



HAL
open science

Action Neige 2016-2017: Amélioration de la modélisation hydrologique distribuée en conditions naturelles dans les Alpes

I. Gouttevin, M. Turko, F. Branger, Etienne Leblois, J.E. Sicart

► To cite this version:

I. Gouttevin, M. Turko, F. Branger, Etienne Leblois, J.E. Sicart. Action Neige 2016-2017: Amélioration de la modélisation hydrologique distribuée en conditions naturelles dans les Alpes. [Rapport de recherche] irstea. 2017, pp.58. hal-02609737

HAL Id: hal-02609737

<https://hal.inrae.fr/hal-02609737>

Submitted on 16 May 2020

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

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

Action Neige 2016-2017

Amélioration de la modélisation hydrologique distribuée en conditions naturelles dans les Alpes

Rapport Final

Version Finale



I. Gouttevin, M. Turko, F. Branger, E. Leblois, J-E. Sicart

Table des Matières

1.	Introduction.....	5
	Contexte	5
	Objectifs de l'Action	5
	Moyens mis en œuvre.....	6
	Etat de l'art succinct de la modélisation hydrologique nivale	6
2.	Données et Méthodes.....	9
2.1.	Modélisation de la neige dans J2000-Rhône.....	9
2.1.1	Interpolation du forçage météorologique.....	9
2.1.2	Accumulation de la neige	11
2.1.3	Fonte.....	11
2.1.4	Autres éléments du modèle de neige, non exploités pour cette étude	13
2.2.	Observations nivales	13
2.2.1	Observations ponctuelles du réseau nivo-météorologique	13
2.2.2	Observations ponctuelles des stations automatiques Nivôses de Météo-France	14
2.3.	Forçages météorologiques	15
2.3.1	SPAZM	15
2.3.2	SAFRAN	15
2.4.	Données hydrologiques de validation.....	17
2.5.	Méthodologie de l'Action Neige.....	20
2.5.1	Démarche globale.....	20
2.5.2	Cadre et éléments d'analyse	20
3.	Comparaison des forçages météorologiques.....	22
3.1	Analyse des différences entre SAFRAN et SPAZM sur le bassin du Rhône	22
3.2	Analyse des différences entre SAFRAN, SAFRAN-BA et SPAZM sur quelques bassins amonts.....	23
3.3	Comparaison aux observations nivales	24
3.4	Implications hydrologiques	26
4.	Exploration des pistes d'amélioration du module de neige de J2000-Rhône.....	27
4.1.	Performances de la modélisation hydrologique nivale dans MDR	27
4.2.	Evaluation préliminaire de la sensibilité aux paramètres du modèle de neige	28
4.3.	Piste #1 : optimisation locale du facteur de fonte	30
4.4.	Piste #2 : changement de forçage météorologique	32
4.5.	Piste #3 : formulation bi-journalière de la fonte.....	35
4.6.	Piste #4 : raffinement du maillage	38

4.7.	Piste #5 : complexification de la formulation de la fonte	40
5.	Discussion	42
5.1.	Les enseignements de l'Action Neige.....	42
5.2.	Opportunité d'un forçage hybride sur l'ensemble du bassin versant du Rhône	43
5.3.	Sensibilité de la modélisation à la résolution spatiale du forçage	45
6.	Conclusions et perspectives	48
6.1.	Performances avant et après l'Action Neige	48
6.2.	Perspectives.....	49
	Références.....	50
	Annexes	52
A.	Modèle de densification du manteau neigeux dans J2000	52
B.	Sensibilité de la modélisation aux paramètres T_{trs} et T_{trans} (formulation Tmean SAF-BA).....	53
C.	Sensibilité de la modélisation au paramètres T_b (formulation Tmean SPZ)	56
D.	Sensibilité du KGE au facteur de fonte dans la formulation « Tmean SAF ».....	57
E.	Correction d'un bug dans le calcul des aspects dans le mailleur HRU-delin.....	57

1. Introduction

Contexte

Cette Action s'inscrit dans le cadre du perfectionnement du modèle J2000-Rhône, développé à IRSTEA-Lyon au cours du projet **MDR (Modélisation Distribuée du Rhône, [Branger et al., 2016](#))** avec le soutien financier et l'accompagnement de l'AERMC. Ce modèle est un modèle hydrologique distribué, orienté processus, et destiné à estimer la ressource en eau en tout point du réseau hydrographique du bassin versant du Rhône. Validé par comparaison à des données hydrologiques sur la période récente (1985-2012), ce modèle permet, sur la base de projections climatiques futures, de traduire les impacts du changement climatique sur la ressource hydrologique.

J2000-Rhône présente des déficiences notables dans les régions de montagne (Figure 1). Ces régions étant particulièrement vulnérables au changement climatique en cours ([Hartmann et al., 2013](#)) et sujettes d'ores et déjà à des tensions sur la ressource en eau, en raison de nombreux usages concomitants ([Badré et al., 2009](#) ; [Magnier, 2013](#)), il nous est apparu important d'examiner la nature de ces déficiences et de les corriger. C'est l'ambition de l'Action Neige : 'amélioration de la modélisation hydrologique distribuée en conditions naturelles dans les Alpes'.

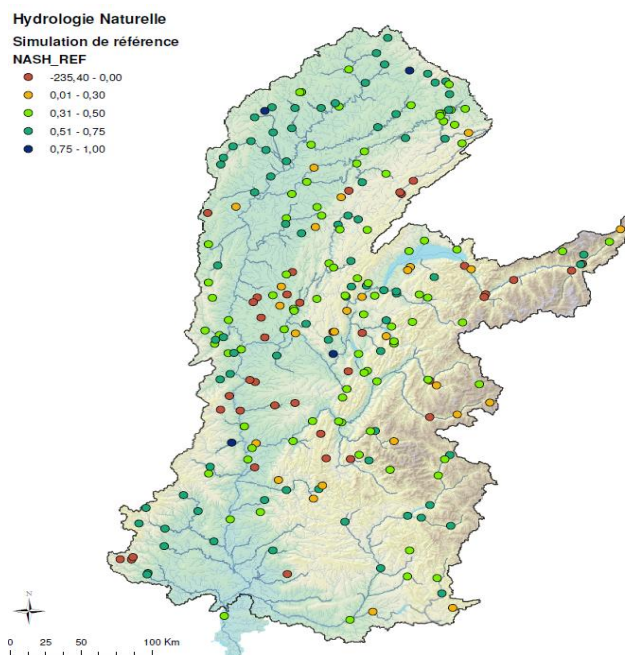


Figure 1 : Critères de Nash de simulations hydrologiques sur 1987-2012 avec J2000-Rhône. Un critère de Nash proche de 1 indique une très bonne performance du modèle.

Objectifs de l'Action

Dans cette perspective, plusieurs actions étaient nécessaires :

- Examiner les incertitudes sur la modélisation hydrologique portées par les forçages météorologiques
- Affiner notre paramétrage du module de neige de J2000-Rhône par des approfondissements bibliographiques et études de sensibilité

- Tester la valeur ajoutée de paramétrisations de la fonte de complexité supérieure, éventuellement en lien avec un maillage du modèle plus adapté au contexte montagneux
- Etablir la sensibilité de notre modélisation aux choix de résolution spatiale du modèle et des forçages météorologiques

Le présent rapport fait état des résultats obtenus sur ces questions.

Moyens mis en œuvre

Le présent rapport s'appuie sur les travaux de :

- Maxime Turko, CDD recruté grâce au financement de l'AERMC pour l'Action Neige.
- Antoine Blanc, stagiaire co-encadré par I. Gouttevin et E. Thibert.
- Isabelle Gouttevin, chercheuse à Irstea.

Ces travaux ont fait l'objet de discussions et collaborations avec les chercheurs d'Irstea-Lyon et de l'IGE (Institut des Géosciences de l'Environnement) de Grenoble, en particulier de J.E. Sicart, F. Branger, E. Leblois et E. Sauquet.

Etat de l'art succinct de la modélisation hydrologique nivale

En modélisation hydrologique nivale, on distingue deux approches, de complexités distinctes :

- La modélisation à base physique, qui repose sur la représentation des composantes du bilan d'énergie de surface à l'échelle des mailles des modèles. En particulier, la fonte est la résultante d'un bilan d'énergie excédentaire. Le modèle ISBA-Crocus, déployé notamment sur la Durance ([Lafaysse et al., 2011](#)) et l'Arve, utilise cette approche.
- La modélisation type 'température-index', où seule la composante fonte du bilan d'énergie est visée, et sa représentation passe par une relation linéaire à la température, souvent prise en moyenne journalière ([Hock, 2003 ; Valéry 2010](#)). On appelle **facteur de fonte** le coefficient linéaire de cette relation.

Si la première approche permet une représentation plus fidèle de la fonte en lien avec la situation météorologique (ciel couvert, situation de foehn), et donc de sa variabilité spatio-temporelle, elle nécessite en entrée un grand nombre de données météorologiques (rayonnement local notamment) et certaines hypothèses paramétriques (telles la rugosité de surface), susceptibles d'affecter la transférabilité de cette approche en dépit de son fondement physique ([Réveillet, 2016](#)).

La seconde approche permet une bonne représentation de la fonte moyenne au cours d'une saison, au détriment d'une bonne résolution de sa variabilité spatiale et temporelle (Figure 2). Surtout, elle est économe en paramètres, reposant uniquement sur la température, qui est la variable météorologique la plus observée dans le monde. À l'exception des modules de surface des modèles de climat globaux, la plupart des modèles hydrologiques déployés sur de grandes échelles spatiales ont donc adopté cette seconde approche. C'est aussi le cas de J2000-Rhône.

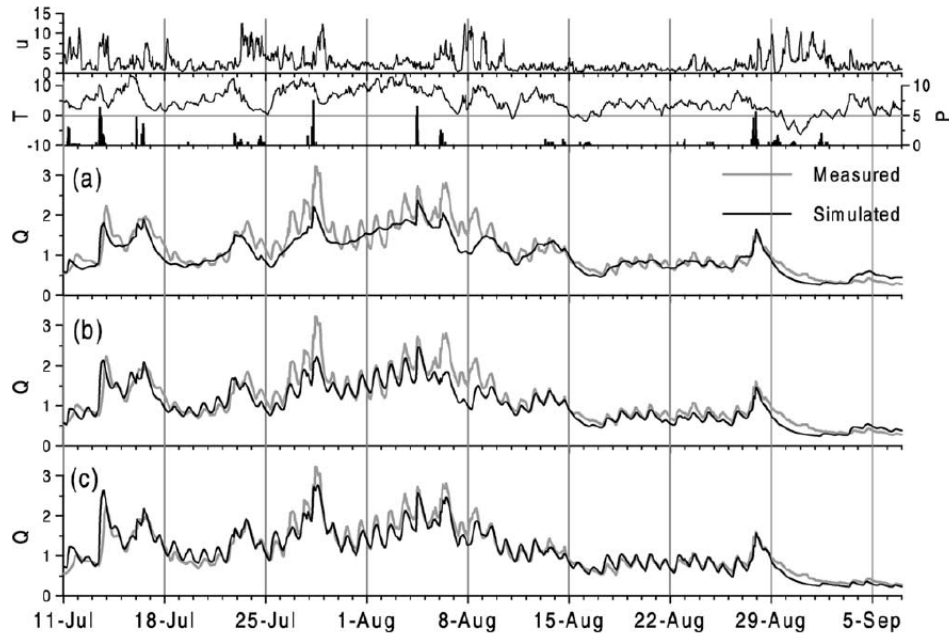


Fig. 2. Hourly data of wind speed, u (m s^{-1}), air temperature, T ($^{\circ}\text{C}$), precipitation, P (mm h^{-1}), simulated and measured hourly discharge, Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) of Storglaciären, Sweden, from July 11 to September 6, 1994. Melt calculations are based on classical degree-day method (a), modified temperature-index model including potential direct solar radiation (b; Hock, 1999) and energy balance model (c; Hock, 1998).

Figure 2 : Performances comparées de modélisations 'température-index' de complexités différentes, et d'un modèle de bilan d'énergie. Tiré de Hock, 2003.

Aux latitudes de la France, les bonnes performances de la modélisation type 'température-index' passent par une bonne corrélation entre température et rayonnement solaire net : ce dernier est en effet le principal vecteur des variations du bilan d'énergie de surface en période de fonte (Sicart et al., 2008). Cette corrélation englobe cependant des effets locaux liés à la topographie (pente, orientation, ombrage des versants) voire aux régimes météorologiques dominants (foehn...), supposant une validité purement locale du facteur de fonte : **il doit donc être calibré localement.**

Ces dépendances justifient la mise en place de **paramétrisations du facteur de fonte incluant les effets de l'altitude, l'orientation et la pente** (Jost et al., 2012, Grunewald et al., 2010, Mizukami et al., 2011) : même si ces études révèlent la faible valeur explicative de ces paramètres, nous testerons la valeur ajoutée de telles paramétrisations.

Enfin, la littérature fait apparaître que des formulations légèrement plus complexes de la fonte génèrent des gains de performance, à faible coût de données ou calculs additionnels :

- L'utilisation **des températures moyennes diurnes et nocturnes en lieu et place de la seule température moyenne journalière**, limite la sous-estimation de la fonte simulée les jours où la température moyenne journalière n'excède pas 0°C .
- La considération d'une **saisonnalité du facteur de fonte** permet de répercuter sur la fonte l'évolution de l'angle d'incidence solaire entre les deux solstices (Anderson, 1976 ; Picouet, 2012b, Jabot, 2012, Panthou and Obléd, 2010).

Nous exploiterons ici ces pistes.

D'autres pistes potentielles ont en revanche été abandonnées après considération de l'état de l'art. Mentionnons notamment la prise en compte de l'inertie thermique du manteau neigeux pour la

modélisation de la fonte à l'échelle de petits bassins versants, estimée inutile par [Schaepli and Huss \(2010\)](#); l'effet de l'advection de chaleur par l'eau liquide lors d'événements de pluie sur neige, jugé peu efficace par [Picouet \(2012b\)](#); et l'exploitation de l'insolation solaire potentielle pour moduler la fonte ([Picouet, 2012b](#)).

2. Données et Méthodes

2.1. Modélisation de la neige dans J2000-Rhône

Par souci de synthèse dans ce rapport, le lecteur est renvoyé à la lecture de [Branger et al. \(2016\)](#) pour une description exhaustive du modèle J2000-Rhône et de son paramétrage.

Nous approfondissons ci-dessous la description du module de neige, scindé en 3 grandes fonctions :

- i) Interpolation du forçage météorologique sur une maille de modèle,
- ii) Accumulation de la neige et modèle de densité,
- iii) Fonte de la neige.

2.1.1 Interpolation du forçage météorologique

Interpolation spatiale

J2000-Rhône peut effectuer des simulations avec différents forçages météorologiques, i.e. des « données » de température et précipitation permettant de connaître les apports (pluie, neige) et exports (évapotranspiration) d'eau entre le sol et l'atmosphère.

Ces forçages météorologiques sont en général fournis à une résolution spatiale plus grossière que les mailles de la modélisation appelées hrus (Figure 3 ; le principe de réalisation des hrus sera expliqué en 2.3) : une interpolation spatiale du forçage météorologique est alors nécessaire sur chaque hru.

L'option retenue dans J2000-Rhône est d'affecter à chaque hru la moyenne pondérée des intrants météo des 4 points de grille du forçage météo les plus proches. La pondération s'effectue par méthode de pondération inverse à la distance¹, les distances considérées étant prises entre les centroïdes des hrus et les points de grille du forçage météo.

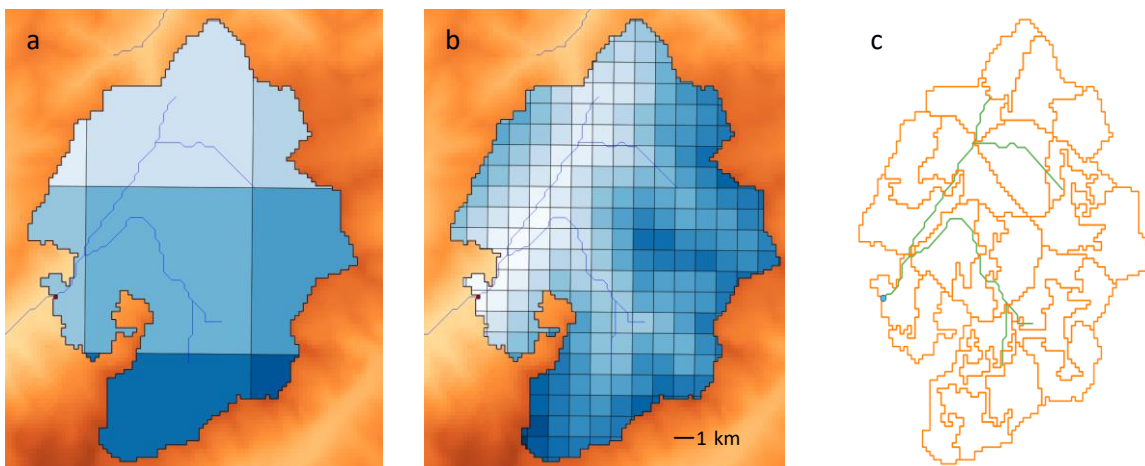


Figure 3 : mailles des forçages météorologiques SAFRAN (a), SPAZM (b) et hrus du modèle J2000-Rhône (c) sur le bassin versant de l'Arve à Chamonix.

¹ https://fr.wikipedia.org/wiki/Pond%C3%A9ration_inverse_%C3%A0_la_distance.

Phase des précipitations

La phase des précipitations est un élément crucial de la modélisation nivale puisqu'elle conditionne l'accumulation hivernale de neige et donc le volume de fonte au printemps. Son estimation est en général indexée sur la température de l'air, exploitant la transition de phase de l'eau pure à 0°C.

Dans une modélisation au pas de temps journalier, comme sous J2000, la température journalière d'un jour où un événement neigeux a été observé, n'est pas nécessairement représentative de la température au moment où il a effectivement neigé (ex. d'une chute de neige nocturne précédant une journée ensoleillée). Ainsi, le seuil de 0°C comme limite pluie-neige n'est pas directement exploitable dans la modélisation à ce pas de temps. La Figure 4 illustre cet effet sur un site à 1800 m d'altitude dans la vallée de Chamonix : des précipitations neigeuses peuvent être obtenues pour des températures moyennes journalières allant jusqu'à 4°C.

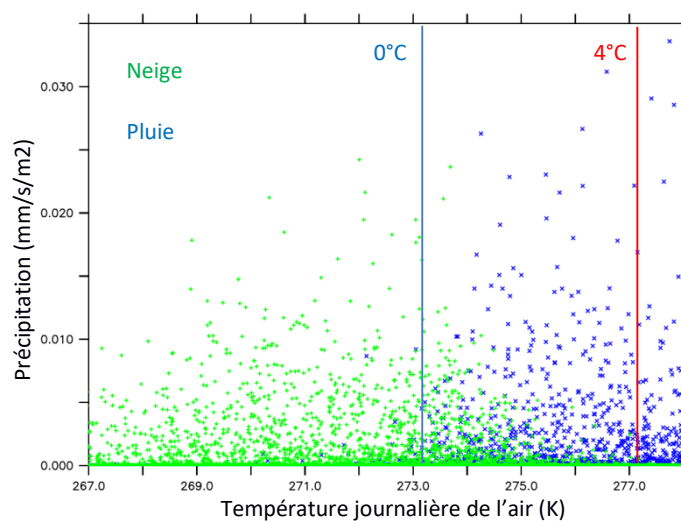


Figure 4 : Précipitation liquide et solide en fonction de la température moyenne journalière dans le forçage météorologique horaire SAFRAN sur la période 1984-2014 à Chamonix (1850 m).

Pour cette raison, la fraction liquide des précipitations est souvent modélisée par une transition linéaire entre 0 et 1 autour d'une valeur seuil de température (T_{trs}) ; cette loi, adoptée dans J2000, est régie par 2 paramètres T_{trs} et T_{trans} illustrés en Figure 5 : T_{trs} est la température où il y a équipartition entre pluie et neige ; à $T_{trs} + T_{trans}$ on atteint 100% de précipitations liquides.

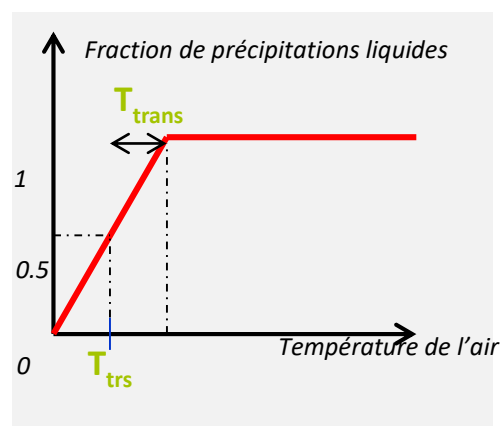


Figure 5 : Paramétrisation classique de la fraction pluie-neige

2.1.2 Accumulation de la neige

Sur chaque hru, le stock de neige, initialement nul, est actualisé après chaque précipitation par l'ajout de la précipitation solide. La variable modélisée par J2000-Rhône est le **SWE** ou Snow Water Equivalent (mm), correspondant à la lame d'eau que génèrerait la fonte de la colonne de neige sur la hru. Seule la fonte peut réduire le stock nival : la perte de stock par sublimation ou son érosion/sur-accumulation sous les effets du transport de neige par le vent, ne sont pas représentés. A l'échelle de nos bassins les phénomènes de transport (érosion / sur-accumulation) peuvent de compenser spatialement, mais la perte de neige par sublimation peut parfois être importante lors d'épisodes de vents forts. L'accumulation de neige est considérée **uniforme** à l'échelle d'une maille de modèle.

La hauteur de neige **HS** est aussi une variable intéressante car plus fréquemment observée que le SWE. La transformation du SWE en HS suppose de connaître la **densité de la neige**. Dans J2000-Rhône la densité de la neige est considérée comme constante et égale à 300 kg/m³. Cela correspond à la densité moyenne observée sur un manteau neigeux alpin de milieu et fin de saison d'accumulation, avant la fonte. Cette valeur a été choisie car le modèle de densification original de J2000 ne tient pas compte du processus de tassement de la neige, qui est le processus de densification dominant dans les régions alpines. Il considère uniquement de la densification par apports d'eau dans le manteau neigeux (pluie, fonte, Annexe A). Notons par ailleurs que la variable d'intérêt principale pour l'hydrologue est le SWE, HS étant une variable diagnostique.

2.1.3 Fonte

Formulation degré-jour du taux de fonte

La modélisation originale l'énergie potentielle de fonte dans J2000-Rhône (*PotMelt*) repose sur une formulation classique degré-jour (Hock, 2003, terme **1** dans l'Eq. (1)) enrichie par la prise en compte de l'advection de chaleur par la pluie (terme **2**) et d'un terme de fonte basale (terme **3**) qui reflète l'impact de la chaleur du sol (liée à la saison estivale précédente) sur la fonte. On parle de fonte potentielle car la fonte est conditionnée par la présence d'un manteau neigeux et car en cas de grand froid, une part de cette énergie potentielle sert à réchauffer le manteau neigeux jusqu'à 0°C. **Quatre paramètres (t_{factor} , T_b , r_{factor} et g_{factor}) régissent donc ce modèle de fonte.** Ils sont normalement calibrés sur des observations de débit (Nepal et al., 2014).

$$PotMelt = \underset{\mathbf{1}}{t_{factor}} \cdot (T - T_b) + \underset{\mathbf{2}}{r_{factor}} \cdot T_{day} \cdot P_{day} + \underset{\mathbf{3}}{g_{factor}} \quad (1)$$

où T_{day} , T et P_{day} représentent respectivement la température moyenne journalière, la température de référence prise en compte pour la fonte (en général, T_{day} aussi) et la précipitation (cumulée) journalière.

