



HAL
open science

Evaluation des processus de fonte et d'accumulation du manteau neigeux lors de la spatialisation du module neige CemaNeige

Gaëlle Tallec, François Tilmant, François Bourgin, Charles Perrin

► **To cite this version:**

Gaëlle Tallec, François Tilmant, François Bourgin, Charles Perrin. Evaluation des processus de fonte et d'accumulation du manteau neigeux lors de la spatialisation du module neige CemaNeige. INRAE UR HYCAR. 2024, 31 pp. hal-04714611

HAL Id: hal-04714611

<https://hal.inrae.fr/hal-04714611v1>

Submitted on 30 Sep 2024

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**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE
la science pour la vie, l'humain, la terre

Programme MTE (DGPR/SRNH) – INRAE 2023

Connaissance et prévention des risques naturels et hydrauliques

Ces travaux bénéficient du soutien du ministère chargé de la transition écologique par décision de subvention n°2103343215.

➤ Evaluation des processus de fonte et d'accumulation du manteau neigeux lors de la spatialisaton du module neige CemaNeige

Action PREVI A3

Gaëlle Tallec, François Tilmant, François Bourgin, Charles Perrin

Septembre 2024

Table des matières

1	Introduction.....	3
2	Matériels et méthodes	4
2.1	Outil de modélisation et modèles	4
2.1.1	Le module CemaNeige.....	4
2.1.2	Le modèle GR4J	6
2.1.3	Calage et simulation	6
2.2	Base de données.....	6
2.2.1	Bassins versants.....	6
2.2.2	Données de précipitations, température de l'air et évapotranspiration potentielle	7
2.2.3	Couvert nival.....	7
2.2.4	Configuration spatiale du modèle	7
2.2.5	Périodes utilisées pour le calage et l'évaluation du modèle	8
	PARTIE 1 : Performances du modèle sur les bassins et sous-bassins	9
3	Performances hydrologiques du modèle.....	9
4	Performances nivales du modèle	11
5	Performances globales du modèle	13
	PARTIE 2 : Evaluation de la spatialisation de CemaNeige.....	14
6	Anomalies sur les données d'observation MODIS 6.1	14
7	Comparaison entre les simulations CemaNeige et les données observées MODIS 6.1.....	15
7.1	Analyse des chroniques simulées.....	15
7.1.1	Analyse visuelle	15
7.1.2	Gratio vs SCA	17
7.1.3	Coefficient de détermination mensuel entre Gratio, SCA et altitude des bandes	18
7.2	Analyse des performances nivales par bande	20
7.3	Analyse des paramètres et variables d'état de CemaNeige	21
7.3.1	Paramètres par sous-bassins versants.....	21
7.3.2	Le paramètre K_f	25
8	Conclusions du diagnostic CemaNeige.....	26
9	Références	27
	Annexe 1 – Paramètres et variables d'états de CemaNeige et étapes de calculs	29

1 Introduction

La gestion de la ressource en eau et du risque naturel lié à la dynamique des eaux continentales représente un enjeu crucial pour la société avec des conséquences humaines et financières significatives. La prévision des crues et des inondations repose sur les outils de modélisation numériques pour l'hydrologie ainsi que sur la combinaison avec des observations de types divers (*in-situ* et spatiales). Malgré les avancées notables dans les domaines de la modélisation numérique, les processus sont décrits avec une gamme d'incertitude liée à la description approximative des processus représentés dans les modèles, à l'identification délicate des paramètres des modèles, et aux erreurs dans les données alimentant les modèles, qui se traduisent inévitablement en erreurs sur les hauteurs et débits simulés. L'assimilation de données offre un cadre méthodologique pour la réduction de ces incertitudes dans les modèles, en tirant le meilleur parti de sources diverses de données observées de télédétection ou *in-situ*. L'objectif de cette action est d'évaluer de manière fine la spatialisation du module d'accumulation et fonte de la neige CemaNeige, associé à un modèle pluie-débit dans une approche semi-distribuée.

Le module CemaNeige a été implémenté pour améliorer la modélisation des débits à l'exutoire des bassins versants influencés par la neige. Il a été mis au point dans les travaux de thèse de Valéry (2010) pour simuler l'évolution du couvert neigeux sur un bassin versant, et en estimer la fonte. Le module CemaNeige est un modèle basé sur une approche degrés-jour à deux paramètres (Valéry et al., 2014a et 2014b). Il a été testé avec plusieurs modèles hydrologiques globaux fonctionnant en simulation, dont le modèle GR4J, et le modèle de prévision GRP (Nicolle, 2010 ; Nicolle et al., 2012). Riboust et al. (2018 ; 2019) ont amélioré la structure et le calage de CemaNeige en utilisant conjointement la surface de couverture neigeuse (Snow Cover Area, SCA) provenant d'image satellite et les observations d'écoulement, à l'aide d'une hystérésis linéaire. Cette dernière représente la relation entre la surface enneigée (SCA) et l'équivalent en eau du manteau neigeux (Snow Water Equivalent, SWE). Riboust et al. (2018 ; 2019) ont permis d'améliorer la représentation de la surface de couverture neigeuse et d'assurer une meilleure transposabilité temporelle du modèle CemaNeige – GR4J. Hallouin et al. (2023) ont récemment comparé différentes discrétisations spatiales du modèle pluie-débit GR4J associé à CemaNeige dans une approche semi-distribuée. Cette étude a permis de dégager une méthode de discrétisation des bandes d'altitude dans le module CemaNeige qui permet d'améliorer la représentation de l'étendue et de la distribution de l'enneigement.

Dans cette étude, nous conservons le même objectif d'amélioration de la modélisation, des périodes d'accumulation et notamment de fonte du manteau neigeux. L'utilisation de données mesurées des quantités de précipitations neigeuses accumulées ou idéalement de stocks de neige, telles que des données nivométriques, étant coûteuses, nous cherchons à optimiser l'utilisation de données plus facilement accessibles, telles que les données satellites, même si ceux sont des mesures indirectes, elles restent des variables d'intérêt.

Parce qu'une assimilation performante nécessite une bonne connaissance de l'application et une caractérisation des problèmes rencontrés, nous poursuivrons les travaux d'Hallouin et al. (2023) par une étude fine d'événements hydrologiques ciblés. L'objectif de cette action est de déterminer comment la spatialisation permet de lisser les anomalies par type d'évènement, lors de l'accumulation ou de la fonte neigeuse. Pour cela, nous suivrons les étapes suivantes :

- i) nous réanalyserons les simulations d'Hallouin et al. (2023) *via* airGRiwrn avec les mêmes données de forçage et les paramètres de calage d'une discrétisation spatiale de type D (cf. Hallouin et al., 2023 ; et détails en partie 2.2.4) ;
- ii) nous étudierons finement les différentes bandes d'altitudes et évaluerons leur cohérence (comparaison entre bandes, température et précipitations si besoin, calcul des scores (KGE) à l'échelle des bandes par sous-bassin) sur 21 bassins versants utilisés dans l'étude d'Hallouin et al. (2023),

- iii) enfin nous évaluerons les stratégies possibles dans le fonctionnement du modèle en fonction des problèmes rencontrés.

2 Matériels et méthodes

2.1 Outil de modélisation et modèles

2.1.1 Le module CemaNeige

CemaNeige est un module de prise en compte de la neige développé par Valéry (2010). Il prend en compte une discrétisation spatiale du bassin versant en cinq bandes d'altitude d'égale surface. La première bande représente les 20 % du bassin les plus bas en termes d'altitude et la cinquième, les 20 % les plus élevés. Pour chacune des bandes d'altitude, la température et la précipitation du bassin sont extrapolées à l'aide de corrections altitudinales optimisées. La détermination de la nature des précipitations (solide ou liquide) se fait suivant l'altitude médiane du bassin (Z_{med_BV}) et les températures (minimale et maximale) du pas de temps et de la bande considérés (cf. Figure 1), avec la possibilité d'avoir un mélange pluie-neige paramétré aux environs de 0°C. La fraction solide est déterminée de deux façons : si $Z_{med_BV} < 1500$ m, la fonction $f(T_{min}, T_{max})$ est utilisée ; dans le cas contraire, on se sert de l'intervalle de température $[-1 ; +3]$ °C, $f([-1 ; +3]°C)$. Notons qu'en absence de mesure des températures minimales et maximales, la seconde approche sera utilisée. Les précipitations solides sont intégrées à un réservoir qui représente le manteau neigeux.

La lame de fonte potentielle est estimée selon la méthode degrés-jour, à partir de l'état thermique du manteau neigeux et de la température de l'air. La lame de fonte réelle est ensuite calculée en fonction de la fonte potentielle, de la surface enneigée et, lorsque le stock de neige est faible, de la vitesse minimale de fonte. Les lames de fonte de chaque bande d'altitude sont agrégées et ajoutées aux précipitations liquides en entrée du modèle hydrologique.

Le module neige possède ainsi deux variables descriptives internes pour chacune des bandes d'altitude : le stock de neige (Snow Water Equivalent, SWE, Figure 1) et l'état thermique du stock (eT_G , Figure 1). Il possède également deux paramètres identiques pour les cinq bandes à caler : le facteur de fonte (K_f , en mm/°C/jour) et le coefficient de pondération de l'état thermique du manteau, fixé à 0.25 (cT , sans unité) (Figure 1).

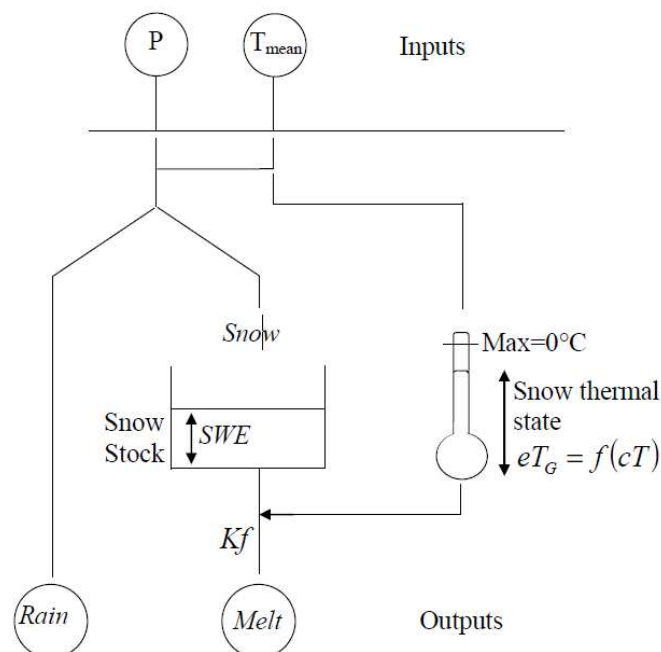


Figure 1. Schéma simplifié du module neige CemaNeige (Riboust et al., 2019).

Riboust et al. (2019) ont montré qu'associer les données de débits observés à des données de couverture neigeuse (Snow Cover Area, SCA) pour le calage augmentait la robustesse des modèles précipitation-débit. Toutefois, cette méthode demande d'introduire une hystérésis qui permet d'améliorer la relation SCA et SWE, initialement présente dans CemaNeige. En effet, les produits satellitaires ne donnent qu'une information géographique sur la présence ou l'absence de neige, sans information sur la quantité ou l'équivalent en eau de la neige (SWE). Le type d'hystérésis retenu par les auteurs est une hystérésis linéaire simple modifiée avec un seuil de fonte dépendant des précipitations solides annuelles (Équation 1), qui introduit deux paramètres supplémentaires au module CemaNeige :

$$\begin{cases} SCA_t = \min\left(\frac{SWE_t}{T_{h,max}}, 1\right) & ; \text{if } \Delta SWE_t < 0 \\ SWE_{t,melt} = SWE_{t-1} & \text{if } SCA_{t-1} = 1 \end{cases}$$

$$T_{h,max} = \begin{cases} T_{h,melt} & \text{if } SWE_{t,melt} > T_{h,melt} \\ SWE_{t,melt} & \text{if } SWE_{t,melt} \leq T_{h,melt} \end{cases}$$

Équation 1. Paramètres de l'hystérésis linéaire simple modifiée par Riboust et al. (2019) (avec SCA : taux de couverture neigeuse ; SWE : équivalent en eau de la neige ; $T_{h,melt}$: seuil max de fonte)

La paramétrisation de la courbe de fonte de l'hystérésis dépend d'un seuil maximum local ($T_{h,max}$, mm), qui définit le point d'inflexion et la pente de la courbe de fonte (en rouge sur la Figure 2). Si la neige accumulée avant la fonte dépasse un seuil de fonte calé ($T_{h,melt}$, mm), le seuil maximal local $T_{h,max}$ prend la valeur $T_{h,melt}$. Sur la Figure 2, cela signifie que lors de la fonte, la valeur SCA ne diminue que si la valeur SWE est inférieure à 250 mm (cette valeur a été prise comme exemple). Si pendant l'hiver, le SWE accumulé ne dépasse jamais la valeur $T_{h,melt}$, ou dans le cas où il y a une accumulation de neige après le début de la phase de fonte (représentée par la courbe jaune sur la Figure 2), le seuil maximal local $T_{h,max}$ prend la valeur SWE maximale avant le début de la fonte ($SWE_{t,melt}$, Équation 1). Les paramètres et sorties des modèles GR4J et CemaNeige sont présentés en annexe 1.

