^3/s}(t) \quad (15)$$

$$Q_{amont}^{mm}(t) = \left(\frac{Q_{amont}^{m^3/s}(t) \times \Delta t}{S_i - s_i} \right) \times 10^{-3} \quad (16)$$

avec Δt le pas de temps en secondes, S_i la superficie totale drainée à l'amont du pixel i et s_i la superficie du pixel i en mètres carrés. Au début du pas de temps, le réservoir se remplit :

$$Rr0 = Rr(t-1) + Q_{amont}^{mm}(t) \quad (17)$$

Le débit de sortie du réservoir de routage est défini selon le principe du réservoir linéaire :

$$Q_{ROUT}^{mm}(t) = Rr0 \times \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{60 \times Cr}\right) \right) \quad (18)$$

Le niveau dans le réservoir de routage devient :

$$Rr(t) = Rr0 - Q_{ROUT}^{mm}(t) \quad (19)$$

Il est ensuite transformé en mètres cube par secondes :

$$Q_{ROUT}^{m^3/s}(t) = \frac{Q_{ROUT}^{mm}(t)}{\Delta t} \times (S_i - s_i) \times 10^3 \quad (20)$$

Le débit s'écoulant dans le réseau de drainage vers les pixels aval est la somme de Q_{ROUT} et du débit généré à l'échelle du pixel :

$$Q_i^{m^3/s}(t) = Q_{ROUT}^{m^3/s}(t) + \frac{(qr(t) + ql(t)) \times s_i}{\Delta t} \times 10^3 \quad (21)$$

3.1.2 Calage des différentes configurations

Seuls 3 ou 4 des 5 paramètres présentés ci-dessus ont été calés, et cela de manière uniforme, c'est à dire, en imposant tous les pixels à la même valeur. Nous avons choisi de commencer par la configuration la plus simple possible du modèle (S1 dans le Tableau 4) et d'augmenter la complexité du modèle. Les caractéristiques de chaque configuration sont détaillées dans les

Paramètre	Configuration			Percolation
	S1	S2	S3	
Capacité de réservoir de production [mm]	C_p	C_p	C_p	0 ($\beta = 1000$)
Capacité de réservoir de transfert rapide [mm]	C_{tr}	C_{tr}	C_{tr}	0 ($\beta = 1000$)
Capacité de réservoir de transfert lent [mm]	-	C_{tl}	$C_{tl} = (C_{tr})^2$	0 ($\beta = 1000$)
Capacité de réservoir de routage [mm]	C_r	C_r	C_r	0 ($\beta = 1000$)
Coefficient de répartition de la précipitation ruisselée [-]	$\alpha = 1$	$\alpha = 0.1$	α	0 ($\beta = 1000$)

Tableau 4 – Les caractéristiques des trois configurations testées du modèle GRD. Les paramètres en **gras** représentent les paramètres de calage.

paragraphes ci-dessous.

Le paramétrage uniforme aux 3 paramètres C_p , C_{tr} , et C_r Dans cette première configuration (S1), la structure du modèle GRD est très simplifiée. Seuls la fonction de production (représentée par C_p), le réservoir de transfert rapide (représenté par C_{tr}) (donc $\alpha = 1$), et la fonction de routage (représentée par C_r) sont conservés. L'avantage de cette configuration réside dans sa simplicité structurelle.

Le paramétrage uniforme aux 4 paramètres C_p , C_{tr} , C_{tl} , et C_r , avec $\alpha = 0.1$ Dans la configuration S2, les trois composantes de la configuration S1 sont conservées mais nous ajoutons le réservoir de transfert lent. Cependant, la répartition de la pluie ruisselée (α) entre les deux réservoirs de transfert est imposée à 10% et les paramètres des deux réservoirs de transfert sont calés.

Le paramétrage uniforme aux 4 paramètres C_p , C_{tr} , α , et C_r , avec $C_{tl} = C_{tr}^2$ Dans la configuration S3, nous reprenons la configuration S2, mais la répartition de la pluie ruisselée (α) entre les deux réservoirs de transfert est laissée libre et la relation entre la capacité du réservoir lent et celle du réservoir rapide est imposée par $C_{tl} = (C_{tr})^2$.

L'algorithme de calage utilisée pour toutes les configurations est une méthode locale directe pas-à-pas développée par Michel (1989) qui cherche à trouver le jeu de paramètre qui optimise une fonction objective. Dans ce travail, la fonction objective cherche un jeu de paramètre identique sur tous les mailles qui maximise le critère de Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash et Sutcliffe, 1970). Dans l'optique d'avoir deux jeux de paramètres différents correspondant aux deux situations "avant" incendie / urbanisation et "après" incendie / urbanisation, le calage est effectué

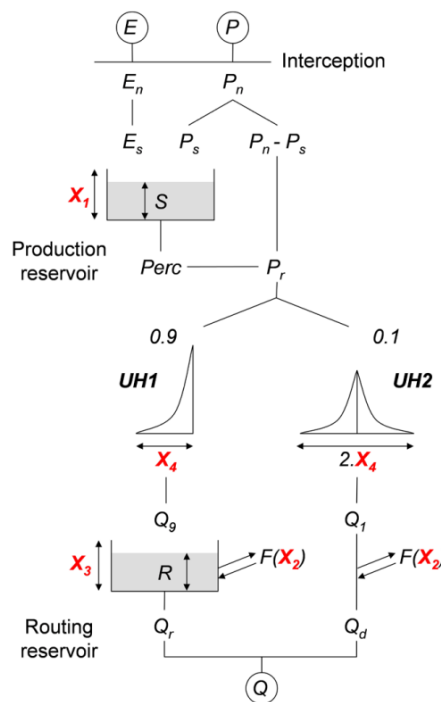
sur chacune des périodes. Les périodes "avant" et "après" pour les bassins incendiés correspondent aux périodes pré-incendie et post-incendie présentées dans le Tableau 2. Pour les bassins urbains, les deux périodes de disponibilité des données les plus éloignées du Tableau 1 sont choisies comme périodes "avant" et "après". Nous choisissons de fixer une période d'initialisation de 1 an pour tous les calages effectués. Cette période d'initialisation commence du début de la période de calage et dure donc 1 an.

3.2 Le modèle global GR4H

3.2.1 Fonctionnement

Pour l'approche globale, nous nous intéressons à un modèle de structure simple et facile à mettre en œuvre. Le modèle conceptuel global de GR4H, développé à IRSTEA d'Antony (Coron et al., 2020, Perrin et al., 2003), est la version horaire du modèle GR4J. Possédant une fonction d'échange, le modèle GR4H calcule le débit à l'exutoire du bassin versant en utilisant les données météorologiques d'entrées qui sont moyennées sur le bassin. Il s'agit d'un modèle à deux réservoirs (Figure 4) et nécessite l'estimation de 4 paramètres qui sont calés par rapport au débit observé à l'exutoire des bassins versants.

La transformation de la pluie en débit représente deux processus successifs : la production et le routage.



$$(1) \text{ Si } P \geq E, P_n = P - E \text{ et } E_n = 0$$

$$\text{Sinon, } P_n = 0 \text{ et } E_n = E - P$$

$$(2) P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S}{X_1} \right)^2 \right) \tanh \left(\frac{P_n}{X_1} \right)}{1 + \frac{S}{X_1} \tanh \left(\frac{P_n}{X_1} \right)}$$

$$(3) E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{X_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{X_1} \right)}{1 + 1 - \left(\frac{S}{X_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{X_1} \right)}$$

$$(4) S = S - E_s + P_s$$

$$(5) Perc = S \left(1 - \left[1 + \left(\frac{4}{9} \frac{S}{X_1} \right)^4 \right]^{-1/4} \right)$$

$$S = S - Perc$$

$$(6) P_r = Perc + (P_n - P_s)$$

$$(7) F = X_2 \left(\frac{R}{X_3} \right)^{7/2}$$

$$(8) R = \max(0; R + Q_9 + F)$$

$$(9) Q_r = R \left(1 - \left[1 + \left(\frac{R}{X_3} \right)^4 \right]^{-1/4} \right)$$

$$R = R - Q_r$$

$$(10) Q_d = \max(0; Q_1 + F)$$

$$(11) Q = Q_r + Q_d$$

FIGURE 4 – Schéma structurel et les équations du modèle global GR4H (Le Moine, 2008).

Le processus de production consiste à :

1. dans un premier temps, calculer la pluie nette (P_n) et l'évapotranspiration nette (E_n). A cette étape, une quantité d'évaporation (E_s) est retirée du premier réservoir (appelé réservoir de production et dimensionné par le paramètre X_1 [mm]).

2. dans un second temps, calculer le volume d'eau (S) dans le réservoir de production.
3. à l'issue de l'étape précédente, calculer la production du réservoir (P_r) à partir de la percolation (P_{er}) et la pluie efficace (la différence entre la pluie nette et la pluie alimentant le réservoir de production).

Le processus de routage consiste à :

1. d'abord, transférer la production via la fonction de transfert représentée par deux hydrogrammes unitaires dont le temps de base est défini par le paramètre X_4 [h].
2. ensuite, le routage non-linéaire de 90% du transfert vers l'exutoire à travers le réservoir de routage (dimensionné par le paramètre X_3 [mm]). Le 10% restant est directement transmis à l'exutoire, sans être routé le réservoir de routage.

Dans cette structure les échanges souterrains avec la nappe sont assurés par une fonction d'échange représentée par le paramètre X_2 .

3.2.2 Calage du modèle

De façon équivalente que pour les calages avec le modèle GRD, le modèle GR4H est calé sur les mêmes périodes "avant" et "après" définies dans la Sous-section 3.1.2 avec une année de chauffe au début de chaque période de calage. La procédure d'optimisation pas-à-pas développée par Michel (1989) et le critère d'optimisation de NSE sont également utilisés.

4 RÉSULTATS

4.1 Performance globale

Les modélisations pluie-débit pour les deux modèles sont faites en calage seulement (pas de phase de validation). Les simulations de débit du modèle global GR4H ainsi que du modèle GRD, pour les différents choix de paramétrage uniforme testés, sont évaluées par rapport aux débits observés à l'exutoire des bassins versants. L'évaluation de performance est représentée en fonction des critères de Kling-Gupta (KGE) (Gupta et al., 2009) et de NSE. KGE et NSE sont adimensionnels et compris entre $-\infty$ et +1 où la valeur +1 indique un accord parfait entre l'observation et la simulation. Les graphiques de la Figure 5 comparent, pour chaque critère de performance, la distribution du critère issue des différents calages. Pour estimer la performance globale, les critères de performance obtenus sur les deux périodes "avant" et "après" et pour l'ensemble des bassins versants d'étude (incendiés et urbains) sont pris en compte.

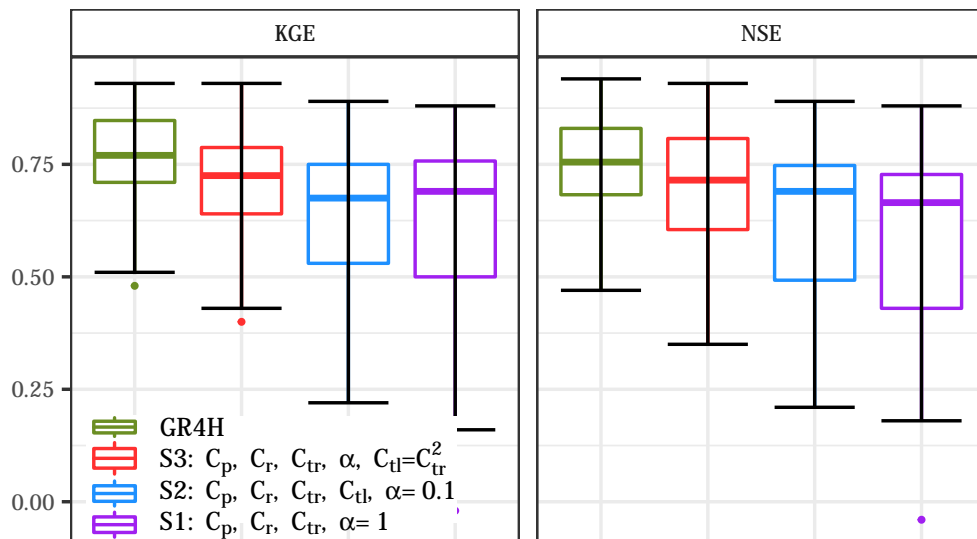


FIGURE 5 – Comparaison de la distribution des critères de performance KGE et NSE calculés pour chaque bassin de l'étude et pour chaque période de calage. Chaque distribution représente une des différentes configurations du modèle GRD ainsi que le modèle GR4H.

On observe que le modèle global GR4H conduit à de meilleurs scores KGE et NSE comparés à toutes les configurations testées du modèle distribué GRD. On constate aussi que le passage de 3 à 4 paramètres conduit à une amélioration du critère NSE. Pour le critère KGE, l'ajout du calage du paramètre C_{tl} en imposant 10% de la pluie ruisselée vers le réservoir du transfert lent (condition de $\alpha = 0.1$) dans la structure S2 n'améliore pas, globalement, le critère. Par contre, la structure S3 qui laisse libre la répartition de la pluie (α) entre les deux réservoirs de transfert mais qui lie la capacité des deux réservoirs de transfert avec la relation $C_{tl} = (C_{tr})^2$, présente la performance globale optimale parmi les configurations testées du modèle GRD.

Le KGE moyenné entre les deux périodes de calage pour le modèle global GR4H ainsi que les différentes configurations du modèle distribué GRD au travers des bassins versants incendiés et urbains est cartographié sur la Figure 6. On constate que pour les bassins versants situés dans le nord de France la performance de GRD et GR4H tombe sur la même classe. Pour les bassins corses, la performance de toutes les configurations du modèle GRD dépasse légèrement celle

du modèle global GR4H. Pour le groupe des bassins versants se situant dans le sud, le modèle GR4H et la configuration S3 appartiennent aux classes de performance équivalentes pour la majorité des bassins et celles-ci sont supérieures aux classes de performance des deux autres configurations, c'est-à-dire la configuration S1 (aux 3 paramètres C_p , C_{tl} , et C_r) et la configuration S2 (aux 4 paramètres C_p , C_{tr} , C_{tl} , et C_r).

