



Projet HYDRODEMO

Évaluation de l'aléa torrentiel dans les petits bassins versants des Alpes du Nord

Action 4 : Développer un cadre de modélisation hydrologique pour les petits bassins versants torrentiels

Projet HYDRODEMO : Évaluation de l'aléa torrentiel dans les petits bassins versants des Alpes du Nord

Action 4 : Désagrégation temporelle des réanalyses SPAZM

Alexandre Mas¹ and Guillaume Evin¹

¹Univ. Grenoble Alpes, INRAE, UR ETNA, 38000, Grenoble, France

15 avril 2022



Financement : Projet financé avec le concours de l'Union européenne. L'Europe s'engage sur le Massif Alpin avec le Fonds Européen de Développement Régional. Opération soutenue par l'Etat - Fonds national d'aménagement et de développement du territoire.

Citation : Alexandre Mas et Guillaume Evin. 2021. *HYDRODEMO - Action 4 : Désagrégation temporelle des réanalyses SPAZM* [Rapport de recherche] INRAE - UR ETNA.

Résumé

Le projet HYDRODEMO a pour objectif de mieux connaître les risques liés aux crues torrentielles dans les Alpes du Nord et de pouvoir mieux s'en prémunir. Ces phénomènes torrentiels sont en effet parfois destructeurs car extrêmement chargés en matériau solide. HYDRODEMO vise à combler un manque critique de connaissance sur ce type d'aléa, tout d'abord en caractérisant l'hydrologie et le transport solide de bassins versants instrumentés, puis en définissant une méthodologie de transposition aux autres bassins versants des Alpes du Nord.

L'action 4 du projet HYDRODEMO vise à caractériser le fonctionnement hydrologique des petits bassins versants torrentiels des Alpes du Nord au moyen d'outils de modélisation. On présente dans ce rapport la méthode de désaggrégation temporelle proposée pour obtenir des précipitations grillées horaires à partir des réanalyses journalières SPAZM.

Table des matières

1	Introduction	5
2	Forçages météorologiques candidats	5
2.1	COMEPHORE	5
2.2	SPAZM	5
2.3	SAFRAN	6
2.4	Résumé	7
3	Approches de désagrégation explorées	7
3.1	Désagrégation des précipitations Spazm	7
3.1.1	Désagrégation Spazm - Comephore par la méthode des analogues	7
3.1.2	Désagrégation Spazm - Safran par cumuls journaliers	8
3.1.3	Désagrégation Spazm - Safran par cumuls mensuels	9
3.2	Désagrégation des températures Spazm	10
3.3	Analyse des séries désagrégées	10
4	Conclusions	13
	Bibliographie	14

1 Introduction

L'étude du fonctionnement hydrologique des petits bassins versants torrentiels nécessite de disposer de données à des résolutions temporelles et spatiales suffisamment fines pour reproduire adéquatement le comportement de ces bassins. Dans le cadre de la modélisation hydrologique pluie-débit, cela implique de disposer à minima des forçages météorologiques d'entrée du modèle au pas de temps souhaité pour la simulation des débits.

Dans le cadre du projet HYDRODEMO, on souhaite générer des chroniques relativement longues de débits horaires simulés aux exutoires des bassins versants observés. Ce chapitre présente le bilan des travaux effectués pour obtenir les forçages météorologiques horaires utilisés dans HYDRODEMO, et notamment différentes options de désaggrégation temporelle (journalier à horaire).

2 Forçages météorologiques candidats

2.1 COMEPHORE

Les réanalyses Comephore sont produites par Météo-France et proviennent d'une combinaison de données radar et de mesures pluviométriques au sol. Elles sont disponibles au pas de temps horaire, sur une grille de 1 km x 1 km sur toute la France, de 1997 à 2017. Des explications détaillées sur les différentes étapes de traitement conduisant au produit final sont données dans Lobligeois (2014).

La résolution spatiale et temporelle des données Comephore est cohérente avec nos besoins. Le diagnostic des données fait cependant apparaître des limites importantes sur une partie de notre zone d'étude. On observe en effet une sous-estimation importante des cumuls de précipitation en altitude et dans les massifs intérieurs des Alpes. Plusieurs explications peuvent être avancées : la moins bonne sensibilité des mesures radar aux précipitations solides qui sont plus fréquentes en altitude, la rareté des pluviomètres (utilisés pour corriger les bilans issus de la mesure radar) en montagne, et le manque de visibilité radar. Le rapport de Roger (2017) fournit une évaluation complète des réanalyses Comephore. De plus, la plage temporelle couverte par les données Comephore (1997-2017) est relativement courte par rapport à l'exploitation que l'on souhaite faire des débits simulés (c'est-à-dire estimer des débits centennaux). Enfin, l'absence d'un forçage de température associé implique dans tous les cas d'avoir recours à une autre source de données.