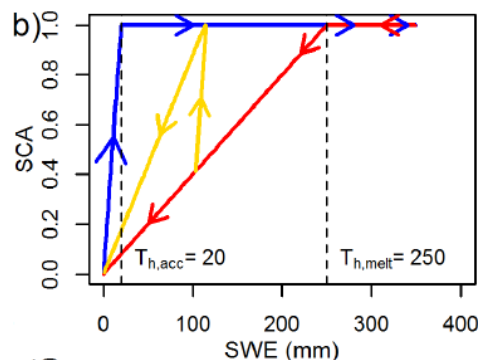


Figure 2. Schéma simplifié de l'hystérésis linéaire (Couverture neigeuse SCA en fonction du stock de neige SWE) utilisée dans le module CemaNeige. La ligne bleue représente la phase d'accumulation de l'hystérésis, la ligne rouge la phase de fonte. Les courbes jaunes représentent un exemple d'accumulation de neige dans une période de fonte. Les valeurs $T_{h,acc}$ et $T_{h,melt}$ ont été fixées respectivement à 20 et 250 mm pour illustrer les différentes hystérésis (Riboust et al. , 2019).

2.1.2 [Le modèle GR4J](#)

Pour la simulation des débits en rivière, CemaNeige est couplé au modèle pluie-débit GR4J (Perrin et al., 2003). Le modèle GR4J est un modèle pluie-débit à réservoirs et à quatre paramètres, fonctionnant à l'échelle globale du bassin versant. Comme le module CemaNeige, il a déjà été testé sur de très nombreux bassins versants français (Le Moine et al., 2007). Le modèle pluie-débit GR4J est forcé avec la lame d'eau liquide et l'évapotranspiration potentielle journalière à l'échelle de l'unité de modélisation. Lors du couplage avec CemaNeige, la lame d'eau fournie à GR4J est le cumul des pluies et de la fonte nivale produite par CemaNeige.

2.1.3 [Calage et simulation](#)

L'outil de modélisation airGRiwr (Dorchies et al., 2021) est utilisé pour le calage et la simulation avec ces modèles dans une configuration semi-distribuée. airGRiwr (version 0.6.1) est une extension du package airGR pour la gestion de modèle hydrologique semi-distribué sur un bassin versant anthropisé (voir aussi Thirel & Delaigue, 2023).

La fonction objectif utilisée pour le calage du modèle est le KGE' (Equation 1) (Gupta et al., 2009; Kling et al., 2012). Les valeurs du critère KGE' ont été calculées sur les débits d'une part et sur les surfaces enneigées d'autre part (pour chaque bande d'altitude séparément, puis moyennées avec une pondération liée à la superficie de chaque bande d'altitude), puis ces deux valeurs sont combinées *via* une moyenne pondérée avec des poids de 0.75 pour les débits et 0.25 pour les surfaces enneigées, comme indiqué par Riboust et al. (2019). Pour le calage en mode semi-distribué, un calage séquentiel est effectué des sous-bassins amont vers les sous-bassins aval sans procédure particulière de régularisation des paramètres.

$$KGE' = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad \text{Equation 1}$$

Où :

- r , est le coefficient de corrélation linéaire entre les données simulées et observées
- $\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o}$, est le rapport de biais (avec μ_s la moyenne des données simulées et μ_o la moyenne des observées) (sans dimension)
- $\gamma = \frac{CV_s}{CV_o} = \frac{\sigma_s/\mu_s}{\sigma_o/\mu_o}$, où CV est le coefficient de variation et σ l'écart type

2.2 Base de données

2.2.1 [Bassins versants](#)

Les données utilisées ici sont des données au pas de temps journalier. Nous utiliserons la base de données des 21 bassins versants sous influence nivale d'Hallouin et al. (2023) (Tableau 1).

Tableau 1. Bassins et stations hydrométriques sélectionnés pour l'étude (Hallouin et al., 2023)

Code station	Nom station	Surface drainée (km ²)
Allan		
U234502001	La Savoureuse à Giromagny	30
U234503001	La Savoureuse à Belfort	144
U234504001	La Savoureuse à Vieux-Charmont	235
U232421001	La Bourbeuse à Froidefontaine	300
U233402001	L'Allan à Joncherey	322
U233401001	L'Allan à Fesches-le-Châtel	705
U235401001	L'Allan à Courcelles-lès-Montbéliard	1109
Dordogne		
P171291001	La Cère à Vic-sur-Cère [Comblat-le-Pont]	88
P174401003	La Jordanne à Aurillac - Passerelle Paul Riotte	105
P177000101	La Cère à Sansac-de-Marmiesse	349
Durance		
X043401001	L'Ubaye à Barcelonnette [Abattoir]	542
X045401001	L'Ubaye au Lauzet-Ubaye [Roche-Rousse]	943
X001001002	La Durance à Val-des-Prés [Les Alberts]	206
X031001001	La Durance à Embrun [La Clapière]	2283
X050551301	La Durance à Espinasses [Serre-Ponçon QNR]	3580
Gave d'Oloron		
Q724252001	Le Saison à Licq-Athérey [Pont de Licq]	231
Q700291001	Le Gave d'Oloron à Oloron-Sainte-Marie [Pont SNCF]	1101
Q741291001	Le Gave d'Oloron à Escos	2484
Gave de Pau		
Q470101001	Le Gave de Pau à Argelès-Gazost	912
Q523101001	Le Gave de Pau à Artiguelouve	1911
Q542102001	Le Gave de Pau à Orthez	2464

2.2.2 [Données de précipitations, température de l'air et évapotranspiration potentielle](#)

Les données de précipitation utilisées sont les données COMEPHORE (COMbinaison en vue de la Meilleure Estimation de la Précipitation HORaire), produit de réanalyse de lame d'eau, au pas de temps horaire sur une résolution de 1x1 km, combinant observations radars et pluviométriques (Tabary et al., 2012; Météo-France, 2019). SAFRAN est également un produit de réanalyse atmosphérique (Vidal et al., 2010). Les données utilisées sont au pas de temps journalier et à la résolution spatiale de 8 km. Les données SAFRAN sont utilisées pour les forçages de température de l'air et pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle selon la formule proposée par Oudin et al. (2005). Pour cette étude, les données maillées sont intersectées avec chaque bassin/sous-bassin pour déterminer les forçages spécifiques à chaque unité hydrographique. Les données de précipitation et de température sont ensuite extrapolées par CemaNeige pour chaque bande d'altitude en fonction de leur altitude moyenne, comme décrit par Valéry (2010).

2.2.3 [Couvert nival](#)

Les observations de la couverture neigeuse utilisées sont les données de télédétection du programme MODIS dans sa version 6.1 (Hall and Riggs., 2021a, b). Les données journalières utilisées pour cette étude sont celles traitées par Hallouin et al. (2023). Les données maillées (500 m) sont intersectées avec chaque bande d'altitude de chaque bassin/sous-bassin pour déterminer les couvertures neigeuses spécifiques à chaque entité spatiale de la discrétisation.

2.2.4 [Configuration spatiale du modèle](#)

Hallouin et al. (2023) ont étudié la discrétisation spatiale de CemaNeige, permettant d'améliorer la représentation de l'étendue et de la distribution de l'enneigement. Nous avons choisi d'appliquer pour notre étude la discrétisation spatiale de configuration « D » d'Hallouin et al. (2023), qui discrétise le bassin versant en sous-bassins. Le Tableau 2 présente la configuration spatiale « D » de chaque bassin.

Le nombre de bandes d'altitude est déterminé en fonction du gradient altitudinal de chaque sous-bassin, en supposant que plus le gradient est élevé, plus le nombre de bandes d'altitude nécessaires est élevé (Tableau 2). L'amplitude altitudinale (altitude maximale moins altitude minimale) est divisée en bandes de 300 m (considéré comme un écart d'altitude justifiant l'introduction d'une bande supplémentaire), puis le résultat est arrondi à l'entier le plus proche pour obtenir le nombre de bandes d'altitude à utiliser. Finalement, ce nombre est utilisé en conjonction avec la courbe hypsométrique de sorte que toutes les bandes sont de surface égale.

Tableau 2. Configuration spatiale « D » des bassins versants utilisés pour cette étude (cf. Hallouin et al., 2023)

Bassin- versant	Allan	Dordogne	Durance	Gave d'Oloron	Gave de Pau
Nb de ss-bv	7	3	5	3	3
Nb min de bande	1	2	7	5	1
Nb max de bande	3	4	11	9	9

2.2.5 Périodes utilisées pour le calage et l'évaluation du modèle

Afin de caler les modèles et d'évaluer leurs performances, deux variables observées d'intérêt sont utilisées conjointement :

- les données journalières moyennes des débits en rivière pour caler le modèle GR4J couplé à CemaNeige
- les données journalières de couvert nival pour caler le module CemaNeige et aider à la paramétrisation de la relation entre SWE et SCA.

Ces mêmes données sont également utilisées pour évaluer les performances des modèles.

Les plages de disponibilité des données pour chaque bassin d'étude sont scindées en deux périodes de durées équivalentes (Tableau 3) et sont utilisées pour le calage et l'évaluation de façon indépendante, puis inversées. Chaque période de calage/évaluation est précédée de deux années d'initialisation du modèle.

Tableau 3. Périodes des données observées pour le calage-contrôle des modèles

Nom bassin	Période 1 (Durée 1)	Période 2 (Durée 2)
Allan	01/10/2002–30/09/2012 (10 ans)	01/10/2012–30/09/2021 (9 ans)
Dordogne	01/10/2002–30/09/2008 (6 ans)	01/10/2008–30/09/2014 (6 ans)
Durance	01/10/2002–30/09/2010 (8 ans)	01/10/2010–30/09/2017 (7 ans)
Gave d'Oloron	01/10/2004–30/09/2013 (9 ans)	01/10/2013–30/09/2021 (8 ans)
Gave de Pau	01/10/2004–30/09/2013 (9 ans)	01/10/2013–30/09/2021 (8 ans)

PARTIE 1 : Performances du modèle sur les bassins et sous-bassins

3 Performances hydrologiques du modèle

Les performances hydrologiques du modèle sont bonnes pour l'ensemble des bassins sur les deux périodes ($KGE' \geq 0.7$, Figure 3). Les KGE' calculés pour chaque sous-bassin et leur décomposition confirment ces résultats (Figure 4). Seuls les sous-bassins de la Durance présentent des KGE' légèrement plus faibles sur la période 2 ($KGE' \geq 0.6$) par rapport à la période 1 ($KGE' \geq 0.8$) (Figure 4). Le modèle semble bien reproduire la dynamique temporelle des débits ($r \geq 0.7$, Figure 4). De même les distributions des débits simulés par rapport aux débits observés sont proches (β et γ proche de 1, Figure 4).

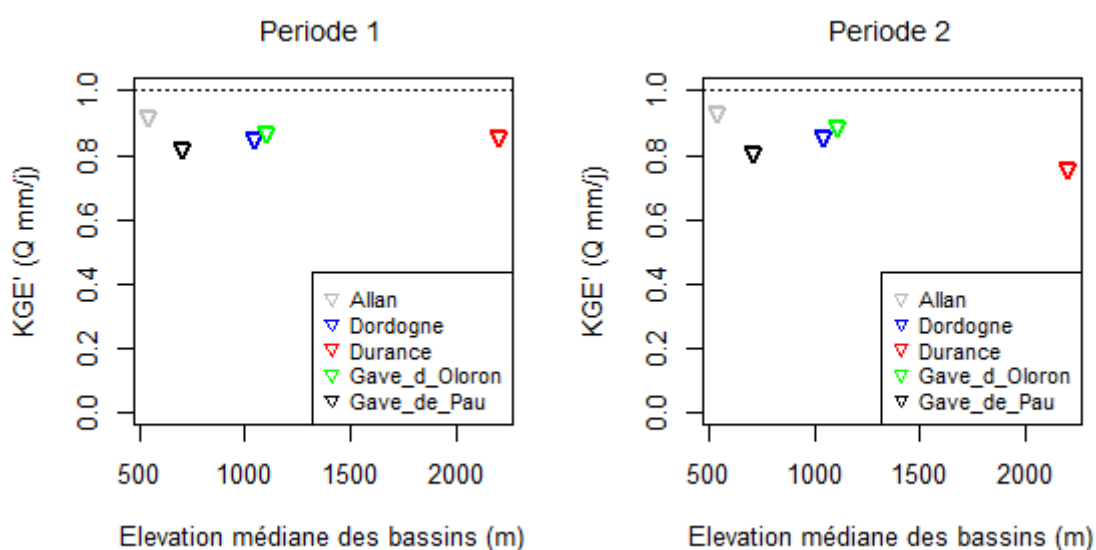


Figure 3. Médiane des KGE' calculés pour chaque sous-bassin entre les débits simulés et les débits observés sur les périodes 1 et 2. Les bassins sont classés en ordre croissant d'élévation.