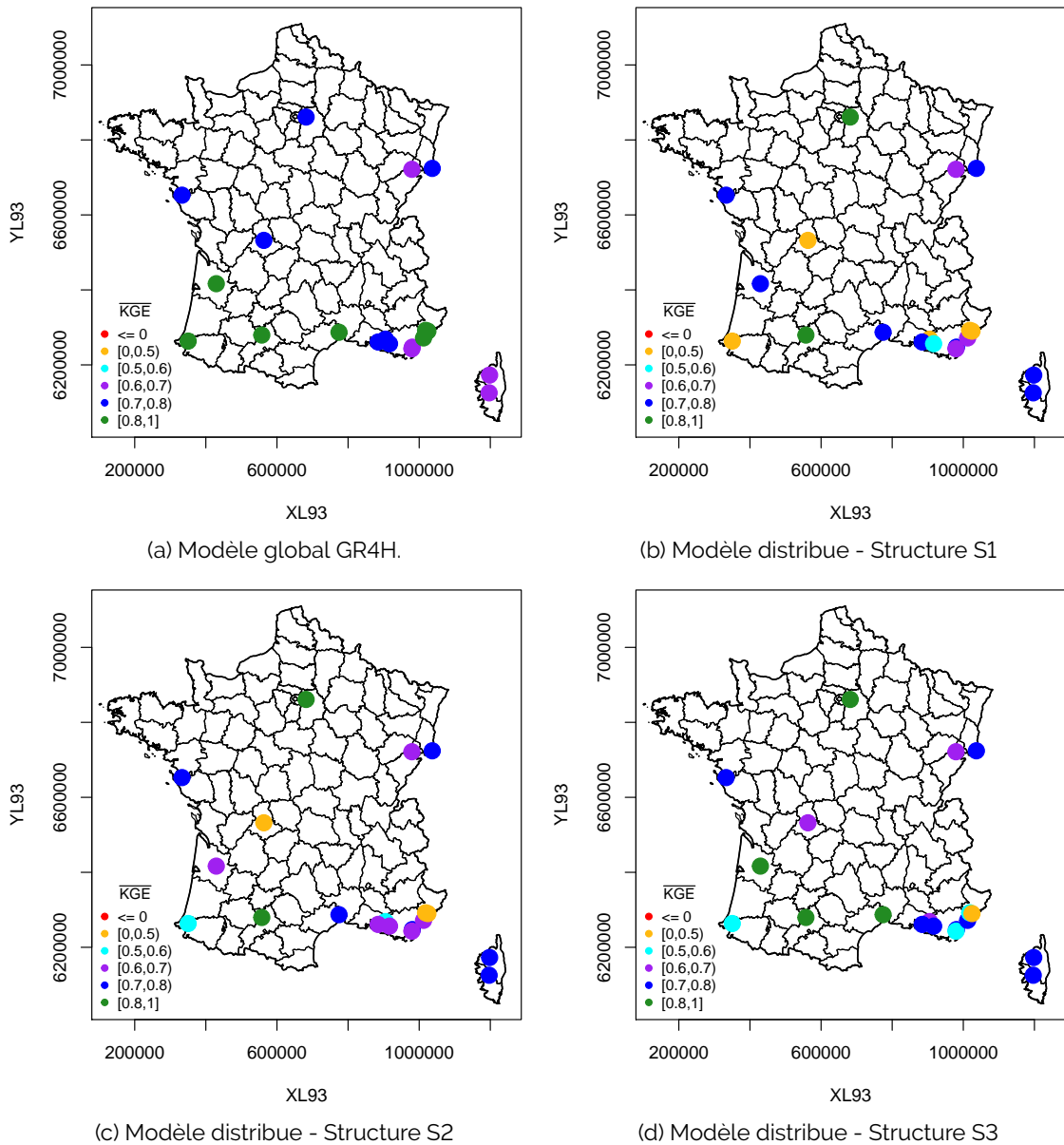


FIGURE 6 – Cartographie de KGE moyenné entre les deux périodes de calage pour les différentes structures du modèle distribué GRD et le modèle global GR4H au travers des bassins incendiés et urbanisés d'étude.

Figure 7 compare les valeurs du KGE et du NSE obtenues du calage réalisé sur chacune des périodes P1 (pré-incendie ou pré-urbanisation) et P2 (post-incendie ou post-urbanisation) sur l'ensemble des bassins d'étude pour les différentes configurations du modèle GRD. On observe que les valeurs de KGE et de NSE diffèrent d'une période à l'autre. D'après la figure, il s'avère que cette différence est moins importante pour la configuration S3 et on peut constater un groupement plus proche autour de la bissectrice, ce qui indique une stabilité de performance relative entre les deux périodes de calage. Aucune tendance particulière est identifiable entre la gran-

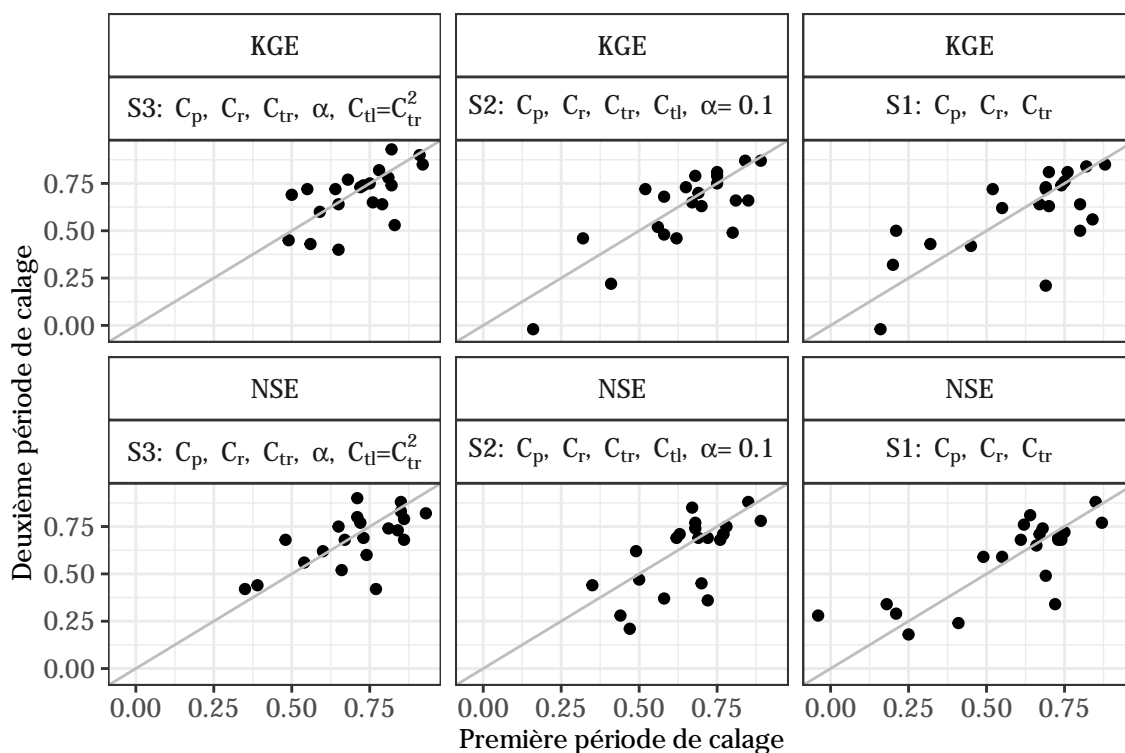


FIGURE 7 – Comparaison des critères de performance KGE et NSE sur chaque période de calage pour les différentes structures testées du modèle distribué à travers de l'ensemble des bassins incendiés et urbanisés d'étude.

deur des valeurs d'une période comparée à l'autre.

4.1.1 En distinguant le débit de base du débit de crue

Afin d'évaluer plus spécifiquement la performance globale, les débits calculés et simulés sont séparés en deux type d'apport (débit de base versus débit de crue) à l'aide du filtre de séparation d'hydrogramme d'Eckhardt (2005). Globalement, on constate une performance supérieure du modèle GR4H à celle du modèle GRD sur les deux type d'apport, mais surtout sur les débits de crues, ce qui conduit à une performance supérieure dans l'ensemble. La performance des différentes configurations du modèle GRD est très proche sur les débits de base. Concernant les débits de crues, pendant que le calage du paramètre C_{tl} améliore légèrement les deux critères de performance, le calage du paramètre α et l'imposition de la relation $C_{tl} = (C_{tr})^2$ dans la configuration S3 apporte un gain plus important de KGE et de NSE.

4.1.2 En fonction des débits de référence de QA, QMNA5, et VCN10

La performance globale des différentes configurations du modèle GRD est ensuite examinée par rapport aux débits de référence présentés dans le Tableau 5. Pour ce faire, les débits journaliers sont d'abord cumulés pour obtenir les débits horaires. Les débits de référence de QA, QMNA5, et VCN10 sont ensuite calculés. Pour chaque débit de référence, on obtient ainsi une valeur par bassin versant et par période de calage. Enfin, les critères de performance de KGE et de NSE sont calculés à partir des valeurs obtenues de l'ensemble des bassins versants d'étude et des deux périodes de calage (Tableau 6). On constate que l'ensemble des configurations ont de bonnes performances (supérieure à 0.8) dans la restitution du module pour les deux critères

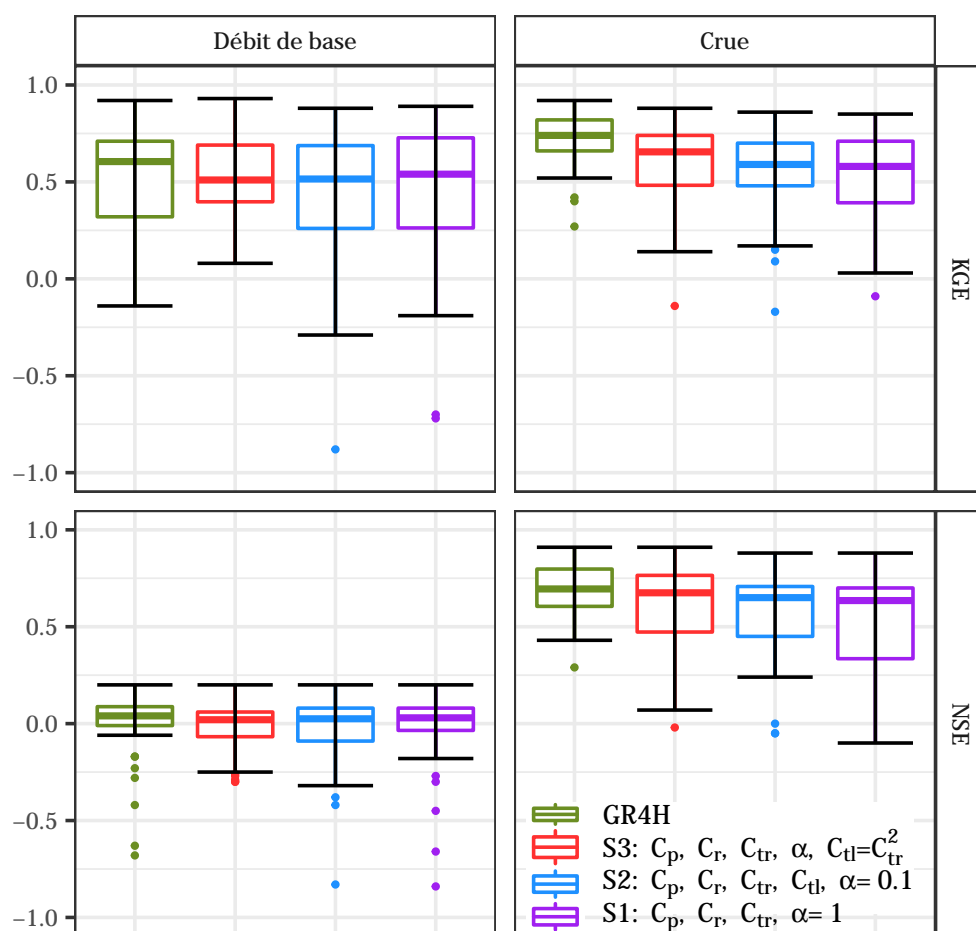


FIGURE 8 – Comparaison de la distribution des critères de performance KGE et NSE dans l'ensemble des échantillons incendiés et urbanisés en fonction de la gamme de débits entre les différentes structures du modèle distribué ainsi que le modèle GR4H. Pour chaque bassin, KGE et NSE des deux périodes de calage sont pris en compte individuellement.

de performance. Cependant, la configuration S1 à 3 paramètres est plus performante que les deux configurations à 4 paramètres en terme de KGE. En ce qui concerne les débits de référence QMNA5 et VCN10, la performance de toutes les configurations diminue de manière significative à des valeurs très faibles (< 0.4 en KGE et < 0.2 en NSE). Cette descente de performance est notamment plus importante pour la configuration S1 à 3 paramètres. Entre les deux modèles à 4 paramètres, la configuration S3 (avec le calage d' α et l'imposition de $C_{tl} = (C_{tr})^2$) est plus performante et dépasse la configuration S2 (avec le calage de C_{tl} et $\alpha = 0.1$), ce qui est cohérent avec l'observation faite dans la Partie 4.1.

Indice	Description	Période de calcul	Indicateur de
QA	Débit moyen inter-annuel (module)	L'année hydrologique	Le bilan hydrologique global
QMNA5	Débit mensuel quinquennal sec	L'année civile	La sévérité de l'étiage
VCN10	Débit minimal sur 10 jours consécutifs	L'année d'étiage	La sévérité de l'étiage

Tableau 5 – Les débits de référence utilisés pour l'évaluation de performance globale des modèles testés.

Configuration	KGE			NSE		
	QA	QMNA5	VCN10	QA	QMNA5	VCN10
S1	0.91	0.13	0.08	0.84	0.01	0.06
S2	0.86	0.37	0.32	0.81	0.1	0.19
S3	0.88	0.41	0.36	0.85	0.19	0.21

Tableau 6 – Synthèse des critères de KGE et de NASH sur la restitution des débits de référence.