2.2 SPAZM

Les réanalyses SPAZM (précipitation et température) sont produites par EDF pour répondre aux divers besoins industriels de gestion de la ressource en eau, en particulier pour la production d'électricité. L'objectif principal de SPAZM est de fournir des estimations fiables en zone de montagne d'où provient la majorité de la ressource en eau utilisée pour l'hydro-électricité. Pour ce faire, la méthode de réanalyse se base sur la combinaison des observations disponibles et d'"ébauches", c'est-à-dire des champs météorologiques proposés par défaut et conditionnés au relief, au type de circulation atmosphérique et à la saison. Le principe de calcul est détaillé dans Gottardi (2009). Les données SPAZM sont produites sur une grille de 1 km x 1 km au pas de temps journalier. Le domaine spatial couvert est présenté sur la figure 1. Trois forçages sont disponibles : le cumul de précipitation (solide et liquide), la température maximale et la température minimale. Les données couvrent les années civiles complètes de 1948 à 2017.

Les données SPAZM présentent plusieurs intérêts dans le cadre du projet HYDRODEMO. Tout

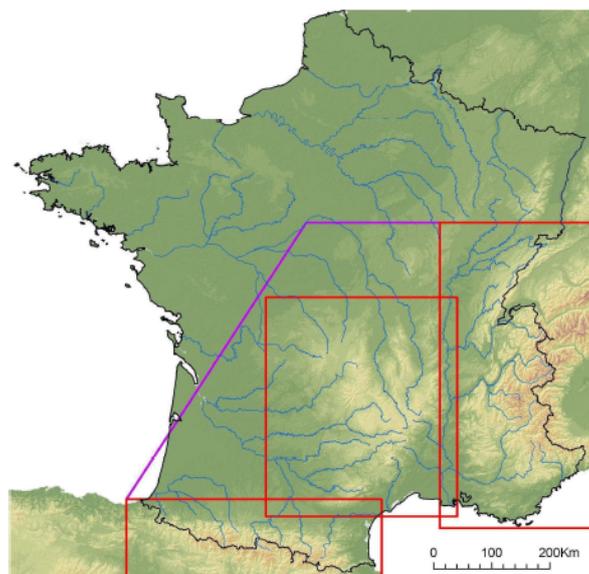


FIGURE 1 – Couverture spatiale des données Spazm (contour violet). Les rectangles rouges délimitent des zones de calcul par massif. Tiré de Gottardi (2009).

d’abord, leur résolution spatiale est cohérente avec l’échelle des bassins versants étudiés, et elles sont disponibles sur une période suffisamment longue (1948-2017). Ensuite, leur mode de calcul a été spécifiquement optimisé pour fournir des cumuls de précipitation fiables en montagne, en particulier grâce à l’utilisation de nombreuses mesures. De plus, les données de température et de précipitation ne sont pas calculées de manière indépendante ce qui assure une certaine cohérence entre les deux forçages et une capacité à reproduire certains phénomènes climatiques locaux. Les données SPAZM étant produite au pas de temps journalier, la résolution temporelle n’est pas suffisant pour la modélisation hydrologique des petits bassins versants torrentiels étudiés dans HYDRODEMO (avec des surfaces entre 10 km² et 200 km²), et ces réanalyses ne sont donc pas directement exploitables.

2.3 SAFRAN

Le système SAFRAN (Système d’Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige) est une analyse atmosphérique de mésoéchelle développée par Météo France (Quintana Segui, 2008). SAFRAN combine des données issues d’un modèle météorologique de grande échelle et des mesures au sol principalement. Les forçages générés par SAFRAN sont utilisés dans plusieurs outils opérationnels, dont la prévision des avalanches et le suivi de la ressource en eau à l’échelle de la France. Les différents forçages sont calculés sur des zones climatiques homogènes par tranche d’altitude de 300 m à des résolutions temporelles variables. Elles sont ensuite interpolées au pas de temps horaire puis projetées sur une grille régulière de 8 km x 8 km. Les données utilisées ici proviennent d’une réanalyse initialement effectuée sur la période 1958-2007 (Vidal *et al.*, 2010) qui a depuis été prolongée jusqu’en 2018.