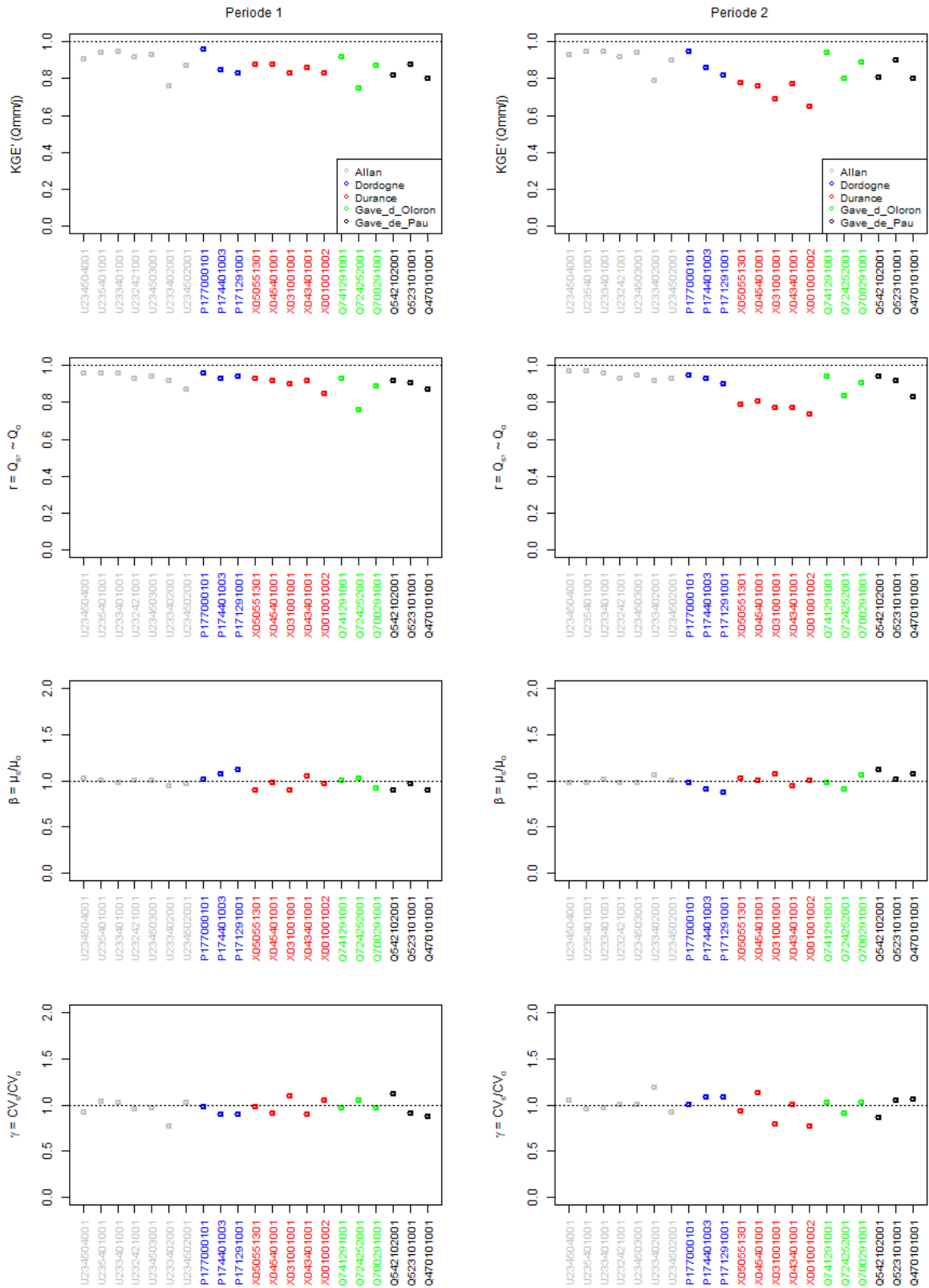


Figure 4. KGE' hydrologique (moyenne des KGE' par bande) calculé entre les débits simulés et les débits observés sur les périodes 1 et 2, pour chaque sous-bassin et sa décomposition: coefficient de corrélation de Pearson (r), rapport de biais (β) et rapport des coefficient de variation (γ). Pour chaque bassin, les sous-bassins sont classés en ordre croissant d'élévation.

4 Performances nivales du modèle

Nous avons calculé les KGE' entre les données de couverture neigeuse MODIS 6.1 et la variable Gratio provenant des simulations CemaNeige, pour chaque bande des 21 sous-bassins. La médiane de ces KGE' est présentée pour chaque bassin par la Figure 5. Les performances du modèle CemaNeige, si elles sont acceptables pour la Durance ($KGE' = 0.8$, triangle rouge, Figure 5), restent relativement faibles pour les autres bassins ($KGE' \leq 0.5$, Figure 5). Cette différence de performance du modèle CemaNeige semble corrélée à l'élévation médiane des bassins (Figure 5). Ces résultats sont à nuancer avec les KGE' obtenus pour chaque sous-bassin (Figure 6). En effet, il peut exister une forte variabilité de performance au sein d'un même bassin (e.g., sous-bassins du Gave de Pau, Figure 6) ou en fonction de la période considérée (e.g., KGE' des sous-bassins du Gave de Pau pour les deux périodes, Figure 6). Pour les sous-bassins de l'Allan, le modèle semble avoir du mal à reproduire la dynamique temporelle de la neige (i.e., processus de fonte ou d'accumulation) (cf. $r \leq 0.5$, Figure 6). Le modèle a également tendance à surestimer les valeurs moyennes des données de couverture neigeuse pour certains sous-bassins, et à en sous-estimer la dispersion (β et γ , Figure 6).

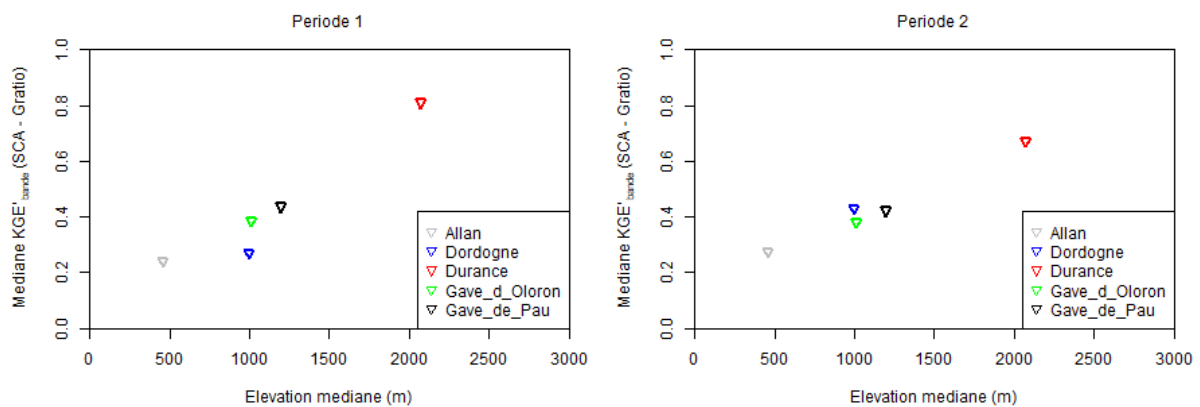


Figure 5. Médiane pour chaque bassin des KGE' par bande entre les SCA provenant de MODIS 6.1 et Gratio provenant des simulations CemaNeige sur les périodes 1 et 2, en fonction de l'élévation médiane des bassins.

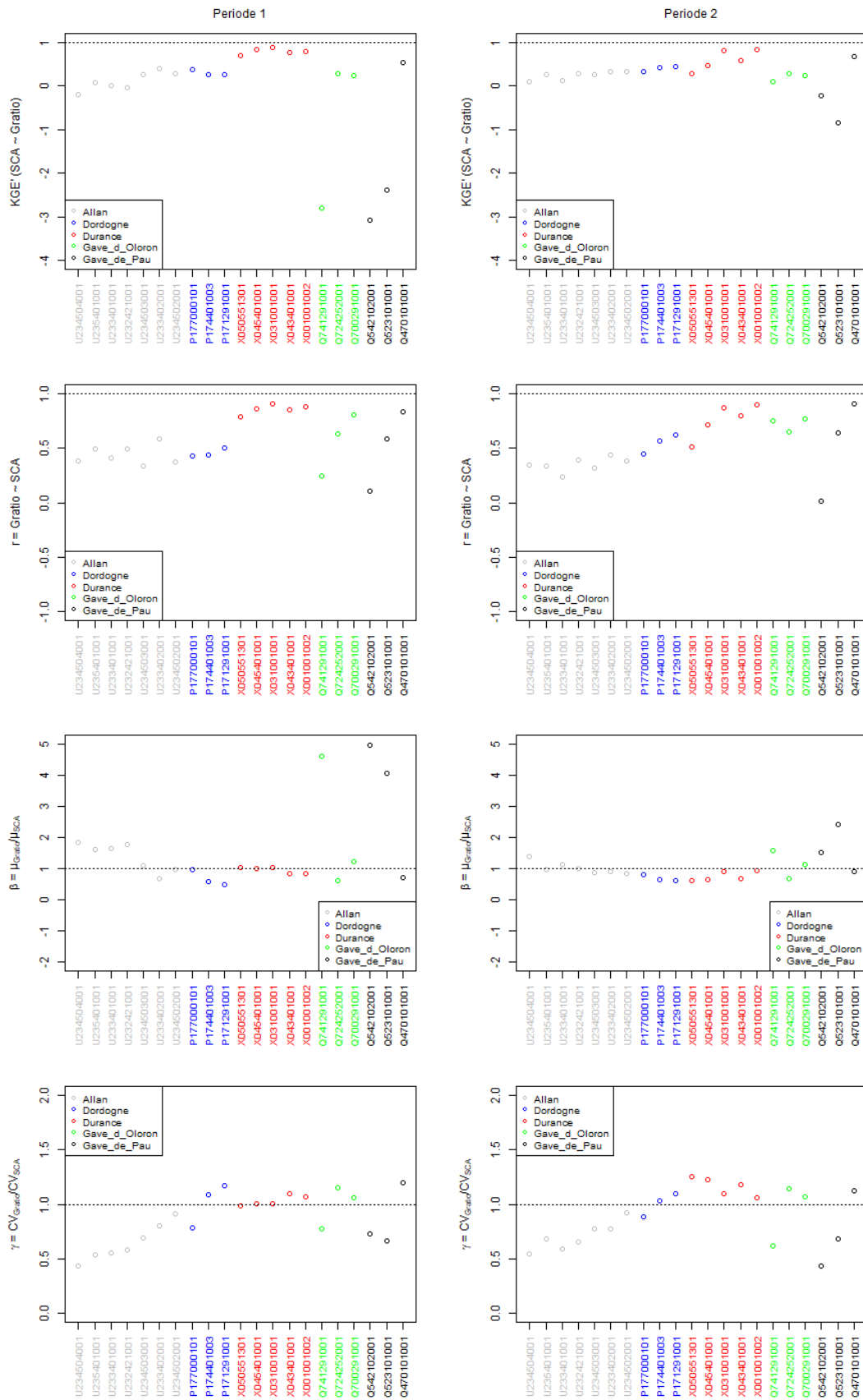


Figure 6. KGE nival pour chaque sous-bassin (moyenne des KGE par bande) calculé entre les SCA provenant de MODIS 6.1 et Gratio provenant des simulations CemaNeige sur les périodes 1 et 2, et sa décomposition: coefficient de corrélation de Pearson (r), rapport de biais (β) et rapport des coefficients de variation (γ). Pour chaque bassin, les sous-bassins sont classés en ordre croissant d'élévation.

5 Performances globales du modèle

La Figure 7 présente la médiane par bassin des KGE' calculés sur la période d'évaluation. Les performances globales du modèle présentent des KGE' supérieurs à 0.6 quelle que soit la période considérée (Figure 7).

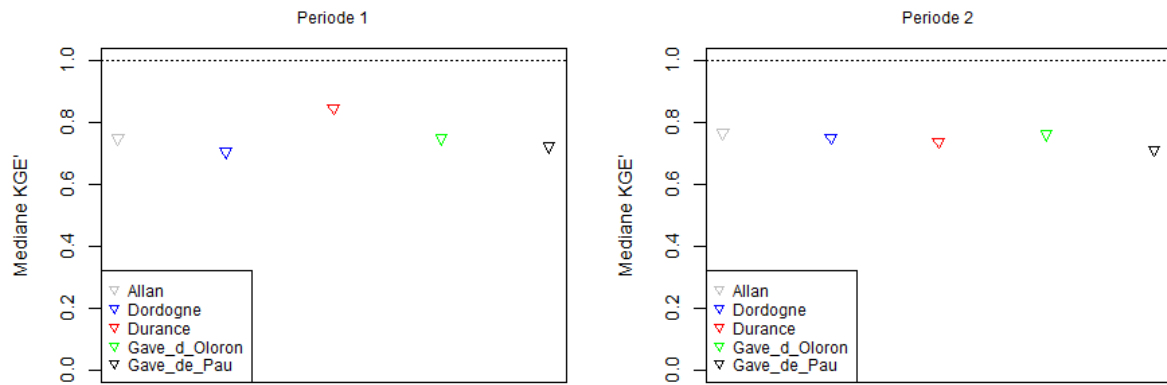


Figure 7. Médiane des KGE' globaux sur les périodes 1 et 2 pour chaque bassin.

PARTIE 2 : Evaluation de la spatialisation de CemaNeige

Pour évaluer plus précisément les performances de simulation des surfaces enneigées sur un bassin, nous nous sommes attachés à comparer chaque événement par bandes d'altitudes sur l'ensemble des bassins étudiés. Un événement de fonte est considéré comme effectif, tant que le stock de neige au temps t (SWE_t) reste inférieur au stock de neige au temps précédent (SWE_{t-1}) sur au moins deux jours consécutifs et inversement pour les événements d'accumulation. Pour évaluer l'effet de la spatialisation, nous avons peu d'éléments de comparaison. Les seules valeurs observées spatialisées sont les mesures de MODIS 6.1. Ces dernières peuvent être comparées aux valeurs de la variable Gratio calculées par CemaNeige. Gratio représente le pourcentage d'enneigement de la bande considérée.