4.1.3 En fonction de paramètre d'échange du modèle GR4H

Le modèle global GR4H prend en compte des échanges souterrains grâce à son paramètre X_2 . Cette prise en compte se fait sur le plan du bilan. Les valeurs positives ou négatives de X_2 introduisent un apport ou une perte effective d'eau dans le bilan. Le modèle distribué GRD ne possède pas cet ajustement du bilan en eau. Pour voir l'influence de cette propriété propre à GR4H, on s'intéresse à rechercher des corrélations éventuelles entre la grandeur de ce paramètre et le gain de performance du modèle GR4H. A noter que le modèle GR4H est un modèle à 4 paramètres et a donc le même degré de liberté que les configurations S2 et S3 du modèle GRD. Les scores de KGE et NSE obtenus par les différentes configurations du modèle GRD sont comparés à ceux du modèle GR4H où la taille des points varie en fonction de la grandeur du paramètre X_2 optimum du modèle GR4H. Les résultats obtenus sur l'ensemble des bassins versants et sur les deux périodes de calage sont résumés sur la Figure 9. Les points qui sont situés au dessus de la bissectrice indiquent les cas où le modèle GR4H est plus performant et plus la distance entre la bissectrice et ces points augmente plus le gain du modèle GR4H devient important. D'après la figure, on ne peut pas constater une corrélation importante entre le gain en KGE et/ou NSE (la distance entre la bissectrice et le point au dessus) et la taille des points. Par exemple, compte tenu du critères de NSE, les points situés proche de la bissectrice ont des tailles bien plus importantes que les points qui sont situés plus loin. Quant au critère de KGE, la tendance est peu identifiable pour la configuration S3. Pour les deux autres configurations, en partant de la bissectrice vers le bas, la taille des points augmente d'abord, ensuite diminue, mais augmente à nouveau pour les scores très élevés de KGE. On peut donc conclure que le gain de performance du modèle GR4H n'est pas liée à la valeur du paramètre d'échange X_2 .

4.2 Paramètres optimaux obtenus

Pour chacune des configurations testées, les valeurs des paramètres optimaux obtenus sont examinées. Les graphiques de la Figure 10 présentent, pour chaque configuration, la distribution des paramètres calés et imposés.

Le paramètre de production C_p qui est calé dans chacune des configurations, présente des valeurs relativement proches pour la configuration S1 à 3 paramètres et la configuration S2 à 4 paramètres (C_{il} et $\alpha = 0.1$) : autour des valeurs médianes de 560 (S1) [mm] et de 537 (S2) [mm]. Pour la configuration à 4 paramètres S3 les valeurs sont bien plus faibles (autour d'une valeur médiane de 239 [mm]). On observe que, globalement, le passage de 3 (configuration S1) à 4 paramètres (configurations S2 et S3), conduit à une diminution du paramètre C_p . Cette diminution est légère dans la configuration S2 et importante pour la configuration S3.

Le paramètre de transfert rapide C_{tr} fait l'objet d'un calage pour chacune des configurations. Dans la configuration S2 même si la valeur médiane (4 [mm]) est plus faible que celle des deux

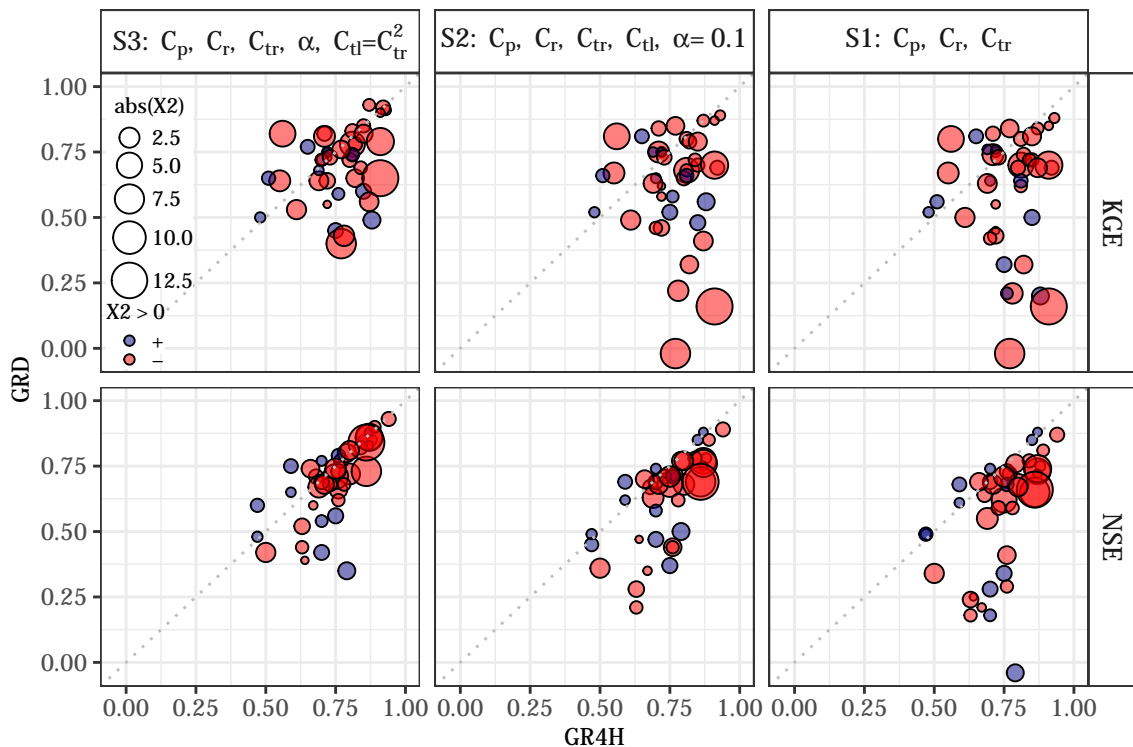


FIGURE 9 – Comparaison de performance en KGE des différentes structures du modèle distribué avec le modèle global GR4H en investiguant la grandeur et la direction d'échange souterrain présenté par le paramètre X2 optimum du modèle global GR4H. Pour chaque bassin, KGE et NSE des deux périodes de calage sont pris en compte individuellement. L'ensemble des bassins incendiés et urbanisés sont pris en compte.

autres configurations, la distribution de C_{tr} présente des valeurs très élevées. La configuration S3 présente les valeurs les plus faibles pour le paramètre C_{tr} avec une valeur médiane autour de 49 [mm]. Pour la configuration à 3 paramètres (S1) qui n'introduit qu'un seul réservoir de transfert, c'est-à-dire, le réservoir de transfère rapide, la distribution du paramètre C_{tr} présente globalement des valeurs plus élevées que celles de la configuration S3 et moins élevées que celles de la configuration S2. Cependant, la valeur médiane (122 [mm]) est plus élevée comparée aux deux autres configurations.

Pour le paramètre de transfert lent C_{tl} , on peut observer qu'il prend des valeurs très élevées (autour d'une valeur médiane de 2434 [mm]) dans la configuration S3, c'est dire lorsqu'on impose $C_{tl} = C_{tr}^2$. Par contre, lors que C_{tl} est calé (configuration S2), il prend des valeurs nettement plus petites autour d'une valeur médiane de 117 [mm].

Le paramètre α est imposé dans les configurations S1 (1) et S2 (0.1). Lorsqu'il est calé (configuration S3), on constate que ses valeurs se répartissent autour d'une médiane de 0.5.

Pour le paramètre de routage C_r qui est aussi calé dans chacune des configurations, le passage de 3 à 4 paramètres conduit globalement aux valeurs plus élevées. Entre les deux configurations à 4 paramètres, les valeurs de la configuration S3 sont légèrement plus faibles que celles de la configuration S2.

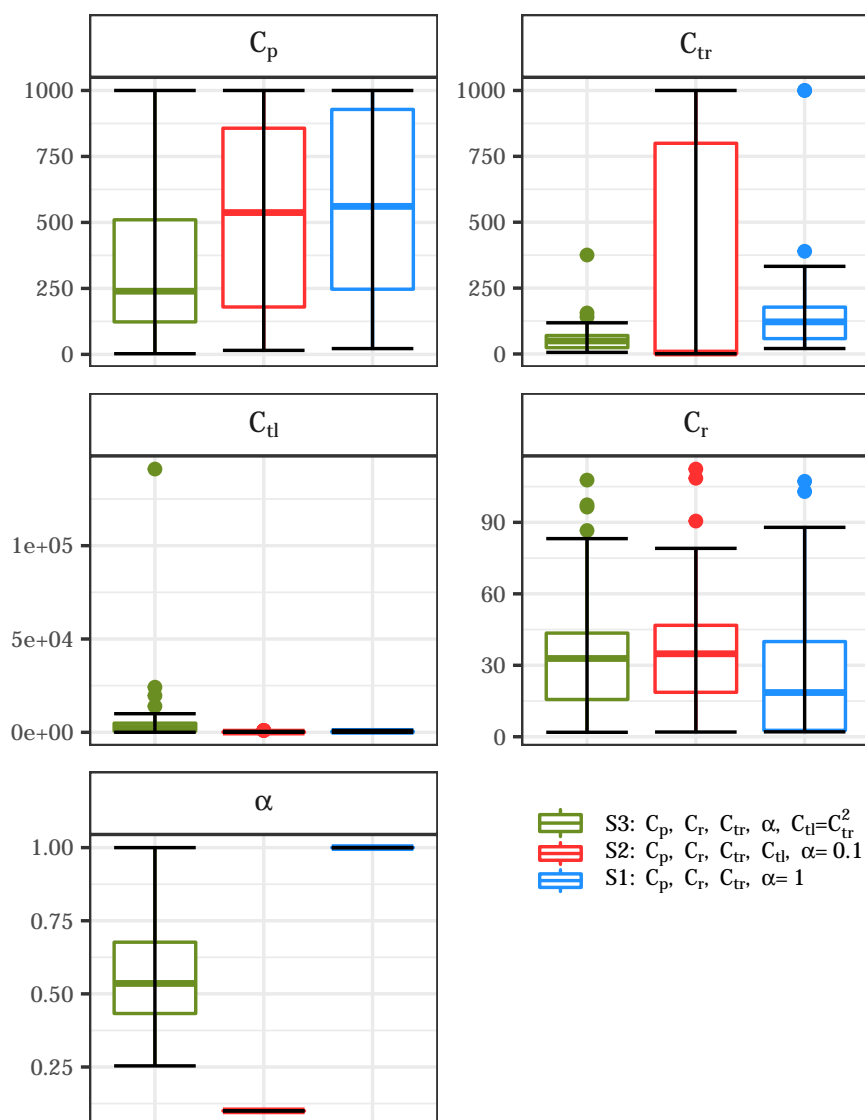


FIGURE 10 – Distribution des paramètres optimaux des différentes structures du modèle distribué pour l'ensemble des bassins incendiés et urbanisés. Pour chaque bassin, les paramètres optimaux de chaque période de calage sont pris en compte individuellement.

Les graphiques de la Figure 11 permettent quant à eux une comparaison des paramètres optimaux obtenus sur chaque période de calage. Les remarques suivantes peuvent être faites :

- Le paramètre C_p prend des valeurs globalement plus élevées sur la deuxième période de calage (post-incendie ou post-urbanisation).
- Dans les configurations S3 et S1, on constate une relative stabilité du paramètre C_{tr} autour des valeurs médianes des deux périodes. Pour la configuration S2, à l'exception d'un cas, pour la première période la valeur retenue est proche de la borne minimale 1 [mm] et pour la deuxième période la valeur retenue est autour de la valeur maximale 1000 [mm].
- La configuration S2 tend à conserver ses valeurs de C_{tl} d'une période à l'autre. Dans la configuration S1 pour laquelle C_{tl} ne fait pas objet d'un calage, la valeur trouvée en pré-filtrage est retenue.
- Les valeurs du paramètre de routage (C_r) sont globalement inférieures sur la deuxième période de calage, indiquant un transfert plus rapide de l'eau vers l'aval des bassins.

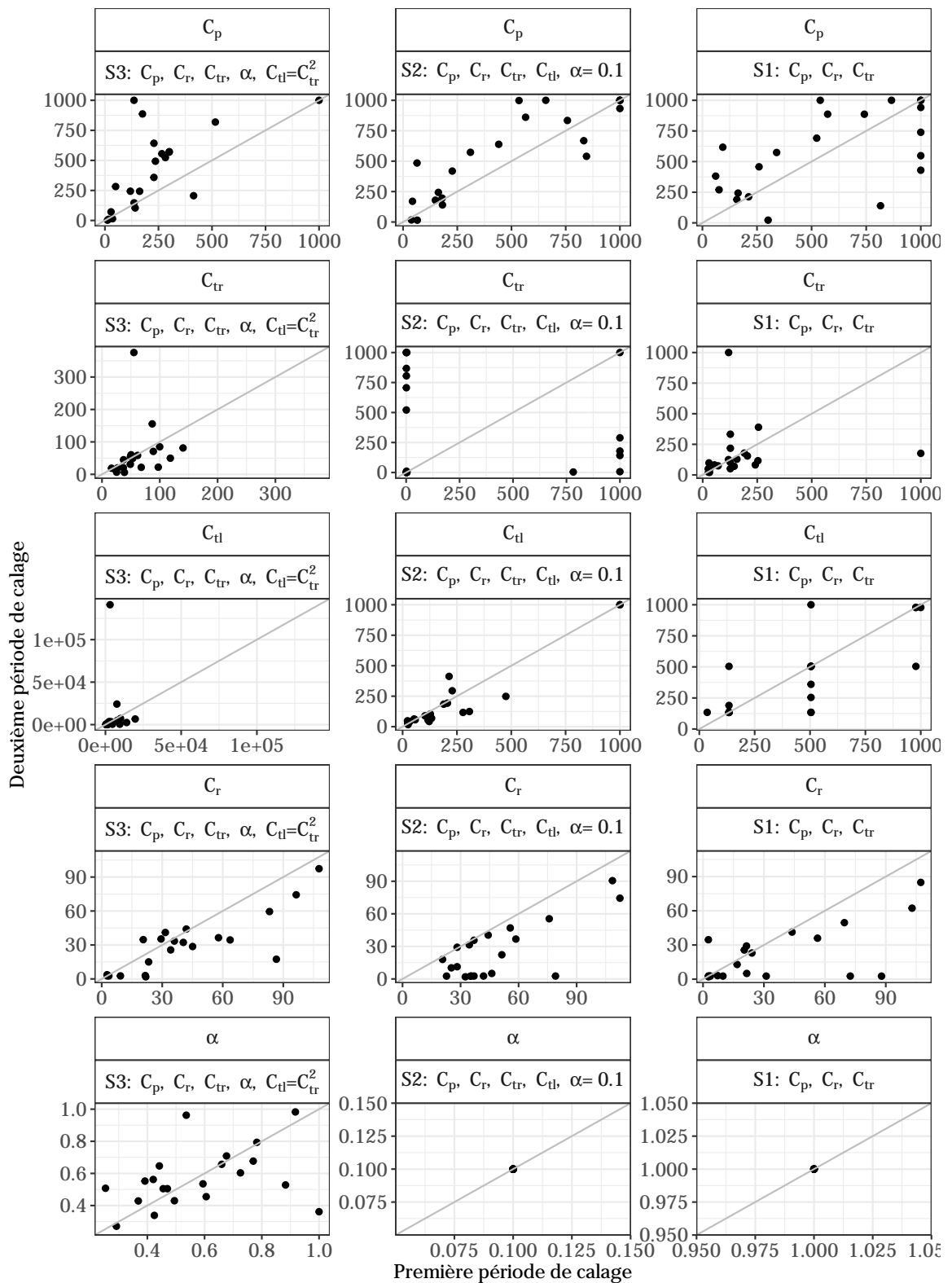


FIGURE 11 – Scatterplot des paramètres optimaux issus des différentes structures du modèle distribué sur les deux périodes de calage pour l'ensemble des bassins incendiés et urbanisés.