Dans le cœur de ce document la sensibilité du modèle de fonte à ces paramètres sera étudiée afin de limiter, dans la mesure du possible, le besoin de calibration. Des formulations alternatives de la fonte seront aussi proposées et évaluées dans une recherche d'amélioration des performances de la modélisation.

Contenu en froid ou « Cold Content »

La fonte suppose un manteau neigeux superficiel à 0°C. Or même en période de fonte, le refroidissement nocturne peut faire descendre en dessous de 0°C la température de la neige : une partie de l'énergie solaire, advective ou géothermique (Eq. 1) servira dans ce cas en fait à réchauffer la neige jusqu'à 0°C. On appelle Cold Content cette énergie, qui est calculée additivement comme proportionnelle à l'écart à 0°C des températures horaires négatives.

Dans J2000-Rhône, c'est la température moyenne journalière qui est utilisée pour le calcul du Cold Content (qui est une grandeur négative) :

$$ColdContent(t) = ColdContent(t - 1) + ColdContent_{factor} \cdot 24 \cdot \min(0, T_{day}) \quad (2)$$

L'impact des refroidissements nocturnes sur la fonte n'y est donc pas pris en compte, mais seulement celui de séquences de journées froides. La fonte (*Melt*) et l'évolution du Cold Content suivent alors :

$$Melt = \max(0, PotMelt + ColdContent) \quad (3)$$

$$ColdContent = \min(0, ColdContent + PotMelt) \quad (4)$$

Écoulement de l'eau de fonte et de pluie-sur-neige

Eau de fonte et pluie-sur-neige sont traitées de la même façon dans J2000 : globalement, ces lames d'eau de surface du manteau neigeux ont 2 impacts :

- Une augmentation de son contenu en eau liquide, qui est mesuré par la différence entre densité totale et densité de neige sèche du manteau neigeux.
- Une augmentation de la densité globale du manteau, qui tient compte de la neige et de l'eau liquide qu'elle incorpore (Annexe A)

L'écoulement en sortie du manteau neigeux est dominé par l'excédent d'eau liquide dans le manteau neigeux au-delà d'une densité critique (i.e. maximale) fixée à 700 kg/m³.

$$Ecoulement1 = \max(0, dens - dens_{crit}) * SWE_{tot} \quad (5)$$

Si la densité critique n'est pas atteinte, mais que de l'eau liquide est présente dans le manteau neigeux, une certaine quantité pourra s'écouler par 'percolation'. Dans la version originale de J2000-Rhône cet *Ecoulement2* obéissait à la paramétrisation suivante :

$$Ecoulement2 = \left(1 - e^{-\left(\frac{dens_{crit}}{dens}\right)^4}\right) \cdot WC \quad (6)$$

où *WC* est le contenu en eau du manteau neigeux (en mm/m²)

Cette formulation suppose une réduction de l'écoulement à mesure que le manteau approche de a saturation, ce qui est contraire aux observations : la formulation originale de J2000-Rhône est donc probablement erronée. Le travail de stage d'Antoine Blanc ([Blanc, 2017](#)), a montré qu'elle pouvait être remplacée par une formulation linéaire donnant de bons résultats sur le bassin versant de la Sarennes :

$$Ecoulement2 = \min(0.25, \frac{dens}{dens_{crit}}). WC \quad (7)$$

Le passage de (6 - old) à (7 - new) est illustré en Figure 6.

Le WC est ensuite actualisé (soustraction de *Ecoulement2*).

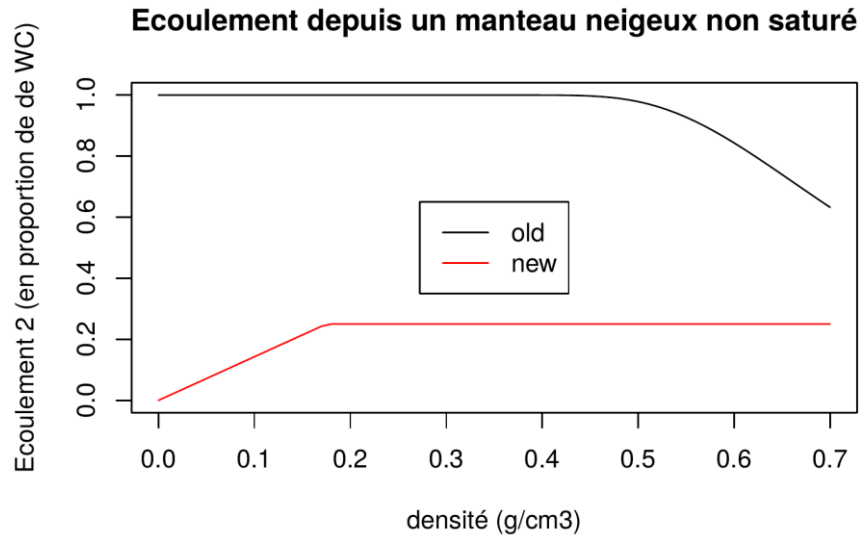


Figure 6 : Paramétrisation de l'écoulement de l'eau depuis un manteau neigeux non-saturé.

2.1.4 Autres éléments du modèle de neige, non exploités pour cette étude

L'interception de la neige par la canopée des arbres sur les mailles en forêt est réalisée en amont du module de neige : la neige interceptée est soit évaporée, soit retombe au sol sous forme de lame d'eau dès que la température journalière ne permet pas son maintien sous forme de neige.

La formulation de la fonte ne contient aucune adaptation spécifique à la prise en compte du couvert forestier, qui pourra faire l'objet de développements ultérieurs (e.g. [Jost et al., 2012](#)).

2.2. Observations nivales

Observations ponctuelles du réseau nivo-météorologique

Le couvert nival est observé ponctuellement par différents acteurs intéressés à la connaissance de son évolution : EDF, CNR², les stations de ski, Météo-France...

Météo-France met à disposition sur son site <https://donneespubliques.meteofrance.fr>, les données du réseau dit 'nivo-météorologique' sur la période de décembre 2010 à aujourd'hui. Ces données sont issues des stations situées en montagne et opérées par les partenaires conventionnés avec Météo-France pour la surveillance du manteau neigeux en période hivernale.

Nous avons pu récupérer auprès de Météo-France une chronique plus complète et dense de ces observations, remontant à 1983, mais non accessible librement depuis le web (

Tableau 1).

² Compagnie Nationale du Rhône.

Ces données concernent les variables suivantes, à pas de temps de 12h:

- direction et force du vent,
- température de l'air
- humidité de l'air
- hauteur de neige
- caractéristiques de la neige accumulée au sol

Les lacunes y sont nombreuses.

Tableau 1 : Observations nivo-météorologiques disponibles, et leur positionnement sur les hrus du modèle J2000-Rhône.

Nom du poste nivo-météorologique	ID	Bassin	Hru	Altitude hru (m)	Altitude nivomètre (m)	Latitude (°)	Longitude (°)	Aspect (°)	Pente nivomètre
Le Corbier	73318400	Arvan_Amont	7691	1618	1585	45.24	6.27	90	0
LA FLEGERE	74056417	Arve	5391	2181	1850	45.96	6.88	10	0
AIGUILLES ROUGES-NIVOS	74056405	Arve	5391	2181	2365	45.98	6.89	130	0
LE TOUR NIVO	74056402	Arve	5213	1840	1470	46	6.94	220	0
LE TOUR BALME	74056418	Arve	5309	2324	2190	46.02	6.97	340	15
Lognan	74056416	Arve	5333	1859	1970	45.96	6.94	10	0
CHAMONIX-OBS	74056400	Arve	5602	1267	1025	45.91	6.86	220	0
LES ROCHILLES-NIVOSE	73306401	Durance_Val_Pres	8028	2519	2450	45.09	6.47	310	0
NEVACHE-BUFFERE	5093403	Durance_Val_Pres	8142	2271	2060	45.01	6.57	40	2
MONTGENEVRE GENDARMERI	5085400	Durance_Val_Pres	8273	2142	1850	44.93	6.72	110	0
MONTGENEVRE-LE CHALVET	5085403	Durance_Val_Pres	8273	2142	2134	44.93	6.71	90	15

On notera que les standards de l'OMM³ ne sont pas respectés pour ces observations, induisant une confiance réduite en la fiabilité de certaines mesures comme la température de l'air. La hauteur de neige étant une grandeur extrêmement variable spatialement, le caractère ponctuel de ces données devra toujours être gardé à l'esprit, par comparaison au caractère spatialisé des sorties de J2000.

Observations ponctuelles des stations automatiques Nivôses de Météo-France

Afin de compléter le réseau nivo-météorologique notamment à plus haute altitude, Météo-France a équipé la-plupart des massifs des Alpes, Pyrénées et Corse de stations automatiques dites 'Nivôses'.

Sur les 3 sous-bassins où nous raffinerons particulièrement notre analyse (cf. 2.5), une seule station Nivôse est implantée : la Nivôse des Aiguilles Rouges, située à 2365 m d'altitude sur le bassin de l'Arve à Chamonix. Ses données, plus fiables que celles du réseau nivo-météorologique, seront utilisées pour comparaison à nos simulations.

³ Organisation Mondiale de la Météorologie.

2.3. Forçages météorologiques

La modélisation hydrologique sous J2000-Rhône suppose la connaissance des conditions de température, précipitation et évapotranspiration potentielle de référence : ces variables au pas de temps journalier, et sur l'emprise spatiale du modèle, constituent le **forçage météorologique**.

Deux sources de données étaient à notre disposition pour forcer J2000-Rhône dans le cadre de l'Action Neige : le produit SPAZM et les produits SAFRAN, que nous présentons ci-après. Le calcul de l'évapotranspiration potentielle de référence (ETO) repose quant à lui sur la formulation de Penman-Monteith, qui fait appel aux variables du bilan d'énergie de surface : ces variables sont modélisées par SAFRAN, que nous utiliserons donc pour inférer ETO. Dans le modèle, une évapotranspiration réelle (ETR) est ensuite calculée via un coefficient cultural (donnant une évapotranspiration potentielle saisonnalisée par type de couvert végétal) et la connaissance du stock d'eau disponible dans le sol ([Branger et al., 2016](#)).

SPAZM

SPAZM (SPAtialisation en Zones de Montagne, [Gottardi, 2009](#), **abbr. SPZ**) propose des chroniques de températures minimales, maximales et précipitations journalières reconstruites par EDF sur une grosse moitié du territoire français, incluant notamment les Alpes (Figure 7). La résolution du produit est de 1 km x 1 km sur 1948-2012. SPAZM repose sur l'utilisation de gradients altitudinaux de température et précipitation, observés entre les stations des réseaux d'observation d'EDF, d'une partie du réseau de Météo-France et de réseaux frontaliers (italien et espagnol).

- ✓ Pour la température, ces gradients sont calculés par saison, considérant l'hiver (d'octobre à février, où les gradients sont plutôt faibles en raison des fréquentes inversions de température en zone de montagne) et l'été (de mars à septembre, où les gradients sont plus forts). Le caractère pluvieux/non pluvieux des journées est aussi pris en compte.
- ✓ Pour les précipitations c'est le « type de temps », au sens météorologique du terme (retour d'est, onde atlantique, etc..) qui gouverne l'ébauche spatiale des gradients altitudinaux. Cette ébauche est ensuite ajustée aux données du réseau d'observation pour construire la pluie à l'échelle kilométrique.

SPAZM est post-traité ici avec un coefficient correctif intégrer pour la sous-captation des précipitations nivales, un biais bien identifié dans la modélisation hydrologique de montagne. Ce coefficient a fait l'objet d'études approfondis par EDF ([Picouet, 2012b](#)) : s'il présente une forte variabilité tant spatiale qu'interannuelle, ce coefficient est en moyenne plus élevé dans les Alpes du Nord que dans les Alpes du Sud. Nous nous basons sur les valeurs moyennes retenues par [Picouet \(2012b\)](#) pour majorer la précipitation nivale par 1.5 dans les Alpes du Nord et 1.3 ailleurs. Les Alpes du Nord sont définies comme les mailles SPAZM situées à une latitude supérieure à la latitude de Grenoble et à une altitude supérieure à 1000 m.

SAFRAN

SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements À la Nivologie) est un système d'analyse de Météo-France ([Durand et al., 2009](#)) combinant les données observationnelles du réseau de Météo-France avec une modélisation de l'atmosphère : cette combinaison permet de produire, au pas de temps horaire, une représentation cohérente des conditions météorologiques. Cette reconstruction couvre la période d'août 1958 à nos jours.

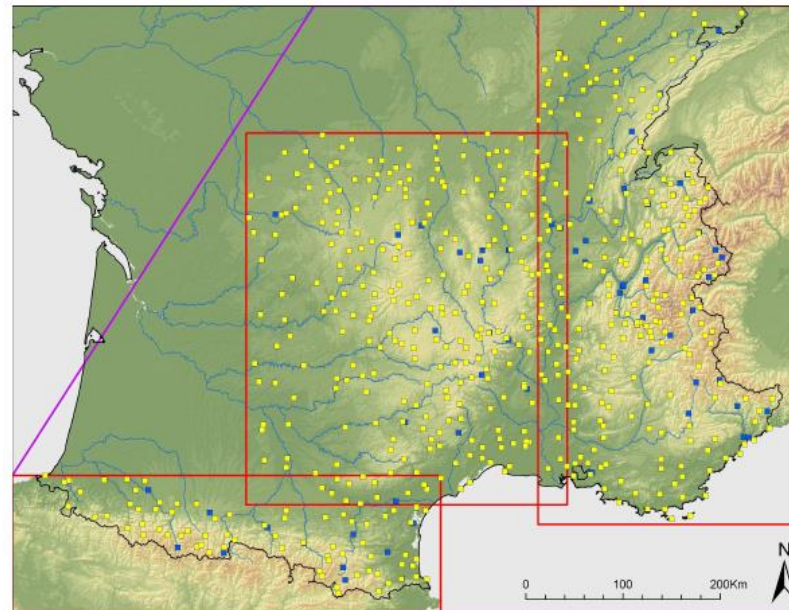


Figure 7 : Localisation des postes de mesure de température de l'air utilisés pour SPAZM (source : Gottardi, 2009).

Le produit SAFRAN est disponible auprès de Météo-France pour des usages de recherche sous différents formats. Nous avons utilisé le SAFRAN-France (produit sur une grille régulière de 8 km x 8 km, aussi exploité dans MDR, et que nous appellerons **SAFRAN (abbr. SAF)** dans la suite) mais également un produit plus adapté aux zones de montagnes, qui est disponible sur chaque massif montagneux par tranches d'altitudes de 300 m et que nous appellerons **SAFRAN-BA (abbr. SAF-BA)** pour SAFRan-Bandes-d'Altitudes. La carte des massifs des Alpes utilisée par Météo-France est présentée Figure 8.

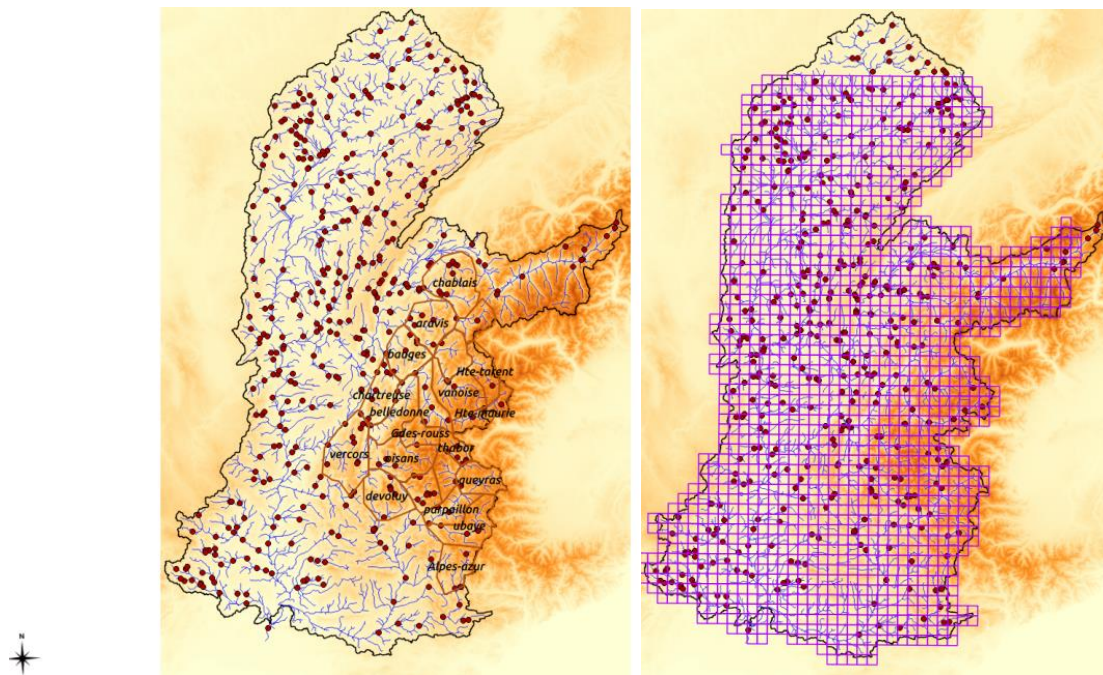


Figure 8 : Carte des massifs montagneux (à gauche) et mailles de la grille régulière 8 km x 8 km (à droite) de SAFRAN sur le bassin versant du Rhône.

2.4. Données hydrologiques de validation

Nous nous sommes appuyés sur l'expertise gagnée lors du projet MDR pour sélectionner des chroniques d'observations hydrologiques longues et peu influencées, propices à la validation de la modélisation des processus liés à la neige en hydrologie naturelle.

31 stations ont ainsi été retenues parmi les stations hydrologiques de MDR : elles sont à la fois situées en zone de montagne (i.e. au sein d'un des massifs de Météo-France) et présentent des critères d'influence d'origine anthropique ou karstique faibles. Nous y avons ajouté la station de l'Arvan à St Jean d'Arve (« Arvan Amont ») en raison de l'intérêt qu'elle suscite pour les recherches menées par IRSTEA dans les domaines de l'hydrométrie, des exports sédimentaires et glaciaires, et récemment de l'écologie des rivières alpines. Située dans le massif de la Maurienne, cette station présente une chronique d'observations plus réduite que les autres. Notre jeu de données comporte ainsi **32 stations**.

Stations Hydrologiques Action NEIGE

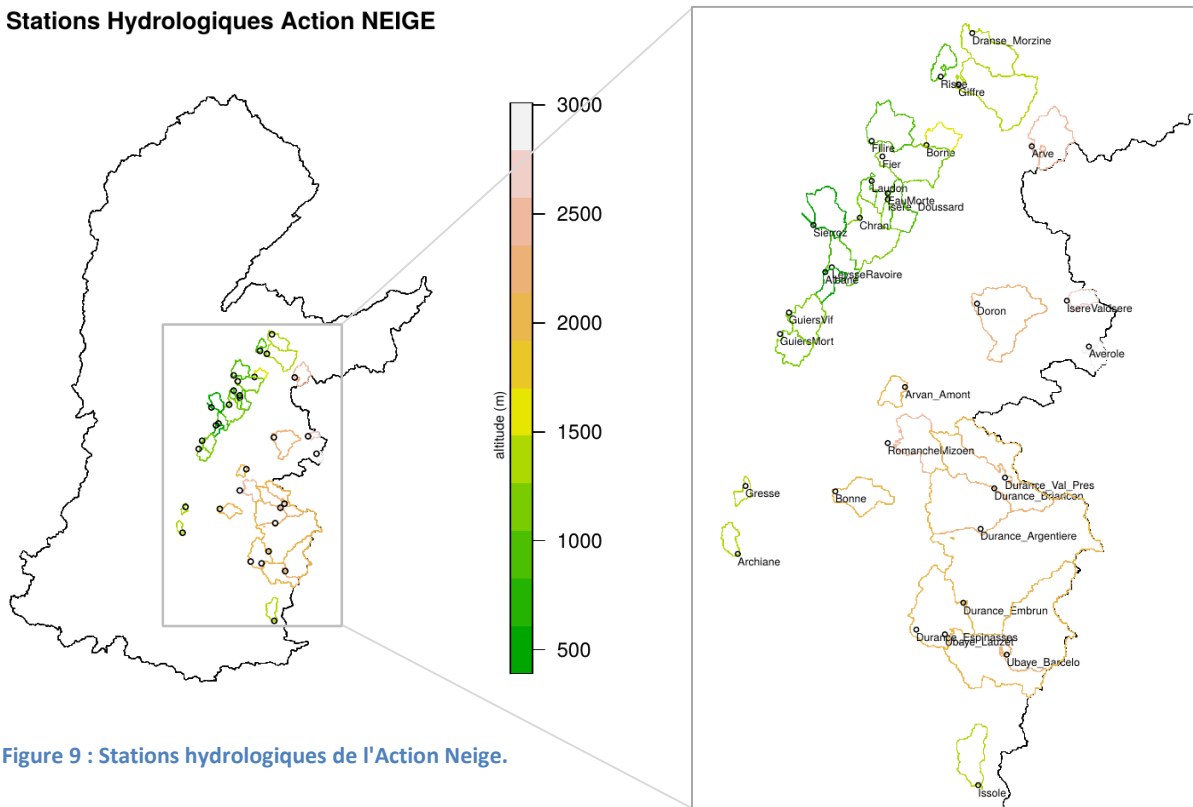


Figure 9 : Stations hydrologiques de l'Action Neige.

Tableau 2 : Caractéristiques des 32 stations hydrologiques de l'Action Neige. BH signifie Banque Hydro, YRS désigne le nombre d'années complètes des chroniques, entre "An1" et "An fin".