Les données Safran ont l’avantage d’être disponibles au pas de temps horaire sur une période suffisamment longue qui correspond à nos besoins. De plus, les forçages générés contiennent entre autres la température et les précipitations solide et liquide. Cependant, sa résolution spatiale est trop grossière pour que Safran puisse être utilisé directement comme forçages météorologiques des modèles hydrologiques dans HYDRODEMO.

2.4 Résumé

Les caractéristiques principales des trois forçages décrits sont résumées dans le tableau 1. Dans HYDRODEMO, la petite taille des bassins versants nous contraint à exploiter seulement les forçages ayant une résolution temporelle et spatiale de 1 km x 1 km. Afin d'exploiter les réanalyses SPAZM, la suite de chapitre présente une solution consistant à désagréger temporellement les données de précipitations et de températures journalières SPAZM.

Nom	Résolution temporelle	Résolution spatiale	Disponibilité	Forçages disponibles
Comephore	Horaire	1 km x 1 km	1997 - 2017	Précipitation totale
Spazm	Quotidien	1 km x 1 km	1948 - 2017	Précipitation totale, température min et max
Safran	Horaire	8 km x 8 km	1958 - 2018	Température, précipitation solide et liquide

TABLE 1 – Résumé des caractéristiques de chaque forçage.

3 Approches de désagrégation explorées

La désagrégation consiste à augmenter la résolution spatiale ou temporelle d'une donnée source, soit en exploitant la meilleure résolution d'une donnée alternative (dite support), soit par une méthode statistique (voir discussion de la littérature dans Breinl et Di Baldassarre, 2019). Dans notre cas, on peut envisager soit d'augmenter la résolution spatiale de Safran, avec Spazm ou Comephore comme support, ou augmenter la résolution temporelle de Spazm, avec Safran ou Comephore comme support. C'est cette dernière option qui est choisie. Elle permet de tirer partie de la disponibilité sur une longue période des données Spazm et de la bonne qualité de ces données en zone de montagne. Plusieurs approches ont été explorées et sont présentées dans la section 3.

3.1 Désagrégation des précipitations Spazm

3.1.1 Désagrégation Spazm - Comephore par la méthode des analogues

Cette première approche vise à tirer parti de la répartition horaire des précipitations fournie par Comephore qui est à priori la plus à même de rendre compte des phénomènes localisés spatialement ou temporellement.

La première étape consiste à définir les jours dits analogues. Pour ce faire, on compare les champs de précipitation quotidiens Spazm et Comephore. Pour chaque jour ds de la période 1948-2017, on détermine le jour dc de la période 1997-2017 pour lequel la similarité entre les champs de précipitation P_{ds}^{Spazm} et P_{dc}^{Comep} est maximale en respectant un certain nombre de contraintes, par exemple sélectionner un jour analogue de la même saisons, de la même classe d'intensité, qui respecte la même organisation spatiale du champ de précipitation (Evin *et al.*, 2018 ; Breinl et Di Baldassarre, 2019). Ensuite, pour chaque heure h des jours ds et dc et chaque pixel Spazm i , la précipitation horaire Spazm s'écrit :

$$P_{i,ds,h}^{Spazm} = P_{j,dc,h}^{Comep} * \frac{P_{i,ds}^{Spazm}}{\sum_{h=1}^{24} P_{j,dc,h}^{Comep}}, \quad (1)$$

avec j l'indice du pixel Comephore le plus proche du pixel Spazm i . La sous-estimation des cumuls en zone de montagne par Comephore n'est donc à priori pas limitante pour cette application puisque, par principe, le cumul journalier est celui de Spazm.