5 CONCLUSION

Nos précédentes études (Mas (2018) et Mas et Arnaud (2019)) ayant été menées à partir du modèle global GR4H, le but de ce travail était de voir si le passage à un modèle distribué pouvait conduire à une meilleure caractérisation des changements du régime hydrologique consécutifs à des modifications physiques dans les bassins (à la suite d'une forte urbanisation ou d'un incendie).

La présente étude montre que :

- Sur l'ensemble des bassins versants de notre échantillon, le modèle global GR4H est plus performant que le modèle distribué GRD et cela pour les 3 configurations que nous avons testées.
- Les performances sur les débits de base étant relativement similaires quel que soit le modèle, il semble que ce soit l'aptitude à bien reproduire les écoulements rapides (crues) qui guide la performance globale.
- Pour le modèle distribué, la configuration S3 à 4 paramètres (C_p , C_{tr} , C_r , α avec $C_{tl} = (C_{tr})^2$) conduit aux meilleurs résultats en calage.

En l'état actuel de nos résultats (obtenus avec des paramètres uniformes), passer à une version distribuée GRD pour l'analyse des changements de régime n'apporterait donc pas de plus value. Ces tests de comparaison sont néanmoins encourageants. En effet,

- Les paramètres obtenus avec le modèle distribué donnent des indications cohérentes, comme par exemple une augmentation de la vitesse de routage après changement.
- Le passage à un calage distribué des paramètres, si réalisé avec les bonnes contraintes, pourrait d'une part améliorer les performances de modélisation, et
- d'autre part ouvrir la voie vers la modélisation fine des modifications, à l'intérieur même des bassins et pas uniquement de façon globale.

Ainsi, même si l'effet des changements au sein des bassins versants est particulièrement complexe à appréhender, ce travail mérite d'être poursuivi.

BIBLIOGRAPHIE

- J. Chen, L. Theller, M. W. Gitau, B. A. Engel, J. M. Harbor, et al. Urbanization impacts on surface runoff of the contiguous united states. *Journal of Environmental Management*, 187 :470–481, 2017.
- L. Coron, O. Delaigue, G. Thirel, C. Perrin, and C. Michel. *airGR : Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling*, 2020. URL <https://CRAN.R-project.org/package=airGR>. R package version 1.4.3.65.
- K. Eckhardt. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes*, 19(2) :507–515, 2005. doi : <https://doi.org/10.1002/hyp.5675>.
- H. V. Gupta, H. Kling, K. K. Yilmaz, and G. F. Martinez. Decomposition of the mean squared error and nse performance criteria : Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1) :80 – 91, 2009.
- R. D. Harr, W. C. Harper, J. T. Krygier, and F. S. Hsieh. Changes in storm hydrographs after road building and clear-cutting in the oregon coast range. *Water Resources Research*, 11(3) :436–444, 1975.
- M. Jay-Allemand, P. Javelle, I. Gejadze, P. Arnaud, P.-O. Malaterre, J.-A. Fine, and D. Organde. On the potential of variational calibration for a fully distributed hydrological model : application on a mediterranean catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019 :1–24, 2019.
- M. Jay-Allemand and D. Organde. *Documentation de GRD*. IRSTEA & Hydris hydrologie, 2020.
- N. Le Moine. Le bassin versant de surface vu par le souterrain : une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit ? Master's thesis, Doctorat Géosciences et Ressources Naturelles, Université Pierre et Marie ..., 2008.
- A. Mas. 4.2.3 – changement global : rôle des incendies. Technical report, Irstea, Unité de recherche RECOVER, 3275 Route Cezanne – CS 40061, 12 2018. Action 4.2 - SHYREG.
- A. Mas and P. Arnaud. 4.2.3 – changement global : rôle des zones urbaines. Technical report, Irstea, Unité de recherche RECOVER, 3275 Route Cezanne – CS 40061, 12 2019. Action 4.2 - SHYREG.
- C. Michel. *Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux (Applied hydrology for small catchments)*. Cemagref, Antony, France, 1989. Internal Report.
- J. E. Nash and J. V. Sutcliffe. River flow forecasting through conceptual models part i—a discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3) :282–290, 1970.
- D. Organde, N. Folton, and P. Arnaud. Développement dans le modèle hydrologique grd de la modélisation des écoulements lents. Technical report, INRAE, HYDRIS hydrologie, 2018.
- L. Oudin, F. Hervieu, C. Michel, C. Perrin, V. Andréassian, F. Anctil, and C. Loumagne. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model ? : Part 2—towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. *Journal of hydrology*, 303(1-4) :290–306, 2005.
- C. Perrin, C. Michel, and V. Andréassian. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279 :275–289, 2003.

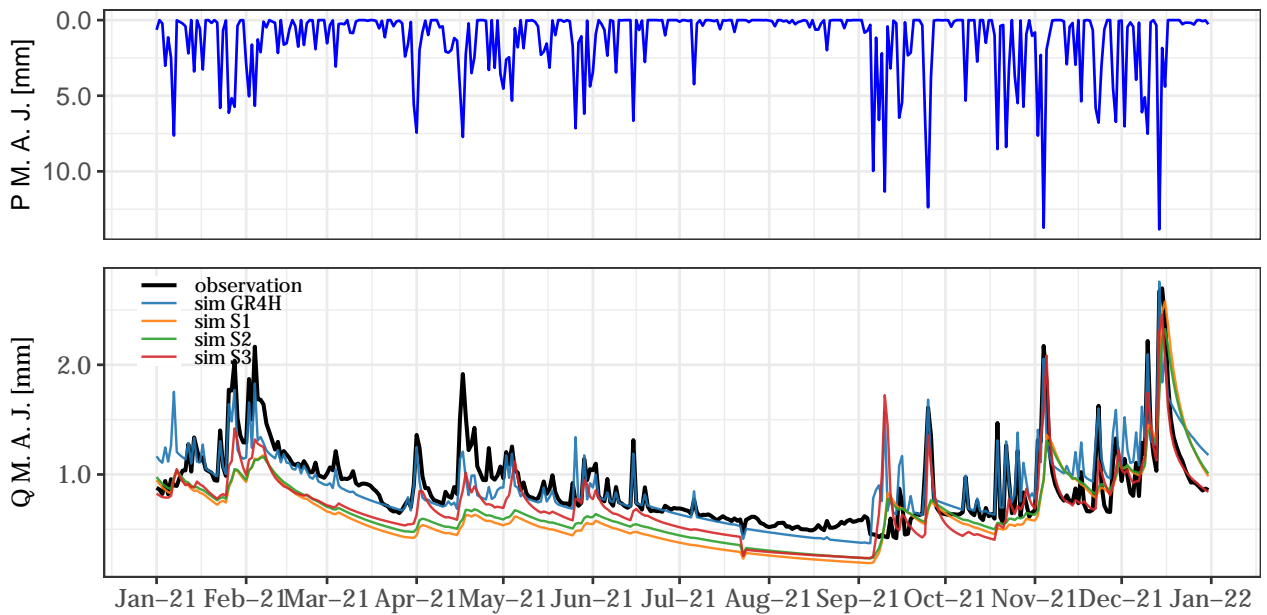
J.-P. Vidal, E. Martin, L. Franchistéguy, M. Baillon, and J.-M. Soubeyrou. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30(11) :1627–1644, 2010. doi : 10.1002/joc.2003.

ANNEXES

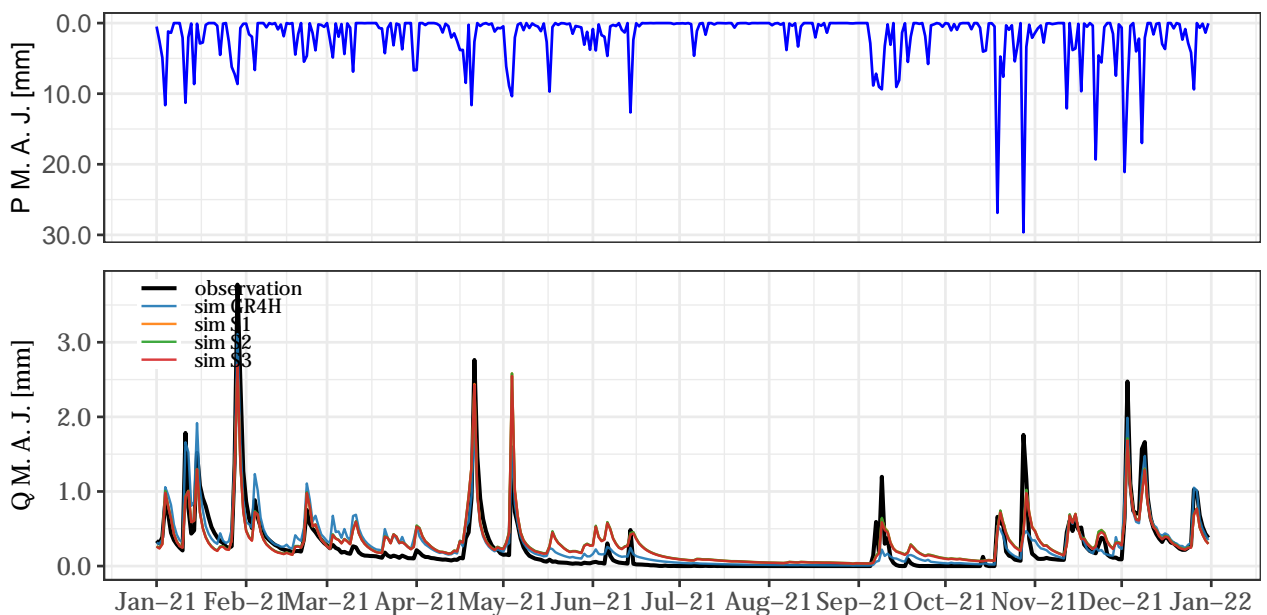
A Débits moyens annuels journaliers observés et simulés par GR4H et par GRD configurations S1, S2, S3 pour les bassins incendiés

Période pré-incendie

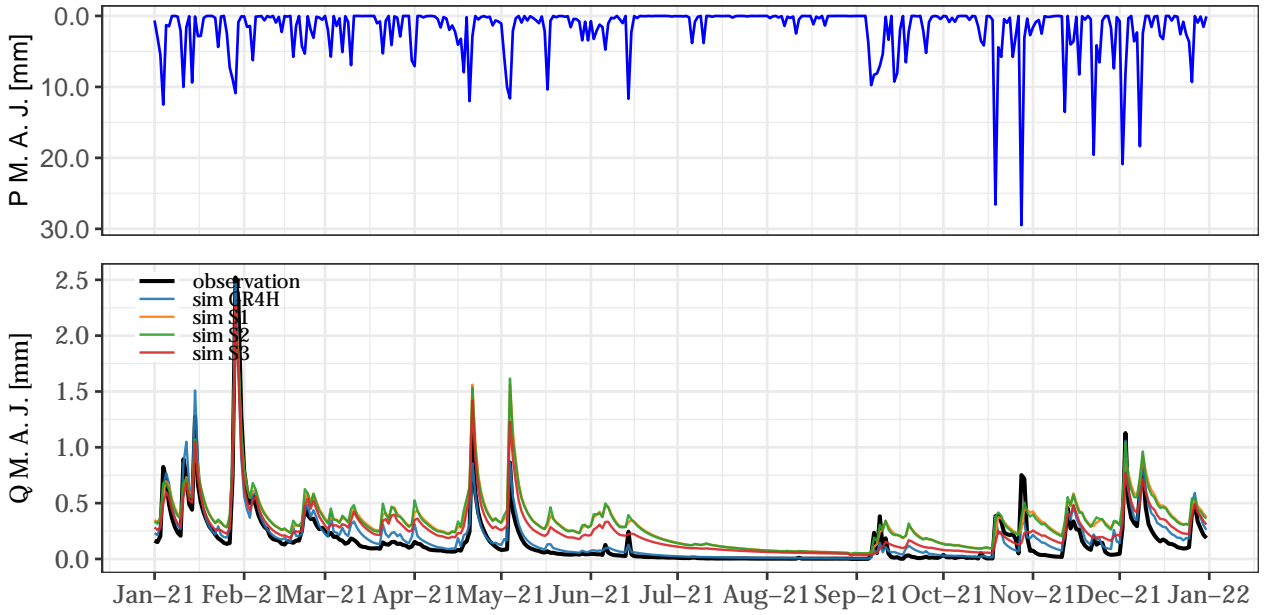
code : Y4225610 , nom : La Cadière à Marignane [stade Saint-Pierre]
superficie : 71.9 [km²]



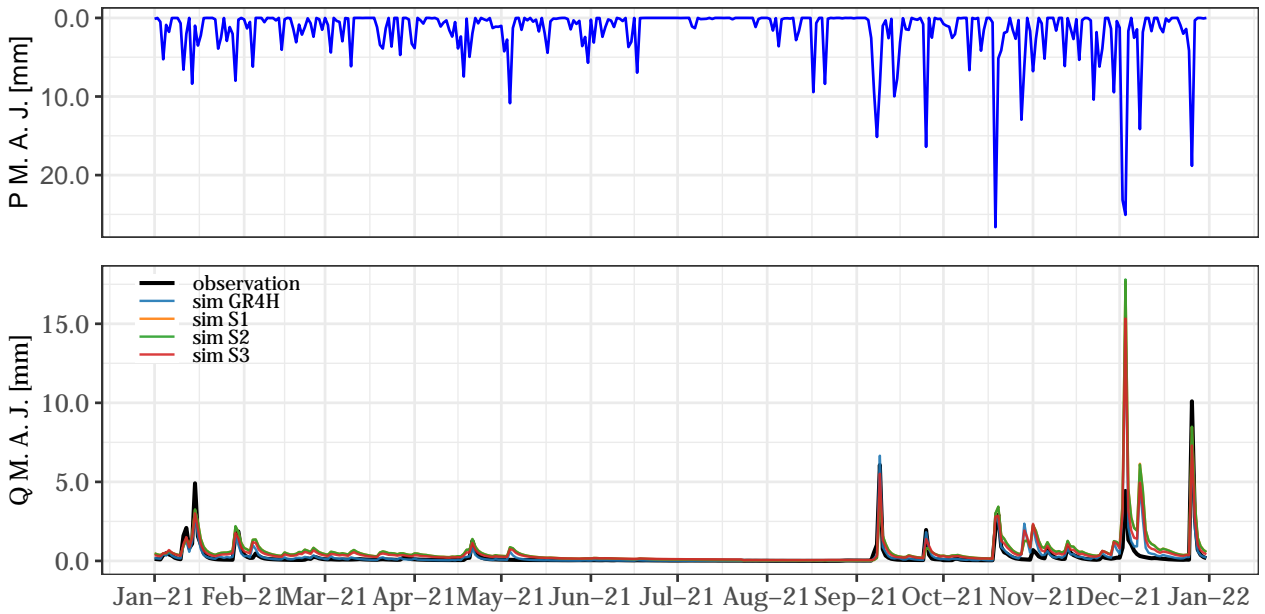
code : Y5424010 , nom : La Giscle à Cogolin
superficie : 66.1 [km²]