CODE	NOM	Altitude station (m) (BH)	Surface bassin (km ²) (BH)	YRS	An1	An fin	MA (mm/yr)	Nom court	Altitude bassin (m)
W1006010	L Avérole à Bessans [Averole]	1950	45.4	29	1969	2006	1417	Averole	2888.7
W0000010	L'Isère Val-d Isère	1831	46	58	1948	2008	1243	IsereValdIsere	2639.9
V0002010	L'Arve a Chamonix-Mont-Blanc [Pont des Favrands]	1020	205	53	1941	2011	1699	Arve	2457.1
W2714010	La Romanche Mizoen [Chambon amont]	1057	220	61	1948	2008	1060	RomancheMizoen	2417.6
X0010010	La Durance à Val-des-Près [Les Alberts]	1360	203	34	1976	2011	778	Durance_Val_Pres	2222
X0434010	L'Ubaye à Barcelonnette [Abattoir]	1132	549	98	1904	2009	613	Ubaye_Barcelonnette	2191.9
X0100010	La Durance à Briançon [aval]	1187	548	50	1955	2008	796	Durance_Briançon	2175.8
W0224010	Le Doron de Bozel à la Perrière [Vignotan]	617	330	55	1948	2002	1203	Doron	2163.1
X0130010	La Durance à l'Argentière-la-Bessée	950	984	69	1910	2012	866	Durance_Argentiere	2160.1
X0310010	La Durance à Embrun [La Clapière]	787	2170	49	1960	2012	753	Durance_Embrun	2090.2
W1055020	L'Arvan à Saint-Jean-d'Arves [La Villette]	1354	58	4	2003	2012	989	Arvan_Arves	2079.5
X0454010	L'Ubaye au Lauzet-Ubaye [Roche Rousse]	790	946	50	1960	2012	1113	Ubaye_Lauzet	2076.3
X0500010	La Durance à Espinasses	652	3580	61	1948	2008	687	Durance_Espinasses	2014.5
W2314010	La Bonne à Entraigues [Pont Battant]	770	143	60	1906	2010	948	Bonne	1933.5
V0205420	Le Borne à Saint-Jean-de-Sixt	882	69.6	40	1965	2012	1360	Borne	1508.1
V0144010	Le Giffre à Taninges [Pressy]	615	325	60	1948	2008	1825	Giffre	1498.1
V4226010	L'Archiane à Treschenu-Creyers [Menée]	633	43	27	1970	2001	1284	Archiane	1490.3
X2114010	L'Issole à Saint-André-les-Alpes [Mourefrey]	931	137	76	1908	2011	619	Issole	1480.8
V0325010	La Dranse de Morzine à Seytroux [Pont de Couvaloup]	690	170	40	1965	2012	1365	Dranse_Morzine	1413.7
W2804020	La Gresse à Gresse-en-Vercors [Pont Jacquet]	1080	24.2	21	1987	2012	554	Gresse	1397.9
V1504010	Le Guiers Mort à Saint-Laurent-du-Pont	413	89	41	1971	2012	1622	GuiersMort	1241.9
V1214010	Le Fier à Dingy-Saint-Clair	514	222	79	1906	2012	1329	Fier	1219.4
V1235210	L'Isère à Doussard	462	27.1	32	1974	2012	1181	Isere_Doussard	1209
V1515010	Le Guiers Vif à Saint-Christophe-sur-Guiers [Pont Saint-Martin]	405	114	33	1971	2012	1290	GuiersVif	1171.4
V1255010	Le Chéran Allèves [La Charniaz]	575	249	58	1951	2012	973	Cheran	1163.5
V1235610	L'Eau Morte à Doussard	452	92.5	37	1976	2012	944	EauMorte	1068.7
V0155010	Le Risse à Saint-Jeoir	536	57.5	18	1974	2012	1051	Risse	1061.7
V1225010	La Filière à Argonay	482	140	28	1983	2011	1093	Filire	1005.7
V1315050	La Leyse à la Ravoire	300	78	16	1996	2012	928	LeyseRavoire	987.9
V1237410	Le Laudon à Saint-Jorioz	455	29.2	35	1978	2012	780	Laudon	954.7
V1325020	Le Sierroz à Aix-les-Bains	245	130	27	1978	2012	590	Sierroz	607.6
V1318210	L'Albane à Chambéry	219	46.5	19	1987	2012	549	Albane	535.2

2.5. Méthodologie de l'Action Neige

Démarche globale

La modélisation hydrologique en zone de montagne est complexe. En effet, à la diversité des processus de surface, s'ajoute la difficulté de l'observation *in situ*, qui pèse à la fois sur la connaissance des processus et sur la qualité des forçages météorologiques.

Dans l'Action Neige, nous réalisons d'abord une comparaison des forçages météorologiques disponibles sur l'arc alpin français afin d'en appréhender les différences majeures. Puis, nous nous appuyons sur des études de sensibilité aux paramètres du module neige, pour fixer ou éliminer certains paramètres redondants ou peu influents. Enfin, nous évaluons incrémentalement l'impact, sur la modélisation hydrologique, des différentes pistes d'amélioration potentielles citées en introduction, à savoir :

- 1. l'optimisation locale du facteur de fonte t_{factor} – sur 32 bassins versants,
- 2. l'utilisation des différents forçages météorologiques – sur 8 bassins versants,
- 3. la prise en compte des températures nocturnes et diurnes pour estimer la température de fonte – sur 8 bassins versants,
- 4. le raffinement de la résolution spatiale de la modélisation – sur 3 bassins versants,
- 5. la complexification de la formulation de la fonte (saisonnalité du facteur de fonte, impacts de l'aspect, de l'altitude et de la pente) – sur 3 bassins versants.

Le nombre de bassins utilisés pour l'exploration de ces pistes n'est pas constant. En effet, les forçages SPAZM et SAFRAN-BA sont à très haute résolution spatiale, rendant leur exploitation sur l'ensemble des 32 bassins versants coûteuse. Aussi, seuls 8 bassins versants serviront à cette exploration. Les critères présidant à leur sélection seront précisés en 4.4. Par ailleurs, le raffinement du maillage, nécessaire aux tests de complexification de la formulation de la fonte en raison d'une mauvaise prise en compte de l'orientation (ou « aspect ») dans le maillage originel de J2000 (cf. Annexe E), est également coûteux puisqu'il suppose l'utilisation du logiciel HRU-delin sur une machine linux dédiée, et une part de post-traitement non-automatisé : de ce fait, l'exploration des pistes #4 et #5 sera conduite sur 3 bassins seulement, qui sont des sites historiques d'observation et de modélisation à Irstea-Lyon : l'Arve à Chamonix, l'Arvan à St Jean d'Arve, et la Durance à Val des Près.

Cadre et éléments d'analyse

Nous appellerons « configuration » la réunion, dans une simulation, d'un forçage météorologique et d'une formulation de la fonte : par exemple, « bidaily SAF » fera référence à la prise en compte des températures nocturnes et diurnes pour la fonte (formulation « bidaily »), avec le forçage SAFRAN. Les noms des formulations seront présentés au moment de leur apparition au cours des tests réalisés.

Nous utiliserons principalement le KGE ([Gupta et al., 2009](#)) comme critère de performance de notre modélisation. Ce critère combine les écarts à leur valeur optimale, 1, des biais relatifs, corrélation et biais relatifs d'écart type des simulations par rapport aux observations. Il est ramené à une gamme « $-\infty$ » (modèle très mauvais) à « 1 » (modèle parfait).

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (8)$$

avec

- r : coefficient de corrélation entre simulation et observation
- α : rapport des écarts-types modélisé et observé
- β : rapport des moyennes modélisée et observée

Le module d'optimisation de J2000-Rhône utilisant en pratique le **KGE normalisé ($KGE_{normalized}$)**, certains graphiques s'appuieront aussi sur cet indicateur de performance :

$$KGE_{normalized} = 1 - KGE = \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (9)$$

La performance de notre modélisation sera généralement évaluée sur la période **1987-2012** (26 ans) en distinguant la **période de fonte**, définie ci-après en utilisant JFMAMJJASOND comme terminologie des mois de l'année :

Tableau 3: période de fonte.

	Altitude moyenne du bassin < 1400 m	Altitude moyenne du bassin > 1400 m
Période de fonte	DJFMA	AMJJ

Les comparaisons de différentes formulations prendront la forme de boîtes à moustache synthétisant la performance médiane et la variabilité de la performance au sein des bassins versants étudiés, ou de graphes en étoile synthétisant par bassin plusieurs indicateurs de performance (Figure 10). Sur ces-derniers, un modèle parfait a ses points sur le bord du diagramme.

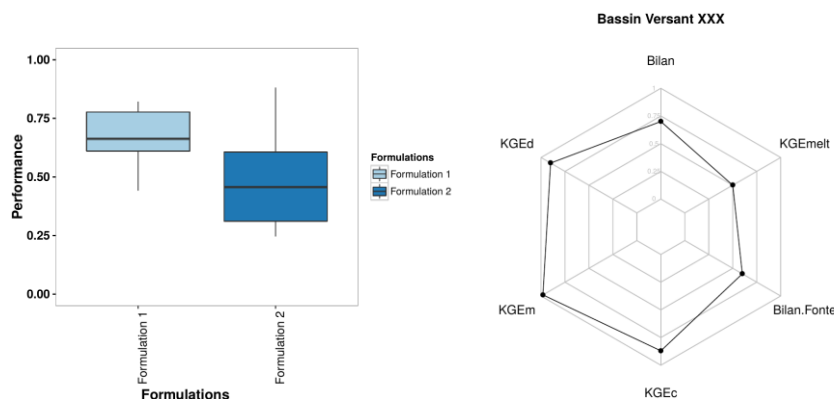


Figure 10: exemple de boîte à moustache (à gauche) et de graphe en étoile (à droite).

- Le **Bilan**, ou biais relatif normalisé, qui indique par son écart à 1 l'état déficitaire ou excédentaire des débits simulés :

$$Bilan = 1 - \frac{abs(moy(Sim) - moy(Obs))}{moy(Obs)} \quad (10)$$

où *moy* désigne la moyenne, *Sim* et *Obs* les débits simulé et observé,

- Le **Bilan fonte** (*Bilan* calculé sur la période de fonte),
- Le **KGE_{melt}** (KGE calculé sur la période de fonte),
- Le **KGE_c** pour KGE_{cycle} (KGE calculé sur la moyenne mensuelle interannuelle des débits). Il indique la capacité de la modélisation à reproduire la saisonnalité des écoulements,
- Le **KGE_m** pour KGE_{month} (KGE calculé sur les moyennes mensuelles des débits),
- Le **KGE_d** pour KGE_{day} (KGE journalier, indicateur standard des performances de la modélisation hydrologique).

3. Comparaison des forçages météorologiques

3.1 Analyse des différences entre SAFRAN et SPAZM sur le bassin du Rhône

La Figure 11 présente les différences en températures moyennes journalières et précipitations entre **SAFRAN** et **SPAZM**. Pour cette comparaison spatiale, le produit SPAZM a été moyenné sur la grille de SAFRAN (64 km²).

Les deux forçages comparés présentent de fortes différences tant en température qu'en précipitation. Par ailleurs ces différences sont exacerbées sur l'arc alpin.

En proportion, les écarts sont plus substantiels en précipitation, avec des différences allant jusqu'à 1000 mm/an soit 1/3 de la précipitation annuelle dans certaines régions de montagne. **SAFRAN est en général plus sec que SPAZM sur les Alpes**, à l'exception du Valais (Suisse) où la qualité de SAFRAN est discutable puisque Météo-France n'y dispose d'aucune observation. **Ces différences de précipitations concernent davantage la saison hivernale** : la modélisation nivale risque d'en être fortement affectée puisque le stock de neige et la fonte printanière sont directement fonction du cumul de précipitations hivernales.

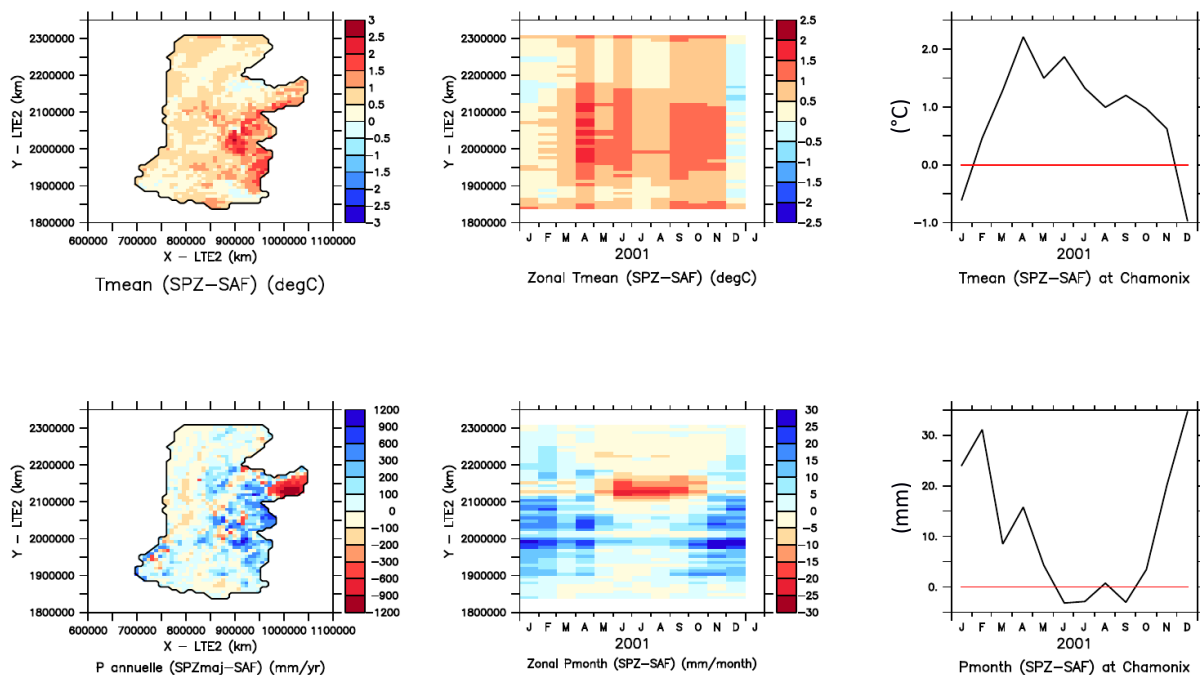


Figure 11: Différences entre SAFRAN et SPAZM sur le bassin du Rhône sur la période 1985-2012. On représente SPAZM moins SAFRAN (SPZ-SAF) en termes de températures moyennes (Tmean) et précipitations annuelle ou mensuelle (P annuelle, Pmonth).

En termes de températures, SPAZM est plus chaud que SAFRAN sur l'arc Alpin sauf en hiver où les températures moyennes journalières de SPAZM peuvent être plus basses. Pour la modélisation de la neige, il pourra en résulter :

- ✓ une température seuil de limite pluie-neige plus basse dans SPAZM que dans SAFRAN, en raison de températures moins élevées en hiver, période d'accumulation de neige.
- ✓ une sensibilité de la fonte à la température (i.e. un facteur de fonte) différente entre SAFRAN et SPAZM.

3.2 Analyse des différences entre SAFRAN, SAFRAN-BA et SPAZM sur quelques bassins amonts

Les forçages SAFRAN-BA et SPAZM étant à très haute résolution spatiale, leur exploitation suppose des espaces de stockage et coûts numériques importants. Pour ces raisons, leur exploitation et comparaison n'ont été réalisées que sur 8 bassins amonts, qui seront présentés plus en détails en partie 4 de ce document.

Nous illustrons ici sur le bassin versant de l'Arve à Chamonix les différences entre ces forçages au sortir du module d'interpolation spatiale de J2000 (Figure 12). Les statistiques des différences sur les 8 bassins versants sont résumées dans le Tableau 4.

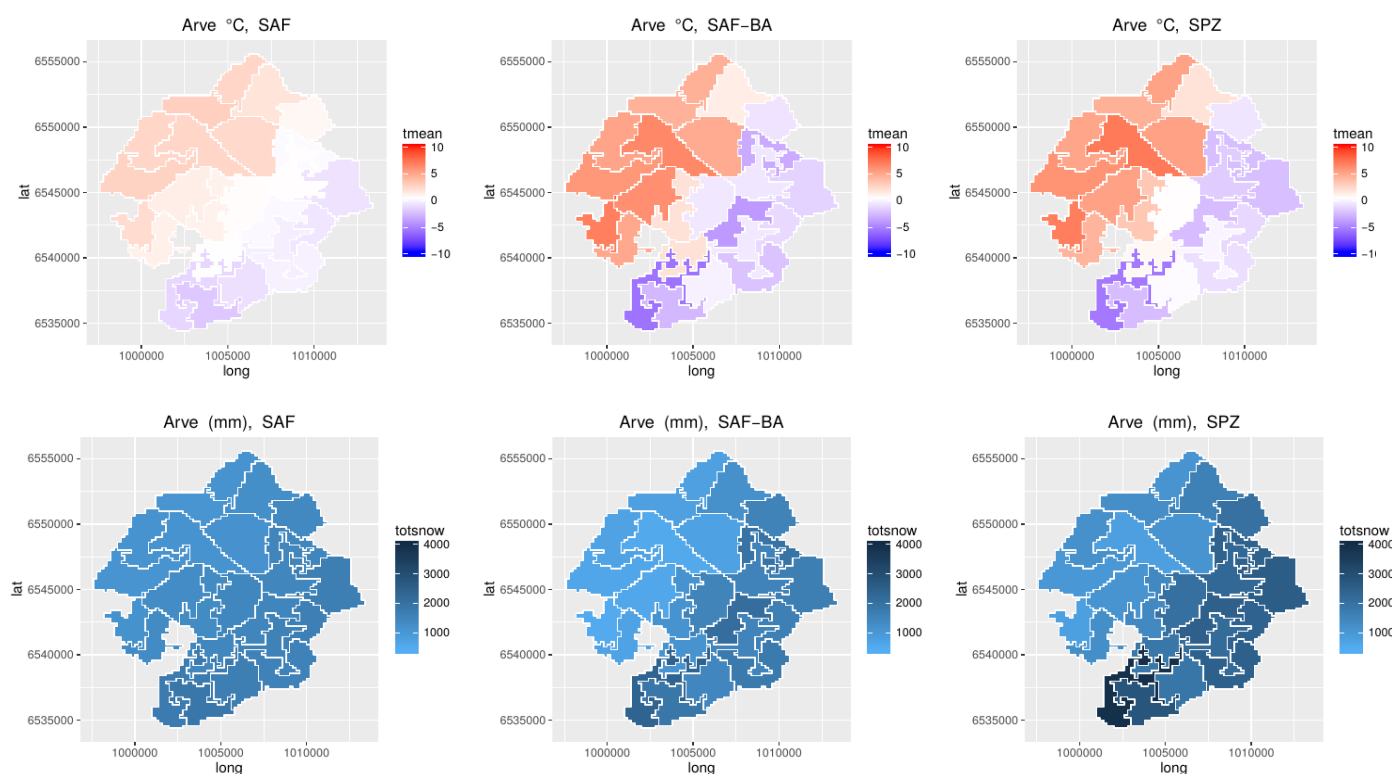


Figure 12: Températures moyennes annuelles (en haut) et cumuls de précipitations neigeuses (en bas) sur les mailles du modèle J2000 déployé sur l'Arve, et pour les forçages SAFRAN (SAF), SAFRAN-BA (SAF-BA) et SPAZM (SPZ).

Le diagnostic posé par l'analyse globale des différences entre SAFRAN et SPAZM est confirmé à cette échelle locale : les températures SAFRAN sont, en moyenne annuelle, plus faibles que celles de SPAZM (0.5°C contre 1.4°C sur l'Arve à Chamonix), et les précipitations neigeuses sont aussi plus faibles (2190 mm/an contre 2400 mm/an). SAFRAN-BA se révèle proche de SPAZM en termes de températures : le gradient altitudinal de températures y est clairement plus distinct que dans SAFRAN, en cohérence avec la prise en compte de bandes d'altitudes homogènes au sein des massifs. Des températures plus chaudes que SAFRAN sont aussi constatées, intermédiaires entre SAFRAN et SPAZM. En termes de précipitations, SAFRAN-BA capte également un gradient altitudinal marqué, comme SPAZM, mais ses cumuls annuels s'avèrent généralement plus faibles que SAFRAN et SPAZM.

Tableau 4 : Comparaison des températures moyennes annuelles (°C) et précipitations annuelles (mm/an) entre les 3 forçages sur 8 bassins versants. Les minima et maxima par variable sont signalés par des couleurs.

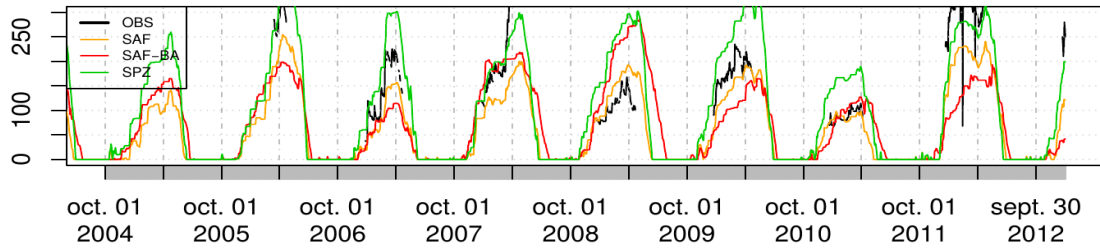
	Tannuelle SAF	Tannuelle SAFBA	Tannuelle SPZ	Pannuelle SAF	Pannuelle SAFBA	Pannuelle SPZ
<i>Albane</i>	9.5	11.3	10.8	1577.4	1387.3	1503.2
<i>Borne</i>	5.3	6.4	6.4	2116.7	1975.8	2247
<i>Averole</i>	-1.2	-0.6	-1.1	1141.2	1119.9	1765.7
<i>Arvan_Amont</i>	3.3	3.6	4.6	1388.5	1590.7	1606.3
<i>Doron</i>	2.1	3.1	3.6	1354.8	1301.7	1555.5
<i>Issole</i>	6.3	7.1	7.5	1157.7	1116.3	1236.9
<i>Durance_Val_Pres</i>	2.5	3.1	3.5	1374.9	1165.1	1308.2
<i>Arve</i>	0.5	1	1.3	2192.8	2117.2	2398.7

3.3 Comparaison aux observations nivales

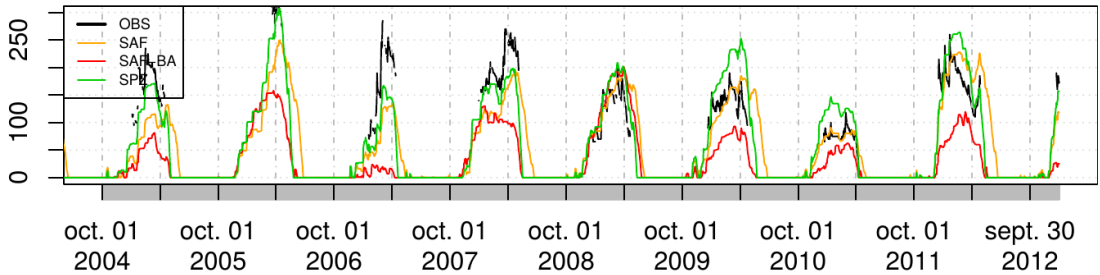
Au vu des différences de précipitation neigeuse entre SPAZM, SAFRAN et SAFRAN-BA, il nous est apparu intéressant de confronter les accumulations de neige modélisées avec ces trois forçages, aux observations nivales. Nous ciblons les hauteurs de neige observées et simulées en fin d'accumulation, avant l'ablation printanière, puisque la densité de neige que nous modélisons correspond à ces conditions. Cette comparaison présuppose également une bonne capacité du modèle à représenter la partition pluie-neige : nous détaillerons en début de chapitre suivant les choix de limite pluie-neige que nous avons adoptés.

Les Figure 13 et Figure 14 montrent les résultats de cette comparaison sur l'Arve à Chamonix et l'Arvan à St Jean d'Arve. Parmi les postes d'observation nivologique disponibles, seuls ceux situés à des altitudes comparables à celles de nos mailles de modélisation ont été exploités.