Il est à noter que cette approche par dates analogues a été envisagée pour deux raisons principales :

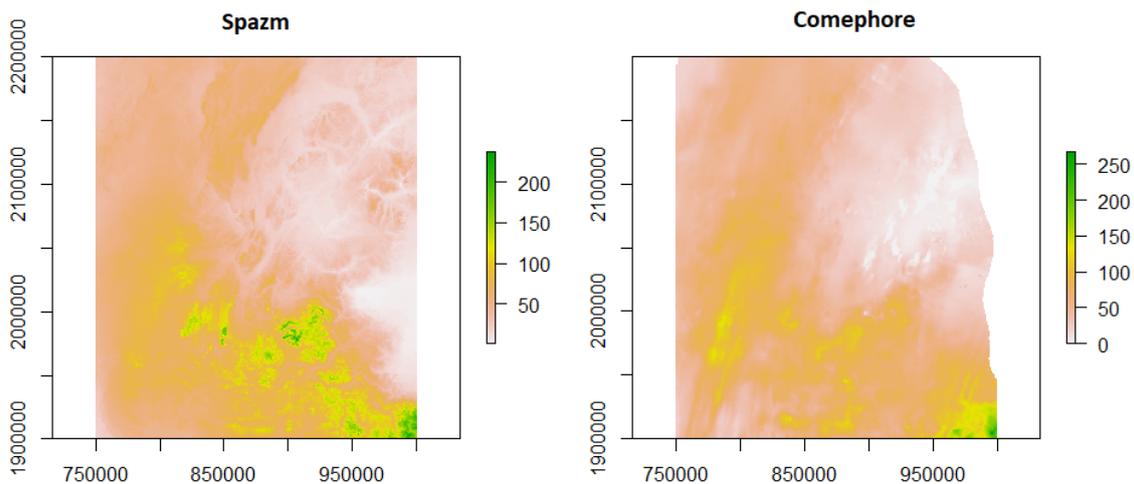


FIGURE 2 – Exemples de champs de précipitations journaliers Spazm (gauche) et Comephore (droite) pour la journée du 04-11-2014.

- Pour la période antérieure à 1997-2017, elle permet de proposer des champs SPAZM désagrégés alors que nous ne disposons pas de champs Comephore concomitants.
- Pour la période 1997-2017, il arrive fréquemment que les champs Comephore et Spazm du même jour soit discordants. Du fait des limites du produit Comephore sur une large portion de la zone d'étude, en particulier sur les massifs intérieurs où la visibilité radar est très limitée, ces situations sont assez fréquentes (voir exemple à la figure 2). Dans ce cas, les précipitations journalières Spazm sont souvent positives et ne peuvent pas être désagrégées par les précipitations nulles de Comephore.

Lorsque les précipitations du jour support sont nulles alors que la précipitation Spazm ne l'est pas, nous sélectionnons le premier jour analogue le plus proche pour lequel la précipitation Comephore n'est pas nulle. La limitation de cette approche est la dégradation de la qualité du jour support sélectionné en allant chercher des jours où la similarité entre les précipitations Spazm et Comephore est moins bonne. De plus, ce traitement étant effectué itérativement pour tous les pixels pouvant être désagrégés, le jour support utilisé pour la désagrégation n'est pas nécessairement le même sur tout le domaine, limitant également la cohérence spatiale du produit obtenu.

En plus de cette cohérence spatiale parfois limitée, l'inconvénient de cette approche par analogie et l'absence de temporalité entre les précipitations désagrégées et les précipitations réelles, le moment de la journée où l'évènement pluvieux arrive n'étant pas contraint. Sur plusieurs bassins de moins de 50 km², on constate donc que la reproduction de la temporalité des averses est très imparfaite sur de nombreux évènements pluvieux. La recherche des jours analogues étant basée sur un critère global à l'échelle des Alpes du Nord, il n'est pas rare qu'à une échelle spatiale plus fine la répartition horaire des précipitations du jour support soit relativement éloignée de la répartition réelle qui peut être en partie déduite des débits observés. Ce diagnostic est rendu possible grâce aux sorties du modèle hydrologique dont un exemple est fourni en figure 3.

Cet aspect de temporalité étant crucial pour la calibration et la simulation des modèles hydrologiques, cette approche n'a pas été retenue par la suite.