6 Anomalies sur les données d'observation MODIS 6.1

Les chroniques observées de couverture neigeuse par MODIS 6.1 peuvent présenter des anomalies. Pour exemple, MODIS observe une couverture neigeuse importante en période estivale avec des températures bien au-dessus de 0°C (Figure 8). En effet, l'interprétation des images satellites MODIS peut être plus difficile lorsque que la zone couverte est une zone forestière (plus particulièrement une zone de conifère) ou lorsque la zone est nuageuse (cas possible lors d'épisodes pluvieux notamment). De manière générale, le traitement des images permet d'atténuer ces biais ; certaines valeurs sont filtrées pour les zones forestières, ou la complémentarité des satellites Terra et Aqua, dont les passages respectifs sont décalés de 3h, peut être utilisée pour éliminer les couvertures nuageuses. Un nouveau traitement pourrait être appliqué sur les données MODIS 6.1 pour éliminer les faux positifs de couverture neigeuse lors d'évènements pluvieux et de températures élevées. On note que ces derniers représentent moins de 1% des données observées. Les données manquantes MODIS 6.1 sur l'ensemble des chroniques des périodes 1 et 2, par bande d'altitude, sont respectivement de l'ordre de 56 et 55 % pour l'ensemble des bassins et de 36 et 35 % pour la Durance. Cette absence de données observées pourrait être un frein à la validation de CemaNeige et l'utilisation d'un autre produit que MODIS 6.1 pourrait être envisagée.

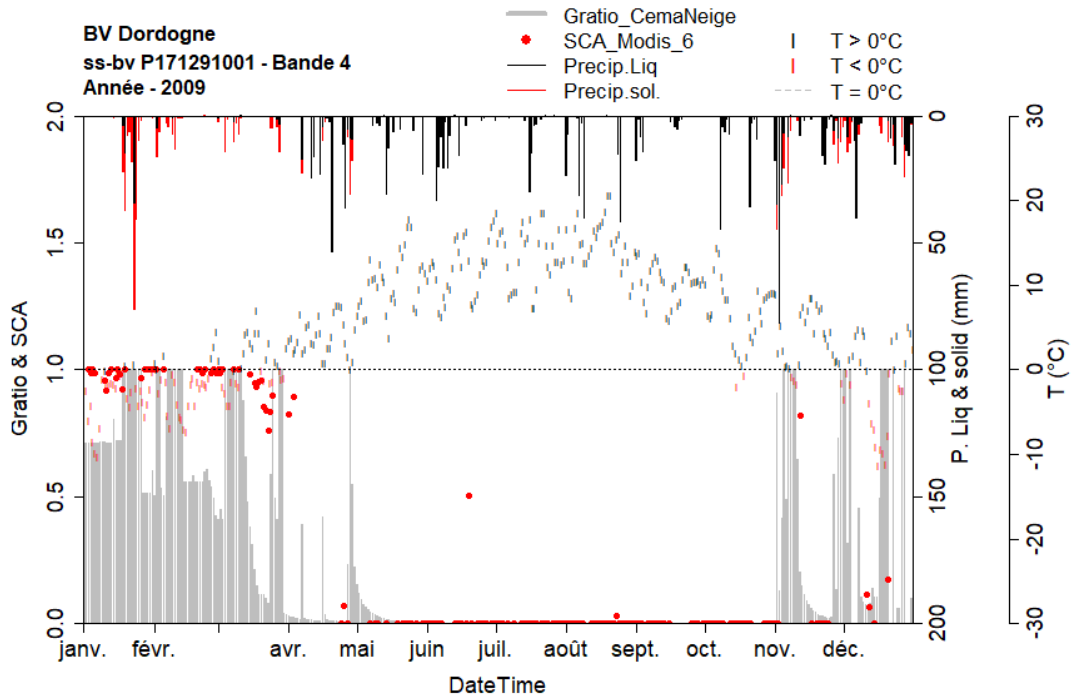


Figure 8. Exemple de faux positifs des données observées par MODIS 6.1 (cf. point rouge, notamment au mois de juin) et chronique annuelle des données simulées par CemaNeige (barre grise), des précipitations (barres noires et rouges) et des températures (pointillés noirs et rouges) (données 2009 sur la période 2 du sous-bassin P171291001, Dordogne).

7 Comparaison entre les simulations CemaNeige et les données observées MODIS 6.1

7.1 Analyse des chroniques simulées

7.1.1 Analyse visuelle

Après une observation des chroniques de simulation de CemaNeige en fonction des précipitations neigeuses et des températures moyennes de l'air, on note que lors des événements d'accumulation, CemaNeige peut surestimer l'accumulation (Figure 9 A) ou à l'inverse, ne pas calculer d'accumulation après une précipitation neigeuse alors que MODIS 6.1 observe 100% de surface enneigée (Figure 9 B). On note également que les pentes d'accumulation diffèrent suivant la bande considérée (Figure 10). De même, des événements de fonte peuvent être simulés par CemaNeige, lorsqu'il n'y a pas de précipitation, alors que les températures sont négatives (cf. les différents éléments à la date du 22-01, Figure 10). Cela peut être dû à l'état thermique du stock de neige (eTg), équivalent à 25% de l'inertie thermique du pas temps précédent et à 75 % de la température d'altitude (Tz). Une très faible température d'altitude négative pourrait être compensée par une forte inertie. On note également que les valeurs de Gratio sont très variables d'un jour à l'autre, conséquence d'évènements simultanés de fonte et d'accumulation (Figure 10). De manière générale, CemaNeige surestime les vitesses de fonte, malgré la prise en compte de l'altitude des bandes (Figure 11). On note en effet que les courbes de fonte sont différentes, pour des températures de l'air similaires, suivant la bande considérée (e.g., Bande 1 et 2, Figure 11).

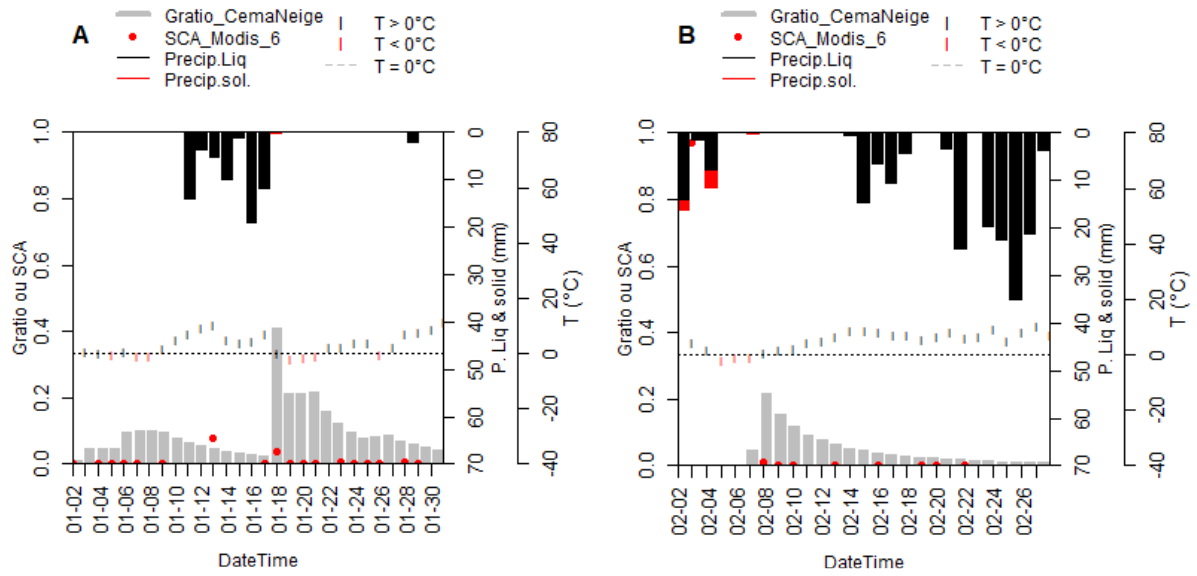


Figure 9. Exemples d'événements d'accumulation, SCA simulés par CemaNeige (ou Gratio barre grise) et chronique journalière des données observées par MODIS 6.1 (point rouge), des précipitations et des températures. A) données de de février 2015 janvier 2017 et B) de février 2015 sur la période 2 du sous-bassin Q542102001 (bande à 210 m d'élévation médiane)

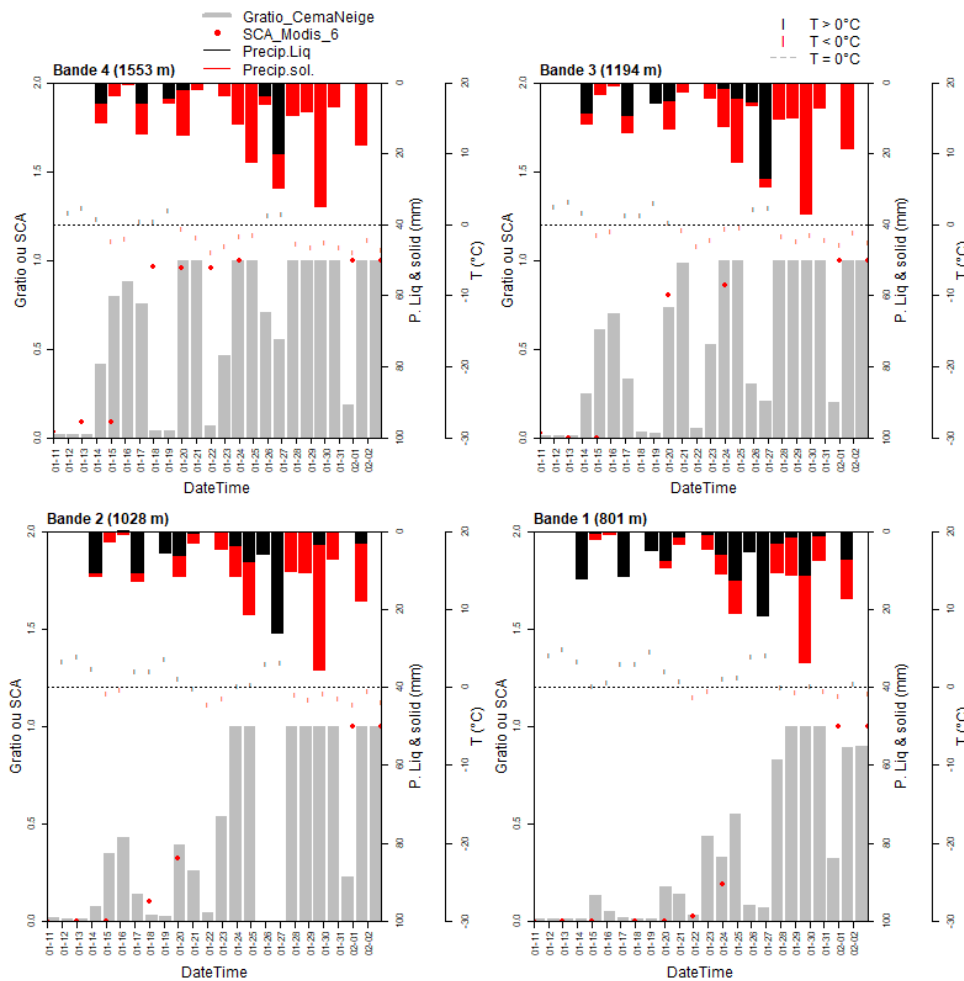


Figure 10. Exemple d'événement d'accumulation neigeuse sur l'ensemble des bandes d'un sous-bassin de la Dordogne (P171291001, période 2, janvier 2014).