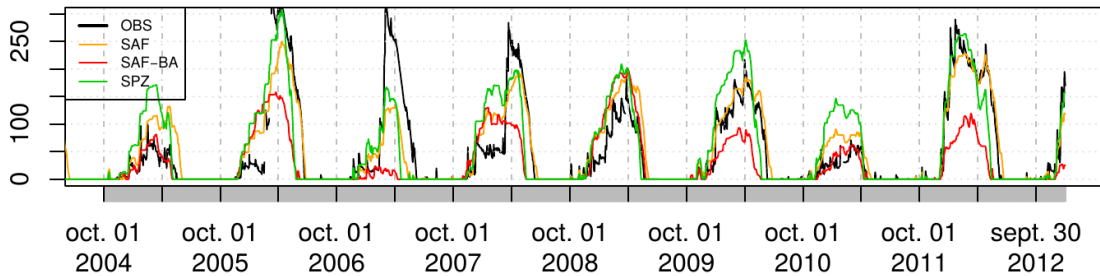
Arve, Snow Depth (cm) ***



comparison of HRU (alt=2324m) to Nivo LE TOUR BALME (alt=2190m)



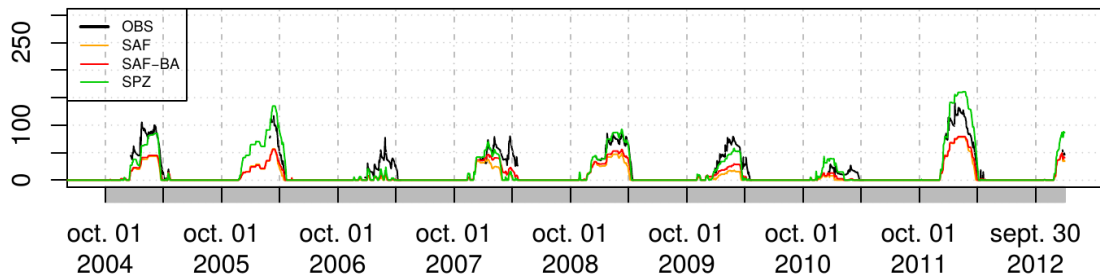
comparison of HRU (alt=2181m) to Nivo LA FLEGERE (alt=1850m)



comparison of HRU (alt=2181m) to Nivo AIGUILLES ROUGES-NIVOS (alt=2365m)

Figure 13 : Comparaison des hauteurs de neige modélisées par J2000 sur l'Arve à Chamonix avec les forçages SAF, SAF-BA et SPZ, aux observations des nivo-postes du bassin (OBS).

Arvan_Amont, Snow Depth (cm) ***



comparison of HRU (alt=1618m) to Nivo Le Corbier (alt=1585m)

Figure 14 : Comme Figure 13 mais sur le bassin de l'Arvan Amont.

Il est difficile de tirer des conclusions définitives de telles comparaisons, tant la variabilité spatiale du manteau neigeux observé à l'échelle ponctuelle par les nivo-postes est grande. Par ailleurs, ces observations nivologiques sont intégrées dans l'analyse SAFRAN, ainsi que d'autres, complémentaires : l'écart entre SAFRAN et ces observations peut donc provenir de divergences avec les observations complémentaires accessibles à Météo-France, qui procurent une vision plus complète du manteau neigeux. Des discussions avec les chercheurs de Météo-France ont permis de prendre conscience de l'importance des phénomènes de transport de neige par le vent sur certains postes comme la nivôse des Aiguilles Rouges (Figure 13, effet particulièrement visible sur l'hiver 2010-2011) : ce type de processus disqualifie l'usage de la donnée observée pour notre étude. Par ailleurs, au sein d'un même massif, les nivo-postes disponibles peuvent conduire à des observations contredisant l'idée d'un gradient altitudinal de précipitations certaines années (par exemple, moins d'accumulation aux Aiguilles Rouges – 2365m – qu'à La Flégère – 1850 m). Enfin, la hauteur de neige modélisée par J2000-Rhone est issue d'une conversion du SWE via une densité fixe, évidemment erronée à proximité d'une chute de neige fraîche.

Cette comparaison observations/modèle confirme les analyses précédentes quant aux cumuls de précipitation neigeuses, inférieurs dans SAF-BA par rapport à SPAZM et SAFRAN. Les performances de ces forçages sont difficiles à hiérarchiser. **Enfin, il apparaît inenvisageable de caler des paramètres de la modélisation (seuil pluie-neige voire facteur de fonte) sur ces observations de neige sans expertise extérieure ou modélisation plus fine des processus du manteau neigeux (conduisant à la densité par exemple).**

3.4 Implications hydrologiques

Les différences entre forçages atmosphériques mises au jour dans cette partie, auront naturellement un impact sur les variables du bilan hydrologique (fonte, stock nival et glaciaire, et ruissellement) qui déterminent le débit des cours d'eau. Sur l'Arve à Chamonix par exemple (Figure 15), les différences de précipitations et température entre forçages conduisent à un bilan déficitaire avec SAF-BA (débit moyen annuel simulé Q_{sim} inférieur au débit moyen annuel observé Q_{obs}), et légèrement excédentaire avec SPAZM en dépit d'une accumulation glaciaire (D_{stock}) plus forte. Dans ces simulations, les paramètres optimaux ont été retenus pour chaque forçage, comme nous l'expliquerons en 4.4.

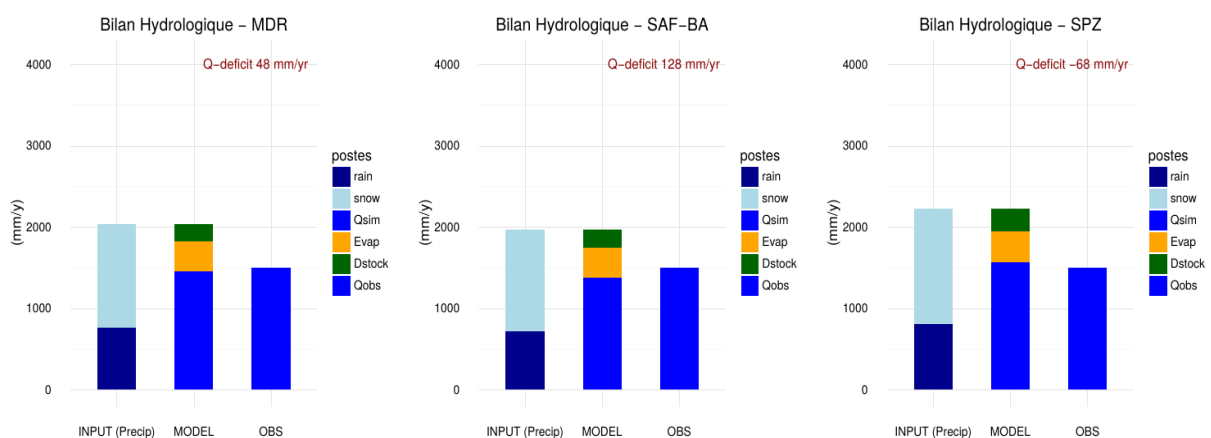


Figure 15 : Impact des différents forçages météorologiques sur le bilan hydrologique de l'Arve à Chamonix.

4. Exploration des pistes d'amélioration du module de neige de J2000-Rhône

4.1. Performances de la modélisation hydrologique nivale dans MDR

Dans le projet MDR ([Branger et al., 2016](#)), le forçage SAFRAN avait principalement été utilisé. Une étude de sensibilité manuelle aux paramètres (T_{trs} , T_{trans}) avec SAFRAN avait mené au choix optimal de (2°C, 3°C), les autres paramètres du modèle de neige n'ayant pas été adaptés. Les performances de la modélisation en hydrologie nivale naturelle restaient modérées, avec un KGE médian de 0.49 sur les 32 bassins « naturels » et des biais prononcés sur les Alpes du Sud et les Alpes intérieures (Tarentaise, Vanoise, Maurienne et Beaufortain), en période de fonte comme en moyenne annuelle (Figure 16).

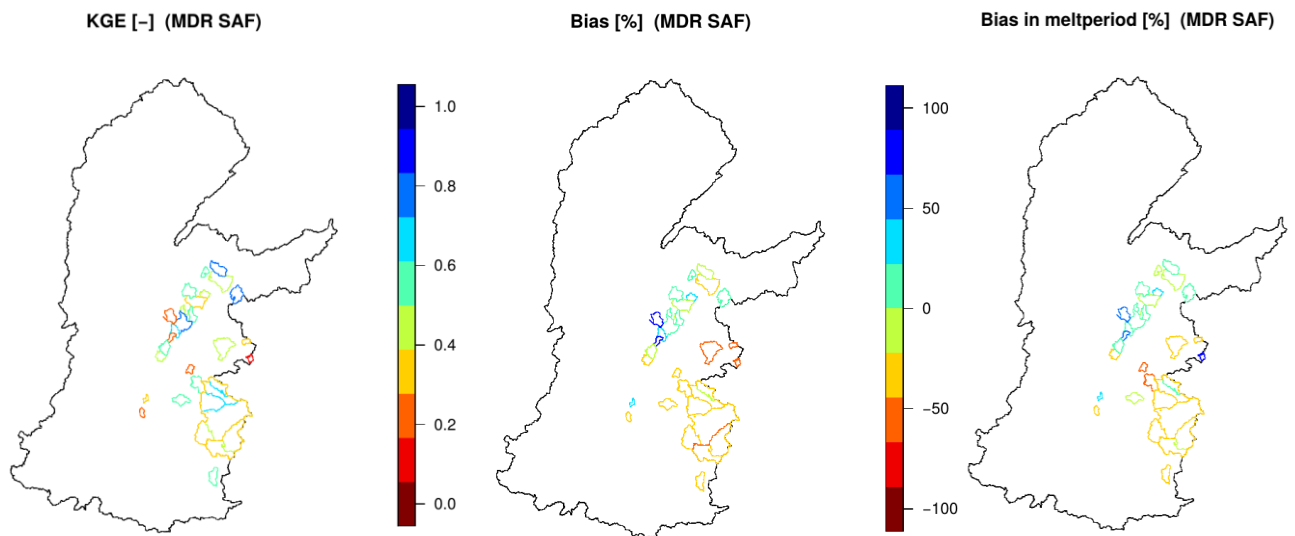


Figure 16 : KGE et biais relatifs de modélisation sur 32 bassins versants dans la configuration MDR.

Pour remédier à ce biais, les précipitations de SPAZM agrégées sur les mailles SAFRAN avaient été utilisées dans MDR sur le bassin de la Durance à St Paul-lès-Durance (forçage « hybrid »), conduisant à une nette réduction des biais sur ces régions, et conséquemment une amélioration des performances (Figure 17).

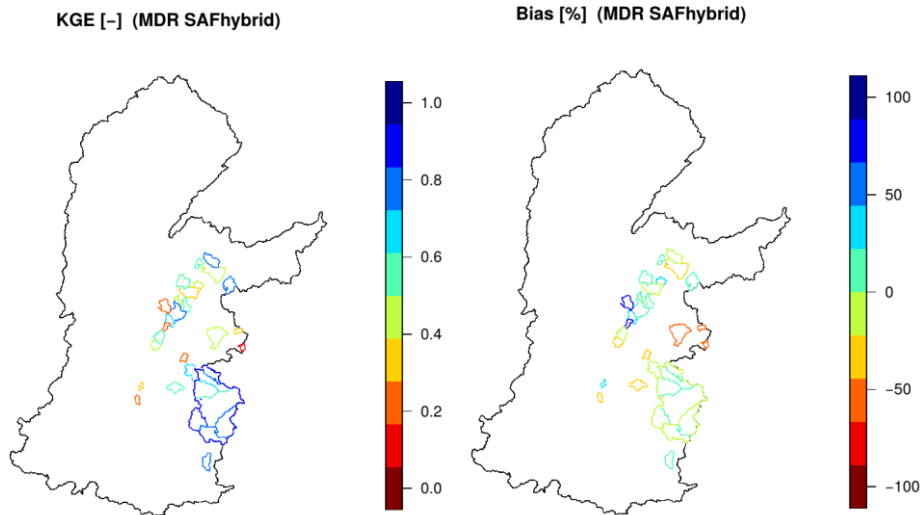


Figure 17: KGE et biais relatif sur 32 bassins versants dans la configuration MDR et le forçage SAFRAN hybrid.

Dans la suite de cette partie 4, nous utiliserons comme référence MDR les résultats obtenus avec le forçage SAFRAN et le paramétrage de MDR. L'opportunité d'une « hybridation » sur l'ensemble du bassin versant du Rhône sera examinée en partie 5.

4.2. Evaluation préliminaire de la sensibilité aux paramètres du modèle de neige

La sensibilité du modèle de fonte au coefficient degré-jour ou facteur de fonte (t_{factor}) a été évoquée en introduction. Nous nous appuyons sur la littérature et sur des études de sensibilité pour ajuster les autres paramètres du modèle de neige, régissant l'accumulation (T_{trs} , T_{trans}) ou la fonte (g_{factor} , r_{factor} , T_b , $coldContent_{factor}$).

Les paramètres d'accumulation T_{trs} et T_{trans} délimitant des seuils de phase selon la température, ils dépendent du forçage météorologique choisi. Pour SAFRAN, l'optimisation manuelle réalisée dans MDR a conduit à sélectionner $T_{trs}=2^{\circ}\text{C}$ et $T_{trans}=3^{\circ}\text{C}$. Nous conservons ce choix. Pour SPAZM, une étude détaillée de l'accumulation au droit des postes d'observation de la neige d'EDF (Picouet, 2012b) conclut au choix optimal de $T_{trs}=1^{\circ}\text{C}$ et $T_{trans}=1^{\circ}\text{C}$: nous adopterons ces paramètres. Pour SAFRAN-BA, une étude de sensibilité menée sur 8 bassins de montagne, et présentée en Annexe B, conduit au choix $T_{trs}=3^{\circ}\text{C}$ et $T_{trans}=1^{\circ}\text{C}$, avec une sensibilité modérée à T_{trs} et faible à T_{trans} .

Concernant le modèle de fonte, des études récentes indiquent les faibles rôles du r_{factor} (Picouet, 2012b et Jabot, 2012) et du $coldContent_{factor}$ (Picouet, 2012b) pour la modélisation de la fonte. Nous conservons dès lors la valeur originelle du $coldContent_{factor}$ dans J2000-Rhône, et fixons r_{factor} à sa valeur physique, qui correspond à l'énergie (convertie en lame d'eau de fonte) cédée par 1 mm de pluie perdant 1°C lors de son passage de la température atmosphérique à celle d'une neige à 0°C , soit :

$$r_{factor} = \frac{C_{p-eau\ liq}}{L_{fusion}} \sim 0.0125 [^{\circ}\text{C}^{-1}] \quad (10)$$

avec $C_{p-eau\ liq}$: capacité calorifique de l'eau liquide

L_{fusion} : chaleur latente de fusion de l'eau

Lors d'événements de pluie sur neige, les composantes du bilan d'énergie sont modifiées par rapport au mécanisme dominant de la fonte dans les climats tempérés : en particulier le rayonnement solaire n'est plus la source dominante d'énergie disponible pour la fonte, et on touche ainsi aux limites de la formulation degré-jour, qui présuppose une certaine homogénéité des conditions météorologiques en lien avec un ou des processus de fonte dominants. Au-delà de la valeur physique que nous lui avons attribué, le r_{factor} peut participer à représenter ce changement de processus ; mais nous ne nous focaliserons pas ici sur les événements pluvieux.

Enfin, par étude de sensibilité, nous constatons :

- Le faible impact du g_{factor} (Figure 18).
- La faible sensibilité des performances de modélisation au paramètre T_b (Annexe C).

Nous fixons par conséquent ces paramètres à 0, supprimant ainsi l'effet des paramétrisations correspondantes.

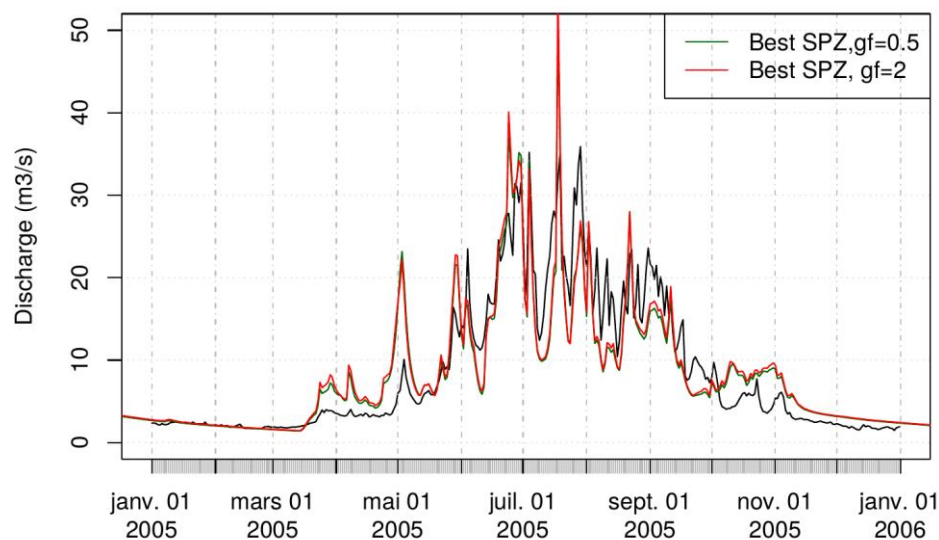


Figure 18 : Impact du g_{factor} (gf) sur la simulation du débit de l'Arve à Chamonix sur l'année 2005, avec le forçage SPAZM.

Ainsi le taux de fonte potentiel devient :

$$PotMelt = t_{factor} \cdot T + 0.0125 \cdot T_{day} \cdot P_{day} \quad (11)$$

où seul t_{factor} est éventuellement optimisé.

Le Tableau 5 résume, en fonction du forçage météorologique, les paramètres retenus par cette analyse préliminaire. Les paramètres choisis dans MDR sont également rappelés. Dans la suite de ce rapport, sauf mention contraire, ce sont ces paramètres qui seront utilisés selon le forçage considéré.

Tableau 5 : Paramètres retenus pour l'Action Neige en fonction du forçage météorologique.

	MDR	SAFRAN	SAFRAN-BA	SPAZM
T_{trs}	2	2	3	1
T_{trans}	3	3	1	1
r_{factor}	0.11	0.0125	0.0125	0.0125
g_{factor}	1,739	0	0	0

T_b	0.1	0	0	0
$coldContent_{factor}$	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012

4.3. Piste #1 : optimisation locale du facteur de fonte

L'optimisation locale (c.-à-d. sur chaque bassin) du facteur de fonte constitue la première piste d'amélioration des performances de la modélisation.

Nous illustrons en Figure 19 et Figure 20 les performances de J2000-Rhône dans deux configurations :

	MDR	Tmean SAF
Forçage	SAFRAN	SAFRAN
Paramètres fixés	Cf. Tableau 5	Cf. Tableau 5
Optimisation des paramètres du modèle de neige	t_{factor} optimisé globalement sur le BV Rhône : $t_{factor}=1.84$ mm/d/°C	t_{factor} optimisé localement sur chacun des 32 sous-bassins

« Tmean » signifie enfin que c'est la température moyenne journalière qui est utilisée pour le calcul de la fonte (Eq. 1).

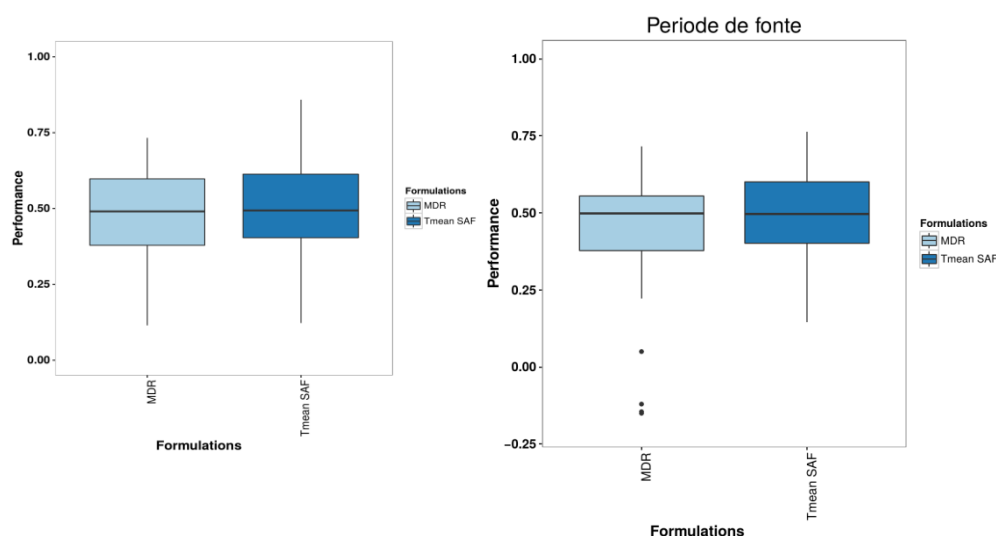


Figure 19 : Comparaison des critères de performance (KGE journalier) pour les configurations MDR et Tmean SAF sur 32 bassins versants.

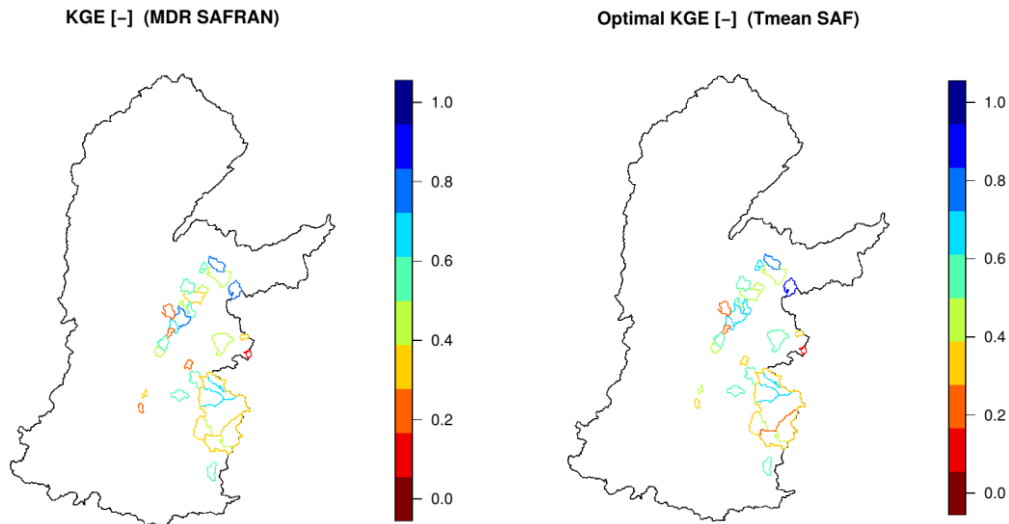


Figure 20 : Carte des KGE sur 32 bassins dans les configurations MDR SAF et Tmean SAF.

Cette comparaison révèle le très faible gain de performance acquis par l'optimisation locale du t_{factor} . Certains bassins, comme l'Arvan Amont ou l'Archiane, voient leur performance nettement améliorée ; d'autres en revanche, comme l'Ubaye au Lauzet, voient leur performance légèrement dégradée, probablement en lien les paramétrages différents des r_{factor} et g_{factor} opérés entre ces configurations. Nous expliquons le faible gain global de performances **par la faible sensibilité du KGE au facteur degré-jour** (Figure 21, Figure 22 et Annexe C) : à l'exception du Risse à St Geiores (Nord des Alpes du Nord), les bassins présentant une forte sensibilité au choix du facteur de fonte ont des facteurs de fonte optimaux faibles, autour de 2 mm/d/°C; les autres peuvent avoir des t_{factor} optimaux jusqu'à 8 mm/d/°C mais avec une très faible sensibilité des performances à cet optimum.

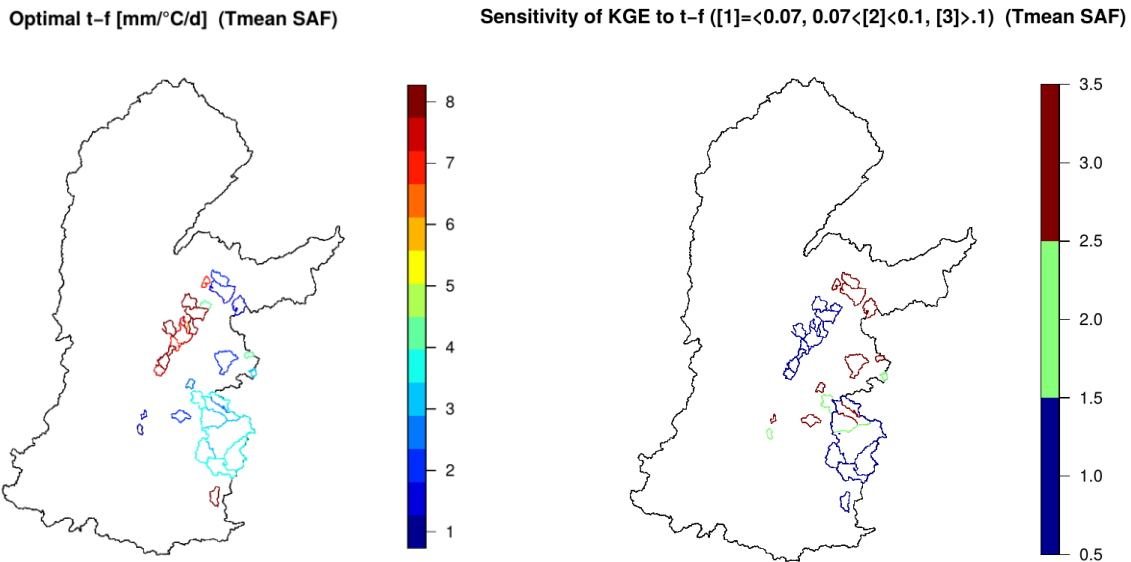


Figure 21 : Facteur de fonte (t_f) optimal dans la configuration Tmean SAF (à gauche) et sensibilité du KGE au facteur de fonte sur une échelle de 1 (très faible) à 3 (modérée), (à droite).

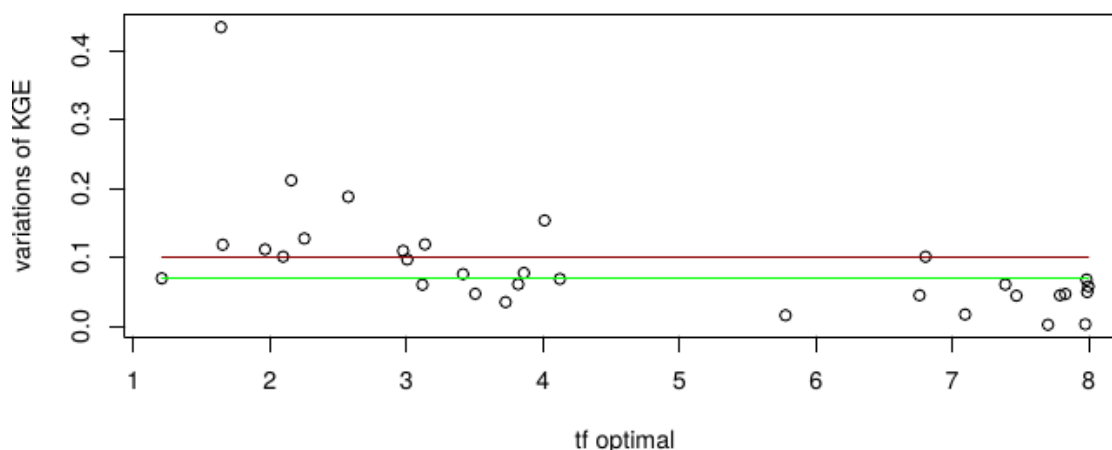


Figure 22 : Sensibilité maximale du KGE à des variations de t_{factor} entre 1 et 8, en fonction du t_{factor} -optimal. Chaque point est un bassin d'intérêt. Les valeurs seuils de sensibilité choisies en Figure 21 ont été ajoutées.

Enfin, les biais de la modélisation sont quasiment inchangés entre les deux configurations : ils apparaissent intrinsèquement liés au forçage météorologique ; et nos deux configurations utilisent ici SAFRAN.

4.4. Piste #2 : changement de forçage météorologique

Nous analysons ici l'impact du choix du forçage météorologique sur la qualité de la modélisation au travers des expériences suivantes :

	Tmean SAF	Tmean SAF-BA	Tmean SPZ
Forçage	SAFRAN 8 x 8	SAFRAN BA	SPA2M
Paramètres fixés	$T_{Trs}=2^{\circ}\text{C}$, $T_{trans}=3^{\circ}\text{C}$	$T_{Trs}=3^{\circ}\text{C}$, $T_{trans}=1^{\circ}\text{C}$	$T_{Trs}=1^{\circ}\text{C}$, $T_{trans}=1^{\circ}\text{C}$
Paramètres optimisés par sous-bassin	t_{factor}	t_{factor}	t_{factor}

Les forçages météorologiques SAFRAN-BA et SPA2M étant à plus haute résolution spatiale, il n'a pas été envisagé de les déployer sur l'ensemble du bassin versant du Rhône. Leur influence a donc été étudiée en **un petit nombre de bassins versants, 8**, sélectionnés car ils échantillonnent un bon gradient de conditions altitudinales, latitudinales, et de performances de modélisation dans les configurations MDR et Tmean SAF (Figure 23). Certains (l'Arve à Chamonix, l'Arvan à St Jean d'Arve, et la Durance à Val des Près) ont aussi fait l'objet d'études spécifiques à Irstea-Lyon ([Le Dirach, 2015](#)).

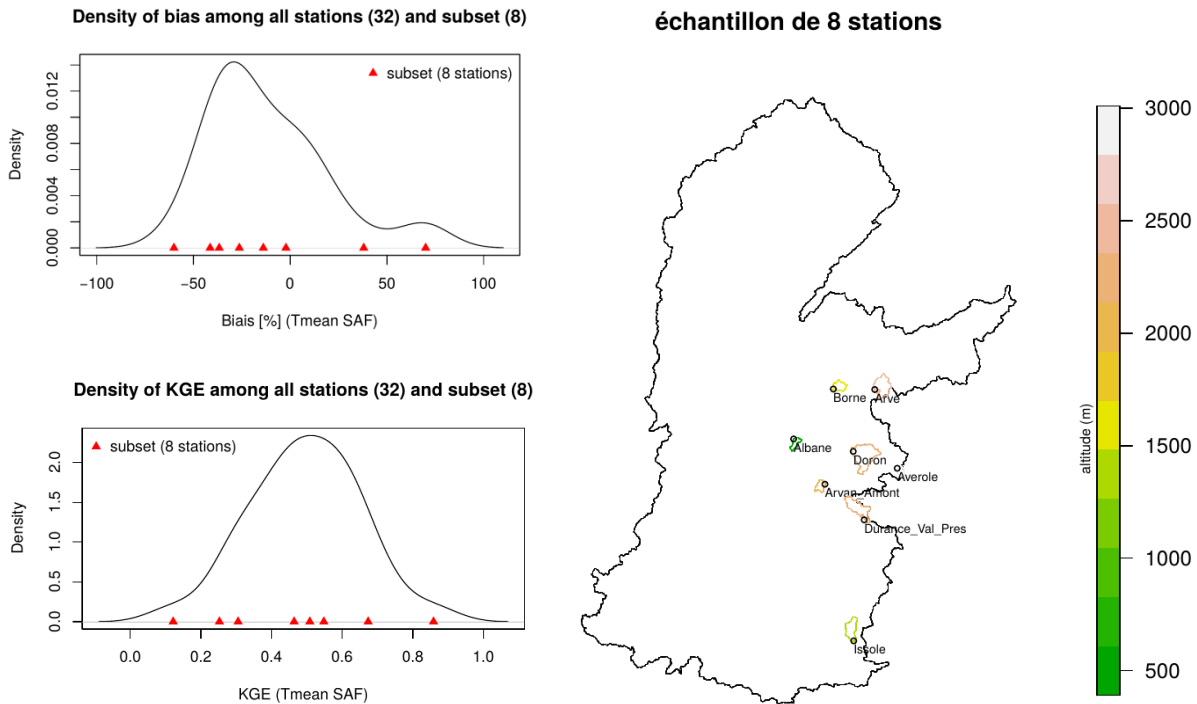


Figure 23 : Répartition géographique et en termes de KGE et de biais, des 8 sous-bassins sélectionnés.

Les Figure 24 et Figure 25 montrent qu'en général, **une amélioration substantielle des performances de modélisation est obtenue sous couvert de choisir un forçage idoine** : sur les 8 bassins versants sélectionnés, on passe d'un KGE journalier médian de 0.46 à 0.61. Dans 5/8 des cas, SPAZM permet la meilleure simulation des KGE journaliers et bilans pendant la période de fonte. En termes de KGE journaliers, il est parfois surpassé par SAFRAN (sur l'Arve) ou par SAFRAN-BA (sur l'Albane et le Borne).

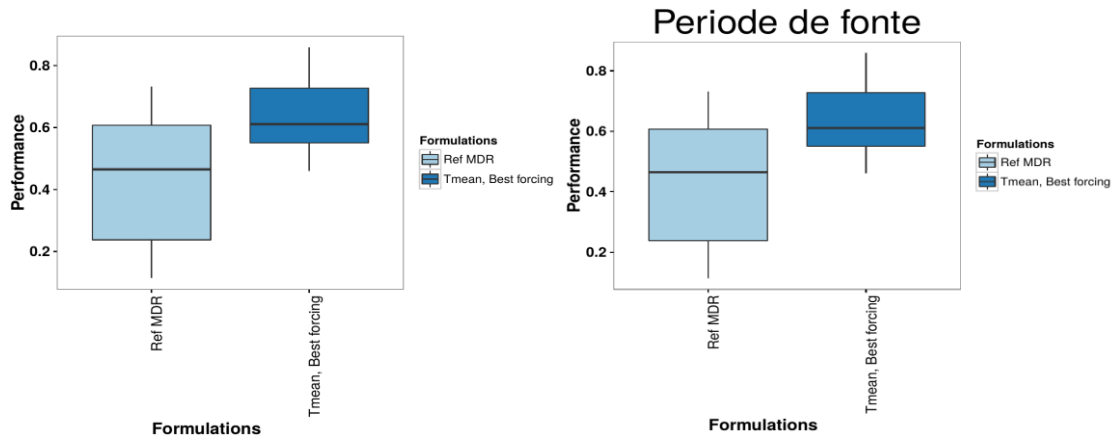


Figure 24 : Comparaison des performances (KGE journalier) de la configuration MDR et d'une formulation Tmean avec le meilleur forçage météorologique, sur 8 bassins versants.

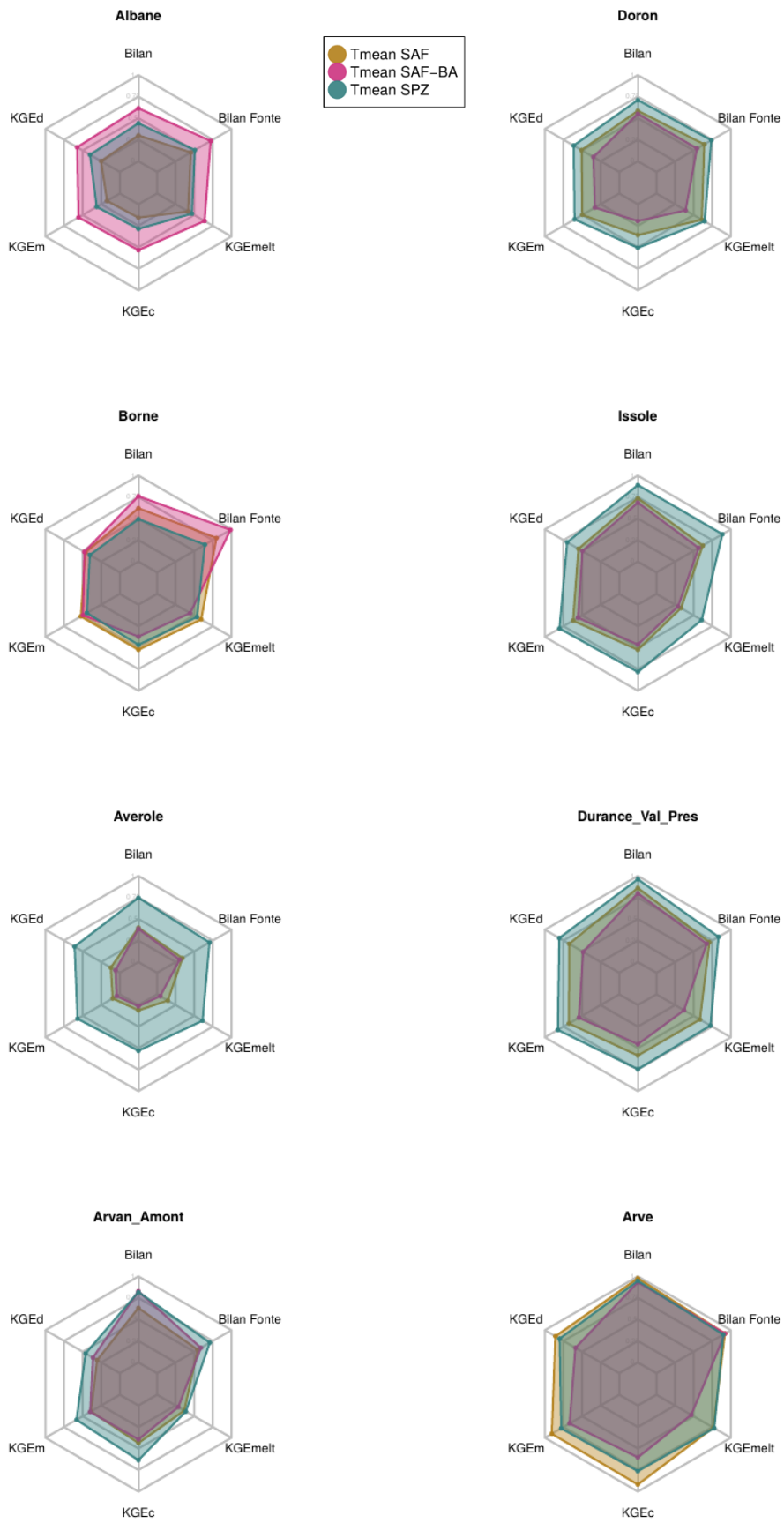


Figure 25 : Performance des formulations Tmean sur 8 sous-bassins, selon le forçage météorologique.

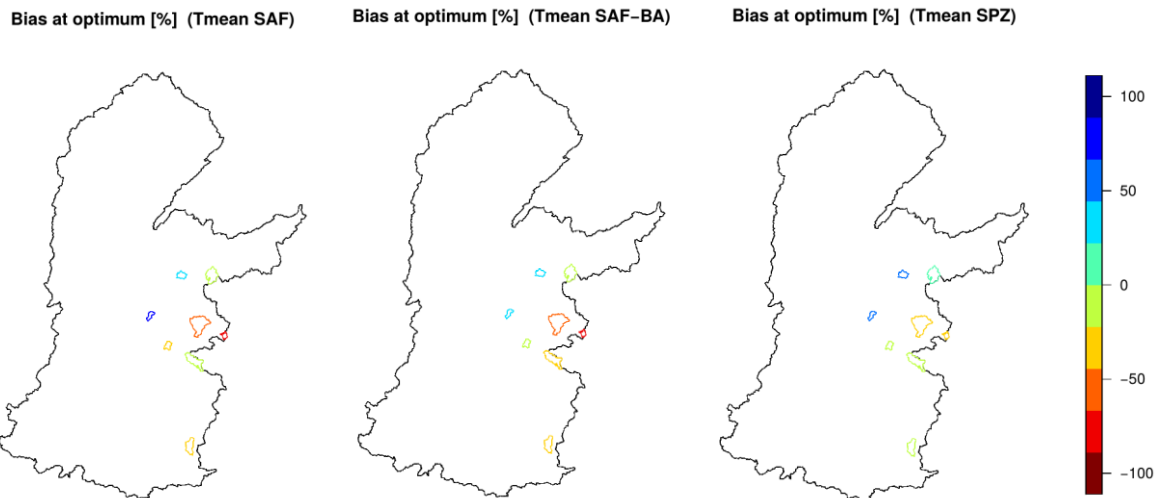


Figure 26 : Biais annuel dans les configurations Tmean SAF, Tmean SAF-BA et Tmean SPZ.

Il est à noter que le meilleur forçage en terme de KGE est en définitive celui qui limite le plus les biais annuels de modélisation (Figure 26) : sur les bassins excédentaires avec Tmean SAF et SPAZM (Albane et Borne), SAF-BA qui est plus sec réduit les biais et offre les meilleures performances. Sur les bassins déficitaires comme en particulier l’Avérole, le Doron, la Durance à Val des Prés et l’Issole, c’est SPAZM, plus pluvieux, qui permet les meilleures simulations. Ce constat intervient en amont de tout choix paramétrique sur la formulation de la fonte. Notons que sur le Borne et l’Albane, l’existence de transferts inter-bassins d’origine karstique n’est pas exclue (Obled, personal communication) : ils expliqueraient les biais excédentaires obtenus avec SPAZM.

De façon générale, **les performances avec le meilleur forçage restent plus limitées sur les petits bassins que sur les grands** (Albane, Borne, Averole et Arvan Amont ont une superficie inférieure à 75 km²), ce qui s’explique probablement par la difficulté des forçages météorologiques en général à reproduire précisément des conditions météorologiques très locales affectant la précipitation ou la température (orage, couche d’inversion..).

4.5. Piste #3 : formulation bi-journalière de la fonte

Sur les 8 bassins versants où les forçages météorologiques à plus haute résolution spatiale ont été déployés, nous allons à présent tester l’effet de la prise en compte des températures nocturnes et diurnes pour estimer la température de fonte. Cette formulation sera appelée « Tbidaily » pour bi-journalière. Le calcul de la fonte potentielle (Eq. 1) y est en effet effectué pour moitié avec une température nocturne, et pour moitié avec une température diurne, telles que :

$$T_{diurne} = \frac{T_{max} + T_{mean}}{2}$$

$$T_{nocturne} = \frac{T_{min} + T_{mean}}{2}$$

où T_{mean} , T_{max} , et T_{min} sont respectivement les températures moyenne, maximale et minimale journalière.

Nous testons cette piste d'amélioration avec le forçage SPAZM, en optimisant à nouveau le facteur de fonte (s'appliquant successivement à T_{diune} et $T_{nocturne}$) sur chacun des 8 bassins (Tableau 6).

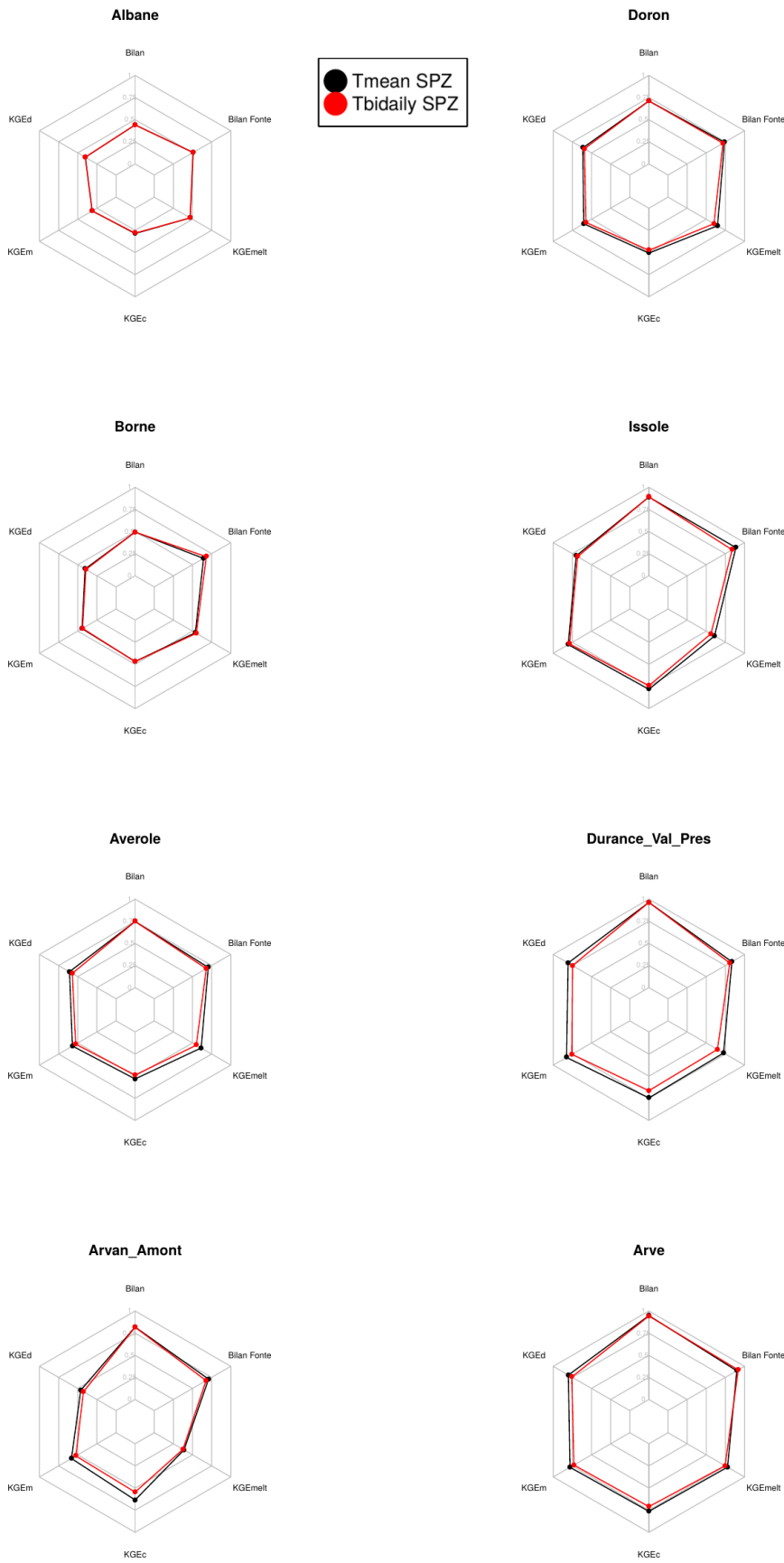


Figure 27 : Performance des configurations Tmean SPZ et Tbidaily SPZ sur les 8 bassins versants.

Tableau 6 : configurations comparées.

	Tmean SPZ	Tbidaily SPZ
Forçage	SPAZM	SPAZM
Paramètre optimisé par bassin	t_{factor}	t_{factor}

La Figure 27 montre que, même sur les bassins versants où SPAZM était le forçage météorologique optimal, la **formulation bi-journalière de la fonte dégrade légèrement les performances de modélisation. Cette formulation sera donc abandonnée.**

4.6. Piste #4 : raffinement du maillage

Le projet MDR avait utilisé sur le bassin versant du Rhône un maillage assez grossier, avec une taille moyenne de mailles de 5 km² et une taille minimale de maille imposée (1 km²). Ces choix ne permettent pas forcément de représenter finement les processus hydrologiques dans les bassins versants de montagne, où la variabilité spatiale s'exprime à très fine échelle. Nous testons ici l'influence d'un raffinement du maillage sur la qualité de la simulation sur 3 bassins versants, l'Arve à Chamonix, l'Arvan à St Jean d'Arves et la Durance à Val des Près. Ce raffinement est porté par une classification plus fine des pentes dans le mailleur (HRU-delin) et un allègement de la contrainte sur la taille minimale d'une maille de modèle, qui passe à 0.25 km².