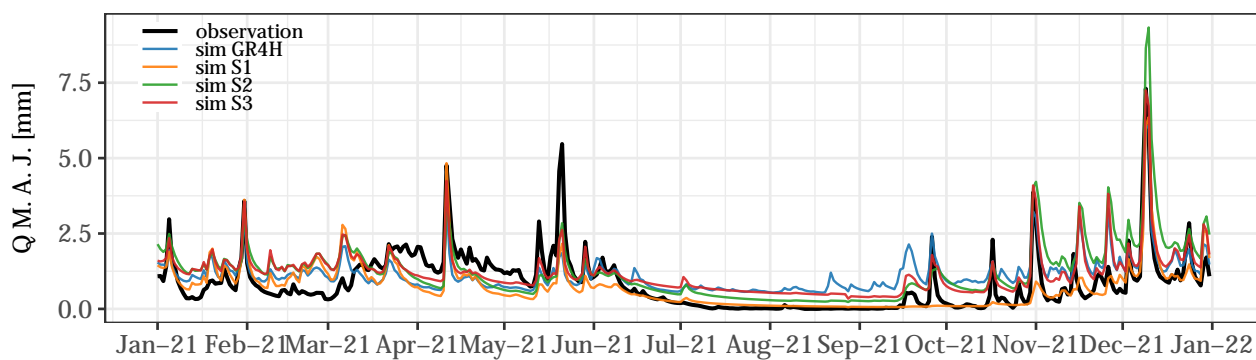
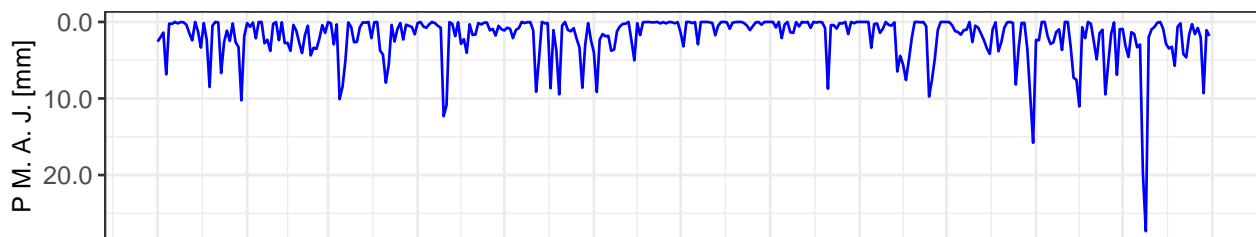
code : Y5444010 , nom : La Gisle à Cogolin [Les Ajusts]
superficie : 201.5 [km2]



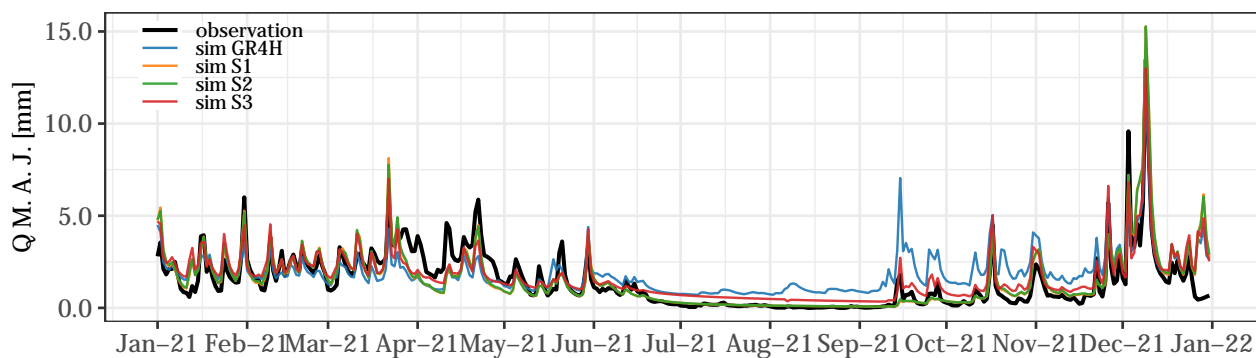
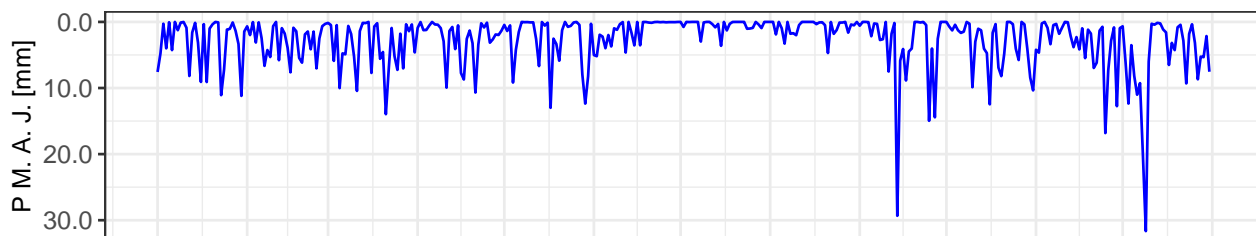
code : Y5505410 , nom : Le Grenouiller à Saint-Raphaël [Agay]
superficie : 48 [km2]



code : Y7114020 , nom : L'Asco à Morosaglia [Ponte-Leccia]
superficie : 366.3 [km2]

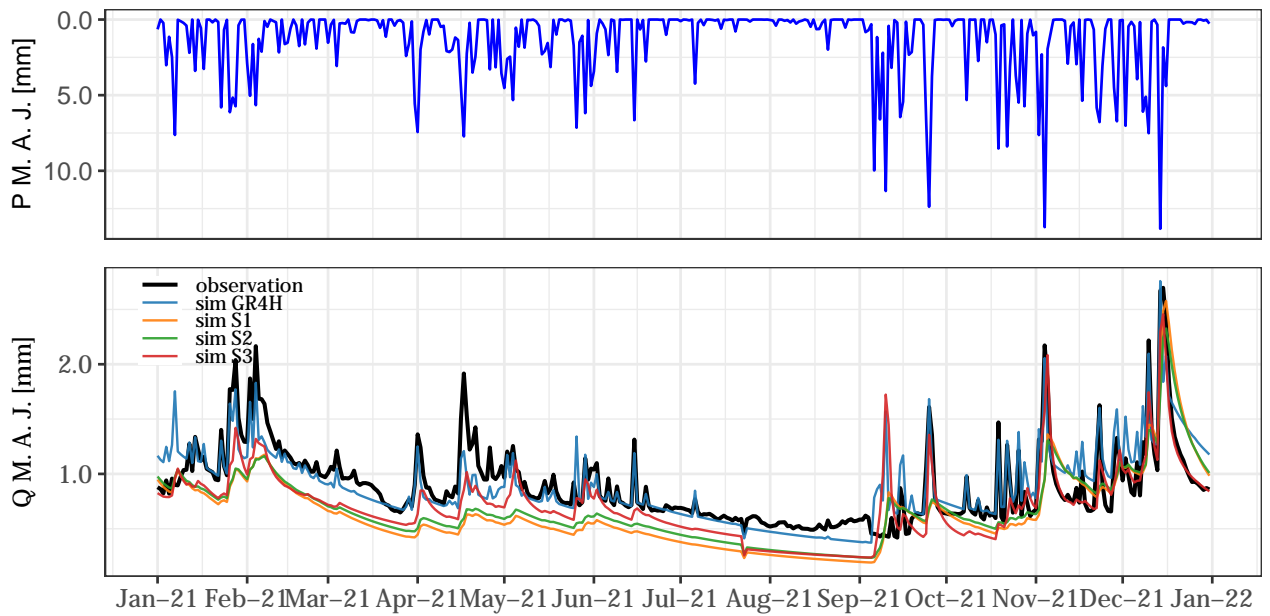


code : Y8324020 , nom : La Gravone à Peri
superficie : 200.8 [km2]

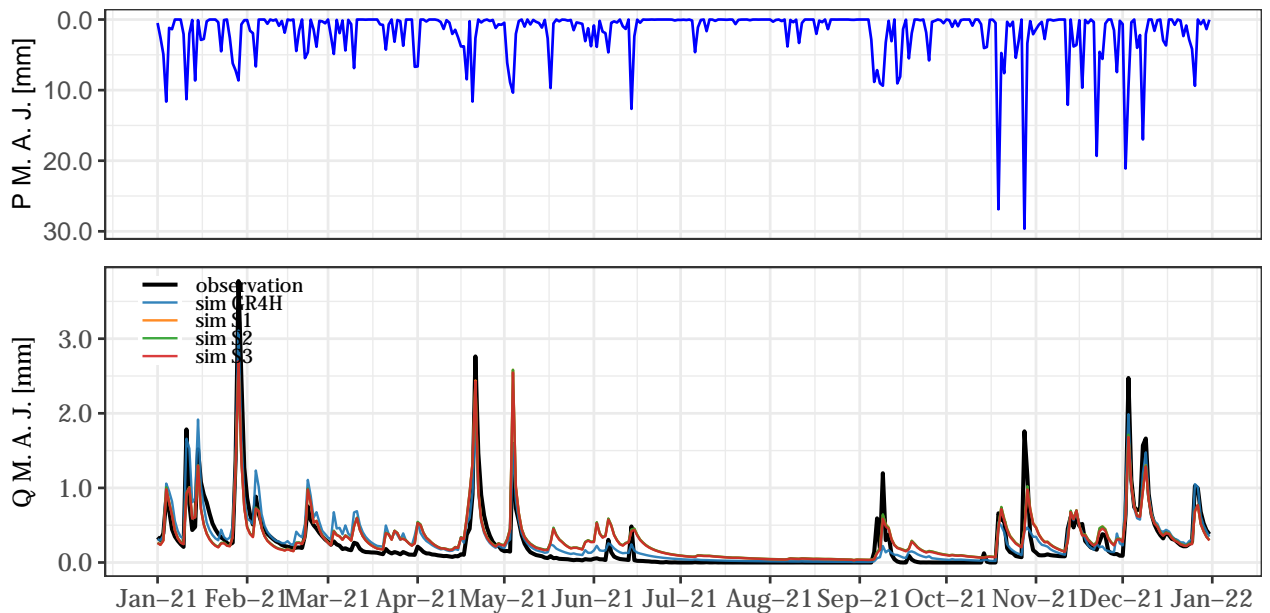


Période post-incendie

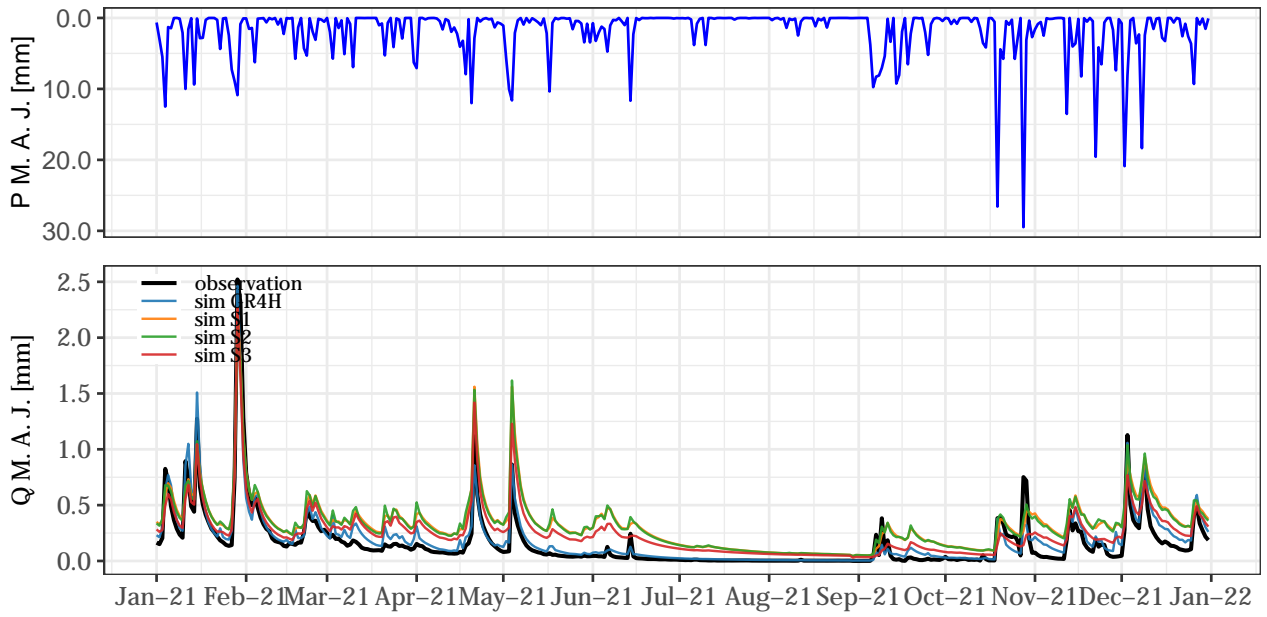
code : Y4225610 , nom : La Cadière à Marignane [stade Saint-Pierre]
superficie : 71.9 [km2]



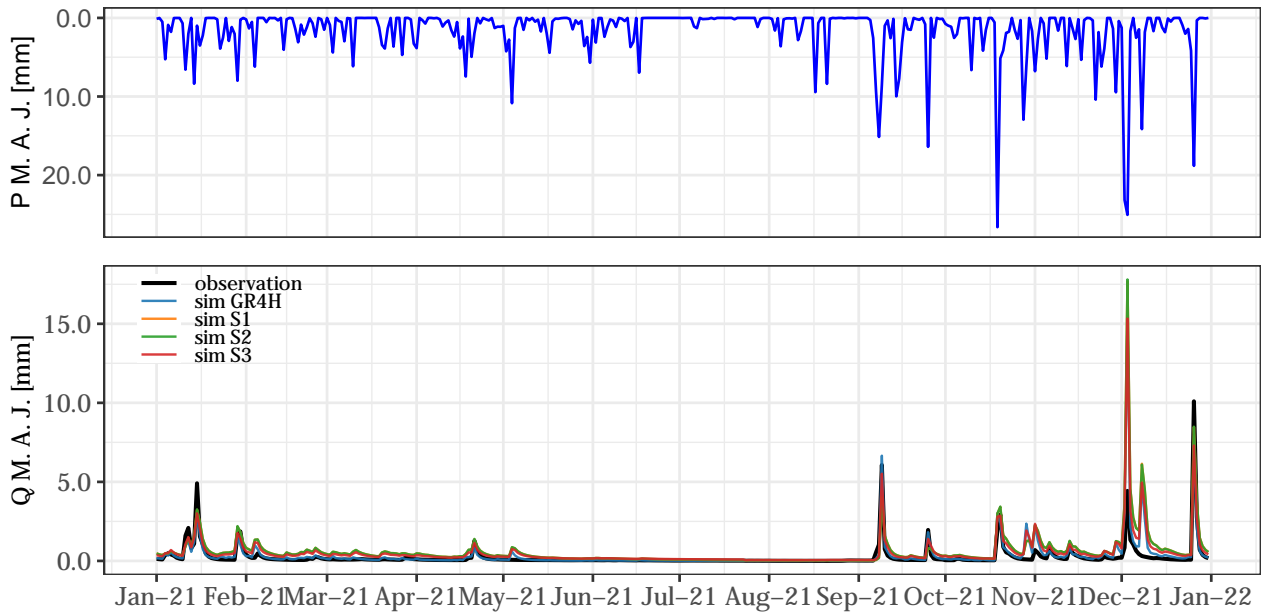
code : Y5424010 , nom : La Gisle à Cogolin
superficie : 66.1 [km2]



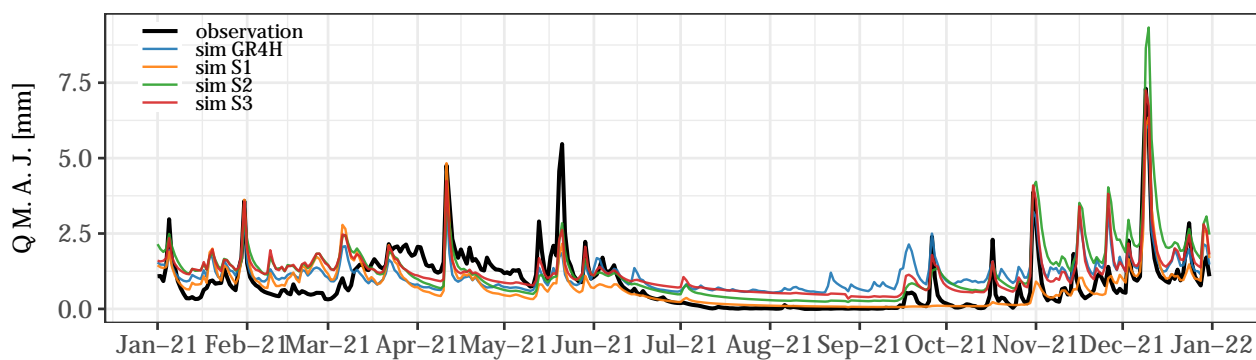
code : Y5444010 , nom : La Gisle à Cogolin [Les Ajusts]
superficie : 201.5 [km2]



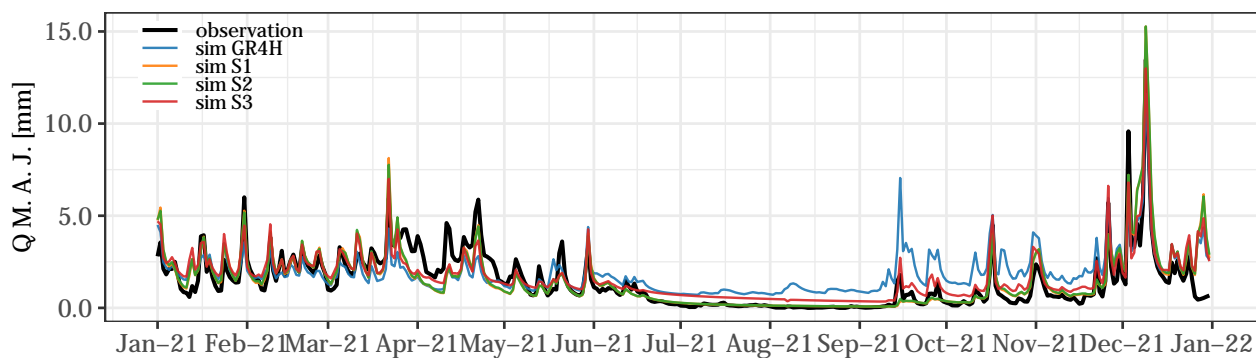
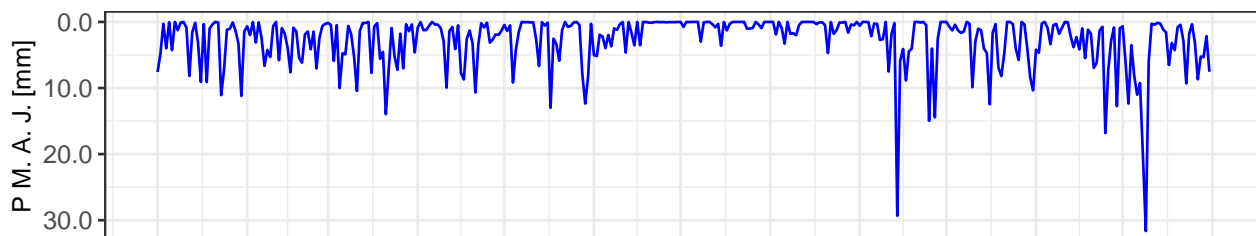
code : Y5505410 , nom : Le Grenouiller à Saint-Raphaël [Agay]
superficie : 48 [km2]



code : Y7114020 , nom : L'Asco à Morosaglia [Ponte-Leccia]
superficie : 366.3 [km2]



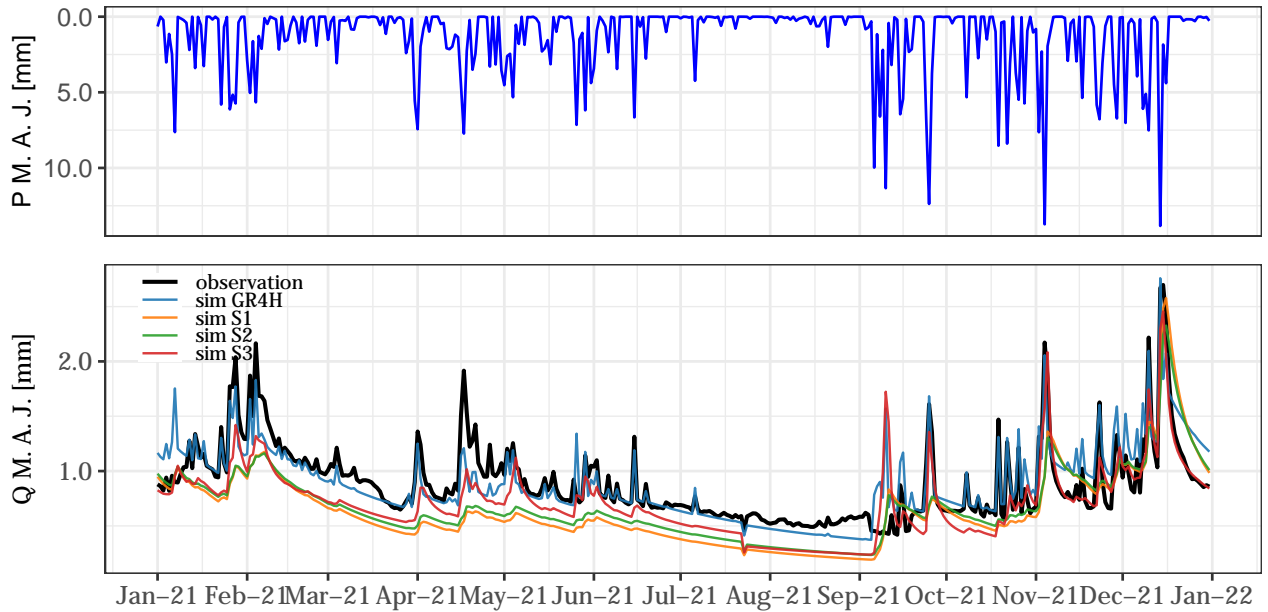
code : Y8324020 , nom : La Gravone à Peri
superficie : 200.8 [km2]



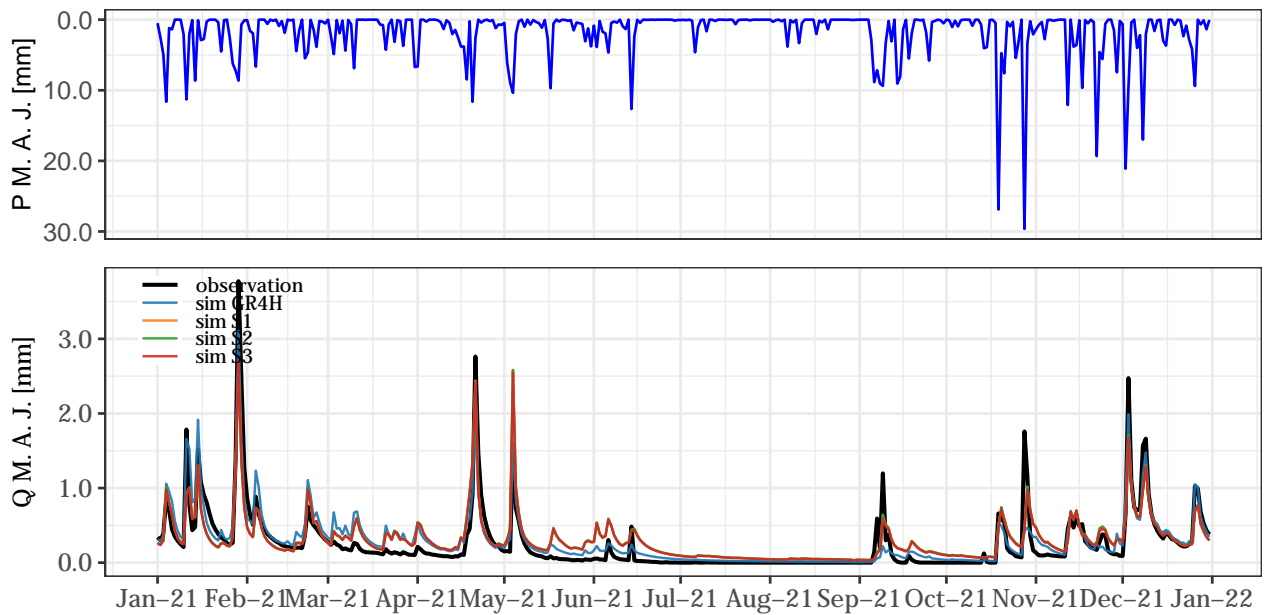
B Débits moyens annuels journaliers observés et simulés par GR4H et par GRD configurations S1, S2, S3 pour les bassins urbains

Période pré-urbanisation

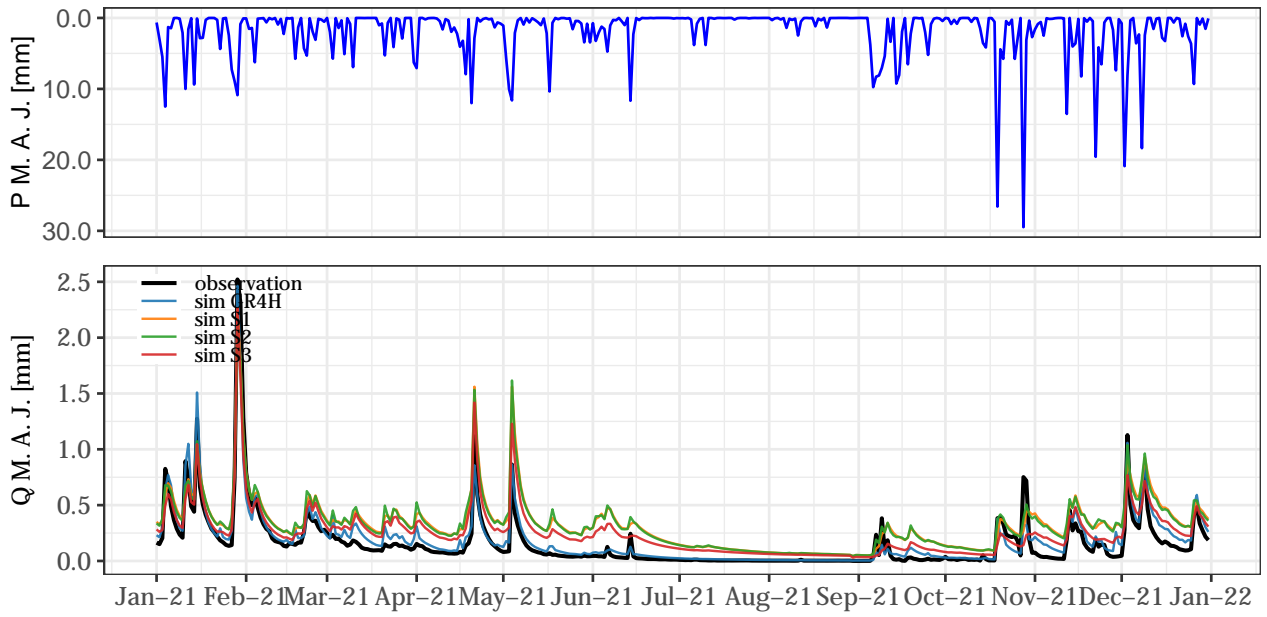
code : Y4225610 , nom : La Cadière à Marignane [stade Saint-Pierre]
superficie : 71.9 [km²]