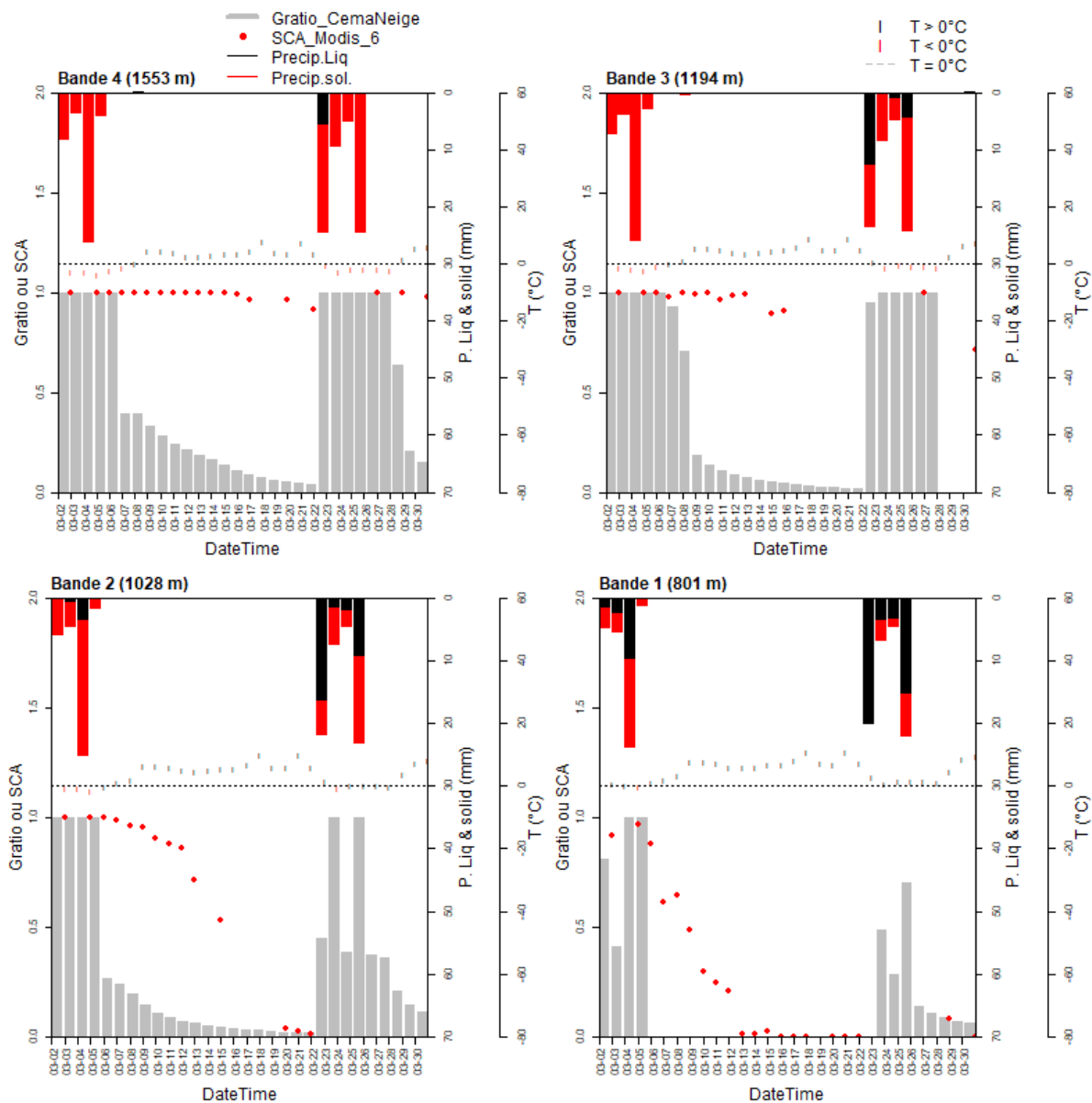


Figure 11. Exemple d'événement de fonte simulé par CemaNeige (barre grise) et chronique journalière des données observées par MODIS 6.1 (point rouge), des précipitations et des températures pour le mois de mars 2014 sur le sous-bassin P171291001 sur la Dordogne, période 2

7.1.2 Gratio vs SCA

En fonction de l'altitude : La comparaison entre Gratio (c'est-à-dire le pourcentage d'enneigement simulé par CemaNeige) et le SCA MODIS confirme l'observation précédente à l'échelle des évènements ; CemaNeige sous-estime l'enneigement (Figure 12). Plus les altitudes sont faibles, plus cette sous-estimation est importante (Figure 12). On note également que les pourcentages nuls d'enneigement de MODIS 6.1 sont relativement bien représentés par CemaNeige (cf. SCA [0, 0.2], Figure 12).

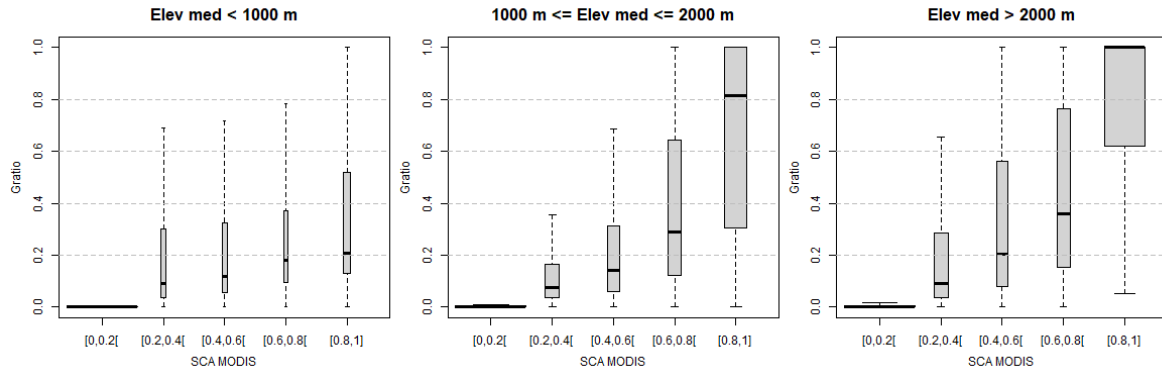


Figure 12. Boîtes à moustaches des Gratio pour chaque bande d'altitude simulés par CemaNeige sur la période 1, en fonction du SCA provenant de MODIS 6 pour différentes altitudes (< à 1000m, entre 1000 et 2000m et > 2000m). Les boxplots représentent l'écart interquartile ([Q25 - Q75]), la médiane, et les moustaches les Q10 et Q90. La largeur des boîtes est proportionnelle à la racine carrée du nombre d'observations.

En fonction de l'altitude, pour les événements de fonte, Gratio est en moyenne surestimé lorsque la couverture neigeuse est faible pour les altitudes supérieures à 1000 m (Figure 13).

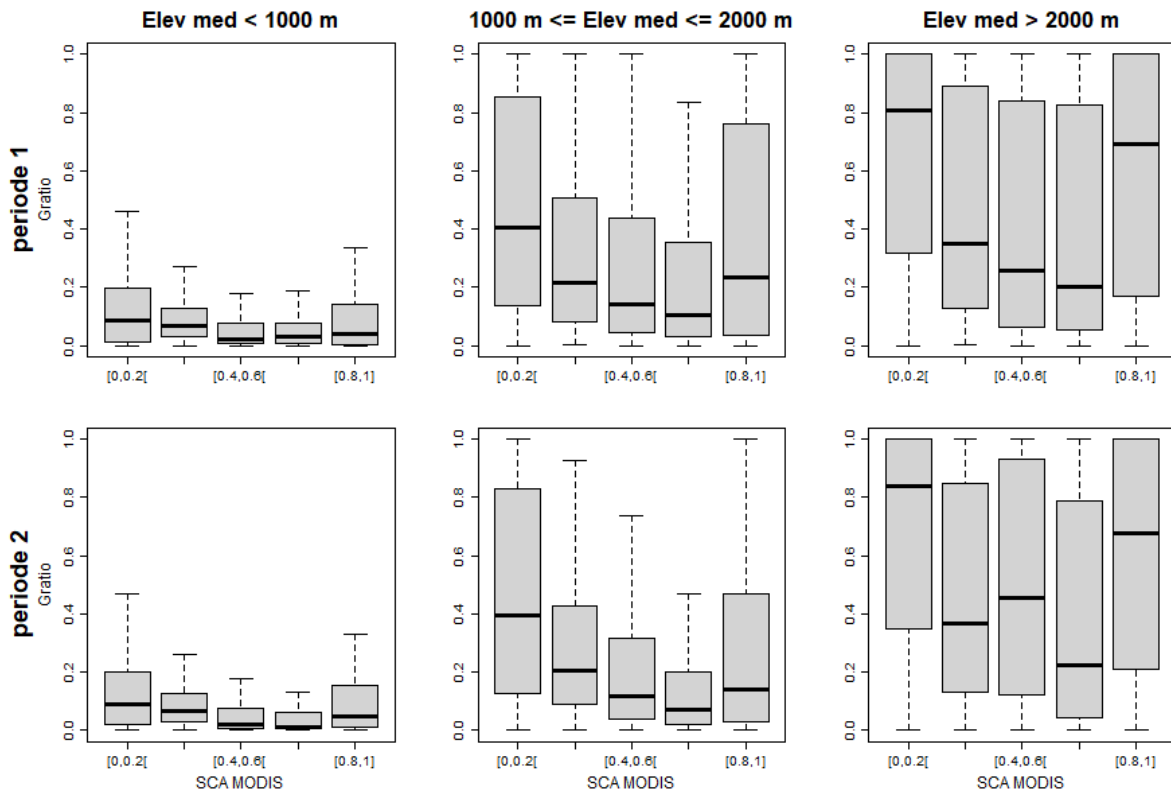


Figure 13. Boîtes à moustaches des Gratio moyen de CemaNeige pour chaque évènement de fonte en fonction du SCA MODIS moyen sur la période 1 et 2, pour les différentes altitudes médianes des bandes (< à 1000m, entre 1000 et 2000m et > 2000m). Les boîtes à moustaches représentent l'écart interquartile ([Q25 - Q75]), la médiane, et les moustaches les Q10 et Q90.

7.1.3 Coefficient de détermination mensuel entre Gratio, SCA et altitude des bandes

Lorsque l'on observe les corrélations entre le Gratio de CemaNeige et SCA observées par MODIS 6.1 sur un pas de temps mensuel, toujours en fonction de l'élévation médiane des bandes (Figure 14), on remarque que : i) la corrélation est contrastée suivant le mois considéré, ii) elle est maximale autour de 1500 m pour les mois les plus froids (de novembre à avril), iii) elle est maximale de mai à septembre

pour les altitudes les plus élevées. Quelle que soit la période considérée, les patterns mensuels observés sont les mêmes (seule la période 2 est présentée, Figure 14). On note également que la corrélation dépendrait moins des surfaces enneigées (cf. cercles noirs vs cercles rouges, Figure 14) que des volumes moyens mensuels de précipitation solide (données non montrés ici).

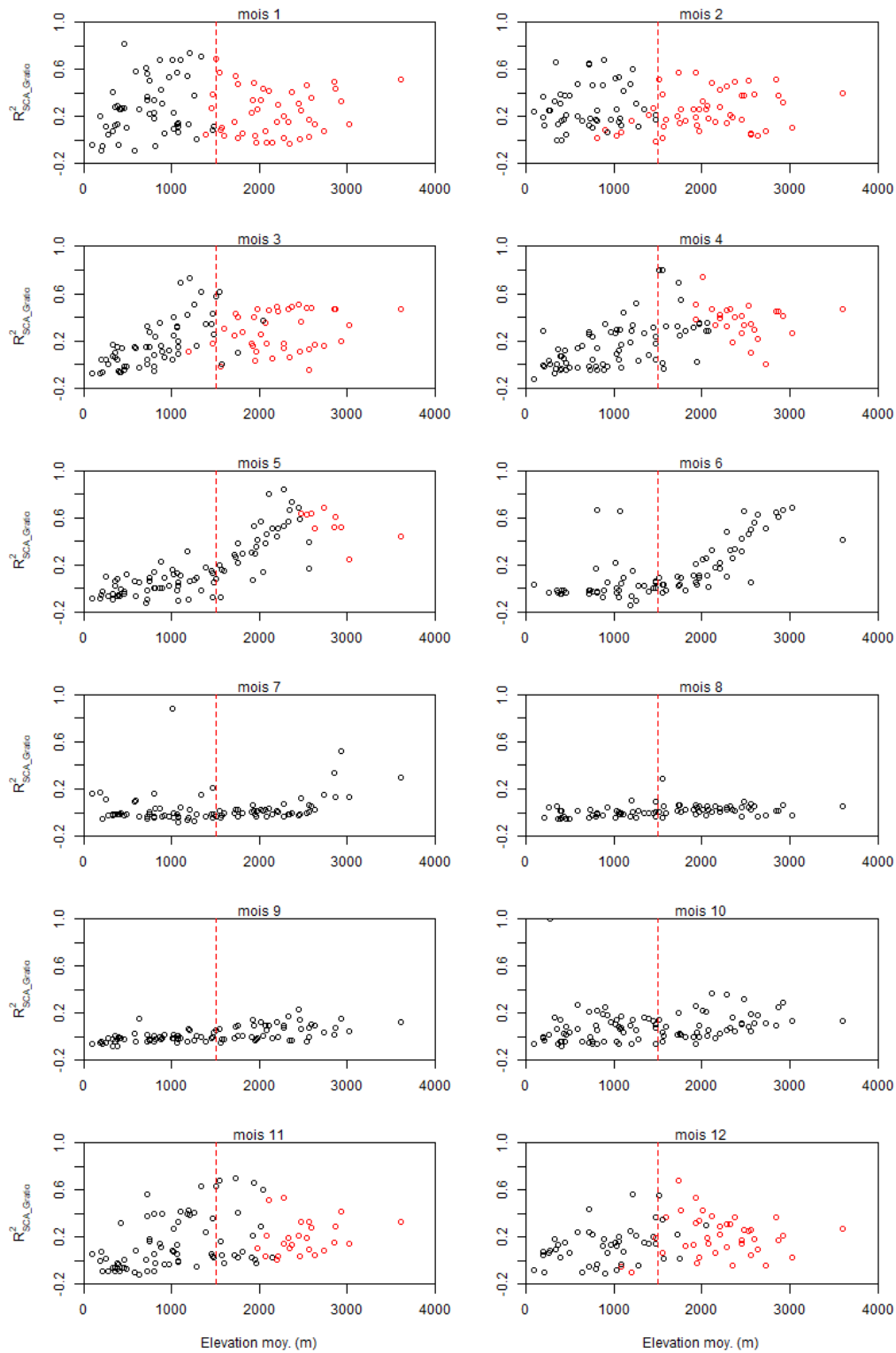


Figure 14. Coefficients de détermination (R^2) entre CemaNeige et MODIS 6.1 (Gratio \sim SCA) sur la période 2 pour chaque mois de l'année calendaire en fonction de l'élévation médiane des bandes. Les cercles rouges représentent les coefficients dont la couverture neigeuse observée est en moyenne supérieure à 50 %.