Un premier test de sensibilité au maillage a été fait sur l'Arve à Chamonix (Tableau 7), montrant très peu de différences, sur la modélisation, entre deux formes de raffinement testées. Les différences entre le maillage MDR et le maillage2 sont illustrées sur l'Arve à Chamonix en Figure 28. La configuration « maillage2 » a ensuite été déployée sur les 3 bassins versants avec les forçages SAFRAN et SPAZM (le meilleur sur ces bassins) et la formulation Tmean de la fonte. De par sa résolution spatiale, SPAZM permet de fournir des intrants météorologiques différents à l'échelle des mailles du maillage2, ce que SAFRAN ne permet pas. SPAZM permet donc potentiellement de tirer parti de ce raffinement de maillage à la fois via une représentation des processus sur chaque maille mieux adaptée aux caractéristiques très locales, et via une précision accrue de l'intrant météorologique local.

Tableau 7: Maillages testés sur l'Arve à Chamonix.

Maillage	Mailleur	Limites des classes de pente	Nombre de mailles
Original MDR	Grass-HRU	0,0.1,0.3,0.5, 5, 10, 20, 30, 90	25
maillage1	HRU-delin	0,0.1,0.3,0.5, 5, 10, 20, 30, 90	124
maillage2	HRU-delin	0, 10, 20, 30, 40, 90	132

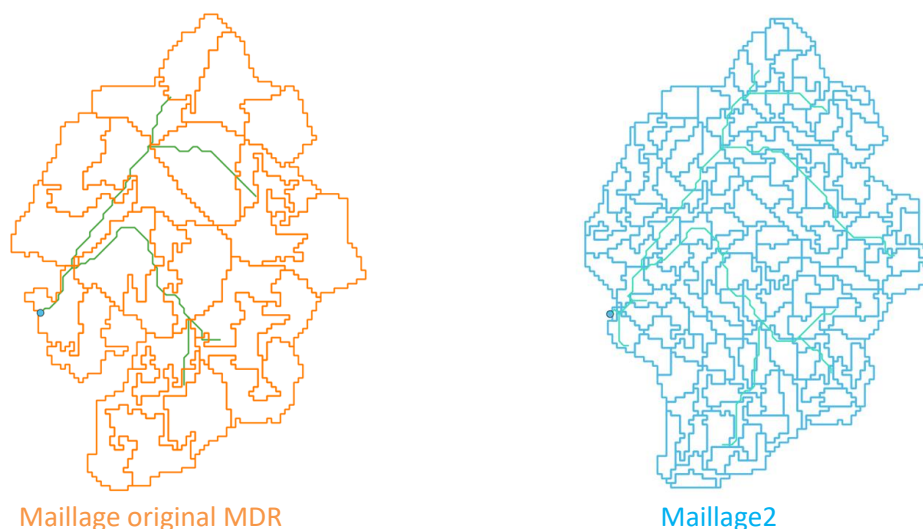


Figure 28: Illustration de 2 maillages testés. Les maillages1 et maillage2 sont proches.

Les Figure 29 et Figure 30 montrent que les modifications de maillage ont un impact limité sur les performances de la simulation sauf sur le bassin de l'Arvan, dont le KGE journalier est augmenté de 0.1 avec SAFRAN et SPAZM, et le biais pendant la fonte est considérablement réduit avec SPAZM. Les gains de performance sont nettement plus réduits avec SAFRAN qu'avec SPAZM ; par ailleurs le raffinement de maillage dégrade les performances de SAFRAN sur la Durance, probablement en exacerbant les déficits de ce bassin, partiellement compensés avec un forçage à basse résolution. Il n'est pas exclu que la stratégie d'adaptation/régionalisation des différents paramètres de J2000-Rhône (paramètres de sols, d'interception, d'imperméabilisation, [Branger et al. 2016](#)), qui a été menée à des échelles spatiales plus agrégées, limite les gains de performances via le passage à plus haute résolution spatiale : c'était déjà le constat de [Bahl \(2016\)](#). Une réévaluation de ces paramètres régionalisés pourrait être faite à une résolution spatiale plus fine dans la thèse de I. Horner (2016-2019, encadrante F. Branger). L'exemple de l'Arvan, bassin versant de petite taille (59 km²) comparé aux deux autres (~ 200 km²), fait émerger l'hypothèse de l'importance de la discrétisation spatiale pour les bassins versants de petite taille. La comparaison SAFRAN/SPAZM montre par ailleurs qu'une cohérence doit être respectée entre raffinement du maillage et résolution spatiale du forçage.

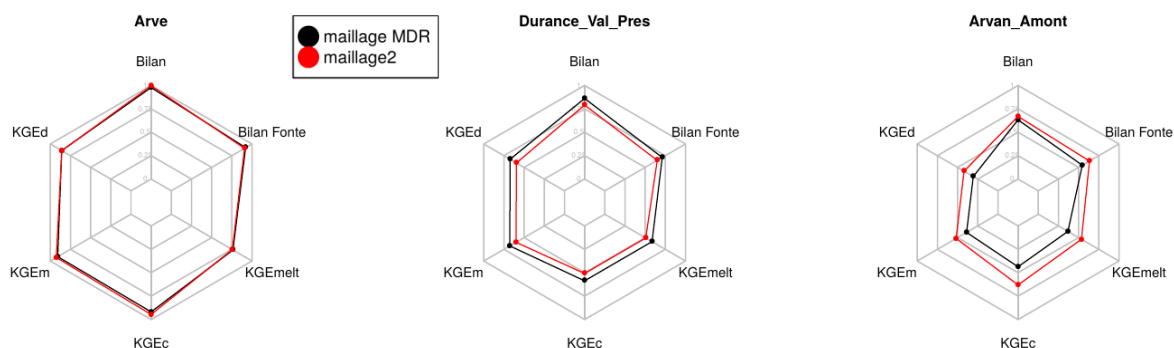


Figure 29: Impact du raffinement de maillage sur les performances de modélisation sur 3 bassins versants, avec SAFRAN.

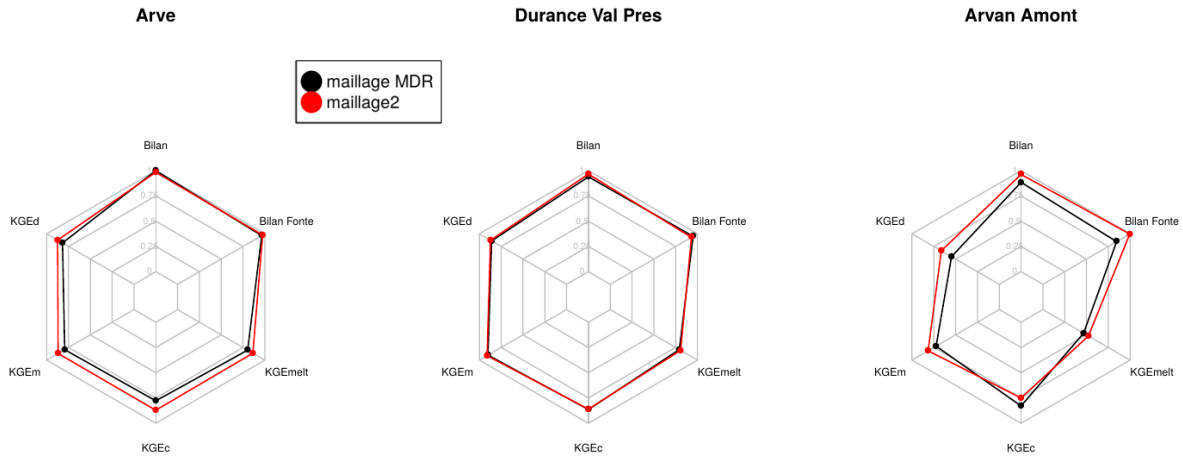


Figure 30 : Comme Figure 29, mais avec SPAZM.

4.7. Piste #5 : complexification de la formulation de la fonte

Sur les trois bassins identifiés précédemment, nous sommes partis des meilleures performances obtenues via les pistes précédentes (c-à-d. avec « Tmean SPZ maillage2 ») pour tester le potentiel d'amélioration de complexifications croissantes du modèle de fonte :

- Paramétrisation du facteur de fonte en fonction de l'aspect (**asp**)

$$t_{factor} = tf_{0-asp} + a_{asp} \cdot \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (12)$$

où θ est l'aspect (0 au Nord, π au Sud) et tf_{0-asp} , a_{asp} des facteurs à calibrer

- Paramétrisation du facteur de fonte en fonction de la saison (**seasonal**)

$$t_{factor} = tf_{0-seas} + a_{seas} \cdot \sin\left(\frac{2\pi(d-d_{equinoxe})}{365}\right) \quad (13)$$

où $d_{equinoxe}$ est le jour de l'année correspondant à l'équinoxe de printemps (142e jour), d le jour de l'année, et tf_{0-asp} , a_{seas} des facteurs à calibrer

- Paramétrisation du facteur de fonte en fonction de l'aspect et de la saison (**asp_seasonal**)

$$t_{factor} = tf_{0-asp-seas} + a_{seas} \cdot \sin\left(\frac{2\pi(d-d_{equinoxe})}{365}\right) + a_{asp} \cdot \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (14)$$

où $tf_{0-asp-seas}$, a_{seas} , a_{asp} , sont des facteurs à calibrer

Une étude de sensibilité a par ailleurs montré la faible plus-value d'une paramétrisation du facteur de fonte en fonction de l'altitude, pourtant évoquée dans l'état de l'art.

Les résultats obtenus en optimisant les paramètres des formulations asp, seasonal et asp_seasonal, sont présentés en Figure 31.

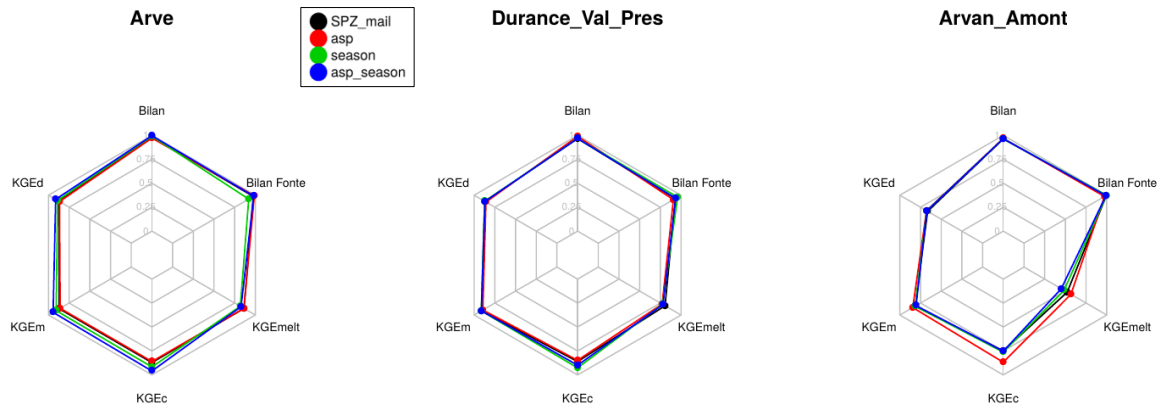


Figure 31 : Comparaison des performances de la simulation Tmean SPZ maillage 2 (abbr. SPZ_mail) avec celles obtenues après adjonction des paramétrisations asp, seasonal et asp_season.

Ces résultats sont mitigés, la complexification introduite n’amenant pas nécessairement un bénéfice important sur la simulation de la fonte même sur l’Arvan Amont, où les performances sont modérées. Les possibles raisons de ces performances modérées seront abordée en partie 5.

5. Discussion

5.1. Les enseignements de l'Action Neige

Plusieurs enseignements sont à tirer de cette étude :

- Le forçage météorologique est le premier vecteur d'amélioration de la modélisation hydrologique en montagne. Parmi les 3 produits disponibles sur l'Arc Alpin français, SPAZM ressort nettement comme le forçage le plus adapté à la simulation hydrologique, tant pour le bouclage des bilans hydrologiques que pour la dynamique de fonte (les deux étant liés notamment en fin de saison, quand un déficit d'accumulation limite la production de débit de fonte).
- Avec le forçage SAFRAN, la sensibilité des résultats optimaux au choix du facteur de fonte est généralement faible pour les bassins dont le facteur optimal de fonte est élevé : c'est ce qui a permis d'obtenir des résultats corrects en optimisation globale dans MDR. À l'échelle de l'arc alpin français, un facteur de fonte de l'ordre de 2 mm/d/°C fournit globalement de bons résultats. Ce constat reste vrai avec SPAZM, pour lequel le facteur de fonte optimal est de l'ordre de 3 mm/d/°C.
- Il est difficile de tirer parti, dans le cadre de notre modélisation hydrologique avec J2000-Rhône, des données de hauteur de neige ponctuelles du réseau d'observation de Météo-France.
- Sur les 3 bassins versants où il a été expérimenté, le raffinement de la maille de modélisation ou de la représentation du processus de fonte (prise en compte de l'aspect et de la saisonnalité) n'ont pas apporté de gains significatifs de performance sauf sur le bassin versant de l'Arvan Amont, probablement en raison de sa petite taille. En effet, la topographie (aspect et pente) a un effet très local sur la fonte : à mesure que l'échelle spatiale d'agrégation des processus (ici, le bassin versant) s'élargit, les différences d'aspects et pentes localement prononcées se compensent et l'impact de la topographie locale n'est plus visible. Par des expériences de rotation artificielle d'un bassin versant suisse, [Comola et al. \(2015\)](#) ont montré une disparition des effets liés à l'interaction entre radiation solaire et versant pour une taille de bassin de 43 km², comparable à celle du bassin versant de l'Arvan Amont (50 km²). Le modèle J2000-Rhône étant destiné à l'estimation de la ressource en eau sur des bassins versants de taille supérieure ou égale à 50 km², la prise en compte de ces raffinements n'apparaît pas nécessaire.
- Au terme de cet exercice, il apparaît que nous avons pu simplifier le modèle de neige de J2000-Rhône par l'attribution de paramètres fonctions du forçage météorologique (T_{trs} , T_{trans}) ou fixes (r_{factor}), ou l'élimination de certains paramètres n'influençant pas significativement les performances de la modélisation (g_{factor} , Tb). Les performances de ce modèle (Simpler model) sont illustrées en Figure 32.

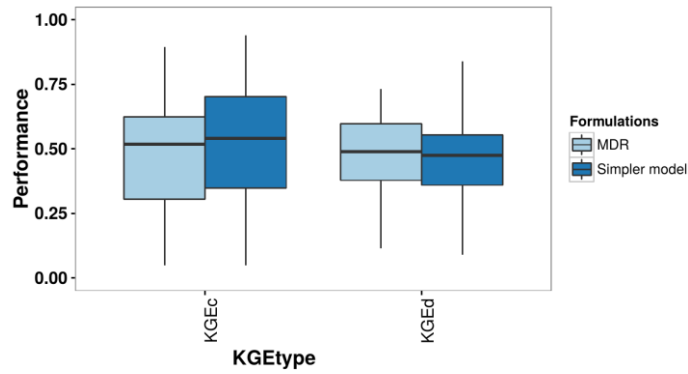


Figure 32: Comparaison des performances de la configuration MDR avec celles du modèle économe en paramètres (Simpler model).

5.2. Opportunité d'un forçage hybride sur l'ensemble du bassin versant du Rhône

Dans MDR, un forçage hybride avait été créé en appliquant les précipitations de SPAZM sur les mailles SAFRAN sur le bassin versant de la Durance à St Paul les Durance (12% du bassin versant du Rhône). Dans l'Action Neige, nous avons réalisé cette hybridation sur l'ensemble du bassin versant du Rhône et comparé ce forçage à SAFRAN (configurations Tmean SAF et Tmean SAFhybridall ci-après).

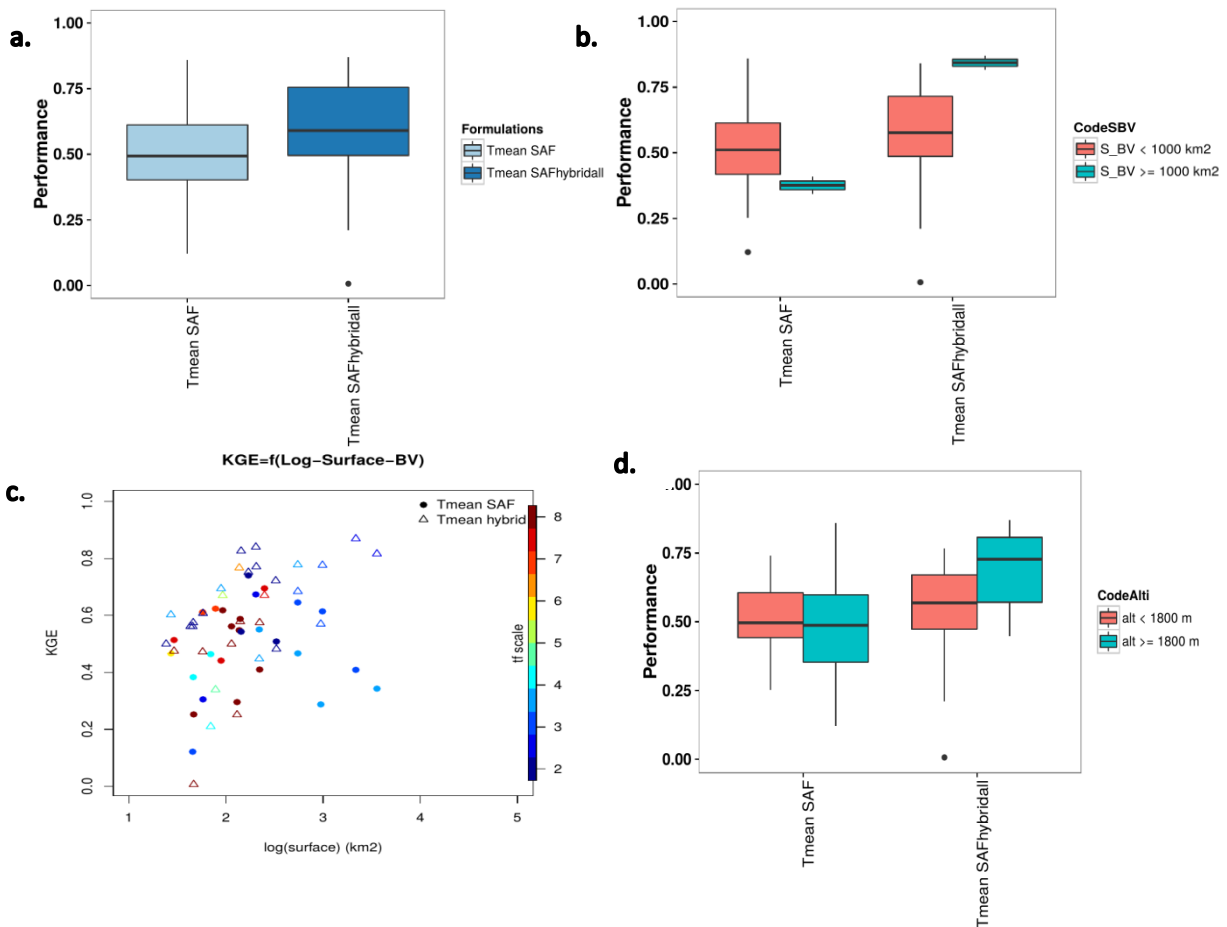


Figure 33 : a. Différence de performance (KGE) entre les simulations Tmean SAF et Tmean SAFhybridall. Ces performances sont déclinées selon l'altitude moyenne des bassins versants (b) et leur superficie (d) ou son logarithme (c).

La comparaison des performances de la modélisation avec les forçages SAF et SAFHybridall révèle un gain de performance avec l'hybridation (Figure 33 a) : il est distinctement plus élevé sur les bassins d'altitude (Figure 33 b) et sur les bassins versants de grande taille (Figure 33 d). Cette dernière assertion doit être modulée par l'absence de très grands bassins versants dans notre échantillon de 32 bassins non-influencés : une analyse complémentaire révèle que sur 3 très grands bassins de montagne (surface > 4500 km²), influencés, l'hybridation réduit en fait les performances de la modélisation. Les bassins versants de grande taille considérés en Figure 33 sont par ailleurs situés sur la Durance, où SPAZM permet notoirement une amélioration des bilans hydrologiques (cf. plus loin).

La discrimination altitudinale des forçages est logique dans la mesure où SPAZM respecte intrinsèquement mieux les gradients altitudinaux que SAFRAN. Par ailleurs, pour la réalisation de SPAZM, EDF a exploité des données d'un réseau d'observation permettant un meilleur échantillonnage des zones de haute altitude que le réseau de Météo-France (utilisé dans SAFRAN).

Géographiquement (Figure 34), les améliorations liées à l'hybridation se concentrent sur les Alpes du Sud (bassin de la Durance, comme vu avec SAFHybrid) et les Alpes intérieures, où seuls des bassins de haute altitude sont non-influencés. L'hybridation améliore peu voire dégrade en revanche les performances des bassins pré-alpins de basse altitude (Massif de la Chartreuse et des Bauges : Albane, Leysse ; Massif des Aravis : Borne, Chablais : Risse). Pour la plupart de ces bassins, SAFRAN semble conduire à des excédents d'eau : un biais renforcé par l'hybridation, puisque SPAZM est généralement plus pluvieux. L'attribution de ces biais à des transferts d'eau inter-bassins d'origine karstique, plutôt qu'à une déficience des précipitations dans les forçages, ne peut être exclue.

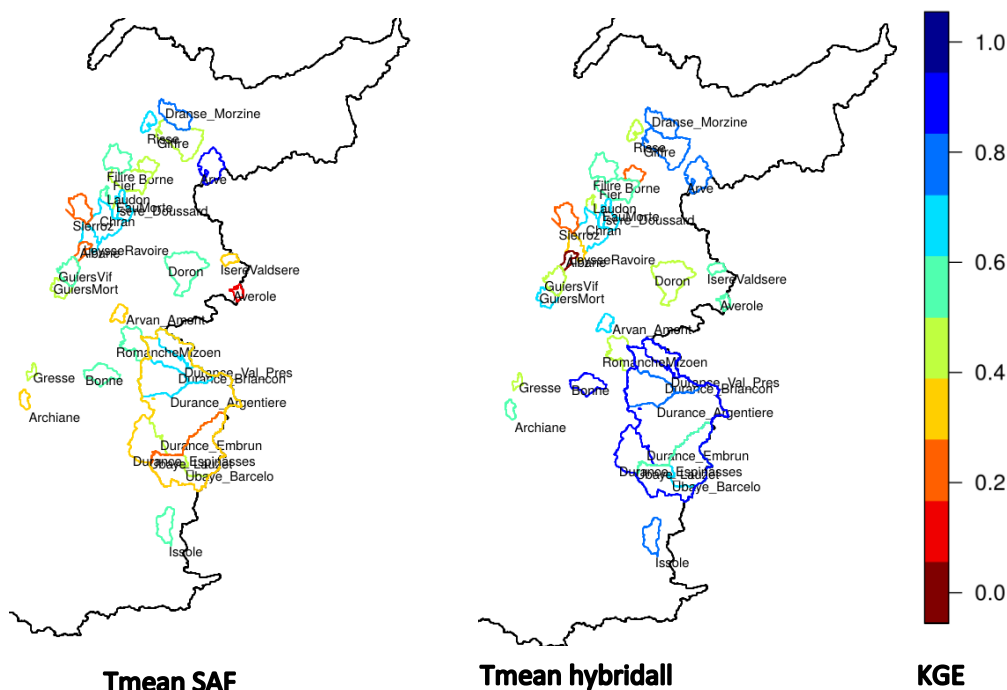


Figure 34 : Carte des KGE des deux configurations comparées.

Ces éléments serviront à orienter à l'avenir le choix du forçage météorologique à privilégier selon la situation géographique, la taille et l'altitude du bassin versant.

5.3. Sensibilité de la modélisation à la résolution spatiale du forçage

Afin d'estimer la sensibilité de la modélisation à la résolution spatiale du forçage, nous moyennons SPAZM sur les mailles 8 km x 8 km de SAFRAN (forçage « SPZ8kmx8km ») et comparons les résultats à ceux obtenus avec SPAZM à 1km de résolution. Cette comparaison est réalisée sur les 8 bassins versants où SPAZM a été déployé. Par rapport à SAFhybridall, SPZ8kmx8km utilise aussi les températures de SPAZM moyennées à 8 km x 8 km.

Les quatre « petits » bassins (<75 km², Albane, Avérole, Borne, Arvan Amont, Figure 35) sont les plus sensibles à ce changement de résolution spatiale du forçage. C'est logique car avec un forçage agrégé à basse résolution spatiale, ces bassins sont influencés par les conditions météorologiques de territoires voisins situés sur la même maille de 8 km x 8 km, et pouvant être assez différentes. Les bassins plus gros par rapport à cette maille de forçage, contiennent intégralement plusieurs mailles de forçage, et sont moins sensibles à ces effets de bord. Avec SPZ8kmx8km, Les performances sont particulièrement détériorées sur l'Albane et le Borne, deux bassins très excédentaires avec SPAZM. Elles le sont aussi sur l'Avérole, déficitaire. Dans ces trois cas, les biais sont aggravés par la dégradation de la résolution spatiale. **Nous retiendrons qu'un forçage bien résolu spatialement par rapport à la taille du bassin versant favorise les performances de la modélisation.**

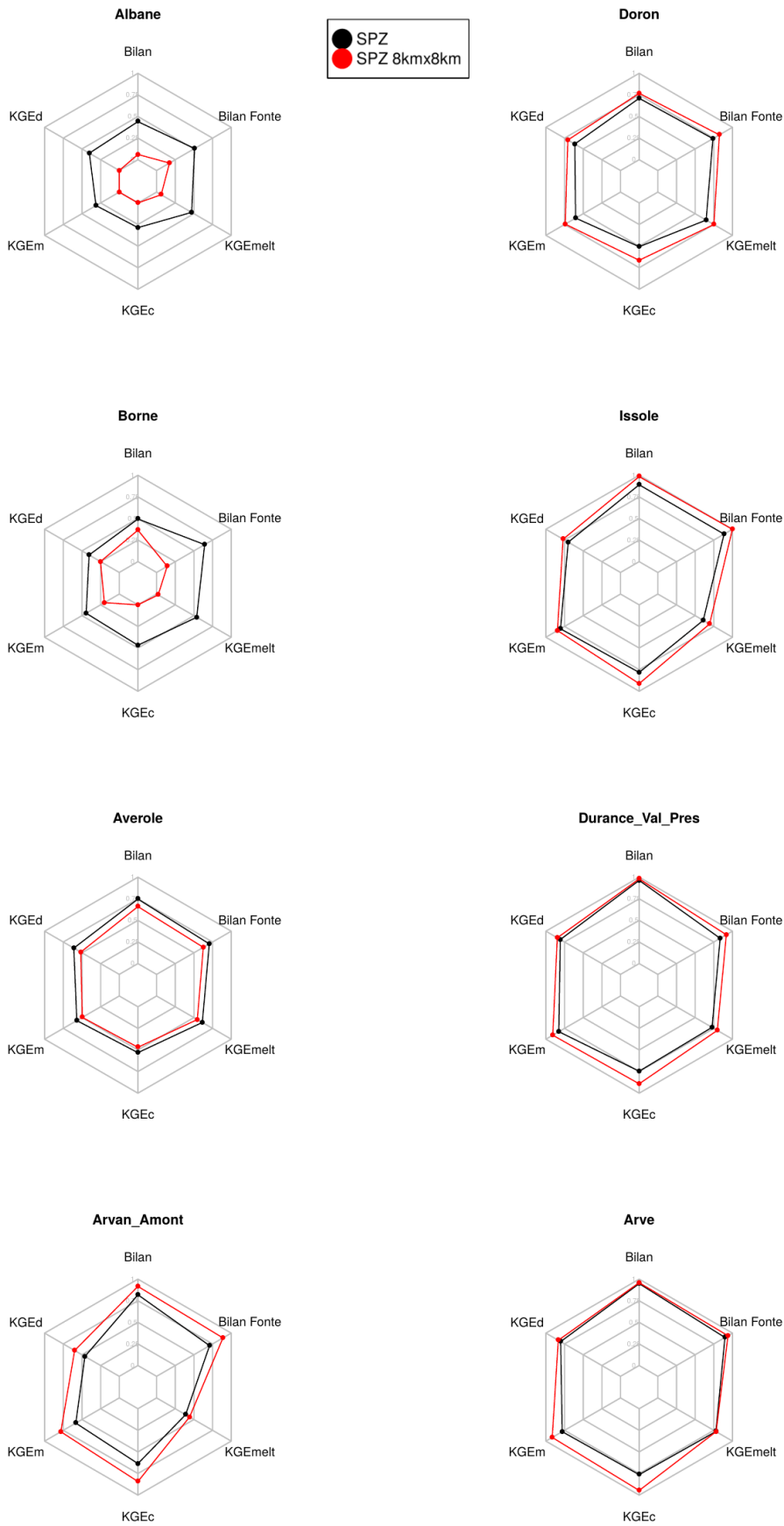


Figure 35 : Comparaison des performances de Tmean SPZ avec Tmean SPZ8kmx8km sur 8 bassins versants.

6. Conclusions et perspectives

6.1. Performances avant et après l'Action Neige

L'Action Neige a conduit à améliorer les performances de modélisation sur le jeu de bassins sélectionnés : nous illustrons ci-après ce gain de performances via les hydrogrammes simulés avant et après l'Action, pour un bassin initialement « mal » simulé, l'Arvan Amont, et un bassin initialement « bien » simulé, l'Arve à Chamonix. Pour chacun de ces bassins, la meilleure configuration, croisement du forçage et des modifications du maillage et/ou de la formulation de la fonte, a été retenue.

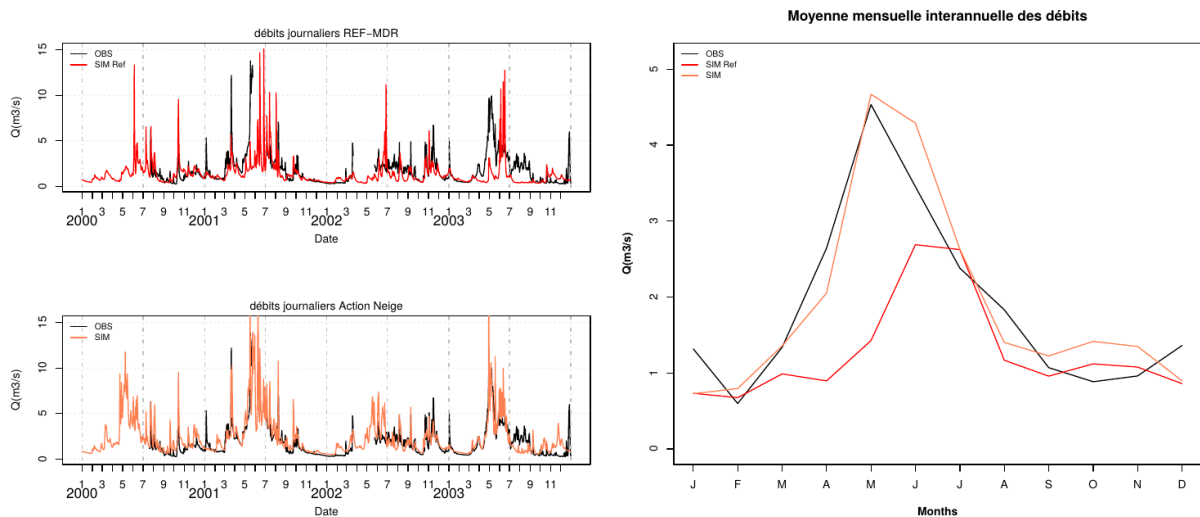


Figure 36 : Débits journaliers et cycle saisonnier du débit observés (OBS) et simulés sur l'Arvan Amont, avant Action Neige : SIM-ref, rouge; et après : SIM, orange).

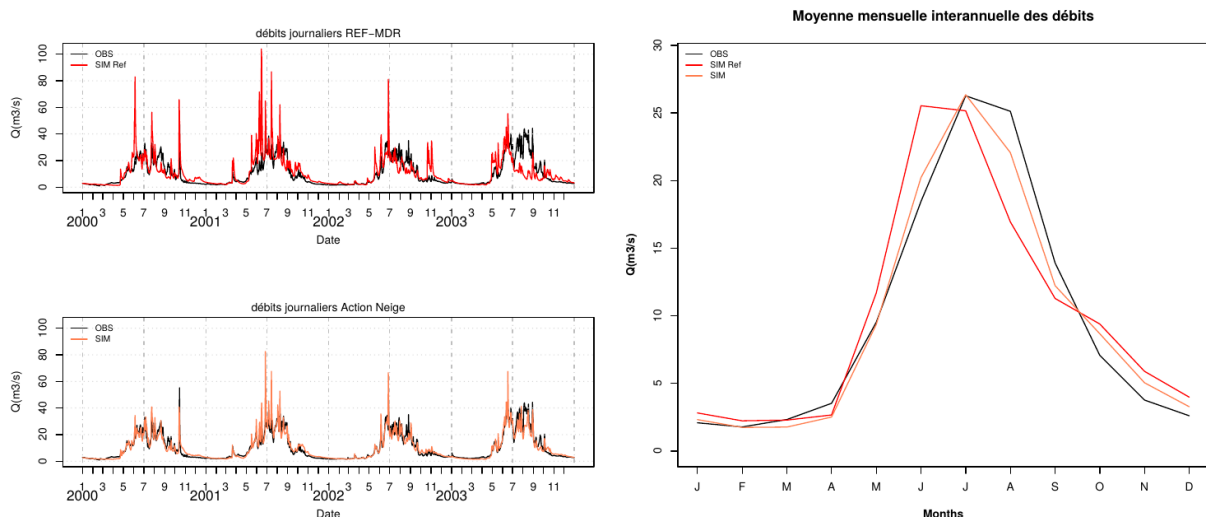


Figure 37 : Comme Figure 36, mais pour l'Arve à Chamonix.

On note un remarquable alignement entre observations et simulations pour ces deux bassins. Pour d'autres bassins étudiés en revanche (Albane et Avérole par exemple), des biais importants subsistent. Ils sont probablement en partie dus aux intrants météorologiques. Les récents travaux de Météo-France sur la production de forçages météorologiques à 2.5 voire 1.3 km de résolution en

montagne, permettront à l'avenir de surmonter une partie de ces biais ([Vionnet et al., 2017](#), [Vionnet et al., 2016](#)).

6.2. Perspectives

Les travaux de [Panthou and Obled \(2010\)](#) ont montré qu'une modulation du facteur de fonte par la nébulosité conduisait, localement, à une meilleure simulation de la fonte. Les situations à forte nébulosité incluent les événements de pluie-sur-neige, que nous n'avons pas ciblés ici. Si cet axe de recherche sort du cadre prévisionnel de l'Action Neige, il constitue une perspective d'amélioration de la modélisation d'événements pouvant induire des crues nivales et véhiculer de forts volumes de fonte. Par ailleurs, le rôle du g_{factor} devra être approfondi à l'échelle de l'ensemble du bassin versant du Rhône, tout comme l'impact du couvert forestier sur la fonte. Enfin, la possibilité, dans J2000, de tenir compte de gradients altitudinaux de température et précipitation afin de raffiner sur les mailles de la modélisation un forçage météorologique à résolution plus grossière, devra être testée et potentiellement exploitée si elle conduit à réduire les biais des forçages actuels.

Notre sélection des paramètres du modèle de fonte repose sur la comparaison des volumes simulés à l'observation hydrologique : cette dernière est entachée d'incertitudes, en particulier pendant la période de fonte où les seuils des bassins versants de tête peuvent se trouver partiellement obstrués (charriage de blocs, etc.), modifiant les courbes de tarage. Une estimation de l'incertitude de la modélisation induite par cette incertitude de mesure devra être faite pour étayer la pertinence de notre modélisation. Les travaux réalisés à IRSTEA Lyon fournissent les outils d'une telle étude.

L'exploitation de données satellites à haute résolution spatiale offre une perspective intéressante pour la validation des modèles de neige de différentes complexités sur les bassins versants de l'Arvan Amont et de la Durance à Val des Prés : ces bassins ont en effet été ciblés par la mission SPOT5 take5 à 10 m de résolution au printemps 2015 (période de fonte). Il est en effet possible que certaines formulations, en particulier celles résolues en aspect, permettent de mieux capturer la variabilité spatiale de l'ablation nivale, à performances hydrologiques égales.

Enfin, dans le cadre d'une thèse commençant à l'automne 2017 (co-financement IRSTEA et Labex OSUG@2020), un modèle de glaciers incluant les effets de la dynamique glaciaire de long terme sur le stock de glace sera développé dans J2000-Rhône. Il permettra d'affiner notre modélisation hydrologique sur les bassins de tête sous influence glaciaire. Il fournira également des estimations des contributions glaciaires au débit, d'intérêt pour la compréhension du fonctionnement et de l'évolution des écosystèmes haut-alpins. Deux projets (projet ZABR porté par Sophie Cauvy-Franié, IRSTEA-dynam, et projet BERGER porté par Isabelle Gouttevin, IRSTEA-hbv) liant hydro-glaciologie et biologie des hydrosystèmes sous influence glaciaire, débiteront aussi cette année, et reposeront en partie sur J2000-Rhône. Ils contribueront à renforcer notre compréhension des déterminants de l'hydrologie glacio-nivale et notre capacité à les modéliser.

Références

- Anderson, E.A. (1976) A Point Energy and Mass Balance Model of a Snow Cover, NOAA Technical Report NWS 19, 150 pp, February 1976.
- Bahl, N. (2016) Dérivation de paramètres caractéristiques du sol pour la modélisation hydrologique sur la région Rhône-Alpes - Analyse de sensibilité de la modélisation à la description du sol sur le bassin de l'Ardèche. Mémoire de fin d'études pour le Diplôme d'ingénieur de l'ENGEES, Strasbourg. 90 p.
- Badré, M., J.-L. Prime, and G. Ribière (2009) Neige de culture: état des lieux et impacts environnementaux-Note socio-économique.
- Blanc, A. (2017) Modélisation de la font nivale et glaciaire sur le bassin supérieur de la Sarennes. Stage de 2e année d'école d'ingénieur ENSE3, 41 p.
- Branger, F., I. Gouttevin, F. Tilmant, T. Cipriani, C. Barachet, M. Montginoul, C. Le Gros, I. Braud, E. Sauquet, et E. Leblois. (2016) Modélisation hydrologique Distribuée du Rhône. Rapport final. Irstea
- Comola, F., B. Schaefli, P. Da Ronco, G. Botter, M. Bavay, A. Rinaldo, and M. Lehning (2015) Scale-dependent effects of solar radiation patterns on the snow-dominated hydrologic response, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 3895–3902, doi:10.1002/2015GL064075.
- Durand, Y., Laternser, M., Giraud, G., Etchevers, P., Lesaffre, B., & Mérindol, L. (2009) Reanalysis of 44 yr of climate in the French Alps (1958–2002): methodology, model validation, climatology, and trends for air temperature and precipitation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(3), 429-449.
- Gottardi, F. (2009) Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne Utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement Application aux grands massifs montagneux français. Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier et l'Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- Grunewald, T., M. Schirmer, R. Mott, and M. Lehning (2010) Spatial and temporal variability of snow depth and swe in a small mountain catchment. *The Cryosphere Discussions*, 4(1):1–30.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009) Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1), 80-91.
- Hartmann, D.L., A.M.G. Klein Tank, M. Rusticucci, L.V. Alexander, S. Brönnimann, Y. Charabi, F.J. Dentener, E.J., Dlugokencky, D.R. Easterling, A. Kaplan, B.J. Soden, P.W. Thorne, M. Wild and P.M. Zhai (2013) Observations: Atmosphere and Surface. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Hock, R. (2003) Temperature index melt modelling in mountain areas. *Journal of hydrology*, 282(1), 104-115.
- Jabot, E. (2012) Etude de la fonte nivale et des températures en vue de la prévision hydrologique : du ponctuel au spatial. Thèse de Doctorat de l'Université Joseph-Fourier de Grenoble.
- Jost, G., Moore, R. D., Smith, R., & Gluns, D. R. (2012) Distributed temperature-index snowmelt modelling for forested catchments. *Journal of hydrology*, 420, 87-101.
- Krause, P., & Flügel, W. A. (2001) J2000-A modelling system for physically based simulation of hydrological processes in large catchments. *Proc. of the MODSIM*, 1(12), 2001.
- Lafaysse, M., Hingray, B., Etchevers, P., Martin, E., & Obled, C. (2011) Influence of spatial discretization, underground water storage and glacier melt on a physically-based hydrological model of the Upper Durance River basin. *Journal of Hydrology*, 403(1), 116-129.
- Le Dirach, P.-J. (2015) Analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin versant de l'Arvan. Projet de Fin d'Etude de l'ENTPE réalisé à IRSTEA-Lyon, 74p.
- Magnier, E. (2013) Neige artificielle et ressource en eau en moyenne montagne: impacts sur l'hydrosystème. Les exemples d'Avoriaz (France) et de Champéry (Suisse). Université Paris-Sorbonne-Paris IV; Université de Lausanne.

- Naoki Mizukami, Sanja Perica, and David Hatch (2011) Regional approach for mapping climatological snow water equivalent over the mountainous regions of the western United States. *Journal of Hydrology*, 400(1-2):72–82
- Nepal, S., Krause, P., Flügel, W. A., Fink, M., & Fischer, C. (2014) Understanding the hydrological system dynamics of a glaciated alpine catchment in the Himalayan region using the J2000 hydrological model. *Hydrological Processes*, 28(3), 1329-1344.
- Panthou, G. and Obléd, C. (2010) Proposition d'amélioration d'un modèle de fonte de neige à degrés-jours par une prise en compte simplifiée de types de temps. Document de travail, version 2010.
- Picouet (2012b) Réanalyse de l'équivalent en eau de la couverture neigeuse : développement d'un modèle de neige au pixel. Partie 2 : Structuration d'un modèle neige à l'échelle du pixel au droit des chroniques historiques SWE. Rapport Technique EDF-LTHE-Alcotra.
- Réveillet, M. (2016) Sensibilité du bilan de masse des glaciers alpins aux variables atmosphériques et topographiques: Observations et simulations (Doctoral dissertation, Grenoble Alpes).
- Schaefli, B., & Huss, M. (2010) Simulation of high mountainous discharge: how much information do we need?. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 7(5), 8661-8702.
- Sicart, J. E., Hock, R., & Six, D. (2008) Glacier melt, air temperature, and energy balance in different climates: The Bolivian Tropics, the French Alps, and northern Sweden. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D24).
- Valéry (2010). Modélisation précipitations – débit sous influence nivale Elaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. Thèse de doctorat, AgroParisTech, 417 p.
- Vionnet, V., Dombrowski-Etchevers, I., Lafaysse, M., Quéno, L., Seity, Y., & Bazile, E. (2016) Numerical weather forecasts at kilometer scale in the French alps: Evaluation and application for snowpack modeling. *Journal of Hydrometeorology*, 17(10), 2591-2614.
- Vionnet, V., Six, D., Auger, L., Lafaysse, M., Quéno, L., Réveillet, M., ... & Dumont, M. (2017). Influence of sub-kilometer precipitation datasets on simulated snowpack and glacier winter balance in alpine terrain. In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 19, p. 10251).

Annexes

A. Modèle de densification du manteau neigeux dans J2000

La densification du manteau neigeux dans J2000 n'a lieu qu'en réponse à un apport d'eau (de fonte ou de pluie). Elle obéit à 2 règles rappelées dans [Krause and Fluegel \(2001\)](#) :

- Si la lame d'eau dépasse ~ 2 fois le contenu en neige sèche du manteau neigeux, ce-dernier est lessivé intégralement (fonte, saturation à 200%)
- Dans le cas contraire, la densité est multipliée par un facteur qui dépend du degré de saturation de la neige (Figure 38) :

Facteur de densification sous effet d'eau liquide

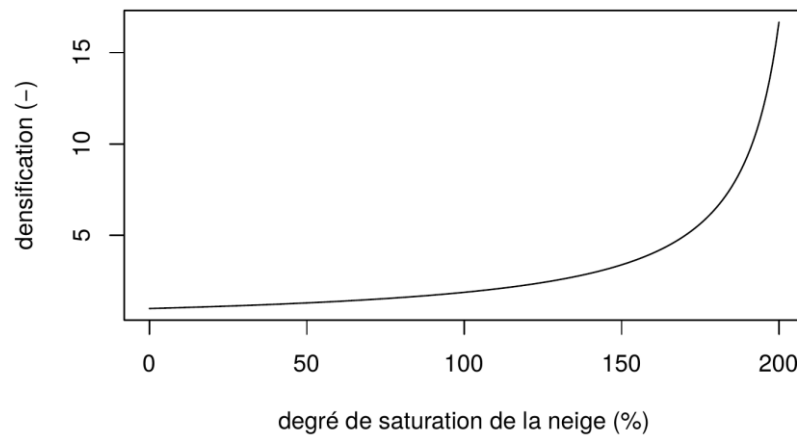


Figure 38 : Densification de la neige dans J2000 sous l'effet de l'eau liquide.

B. Sensibilité de la modélisation aux paramètres T_{trs} et T_{trans} (formulation Tmean SAF-BA)

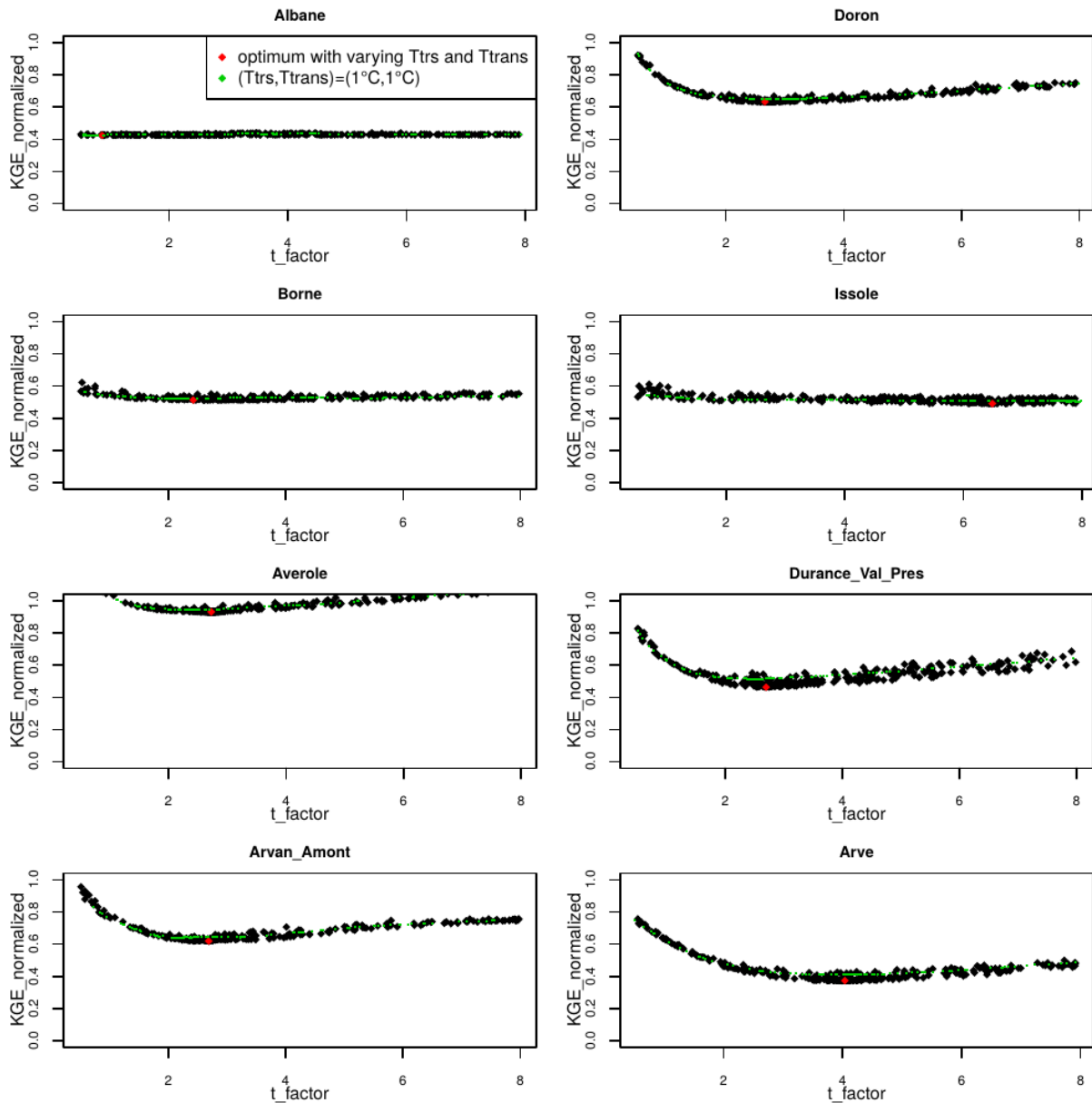


Figure 39 : Sensibilité des performances de la modélisation aux paramètres t_{factor} , T_{trs} et T_{trans} (points noirs), représentée en fonction du t_{factor} . Le t_{factor} apparaît comme le paramètre le plus sensible, les variations de T_{trs} et T_{trans} créant un bruit généralement homogène autour de la courbe $KGE_normalized=f(t_{factor})$.

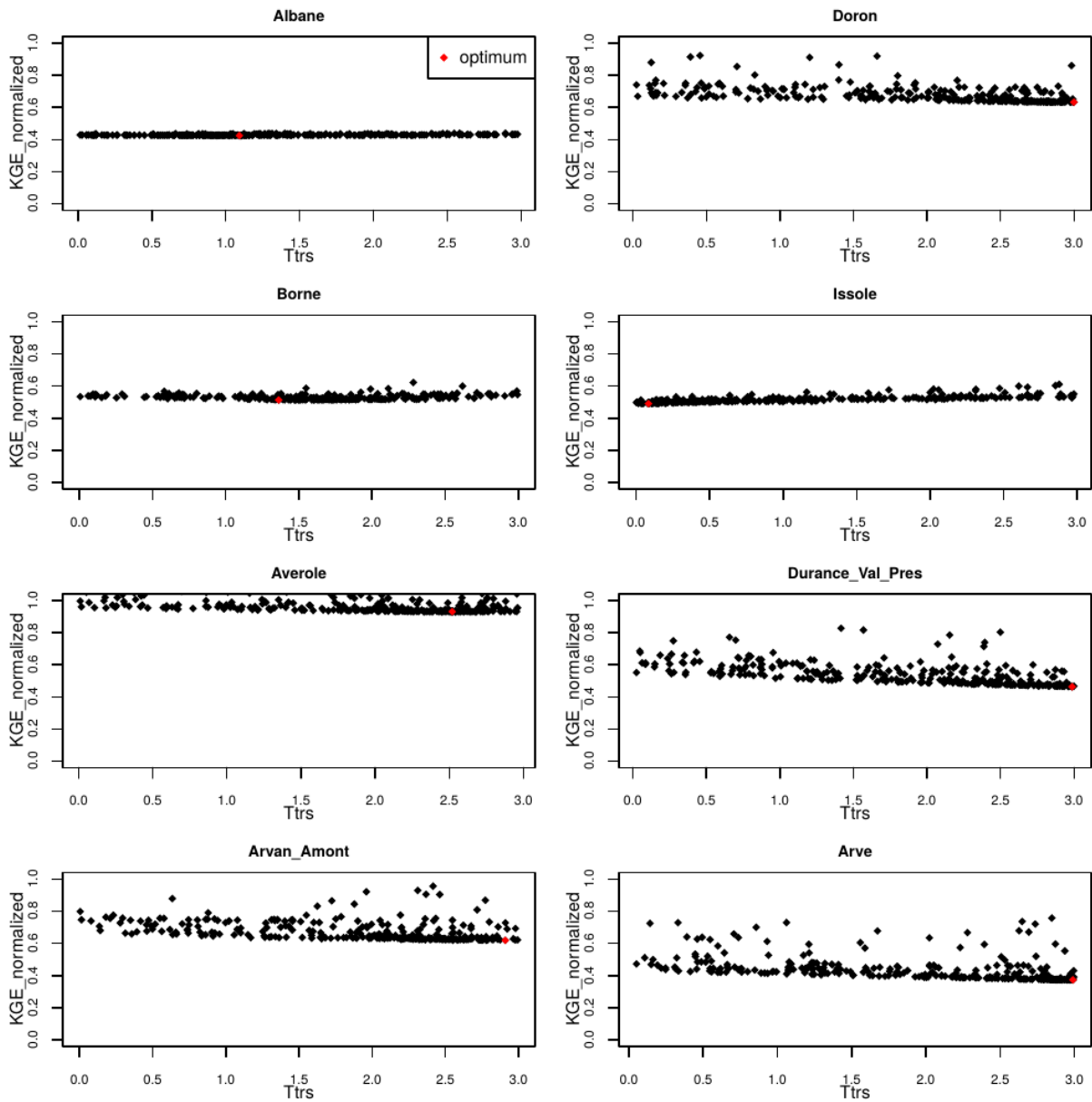


Figure 40 : Comme Figure 39, mais représenté en fonction du paramètre T_{trs} . T_{trs} apparait comme le deuxième paramètre le plus sensible, avec une valeur optimale proche de 3 sur les bassins sensibles à ce paramètre.

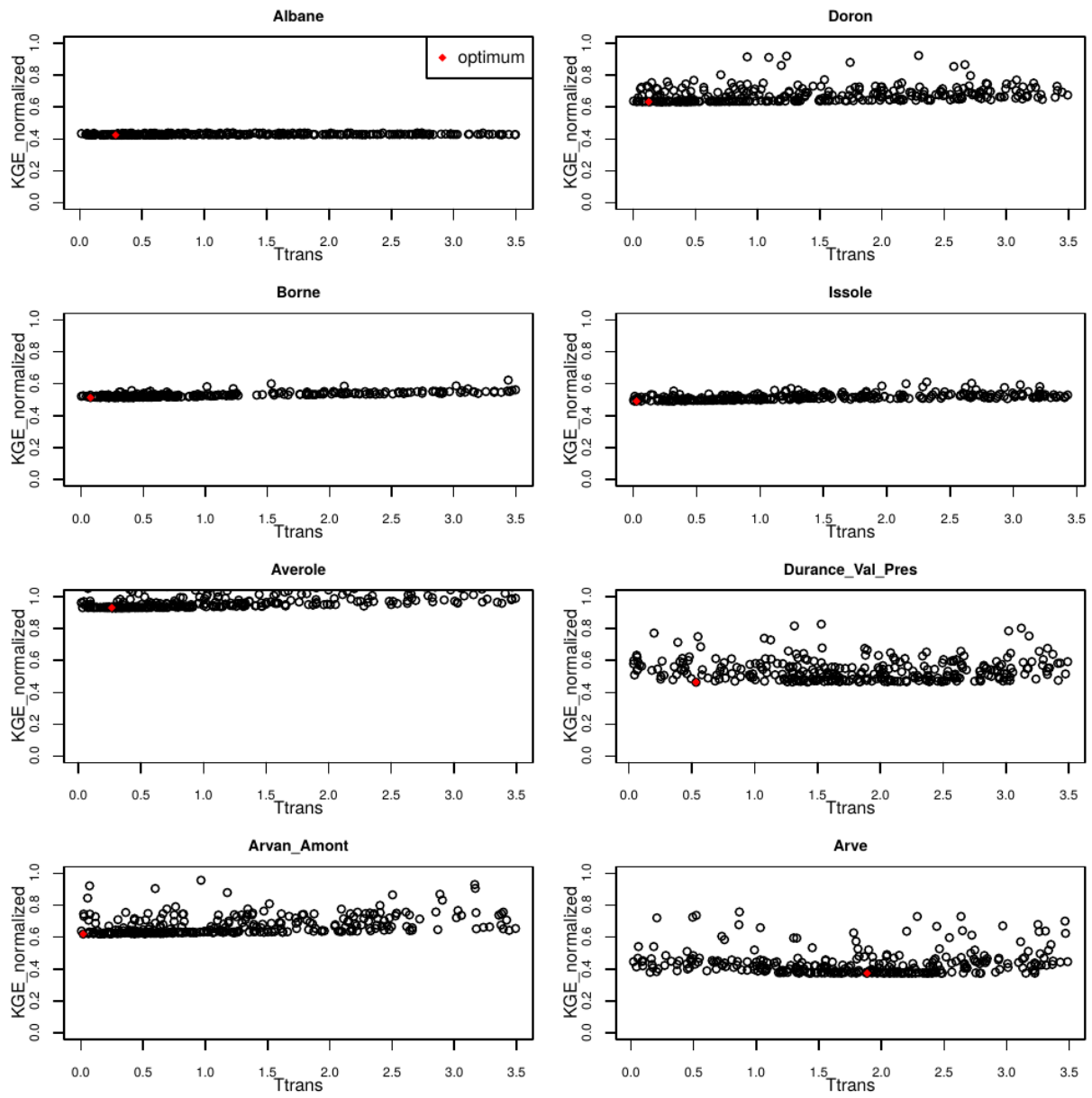


Figure 41 : Comme Figure 39, mais représenté en fonction du paramètre T_{trans} . T_{trans} apparait comme peu sensible et difficile à calibrer, nous le choisisons à 1°C.

C. Sensibilité de la modélisation aux paramètres T_b (formulation Tmean SPZ)

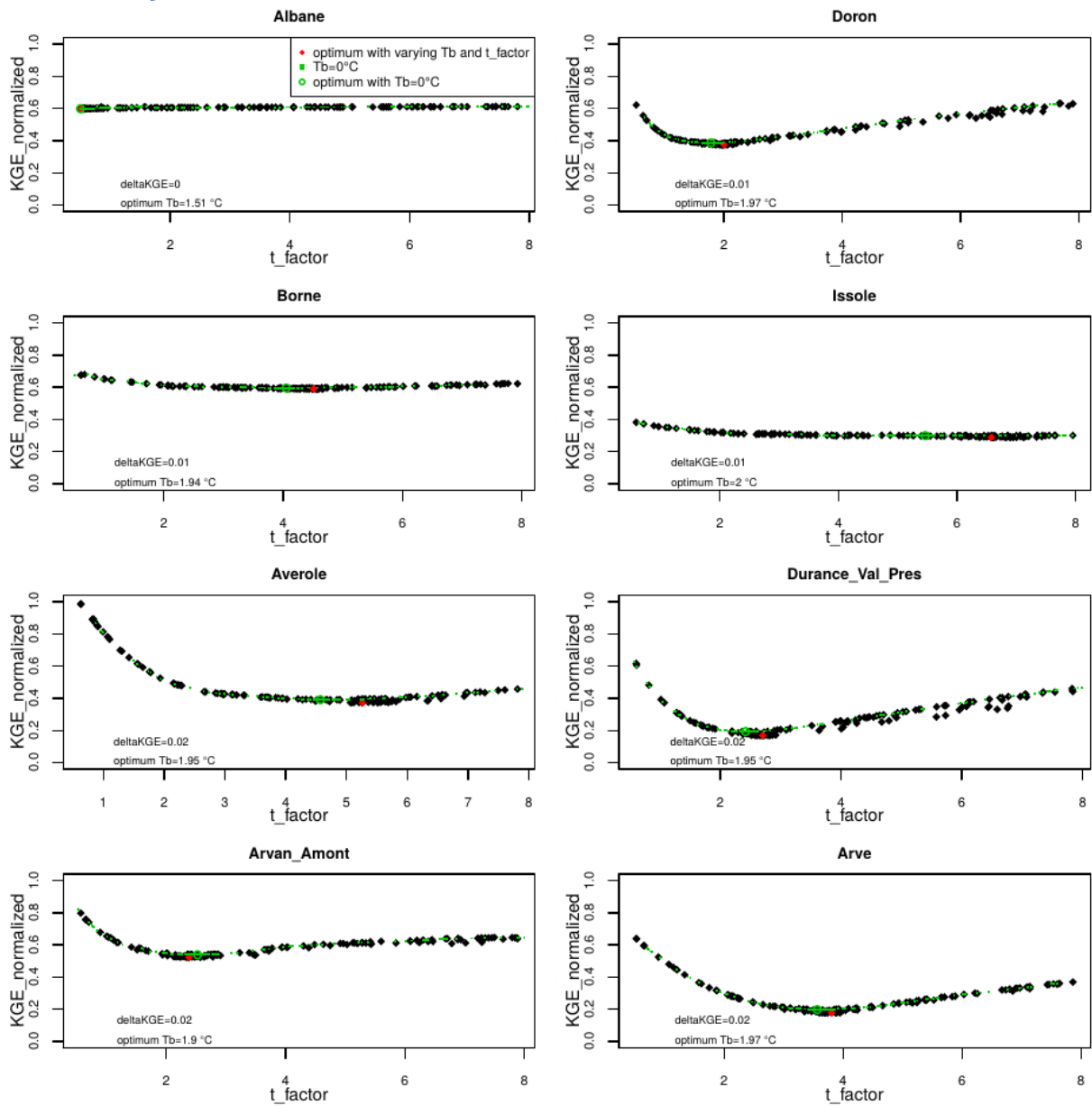


Figure 42 : Sensibilité des performances de la modélisation aux paramètres t_{factor} et T_b (points noirs), représentée en fonction du t_{factor} . Elle est comparée à la sensibilité au t_{factor} seule avec $T_b=0^{\circ}C$ (points verts). La différence de KGE entre les deux optima, ΔKGE , est de 0.02 dans le meilleur des cas, montrant la faible sensibilité de la performance à l'optimisation de T_b .

D. Sensibilité du KGE au facteur de fonte dans la formulation « Tmean SAF »

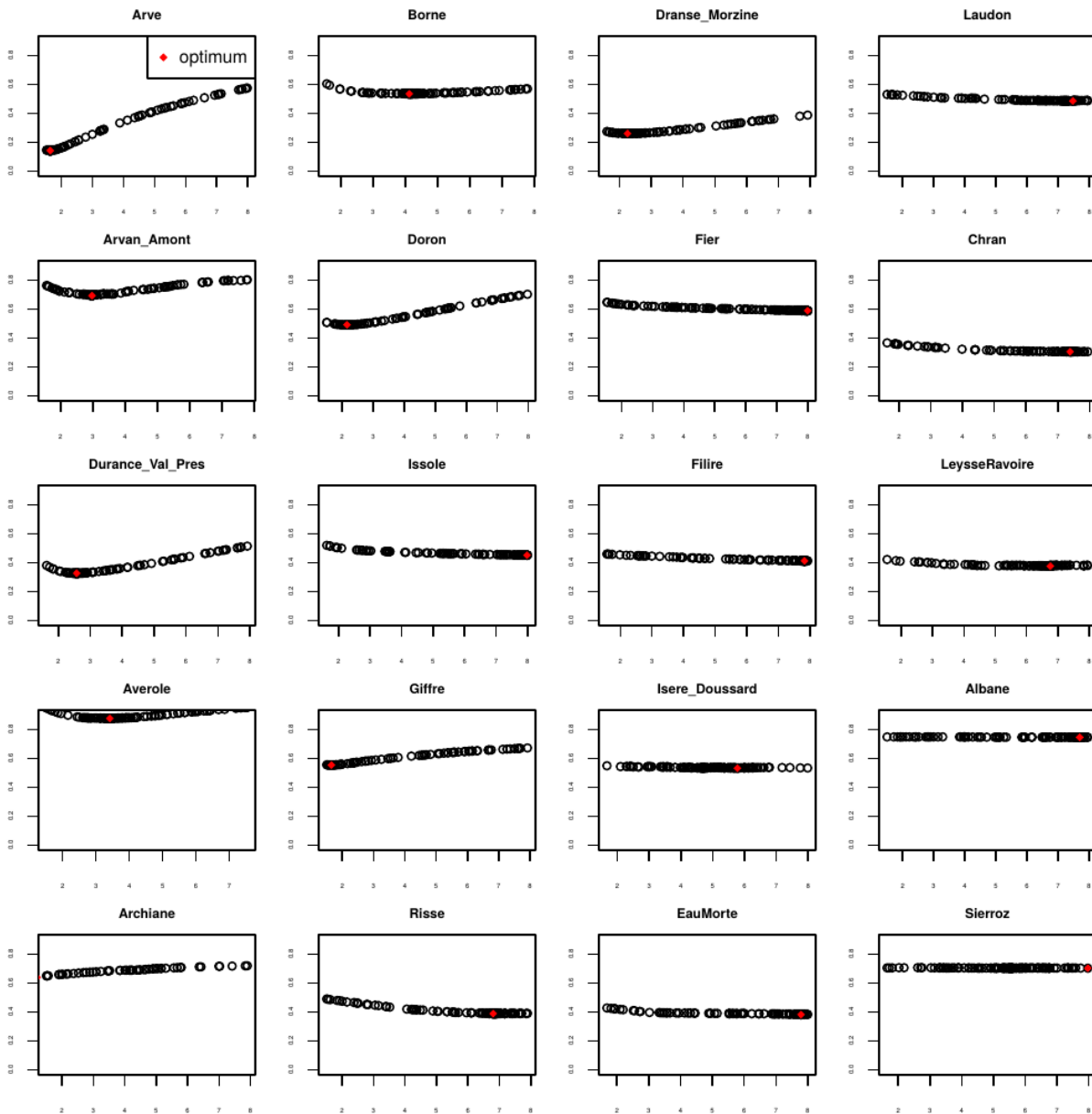


Figure 43 : Sensibilité du KGE normalisé (ie 1-KGE) (y) au facteur de fonte (x) sur 20 des 32 sous bassins retenus.

E. Correction d'un bug dans le calcul des aspects dans le meilleur HRU-delin

Le meilleur du modèle J2000, HRU-delin, s'appuie sur un MNT agrégé à 200m de résolution pour estimer les caractéristiques topographiques des bassins-versant, impactantes pour certains processus hydrologiques : la fonte fait partie de ces processus, puisque l'aspect (Nord-Sud-Est-Ouest) et la pente (ici en °) impactent la quantité de rayonnement solaire reçue par les surfaces, qui constitue la principale source d'énergie pour la fonte.

Dans l'Action Neige, nous avons donc particulièrement contrôlé la qualité du maillage dans les zones de montagne, afin de tester la sensibilité de la fonte à une paramétrisation dépendant de la topographie (cf. 4.7) : nous avons ainsi détecté une erreur dans l'agrégation des aspects par hrus dans notre mailleur, liée à la discontinuité des aspects (exprimés en ° par rapport au Nord) à la transition 360° - 0°. Le détail de la correction apporté au code du mailleur est fourni dans l'encart grisé ci-après. L'erreur conduisait à une mauvaise caractérisation des aspects des pentes Nord (en jaune Figure 44) dans notre maillage et le fichier de paramètre hru.par correspondant. Cette erreur est notamment illustrée en Figure 44 sur une maille Nord sélectionnée.

La correction apportée au mailleur est désormais intégrée pour toutes les simulations futures. **Elle n'induit aucune modification dans la géométrie du maillage, mais modifie le fichier de paramètres hru.par, colonne *aspect*.** Cette modification peut être impactante pour la modélisation si une paramétrisation de la fonte en fonction de l'aspect est mise en place.

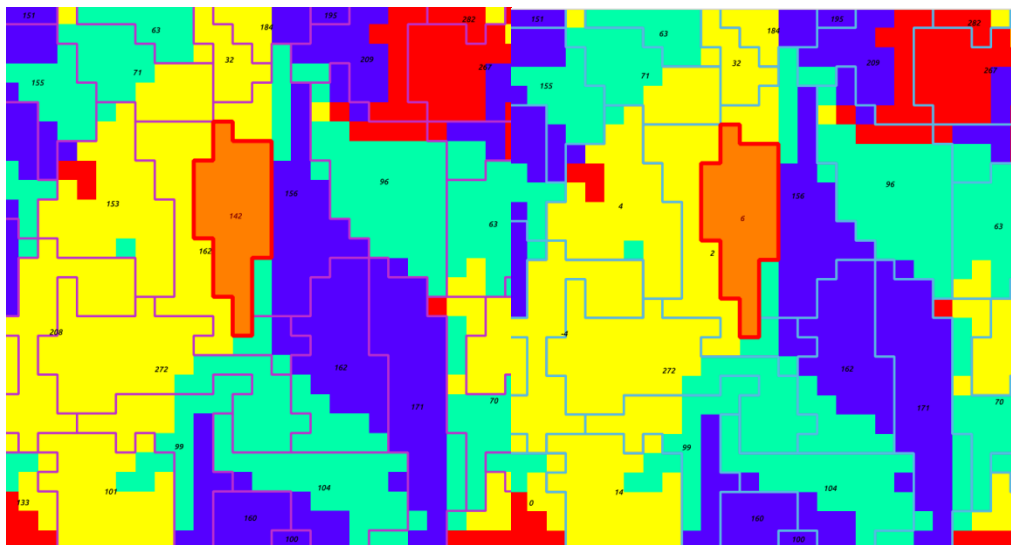


Figure 44 : Impact de la correction d'aspect implémentée dans le logiciel de maillage. A gauche : avant correction. A droite ; après correction. Les mailles orientées Nord, en jaune, ont maintenant un aspect cohérent.

Nature de la correction :

L315 et 316 (mjj) de modules/hru-delin_parms_J2000.py :
`grass.run_command('r.mapcalc', aspect_mjj='if((aspect_mj>315.0),aspect_mj-360.0,aspect_mj)')`