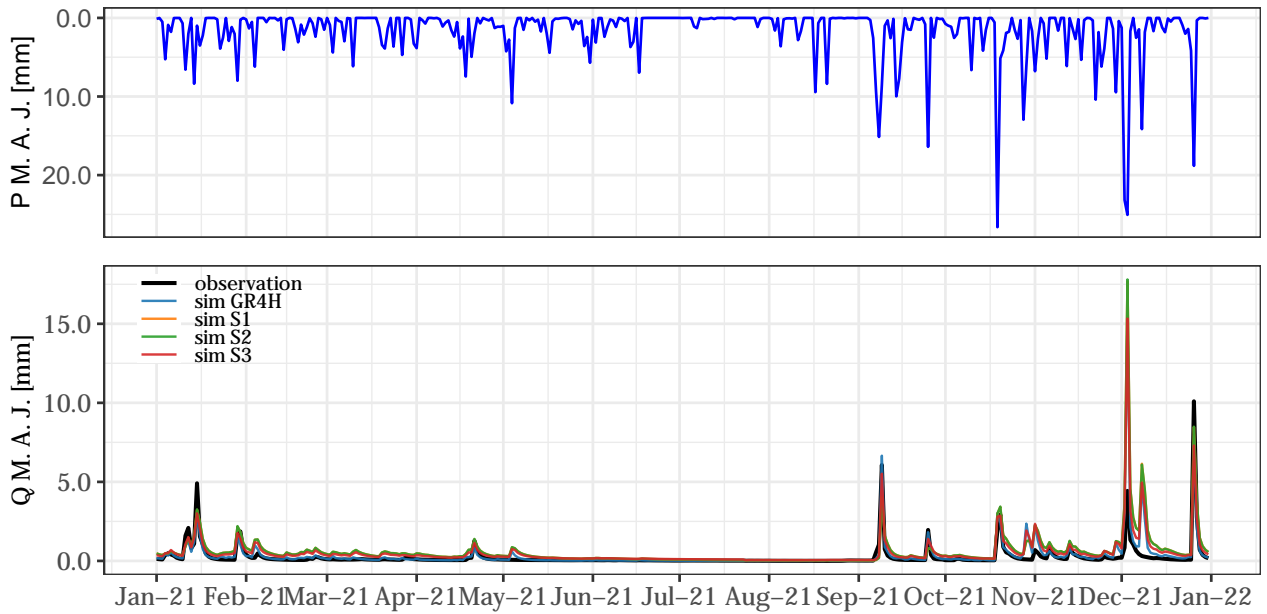
code : Y5424010 , nom : La Giscle à Cogolin
superficie : 66.1 [km²]



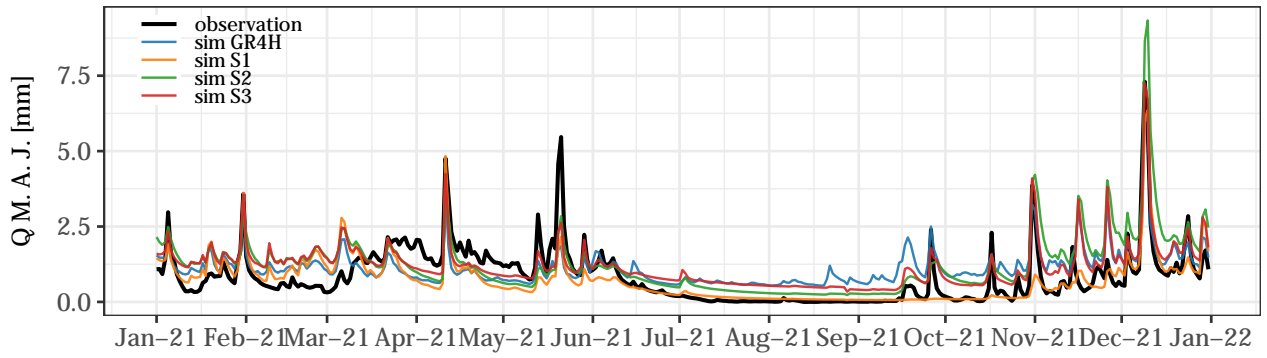
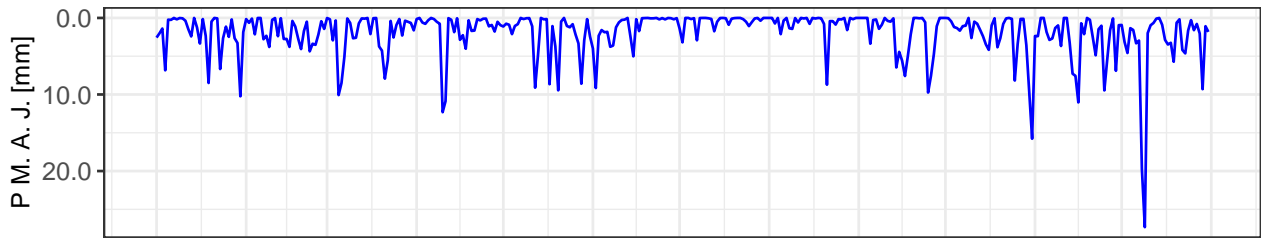
code : Y5444010 , nom : La Gisle à Cogolin [Les Ajusts]
superficie : 201.5 [km2]



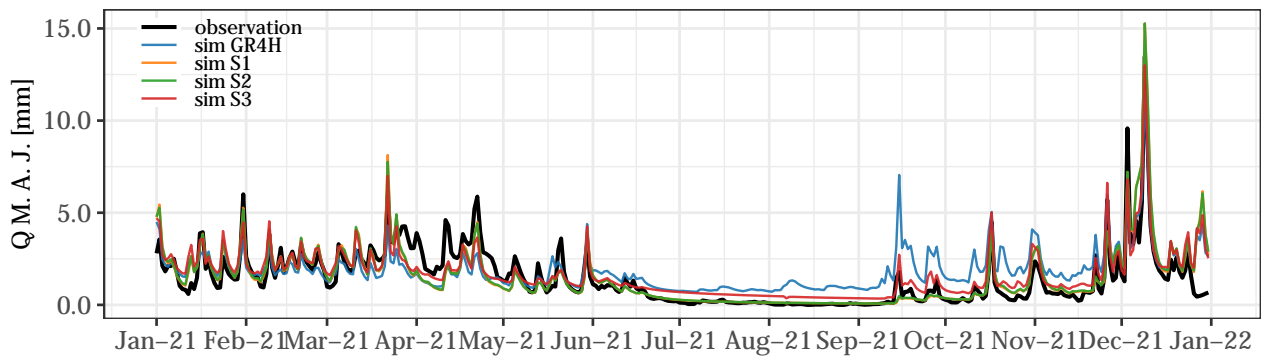
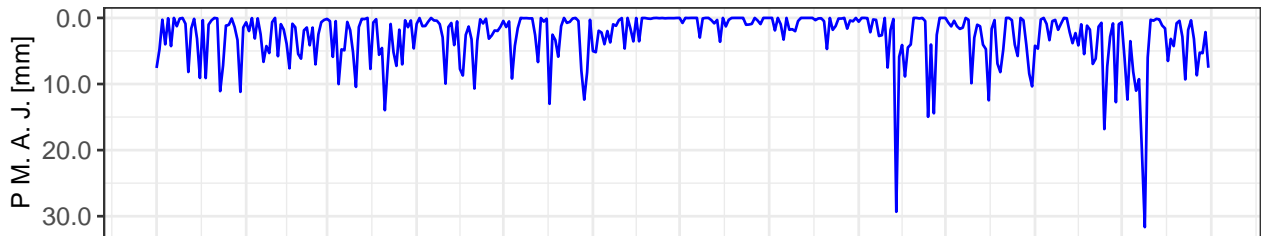
code : Y5505410 , nom : Le Grenouiller à Saint-Raphaël [Agay]
superficie : 48 [km2]



code : Y7114020 , nom : L'Asco à Morosaglia [Ponte-Leccia]
superficie : 366.3 [km2]

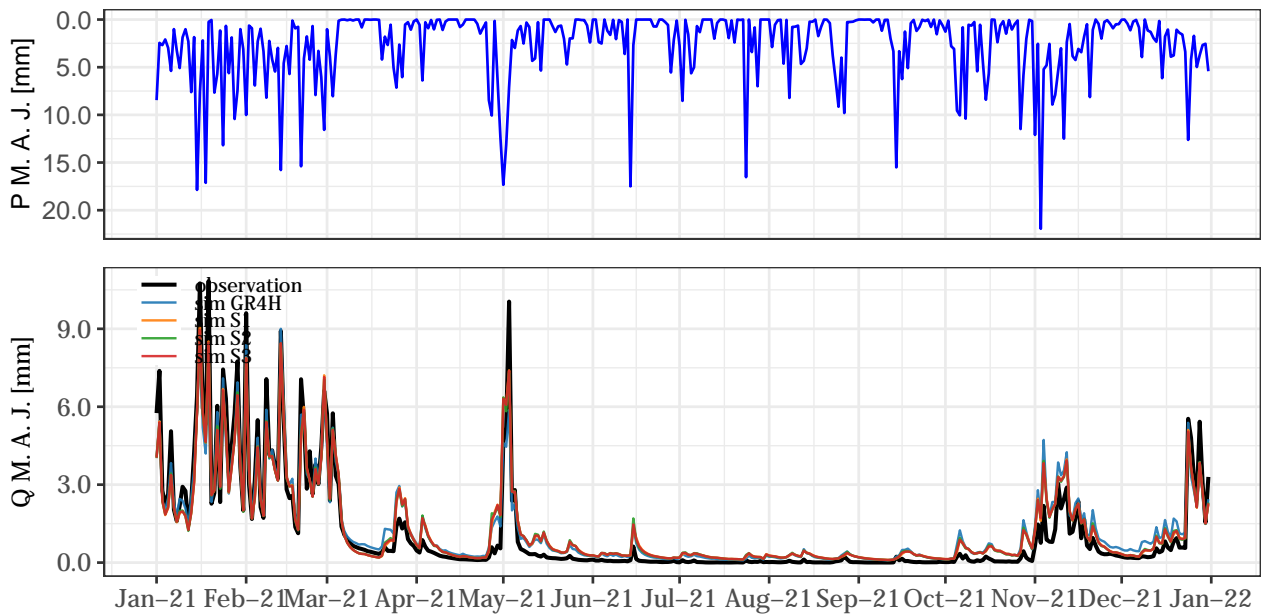


code : Y8324020 , nom : La Gravone à Peri
superficie : 200.8 [km2]

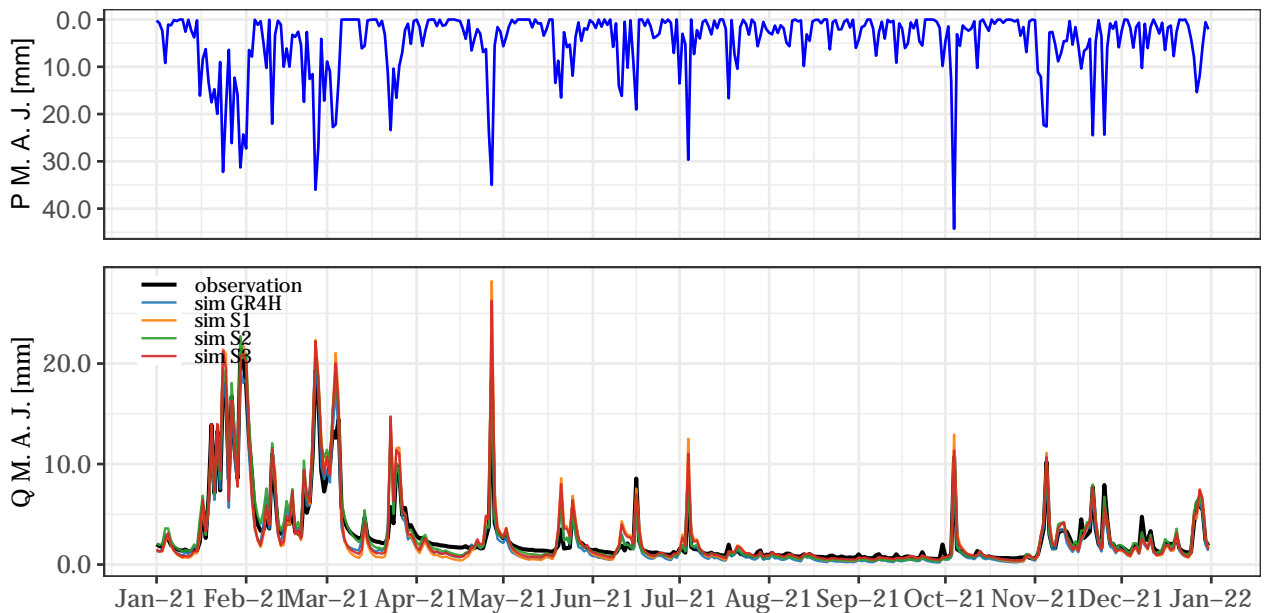


Période post-urbanisation

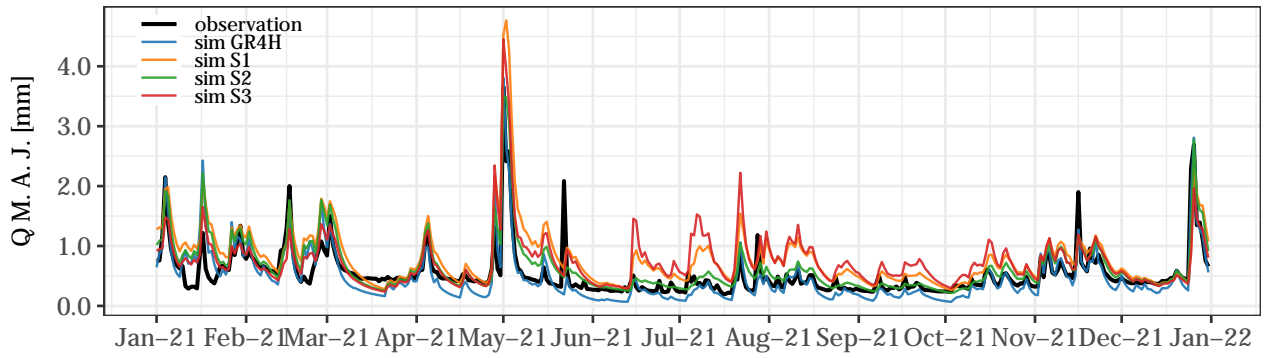
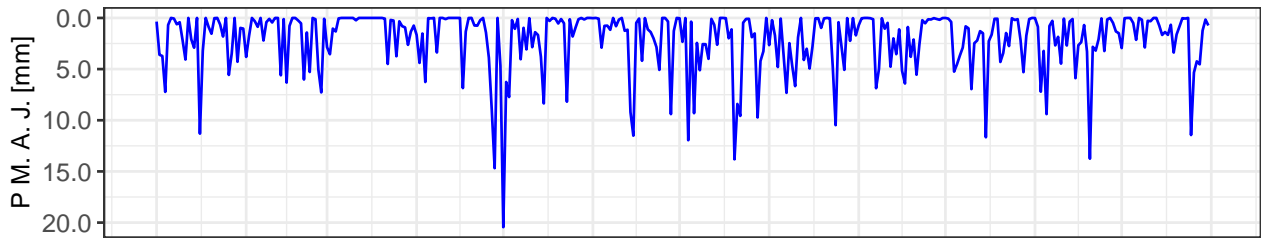
code : N0204210 , nom : Le Pont-Habert à Challans
superficie : 38.2 [km2]



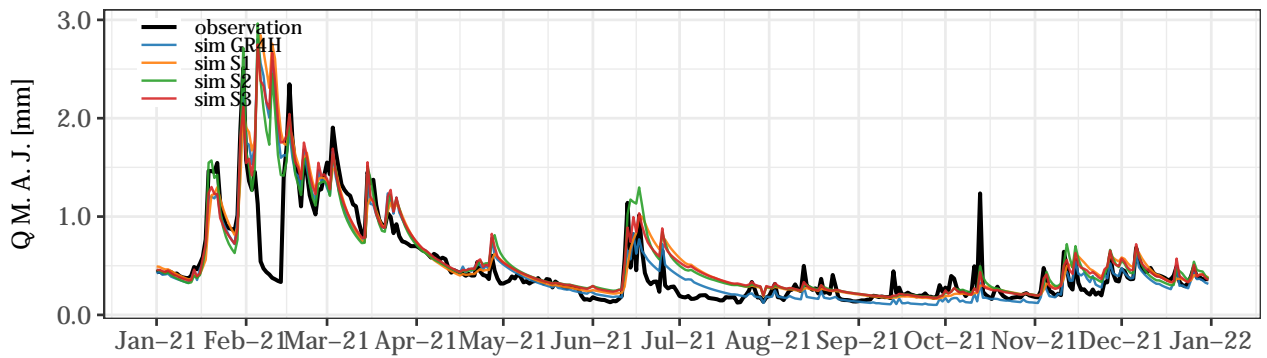
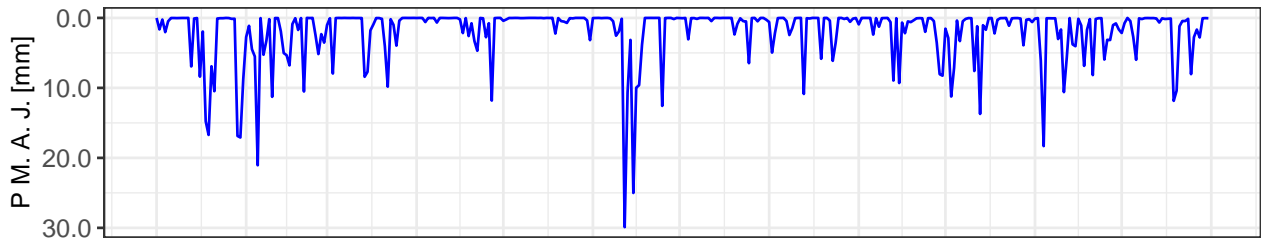
code : Q8345910 , nom : Le Mentialçu à Hasparren
superficie : 17 [km2]



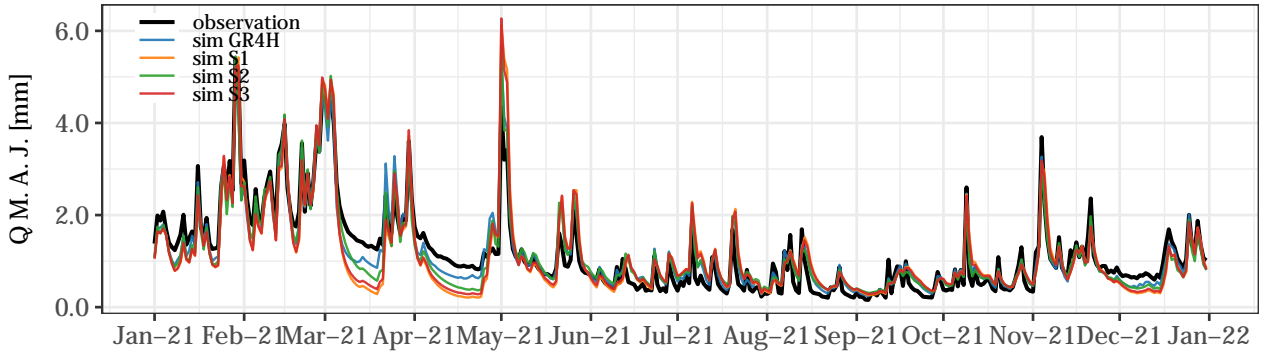
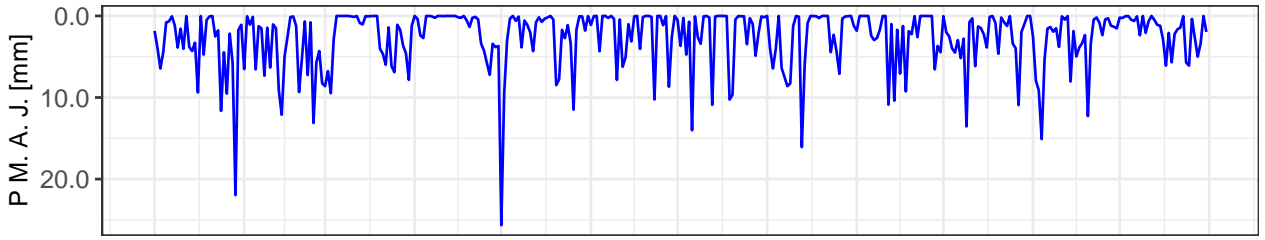
code : A0220200 , nom : Le Lertzbach à Hégenheim
superficie : 17 [km2]



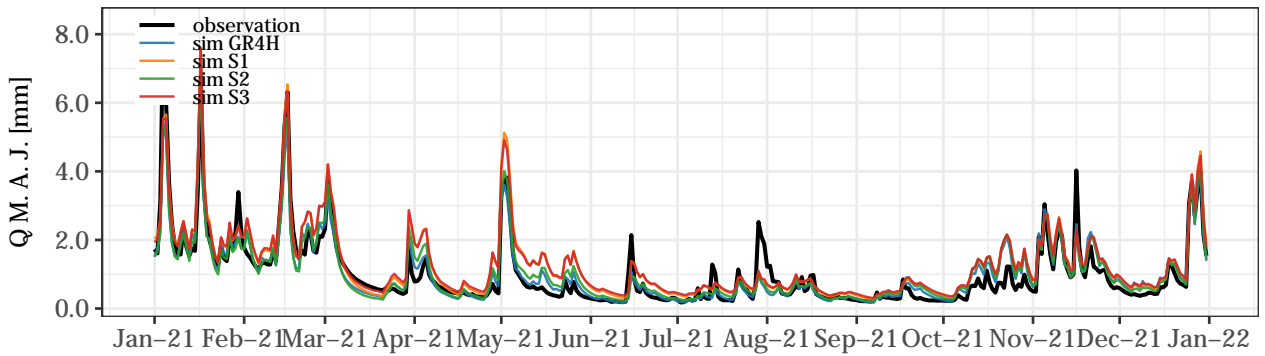
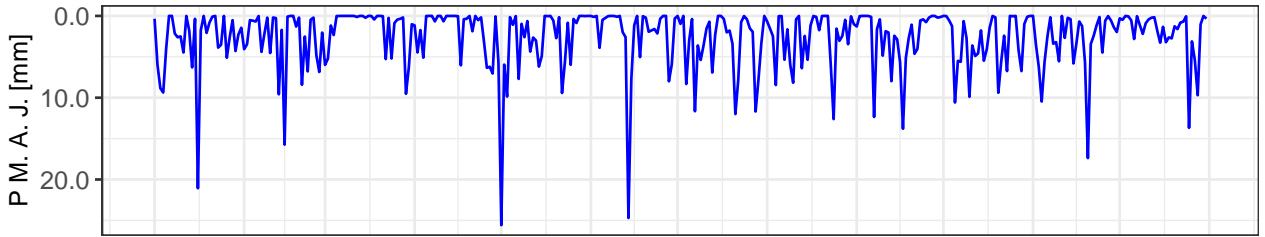
code : Y4122040 , nom : L'Arc à Aix-en-Provence [Roquefavour-Bruet]
superficie : 637 [km2]



code : L0614020 , nom : LAurence à Isle
superficie : 86.4 [km²]



code : U2356610 , nom : Le Rupt à Dung
superficie : 43.4 [km²]



C Critères de KGE et de NSE sur chaque période de calage en fonction de gamme de débits pour les différentes configurations du modèle GRD

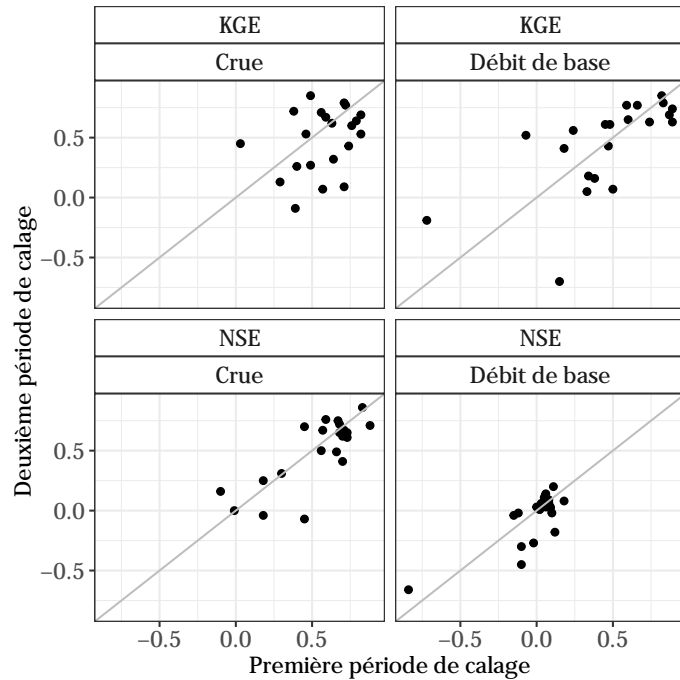


FIGURE 12 – Comparaison des critères de performance KGE et NSE sur chaque période de calage en fonction de gamme de débits pour pour la configuration S1 du modèle GRD à travers de l'ensemble des bassins incendiés et urbanisés d'étude.

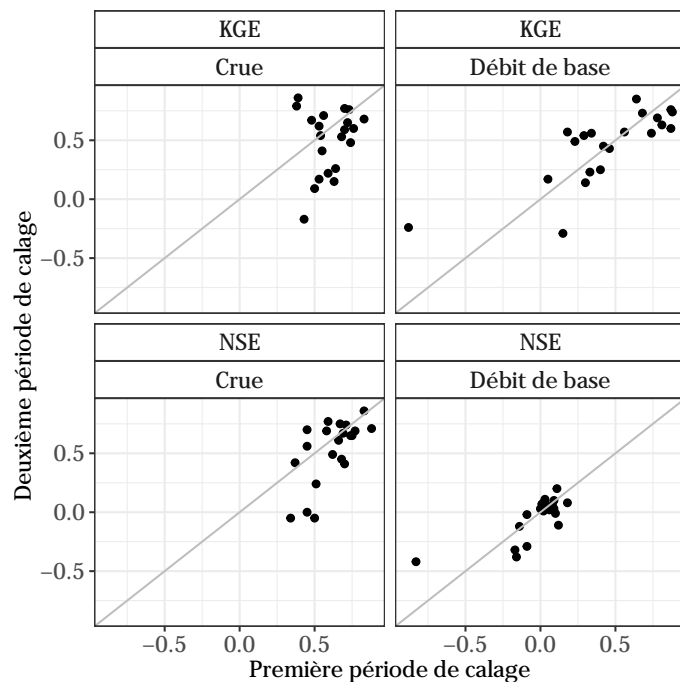


FIGURE 13 – Comparaison des critères de performance KGE et NSE sur chaque période de calage en fonction de gamme de débits pour pour la configuration S2 du modèle GRD à travers de l'ensemble des bassins incendiés et urbanisés d'étude.

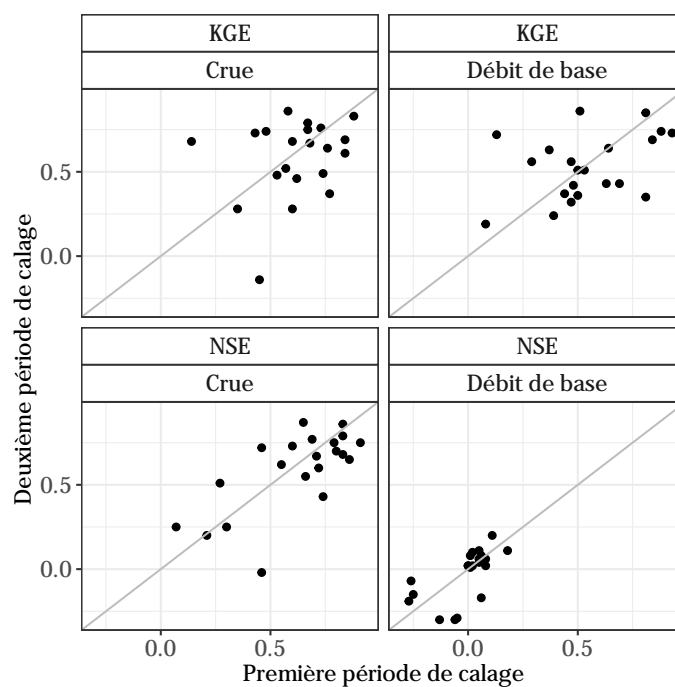


FIGURE 14 – Comparaison des critères de performance KGE et NSE sur chaque période de calage en fonction de gamme de débits pour pour la configuration S3 du modèle GRD à travers de l'ensemble des bassins incendiés et urbanisés d'étude.



Centre siège Antony-Paris
Direction de l'Appui aux Politiques Publiques
1, rue Pierre-Gilles de Gennes
CS 10030
92761 Antony Cedex
Tél. : +33 1 (0)1 40 96 61 21



Rejoignez-nous sur :

www.inrae.fr