7.2 Analyse des performances nivales par bande

Les KGE' calculés entre SCA MODIS et Gratio et leur décomposition, par bande pour chaque sous-bassin, semble montrer une corrélation entre la performance de CemaNeige et l'altitude des bandes considérées (KGE', Figure 15). Ces résultats s'observent que l'on considère les événements de fonte ou d'accumulation (Figure 16). La dynamique temporelle et les distributions semblent moins bien simulées pour les bandes d'altitudes inférieures à 500 m (r , β et γ , Figure 15). Toutefois ces résultats sont à nuancer, car il y a une différence marquée entre la période 1 et la période 2 (Figure 15). De plus, si l'on fait abstraction des bandes des bassins du Gave, ces tendances, par rapport à l'altitude, ne sont plus aussi lisibles.

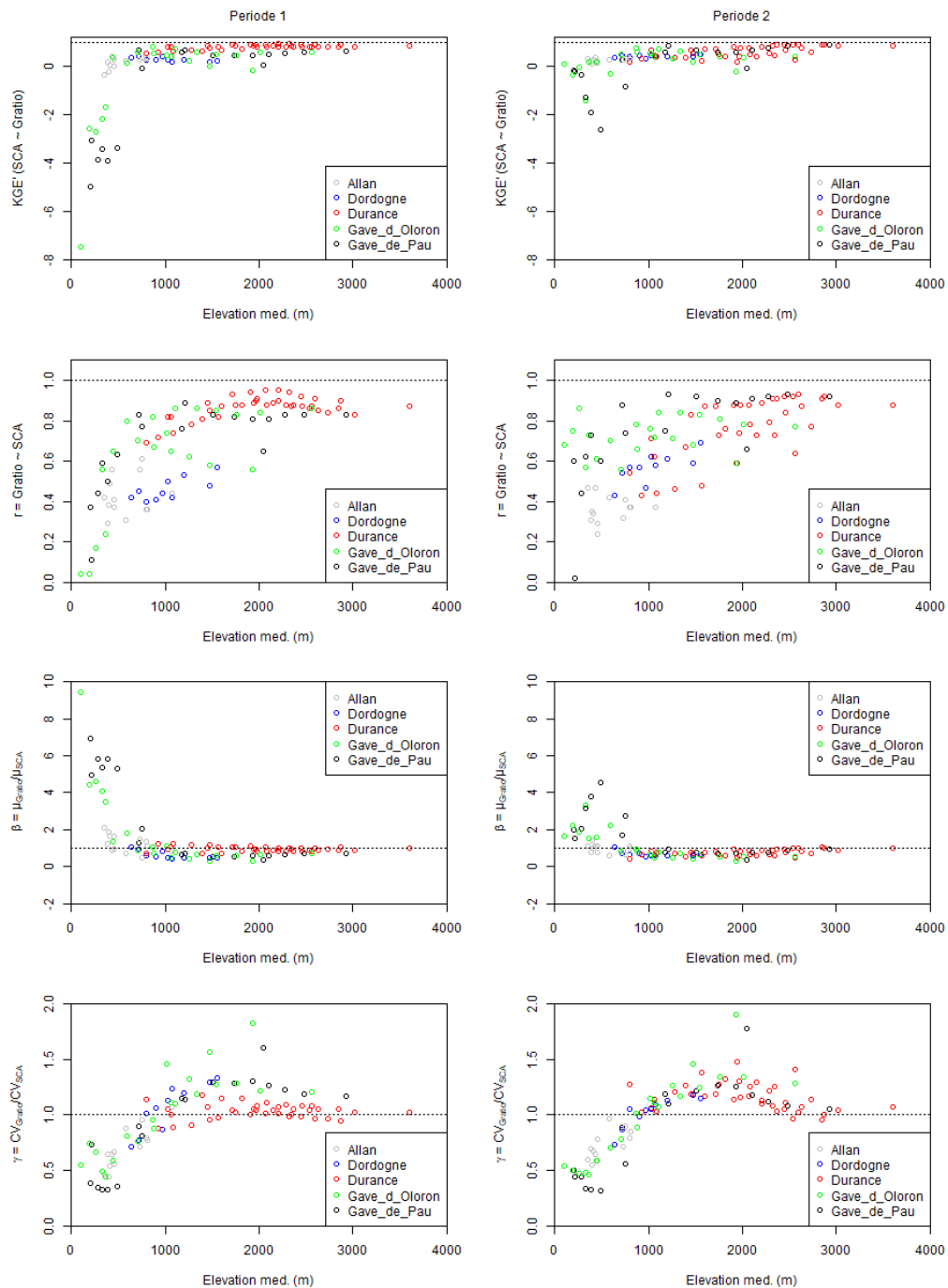
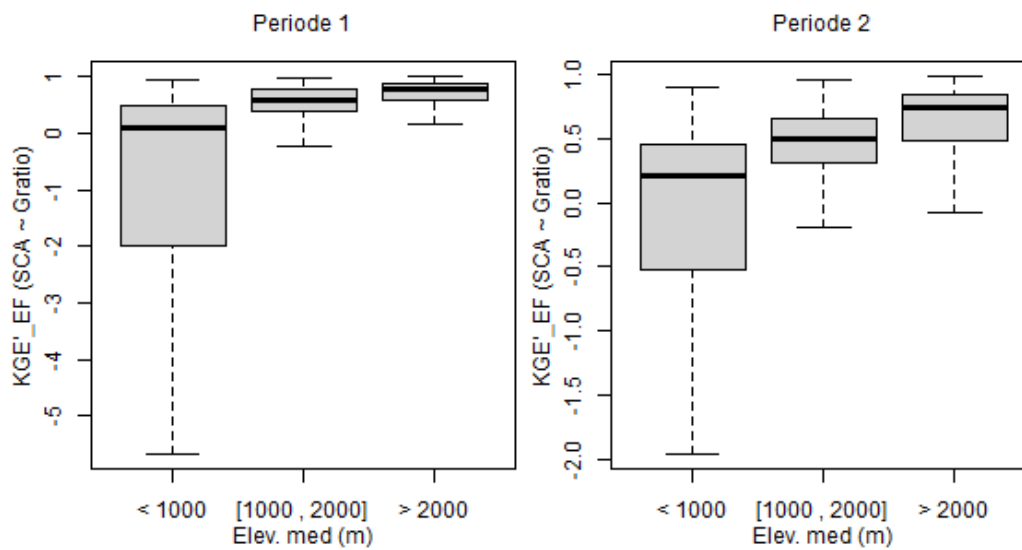


Figure 15. KGE' nival calculé pour chaque bande en fonction de leur élévation médiane, sur les périodes 1 et 2 et sa décomposition: coefficient de corrélation de Pearson (r), rapport de biais (β) et rapport des coefficients de variation (γ).

A. Evènements de fonte



B. Evènements d'accumulation

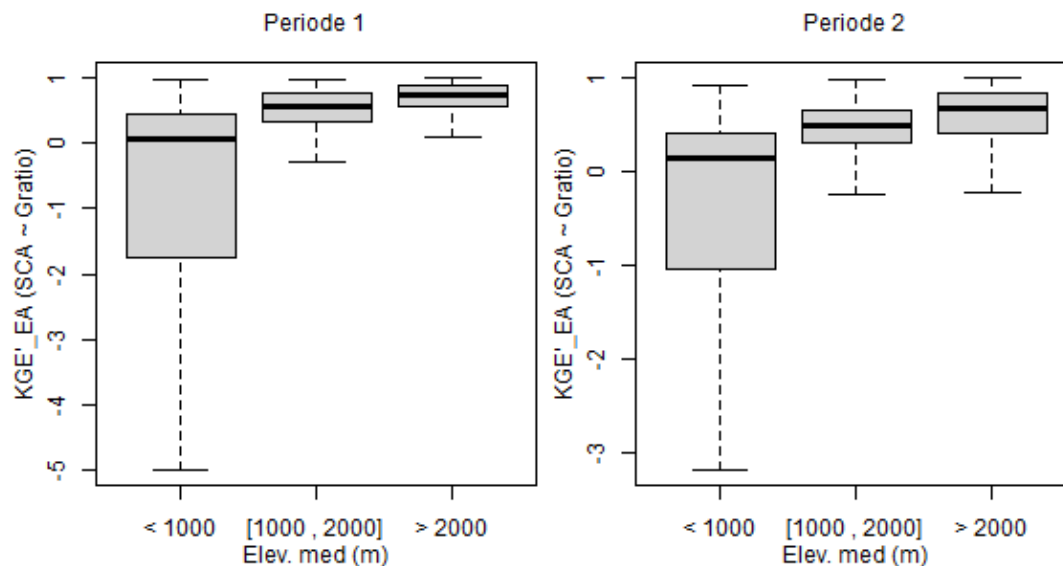


Figure 16. Boîtes à moustaches des KGE' entre Gratio et SCA provenant de MODIS 6.1 pour différentes altitudes (< 1000m, entre 1000 et 2000m et > 2000m), sur les périodes 1 et 2 pour les événements de fonte (A) et d'accumulation (B). Les boxplots représentent l'écart interquartile ([Q25 - Q75]), la médiane, et les moustaches les Q10 et Q90.

7.3 Analyse des paramètres et variables d'état de CemaNeige

7.3.1 Paramètres par sous-bassins versants

Le modèle GR4J couplé au module CemaNeige au sein du package airGRiwrn nécessite le calage de 8 paramètres (4 pour le modèle hydrologique et 4 pour le module CemaNeige) et d'un paramètre de propagation hydraulique lié à la semi-distribution. Le paramètre de propagation est une célérité qui, multipliée par la distance hydraulique entre exutoires, permet de calculer le temps de transfert entre les exutoires des sous-bassins à l'exutoire principal. La célérité n'est calculée que pour les sous-bassins présentant un temps de retard (noté *Lag*) non nul. Suite à une précédente étude montrant le manque de sensibilité de deux paramètres du module CemaNeige, ceux-ci ont été fixés. Ainsi, le coefficient de pondération de l'état thermique du manteau est fixé à 0.25 (*cT*) et la valeur minimale du stock de neige à partir de laquelle la bande est recouverte de neige (noté G_{acc}) est fixée à 10 mm.

La Figure 17 présente les paramètres calés (comparables à ceux obtenus par Hallouin *et al.*, (2023) pour la même configuration « D »), sur la période 1 et la période 2, du modèle hydrologique GR4J (X1 à X4), du modèle CemaNeige (*Kf et Gseuil*) et de propagation (noté *C*), pour chaque sous-bassin. La Figure 18 compare les paramètres obtenus entre la période 1 et la période 2.

Les valeurs de célérité peuvent atteindre jusqu'à 20 m/s pour certains sous-bassins, ce qui correspondrait à des transferts quasi instantanés, sans que cela ne soit relié à l'altitude des bassins (Figure 17) ou à leur taille (données non montrées). Ce paramètre reste stable d'une période à l'autre sauf pour deux sous-bassins du Gave (Figure 18).

Les paramètres du modèle GR4J sont relativement homogènes sur l'ensemble des bassins et entre les deux périodes considérées (Figure 17 et Figure 18). Seuls quelques sous-bassins présentent des valeurs de paramètres aberrantes : le Gave de Pau à Orthez (voir X1 du sous-bassin Q542102001 en noir, période 1, Figure 17) et le sous-bassin de la Durance à Espinasses (voir X3 du sous-bassin X050551301 en rouge, période 2, Figure 17) et dans une moindre mesure le sous-bassin de l'Allan à Fesches-le-Châtel (voir X4 du sous-bassin U233401001 en gris, période 1, Figure 17). Pour exemple, la valeur de 2000 mm obtenue pour X1 sur le Gave de Pau, lors de la période 1, sort de la gamme généralement obtenue pour ce paramètre, entre 100 et 1200 mm (Perrin *et al.*, 2007).

Le paramètre *Kf* présente une large gamme de valeurs entre 1.6 et 109 mm/°C/jour sur les deux périodes, sans relation avec l'altitude médiane du sous-bassin considéré (Figure 17). On note une certaine variabilité du paramètre *Kf* entre la période 1 et 2 (Figure 18). Ce paramètre, qui dépend de la température de l'air pourrait aussi être affecté par les périodes de calage / validation choisies et les conditions climatiques non-stationnaires (Bérubé 2020 ; Coron, 2011).

Le paramètre G_{seuil} de CemaNeige, seuil de fonte du modèle (représentant la valeur de SWE à partir de laquelle la fonte est effective), est calculé comme le double de 90% du cumul annuel moyen de précipitation neigeuse du bassin considéré. Si ce dernier est homogène pour les sous-bassins de l'Allan et de la Dordogne sur les deux périodes, il est plus variable pour les autres sous-bassins (Figure 17 et Figure 18). Sa valeur est égale à 1 pour l'ensemble des bassins, et entre 0,25 et 0,5 pour les sous-bassins qui présentent les plus hautes ou les plus basses altitudes (Figure 17 et Figure 18). Toutefois la variation du paramètre G_{seuil} s'explique mieux avec l'exposition des pentes montagneuses (les pentes ombragées ont tendance à fondre moins vite que les pentes ensoleillées) qu'avec l'altitude (Riboust *et al.*, 2018).