3.1.2 Désagrégation Spazm - Safran par cumuls journaliers

L'utilisation de la série Safran comme support permet de s'affranchir d'une approche par analogie. En effet, les 60 ans de données sont suffisants pour nos besoins et l'exclusion de la première décennie des

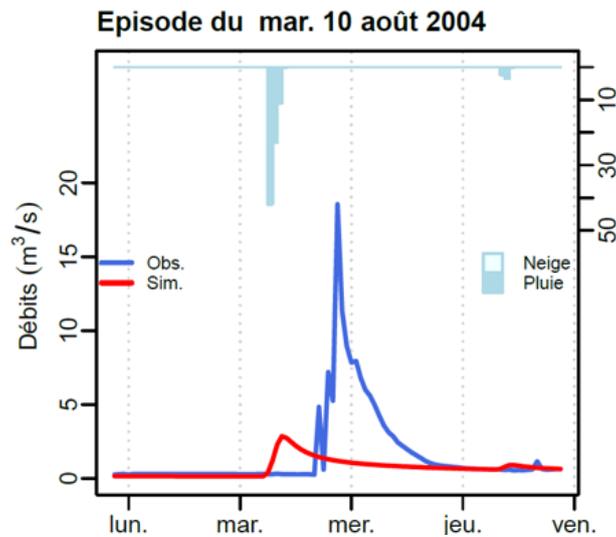


FIGURE 3 – Précipitation de bassin et débits observés et simulés par le modèle MORDOR-SD avec la désagrégation Spazm-Comephore pour l'évènement du 10 août 2004 sur le bassins de la Morge à Voiron.

données Spazm est raisonnable. Pour chaque heure h du jour d et chaque pixel Spazm i , la précipitation Spazm s'écrit :

$$P_{i,h}^{Spazm} = P_{j,h}^{Safran} * \frac{P_{i,d}^{Spazm}}{\sum_{h=1}^{24} P_{j,h}^{Safran}} \quad (2)$$

avec j l'indice du pixel Safran le plus proche du pixel Spazm i . Les situations où le support ne permet pas la désagrégation sont gérées en répartissant la précipitation Spazm de manière uniforme sur les 24 pas de temps de la journée. Cette solution très simple à mettre en oeuvre a été choisie afin d'obtenir rapidement des résultats et de faire une première évaluation de la pertinence de cette approche de désagrégation. Les résultats montrent que les cas précédemment décrits (précipitation Spazm positive et précipitation Safran correspondante nulle) représentent en moyenne 12% des couples (pixel, jour) chaque année. La fréquence de ces situations étant élevée, d'autres solutions ont été envisagées.

L'utilisation d'un pixel Safran plus éloigné n'est pas jugée pertinente du fait de la résolution spatiale trop large. La recherche d'un jour support différent par analogue est complexe à mettre en oeuvre et nous confronterait aux mêmes limites que celles mentionnées dans la section 3.1.1. Le recours à des séries de précipitation observées est possible mais conditionné à la présence d'une station météorologique à proximité. Le réseau de stations étant beaucoup moins dense dans les zones de montagne, cette solution ne pourrait pas être déployée de manière homogène sur toute la zone d'étude.

Aucune de ces solutions n'étant jugée pertinente, la technique de désagrégation a été modifiée pour limiter les occurrences des situations problématiques.

3.1.3 Désagrégation Spazm - Safran par cumuls mensuels

De manière alternative, la méthode Duo (Magand *et al.*, 2018) s'appuie sur la répartition des précipitations Safran au sein du même mois m . Cette approche a été mise en oeuvre sur le bassin de la Durance à Serre-Ponçon et s'est avérée pertinente pour une utilisation en modélisation hydrologique. Les précipitations sont désagrégées en suivant la méthode proposée dans Magand (2014). Pour chaque heure h du même mois m et chaque pixel Spazm i , la précipitation Spazm s'écrit :

$$P_{i,h}^{Spazm} = P_{j,h}^{Safran} * \frac{\sum_{d=1}^{ndm} P_{i,d}^{Spazm}}{\sum_{h=1}^{nhm} P_{j,h}^{Safran}}, \quad (3)$$

avec j l'indice du pixel Safran le plus proche du pixel Spazm i , et ndm (resp. nhm) le nombre de jours (resp d'heures) dans le même mois m .

L'utilisation du cumul mensuel permet de réduire fortement l'occurrence des pas de temps où le cumul Safran est nul et le cumul Spazm non nul, qui représentent 0.05% des couples (pixel, mois). Ces situations étant très rares, on a choisi de conserver la solution de désagrégation uniforme de la précipitation Spazm. Dans le cadre d'une utilisation en modélisation hydrologique, on pourra raisonnablement exclure les mois concernés des analyses si on identifie un impact négatif significatif.

En revanche, l'utilisation du cumul mensuel engendre la perte de l'information du cumul journalier Spazm. On peut cependant vérifier que la distribution des cumuls journaliers calculés à partir des précipitations Spazm désagrégées est très proche de la distribution originale.

3.2 Désagrégation des températures Spazm

Les températures sont désagrégées en corrigeant l'amplitude journalière de la température Safran au moyen des températures minimale et maximale Spazm. Pour chaque heure h du jour d et chaque pixel Spazm i , la température Spazm s'écrit :

$$T_{i,h}^{Spazm} = (T_{j,h}^{Safran} - T_{j,d}^{Safran,min}) * \frac{T_{i,d}^{Spazm,max} - T_{i,d}^{Spazm,min}}{T_{j,d}^{Safran,max} - T_{j,d}^{Safran,min}} + T_{i,d}^{Spazm,min}, \quad (4)$$

où $T_{i,d}^{Spazm,min}$ et $T_{i,d}^{Spazm,max}$ désignent les températures Spazm minimum et maximum, respectivement, pour le pixel i et le jour d , $T_{j,d}^{Safran,min}$ et $T_{j,d}^{Safran,max}$ sont les températures Safran minimum et maximum correspondantes pour le plus proche pixel j . Enfin, $T_{i,h}^{Spazm}$ et $T_{j,h}^{Safran}$ sont les températures Spazm et Safran pour l'heure h , respectivement.

Pour les températures, l'amplitude journalière produite par Spazm est donc respectée, et Safran procure l'évolution infra-journalière.

3.3 Analyse des séries désagrégées

Concernant les précipitations, deux faits saillants sont à noter. Premièrement, on peut identifier l'impact de la résolution spatiale Safran (8 km x 8 km) sur les cartes de précipitations Spazm désagrégées, avec des discontinuités plus ou moins importantes entre les pixels Spazm (voir illustration à la figure 4).

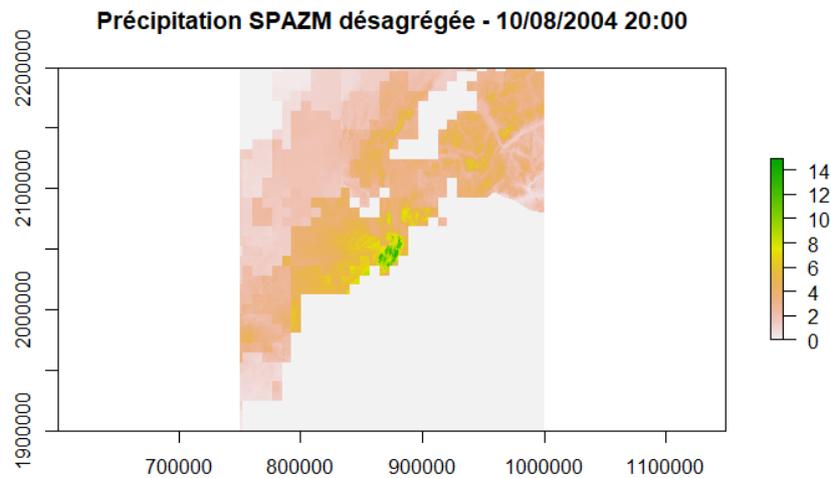


FIGURE 4 – Précipitation Spazm désagrégée du 10 août 2004 à 20h sur la totalité du domaine Spazm - Alpes du Nord. Les carrés bien identifiables correspondent aux pixels Safran. La variabilité spatiale fine est donnée par Spazm.

Pour tous les pixels Spazm héritant de la répartition horaire d'un pixel Safran, le rapport $\frac{P_{j,h}^{Safran}}{\sum_{h=1}^{nhm} P_{j,h}^{Safran}}$ est identique à chaque heure. La variation spatiale est donc uniquement celle de Spazm. En revanche, pour deux pixels Spazm contigus mais ayant un pixel Safran support différent, le rapport $\frac{P_{j,h}^{Safran}}{\sum_{h=1}^{nhm} P_{j,h}^{Safran}}$ est différent, ce qui explique les discontinuités observées. On identifie également des pixels Safran dont la précipitation est nulle au pas de temps considéré tout en étant entourés de pixels où les intensités horaires peuvent être fortes. Dans notre approche de modélisation hydrologique globale où les forçages sont moyennés à l'échelle du bassin, ce phénomène a un impact relativement limité. En revanche, l'utilisation de ce forçage en modélisation hydrologique distribuée pourrait être discutable dans la mesure où la répartition spatiale des précipitations peut être fortement déséquilibrée.

Deuxièmement, on constate que la représentativité de la répartition horaire des précipitations est relativement mauvaise avec la présence régulière de séquences de 6 heures consécutives où la précipitation est uniforme. La figure 5 illustre cette situation sur un évènement en comparant les sorties du modèle hydrologique obtenues avec les précipitations Comephore et Spazm désagrégé. On constate que les cumuls sur l'évènement sont assez proches, mais que la forme de l'averse Spazm n'est pas cohérente. Ce phénomène est lié à la méthode de calcul des précipitations horaire de Safran, qui sont obtenues à partir de valeurs produites au pas de temps 6 heures. En l'absence de données locales de validation, les précipitations horaires Safran sont obtenues en répartissant uniformément le cumul de précipitations. Cette limite inhérente au mode de calcul de Safran est documentée dans plusieurs sources et se présente comme son principal point faible en terme d'utilisation pour la modélisation hydrologique à petite échelle.

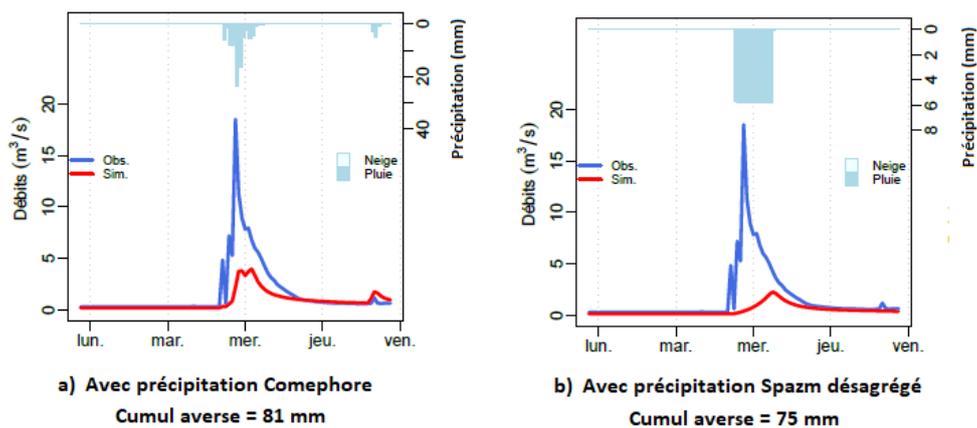


FIGURE 5 – Sorties du modèle hydrologique MORDOR-SD pour l'évènement du 10 août 2004 sur le bassin de la Morge à Voiron avec a) la précipitation Comephore et b) la précipitation Spazm désagrégé.

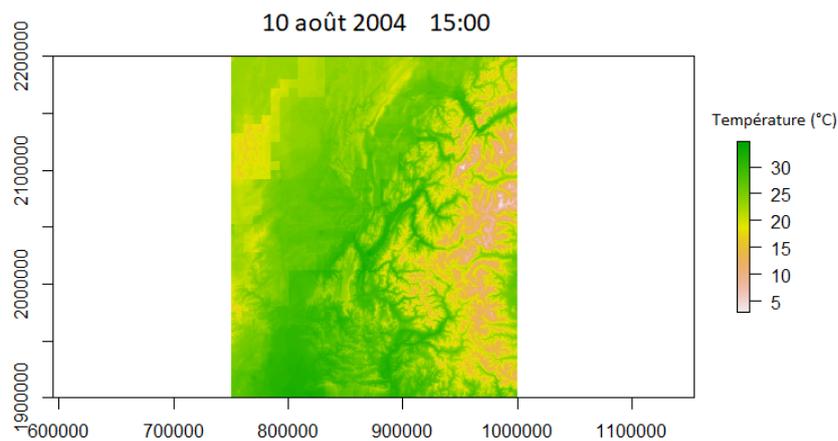


FIGURE 6 – Température Spazm désagrégé le 10 août 2004 à 15h sur la totalité du domaine Spazm - Alpes du Nord. Les carrés bien identifiables correspondent aux pixels Safran.

Concernant les températures, les possibilités de diagnostic sont plus limitées. On constate sur la figure 6 que le masque de la grille Safran apparaît sur la grille Spazm désagrégé, même si le phénomène est beaucoup moins marqué que pour les précipitations. On peut l'expliquer par les différences entre les heures d'occurrence des températures extrêmes sur deux pixels Safran voisins ce qui introduit un décalage. De manière générale, l'incertitude sur la répartition horaire des températures est très réduite par rapport à celle sur les précipitations. L'évolution infra-journalière des températures entre deux extremums peut généralement être modélisée sans trop d'erreur par une courbe de type sinusoïde. Les heures d'occurrence des températures minimale et maximale peuvent également être estimées simplement avec une incertitude relativement faible, hors situation météorologique locale particulière. Dans le cas de Safran, les températures sont également réajustées en fonction du bilan de transfert radiatif, ce dernier dépendant entre autre de la nébulosité.

4 Conclusions

Un des objectifs du projet HYDRODEMO consiste à produire des séries de débits simulés sur une longue période temporelle sur un échantillon de petits bassins versants torrentiels des Alpes du Nord. Afin d'exploiter les réanalyses Spazm de précipitation et de température disponibles au pas de temps journalier sur la période 1958-2017 comme forçages météorologiques, une méthode de désagrégation temporelle (journalier vers horaire) a été proposée. Plusieurs approches ont été envisagées, la méthode retenue consistant à désagréger les forçages de température et de précipitation Spazm en utilisant les données Safran comme support. On dispose alors de grilles de précipitation et de température au pas de temps horaire à la résolution de 1 km x 1 km, sur un domaine qui couvre l'ensemble des Alpes du Nord, de 1958 à 2017.

Le diagnostic des forçages obtenus a été effectué de manière directe en analysant les cartes de précipitation et de température ainsi que de manière indirecte en utilisant les données en entrée d'un modèle hydrologique. Cette deuxième approche a permis de mettre en lumière la faiblesse principale de l'approche sélectionnée, à savoir des défauts dans la répartition horaire des précipitations. Cette limite peut représenter un frein potentiel à l'utilisation des données pour la modélisation hydrologique de petits bassins versants caractérisés par un temps de réponse rapide et pour lesquels la bonne représentation des forçages au pas de temps horaire est primordiale.

L'évaluation des performances du modèle hydrologique sur la totalité des bassins versants étudiés et selon plusieurs critères de performance permettra d'évaluer dans quelle mesure les limites observées ont un impact sur les résultats.

Références

- BREINL, K. et DI BALDASSARRE, G. (2019). Space-time disaggregation of precipitation and temperature across different climates and spatial scales. *Journal of Hydrology : Regional Studies*, 21 :126–146.
- EVIN, G., FAVRE, A.-C. et HINGRAY, B. (2018). Stochastic generation of multi-site daily precipitation focusing on extreme events. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1) :655–672.
- 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, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- LOBLIGEOIS, F. (2014). *Mieux connaître la distribution spatiale des pluies améliore-t-il la modélisation des crues ? Diagnostic sur 181 bassins versants français*. Thèse de doctorat, AgroParisTech.
- MAGAND, C. (2014). *Influence de la représentation des processus nivaux sur l'hydrologie de la Durance et sa réponse au changement climatique*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- MAGAND, C., DUCHARNE, A., TILMANT, F., LE MOINE, N., SAUQUET, E., MATHEVET, T., VIDAL, J.-P. et PERRIN, C. (2018). Hybridation de réanalyses météorologiques de surface pour les zones de montagne : exemple du produit duo sur le bassin de la durance. *La Houille Blanche*, 3 :77–85.
- QUINTANA SEGUI, P. (2008). *Simulation hydrologique en région méditerranéenne avec SAFRAN-ISBA-MODCOU. Amélioration de la physique et évaluation des risques dans le cadre du changement climatique*. Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier.
- ROGER, L. (2017). Validation et utilisation climatologiques de la ré-analyse de lame d'eau radar Comephore étendue. Stage de fin d'étude, Météo-France, Toulouse. 77 p.
- VIDAL, J.-P., MARTIN, E., FRANCHISTÉGUY, L., BAILLON, M. et JEAN-MICHEL., S. (2010). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over france with the safran system. *International Journal of Climatology*, 30(11) :1627–1644.



Centre Center Lyon-Grenoble - Auvergne-Rhône-Alpes
2 rue de la Papeterie BP 76,
38 402 St-Martin-d'Hères - France

Rejoignez-nous sur :



<https://www.inrae.fr/centres/lyon-grenoble-auvergne-rhone-alpes>