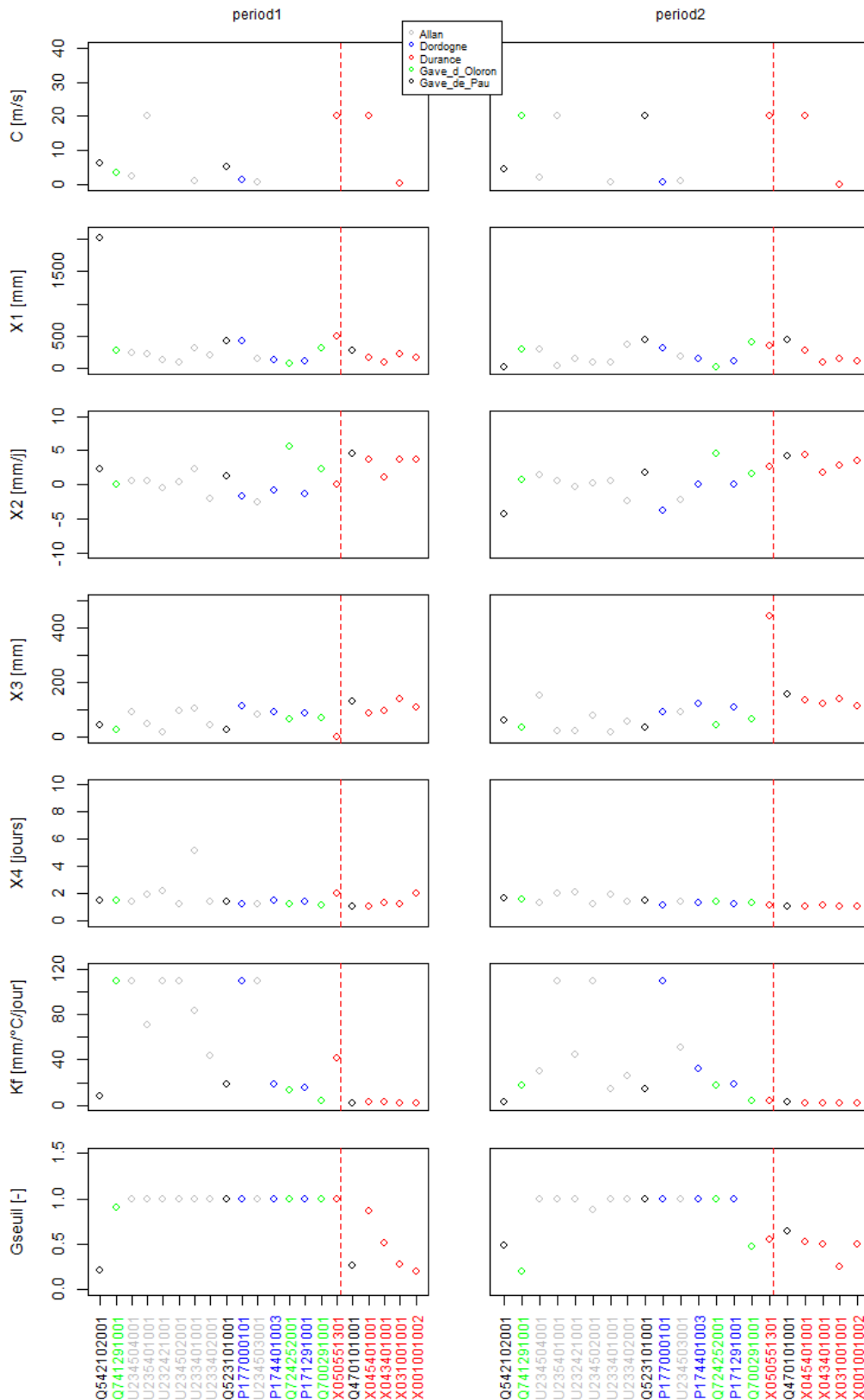


Figure 17. Paramètres calés et variables du modèle sur les périodes 1 et 2, pour les 21 sous-bassins versants (X1 : capacité du réservoir de production (mm), X2 : coefficient d'échanges souterrains (mm/jour), X3 : capacité à un jour du réservoir de routage (mm), X4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (jours) et C (célérité): délai en sortie sur les débits pour GR4J (m/s), et Kf (mm/°C/jour) et Gseuil (sans unité) pour CemaNeige). Les sous-bassins sont classés en fonction de leur altitude, de l'élévation médiane la plus faible à la plus forte.

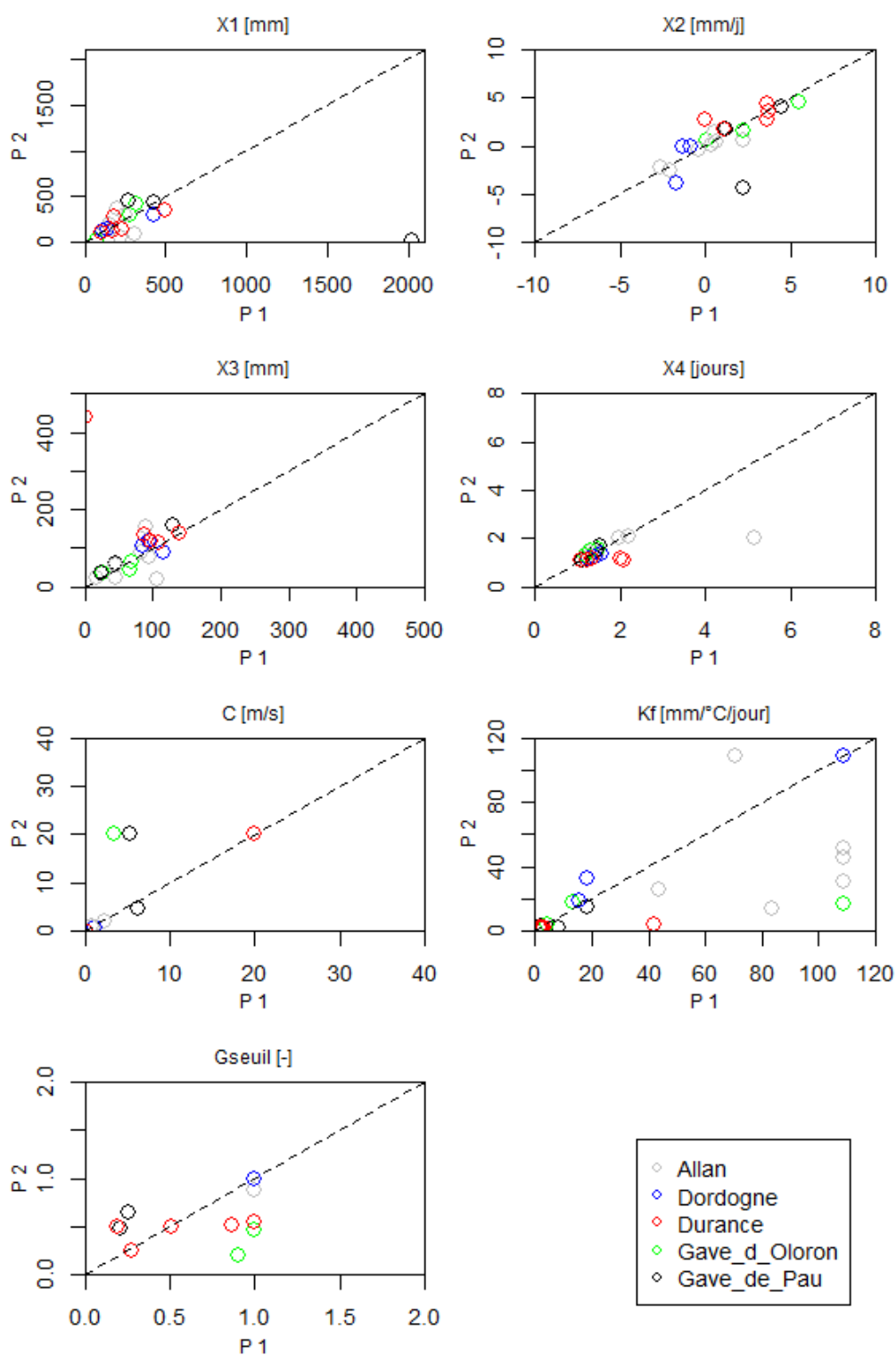


Figure 18. Paramètres calés et variables du modèle de la période 2 en fonction de la période 1, pour les 21 sous-bassins versants (X1 : capacité du réservoir de production (mm), X2 : coefficient d'échanges souterrains (mm/jour), X3 : capacité à un jour du réservoir de routage (mm), X4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (jours) et C (ou célérité notée aussi Lag): délai en sortie sur les débits pour GR4J (m/s), et Kf (mm/°C/jour) et Gseuil (sans unité) pour CemaNeige).

7.3.2 Le paramètre K_f

Dans CemaNeige, la vitesse de fonte, souvent surestimée (cf. partie 7.1), dépend de la couverture neigeuse et de la fonte potentielle. La fonte potentielle est paramétrée par k_f sur le sous-bassin considéré et les températures positives de la bande considérée ($K_f * T_z$ ($T_z > 0$)). Si les températures dépendent bien de l'élévation médiane des bandes (Figure 19), la vitesse de fonte potentielle dépend aussi de l'exposition des pentes, facteur que ne compense peut-être pas toujours le paramètre K_f si l'on regarde les performances nivales (cf. partie 7.2). Or il peut y avoir autant ou aussi peu de corrélation entre la moyenne annuelle des heures d'ensoleillement et le paramètre K_f (Figure 20), qu'avec la température moyenne des bandes (Figure 21).

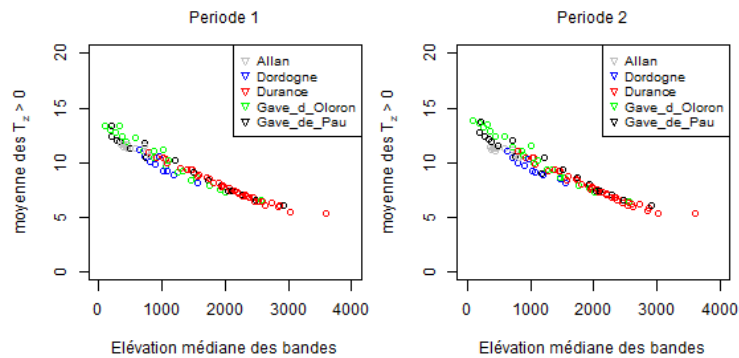


Figure 19. Température positive moyenne en fonction l'élévation médiane des bandes sur les périodes 1 et 2.

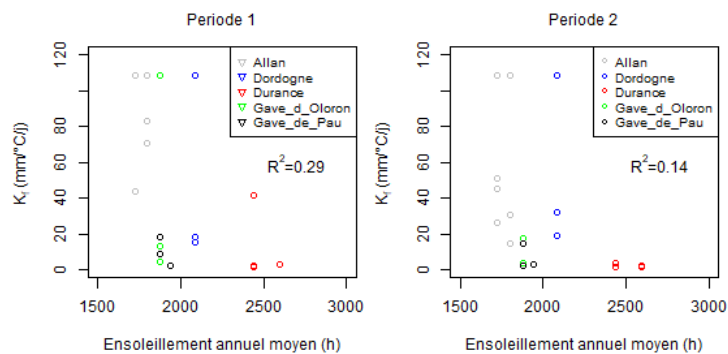


Figure 20. Paramètre K_f pour chaque sous-bassin sur les périodes 1 et 2, en fonction de l'ensoleillement de son département (Source : data.gouv.fr Hello Watt Données du temps d'ensoleillement par départements en France, dernière mise à jour : 29/08/2023) et leur coefficient de corrélation (R^2).

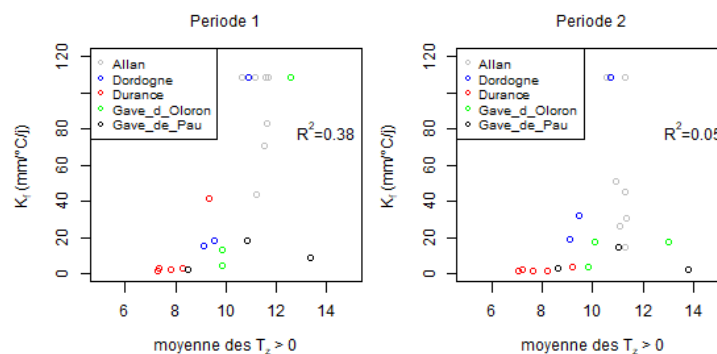


Figure 21. Paramètre K_f pour chaque sous-bassin en fonction de la moyenne des températures positives des bandes du sous-bassin et leur coefficient de corrélation (R^2) sur les périodes 1 et 2.

8 Conclusions du diagnostic CemaNeige

Notre objectif était d'évaluer l'intérêt pour le module CemaNeige, d'assimiler des données externes, telle que la surface enneigée provenant d'image satellite, donnée présentant elle-même certaines limites (cf. partie 6). Rappelons que le SCA est une variable intermédiaire, qui joue un rôle de deuxième ordre sur le volet hydrologique qui nous intéresse. Nous avons vu que le modèle CemaNeige présentait de moins bonnes performances pour les bassins de faibles altitudes (< 500 m), sans qu'il y ait un réel impact sur les performances hydrologiques et globales du modèle (cf. parties 3 à 5 et 7.2). Aux faibles altitudes ou lorsque la couverture neigeuse aux hautes altitudes est faible, CemaNeige a tendance à surestimer les événements d'accumulation et de fonte (cf. partie 7.1). Si certains paramètres du modèle CemaNeige semblent sensibles à l'altitude tel que G_{seuil} , d'autres pourraient être aussi sensibles à l'exposition des pentes ou au choix de la période de calage comme K_f (cf. partie 7.3).

Pour améliorer le modèle CemaNeige, plusieurs pistes, outre l'assimilation de données, peuvent être proposées :

1. **Améliorer la prise en compte des processus dans le modèle CemaNeige**, notamment lors de la fonte du manteau neigeux et des événements d'accumulation, en particulier aux basses altitudes. Dans le cadre de la spatialisation, des tests de sensibilité, au paramètre K_f et à l'état thermique du stock (eTg) pour les processus de fonte et au paramètre fixé G_{acc} pour les événements d'accumulation, pourraient aider à améliorer les performances du modèle.
2. **Evaluer le meilleur ratio des KGE neige/débit** nécessaire au calage de CemaNeige en fonction de l'élévation médiane des bandes.
3. **Evaluer la sensibilité des paramètres et des performances du modèle au choix de la période de calage.**
4. **Utiliser d'autres données satellites** que celles fournies par MODIS 6.1, qui présentent près de 50 % de données manquantes sur les chroniques utilisées. Pour exemple, les données satellites telles que les températures de surface peuvent être déterminées à partir des mesures de l'émission thermique d'une surface (infrarouge thermique) tandis que les micro-ondes passives et actives (radar) peuvent fournir de l'information sur les caractéristiques du manteau neigeux (profondeur, ÉEN, SCN) ainsi que sur l'humidité du sol (Schmugge et al., 2002). Les images MODIS pourraient être validées en croisant d'autres données satellites. Pour exemple, Esmaeelzadeh et al. (2024) fusionnent les images de Sentinel-1 et Sentinel-2, pour améliorer la cartographie neigeuse de leur modèle. Wang et al. (2018) utilisent pour l'étude du manteau neigeux des données de télédétection multi-sources. Plusieurs satellites sont capables de détecter le couvert de neige. Pour exemple, les groupes de satellites Landsat et SPOT offrent des mesures dans plusieurs bandes du visible pour une excellente résolution de 30 m (Landsat) et 6 m (SPOT 6-7). Cependant, Landsat offre une couverture temporelle très faible, ne passant au même endroit que tous les 16 jours. Le satellite SPOT offre la possibilité d'avoir des images de façon journalière.
5. **Assimiler les données MODIS 6.1 (ou autre)** dans le modèle CemaNeige, pour mettre à jour ses états et améliorer les performances. Dans ce cadre, les résultats des études menées par Météo-France, notamment sur le système S2M et ses développements futurs, qui prévoient notamment l'assimilation d'observations satellites et radars variées, pourront être utilisés dès leur accessibilité (Centre d'Etude de la Neige, CNRM, Grenoble).

9 Références

- Bérubé S. 2020. Stratégies optimales de calibration de modèles hydrologiques en contexte de changements climatiques. Doctoral dissertation. École de technologie supérieure. Univ. Du Québec. 87 pp.
- Coron, L., Andréassian, V., Bourqui, M., Perrin, C., & Hendrickx, F. (2011). Pathologies of hydrological models used in changing climatic conditions: a review. Symposium J-H02 at IUGG 2011, Jun 2011, Melbourne, Australia. pp.6.
- De Lavenne, A., Andréassian, V., Thirel, G., Ramos, M.-H., Perrin, C., 2019. A Regularization Approach to Improve the Sequential Calibration of a Semi-distributed. Hydrological Model. *Water Resources Research* 55, 8821–8839. <https://doi.org/10.1029/2018WR024266>
- Dorchies, D., Delaigue, O., & Thirel, G. (2021, April). airGRiwr: an extension of the airGR R-package for handling Integrated Water Resources Management modeling. In EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. EGU21-2190), <https://dx.doi.org/10.5194/egusphere-egu21-2190>.
- Esmaeelzadeh, R., Emamgholizadeh, S., & Bigdeli, B. (2024). Improvement on the Effective Snow Cover Extraction Using Fusion Satellite Images Approach. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 52, 449–462, <https://doi.org/10.1007/s12524-024-01828-y>.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., and Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling, *J. Hydrol.*, 377, 80–91, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Hall, D. K. and Riggs, G. A. (2021a). MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m SIN Grid, Version 61, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD10A2.061>.
- Hall, D. K. and Riggs, G. A. (2021b). MODIS/Aqua Snow Cover Daily L3 Global 500m SIN Grid, Version 61, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MYD10A1.061>.
- Hallouin T., Bourgin F., Thirel G., Tilmant F., Perrin C., Andréassian V. (2023). Spatialisation d'un module neige dans un contexte de modélisation hydrologique semi-distribuée. Rapport d'action Programme MTECT (DGPR/SRNH) – INRAE 2022, pp 40, <https://hal.science/hal-04264392>.
- Kling, H., Fuchs, M., and Paulin, M. (2012) Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios, *J. Hydrol.*, 424–425, 264–277, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.011>.
- Le Moine, N., Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., (2007). How can rainfall-runoff models handle intercatchment groundwater flows? Theoretical study based on 1040 French catchments. *Water Resources Research* 43(6), <https://doi.org/10.1029/2006WR005608>.
- Météo-France (2019). RADAR COMEPHORE Hourly Precipitation Amount Composite, <https://doi.org/10.25326/360>
- Nicolle P. (2010) — Prise en compte de la neige dans la prévision hydrologique : quel apport pour mieux prévoir les crues nivales. Mémoire de Master, Université Pierre et Marie Curie, Cemagref, Paris. 53 pp, <https://hal.inrae.fr/hal-02593633>.
- Nicolle, P., Valery, A., Ramos, M. H., Perrin, C., & Andreassian, V. (2012). Mieux prévoir les crues nivales: évaluation de prévisions probabilistes de débit sur des bassins versants de montagne français. *La Houille Blanche*, 98(2), 26-33, <https://doi.org/10.1051/lhb/2012012>.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., and 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, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>.

- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of hydrology*, 279(1-4), 275-289, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7).
- Riboust, P. (2018). De la neige au débit: de l'intérêt d'une meilleure contrainte et représentation de la neige dans les modèles Thèse de doctorat. Sorbonne Université, <https://theses.hal.science/tel-02108942v2>.
- Riboust, P., Thirel, G., Le Moine, N., and Ribstein, P. (2019) Revisiting a simple degree-day model for integrating satellite data: implementation of SWE-SCA hystereses, *Journal of hydrology and hydromechanics*, 67, 70–81, <https://doi.org/10.2478/johh-2018-0004>.
- Schmugge, T. J., Kustas, W. P., Ritchie, J. C., Jackson, T. J. et Rango, A. (2002). Remote sensing in hydrology. *Advances in Water Resources*, 25 (8), 1367-138, [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00065-9](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00065-9).
- Tabary, P., Dupuy, P., L'Henaff, G., Gueguen, C., Moulin, L., and Laurantin, O. (2012). A 10-year (1997–2006) reanalysis of Quantitative Precipitation Estimation over France: methodology and first results, IAHS-AISH publication, pp. 255–260.
- Thirel G., Delaigue O., (2023). Using satellite snow cover area data for calibrating and improving CemaNeige https://cran.r-project.org/web/packages/airGR/vignettes/V04_cemaneige_hysteresis.html
- Valéry, A. (2010). Modélisation précipitations débit sous influence nivale: Elaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. Sciences de l'environnement. Doctorat Hydrobiologie, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement AgroParisTech, 418pp, <https://hal.inrae.fr/tel-02594605>.
- Valéry, A., Andréassian, V., & Perrin, C. (2014a). 'As simple as possible but not simpler': What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 1 – Comparison of six snow accounting routines on 380 catchments. *Journal of hydrology*, 517, 1166–1175, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.059>.
- Valéry, A., Andréassian, V., & Perrin, C. (2014b). 'As simple as possible but not simpler': What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 2–Sensitivity analysis of the CemaNeige snow accounting routine on 380 catchments. *Journal of hydrology*, 517, 1176-1187, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.058>.
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., and Soubeyroux, J.-M. (2010). A 50-year high resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system, *International Journal of Climatology*, 30, 1627–1644, <https://doi.org/10.1002/joc.2003>.
- Wang, Y., Huang, X., Liang, H., Sun, Y., Feng, Q., & Liang, T. (2018). Tracking snow variations in the Northern Hemisphere using multi-source remote sensing data (2000–2015). *Remote Sensing*, 10(1), 136, <https://doi.org/10.3390/rs10010136>.

Annexe 1 – Paramètres et variables d'états de CemaNeige et étapes de calculs

ETAPES DE CALCULS CEMANEIGE		UNITE	REPRESENTATION
A. Détermine la nature des précipitations			
A.1 CALCUL température T_z de la bande z			
T _{air}	°C		Température de l'air SAFRAN (moyenne journalière)
Z _{med_BV}	m		Élévation médiane du BV
Z _z	m		Élévation médiane de la bande z
θ _{altitude}	°C/m		Gradient altitudinal de température
$T_z = T_{air} + \theta_{altitude} \times (Z_z - Z_{med_BV})$	°C		Extrapolation de la T _{air} de la bande z
A.2 CALCUL fraction solide des précipitations sur la bande z			
$P_z = P \times \exp[\beta_{altitude} \times (Z_z - Z_{med_BV})]$	mm		Extrapolation des précipitations de la bande z
$P_{liq} = P_z - P_{sol}$	mm		Précipitation liquide de la bande z
Fraction _{neige}	mm		$\int_{(-1^\circ\text{C}, +3^\circ\text{C})}$ si Z _{med_BV} ≥ 1500m $\int_{(T_{min}, T_{max})}$ si Z _{med_BV} < 1500m
$P_{sol} = P_z \times \text{Fraction}_{neige}$	mm		Précipitations neigeuses de la bande z
B. Détermine l'accumulation et fonte neigeuse			
B.1 CALCUL eTg état thermique du stock			
$eTg = 0.25 eTg_{t-1} + 0.75 T_z$		eTg eq. 25% de l'inertie du pas temps précédent + 75 % de la température d'altitude T _z	Etat thermique du stock
Ctg	-		Coefficient de pondération de l'état thermique du stock de neige (inertie thermique) - Paramètre fixe : Ctg = 0.25
B.2 CONDITION si eTg < 0°C ou ≥ 0°C			
Si eTg < 0°C et T_z ≤ 0°C		ACCUMULATION	G_t = G_{t-1} + P_{sol}
$\Delta SWE_t \geq 0$		$\Delta SWE_t = P_{sol_t} - Melt_t$ avec $Melt_t \leq P_{sol}$	Stock de neige équivalent (SWE ou snowpack) ou G
SCA	mm		$SCA_t = \min[SCA_{t-1} + \Delta SWE_t / G_{acc}, 1]$
G _{acc}	mm		Paramètre fixe : G _{acc} = 10 mm, valeur minimale du stock de neige à partir de laquelle toute la bande est recouverte de neige (SCA = 1)
Si eTg ≥ 0°C et T_z > T_f : déclenche le calcul de fonte potentielle		FONTE avec ou sans accumulation	G_t = G_{t-1} - FONTE
Calcul de la fonte potentielle		Melt_{pot t} = K_f x T_{z t}	
T _f	°C		Température de fonte fixée à 0°C
K _f	mm/°C/jour		Paramètre libre, facteur de fonte
<i>Condition particulière, Si Melt_{pot} > G alors Melt_{pot} = G</i>			
Calcul de la fonte réelle avec Melt_{pot} et SCA		Melt_t = (0.9 SCA_t + 0.1) Melt_{pot t}	
Calcul SCA ou pourcentage d'enneigement (P_{enneigé} ou G_{ratio})		Calculé à partir de SWE via une hystérésis linéaire SCA_t = min[SWE_t / G_{localmax}, 1]	
G _{seuil} (ou Th,melt)	mm		Valeur de SWE à partir de laquelle la fonte est effective : 90% du cumul annuel moyen de précipitation neigeuse sur le bassin x 2
G _{localmax} (ou Th,max)	mm		Définit la pente et le point d'inflexion de la courbe de fonte
Si SWE _{t-1} > G _{seuil}		SCA = 1 et G _{localmax} = G _{seuil}	SCA = 1 et diminue seulement si SWE _t < G _{seuil}
Si SWE _{t-1} ≤ G _{seuil}		SCA = G / G _{localmax} = G _{ratio}	G _{localmax} = SWE _t et SCA diminue
Si G n'est jamais > G _{seuil} ou Si il y a accumulation pendant la fonte		G _{localmax} = SWE _t	G _{seuil} prend la valeur maximale de SWE avant le début de la fonte, soit G _{localmax}
Si SCA = 0		Melt _t = 0.1 Melt _{pot} = V _{min}	V _{min} : Vitesse de fonte minimale correspond à un k _f =0.1. Plus SCA décroît, plus la vitesse de fonte décroît jusqu'à un minimum de 10% de Melt _{pot} .



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



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE