



HAL
open science

Projet HYDRODEMO Évaluation de l'aléa torrentiel dans les petits bassins versants des Alpes du Nord - Action 2: Caractériser les scénarios atmosphériques gouvernant les crues torrentielles

Alix Reverdy, Juliette Blanchet, Périne Kiennemann

► To cite this version:

Alix Reverdy, Juliette Blanchet, Périne Kiennemann. Projet HYDRODEMO Évaluation de l'aléa torrentiel dans les petits bassins versants des Alpes du Nord - Action 2: Caractériser les scénarios atmosphériques gouvernant les crues torrentielles. [Rapport de recherche] Université Grenoble Alpes; CNRS; IGE. 2022. hal-03566424

HAL Id: hal-03566424

<https://hal.science/hal-03566424>

Submitted on 11 Feb 2022

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.



Projet HYDRODEMO

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

Action 2 : Caractériser les scénarios atmosphériques gouvernant les crues torrentielles



HYDRODEMO

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

Action 2 : Caractériser les scénarios atmosphériques gouvernant les crues torrentielles

Alix Reverdy¹, Juliette Blanchet¹, and Périne Kiennemann^{1,2}

¹CNRS, Univ. Grenoble Alpes, IGE, 3800, Grenoble, France

²ENM, Météo France, 31057, Toulouse, France

11 février 2022



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional



EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

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.

Ce rapport est publié sous Licence Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

Citation : Reverdy, A., Blanchet, J., Kiennemann, P. 2022. *Projet HYDRODEMO - Action 2 : Caractériser les scénarios atmosphériques gouvernant les crues torrentielles* [Rapport de Recherche] IGE

Résumé

Les crues torrentielles sont un facteur majeur de dommages matériels et humains dans les régions de montagne, mais leur étude nécessite des jeux de données de précipitations ou de débits horaires et à forte résolution spatiale, qui sont rares ou inexistantes. Dans cette Action 2 du projet HYDRODEMO, nous proposons de croiser une base de données de dates d'occurrences de crues remarquées sur la métropole de Grenoble (Alpes françaises) entre 1850 et 2019, avec différents jeux de données atmosphériques afin de caractériser les scénarios atmosphériques les plus générateurs de crues torrentielles dans cette zone. Dans un premier temps, nous faisons usage de jeux de données existants : la classification de type de temps de Garavaglia et al. [2010] et celle de Lamb et les indicateurs de forme du champ d'altitude du géopotentiel de Blanc et al. [2021]. Puis, de nouveaux indicateurs portant notamment sur la CAPE, l'humidité et le vent sont développés à partir de la réanalyse 20CRv2c. Une méthodologie basée sur la comparaison de la distribution des indicateurs pour les dates de crue et pour le reste de la climatologie est mise en place afin d'évaluer le pouvoir discriminant de ces indicateurs. La majorité des crues a lieu en été, avec un maximum secondaire en hiver. Les conditions atmosphériques des crues hivernales sont les plus caractéristiques, avec un flux d'altitude zonal marqué et peu singulier, associé à un fort transport d'humidité, le plus souvent sous forme de rivière atmosphérique. Les crues estivales sont issues d'une variété d'influences atmosphériques, avec aussi bien des flux zonaux, que méridionaux ou des situations orageuses locales. A part en conditions de marais barométriques, les conditions sont localement humides et instables relativement à la saison et au type de temps considéré. La persistance d'un type de temps pour quelques jours est aussi une condition nécessaire aux développements de conditions génératrices de crues. La discrimination entre les situations génératrices de crues et le reste de la climatologie a été améliorée comparativement aux indicateurs de Blanc et al. [2021] appliqués aux crues torrentielles, notamment avec des indicateurs comme la quantité d'eau précipitable au-dessus des alpes françaises ou la détection des rivières atmosphériques. Les résultats sont peu sensibles au choix du membre de la réanalyse 20CRv2c, mais sont améliorés de manière conséquente lorsque l'on utilise à la place la réanalyse ERA5.

Torrential floods are a major factor of human and property damages in mountain regions, but their study requires extensive precipitation or discharge data at hourly timestep and high spatial resolution, that prove rare or nonexistent. In this Second Action of the HYDRODEMO project, we will combine a database of noticable flood occurrences over Grenoble Metropolis (French Alps) between 1850 and 2019, with different atmospheric datasets in order to isolate scenarios that generate floods over this area. First, we used existing datasets, Garavaglia et al. [2010] weather types classification and the one from Lamb, and the shape indicators for the field of the geopotential altitude from Blanc et al. [2021]. Then, new indicators regarding CAPE, IVT, humidity and wind were developed from 20CRv2c reanalysis, along with a method to evaluate their differentiating power based on the comparison of their distribution for flood occurrences relative to the climatology. Most floods happen during summer, with a secondary maximum in winter. Atmospheric conditions for winter floods are the most characteristic, with a strong and unsingular zonal flux, associated with a strong moisture transport, often through an atmospheric river. Summer floods originate from a diversity of atmospheric influences : zonal fluxes, as well as meridional ones or local thunderstorms. Apart from barometric swamps, conditions are locally unstable and moisty relative to the season and weather type considered. Persistency of the weather types over a few days is also a prerequisite for flood generating conditions to occur. The differentiation between flood generating conditions and the rest of the climatology has been improved compared to when applying Blanc et al. [2021] indicators to torrential floods, notably with variables such as precipitable water over the French Alps or atmospheric river detection. The choice of the 20CRv2c member has few impacts on the results, but they are improved quite significantly by the use of the ERA5 reanalysis.

Remerciements

Nous tenons à remercier tous les acteurs qui ont contribué à l'aboutissement de cette étude :

- Les agents de l'ONF-RTM pour leurs archives et les données SIG de leur base de données et leurs retours sur la base de données RTM-IGE.
- Gilles Delaygues, Paul James et Marc Lemus Cánovas pour leurs données et leur conseils sur les classifications de circulation atmosphérique.
- Jean-Dominique Creutin, Antoine Blanc, Loïc Orillard, Jules Boulard et Mathieu Dode pour les travaux ayant précédé cette étude et/ou l'ayant nourri durant son développement.
- L'ensemble des acteurs internes et externes du projet HYDRODEMO pour les retours constructifs tout au long de la construction de notre étude.
- Le personnel technique et administratif de l'IGE pour le support indispensable à la recherche.

Table des matières

1	Introduction	6
1.1	Le projet HYDRODEMO	6
1.2	Pourquoi l’Action 2 : Caractériser les scénarios atmosphériques gouvernant les crues torrentielles ?	7
2	Matériels et Méthodes	10
2.1	Zone d’étude	10
2.2	Rappel sur les données	13
2.3	Méthodologie	14
2.3.1	Classifications de type de temps	17
2.3.2	Rivières atmosphériques	17
2.3.3	Indicateurs hydrométéorologiques du géopotentiel	19
2.3.4	Autres indicateurs hydrométéorologiques	22
2.3.5	Paramètres géomorphologiques	28
3	Résultats	30
3.1	Classifications de type de temps	30
3.1.1	Classification EDF	30
3.1.2	Classification Lamb	34
3.2	Indicateurs hydrométéorologiques du géopotentiel	42
3.3	Autres indicateurs hydrométéorologiques	50
3.3.1	Autres indicateurs	50
3.3.2	Rivières atmosphériques	56
3.4	Indicateurs et paramètres géomorphologiques	57
4	Discussion	70
4.1	Limitations de la base de données RTM-IGE	70
4.2	Classifications de type de temps	70
4.2.1	Classification EDF	70
4.2.2	Classification Lamb	71
4.3	Indicateurs hydrométéorologiques du géopotentiel	72
4.4	Autres indicateurs hydrométéorologiques	74
4.5	Indicateurs et paramètres géomorphologiques	77
5	Conclusion	78
	Bibliographie	81
	ANNEXES	84
A	Classification de Type de Temps Lamb pour les membres 2 et moyen de 20CR	84
B	Performances des indicateurs hydrométéorologiques	89

1 Introduction

1.1 Le projet HYDRODEMO

Le projet HYDRODEMO a pour objectif de mieux connaître les aléas et risques liés aux crues torrentielles dans les Alpes du Nord pour pouvoir *in fine* mieux s'en prémunir. L'occurrence et la concomitance d'épisodes pluvieux intenses sur des sols plus ou moins pré-saturés génèrent, dans les Alpes du Nord comme ailleurs, des crues des cours d'eau. Dans les zones montagneuses, le relief donne aux écoulements l'énergie pour éroder, transporter et déposer des matériaux sédimentaires. Ces processus aggravent régulièrement les dommages associés aux inondations. 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. Le projet est organisé en cinq actions (Fig. 1).

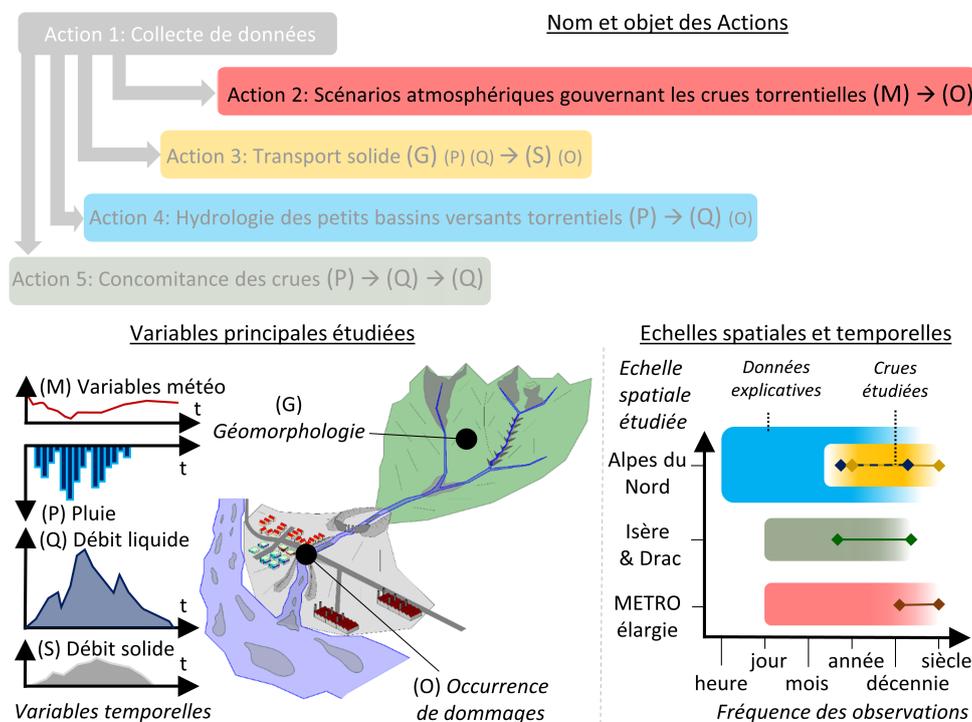


FIGURE 1 – Organisation générale des Actions du projet HYDRODEMO

- **L’Action 1** vise à faire la synthèse des données mobilisées par l’ensemble des autres Actions ;
- **L’Action 2**, objet du présent rapport, vise à caractériser les scénarios atmosphériques gouvernant les crues torrentielles qui ont sévi historiquement dans la région Grenobloise ;
- **L’Action 3** vise à caractériser l’activité de transport solide associée aux crues torrentielles via les données de curage des plages de dépôt équipant les torrents des Alpes du Nord ;
- **L’Action 4**, vise à développer un cadre de modélisation hydrologique pour les bassins versants torrentiels des Alpes du Nord ;
- **L’Action 5**, utilise des outils de modélisation hydrologique pour l’analyse des concomitances de crues torrentielles sur les bassins versants et sous-bassins versants de l’Isère et du Drac.

Cette nouvelle connaissance scientifique permettra à l'avenir de mieux comprendre les phénomènes associés aux aléas torrentiels, de mieux les prévenir et d'améliorer l'alerte à la population.

1.2 Pourquoi l'Action 2 : Caractériser les scénarios atmosphériques gouvernant les crues torrentielles ?

L'estimation de l'aléa dû aux phénomènes torrentiels nécessite de comprendre les facteurs conduisant à leur déclenchement. Le plus souvent, dans le cadre plus global de l'estimation du risque hydrologique, cela passe par l'analyse de chroniques de débits ou de précipitations ou le calage d'un modèle hydrologique afin de déterminer une intensité pour un temps de retour donné. Contrairement aux crues de rivière, les phénomènes torrentiels sont courts et localisés, leur étude nécessite donc des données horaires à haute résolution spatiale (de l'ordre de la dizaine de kilomètres carrés). Mais dans le cas des bassins versants torrentiels et en territoire de montagne, la mesure de la précipitation s'accompagne de forts problèmes d'hétérogénéité spatiale [gradient altitudinaux, effets orographiques Gottardi et al., 2012] et de fiabilité de la mesure (problèmes liés à la mesure de la précipitation solide et influence du vent, difficultés techniques de maintenir un réseau d'observations [Kochendorfer et al., 2017]). De plus, il existe peu de séries d'observations de précipitations horaires remontant au début du vingtième siècle et permettant donc d'estimer des temps de retour importants. Pour la région grenobloise c'est le cas de seulement 3 pluviomètres : Charavines 1893-présent, Engins 1905-2018, Monestier 1905-présent (Météo France, communication personnelle 2021) ; qui ne permettent donc pas une représentation fiable de la pluie à l'échelle des bassins versant torrentiels. Ce problème de couverture spatiale et temporelle est encore plus marqué pour les séries de données hydrologiques, avec très peu de bassins versants instrumentés et encore moins sur le long terme. Sur la Métropole grenobloise, seuls 4 torrents ont des chroniques de débit disponibles (Doménon 2018-actuel au pas de temps horaire, Sonnant discontinu depuis 1997, Furon, Vence) et aucune n'est suffisamment ancienne pour estimer des temps de retour longs (Céline Thomas, Grenoble-Alpes Métropole, communication séminaire PARN Risque torrentiel en montagne, 9 décembre 2020). En ce qui concerne l'usage de modèle hydrologiques, ils sont aussi limités par la disponibilité de données de débit de calage et de données météorologiques et notamment de précipitations pour leur forçage, avec encore une fois des problématiques de couverture spatiale et temporelle.

Une approche permettant de contourner ces besoins de mesures à haute résolution spatiale et temporelle en chaque bassin versant et pour de longues périodes de temps, est de s'intéresser aux facteurs atmosphériques grande échelle générant des réactions locales mais simultanées et/ou intenses sur un ou plusieurs bassins versant torrentiels. Cela repose sur l'hypothèse qu'à partir d'une certaine intensité ou emprise les événements torrentiels ont une signature atmosphérique grande échelle. Ces données atmosphériques grandes échelles (champs de pression, de température, d'humidité, de vent...) présentent l'avantage d'être plus largement disponibles dans le passé et plus continus spatialement, permettant des jeux de données plus fiables, même si extrapolés le plus souvent à partir de mesures ponctuelles au sol. Dans la littérature plusieurs grandes approches ont été employées afin de relier événements hydrométéorologiques extrêmes et conditions atmosphériques grande échelle :

- L'analyse qualitative de cartes de variables météorologiques.
- Le calcul d'indicateurs statistiques résumant l'état de l'atmosphère pour une ou plusieurs variables.
- L'utilisation de types de temps groupant en classes des conditions atmosphériques similaires.

Ces approches ont été appliquées aussi bien aux extrêmes de précipitations, qu'aux extrêmes hydrologiques. Pour ce qui est des précipitations, Plaut et al. [2001] et Mastrantonas et al. [2021] ont établi des liens entre fortes précipitations de méso-échelle et classes de circulations atmosphériques/type de

temps, respectivement pour la période 1971-1995 dans l'ensemble des Alpes et 1979-2019 pour le bassin Méditerranéen. Lavers and Villarini [2013] quant à eux ont établi un lien entre maxima annuels de précipitation à méso-échelle et les occurrences de rivières atmosphériques en Europe (1979-2011). Dans Blanchet et al. [2018], Blanchet and Creutin [2020], Blanc et al. [2021], les auteurs caractérisent les situations de précipitations extrêmes cumulées à l'échelle d'un bassin versant de rivière (Isère) à l'aide d'indicateurs statistiques portant sur la forme du champ de géopotentiel (1950-2011). Ces études sont toujours conduites à méso-échelle et uniquement sur les précipitations, pour la seconde moitié du vingtième siècle.

D'autres études se sont intéressées directement au lien entre conditions atmosphériques et extrêmes hydrologiques. Froidevaux and Martius [2016] ont montré par une analyse qualitative de cartes météorologiques, l'importance du transport de vapeur d'eau dans un flux perpendiculaire au relief, pour les inondations d'échelle régionale en Suisse entre 1987 et 2011. Prudhomme and Geneviev [2011] croisent des catalogues de classification de type de temps avec les occurrences de crues pour une vaste gamme de taille des bassins versants (de quelques dizaines de km² à plusieurs milliers) en Europe (1957-2002), afin de déterminer les types de temps les plus générateurs de crues suivant les régions. Cette approche d'utiliser une classification de circulations atmosphériques pour isoler des situations davantage génératrices de forts débits est largement utilisée dans la littérature. Ainsi, Petrow et al. [2009], Bárdossy and Filiz [2005], Jacobeit et al. [2006], Caspary [1995] ont appliqué cette approche à des bassins versants de 100 km² à plus de 1000 km² (respectivement en Allemagne 1951-2002, France et Espagne 1951-1990, Allemagne 1926-1995 et Europe centrale 1948-2002) et pour des temps de retour hydrologiques de l'ordre de l'annuel. Notamment, Petrow et al. [2009], Caspary [1995] ont mis en évidence un changement conjoint des circulations atmosphériques et des réactions hydrologiques intenses. Seule l'étude de Caspary [1995] remonte plus loin que le milieu de 20^e siècle, jusqu'en 1926, mais pour des bassins versants de l'ordre du millier de kilomètres carrés. L'ensemble de ces études s'est intéressé à des bassins versants de méso-échelle jusqu'à l'échelle régionale et à notre connaissance seuls Turkington et al. [2014] se sont intéressés à des bassins versants de l'ordre de la dizaine de kilomètres carrés. Ils ont développé des indicateurs météorologiques permettant d'isoler les situations génératrices de coulées de débris et de crues éclairs dans la région de l'Ubaye, mais cela uniquement entre 1979 et 2010.

Très peu d'études ont donc caractérisé les scénarios atmosphériques à l'origine des crues pour les petits bassins versants torrentiels de montagne. A notre connaissance aucune étude n'a appliqué une telle approche à cette échelle avant les années 1950, et donc disposé d'un échantillon d'extrêmes hydrologiques suffisamment important pour étudier des temps de retour longs. De plus, l'application de ces méthodes à l'échelle du territoire hydrologique d'une Métropole de montagne que nous nous proposons de conduire est aussi un élément novateur.

Dans l'Action 2 du projet HYDRODEMO : " Caractériser les scénarios atmosphériques gouvernant les crues torrentielles" ; nous nous proposons donc d'étudier les conditions atmosphériques à l'origine des crues torrentielles dommageables du "Y" Grenoblois depuis les années 1850 et jusqu'en 2019, afin d'isoler les scénarios météorologiques les plus générateurs de crues. Dans ce but, nous nous baserons sur les occurrences de crues dommageables référencées dans une base de données développée à l'IGE [Creutin et al., In Press] à partir notamment des observations des services de l'Etat. Nous croiserons ces dates de réaction avec différents jeux de données atmosphériques :

- 2 classifications de circulations atmosphériques [Garavaglia et al., 2010, Jenkinson and Collison, 1977].
- Les indicateurs de forme du champ de géopotentiel développés dans Blanc et al. [2021].
- Un nouveau jeu d'indicateurs atmosphériques portant sur d'autres variables et développés dans le cadre de cette étude.

Ces indicateurs permettront de résumer l'état de l'atmosphère aux dates de réactions hydrologiques, afin d'isoler les comportements météorologiques générateurs de crues torrentielles. Enfin, nous nous intéresserons aux potentiels liens entre les caractéristiques géomorphologiques des bassins versants, mises en évidence dans l'Action 3 du projet HYDRODEMO, et les indicateurs hydrométéorologiques aux dates de réaction.

Le suite de ce rapport est organisé en 4 parties. Dans la section 2 nous présenterons la zone d'étude, reviendrons succinctement sur les données utilisées et développerons la méthode mise en oeuvre. La section 3 présentera les résultats obtenus avec les différentes approches présentées dans le paragraphe précédent. Ces résultats et leurs implications seront discutés, ainsi que les limites des méthodes utilisées dans la section 4, avant de conclure et d'ouvrir des perspectives pour les suites à donner à cette étude dans la section 5.

2 Matériels et Méthodes

Dans cette section nous présenterons la zone concernée par l'étude menée dans le cadre de l'Action 2, puis nous reviendrons brièvement sur les données utilisées (explicitées plus en détail dans le rapport portant sur l'Action 1), avant de finalement présenter la méthode mise en oeuvre.

2.1 Zone d'étude

Cette partie du projet se concentre sur le territoire de la Métropole Grenobloise, dans les Alpes françaises. Plus précisément les bassins versants torrentiels considérés sont ceux qui intersectent le territoire des 75 communes comprises dans la Métropole Grenobloise¹ et/ou l'unité urbaine INSEE de Grenoble². Ce territoire se trouve à la confluence de deux rivières l'Isère et le Drac, alimenté plus en amont par une troisième la Romanche. La surface amont de ces deux grands bassins versants est illustrée en noir sur la Figure 2, tandis que le contour de la surface couverte par l'ensemble des bassins versants torrentiels du territoire est illustré en liseré rouge.

En plus des trois tronçons de rivières, séparant les massifs montagneux calcaires du Vercors et de la Chartreuse et le massif cristallin de Belledonne (Figure 3), le territoire est couvert par 139 unités torrentielles telles que définies par le RTM et au sein de la BD RTM-IGE (voir Action 1 pour un descriptif détaillé). Ces entités torrentielles sont illustrées en Figure 3, avec leur nombre de crues telles que référencées dans la BD RTM-IGE. On peut voir que le comportement hydrologique de ce territoire, appelé par la suite "Y grenoblois" de part sa géométrie, est très varié avec des "points chauds" comme les torrents du Manival, du Rif Talon ou du Charmeyran bien connus des autorités locales.

La variété des unités torrentielles tient aussi à leur caractéristiques géomorphologiques avec des superficies inférieures à 1 km² jusqu'à 170 km² pour le torrent de la Gresse, malgré une majorité de bassins de moins de 20 km² (4). Les altitudes sont comprises entre 180 m et 2977 m. La ville de Grenoble a une température moyenne annuelle d'environ 12°C, pour un cumul de précipitation annuel moyen de l'ordre de 1000 mm [France, 2010]. Ces valeurs ne sont pas représentatives de la zone d'étude du fait de l'orographie et des gradients altitudinaux de précipitation et de température, ainsi que de l'hétérogénéité spatiale des précipitations.

Dans les Alpes les sources d'humidité pour les précipitations sont multiples, avec beaucoup de vapeur d'eau originaire de la Méditerranée, malgré davantage de contribution de l'Atlantique Nord en hiver et des Alpes elle-mêmes en été [Sodemann and Zubler, 2009]. D'un point de vue climatologique le "Y grenoblois" est considéré comme étant à la limite de deux zones climatiques distinctes : les Alpes du Nord-Ouest et les Alpes du Sud-Ouest telles que définies par Auer et al. [2007] sur la base de la température, la précipitation, l'humidité, l'ensoleillement et d'autres critères climatologiques. En ce qui concerne les précipitations extrêmes cela se traduit par une dominance de flux méditerranéens pour les massifs au Sud de notre région et de flux océaniques pour ceux au Nord [Blanchet et al., 2020]. Le "Y grenoblois" est donc soumis à une diversité d'influences météorologiques tant dans sa climatologie, que dans ses extrêmes hydrométéorologiques et avec une forte variabilité saisonnière. Cela se traduit par une large gamme de phénomènes météorologiques pouvant causer de fortes précipitations localement : blocage orographique sous anafront froid en flux de Sud, blocage orographique sous front chaud en flux d'ouest dynamique, soulèvement orographique avec des dynamiques de Nord ou d'Ouest, développements convectifs par évolution diurne [Kiennemann, 2021]. Cela justifie la nécessité de caractériser les scénarios atmosphériques générateurs de crues torrentielles sur un échantillon de

1. Liste : <https://www.grenoblealpesmetropole.fr/11-49-communes.htm>

2. Liste : <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/cog/unite-urbaine-2010/UU201038701-grenoble>

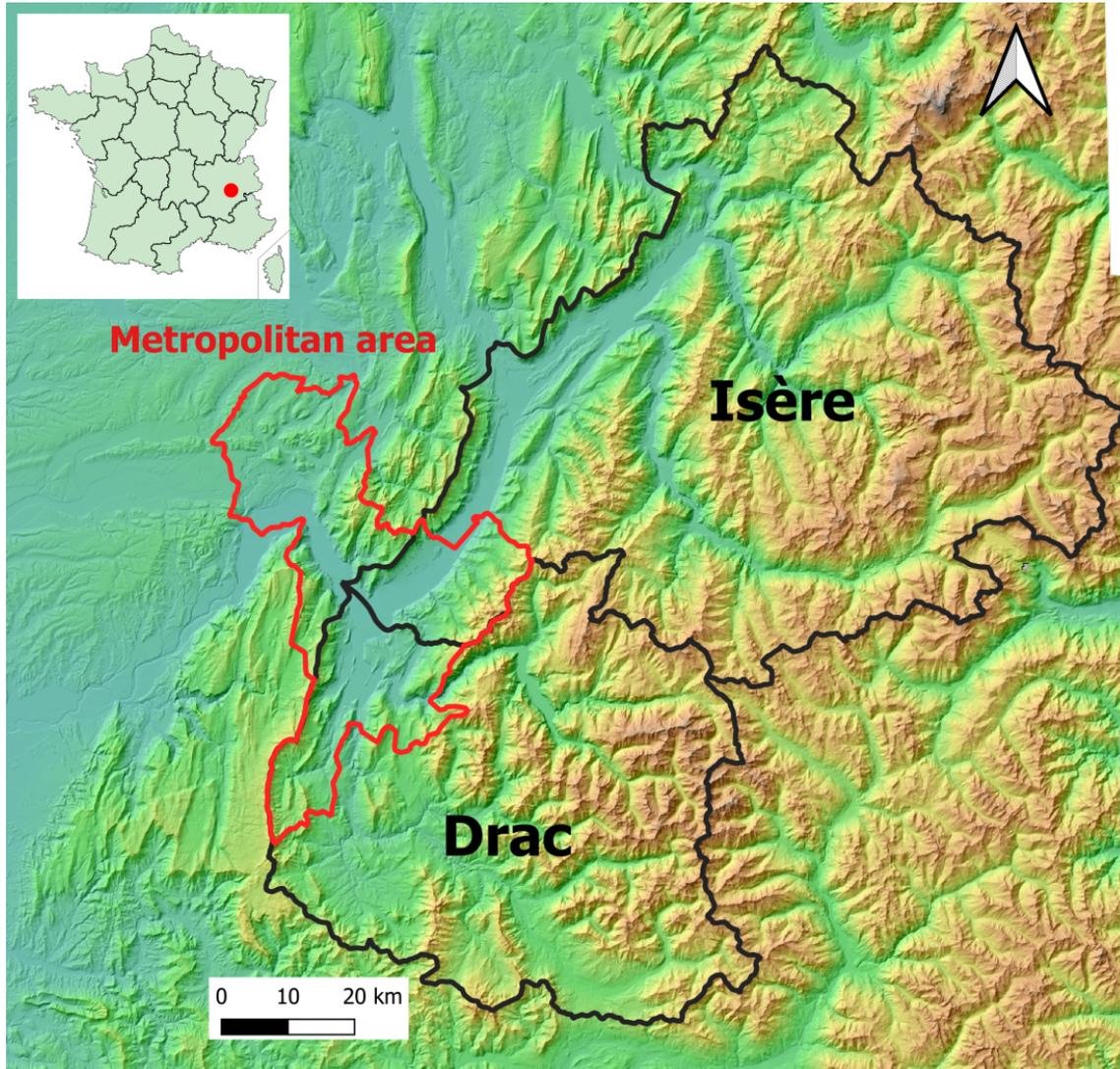


FIGURE 2 – Situation et contexte hydrologique de la zone d'étude de l'Action 2 (en rouge) au sein des bassin versants du Drac et de l'Isère (en noir).

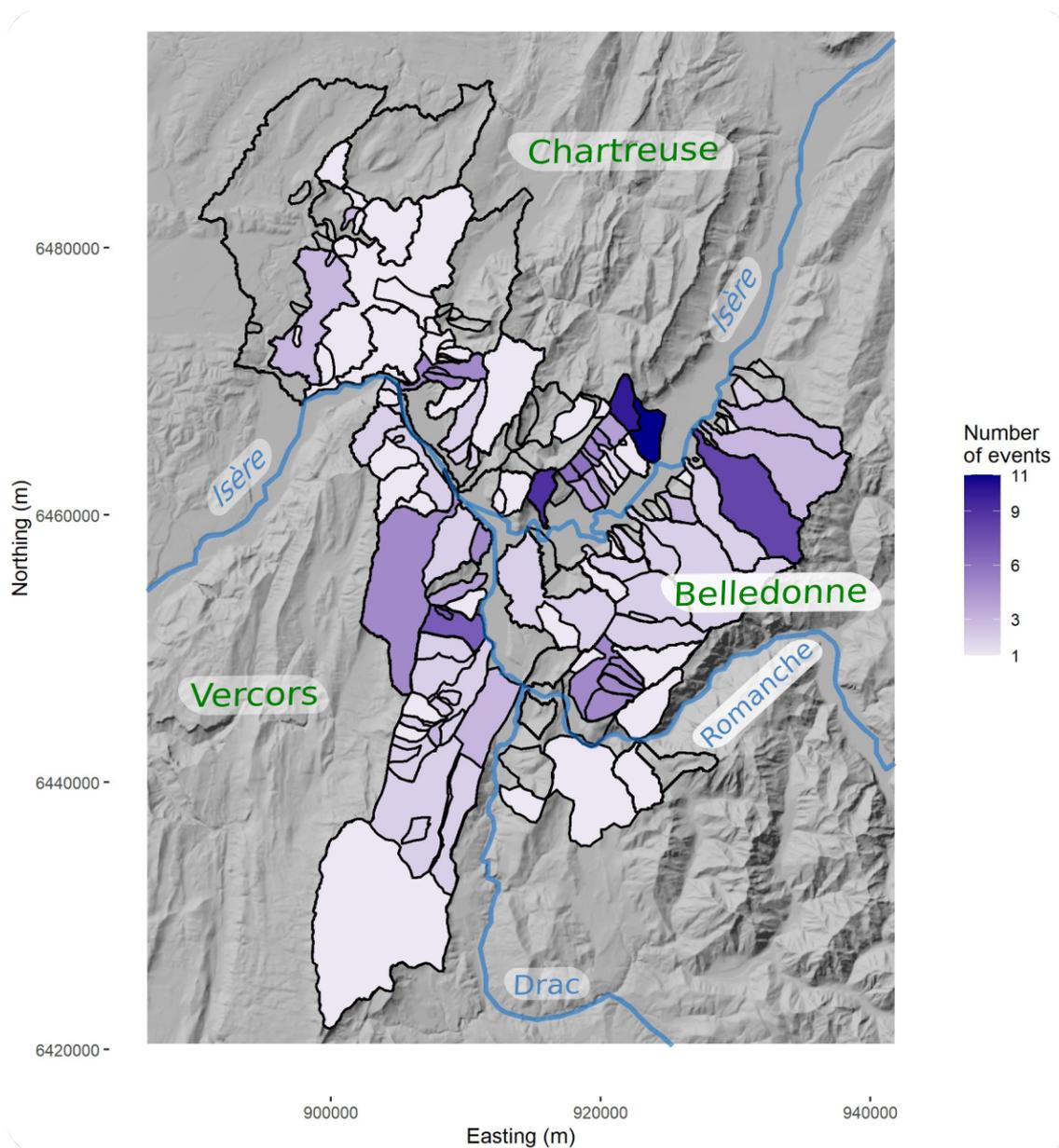


FIGURE 3 – Contexte géographique de la zone d'étude et nombres d'évènements référencés dans la BD RTM-IGE par unité torrentielle (1850-2019).

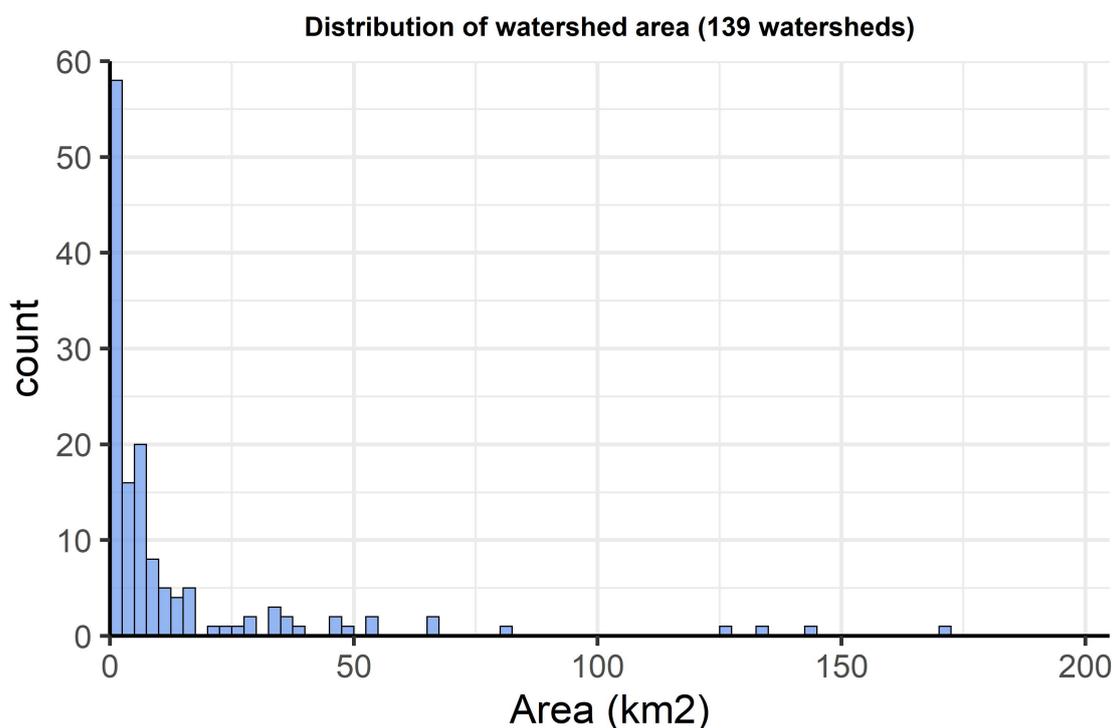


FIGURE 4 – Distribution des superficies des 139 unités torrentielles de la BD RTM-IGE.

données suffisamment étendu et conséquent.

2.2 Rappel sur les données

Dans le cadre de l’Action 2 du projet HYDRODEMO, plusieurs jeux de données ont permis de mener à bien le travail de recherche. Ces jeux de données sont détaillés dans le rapport concernant l’Action 1 de ce même projet, nous nous contenterons donc ici de brièvement résumer leur contenu et leur usage dans le cadre de ce travail et renvoyons le lecteur vers le rapport sur l’Action 1 pour plus de détails.

La référence en ce qui concerne les crues torrentielles est donnée par la BD RTM-IGE [Creutin et al., In Press]. Cette base de données recense des évènements hydrométéorologiques d’un à plusieurs jours ayant provoqué des réactions d’un ou plusieurs torrents et une ou plusieurs rivières qui ont causé des dégâts remarquables. Elle couvre le territoire présenté dans la section 2.1 (139 unités torrentielles et 3 rivières). Elle présente 104 évènements entre 1850 et 2019, parmi lesquels nous avons retenu 70 évènements présentant au moins une crue torrentielle. Ces 70 dates ou séquences de dates de réactions constituent les dates de référence pour l’étude des conditions atmosphériques associées aux crues torrentielles. Pour davantage d’analyses portant sur les caractéristiques de ces évènements hydrométéorologiques, le lecteur est renvoyé vers Creutin et al. [In Press], ce travail dépassant le cadre du projet HYDRODEMO.

Afin de caractériser ces conditions atmosphériques, 2 types de jeux de données différents ont été utilisés.

- Deux réanalyses atmosphériques qui sont des interpolations spatiales et temporelles de mesures météorologiques passées à l’aide de techniques d’assimilation de données et d’un modèle météorologique. 20CRv2c (par la suite 20CR) couvre la période 1851-2014 avec une résolution spatiale

de 2° [Compo et al., 2011]. Nous avons utilisé les données des membres 1, 2 et moyen en moyenne journalière. Nous nous sommes limités à ces 2 membres sur les 56 pour des problématiques de puissance de calcul et de téléchargement. Ils permettent néanmoins aux côtés du membre moyen une première analyse de sensibilité, ces membres étant équiprobables. Nous n'utilisons pas le membre moyen seul, car il a été montré qu'il avait tendance à trop lisser les champs météorologiques au 19^e siècle (A. Blanc et J. Boulard, communication personnelle, 2021). Cette réanalyse étant actuellement la seule à remonter jusqu'en 1851, elle constitue notre jeu de données principal. En complément, afin d'étudier l'impact du choix de la réanalyse, la réanalyse ERA5 [Hersbach et al., 2020], disponible seulement de 1950 à 2021 a été également étudiée. Cette réanalyse a par contre une plus haute résolution de 0.25° et des données d'entrée plus nombreuses et variées, constituant une bonne référence de comparaison. Les moyennes journalières ont également été utilisées.

- Deux classifications de circulations atmosphériques (ou type de temps (TT)), qui regroupent les journées en classes possédant la même direction générale de flux atmosphérique :
 - ★ La classification dite "EDF" [Gottardi et al., 2012] basée sur les précipitations et le géopotential à 700 hPa et 1000 hPa du Sud-Est de la France. Elle couvre la période 1948-2019. Dans le cadre de cette étude, les classes initiales ont été groupées en 4 grandes influences similairement à Blanchet et al. [2020] : Océanique, Méditerranéen, Continental et Anticyclonique (voir Figure 5).
 - ★ La classification de Lamb centrée sur 45°N/5°E [Jenkinson and Collison, 1977] basée sur les pression au niveau de la mer pour chacun des membres 1, 2 et moyen de la réanalyse 20CR. Elle couvre la période 1851-2014. Dans le cadre de cette étude, les classes initiales ont été groupées en 5 grandes influences similairement à [Kiennemann, 2021] : Nord à Ouest (N-W), Sud-Ouest à Sud-Est (SW-SE), Nord-Est à Est (N-NE), Hautes Pressions (HP) et Marais Barométrique (MB) (voir Figure 6).

2.3 Méthodologie

L'action 2 du projet HYDRODEMO vise à de caractériser les contextes hydrométéorologiques à l'origine des crues de torrents dans un contexte alpin. Pour cela, comme explicité précédemment, on se base sur les jours ou les séquence de jours de réactions torrentielles référencées dans la BD RTM-IGE. Pour ces dates, on va caractériser l'état de l'atmosphère à l'échelle synoptique, afin d'en extraire des motifs récurrents permettant de distinguer au mieux les dates d'occurrence de crues du reste de la climatologie. On définit ainsi des scénarios atmosphériques davantage générateurs de crues sur le "Y grenoblois". A terme, ces scénarios devraient permettre d'étudier l'évolution passée et future des conditions atmosphériques génératrices de crues, mais ce travail dépasse le cadre du projet HYDRODEMO. La caractérisation de l'état de l'atmosphère a été conduite à travers plusieurs approches.

Deux classifications de type de temps : EDF et Lamb, ont été utilisées pour caractériser les circulations atmosphériques grande échelle et les directions des flux d'altitude aux dates d'occurrence de crues. Un algorithme de détection des dates apparentées à des situations de rivières atmosphériques a été développé. Précisément, cet algorithme identifie les jours de transport zonal de vapeur d'eau intense et concentré sur une faible bande de latitude. Les réanalyses atmosphériques 20CR et ERA5 ont servies à calculer des indicateurs statistiques résumant dans un premier temps la forme du champ de géopotential, puis la valeur des différentes variables météo en chaque date. Ainsi, les dates d'occurrence de crues ont pu être comparées au reste de la climatologie. On dispose de 70 séquences d'occurrence de crue sur la période 1850-2019, mais de seulement 66 sur la période couverte par 20CR (1851-2014) et donc la classification Lamb, 46 sur la période d'ERA5 (1950-2019) et 46 pour la classification EDF (1948-2019). Enfin, ces différents paramètres ont été croisés à des variables géomorphologiques des

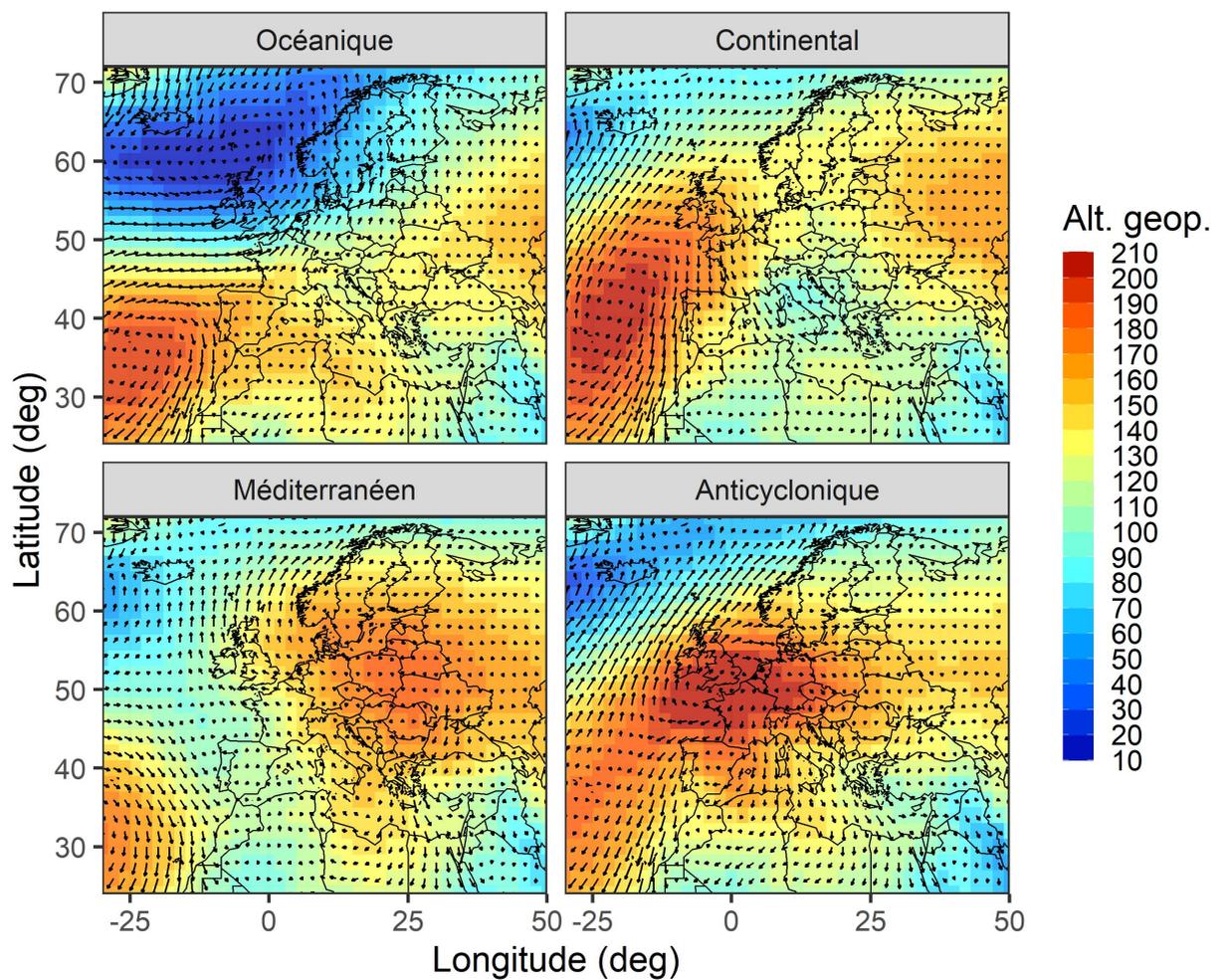


FIGURE 5 – Altitude moyenne du géopotiel à 1000 hPa (en mètres) et vecteurs vents associés (20CR membre 1) pour la classification EDF

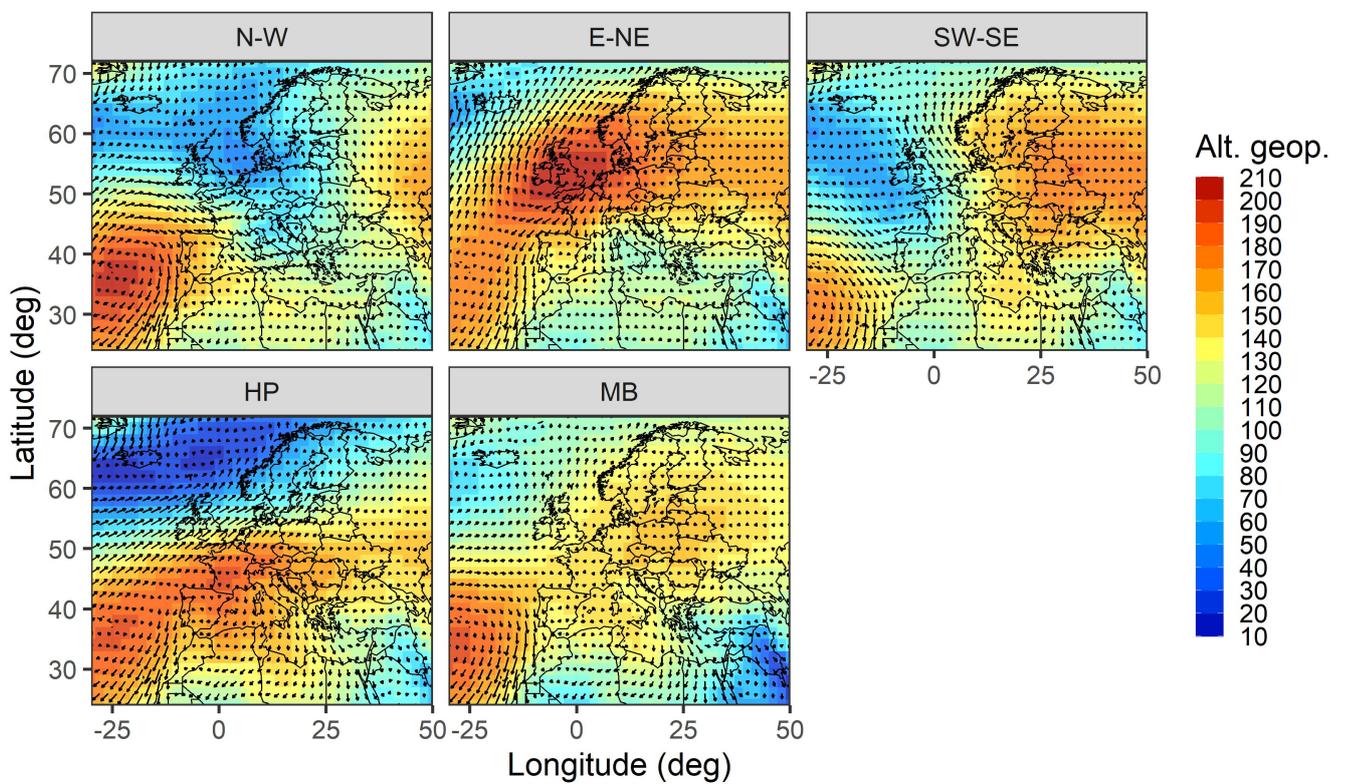


FIGURE 6 – Altitude moyenne du géopotential à 1000 hPa (en mètres) et vecteurs vents associés (20CR membre 1) pour la classification Lamb

bassins versants inspirées des travaux préliminaires de l'Action 3, pour étudier le lien potentiel entre géomorphologie, conditions atmosphériques et occurrences de crues.

2.3.1 Classifications de type de temps

La première classification de type de temps utilisée est celle d'EDF, dans sa version groupée à 4 classes. Elle a été choisie de par son développement centré sur les régions montagneuses du Sud-Est de la France et ses nombreuses applications sur les précipitations. Pour chaque date de référence d'occurrence de crues (la date pour les séquences de jour avec l'évènement le plus marquant), on extrait le type de temps correspondant. On étudie ainsi la répartition relative du type de temps de crues par rapport à la climatologie, ainsi que sa saisonnalité. La même approche est appliquée pour l'ensemble des dates des séquences d'occurrence de crues et pas seulement les dates de référence. Ensuite, on s'intéresse à la persistance des séquences de types de temps incluant les dates de référence des crues, quantifiée par le nombre de jours consécutifs (avant et après) avec le même type de temps que ces dates de référence. Enfin, on a également croisé le type de temps des occurrences de crues avec le nombre de torrents réagissants et leur localisation géographique.

Dans un second temps, nous avons appliqué la même approche pour la classification de Lamb groupée en 5 classes. Cette seconde classification de circulation atmosphérique a été sélectionnée pour compléter les résultats obtenus avec la première. En effet, elle apporte une information plus brute, basée uniquement sur la direction des flux d'altitude et permet de remonter jusqu'en 1851. On étudie comme précédemment la répartition du type de temps pour les dates de référence et l'ensemble des dates des séquences et sa saisonnalité, ainsi que la persistance. La méthode de calcul de la classification Lamb permettant de déterminer les classes pour différentes réanalyses, on étudie la sensibilité des résultats aux choix du membre 1, 2 ou moyen de 20CR ou au choix d'ERA5.

2.3.2 Rivières atmosphériques

Une autre approche a été appliquée en s'intéressant aux dates de fort transport de vapeur zonaux vers la région grenobloise. Ces situations sont caractérisées par une valeur de flux de vapeur d'eau dans la troposphère particulièrement élevée, le long d'une bande restreinte. Cette forme lui donne son nom de rivière atmosphérique (AR). Dans notre cas, on s'est intéressé aux situations de rivière atmosphérique touchant l'Europe de l'Ouest, avec un transport d'Ouest en Est. Comme illustré par le projet d'inter-comparaison des rivières atmosphériques ARTMIP³, il n'existe pas une définition univoque des rivières atmosphériques et la méthode de détermination est le plus souvent dépendante des données d'entrée et de la région.

Inspirés par Lavers and Villarini [2013], Wille [2019], nous avons donc développé notre propre algorithme de détection de rivières atmosphériques adapté à nos données et notre région (ou plus généralement de fort transport zonal de vapeur d'eau). En utilisant le membre 1 de 20CR, nous avons déterminé pour chaque jour en 1851 et 2014 si une rivière atmosphérique touchait les Alpes françaises ou non. Nous avons ensuite recoupé cette information avec les dates d'occurrence de crues.

L'estimation des AR s'est faite à partir des données de transport de vapeur d'eau intégré (IVT). Ce champ d'IVT a été calculé à partir des valeurs de vent méridionaux (v) et zonaux (u) et de l'humidité spécifique (Q) à 850, 700 et 500 hPa (équation 2).

3. <https://www.cgd.ucar.edu/projects/artmip/>

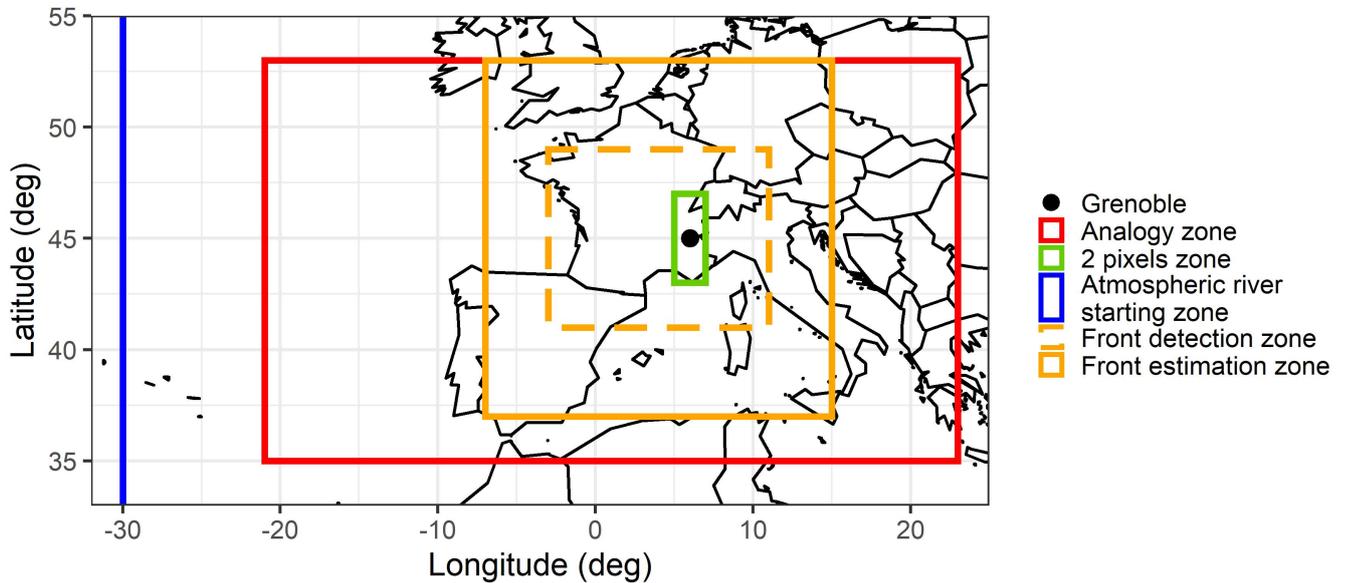


FIGURE 7 – Zones utilisées pour le calcul des indicateurs.

$$V = \sqrt{u^2 + v^2}, \tag{1}$$

$$IVT = \frac{-1}{g} * \int Q * V * dP, \tag{2}$$

avec V la vitesse du vent (équation 1), $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ et dP l'intervalle de pression. L'intégration est faite sur les 3 niveaux : 850 hPa, 700 hPa et 500 hPa.

Pour chaque date, on détecte si un groupe continu de pixels 20Cr (par leur bord(s)) avec une valeur d'IVT supérieur à un seuil donné, relie les pixels situés dans l'Atlantique Nord à 30°W, entre 24 et 72°N avec les 2 pixels 20CR entourant le "Y grenoblois" (soit approximativement les Alpes françaises). Ces zones sont illustrées dans la Figure 7.

Le seuil utilisé est le quantile 92.5% des valeurs d'IVT des deux pixels autour de Grenoble, soit une valeur de 154 kg/m/s. Ce seuil a été optimisé pour distinguer au mieux les situations de rivières atmosphériques des autres dates pour les dates de référence d'occurrence de crues. Cette optimisation s'est faite par inspection visuelle de cartes d'IVT. La Figure 8 illustre une situation typique de rivière atmosphérique pour la crue torrentielle du Rif Talon du 14/01/1899, avec un transport intense mais limité dans l'espace de vapeur d'eau de l'Atlantique Nord vers les Alpes françaises. Cette méthode

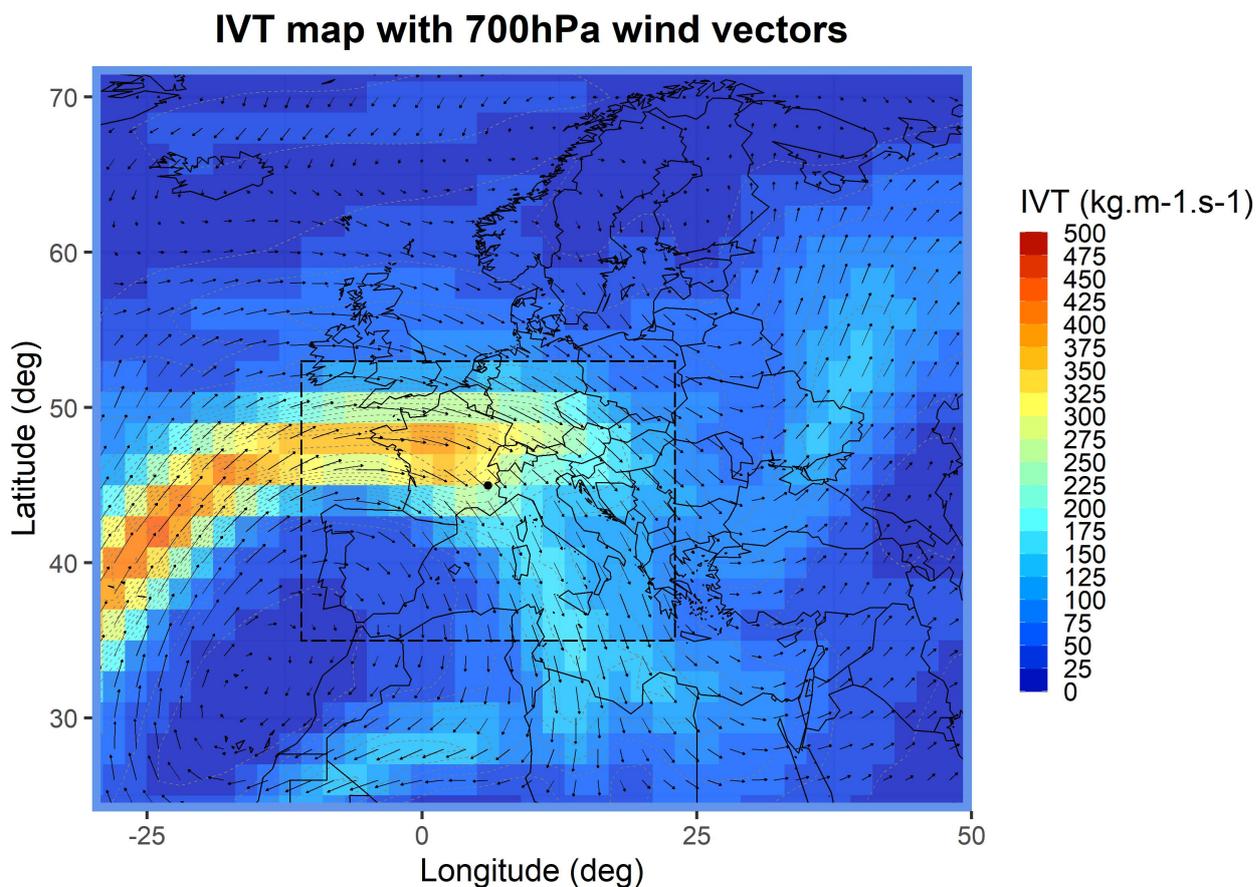


FIGURE 8 – Valeurs d’IVT du membre 1 de 20CR lors d’une situation de rivière atmosphérique (crue du Rif Talon du 14/01/1899). Les flèches indiquent les vecteurs du vent à 700 hPa.

présente une certaine subjectivité. Cependant, l’objectif n’est pas de déterminer au mieux les rivières atmosphériques, mais de pouvoir comparer crues et climatologie par rapport à des situations de fort transport zonal de vapeur. On compare donc ensuite l’occurrence des AR pour les dates d’occurrence de crues (en prenant en compte l’intégralité des séquences et une marge de ± 1 jour pour prendre en compte les crues ayant lieu en début ou fin de journée et la basse résolution journalière de nos données) et pour le reste de la climatologie.

Cette approche, ainsi que celle des classifications en type de temps, bien qu’apportant de précieuses informations complémentaires, sont limitées par le fait qu’elles classent les journées et sont donc des indicateurs discrets. Leur pouvoir discriminant entre situations de crues et climatologie est donc limité. Afin de mieux isoler le comportement atmosphérique des dates d’occurrence de crues du reste de la climatologie, il est donc intéressant d’utiliser également des indicateurs statistiques continus pour résumer l’état de l’atmosphère en chaque jour.

2.3.3 Indicateurs hydrométéorologiques du géopotentiel

Les premiers indicateurs calculés pour être croisés avec les dates de réaction hydrologiques découlent directement de travaux en cours au sein de l’IGE. Ces travaux visent à établir un lien entre indicateurs portant sur la forme du champ d’altitude du géopotentiel et précipitations intenses sur les bassins versants de l’Isère et du Drac. L’altitude du géopotentiel (par la suite géopotentiel) correspond à l’altitude

d’une pression donnée. Elle conditionne la position des centres dépressionnaires et de hautes pressions et donc l’intensité et la direction des circulations atmosphériques grande échelle. Nous appliquerons donc la célérité (cel), la singularité (sing) et la singularité relative (rsing) de Blanchet and Creutin [2020], ainsi que la différence maximale d’altitude du géopotential (MPD), la célérité des analogues (celnei), la singularité des analogues (singnei) et la singularité relative des analogues (rsingnei) de Blanc et al. [2021].

Le MPD d’un jour donné est la différence entre l’altitude minimale et l’altitude maximale du géopotential 500 hPa sur la fenêtre d’analogie (illustrée en Figure 7). Les autres indicateurs reposent sur l’étude de la forme du champ de géopotential 500 hPa (z). On caractérise la déformation spatio-temporelle (la modification dans le temps et l’espace des gradients) de ce champ entre 2 dates données par la métrique du Teweles-Wobus Score (TWS) [Teweles and Wobus, 1954].

$$TWS_{k,k'} = \frac{\sum_{j,j'} |(z_{jk} - z_{j'k}) - (z_{jk'} - z_{j'k'})|}{\sum_{j,j'} \max(|(z_{jk} - z_{j'k}), (z_{jk'} - z_{j'k'})|)}, \quad (3)$$

où k et k' les deux jours considérés, j un point de la fenêtre d’analogie et j' un point adjacent horizontalement ou verticalement.

La célérité est calculée à partir de la moyenne du TWS entre le jour de référence considéré et la veille, et le jour de référence et le lendemain. Une faible célérité correspond à une lente évolution du géopotential et donc une situation stationnaire. A l’inverse une forte célérité traduit des conditions synoptiques changeantes et un champ de géopotential très différent d’un jour à l’autre (Figure 9).

Les autres indicateurs reposent sur le principe d’analogie, c’est-à-dire que des situations similaires en terme de géopotential conduisent à des effets similaires sur les précipitations. On détermine les plus proches analogues d’une journée en prenant les 0.5% de dates avec le TWS le plus faible avec cette journée [Blanchet and Creutin, 2020]. La singularité est alors la moyenne du TWS de ces analogues avec le jour de référence. Une faible singularité est associée à des journées dont le champ de géopotential est fortement reproductible, tandis que les fortes valeurs sont liées à des champs très singuliers. Un géopotential est reproductible si on le retrouve reproduit similairement dans la climatologie, comme pour la journée illustrée en Figure 10a qui est un flux d’ouest que l’on retrouve de manière très similaire dans la climatologie. A l’inverse le géopotential de la Figure 10b est une situation de marais barométrique marqué très peu reproduite.

La singularité relative illustre la ressemblance d’un champ de géopotential à ses propres analogues : à quel point il est semblable aux champs qui lui ressemblent le plus. Une faible singularité relative est le signe d’un champ “attracteur”, qui ressemble beaucoup à ses analogues. La singularité relative est la singularité divisée par le TWS entre le jour de référence et son analogue le plus distant (le TWS maximal des analogues).

La celnei, singnei et rsingnei sont respectivement la moyenne des valeurs des analogues de cel, de sing et de rsing. Ces derniers indicateurs ont montré plus de robustesse lors de la modélisation des précipitations sur les bassin versants du Drac et de l’Isère [Blanc et al., 2021].

Ces indicateurs ont été calculés pour les membres 1, 2 et moyen de 20CR et pour ERA5. Nous présenterons principalement les résultats pour le membre 1 de 20CR. De précédentes études au sein de l’IGE ont montré une faible sensibilité au choix du membre (en dehors du membre moyen qui tend au 19e siècle à trop lisser le champ de géopotential). Similairement, d’autres travaux menés à l’IGE

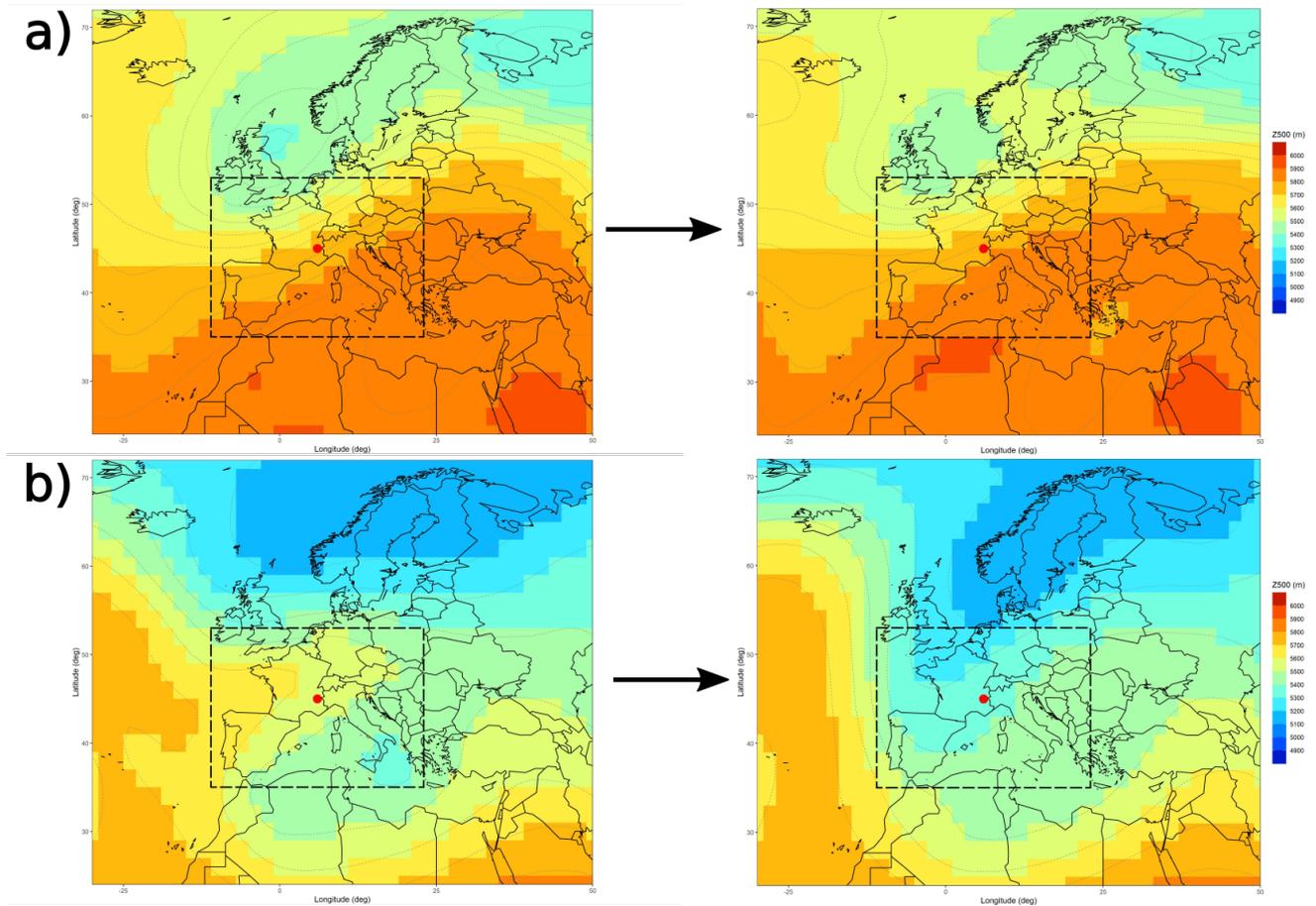


FIGURE 9 – Champs de géopotentiel 500 hPa : dépressions en bleu et haute pression en rouge. Grenoble est représenté par le point rouge et la zone d’analogie en pointillés noirs. a) Jour de plus faible célérité et son lendemain ($cel=0.070$) b) Jour de plus forte célérité et son lendemain ($cel=0.481$)

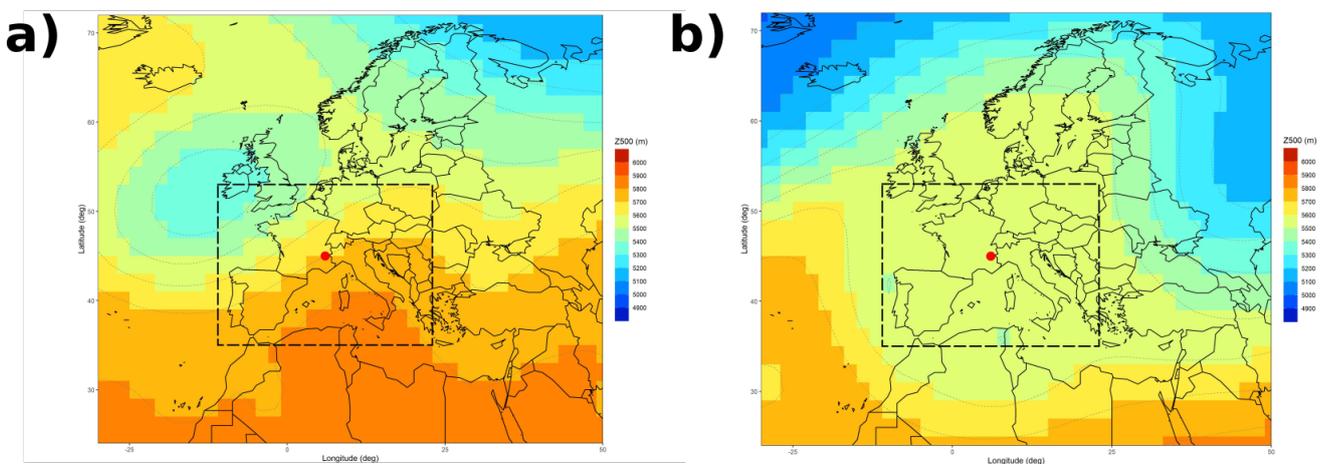


FIGURE 10 – Champs de géopotentiel 500 hPa : dépressions en bleu et haute pression en rouge. Grenoble est représenté par le point rouge et la zone d’analogie en pointillés noirs. a) Jour de plus faible singularité ($sing=0.130$) b) Jour de plus forte singularité ($sing=0.412$)

ont déjà optimisé ou testé la sensibilité du choix du nombre d'analogues, de la taille de la fenêtre d'analogie, du niveau de pression utilisé, de l'usage de la distance TWS et de l'usage d'une fenêtre spatiale de recherche des analogues. Nous utiliserons donc les mêmes paramètres que Blanchet and Creutin [2020], Blanc et al. [2021], comme décrit précédemment.

Une fois ces 7 indicateurs calculés, nous avons comparé les valeurs des dates d'occurrence de crue au reste de la climatologie pour des paires d'indicateurs, dans le but d'isoler des types de forme de géopotential davantage générateurs de crues torrentielles sur le "Y grenoblois". Ces résultats ont également été croisés avec la saisonnalité et les informations provenant du type de temps EDF. Bien que très informative, cette approche ne permet de résumer que l'état de la circulation atmosphérique et pas la nature des masses d'air transportées, ni des possibles déclencheurs de la précipitation. Le travail mené sur le géopotential a donc été étendu à de nouvelles variables.

2.3.4 Autres indicateurs hydrométéorologiques

Afin de caractériser de manière plus complète les scénarios atmosphériques à l'origine des crues torrentielles dans le "Y grenoblois", nous nous sommes intéressés à des variables complémentaires du champ de géopotential. En plus d'une caractérisation plus exhaustive des scénarios atmosphériques, cette approche est la première pierre nécessaire à l'étude de l'évolution temporelle de ces scénarios dans un contexte de changement climatique. En effet, un changement des extrêmes de précipitations pourrait se produire sans modification majeure des formes de géopotential génératrices, seulement par changement de la quantité d'humidité disponible, de la température, de la convection ou d'autres variables.

Les champs météorologiques retenus sont la colonne de vapeur d'eau intégrée (PWAT), l'énergie potentielle de convection disponible (CAPE), l'humidité spécifique à 700 hPa (Q), la vitesse horizontale du vent à 700 hPa (V), la température à 850 hPa (T), la température potentielle pseudo-adiabatique du thermomètre mouillé (θ'_w) à 850 hPa, l'IVT et la vitesse verticale du vent à 700 hPa (W). Ces champs ont été téléchargés pour les membres 1, 2 et moyen de 20CR et pour ERA5. Des essais ont également été menés pour développer des indicateurs portant sur l'humidité relative à 850 hPa et de nouveaux indicateurs sur l'altitude du géopotential 500 hPa sans résultats suffisamment concluants pour être présentés ici.

La vitesse verticale du vent est calculée selon l'équation 1 et l'IVT selon l'équation 2. Le champ de θ'_w est calculé d'après l'humidité spécifique (Q), l'humidité relative (RH) et la température en °K (T) à 850 hPa, selon les équation suivantes :

$$\theta'_w = \theta_e - C - \exp \left\{ \frac{a_0 + a_1 \times X + a_2 \times X^2 + a_3 \times X^3 + a_4 \times X^4}{1 + b_1 \times X + b_2 \times X^2 + b_3 \times X^3 + b_4 \times X^4} \right\} \quad (4)$$

θ'_w en °C ; θ_e en K

$$X = \frac{\theta_e}{C}$$

$$C = 273.15$$

$$a_0 = 7.101574$$

$$a_1 = -20.68208$$

$$a_2 = 16.11182$$

$$a_3 = 2.574631$$

$$a_4 = -5.205688$$

$$b_1 = -3.552497$$

$$b_2 = 3.781782$$

$$b_3 = -0.6899655$$

$$b_4 = -0.5929340$$

$$\theta_e = T \times \left(\frac{1000}{Pd} \right)^{0.285(1-0.28w)} \times \exp \left\{ w(1-0.81w) \left(\frac{3376}{Tlcl} - 2.54 \right) \right\} \quad (5)$$

$$w = \frac{q}{1-q}$$

$$Tlcl = \left\{ \frac{1}{T-55} - \frac{\ln(RH)}{2840} \right\}^{-1} + 55 \quad (6)$$

$$Pd = Plcl - e_{sw}(Tlcl)$$

$$e_{sw}(Tlcl) = 6.11e^{19.83 - \frac{5417}{Tlcl}} \quad (7)$$

$$Plcl = P \left(\frac{Tlcl}{T} \right)^{\frac{C_{pm}}{Rm}}$$

$$P = 850hPa$$

$$Rm = (1-q)Ra + q \times Rv$$

$$Ra = 287.04 \text{ J/kg/K}$$

$$Rv = 461 \text{ J/kg/K}$$

$$C_{pm} = (1-q)C_{pa} + q \times C_{pv}$$

$$C_{pa} = 1006.04 \text{ J/kg/K}$$

$$C_{pv} = 1879 \text{ J/kg/K}$$

L'équation 4 provient de Davies-Jones [2008], les équations 5 et 6 proviennent de Bolton [1980] et l'équation 7 est la formule d'Auguste-Roche-Magnus. La θ'_w résume l'état d'une masse d'air. Elle est forte pour une masse d'air chaude et humide.

L'ensemble de ces champs sont donnés à titre d'exemple pour la crue du Rif Talon du 14/01/1899 en Figure 11. On retrouve pour l'IVT le fort transport zonal décrit précédemment. Il est lié à une forte humidité le long d'une bande approximativement Ouest-Est visible sur le champ de Q et de manière intégrée avec la PWAT. On voit aussi un vent horizontal fort dans cette même région. Tous ces facteurs sont connus comme possibles causes participants aux fortes précipitations. On note également une forte

	IVT	Q	PWAT	V	W	CAPE	T	θ'_w
q95 fenêtre d'analogie	x	x	x	x			x	x
Moyenne fenêtre	x	x	x	x			x	x
q5 fenêtre	x	x	x	x			x	x
Différence maximale fenêtre					x		x	x
Maximum 2 pixels	x	x	x	x		x	x	x
Moyenne 2 pixels	x	x	x	x		x	x	x
Minimum 2 pixels	x	x	x	x		x	x	x

TABLE 1 – Indicateurs statistiques.

vitesse vertical absolue du vent proche de Grenoble, signe de mouvements verticaux de masse d'air importants, potentiel déclencheur de précipitations.

Dans le cas de cette occurrence de crue, la CAPE, la température et la θ'_w ne semblent pas être des facteurs pertinents, mais on s'y intéressera dans le cas d'autres scénarios atmosphériques. La CAPE est un proxy pour l'instabilité de l'atmosphère et la possibilité de convection marquée pouvant déclencher des précipitations. La température pourrait jouer un rôle dans la phase des précipitations et la fonte et la θ'_w permet de détecter les masses d'air anormalement chaudes et humides et les fronts météorologiques.

L'ensemble de ces variables permet donc de couvrir indirectement une part conséquente des facteurs importants pour la génération de crues torrentielles sur le "Y grenoblois" : contenu en humidité de l'atmosphère, fonte, transport de vapeur, impact du vent sur le soulèvement orographique, convection et fronts météorologiques.

Afin de résumer l'état de l'atmosphère et simplifier ces champs tri-dimensionnels (longitude, latitude et temps), plusieurs indicateurs statistiques ont été calculés en chaque jour :

- Le quantile 95% des pixels du jour sur la fenêtre d'analogie (voir Figure 7).
- La moyenne des pixels du jour sur la fenêtre d'analogie.
- Le quantile 5% des pixels du jour sur la fenêtre d'analogie.
- La différence entre le minimum et le maximum des pixels du jour sur la fenêtre d'analogie.
- Le maximum sur les 2 pixels entourant Grenoble (ou les 105 pixels ERA5 correspondants) (voir Figure 7).
- La moyenne sur les 2 pixels entourant Grenoble.
- Le minimum sur les 2 pixels entourant Grenoble.
- L'intensité du front météorologique (voir ci-après).

Les indicateurs calculés pour chaque variable sont résumés dans la Table 1. Une statistique n'est calculée pour une variable météorologique que si elle présente un sens physique, ainsi par exemple la CAPE à l'échelle de l'Europe de l'Ouest présente peu d'intérêt pour des crues locales et seules les statistiques sur 2 pixels seront calculées.

Le dernier indicateur porte sur l'intensité des front météorologiques (IF). Du fait de la faible résolution spatio-temporelle des réanalyses utilisées, il ne s'agit pas à proprement parler d'une définition des zones de front météorologiques et de leur intensité au sens du prévisionniste, mais d'un proxy adapté à la nature des données d'entrée. Notre définition d'un "front météorologique" sera donc une zone de fort gradient de θ'_w (soit une transition entre 2 masses d'air) dans nos données de réanalyse et son intensité

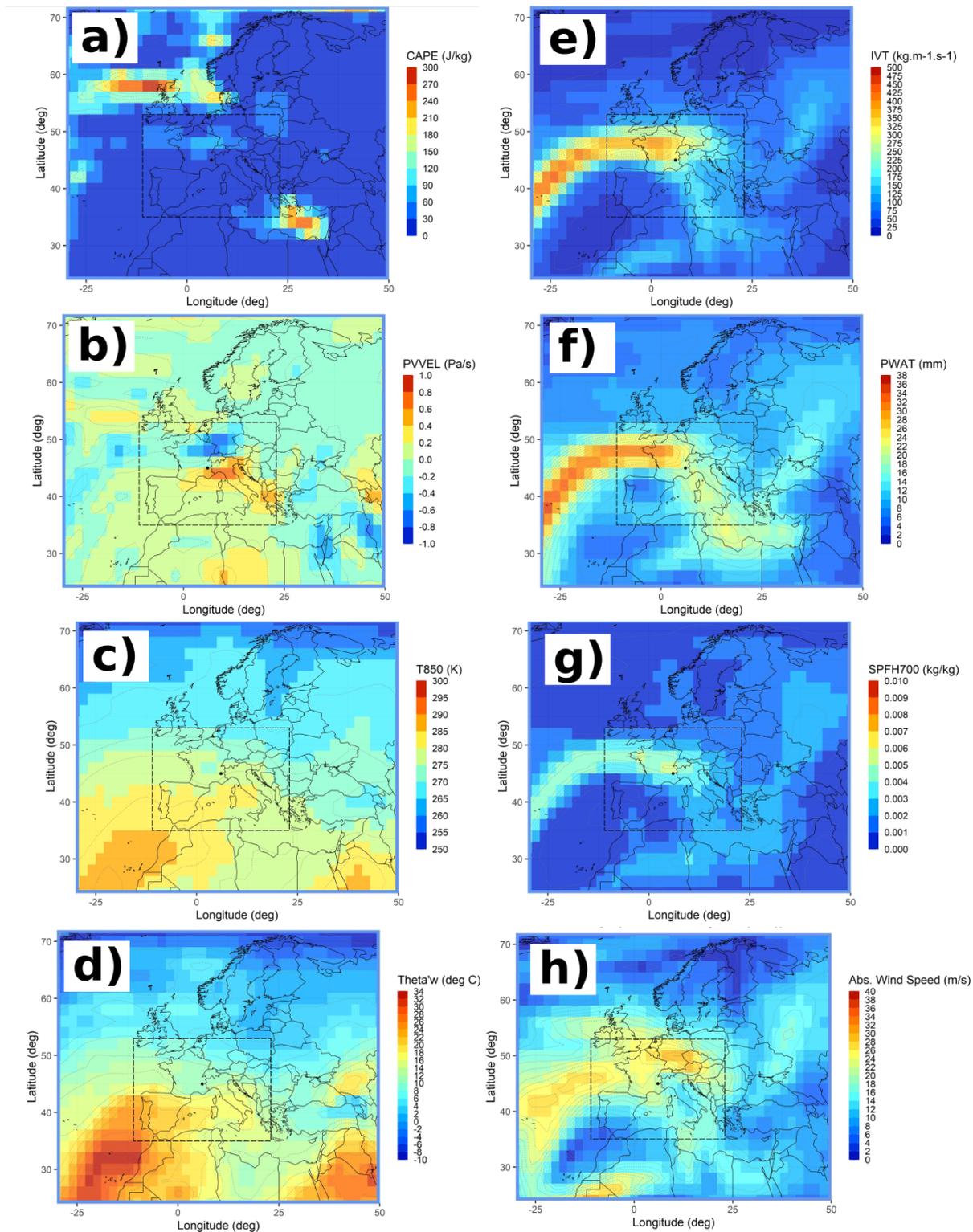


FIGURE 11 – Carte des champs météorologiques (20CR membre 1) pour la crue du Rif Talon du 14/01/1899. a) CAPE, b) Vitesse verticale du vent, c) Température à 850 hPa, d) θ'_w à 850 hPa, e) IVT, f) PWAT, g) Humidité spécifique à 700 hPa, h) Vitesse horizontale du vent à 700 hPa.

sera la différence entre la plus faible et la plus forte valeur de θ'_w sur la zone de front. On commence par définir la “zone de front” comme le plus grand nombre de pixels connectés par leur bord dont la valeur de gradient de θ'_w est supérieur à $1.2 \text{ }^\circ\text{C}/^\circ$ géographique (calculé entre pixels voisins par le bord ou la diagonale). Ce décompte de pixels se fait sur la “zone d’estimation des fronts” et seulement pour les groupes de pixels qui intersectent la “zone de détection des fronts” (Figure 7). Ce choix de zone est fait dans le but de limiter la taille des fronts considérés (les données basse résolution ayant tendance à l’exagérer) et de considérer uniquement les fronts ayant pu avoir une influence sur le “Y grenoblois”. On calcule ensuite la différence de θ'_w entre le pixel minimal et le pixel maximal sur cette zone comme proxy de l’intensité du front. Si aucun front n’a été détecté la valeur est de 0. Le choix du seuil de $1.2 \text{ }^\circ\text{C}/^\circ$ géographique est basé sur une évaluation visuelle de cartes de θ'_w pour 20CR aux dates d’occurrence de crues. Comme pour les AR cette approche n’est pas dépourvue de biais de subjectivité, mais l’objectif étant de comparer crues et climatologie, nous n’avons pas besoin d’une définition exacte de l’intensité du front, seulement d’une définition homogène de zones de forts gradients de θ'_w .

La plupart de ces indicateurs, de par la nature des champs météorologiques considérés, possèdent un cycle saisonnier marqué, ainsi qu’une dépendance prononcée à la circulation atmosphérique. Les plages de valeurs sont aussi très variées, rendant moins aisée la comparaison. Notre objectif étant de comparer les valeurs des indicateurs aux dates d’occurrence des crues au reste de la climatologie, afin de caractériser des scénarios atmosphériques propices aux crues torrentielles, nous devons nous défaire de ces problématiques. En effet, si un indicateur est fort pour les crues comparé à la climatologie, il nous serait impossible de conclure si cela est lié à ce que beaucoup de crues ont lieu durant une saison ou un type de temps où cet indicateur est fort. Dans cet objectif, pour chaque date d’occurrence de crue on va calculer une fréquence au non-dépassement par rapport au reste de la climatologie du même mois et du même type de temps Lamb. Ainsi, une valeur de 87% pour une date d’occurrence de crue du maximum de T850 sur 2 pixels signifierait que cette date a une valeur supérieure à 87% des autres dates de la climatologie du même mois et du même type de temps. Cette date est donc particulièrement chaude, même pour sa saison et son type de temps.

Ces fréquences ont également été calculées pour les indicateurs portant sur le géopotential, à but de comparaison. Dans les 2 cas elles ont été calculées pour 20CR membre 1, 2 et moyen et ERA5. Afin de prendre en compte les séquences d’occurrence de crue de plusieurs jours lorsque le cas se présentait, on assigne à un évènement de plusieurs jours la fréquence la plus élevée (ou la plus basse suivant l’indicateur) sur tous les jours de la séquence dont le type de temps Lamb est le même que celui de la date de référence de la séquence (le jour avec l’évènement le plus marquant). On prend une marge d’une journée avant le début des séquences pour les crues qui se produiraient tôt dans la journée et dont les causes météorologiques se retrouveraient donc la veille dans les réanalyses.

La dernière étape dans la caractérisation des scénarios atmosphériques à l’origine des crues torrentielles du “Y grenoblois” à l’aide des indicateurs statistiques, consiste à sélectionner les indicateurs qui permettent le mieux de distinguer les situations d’occurrence de crues du reste de la climatologie. Pour ce faire on va se baser sur la fréquence au non-dépassement définie précédemment. Avec cette fréquence la climatologie possède par construction une distribution uniforme entre 0 et 100%, avec donc une médiane de 50%. Deux exceptions notables sont l’IF et les indicateurs portant sur la CAPE, qui sont des indicateurs avec un nombre significatif de valeurs nulles et donc une distribution de fréquence au non-dépassement tronquée pour les petites fréquences (beaucoup de dates à 0% et pas de dates pour les autres faibles pourcentages). On caractérisera donc le pouvoir discriminant d’un indicateur pour les dates d’occurrence de crue par rapport à la climatologie à travers deux indices, résumés ensuite en un score de pouvoir discriminant (SPD).

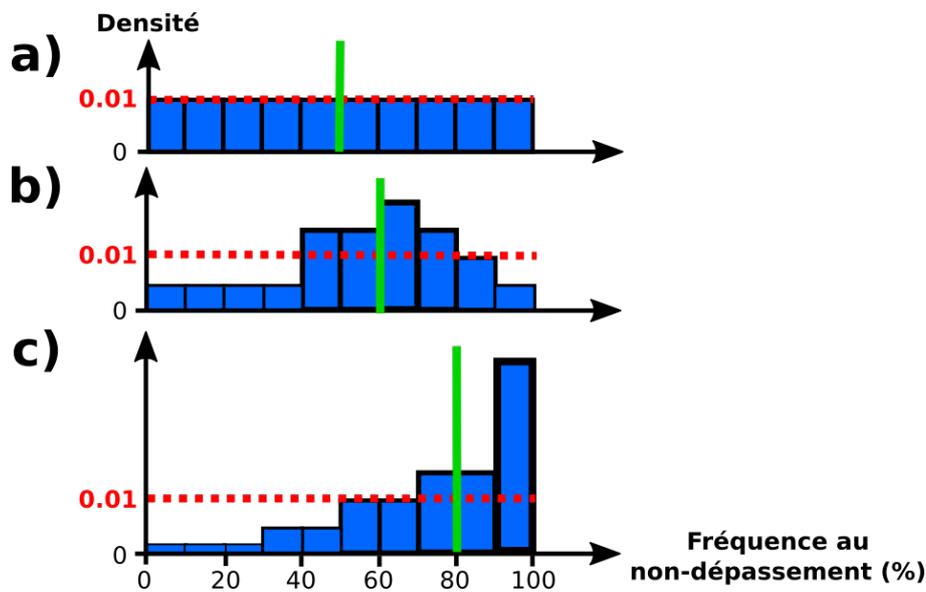


FIGURE 12 – Illustration de la méthode de calcul de l’EDC, de la médiane et du SPD. Les histogrammes représentent la distribution de trois indicateurs fictifs en fréquence au non dépassement de la climatologie pour les dates d’occurrence de crues. La ligne pointillée rouge symbolise la distribution uniforme de la climatologie. La ligne continue verte représente la médiane de la distribution. a) Situation identique à la climatologie. b) Indicateur faiblement discriminant. c) Indicateur fortement discriminant.

Tout d’abord plus la distribution de l’indicateur pour les crues s’écartera de la distribution de la climatologie, plus cela voudra dire que cet indicateur est différent en situation de crue et donc discriminant. On calcule donc l’écart à la distribution climatologique (EDC) comme la somme des différences absolues entre l’histogramme en densité par classes de 10% de la climatologie et celui des crues :

$$EDC = \sum_{i=1}^{10} |dens_{climatologie}(i) - dens_{crues}(i)|, \quad (8)$$

avec $dens(1)$ la densité de l’histogramme pour la classe 0-10% (2 pour 10-20%...). Cette densité est donc entre 0 et 0.01 pour le cas général de la distribution climatologique uniforme (Figure 12a). Sur les Figures 12b et c on peut voir la différence entre la distribution climatologique et la distribution des crues comme l’aire absolue entre l’histogramme et la courbe pointillée rouge. Par construction EDC est donc compris entre 0 (distribution identique à la climatologie) et 0.18 (toutes les crues dans une seule classe de 10% : il y a 0.09 en trop pour cette classe et 0.01 manquant pour les 9 autres).

Néanmoins, même un indicateur avec un mauvais pouvoir discriminant pour les extrêmes hydrologiques peut être le résultat d’une distribution très dissemblable à la climatologie. En effet, une distribution pourrait être fortement non uniforme, mais centrée sur 50% (par exemple un pic à 50%, ou un pic à 10% et un autre à 90%). La distribution de l’indicateur pour les crues est alors bien différente de la distribution pour la climatologie, mais l’indicateur n’apporte aucune information sur les scénarios atmosphériques générateurs de crues. En effet, il n’y a alors pas de lien entre extrême hydrologique et extrême atmosphérique ou bien l’étude a besoin d’être affinée car les deux extrêmes atmosphériques (minimum et maximum de fréquence) sont liés aux extrêmes hydrologiques. On s’intéresse donc également à la valeur de la médiane des fréquences pour les occurrences de crue (MED). Pour les distributions non uniformes (CAPE et IF), si la médiane des événements hydrologiques est nulle, on

contrôle la médiane de la climatologie. Si celle-ci est nulle également, le pouvoir discriminant est nul et on force la médiane des crues à 50% afin de faciliter la lecture des résultats. Si elle n'est pas nulle cela signifie que les crues ont plus de valeurs nulles que la climatologie et donc l'indicateur est discriminant, et la médiane des crues est donc la plus petite fréquence non nulle de la climatologie. Ces cas pour les distributions non uniformes sont rares et n'influencent pas les conclusions vis-à-vis du résultat, ils ne sont donc fournis qu'à titre d'information pour le lecteur qui souhaiterait reproduire la méthodologie.

Afin de synthétiser ces deux informations nous avons conçu un score de pouvoir discriminant (SPD). Celui-ci est compris entre 0 et 1 : une valeur de 0 indique une distribution en classes de 10% identique à la climatologie comme la Figure 12a, tandis qu'une valeur proche de 1 indique que toutes les fréquences de crues sont concentrées vers un extrême, comme en Figure 12c. La Figure 12b indique une situation avec un score et un pouvoir discriminant intermédiaires, car la médiane des crues est légèrement supérieure à 50% et la distribution pas tout à fait uniforme.

$$SPD = \left| \frac{MED - 50}{50} \right| \times \frac{EDC}{0.18}. \quad (9)$$

Ce score est calculé avec l'ensemble des dates d'occurrence de crue, puis par saison ou par type de temps Lamb. Il permet d'isoler les indicateurs les plus discriminants et de comparer les valeurs entre membres et entre réanalyses. Une fois les indicateurs les plus discriminants sélectionnés, leur analyse permet de déterminer des scénarios atmosphériques davantage générateurs de crues torrentielles sur le "Y grenoblois" pour différentes saisons et types de temps.

2.3.5 Paramètres géomorphologiques

Une fois ces différents classifications et indicateurs développés, nous les avons croisés avec la classification géomorphologique des bassins versants issue de l'Action 3 d'HYDRODEMO. L'objectif étant d'étudier un possible lien entre scénarios atmosphériques générateurs de crues torrentielles et caractéristiques géomorphologiques des bassins versants où la crue a lieu. Sur les conseils de Maxime Morel et sur la base de son travail dans l'Action 3 nous avons choisi d'appliquer la classification de Wilford et al. [2004] à nos bassins versants, pour les répartir en trois catégories de mode de transport sédimentaire en crue :

- charriage ("bedload"),
- charriage hyper-concentré ("debris flood"),
- lave torrentielles ("debris flow").

Le choix de cette classification repose sur sa facilité d'application et le fait qu'elle ne nécessite pas de jeux de données complexes et/ou haute résolution. Elle repose sur un système de seuils sur 2 variables :

- l'indice de Melton (équation 10), déterminé à partir des contours de bassins versants (voir Action 1) et du MNT BD ALTI 25m⁴.
- la longueur du cours d'eau principal, déterminée à partir des cours d'eau et tronçons hydrographiques de la BD CARTHAGE⁵.

$$Melton = \frac{Z_{max} - Z_{min}}{\sqrt{A}}, \quad (10)$$

4. Voir site internet : <https://geoservices.ign.fr/documentation/diffusion/telechargement-donnees-libres.html>

5. Voir site internet : <http://services.sandre.eaufrance.fr/telechargement/geo/ETH/BDCarthage/>

avec Z_{max} l'altitude minimale du bassin, Z_{min} l'altitude maximale et A sa superficie. Les bassins versants avec un indice de Melton inférieur à 0.3 sont classés comme crues à charriage, ceux avec un indice de Melton supérieur à 0.6 et une longueur de cours d'eau principal inférieur à 2.7km en laves torrentielles et le reste en crues à charriage hyper-concentré.

On regarde ensuite chaque crue individuellement (et donc 201 crues de torrents et non plus 70 événements torrentiels journalier à pluri-journaliers) pour croiser type de transport sédimentaire et valeur des indicateurs atmosphériques à cette date. Cette analyse croisée a également été faite avec la variable de la superficie des bassins versants réagissants, afin de déterminer si les liens observés sont ou non uniquement liés à la présence de la superficie dans le calcul de l'indice de Melton (équation 10).

3 Résultats

Nous commençons par nous intéresser au lien entre circulations atmosphériques et occurrence de crues, avant d'utiliser les différents indicateurs hydrométéorologiques présentés précédemment afin d'isoler des scénarios atmosphériques davantage générateurs de crues. Nous étudierons enfin s'il existe un lien entre indicateurs hydrométéorologiques, occurrences de crues et caractéristiques géomorphologiques des bassins versants.

Dans un premier temps, afin de faciliter la compréhension du lecteur nous revenons rapidement sur quelques aspects de la saisonnalité et de la durée des événements déjà décrits pour partie par Creutin et al. [In Press], mais centrés ici sur les occurrences torrentielles et nos périodes d'intérêt : 1850-2019 (soit l'ensemble de la période d'étude et avec une approximation minimale vis-à-vis des occurrences de crues la période de 20CR et Lamb) et 1948-2019 (soit la période couverte par EDF et avec une approximation minimale vis-à-vis des occurrences de crues la période d'ERA5). Les saisons sont définies comme groupement de 3 mois civils (Décembre/Janvier/Février, Mars/Avril/Mai, Juin/Juillet/Août et Septembre/Octobre/Novembre). Entre 1850 et 2019 58% des événements torrentiels ont lieu en été (dont 26% du total en juin et 23% en juillet), 20% en hiver, 14% en automne et 9% au printemps. Tandis qu'entre 1948 et 2019, cette saisonnalité change marginalement : 59% en été, 22% en hiver, 13% en automne et 7% au printemps. Pour ce qui concerne la durée des événements torrentiels, entre 1850 et 2019 56% sont journaliers et seuls 10% durent plus de 4 jours. Entre 1948 et 2019, les changements sont marginaux avec 54% d'événements journaliers et 9% de plus de 4 jours.

3.1 Classifications de type de temps

Au premier ordre, la précipitation et donc les réactions torrentielles sont gouvernées par les flux de masse d'air à grande échelle. Il est donc intéressant de regarder le lien entre occurrences de crues et circulation atmosphérique, à l'aide des catalogues de type de temps.

3.1.1 Classification EDF

Dans un premier temps, nous nous intéressons aux circulations telles que définies par la classification EDF, qui tient lieu de référence pour les types de temps dans les Alpes françaises. Notre étude portera donc sur les 46 occurrences de crues se produisant sur la période 1948-2019.

La Figure 13 montre la saisonnalité du TT EDF (1948-2019). L'Océanique domine la climatologie (37%), suivi par l'Anticyclonique (29%) et le Méditerranéen (25%), tandis que le TT Continental est peu représenté (5%). L'Anticyclonique est à son maximum en été, à l'inverse de l'Océanique qui atteint son maximum d'occurrence en hiver. Le Méditerranéen possède deux maximums au printemps et en automne.

On s'intéresse maintenant au TT EDF associé aux dates d'occurrence de crues. Dans un premier temps, on regardera pour chaque événement torrentiel, uniquement le TT de la date de référence, le jour avec la crue la plus remarquable de la séquence. La majorité des crues ont lieu pour un TT Océanique (43 %) ou Méditerranéen (41 %) et très peu de crues pour les autres TT (Figure 14). En hiver le TT océanique est pratiquement le seul à générer des crues, tandis qu'en été on a une variété d'influences, avec néanmoins une domination du Méditerranéen. Si on fait le parallèle avec la climatologie de ce TT EDF, on relève un début de scénario atmosphérique davantage générateur pour certaines crues. En effet, si le TT Océanique est assez commun en hiver, le TT Méditerranéen est lui relativement peu présent en été. Ainsi la probabilité conditionnelle d'avoir une crue sachant qu'on

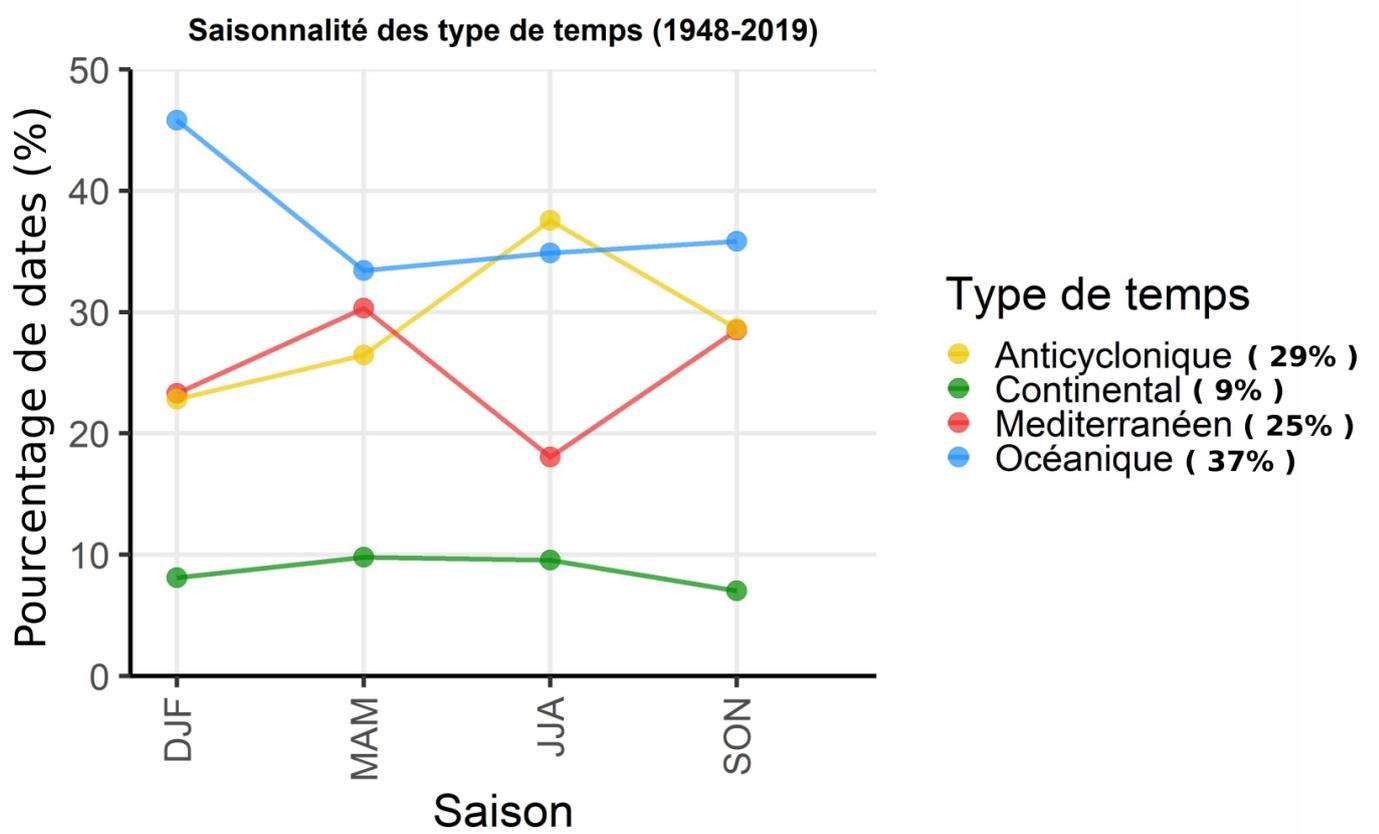


FIGURE 13 – Climatologie du TT EDF (pourcentage de date de la saison).

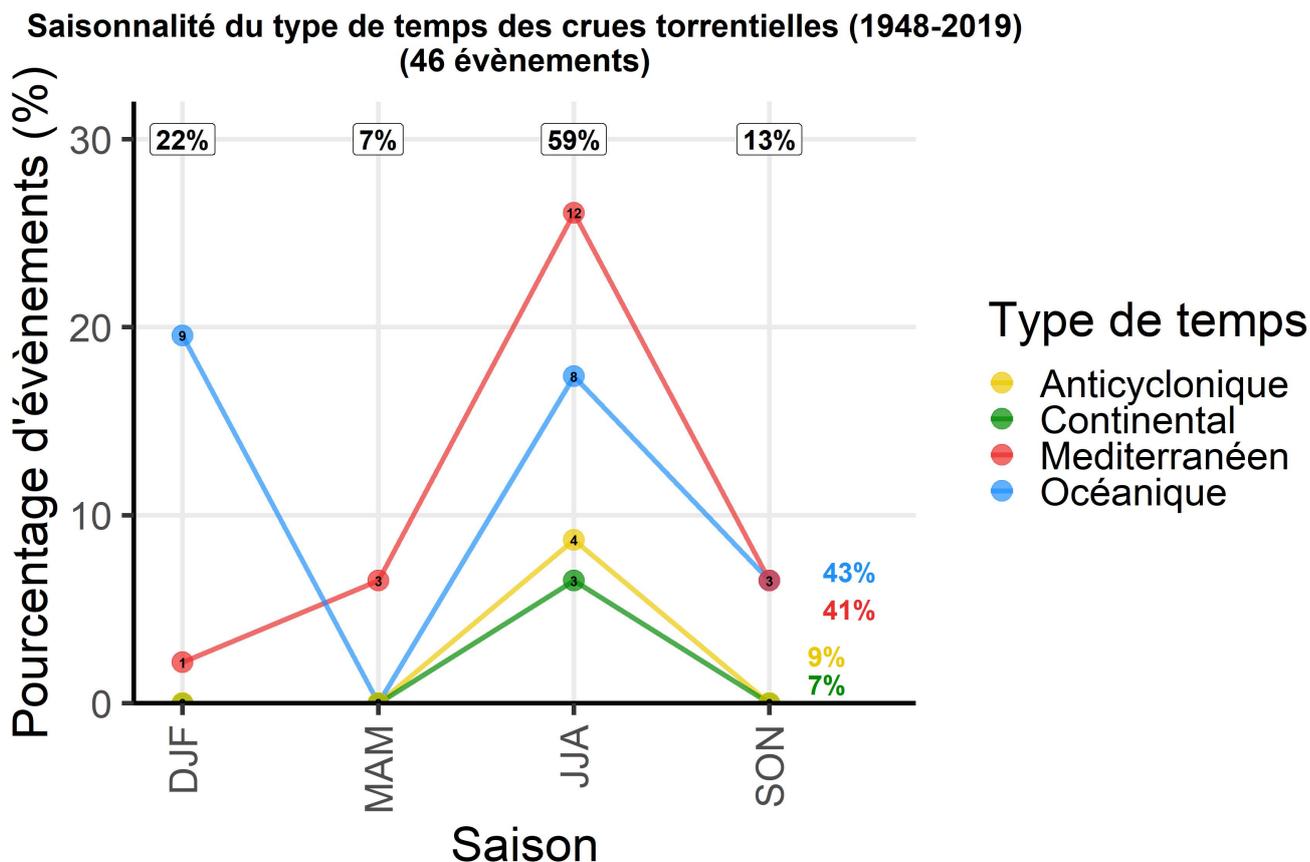


FIGURE 14 – Saisonnalité du TT EDF pour les dates de référence d’occurrence de crue. Le pourcentage en haut est l’occurrence saisonnière et celui à droite l’occurrence par TT. Les chiffres dans les bulles correspondent au nombre d’évènements. DJF=Décembre, Janvier, février ; MAM = Mars, Avril, Mai ; JJA = Juin, Juillet, Août ; SON = Septembre, Octobre, Novembre.

est en flux Méditerranéen d’été monte jusqu’à 1%, la probabilité conditionnelle d’une crue, sachant que le type de temps est Méditerranéen toutes saisons confondues étant de 0.29%. A l’inverse les conditions anticycloniques, bien que très communes sont peu génératrices de crues, comme attendu. Ces conclusions restent à nuancer par la taille de l’échantillon disponible.

Ce même croisement des occurrences de crue et des TT a été effectué pour l’ensemble des journées des séquences de réaction hydrométéorologiques. Cette approche a pour avantage d’agrandir l’échantillon considéré, mais peut aussi introduire des journées avec des événements hydrologiques et donc météorologiques moins prononcés.

La Figure 15 montre la saisonnalité du TT pour cet ensemble de journées d’occurrence de crues. Les conclusions sont similaires à lorsque l’on étudie uniquement les dates de référence à l’exception qu’on a un nombre bien plus important de journées anticycloniques associées à des crues en été. Cela est lié à une séquence d’occurrence de crues de 6 jours sous TT Anticyclonique (juillet 1987) et à l’inclusion de quelques jours anticycloniques dans des séquences dont le jour de référence est Océanique ou Méditerranéen, probablement pour des flux moins marqués et oscillant avec l’Anticyclonique.

Afin de mieux caractériser ce lien entre TT EDF et occurrences de crues, nous avons croisé ces infor-

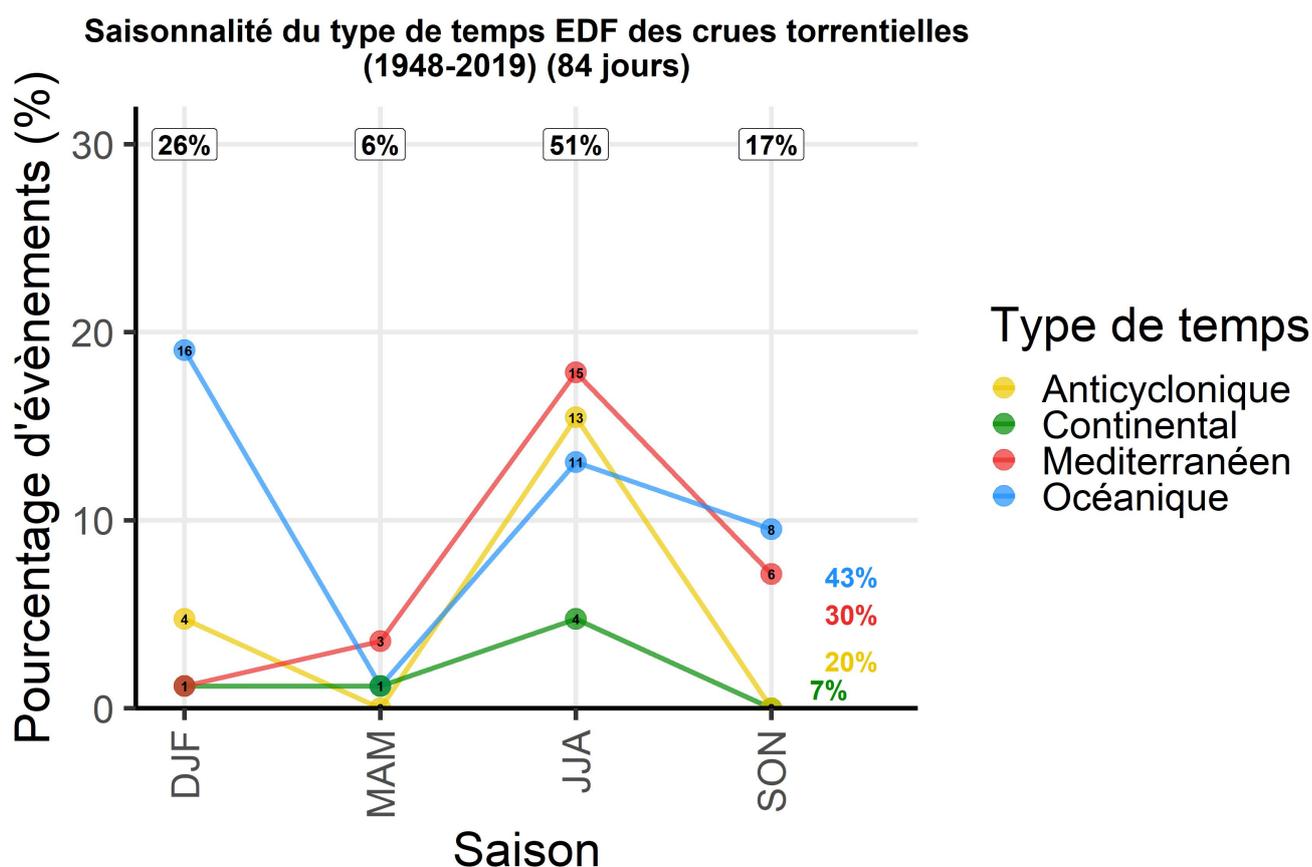


FIGURE 15 – Saisonnalité du TT EDF pour l’ensemble les dates d’occurrence de crue. Le pourcentage en haut est l’occurrence saisonnière et celui à droite l’occurrence par TT. Les chiffres dans les bulles correspondent au nombre d’évènements. DJF=Décembre, Janvier, février ; MAM = Mars, Avril, Mai ; JJA = Juin, Juillet, Août ; SON = Septembre, Octobre, Novembre.

mations avec le nombre de torrents réagissant à chaque évènement, ainsi que les massifs montagneux concernés (Belledonne, Chartreuse ou Vercors, voir Figure 3). La Figure 16a montre que près de deux tiers des évènements sont multi-torrents, tandis que les évènements Continentaux et Anticycloniques sont uniquement multi-torrents (à nuancer par la taille d'échantillon). Les évènements touchant plus de 5 torrents sont quant à eux présents pour les TT Océanique et Méditerranéen.

Au niveau de la localisation géographique, la grande majorité des évènements touchent un seul massif (59%) et souvent la Chartreuse (39 %) (Figure 16b). Belledonne n'est jamais touché seul (sur la période 1948-2019). Les évènements touchant 3 massifs semblent plus liés au TT Océanique et les évènements concomitants torrent-rivière (touchant au moins un torrent et au moins une rivière) aux TT Océanique et Méditerranéen. Le TT Méditerranéen touche davantage le Vercors seul que les autres. Ces observations sont à nuancer par la taille de l'échantillon disponible.

Enfin, nous avons testé l'hypothèse selon laquelle des période prolongées avec un TT identique étaient plus à risque de générer des crues torrentielles, du fait d'un potentiel pour maintenir des flux d'humidité et donc des précipitations prolongées vers le "Y grenoblois". Pour cela on s'intéresse à la durée des séquences de TT, c'est-à-dire le nombre de jours consécutifs avec le même TT. La Figure 17a montre que la médiane de cette "persistance" est de 3 jours pour l'Océanique, 2 jours pour le Méditerranéen et l'Anticyclonique et 1 jour pour le Continental. Quelques rares séquences dépassent les 5 jours tous TT confondus.

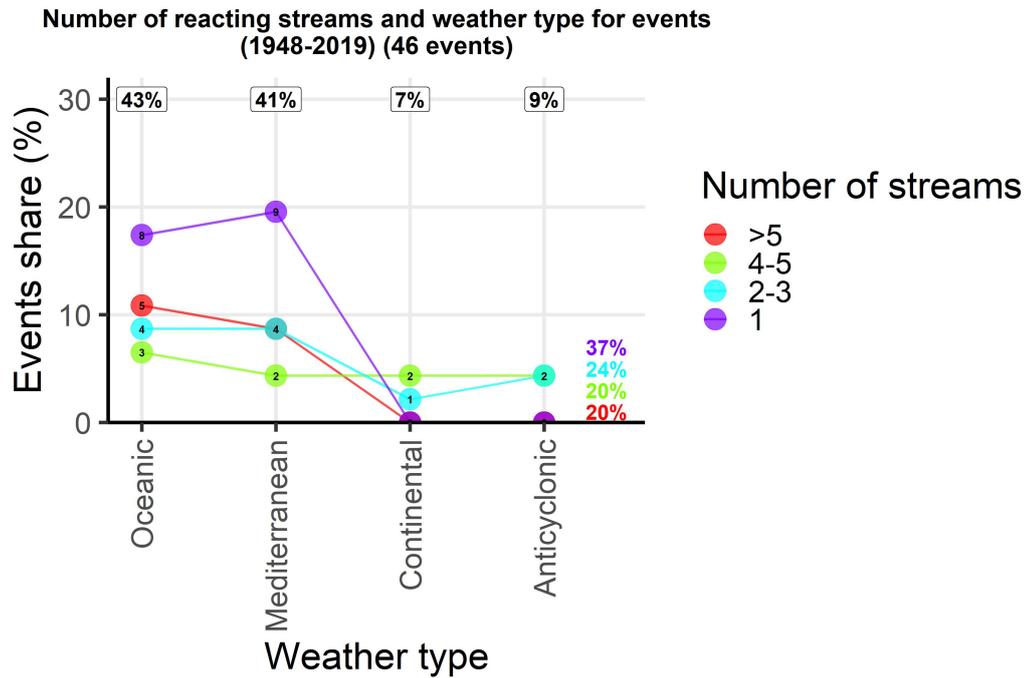
On s'intéresse ensuite au TT des dates d'occurrence de crues. Pour cela on compte le nombre de jours consécutifs (avant et après) ayant le même TT que les dates de référence. On compare ensuite ces durées aux durées pour le même TT dans le reste de la climatologie, en calculant une fréquence au non-dépassement (une valeur de 90% veut dire que la persistance du TT pour cette crue et plus forte que 90% des persistances de ce TT). On observe avec la Figure 17b que les crues ont lieu pour des séquences de TT relativement persistantes par rapport à la climatologie, particulièrement pour l'Anticyclonique et l'Océanique.

L'utilisation de la classification de circulation atmosphérique EDF s'est prouvée utile pour relever des comportements météorologiques des occurrences de crues, en accord avec les TT en usage dans notre région [Blanchet et al., 2020, Blanc et al., 2021]. Néanmoins, ce jeu de données limite le nombre d'occurrences de crues étudiées et donc l'échantillon disponible pour l'étude statistique. Une classification plus long terme est donc nécessaire.

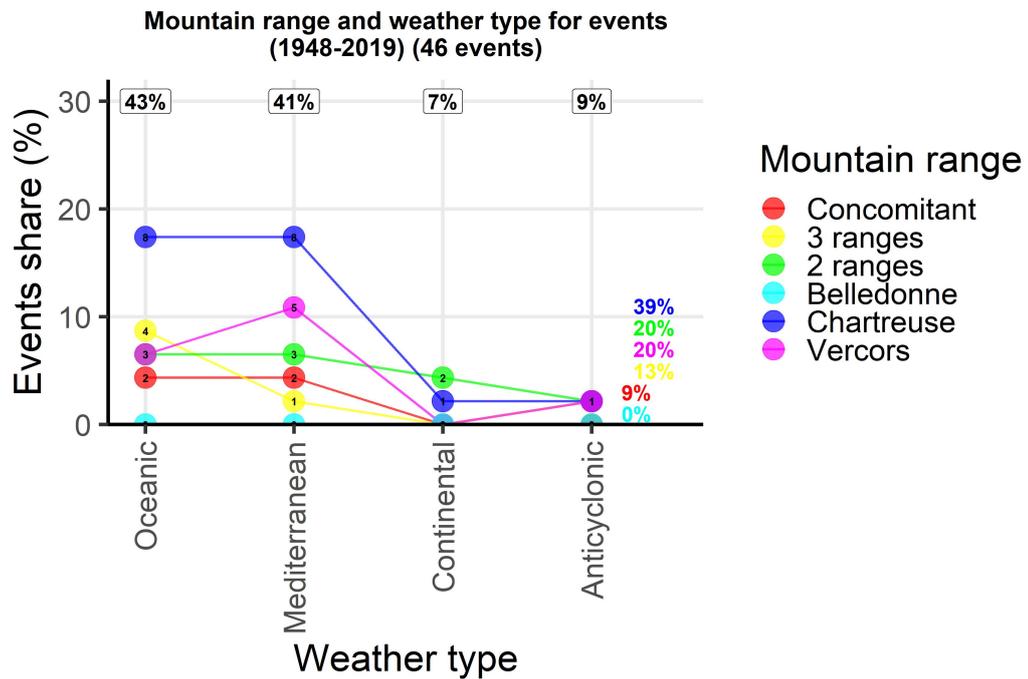
3.1.2 Classification Lamb

Afin de disposer d'un échantillon de dates d'occurrences de crues plus important, nous avons appliqué une démarche similaire à la classification de TT Lamb. La classification Lamb nous permet de croiser circulation atmosphérique et occurrences de crues pour la période 1851-2014 (soient 66 séquences d'occurrence de crues). Ces résultats et figures sont issus ou dérivés du mémoire de Master de Périne Kiennemann [Kiennemann, 2021]. Nous concentrerons notre étude sur la classification Lamb obtenue avec le membre 1 de 20CR, avant de rapidement comparer avec les autres membres et ERA5.

Dans le cas de la classification Lamb les TT dominants sont les Hautes Pressions (HP) avec 35% des dates de la climatologie, suivi de SW-SE (25%), E-NE (18%) et N-W (13%). Il y a seulement 9% de situations de Marais Barométrique (MB) (Figure 18). HP est au plus bas au printemps, lorsque SW-SE domine, alors que ce dernier a son minimum en été lorsqu'il y a davantage de MB.

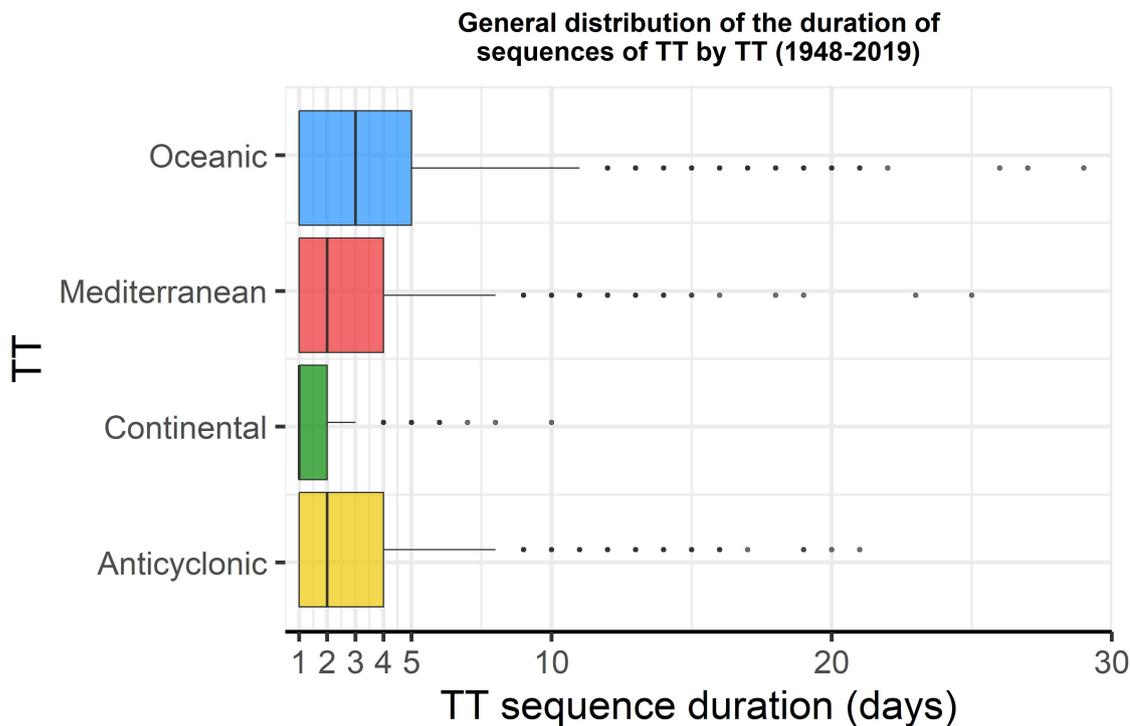


(a) Nombre de torrents

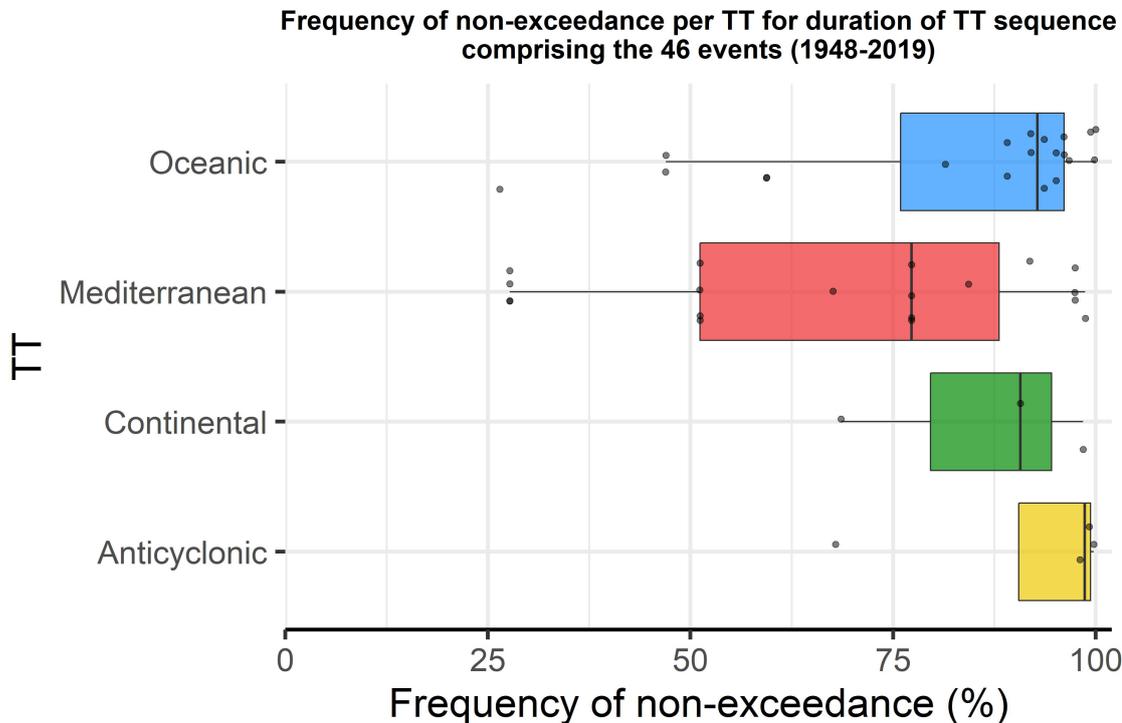


(b) Massif montagneux

FIGURE 16 – Répartition des évènements torrentiels en terme de TT EDF et a) de nombre de torrents réagissant b) de massifs impactés par les crues (“Concomitant” signifie qu’en plus d’au moins un torrent, une rivière au moins est en crue parmi l’Isère, le Drac et la Romanche). Les pourcentages en haut reprennent la répartition selon les TT et ceux à droite la répartition selon le nombre de torrents ou les massifs. La courbe avec uniquement le nom d’un seul massif (par exemple “Belledonne”) veut dire que seul ce massif est touché.



(a) Durée des séquences de TT dans la climatologie suivant le TT



(b) Durée des séquences de TT des crues relatives à la durée des séquences de TT de la climatologie pour le même TT (en fréquence au non-dépassement).

FIGURE 17 – Persistance du TT EDF

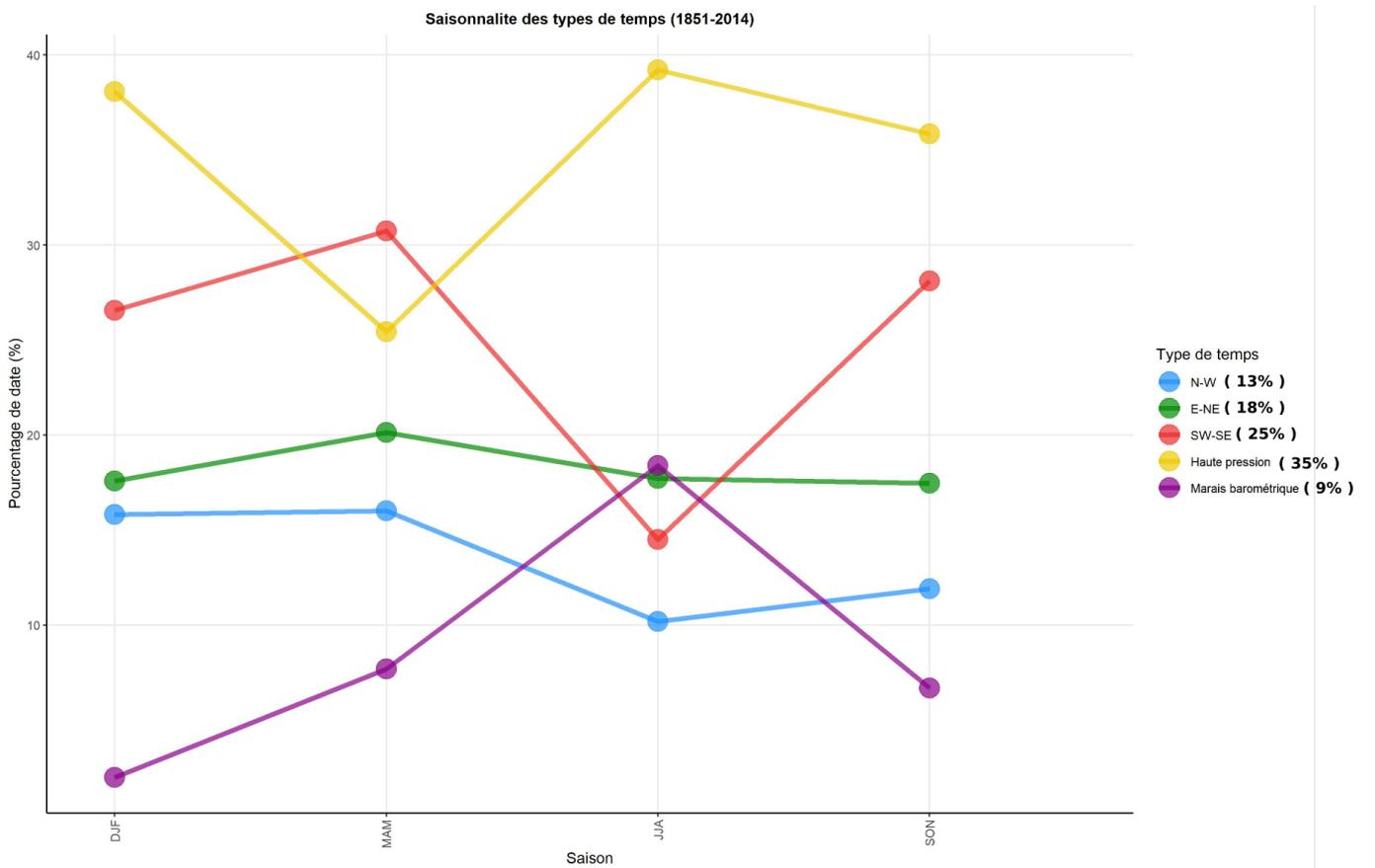


FIGURE 18 – Climatologie du TT Lamb pour le membre 1 de 20CR (pourcentage de date de la saison)

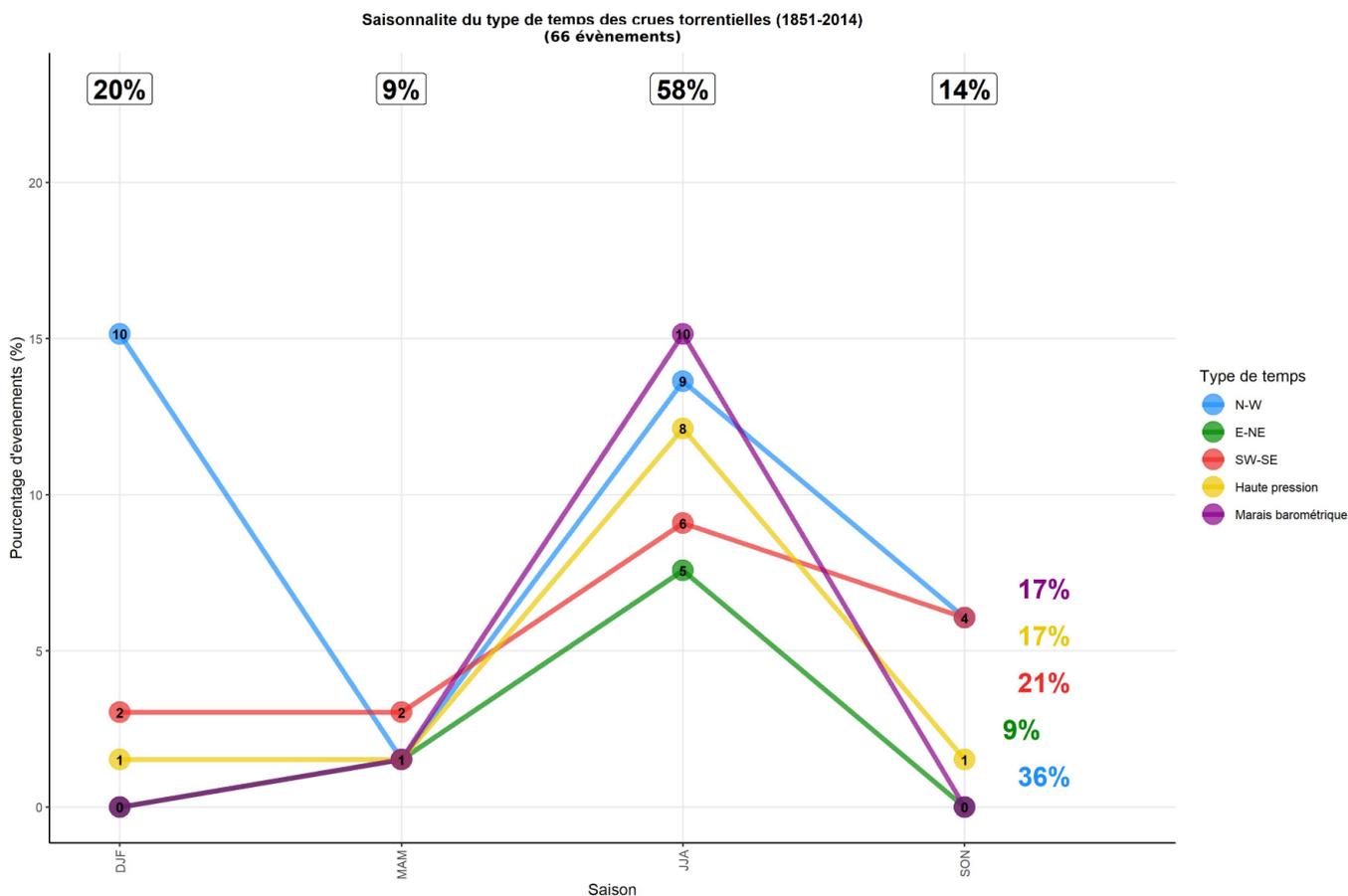


FIGURE 19 – Saisonnalité du TT Lamb pour le membre 1 de 20CR pour les dates d’occurrence de crues. Le pourcentage en haut est l’occurrence saisonnière et celui à droite l’occurrence par TT. Les chiffres dans les bulles correspondent au nombre d’évènements.

Comme pour le TT EDF, on regarde ensuite le TT pour les dates de référence des occurrences de crue (Figure 19). Pour ces dates, ce sont les flux de N-W qui dominent plus d’un tiers des occurrences. Il y a un nombre équivalent d’évènements pour les autres flux (autour de 20%), sauf pour E-NE (9%). L’hiver est largement dominé par les flux de N-W tandis que l’été présente une forte diversité d’influences en terme de circulations atmosphériques. On y retrouve beaucoup d’évènements torrentiels sous MB, flux de N-W et HP. Les flux de SW-SE se retrouvent à toutes les saisons et sont le flux dominant pour les occurrences de crues d’automne avec le N-W.

Si on inclue maintenant l’ensemble des dates d’occurrence de crues et plus uniquement les dates de référence de chaque séquence hydrométéorologique, on note un certain nombre de changements (Figure 20). En été, on observe beaucoup plus de crues sous Haute Pression (par inclusions de jours de HP dans d’autres séquences, principalement N-W), alors qu’en automne ce sont les crues sous flux de SE-SW qui augmentent le plus en proportion (du fait de 2 longues séquences). En hiver, 5 occurrences de crues sous flux de E-NE s’ajoutent alors qu’il n’y en avait pas pour les dates de référence (lié à l’ajout de 5 jours E-NE à la séquence N-W de février 1984). Ces crues d’E-NE voient aussi une des augmentations parmi les plus fortes en proportion en été (liée à une séquence longue en juillet 1987).

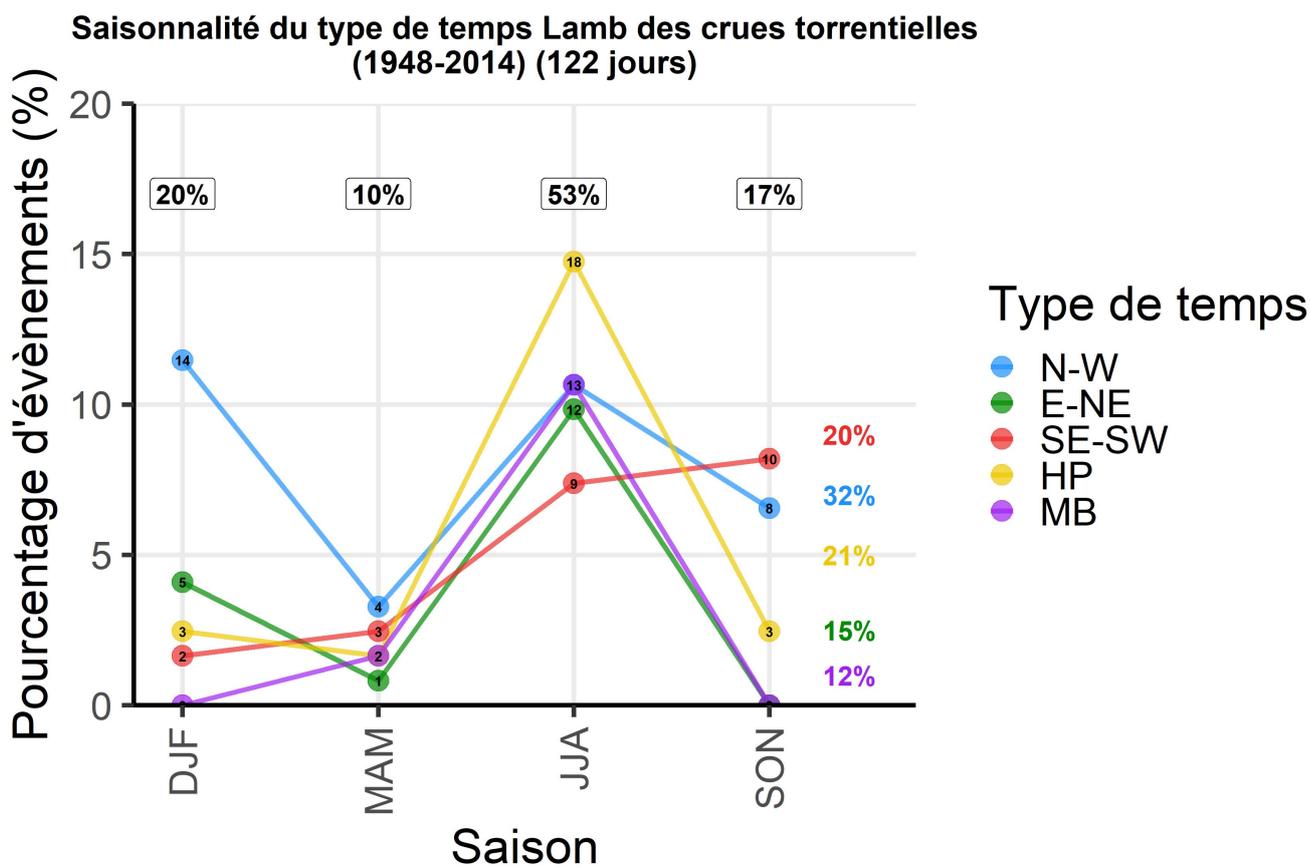


FIGURE 20 – Saisonnalité du TT Lamb pour le membre 1 de 20CR pour l’ensemble des dates d’occurrence de crues. Le pourcentage en haut est l’occurrence saisonnière et celui à droite l’occurrence par TT. Les chiffres dans les bulles correspondent au nombre d’occurrence de crues toutes séquences confondues.

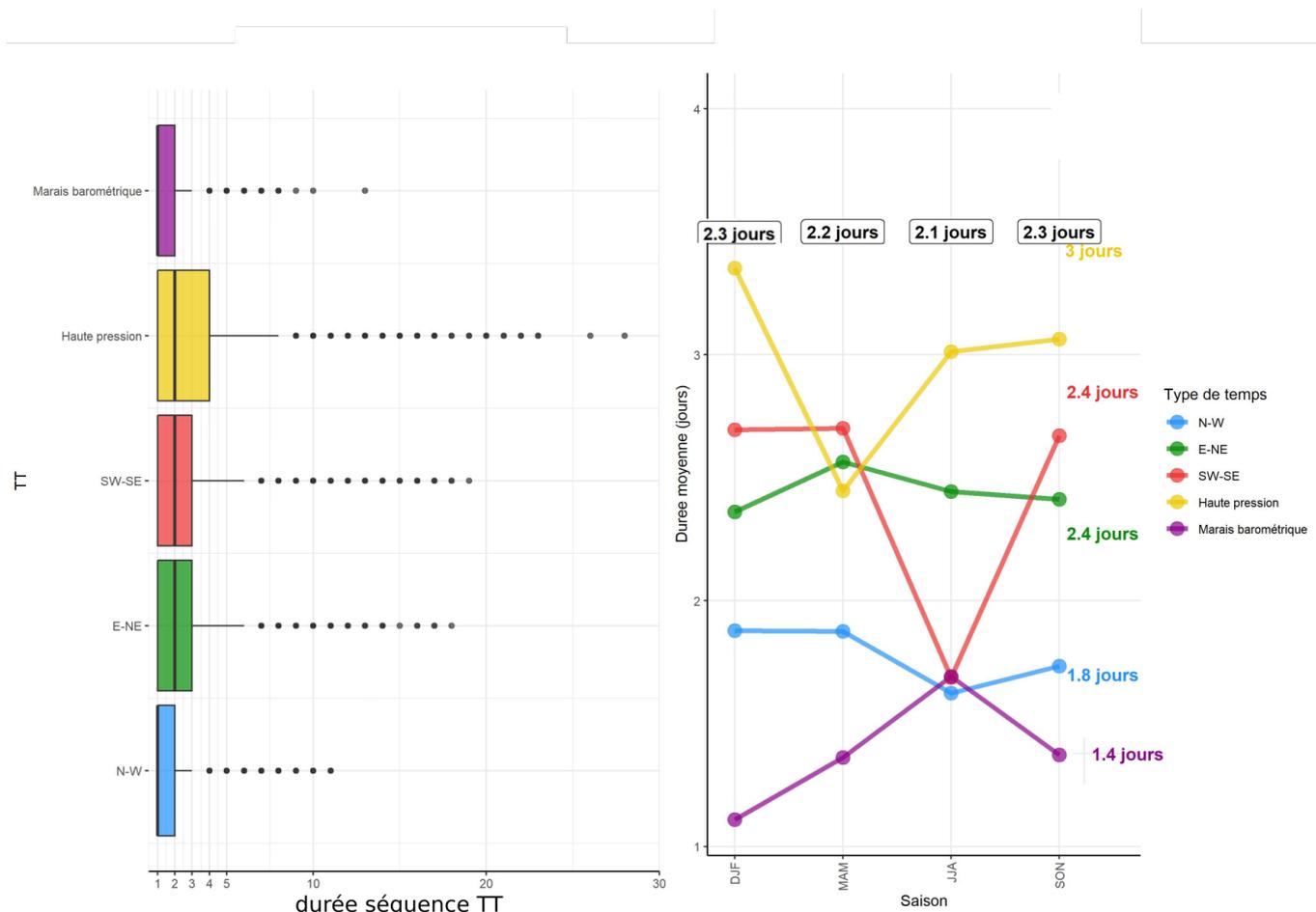


FIGURE 21 – A gauche : distribution des durées de séquence de TT Lamb dans la climatologie pour le membre 1 de 20CR (1851-2014). A droite : saisonnalité de cette durée par TT.

Nous nous penchons maintenant sur les séquences de jours consécutifs avec le même TT Lamb et donc l'étude de la persistance de ces TT. La Figure 21 montre que cette persistance est plus forte pour HP, tant en moyenne (3 jours), que pour les persistances les plus fortes (quantile 75% à 4 jours et de nombreuses séquences au-delà de 10 jours). Ensuite viennent les flux de E-NE et SW-SE, puis les moins persistants N-W et enfin MB. SW-SE présente des séquences particulièrement courtes en été, quand MB voit des séquences un peu plus longues en été et HP des séquences un peu plus courtes au printemps.

On s'intéresse ensuite à la persistance pour les dates d'occurrence de crues (Figure 22). On compare encore une fois la durée de la séquence de TT dans laquelle se trouve la date de référence avec la persistance de ce TT dans la climatologie ou la persistance pour la saison, à l'aide d'une fréquence au non-dépassement. Dans les 2 cas les occurrences de crues se produisent pour des séquences de TT parmi les plus persistantes. C'est particulièrement vrai pour les crues d'automne, de MB et de N-W. Par exemple, pour les crues de N-W, 75% des crues se produisent pour une séquence de TT plus longue que 80% de la climatologie.

Nous allons maintenant nous pencher sur la sensibilité de ces résultats au choix du membre 20CR utilisé dans le calcul de la classification Lamb. Nous résumerons ici rapidement les résultats principaux, mais les figures produites jusqu'ici pour le membre 1 de 20CR sont disponibles pour les membres 2 et moyen

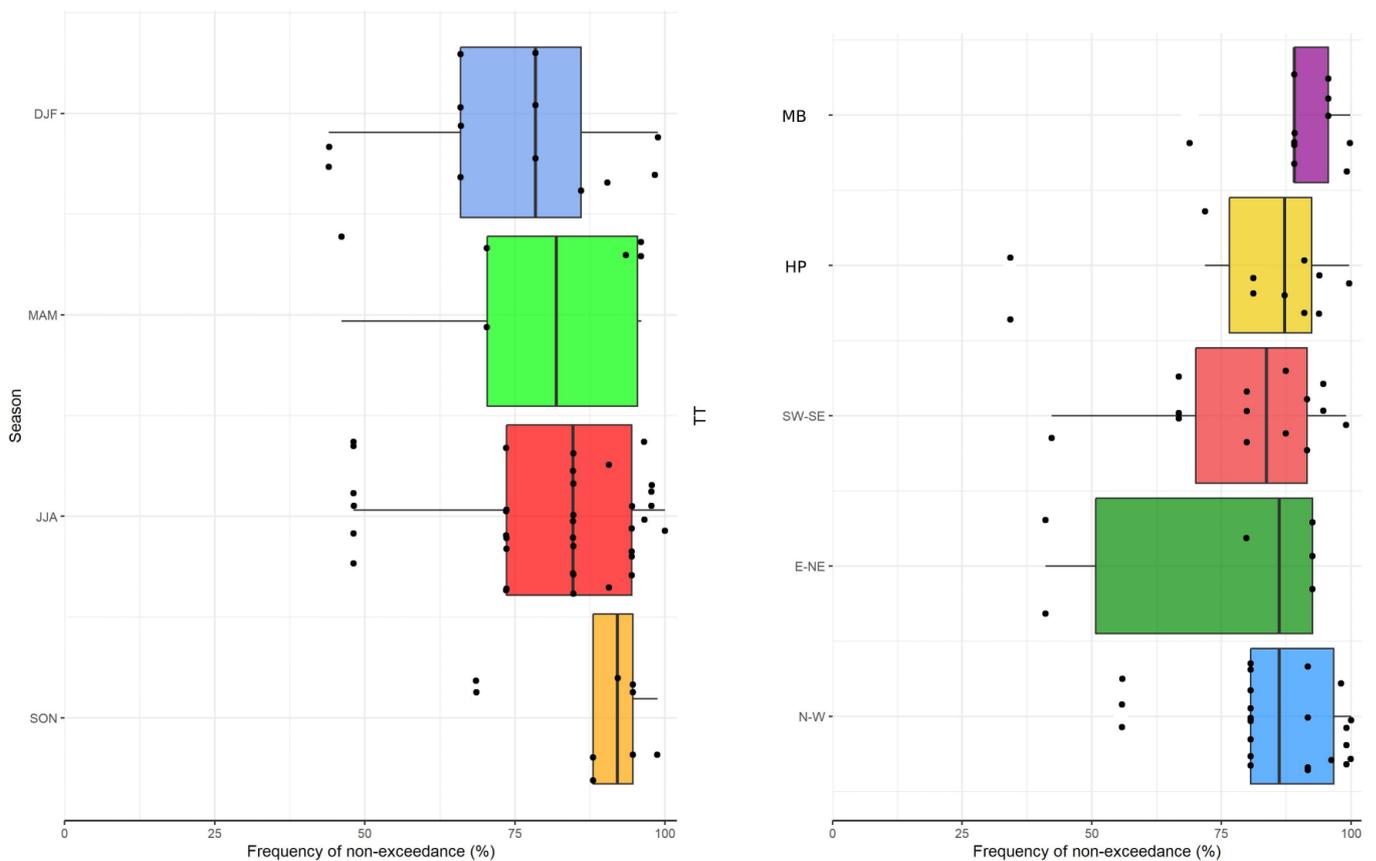


FIGURE 22 – À gauche : fréquence au non-dépassement saisonnière de la persistance du TT Lamb des dates de référence d’occurrence de crue pour le membre 1 de 20CR (1851-2014). À droite : identique mais pour une fréquence au non-dépassement par TT.

en Annexe A.

Il n'y a pas ou très peu de variation en fonction du membre pour la saisonnalité du TT Lamb sur la période 1851-2014. En ce qui concerne le TT des dates de référence d'occurrence de crues, seule la saison d'été voit quelques différences en terme de classification, avec 1 et 5 crues classifiées différemment, sans toutefois changer les tendances observées sur le membre 1. Enfin, lorsque l'on considère l'ensemble des dates des occurrences de crues et plus seulement les dates de référence, les changements sont encore minimales et de l'ordre de quelques jours classifiés différemment. La seule nuance est que l'on ne retrouve pas le plus grand nombre de jours de SE-SW comparé au N-W en automne.

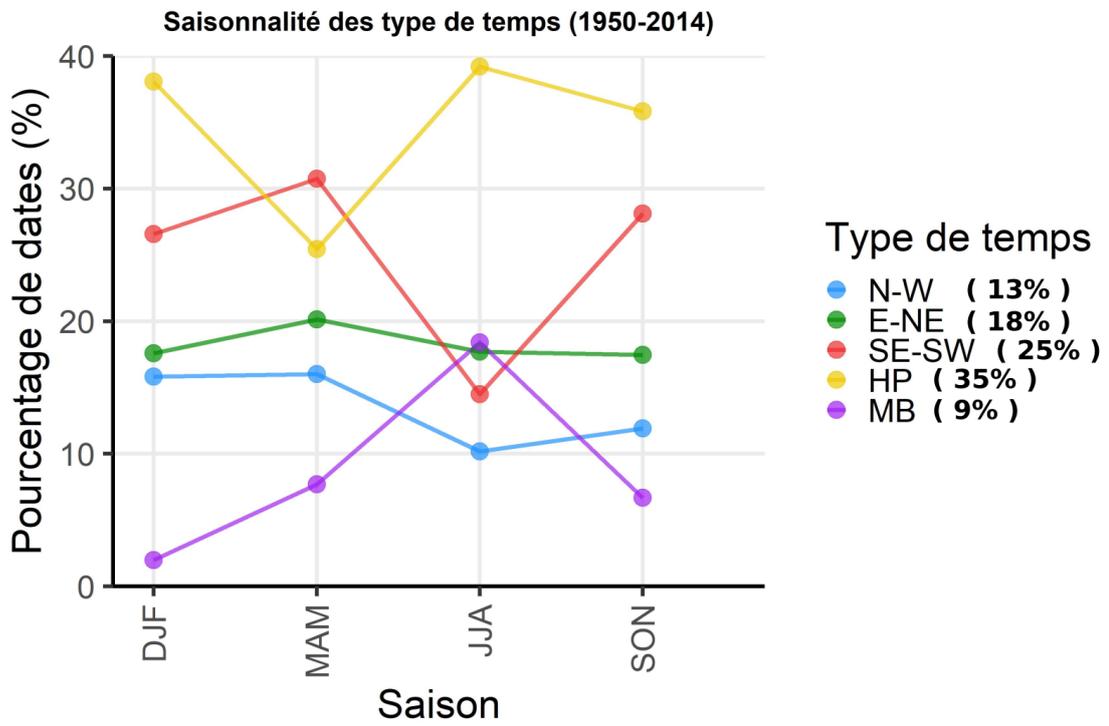
La persistance des séquences de TT dans la climatologie est quant à elle très peu impactée par le choix du membre, en moyenne et dans sa saisonnalité. Seules quelques persurances parmi les extrêmes les plus longs sont visiblement modifiées de quelques jours. Pour la persistance du TT Lamb des dates de référence d'occurrence de crues, bien que l'on observe des changements mineurs sur des événements individuels, le choix du membre 20CR a peu d'impact sur les résultats observés sur l'ensemble des événements.

Finalement, nous allons comparer les résultats obtenus pour le TT Lamb avec le membre 1 de 20CR et ERA5, sur leur période de référence commune de 1950 à 2014. L'étude de l'impact de la prise en compte de l'ensemble des dates d'occurrence de crues et de la persistance apportant ici très peu d'informations complémentaires et des conclusions similaires malgré quelques différences (non montré par souci de concision), nous nous concentrons ici sur les différences de climatologie du TT Lamb et de TT des occurrences de crues en fonction de la réanalyse. En comparant les Figures 18 et 23a on peut d'abord noter que pour le membre 1 de 20CR, le fait de changer la période n'a pratiquement pas d'impact sur la saisonnalité du TT Lamb. En ce qui concerne le TT des crues, le changement de période n'a qu'un effet marginal, qui ne modifie pas le comportement saisonnier principal (Figures 19 et 24a). On s'intéresse maintenant aux différences liées purement à la réanalyse utilisée pour la production du TT Lamb. En comparant les Figures 24a et 24b on voit que le choix de la réanalyse a un impact important sur une partie de la saisonnalité du TT Lamb. Notamment avec la réanalyse ERA5 on passe de 35% de HP pour 20CR à 28% pour ERA5 et de 13% de N-W à 19%. Cette addition de HP et diminution de N-W pour 20CR est particulièrement marquée en été. En ce qui concerne le TT Lamb des crues (Figures 24a et 24b), pour ERA5 on voit que beaucoup plus d'occurrences de crues estivales sont attribuées au TT SE-SW et moins au HP (avec néanmoins un faible échantillon pour conclure). Les changements pour les autres saisons sont marginaux.

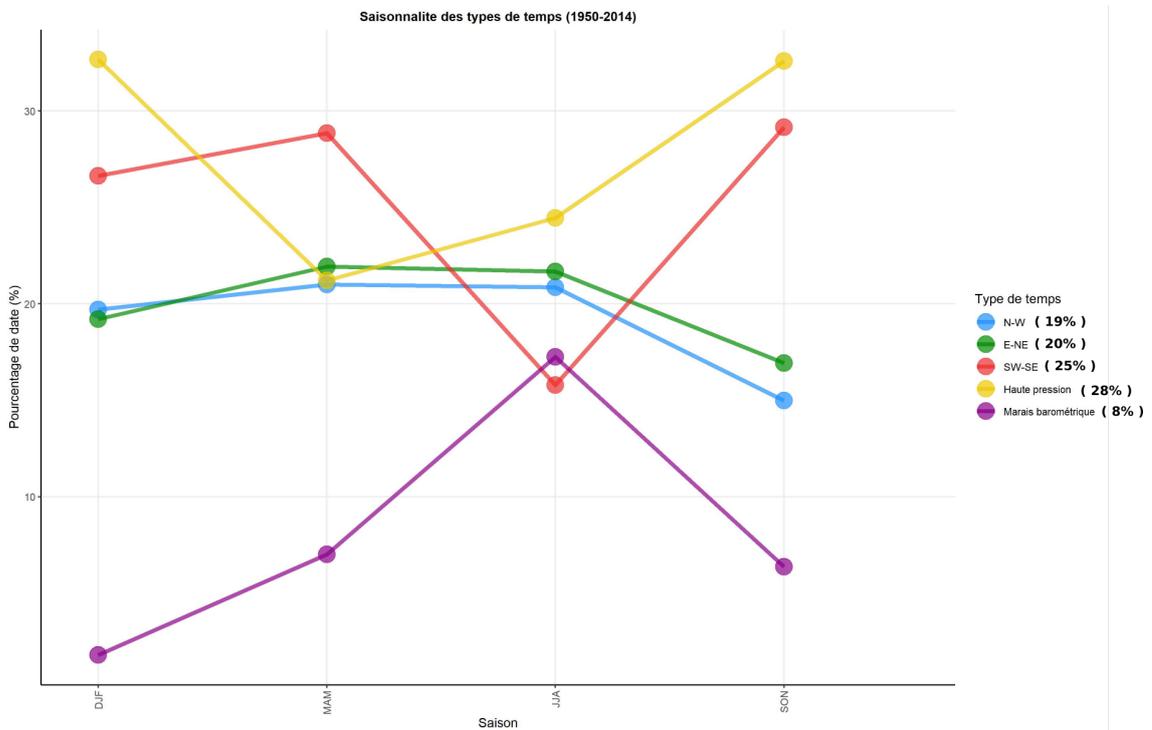
Cette étude du TT Lamb des occurrences de crues torrentielles du "Y grenoblois" a permis de mettre en évidence des comportements météorologiques différents du reste de la climatologie en terme de circulation atmosphérique grande échelle et ce pour une échelle de temps plus longue qu'avec la classification EDF. Néanmoins, cette approche reste limitée par son usage de classes et donc son incapacité à caractériser de manière continue les circulations atmosphériques. Dans ce but, des indicateurs statistiques continus sont donc requis.

3.2 Indicateurs hydrométéorologiques du géopotentiel

Afin de mieux caractériser l'état de l'atmosphère en terme de l'évolution spatio-temporelle des circulations atmosphériques, nous utilisons ici les indicateurs du géopotentiel définis précédemment : la célérité, la singularité, la singularité relative et le MPD, calculés journalièrement (sans moyenner sur les analogues, *celnei*, *singnei* et *rsingnei* n'apportant en définitive pas de résultats supplémentaires par rapport aux premiers indicateurs). On se concentrera sur les résultats obtenus avec le membre 1 de

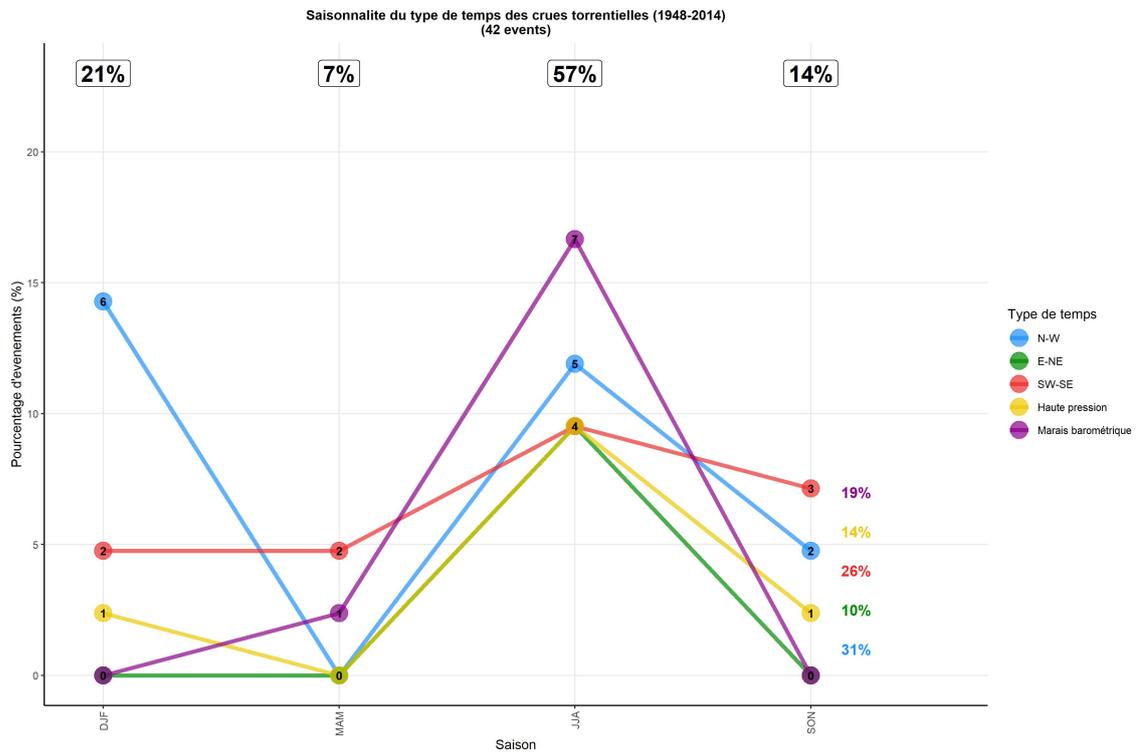


(a) 20CR membre 1

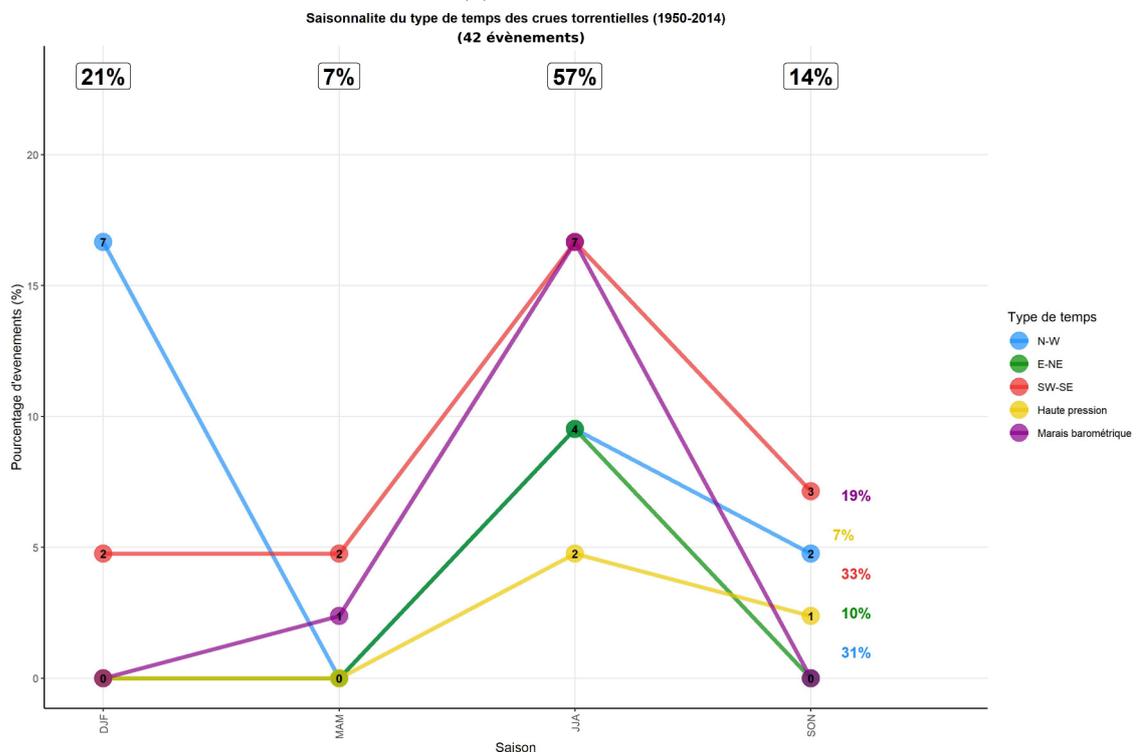


(b) ERA5

FIGURE 23 – Climatologie du TT Lamb (pourcentage de date de la saison) (1950-2014)



(a) 20CR membre 1



(b) ERA5

FIGURE 24 – Saisonnalité du TT Lamb pour les dates d’occurrence de crues (1950-2014). Le pourcentage en haut est l’occurrence saisonnière et celui à droite l’occurrence par TT. Les chiffres dans les bulles correspondent au nombre d’évènements.

20CR et plus particulièrement sur le cas d'étude de la paire d'indicateurs singularité-célérité. Pour cette paire d'indicateurs nous regarderons également les résultats obtenus pour ERA5 sur sa période de référence. L'étude des indicateurs du géopotential pour l'ensemble des membres et des réanalyses, debiaisés des signaux saisonniers et du TT, sera présentée en Section 3.3.1 en même temps que le reste des indicateurs.

Si l'on compare la distribution de la paire d'indicateurs célérité-singularité pour les dates de référence d'occurrences de crues au reste des dates de 1851-2014 (Figure 25), on note que la distribution est sensiblement la même, couvrant la même part de cet espace à 2 dimensions et avec le même centre de densité apparent. Cette impression est confirmée par un test de densité kernel qui au seuil de 95% confirme l'hypothèse que les 2 distributions sont identiques. Cette paire d'indicateurs est donc un mauvais discriminant des situations de crues par rapport au reste de la climatologie. Néanmoins, si l'on observe le comportement saisonnier de ces indicateurs pour les occurrences de crues, on relève que les crues hivernales sont associées à des valeurs de singularité faibles comparées à la climatologie (inférieures à 0.2) et dans une moindre mesure à de relativement plus faibles célérités (moins de 0.28). Si on fait maintenant la distinction entre séquences des crues purement torrentielles et séquences de crues concomitantes (au moins une crue torrentielle et une crue de rivière), on relève que les crues concomitantes se produisent également pour des singularité faibles et des célérités un peu plus faibles par rapport au reste de la climatologie.

La Figure 26 reprend cette comparaison entre climatologie et occurrences de crue pour le couple cel-sing, mais différencie cette fois les occurrences de crues par leur TT EDF associé. Les crues Méditerranéennes ont une distribution semblable à la climatologie, quand les crues Océaniques ne se retrouvent que pour de faibles valeurs de singularité (et pas pour les plus fortes célérités). A l'inverse, les crues Anticycloniques et Continentales ne se retrouvent pas pour les faibles singularités (cette observation reste à nuancer par la faible taille de l'échantillon dans ces deux derniers cas).

Ces observations sur la saisonnalité et le TT EDF des occurrences de crues relatifs à la climatologie, sont intéressantes à mettre en regard de la saisonnalité intrinsèque de la singularité et la célérité. Avec la Figure 27a on note que la distribution climatologique de cel-sing est légèrement décalée vers les faibles célérités pour l'été et les fortes célérités pour l'hiver. En ce qui concerne le TT EDF de la climatologie de cel-sing, la célérité est légèrement plus faible pour l'Océanique, tandis que la singularité est beaucoup plus faible (Figure 27b). Ces résultats nuancent un peu la conclusion d'une plus faible singularité des dates d'occurrence de crues océaniques et mettent en évidence la nécessité de se détacher du signal de fond saisonnier et par TT lorsque l'on utilise des indicateurs (approche développée en Section 3.3.1).

Nous testons également la sensibilité des résultats de ce cas d'étude sur la célérité et la singularité à un changement de réanalyse (et donc conjointement de période de calcul pour l'analogie). La Figure 28 montre à nouveau la distribution des couples cel-sing pour les occurrences de crues comparée à celle de la climatologie, mais cette fois pour ERA5. Comparé à la Figure 25, la distribution de la climatologie est sensiblement la même et la répartition saisonnière des crues et la répartition des crues concomitantes torrent-rivière est similaire. Le changement de réanalyse et de période a donc peu d'impact sur les observations faites précédemment, même s'il peut impacter les valeurs journalières individuellement. La comparaison des indicateurs pour ERA5 et 20CR sur la même période de référence sera faite en Section 3.3.1, en même temps que les autres indicateurs.

Nous nous intéressons maintenant au pouvoir discriminant entre climatologie et dates d'occurrence de crues des autres indicateurs du géopotential (cel, sing, rsing et MPD). On étudie toujours la distribution

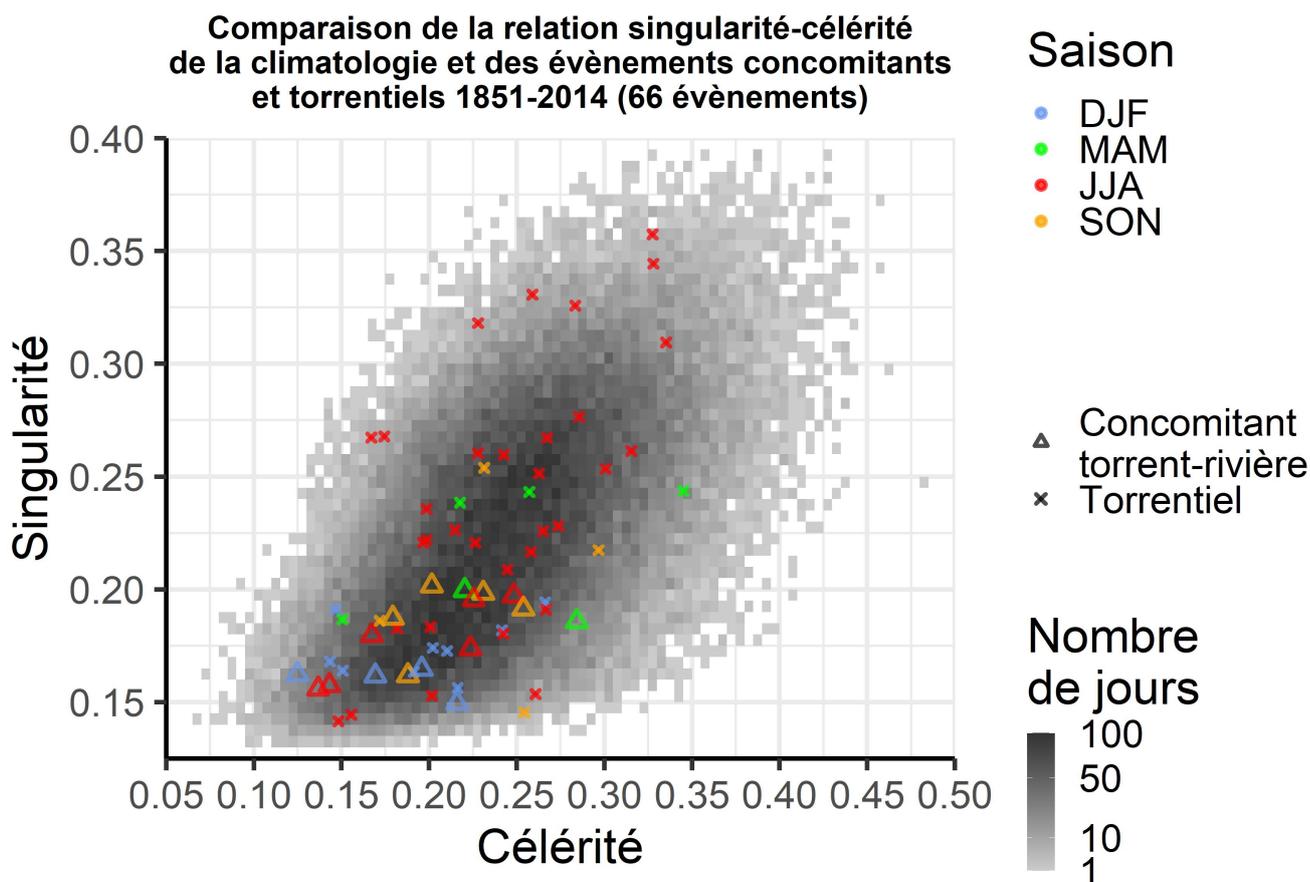


FIGURE 25 – Distribution des valeurs de singularité et de célérité des dates de référence d’occurrence de crues, par rapport au reste de la climatologie (20CR). La densité de la climatologie est représentée en niveaux de gris (plus sombre pour une paire d’indicateurs plus représentée). Les crues sont représentées par des symboles de couleur en fonction de leur TT EDF.

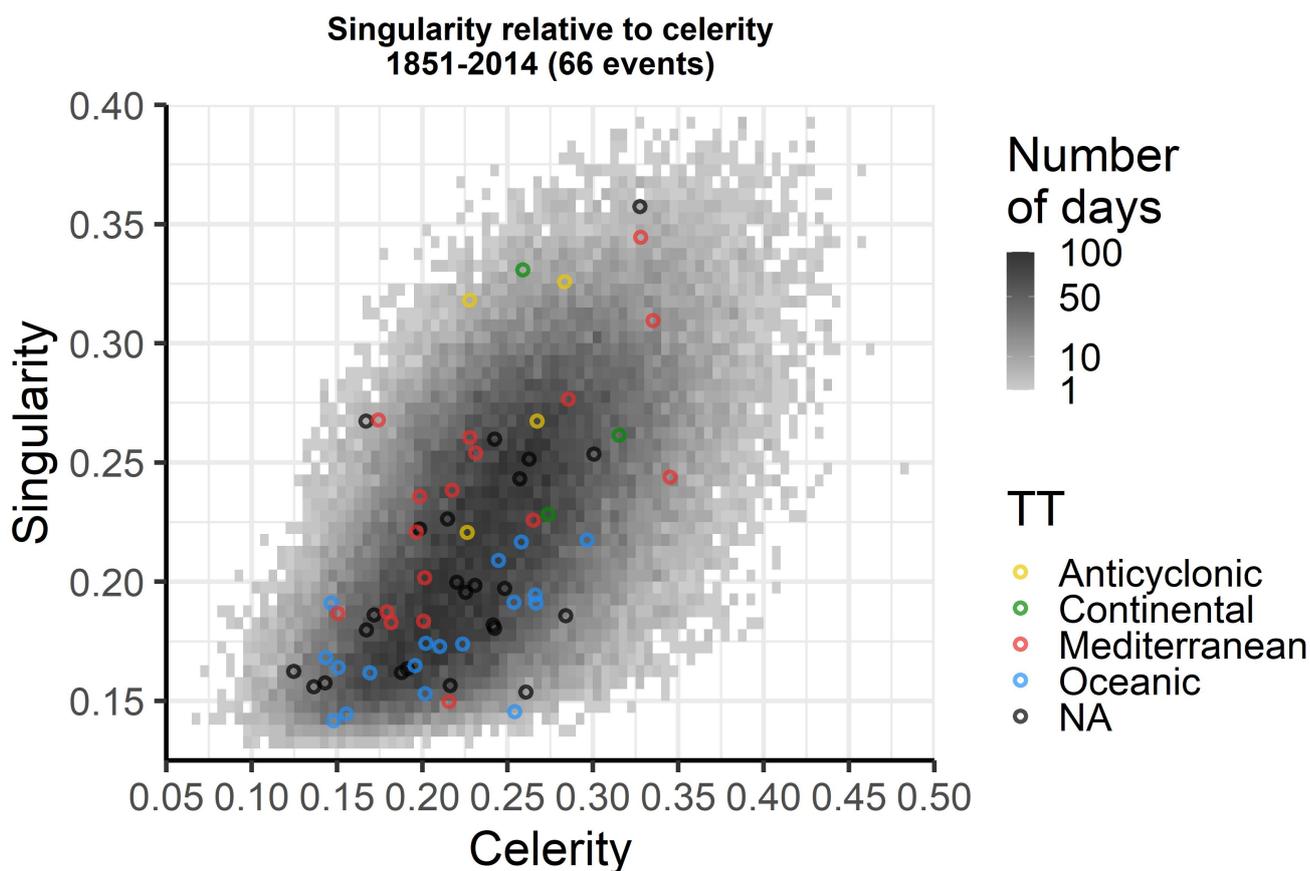
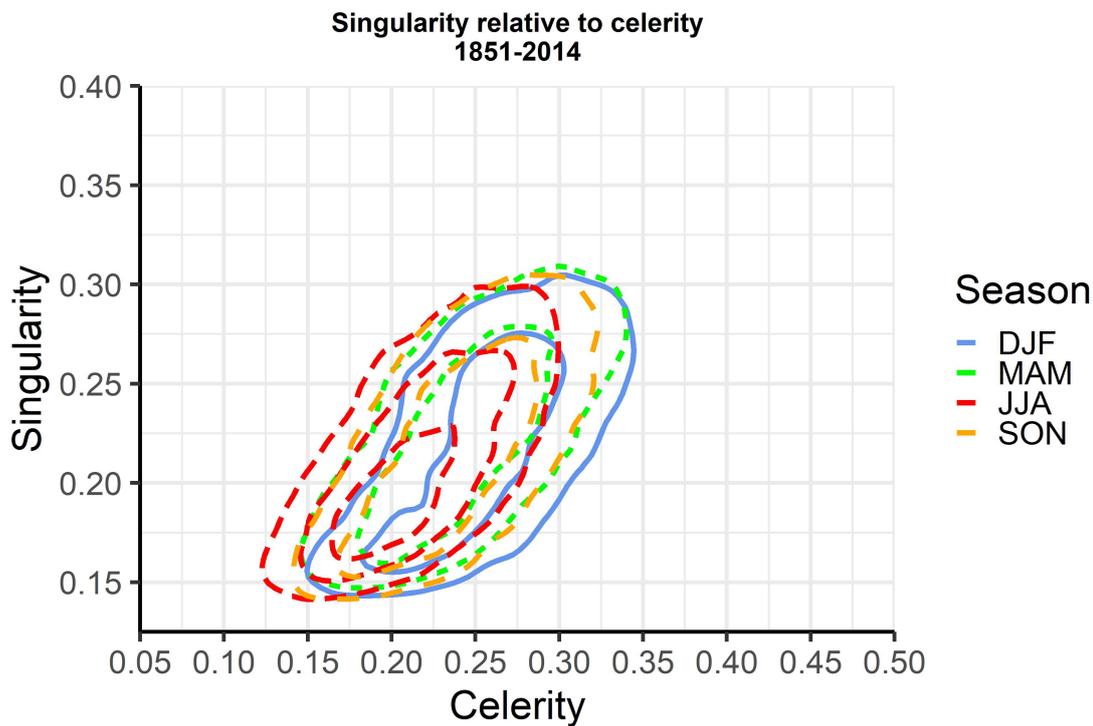
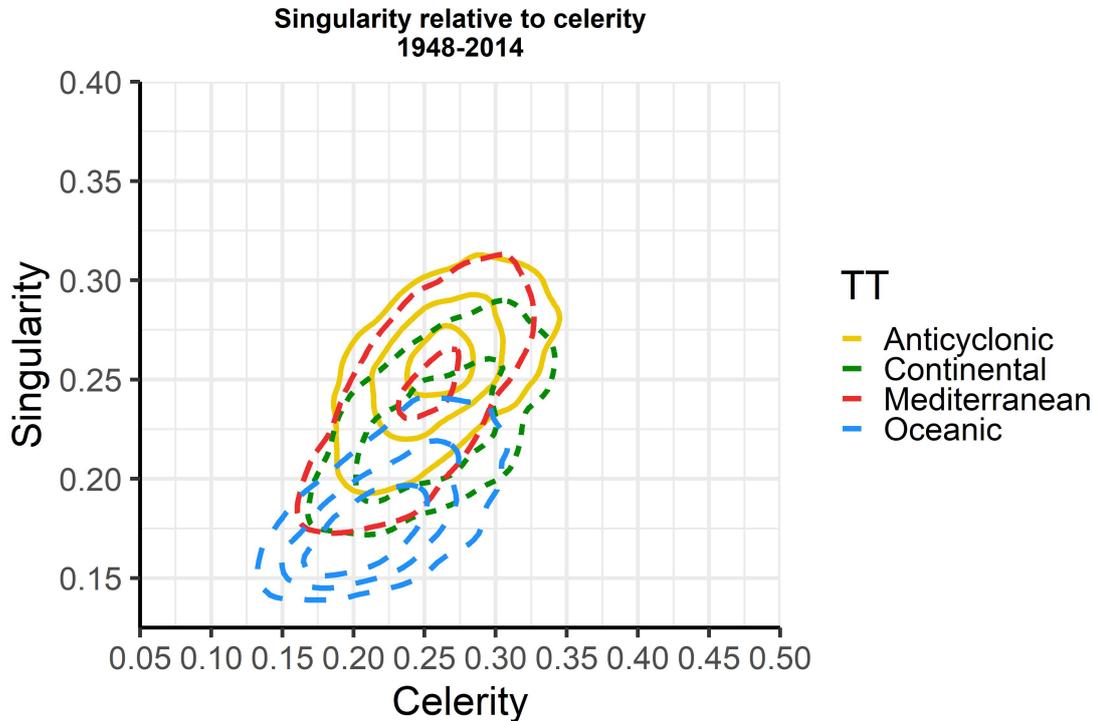


FIGURE 26 – Distribution des valeurs de singularité et de célérité des dates de référence d’occurrence de crues, par rapport au reste de la climatologie pour 20CR membre 1. La densité de la climatologie est représentée en niveaux de gris (plus sombre pour une paire d’indicateurs plus représentée). Les crues sont représentées par des symboles de couleur. NA veut dire que le TT n’est pas disponible à cette date.



(a) Saison (1851-2014)



(b) TT EDF (1948-2014)

FIGURE 27 – Distribution de la climatologie cel-sing par catégories : courbes d'équi-densité pour l'ensemble de couples cel-sing de la période pour 20CR membre 1.

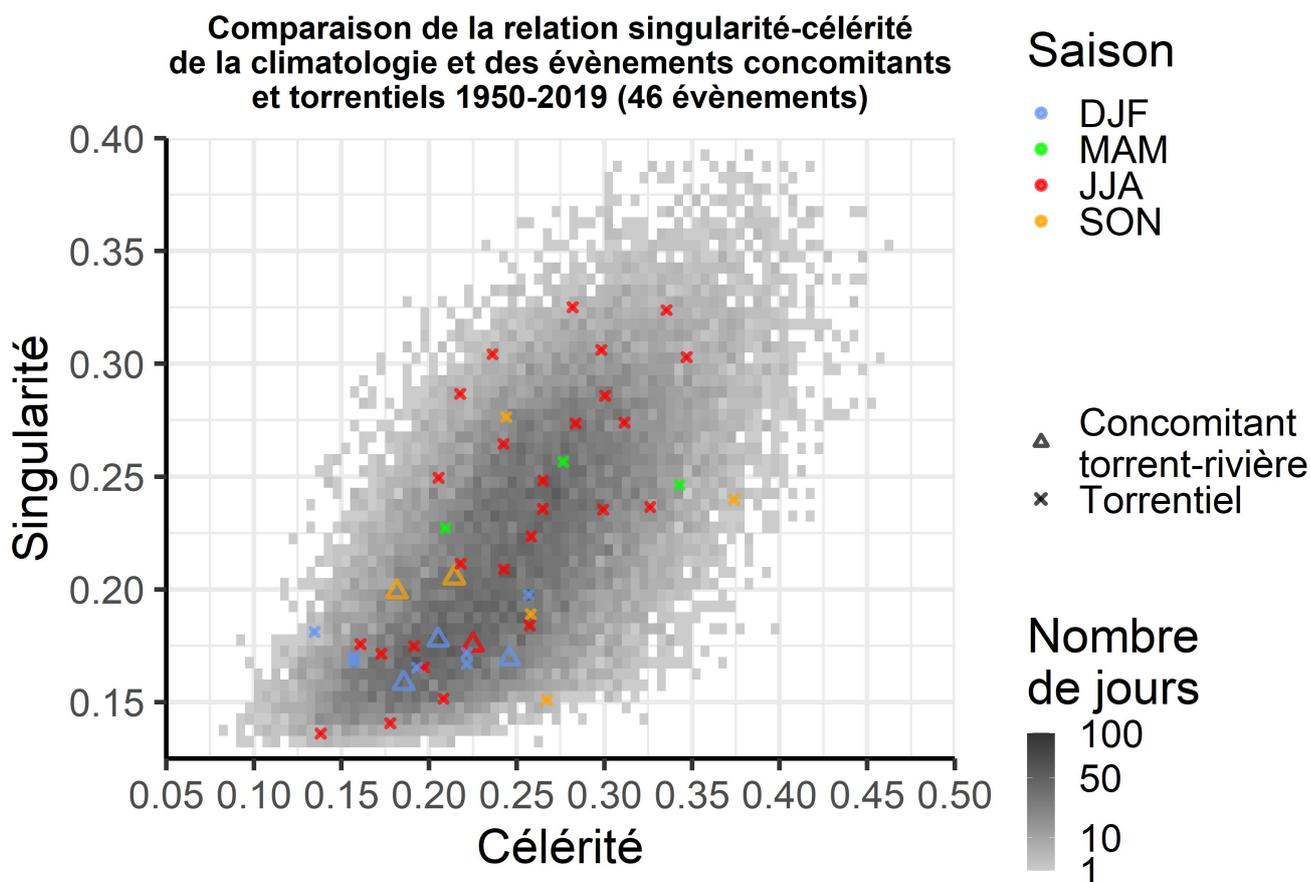


FIGURE 28 – Distribution des valeurs de singularité et de célérité des dates de référence d’occurrence de crues pour ERA5, par rapport au reste de la climatologie. La densité de la climatologie est représentée en niveaux de gris (plus sombre pour une paire d’indicateurs plus représentée). Les crues sont représentées par des symboles de couleur.

relative de la climatologie et des occurrences de crues pour des paires d'indicateurs, mais cette fois afin de ne pas avoir de biais lié à la gamme de valeur on utilise la fréquence au non-dépassement. L'étude, débiaisée du signal saisonnier et par TT, est faite en parallèle des autres indicateurs dans la Section 3.3.1. Les résultats pour ces paires d'indicateurs du géopotential sont donnés en Figure 29. Un couple d'indicateurs discriminant bien situations de crues et climatologie présenterait une distribution des crues très différentes de la climatologie, avec les points représentant les crues dans une zone de faible densité, idéalement vers un extrême. Ce n'est le cas d'aucune des paires étudiées, néanmoins certaines paires présentent une concentration plus dense d'occurrences de crues vers un de leurs extrêmes :

- Fort MPD et faible r_{sing} (Figure 29c).
- Faible cel et faible sing (Figure 29d).
- Faible sing et faible r_{sing} (Figure 29f).

Aucun de ces indicateurs ne permet donc une discrimination suffisante des situations atmosphériques génératrices de crue pour l'ensemble des crues. Comme dans le cas d'étude de la célérité-singularité, l'ajout de l'information de la saison des crues, du TT ou de la concomitance avec des crues de rivières présente des résultats plus satisfaisants (non montrés ici par souci de concision), mais la distribution des indicateurs du géopotential pour les occurrences de crues estivales reste très similaire à la climatologie, alors qu'elles constituent 59% des crues (le printemps et l'automne constituant de trop petits échantillons pour envisager une conclusion fiable).

Le calcul de la moyenne des indicateurs sur la durée totale de chaque séquence hydrométéorologique ne modifie pas non plus les conclusions (non montré ici par souci de concision). De même l'utilisation d'une moyenne glissante de 10 jours vers le passé sur les indicateurs (afin de prendre en compte la possible influence des systèmes météorologiques antécédents sur l'état hydrologique du bassin versant) n'améliore pas les résultats (non montré ici par souci de concision).

Les indicateurs portant sur le champ de géopotential ont donc mis en évidence un comportement différent des crues hivernales, océaniques et/ou concomitantes torrent-rivière par rapport à la climatologie, mais ils ne permettent pas une telle discrimination pour les autres saisons. Il est donc nécessaire d'étudier des indicateurs portant sur d'autres variables météorologiques afin de compléter cette première approche et mieux caractériser les scénarios atmosphériques à l'origine des crues estivales. De plus, nous avons mis en évidence la nécessité de se détacher du signal de fond saisonnier et par TT afin d'établir une discrimination plus objective entre climatologie et crues. C'est cette approche qui sera menée sur de nouvelles variables et reprise pour les indicateurs du géopotential dans la prochaine section.

3.3 Autres indicateurs hydrométéorologiques

Afin de caractériser de manière plus complète les scénarios atmosphériques générant les crues torrentielles du "Y grenoblois", nous présentons dans un premier temps les résultats des indicateurs hydrométéorologiques portant sur les champs de géopotential, d'IVT, de PWAT, de CAPE, de température, de θ'_w , d'humidité spécifique, de vitesse horizontale du vent et de sa vitesse verticale. Dans un second temps, nous discuterons l'indicateur portant sur les rivières atmosphériques.

3.3.1 Autres indicateurs

L'approche menée ici pour ces indicateurs hydrométéorologiques portant sur de nouvelles variables a donc été de calculer pour les dates d'occurrence de crues, des fréquences au non-dépassement par mois et par TT, comme décrit dans la méthodologie. On s'intéresse ensuite au SPD (score de pouvoir discriminant issu de la médiane et de l'écart à la distribution climatologique, EDC) de ces fréquences

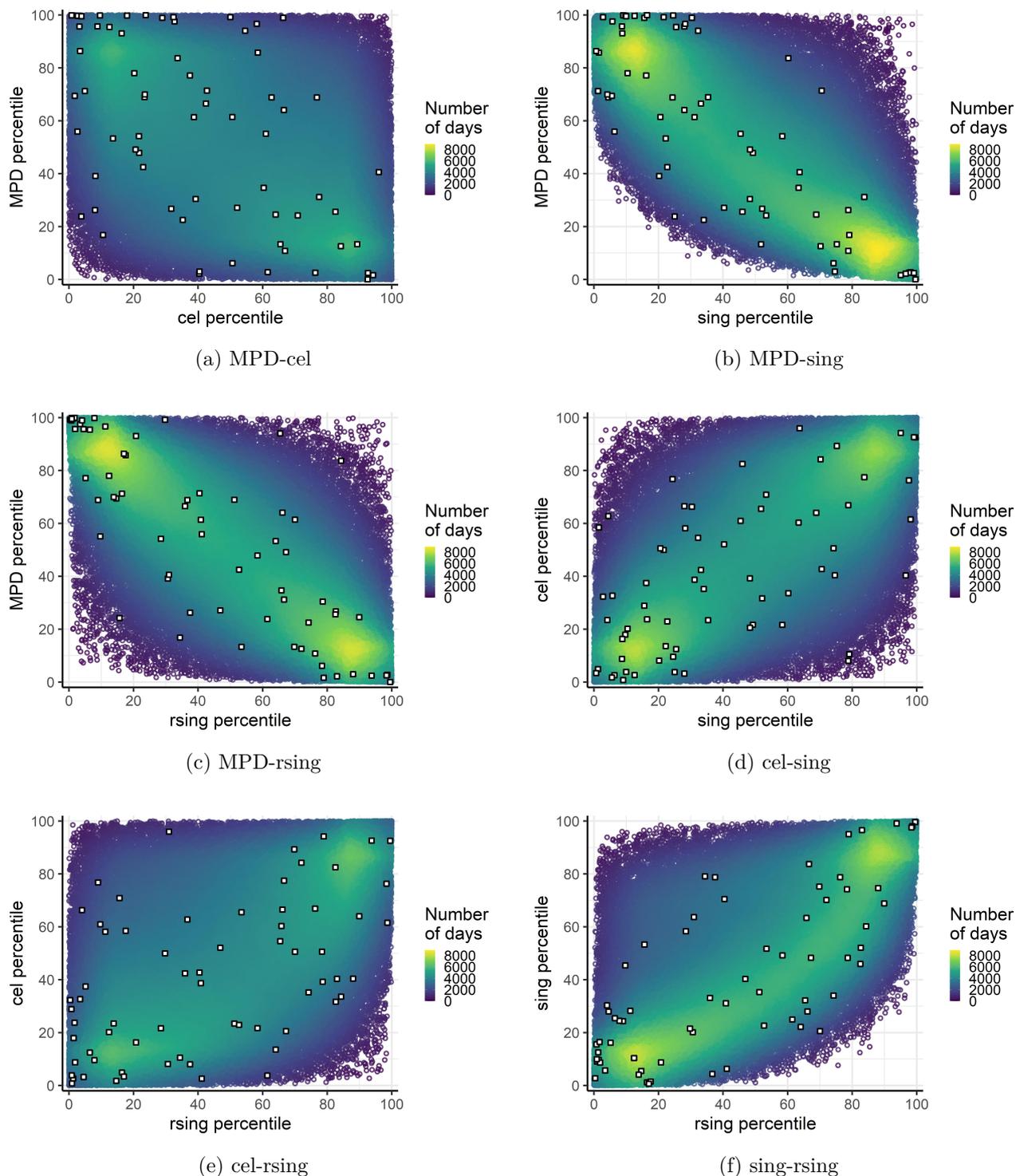


FIGURE 29 – Distribution des valeurs par couples d’indicateurs du géopotential des dates de référence d’occurrence de crues (66 événements), par rapport au reste de la climatologie (1851-2014). La densité de la climatologie est représentée par l’échelle de couleur (nombre de voisins dans un rayon de 0,5 écart-type). Les occurrences de crues sont représentées par les carrés blancs. Les axes sont en fréquence au non-dépassement.

pour les occurrences de crues, afin de déterminer les indicateurs discriminant le mieux occurrences de crues et climatologie et permettant donc de décrire des scénarios atmosphériques davantage générateurs de crues. On regarde également les performances de ce SPD par saison et par TT Lamb.

Dans cette section, les indicateurs sont nommés de façon abrégée comme suit : var_stat_zone avec “var” le champ météorologique concerné (“th” abrégant θ'_w et “vvel” la vitesse verticale), “stat” la statistique appliquée (“avrg” la moyenne, “q5” le quantile 5%, “q95” le quantile 95%, “min” le minimum, “max” le maximum, “MD” la différence minimum-maximum) et “zone” la zone de calcul (rien si toute la zone d’analogie et “2px” si uniquement la surface couverte par les 2 pixels 20CR).

La Figure 30 illustre ces valeurs de médiane, EDC et SPD pour l’ensemble des indicateurs calculés et le membre 1 de 20CR sur la période 1851-2014. En prenant en compte l’ensemble des événements torrentiels, les indicateurs les plus performants portent sur la CAPE, l’humidité spécifique, l’IVT et la PWAT et sont plus précisément la cape_max_2px, l’ivt_max_2px, la pwat_avrg_2px et le q700_min_2px. Le front_MD est un bon exemple d’indicateur performant en médiane, avec une médiane très proche de l’extrême faible mais une distribution semblable à la climatologie (faible EDC), le Score de Pouvoir Discriminant est donc faible. Néanmoins le plus souvent médianes extrêmes et forts EDC sont associés. On relève aussi que lorsque l’on sépare les occurrences de crues par TT, l’indicateur le plus discriminant et la gamme de valeurs de SPD varient en fonction du TT et que pour certains TT un indicateur aura une médiane particulièrement faible (v700_max_2px pour E-NE) et pour d’autres une médiane particulièrement forte (v700_max_2px pour N-W), impliquant un SPD pour l’ensemble des occurrences de crues bas, alors que les SPD par TT sont relativement forts.

L’étude d’un seul membre, bien qu’illustrative du mode de calcul du SPD et de son comportement ne permet pas de prendre en compte l’incertitude liée aux données d’entrée (la réanalyse 20CR). Nous développerons donc plus en détail notre analyse des indicateurs les plus performants à l’aide la Figure 31, qui donne la valeur moyenne du SPD sur les membres 1, 2 et moyen de 20CR, ainsi que l’écart entre les 2 valeurs les plus différentes (entre membres). Ainsi on obtient une valeur de SPD plus robuste, ainsi qu’un proxy de sa fiabilité en regard de l’incertitude découlant des données 20CR.

A l’échelle de l’ensemble des événements, la première chose à noter est que les indicateurs du géo-potential présentent un moins bon SPD que les nouveaux indicateurs. Généralement les indicateurs calculés sur l’ensemble de l’Europe de l’Ouest (zone d’analogie) performant moins bien que ceux calculés localement sur les Alpes françaises (2 pixels). Notre indicateur de l’intensité de front (front_MD) présente des performances faibles. La mesure de la différence entre les membres permet de rejeter des indicateurs qui malgré une bonne performance pour certains TT présentent une dispersion du SPD trop forte entre les membres pour être considéré comme fiable. C’est le cas notamment de vvel700_MD pour les flux d’E-NE qui malgré un SPD de 0.5 présente une différence maximale entre membres de 0,31. Généralement, les indicateurs performant le mieux pour E-NE, mais c’est aussi le TT pour lequel la dispersion est maximale, probablement du fait du faible échantillon de crues utilisé pour le calcul (6 événements). Quel que soit le TT, chaque TT présente un indicateur (souvent différent des autres) avec de meilleures performances que lorsque l’on prend en compte l’ensemble des TT. La seule exception est MB, pour lequel les indicateurs performant moins bien. En prenant en compte la valeur moyenne du SPD entre les membres et sa dispersion les indicateurs les plus discriminants et les plus fiables sont :

- Pour l’ensemble des occurrences de crues : cape_max_2px, ivt_max_2px, pwat_min_2px et q700_min_2px.
- Pour celles de N-W : cel, MPD, cape_max_2px, ivt_min_2px, pwat_min_2px, q700_min_2px, t850_min_2px, th850_min_2px, v700_max_2px et vvel700_MD.

	med	EDC	SPD	medianW	EDC MW	SPD MW	medianE	EDC ENE	SPD ENE	medianSE	EDC SNE	SPD SNE	medianSW	EDC SW	SPD SW	medianHP	EDC HP	SPD HP	medianB	EDC MB	SPD MB
cal	352.2	0.036	0.06	193.81	0.06	0.2	63.7	0.1	0.14	22.05	0.077	0.22	49.59	0.067	0.22	49.59	0.067	0.22	38.59	0.085	0.26
calhd	424.26	0.027	0.02	50.58	0.026	0.2	89.9	0.12	0.15	22.82	0.092	0.23	49.59	0.104	0.23	49.59	0.104	0.23	38.59	0.085	0.26
calhd	341.6	0.04	0.07	28.07	0.037	0.14	91.82	0.14	0.55	2.7	0.092	0.24	19.92	0.105	0.36	19.92	0.105	0.36	16.85	0.085	0.19
slng	31.96	0.033	0.08	33.42	0.053	0.1	99.76	0.14	0.68	21.61	0.077	0.23	33.08	0.087	0.35	33.08	0.087	0.35	7.55	0.085	0.24
slng	32.15	0.039	0.08	15.73	0.078	0.3	66.53	0.1	0.18	21.21	0.077	0.25	33.08	0.122	0.23	33.08	0.122	0.23	7.109	0.049	0.11
slng	30.15	0.052	0.11	16.42	0.078	0.29	69.37	0.08	0.17	20.72	0.086	0.28	11.95	0.104	0.28	11.95	0.104	0.28	7.102	0.085	0.2
MFD	68.25	0.044	0.09	79.46	0.073	0.24	63.37	0.08	0.17	64.32	0.086	0.28	81.99	0.104	0.47	81.99	0.104	0.47	26.97	0.086	0.2
cape_avg_Zpx	79.75	0.071	0.23	76.59	0.078	0.23	91.12	0.14	0.65	64.32	0.089	0.11	85.21	0.122	0.48	85.21	0.122	0.48	35.24	0.065	0.11
cape_max_Zpx	80.35	0.07	0.24	78.14	0.071	0.22	90.32	0.14	0.63	89.01	0.126	0.54	82.12	0.119	0.43	82.12	0.119	0.43	35.22	0.067	0.11
cape_min_Zpx	78.95	0.074	0.24	78.64	0.083	0.26	92.71	0.139	0.66	87.12	0.111	0.46	78.98	0.123	0.4	78.98	0.123	0.4	43.46	0.082	0.06
hc_avg	73.5	0.049	0.13	88.94	0.098	0.42	60.17	0.08	0.09	68.78	0.048	0.1	90.35	0.122	0.55	90.35	0.122	0.55	23.46	0.067	0.2
hc_max_Zpx	84.84	0.066	0.26	94.3	0.11	0.54	13.52	0.12	0.49	79.29	0.068	0.22	97.47	0.107	0.56	97.47	0.107	0.56	51.54	0.067	0.01
hc_min_Zpx	83.08	0.073	0.27	92.86	0.113	0.52	16.13	0.14	0.53	76.84	0.091	0.27	96.39	0.125	0.64	96.39	0.125	0.64	59.36	0.051	0.05
hc_avg_Zpx	80.01	0.066	0.22	94.53	0.113	0.56	13.1	0.12	0.49	80.01	0.068	0.23	97.18	0.124	0.65	97.18	0.124	0.65	36.75	0.067	0.1
hc_min_Zpx	69.44	0.05	0.11	91.87	0.098	0.46	43.21	0.08	0.06	78.2	0.097	0.3	70.62	0.067	0.15	70.62	0.067	0.15	16.55	0.086	0.32
hc_max_Zpx	71.82	0.053	0.13	82.13	0.09	0.32	83.43	0.12	0.45	67.45	0.091	0.18	57.68	0.105	0.06	57.68	0.105	0.06	41.93	0.085	0.08
pwat_avg_Zpx	81.64	0.079	0.28	89.97	0.115	0.51	90.66	0.14	0.63	68.51	0.068	0.14	90.64	0.142	0.64	90.64	0.142	0.64	28.59	0.051	0.12
pwat_max_Zpx	79.2	0.074	0.24	89.62	0.118	0.55	94.99	0.14	0.7	67.54	0.069	0.13	92.67	0.124	0.59	92.67	0.124	0.59	41.58	0.084	0.08
pwat_min_Zpx	83.53	0.073	0.27	91.9	0.106	0.49	89.41	0.12	0.53	67.72	0.063	0.15	87.63	0.122	0.51	87.63	0.122	0.51	52.53	0.033	0.01
pwat_q95	71	0.045	0.11	82.75	0.095	0.35	74.6	0.16	0.74	67.72	0.063	0.12	84.22	0.122	0.46	84.22	0.122	0.46	34.51	0.049	0.08
q700_avg	68.01	0.044	0.09	82.64	0.087	0.32	85.59	0.14	0.55	69.66	0.106	0.23	49.67	0.085	0.1	49.67	0.085	0.1	27.33	0.085	0.21
q700_max_Zpx	84.66	0.079	0.3	91.65	0.123	0.57	94.59	0.14	0.69	72.58	0.083	0.21	90.54	0.122	0.55	90.54	0.122	0.55	44.04	0.069	0.05
q700_min_Zpx	85.94	0.076	0.3	91.67	0.118	0.55	94.99	0.14	0.67	67.54	0.069	0.13	92.67	0.124	0.59	92.67	0.124	0.59	41.58	0.084	0.08
q700_q95	84.9	0.085	0.33	89.86	0.123	0.54	93.34	0.14	0.67	72.84	0.06	0.15	87.63	0.122	0.51	87.63	0.122	0.51	52.53	0.033	0.01
1850_avg	64.35	0.056	0.16	73.87	0.107	0.35	74.54	0.12	0.33	68.1	0.069	0.13	53.01	0.032	0.01	53.01	0.032	0.01	55.86	0.065	0.04
1850_max_Zpx	72.56	0.059	0.15	75.77	0.073	0.21	83.26	0.12	0.44	72.47	0.069	0.16	53.01	0.069	0.09	53.01	0.069	0.09	53.98	0.065	0.08
1850_min_Zpx	73.25	0.065	0.17	78.08	0.073	0.22	76.12	0.14	0.41	74.44	0.083	0.16	67.31	0.087	0.17	67.31	0.087	0.17	40.52	0.051	0.05
1850_MD	52.72	0.039	0.01	71.12	0.061	0.14	69.3	0.14	0.37	80	0.077	0.28	70.14	0.087	0.19	70.14	0.087	0.19	61.45	0.067	0.09
1850_q95	74.03	0.054	0.14	79.73	0.078	0.26	81.21	0.08	0.17	36.44	0.091	0.11	84.84	0.085	0.31	84.84	0.085	0.31	36.87	0.087	0.13
1850_q5	64.05	0.037	0.06	66.68	0.053	0.1	82.51	0.14	0.49	73.7	0.091	0.24	64.84	0.086	0.14	64.84	0.086	0.14	41.93	0.033	0.03
1850_q1	70.87	0.044	0.1	76.91	0.07	0.21	18.96	0.12	0.36	72.45	0.054	0.13	38.9	0.049	0.06	38.9	0.049	0.06	70.15	0.067	0.15
1850_avg	68.5	0.052	0.11	73.26	0.077	0.2	87.41	0.12	0.5	69.14	0.066	0.14	73.23	0.069	0.18	73.23	0.069	0.18	37.1	0.066	0.09
1850_max_Zpx	71.55	0.059	0.14	75.37	0.062	0.17	77.28	0.12	0.36	69.14	0.066	0.14	43.33	0.069	0.06	43.33	0.069	0.06	61.72	0.067	0.09
1850_min_Zpx	70.56	0.058	0.13	70.79	0.065	0.12	82.16	0.1	0.36	77.83	0.091	0.28	60.3	0.069	0.08	60.3	0.069	0.08	71.02	0.087	0.2
1850_MD	69.91	0.049	0.11	74.9	0.062	0.17	14.24	0.14	0.56	71.13	0.057	0.29	63.16	0.104	0.15	63.16	0.104	0.15	67.3	0.104	0.2
1850_min_Zpx	73.35	0.056	0.15	80.17	0.073	0.24	77.58	0.14	0.43	76.2	0.077	0.26	75.73	0.087	0.25	75.73	0.087	0.25	29.33	0.086	0.2
1850_q5	66.66	0.037	0.07	68.71	0.053	0.11	84.17	0.12	0.46	76.24	0.069	0.24	55.52	0.069	0.04	55.52	0.069	0.04	48.39	0.033	0.01
1850_q95	71.84	0.043	0.1	78.49	0.065	0.21	11.91	0.12	0.51	68.8	0.074	0.19	35.5	0.065	0.1	35.5	0.065	0.1	70.94	0.051	0.12
1850_q1	61.88	0.038	0.05	83.14	0.068	0.25	33.28	0.14	0.26	72.07	0.077	0.15	74.53	0.104	0.21	74.53	0.104	0.21	65.25	0.049	0.08
1850_avg_Zpx	68.31	0.055	0.11	87.2	0.09	0.37	3.78	0.14	0.72	84.24	0.091	0.35	94.72	0.105	0.52	94.72	0.105	0.52	26.77	0.067	0.18
1850_max_Zpx	71.38	0.056	0.13	86.67	0.098	0.4	3.85	0.14	0.72	81.31	0.074	0.26	94.08	0.105	0.51	94.08	0.105	0.51	22.73	0.088	0.27
1850_min_Zpx	68.7	0.049	0.11	87.45	0.082	0.34	7.32	0.14	0.66	88.53	0.083	0.34	86.14	0.104	0.42	86.14	0.104	0.42	31.1	0.066	0.16
1850_q95	71.42	0.046	0.11	85.29	0.093	0.36	2.92	0.14	0.29	74.08	0.071	0.19	72.62	0.084	0.21	72.62	0.084	0.21	28.77	0.066	0.14
1850_q5	53.51	0.032	0.01	87.93	0.098	0.41	27.16	0.14	0.36	38.79	0.063	0.08	60.3	0.085	0.1	60.3	0.085	0.1	25.22	0.049	0.13
1850_MD	3.76	0.028	0.14	4.36	0.013	0.07	1.67	0.14	0.82	1.99	0.022	0.12	4.48	0.023	0.12	4.48	0.023	0.12	0.02	0.038	0.21

FIGURE 30 – Valeurs de la médiane (med en vert), de l'EDC (en bleu) et du SPD (en rouge) pour l'ensemble des occurrences de crues avec le membre 1 de 20CR (1851-2014, 66 évènements) dans les 3 premières colonnes, puis par TT Lamb dans les 12 suivantes. Plus la couleur d'une case est intense, plus l'indicateur est performant pour ce test.

	sc	sc_dif	scNIW	scNIW_dif	scENE	scENE_dif	scSWSE	scSWSE_dif	scHP	scHP_dif	scMB	scMB_dif
cel	0,03	0,05	0,25	0,09	0,25	0,25	0,21	0,12	0,04	0,07	0,29	0,12
celnei	0,02	NA	0	NA	0,55	NA	0,23	NA	0,43	NA	0,26	NA
sling	0,07	0	0,15	0,02	0,76	0,17	0,21	0,05	0,33	0,05	0,22	0,04
slingnei	0,05	NA	0,1	NA	0,68	NA	0,13	NA	0,35	NA	0,24	NA
rslingnei	0,11	NA	0,29	NA	0,18	NA	0,25	NA	0,23	NA	0,11	NA
MPPD	0,1	0,02	0,24	NA	0,17	NA	0,28	NA	0,44	NA	0,2	NA
cape_avg_2px	0,28	0,08	0,23	0,02	0,61	0,11	0,22	0,21	0,32	0,2	0,18	0,07
cape_max_2px	0,3	0,1	0,25	0,14	0,74	0,13	0,57	0,06	0,5	0,3	0,08	0,07
cape_min_2px	0,24	0,01	0,2	0,1	0,66	0,07	0,53	0,09	0,47	0,1	0,09	0,13
lv_avg	0,16	0,07	0,37	0,08	0,74	0,15	0,46	0	0,53	0,24	0,05	0,03
lv_max_2px	0,28	0,05	0,51	0,06	0,09	0,03	0,2	0,21	0,53	0,09	0,2	0,05
lv_min_2px	0,28	0,04	0,47	0,08	0,48	0,02	0,35	0,25	0,59	0,06	0,12	0,2
lv_q95	0,12	0,04	0,53	0,06	0,29	0,1	0,31	0,11	0,66	0,12	0,09	0,1
pwat_avg	0,16	0,06	0,41	0,11	0,09	0,05	0,24	0,16	0,6	0,08	0,15	0,21
pwat_avg_2px	0,32	0,08	0,29	0,06	0,59	0,23	0,16	0,12	0,27	0,2	0,23	0,18
pwat_max_2px	0,28	0,09	0,47	0,08	0,65	0,1	0,2	0,12	0,55	0,17	0,05	0,12
pwat_min_2px	0,31	0,06	0,46	0,1	0,56	0,08	0,19	0,14	0,46	0,07	0,04	0,04
pwat_q95	0,13	0,03	0,5	0,04	0,72	0,08	0,2	0,17	0,53	0,16	0,07	0,1
q700_avg	0,14	0,09	0,32	0,01	0,36	0,24	0,18	0,18	0,14	0,4	0,15	0,09
q700_avg_2px	0,29	0,04	0,48	0,19	0,59	0,2	0,19	0,13	0,11	0,08	0,07	0,13
q700_max_2px	0,29	0,06	0,46	0,19	0,6	0,25	0,23	0,14	0,51	0,11	0,07	0,04
q700_min_2px	0,31	0,04	0,49	0,09	0,59	0,14	0,19	0,2	0,48	0,22	0,06	0,09
q700_q95	0,13	0,09	0,31	0,1	0,62	0,14	0,13	0,09	0,5	0,06	0,05	0,06
ts850_avg	0,12	0,04	0,21	0,01	0,29	0,16	0,13	0,17	0,06	0,1	0,06	0,06
ts850_avg_2px	0,16	0,02	0,26	0,07	0,43	0,11	0,18	0,08	0,07	0,06	0,03	0,06
ts850_max_2px	0,17	0,01	0,24	0,06	0,48	0,15	0,18	0,09	0,17	0,04	0,04	0,05
ts850_MID	0,01	0,01	0,15	0,08	0,39	0,12	0,22	0,06	0,18	0,02	0,1	0,02
ts850_min_2px	0,14	0	0,27	0,03	0,54	0,33	0,1	0,04	0,21	0,21	0,12	0,06
ts850_q5	0,09	0,06	0,11	0,06	0,44	0,09	0,16	0,12	0,15	0,03	0,03	0,01
ts850_q95	0,07	0,04	0,26	0,08	0,38	0,21	0,35	0,08	0,08	0,09	0,16	0,11
th850_avg	0,1	0,03	0,22	0,05	0,47	0,06	0,35	0,09	0,09	0,17	0,11	0,06
th850_avg_2px	0,12	0,03	0,21	0,07	0,46	0,08	0,14	0,07	0,04	0,06	0,07	0,06
th850_max_2px	0,11	0,03	0,17	0,08	0,34	0,25	0,19	0,14	0,08	0,07	0,12	0,14
th850_MID	0,05	0,09	0,18	0,06	0,51	0,19	0,19	0,18	0,11	0,07	0,11	0,16
th850_min_2px	0,14	0,03	0,25	0,03	0,46	0,16	0,16	0,18	0,13	0,19	0,17	0,12
th850_q5	0,08	0,02	0,12	0,04	0,5	0,13	0,15	0,14	0,13	0,13	0,03	0,03
th850_q95	0,09	0,08	0,26	0,1	0,45	0,09	0,16	0,06	0,06	0,07	0,13	0,04
v700_avg	0,06	0,04	0,23	0,04	0,33	0,14	0,21	0,13	0,1	0,16	0,08	0,01
v700_avg_2px	0,14	0,05	0,31	0,09	0,71	0,11	0,2	0,09	0,24	0,05	0,19	0
v700_max_2px	0,17	0,09	0,36	0,2	0,7	0,37	0,37	0,13	0,48	0,09	0,17	0,03
v700_min_2px	0,13	0,04	0,32	0,11	0,69	0,04	0,32	0,13	0,53	0,04	0,24	0,08
v700_q95	0,13	0,05	0,32	0,11	0,13	0,1	0,4	0,11	0,43	0,14	0,13	0,02
vvel700_MID	0,06	0,11	0,37	0,09	0,5	0,28	0,19	0,06	0,25	0,07	0,19	0,06
front_MD	0,16	0,09	0,1	0,07	0,39	0,31	0,22	0,26	0,14	0,08	0,11	0,04

FIGURE 31 – Valeurs du SPD (sc) moyenné sur les 3 membres 20CR (en rouge) et de l'écart maximal de SPD (sc_dif) entre les membres (en violet) (1851-2014, 66 évènements). Plus le rouge est intense, plus le SPD moyen est fort et plus le violet est intense, plus la différence de SPD est importante. Les 2 premières colonnes sont calculées pour l'ensemble des évènements torrentiels et le 8 suivantes uniquement pour les évènements du TT concernés. Une valeur NA signifie que la disponibilité des données n'a permis le calcul de l'indicateur que pour le membre 1 et donc qu'il est impossible de calculer une différence et que la moyenne est faite sur une seule valeur.

- Pour celles de E-NE : sing, MPD, cape_max_2px, ivt_avrg_2px, pwat_min_2px, q700_min_2px, t850_min_2px, th850_min_2px et v700_max_2px.
- Pour celles de SE-SW : sing, cape_avrg_2px, ivt_max_2px, pwat_max_2px, q700_min_2px, t850_q95, t850_max_2px, et v700_min_2px
- Pour celles de HP : sing, cape_avrg_2px, ivt_max_2px, pwat_min_2px, q700_min_2px, et v700_max_2px.
- Pour celles de MB : cel, sing, MPD, ivt_avrg et v700_max_2px.

Par la suite nous nous concentrerons donc sur les indicateurs suivants, qui sont les plus performants à travers un grand nombre de TT et/ou permettent d'illustrer au mieux les différentes variables atmosphériques (vent, humidité, champ de pression, transport de vapeur, convection et température) : cel, sing, MPD, cape_max_2px, ivt_max_2px, pwat_min_2px et v700_max_2px.

Pour référence le même tableau avec les SPD calculés pour les occurrences de crues groupées par saison est donnée en Annexe B. Nous ne nous étendrons pas plus en détail sur ces valeurs puisque les résultats sont globalement moins satisfaisants que le groupement par TT Lamb. En effet les SPD les plus faibles sont pour l'été, saison pour laquelle se produisent 59% des séquences de crues, tandis qu'avec le groupement par TT ceux-ci sont pour le MB et du même ordre de grandeur, TT pour lequel on a seulement 17% des occurrences de crue. Les 2 résultats les plus notables sont que les indicateurs d'IVT sont très discriminants en hiver et en été ceux qui performent relativement le mieux sont liés à la CAPE. Par contre, avec le groupement par saison, la dispersion entre les membres est plus faible de part la limitation de l'influence de l'incertitude de calcul du TT Lamb.

Nous allons maintenant nous pencher plus en détails sur les indicateurs les plus intéressants, sélectionnés auparavant. La Figure 32 illustre la distribution de ces indicateurs par rapport à celle de la climatologie pour l'ensemble des occurrences de crues, puis groupés par TT. De manière générale on relève un assez bon accord entre les membres 20CR, sauf parfois pour le MB. On relève les très bonnes performances en terme de discrimination crues-climatologie de cape_max_2px (Figure 32d) et pwat_min_2px (Figure 32e), tant de manière générale que pour chaque TT individuellement, sauf MB. Pour pwat_min_2px, la médiane de l'ensemble des séquences d'occurrences de crues est supérieure à 85% des dates de la climatologie, en considérant pour chaque crue la même saison et le même TT. On relève encore une fois le comportement intéressant de v700_max_2px, avec une mauvaise discrimination globale, mais une meilleure discrimination pour chaque TT individuellement, étant donné que les crues d'E-NE et de MB, à l'opposé des autres, ont lieu pour des faibles valeurs de cet indicateur (Figure 32g). Pour MB, ce sont cel, sing, MPD et v700_max_2px qui sont le plus discriminant par rapport à la climatologie, mais de manière plus modérée que pour les autres TT. On peut relever à nouveau que les indicateurs du géopotential ne sont pas aussi discriminants que ceux sélectionnés sur d'autres variables hydrométéorologiques. Enfin on observe des valeurs modérément plus élevées que la climatologie de th850_min_2px sauf pour MB (Figure 32h).

Ces figures sont également disponibles pour référence avec le groupement par saison en Annexe B. Il est intéressant de noter que l'on retrouve la bonne performance des indicateurs du géopotential pour les crues hivernales et que pour tous les indicateurs les performances sont relativement faibles en été. Cape_max_2px et pwat_min_2px font exception avec des médianes estivales relativement élevées, mais néanmoins un nombre d'évènements inférieur à la médiane de la climatologie important.

Enfin, nous avons comparé sur la Figure 33 les résultats obtenus en terme de pouvoir discriminant avec 20CR, à ceux obtenus avec ERA5, afin d'estimer l'impact du choix d'une réanalyse basse résolution et avec peu de forçages comme 20CR. La comparaison porte sur 42 évènements torrentiels entre 1950

et 2014, période commune des 2 réanalyses. Les résultats sont contrastés. Les indicateurs portant sur le géopotential sont plus performants avec ERA5 (sauf pour SE-SW). De même ERA5 performe généralement mieux pour les situations de MB. Par contre, l'utilisation d'ERA5 fait notablement baisser les scores pour la `cape_max_2px`. Le reste des différences est très variable suivant l'indicateur et le TT considéré. Pour référence les mêmes résultats sous forme de diagramme à moustache sont donnés en Annexe B.

La dernière étude conduite consiste à croiser les indicateurs retenus (similairement aux résultats présentés avec singularité et célérité), afin d'observer pour l'interaction de deux indicateurs le comportement relatif des occurrences de séquences de crues comparé avec le reste de la climatologie. L'objectif est de chercher des couples d'indicateurs pour lequel le comportement des crues est plus complexe que si l'on considère chaque indicateur séparément. Par exemple si les crues se produisent pour des CAPE et des humidités modérément élevés, peut-être que plutôt que les crues de CAPE modérée soient d'humidité modérée et celles de CAPE forte, d'humidité forte, il se trouve que les crues de CAPE modérée ont des humidité particulièrement fortes et inversement. La paire d'indicateurs serait donc encore plus discriminante que les indicateurs pris séparément. On recherche également en croisant les indicateurs une tendance des crues à se regrouper dans cet espace 2D et/ou à occuper une "zone" faiblement représentée dans la climatologie. Dans ce cas également la paire d'indicateurs serait fortement discriminante. Cette étude a été conduite pour tous les indicateurs sélectionnés précédemment et les paires possibles, mais la majorité des paires n'a pas apporté d'informations complémentaires et seules les plus pertinentes sont présentées ici (Figure 34.) Un exemple de cela est visible en Figure 34a où l'on retrouve les tendances des 2 indicateurs séparément, sans informations complémentaires. Les occurrences de crues de MB sont dispersées pour la `cape_max_2px` et l'`ivt_max_2px`, l'`ivt_max_2px` est faible pour E-NE et fort pour N-W, la `cape_max_2px` est forte pour SW-SE et E-NE. La Figure 34b montre une des paires les plus performantes. Bien que les occurrences de crues soient localisées dans une zone de forte densité climatologique, la combinaison de fortes valeurs de `cape_max_2px` et de `pwat_min_2px` conduisent à un groupement significatif des valeurs dans cet espace 2D et donc à une meilleure discrimination que les indicateurs pris séparément. Pour référence la Figure 34c reprend le couple cel-sing présenté précédemment mais cette fois en fréquence au non dépassement mensuelle et par TT, illustrant ses relativement moins bonnes capacités de discrimination comparé aux nouveaux indicateurs. Le croisement de `v700_max_2px` et du MPD bien que peu discriminant nous permet de relever le comportement inversé des occurrences de crues de MB et E-NE (faibles valeurs des 2 indicateurs) par rapport aux autres TT (Figure 34d). Enfin, sur la Figure 34e, on relève un groupement d'occurrences de crues pour des fortes valeurs de `v700_max_2px` et de `th850_min_2px`, situation peu commune dans la climatologie. Néanmoins, il reste difficile d'interpréter ce résultat puisque ce groupe est constitué d'une variété de TT qui par ailleurs présente une dispersion importante.

3.3.2 Rivières atmosphériques

Nous allons à présent nous pencher sur un dernier indicateur atmosphérique : la présence ou non de rivières atmosphérique (AR) à une date donnée. La Figure 35 montre pour chaque saison le pourcentage de dates présentant une AR selon notre algorithme de détection et le pourcentage d'événements torrentiels se produisant durant ou à ± 1 jour d'une AR. Environ 4% de la climatologie présente une AR, avec légèrement moins d'occurrences au printemps et un peu plus en été et automne. En ce qui concerne les événements torrentiels, environ 30% sont associés à une AR. Ce pourcentage monte à plus de 80% en hiver et tombe sous les 20% au printemps et en été. Ces résultats sont assez peu sensibles au membre de 20CR ou au choix de la réanalyse (non montré par souci de concision).

Nous avons donc mis en évidence, que l'usage de différents indicateurs atmosphériques et classification de types de temps permet dans une certaine mesure de différencier les situations générant des crues

torrentielles du reste de la climatologie. Jusqu'à présent nous avons considéré l'ensemble de nos bassins versants comme réagissant de la même manière aux forçages atmosphériques, il est donc intéressant d'étudier le possible lien entre indicateurs atmosphériques et différentes catégories géomorphologiques de bassin versants.

3.4 Indicateurs et paramètres géomorphologiques

Nous présentons ici les résultats portant sur le croisement des indicateurs et TT avec la classification géomorphologique des bassin versants présentée précédemment. Dans le cadre de cette section uniquement, on considère donc les crues d'une même séquence torrentielle comme indépendantes. Les indicateurs sont uniquement basés sur le membre 1 de 20CR, les résultats n'étant pas assez caractérisés pour justifier une étude de sensibilité. La Figure 36 illustre la répartition dans l'espace du type de transport sédimentaire en crue des entités hydrologiques du "Y grenoblois". 55% des entités torrentielles sont à charriage hyper-concentré, 22% à lave torrentielles et 22% à charriage. On note le nombre important de torrents à charriage dans le Voironnais et de cours d'eau à laves torrentielles dans la partie haute de la Chartreuse côté Isère amont.

Tout d'abord nous avons croisé les modes de transport des entités hydrologiques en crue avec les classifications de TT EDF et Lamb à la date de la crue. Aucun résultat significatif n'a été observé et nous ne présenterons donc pas ces résultats en détail ici.

En ce qui concerne la saisonnalité des crues en fonction du transport sédimentaire, on relève qu'elle suit la saisonnalité des crues tout transport confondu (bulles blanches en haut de la Figure 37), à l'exception des crues à charriage bien plus présentes en hiver et en automne (Figure 37).

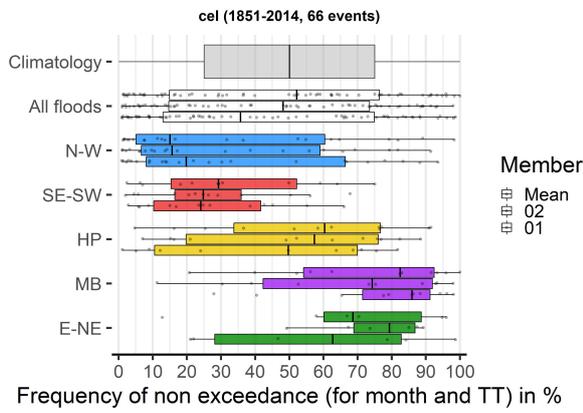
Si l'on croise le type de transport des crues avec la présence ou non d'une AR, on observe qu'en proportion les crues par charriage sont plus souvent liées à des AR que les autres. Alors que seules 26% des crues sont liées à une AR, ce sont plus de 50% des crues à charriage (Figure 38).

Enfin, la Figure 39 croise le type de transport sédimentaire des crues avec la valeur d'une sélection des indicateurs les plus pertinents et donnant les résultats les plus significatifs. Quel que soit l'indicateur considéré, on retrouve pour les 3 catégories de transport sédimentaire l'ensemble de la gamme de valeur de l'indicateur. Néanmoins, les crues à charriage sont plus concentrées vers les faibles valeurs de célérité et les fortes valeurs de MPD. Elles présentent également une médiane légèrement plus faible pour la `cape_max_2px` que les crues à charriage hyper-concentré, qui ont elles-mêmes une médiane plus faible que les crues de bassins à laves torrentielles.

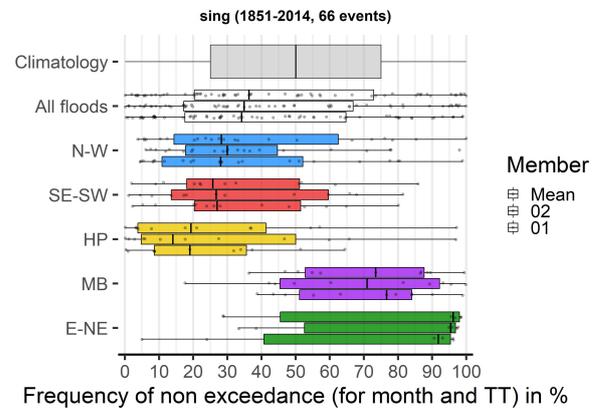
La superficie du bassin versant étant un paramètre important dans la formule de calcul de la classification de type de transport sédimentaire, il est intéressant de vérifier son influence sur nos résultats. La Figure 40, montre que bien qu'il y ait intersection entre les catégories, la superficie des bassins versants à charriage est bien supérieure à celle des bassins à charriage hyper-concentré, elle-même supérieure à celles des bassins à laves torrentielles. Notamment les quelques bassins de plus de 100 km² sont tous à charriage et il n'y a pas de bassins à laves torrentielles de plus de 4 km².

Nous avons donc croisé la superficie des bassins versants en crues avec les valeurs de nos différents indicateurs atmosphériques à la date de réaction. De même que pour le type de transport sédimentaire, les classifications de TT, n'ont pas donné de résultats significatifs. C'est aussi le cas des indicateurs utilisés précédemment avec le type de transport sédimentaire comme la `cape_max_2px`, la célérité et le MPD. Par contre, on observe des résultats intéressants en ce qui concerne la saisonnalité des superficies

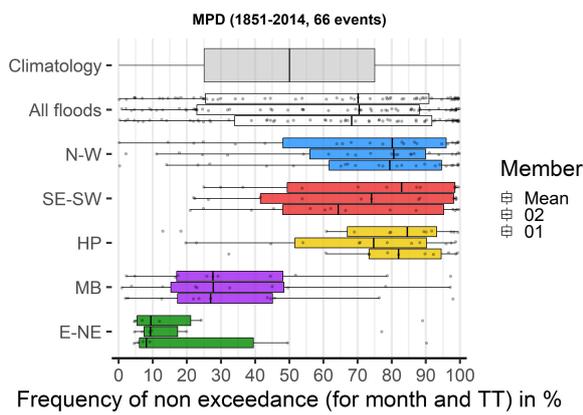
des bassins versants qui réagissent d'une part et le lien avec les occurrences d'AR d'autre part. La Figure 41 nous montre qu'en été ce sont proportionnellement de plus petites entités hydrologiques qui ont tendance à réagir, avec notamment beaucoup de bassins de l'ordre du kilomètre carré. La Figure 42 quant à elle illustre que les bassins réagissant aux AR sont en médiane plus grands que les autres (même si certains peuvent réagir à la fois en présence ou en absence d'AR).



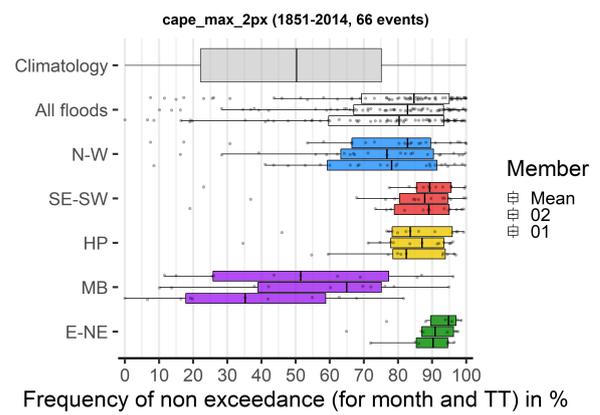
(a)



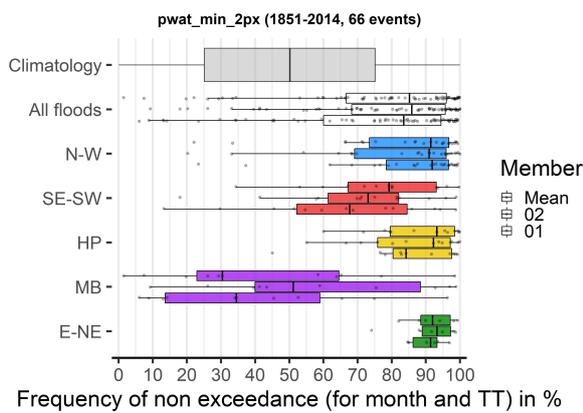
(b)



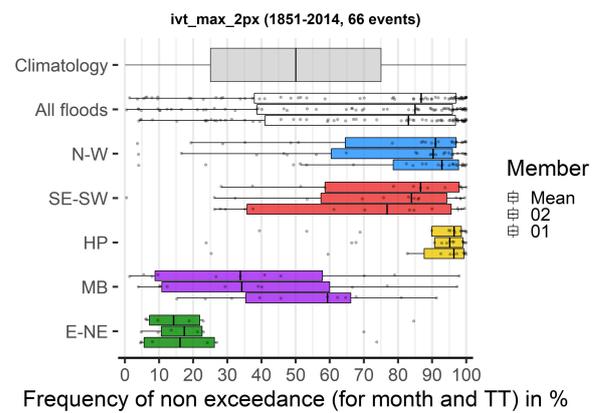
(c)



(d)



(e)



(f)

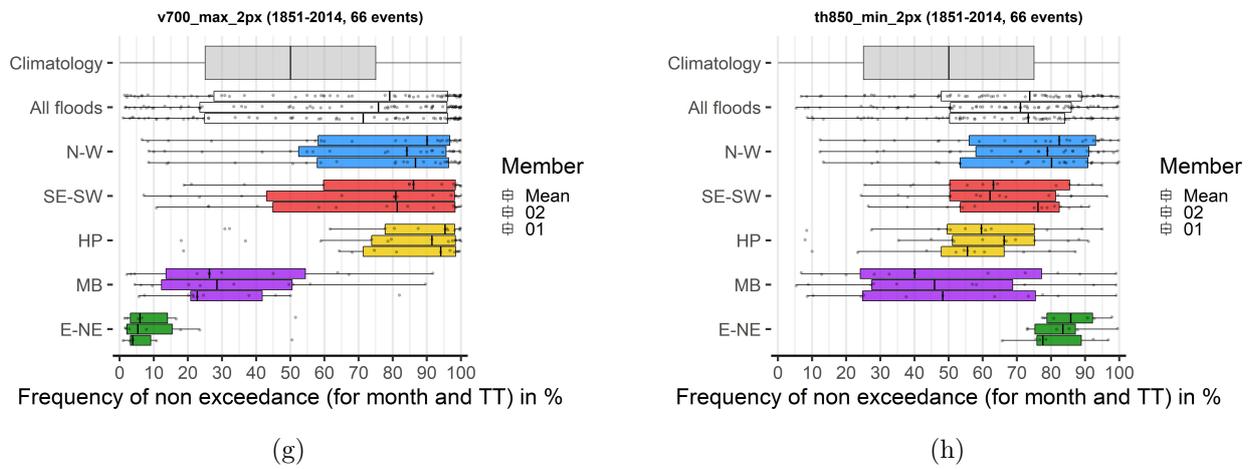


FIGURE 32 – Distribution des valeurs d’indicateurs des séquences d’occurrences de crues (66 évènements, 1851-2014) en fréquence au non dépassement par mois et par TT. De bas en haut : ensembles des dates 1851-2014, ensemble des séquences d’occurrences de crues, puis séquences d’occurrence de crues groupées par chacun des 5 TT Lamb. Dans chaque cas, un diagramme à moustache par membre 20CR (de bas en haut moyen, 2 et 1).

	sc	sc_dif	scNW	scNW_dif	scENE	scENE_dif	scSWSE	scSWSE_dif	scHP	scHP_dif	scMB	scMB_dif
cel	0,05	0,1	0,19	0,06	0,48	0,21	0,25	0,13	0,26	0,61	0,16	0,17
sing	0,04	0,02	0,08	0,11	0,9	0,04	0,23	0,03	0,66	0,05	0,16	0,07
MPD	0,08	0,02	0,23	0,08	0,76	0,04	0,21	0,03	0,82	0,13	0,07	0,01
cape_max_2px	0,41	0,06	0,31	0,08	0,82	0,09	0,67	0,21	0,68	0,05	0,09	0,13
ivt_max_2px	0,35	0,05	0,6	0,06	0,57	0,11	0,4	0,04	0,96	0,01	0,09	0,06
pwat_min_2px	0,35	0,02	0,58	0,04	0,7	0,14	0,3	0,06	0,75	0,13	0,14	0,14
th850_min_2px	0,17	0,09	0,32	0,12	0,54	0,12	0,18	0,21	0,03	0,04	0,15	0,08
v700_max_2px	0,23	0,02	0,38	0,12	0,82	0,03	0,46	0,12	0,85	0,03	0,2	0,1

(a) 20CR

	med	area	score	medNW	areaNW	scoreNW	medENE	areaENE	scoreENE	medSWSE	areaSWSE	scoreSWSE	medHP	areaHP	scoreHP	medMB	areaMB	scoreMB
cel	39,32	0,039	0,05	27,53	0,058	0,17	35,64	0,13	0,93	38,26	0,059	0,08	6,13	0,16	0,76	76,18	0,079	0,23
sing	49,26	0,038	0	27,76	0,067	0,17	96,38	0,16	0,82	57,63	0,048	0,04	3,93	0,16	0,82	55,23	0,099	0,06
MPD	61,61	0,044	0,06	80,34	0,085	0,29	3,1	0,18	0,94	64,3	0,058	0,09	92,6	0,16	0,76	31,98	0,08	0,12
cape_max_2px	80,65	0,064	0,22	45,43	0,089	0,05	85,41	0,14	0,55	89,33	0,126	0,55	84,67	0,16	0,62	73,85	0,06	0,21
ivt_max_2px	87	0,087	0,36	96,02	0,129	0,66	69,15	0,12	0,26	85,95	0,088	0,35	97,75	0,18	0,96	48,12	0,08	0,02
pwat_min_2px	88,38	0,092	0,39	92,84	0,144	0,69	97,59	0,16	0,85	67,93	0,071	0,14	95,7	0,18	0,91	78,55	0,079	0,25
th850_min_2px	73,7	0,052	0,14	79,84	0,109	0,36	84,85	0,14	0,54	34,54	0,068	0,12	45,08	0,14	0,08	83,39	0,099	0,37
v700_max_2px	73,25	0,069	0,18	93,57	0,098	0,47	21,99	0,16	0,5	93,96	0,094	0,46	90,98	0,18	0,82	13,53	0,1	0,41

(b) ERA5

FIGURE 33 – a) Valeurs du SPD (sc) moyenné sur les 3 membres 20CR (en rouge) et de l’écart maximal de SPD (sc_dif) entre les membres (en violet) (1950-2014, 42 évènements). Plus le rouge intense, plus le SPD moyen est fort et plus le violet est intense, plus la différence de SPD est importante. Les 2 premières colonnes sont calculées pour l’ensemble des évènements torrentiels et le 8 suivantes uniquement pour les évènements du TT concerné. b) Valeurs de la médiane (med en vert), de l’EDC (en bleu) et du SPD (en rouge) pour l’ensemble des occurrences de crues avec ERA5 (1950-2014, 42 évènements) dans les 3 premières colonnes, puis par TT Lamb dans les 12 suivantes. Plus la couleur d’une case est intense, plus l’indicateur est performant pour ce test.

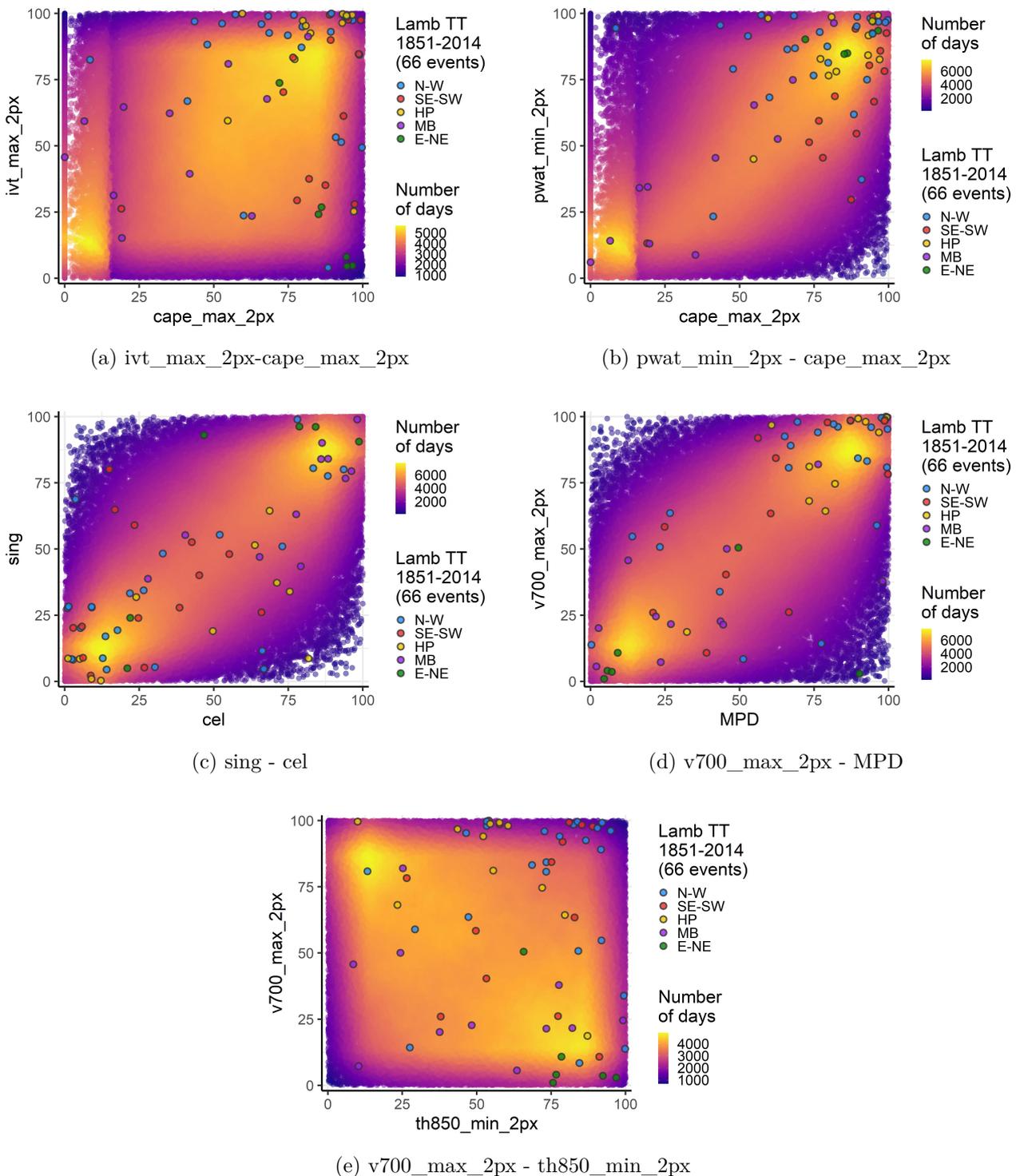


FIGURE 34 – Distribution des valeurs pour les paires d’indicateurs des séquences d’occurrences de crues (66 évènements, 1851-2014) en fréquence au non dépassement par mois et par TT, par rapport au reste de la climatologie. La densité de la climatologie est représentée par l’échelle de couleur (nombre de voisins dans un rayon de 0,5 écart-type). Les occurrences de crues sont représentées par les points de couleur en fonction du TT Lamb.

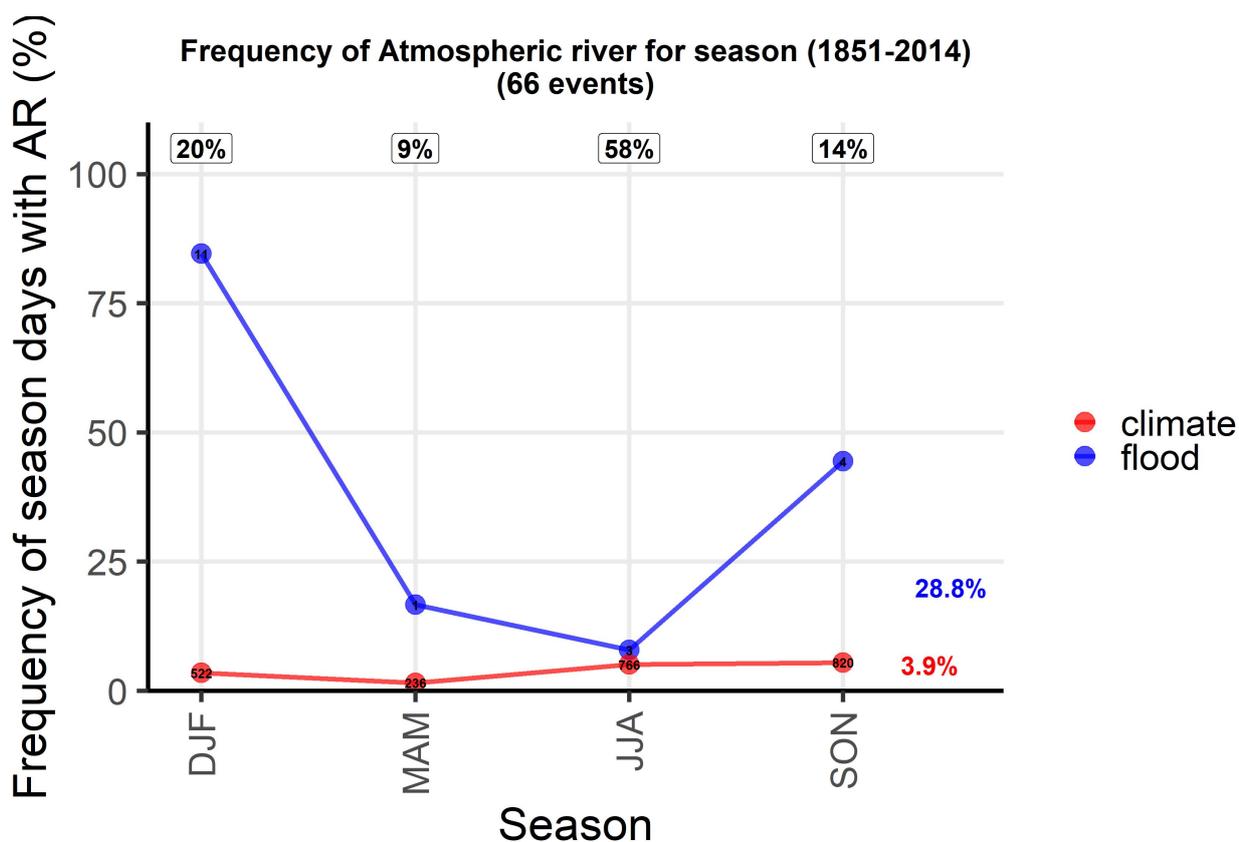


FIGURE 35 – Pourcentage de dates par saison des AR dans la climatologie et durant une séquence de dates d’occurrence de crues (± 1 jour), d’après le membre 1 de 20CR. Les pourcentages en haut rappelle la saisonnalité des évènements torrentiels et ceux à droite le pourcentage total de dates avec une AR. Les chiffres dans les bulles correspondent au nombre de dates.

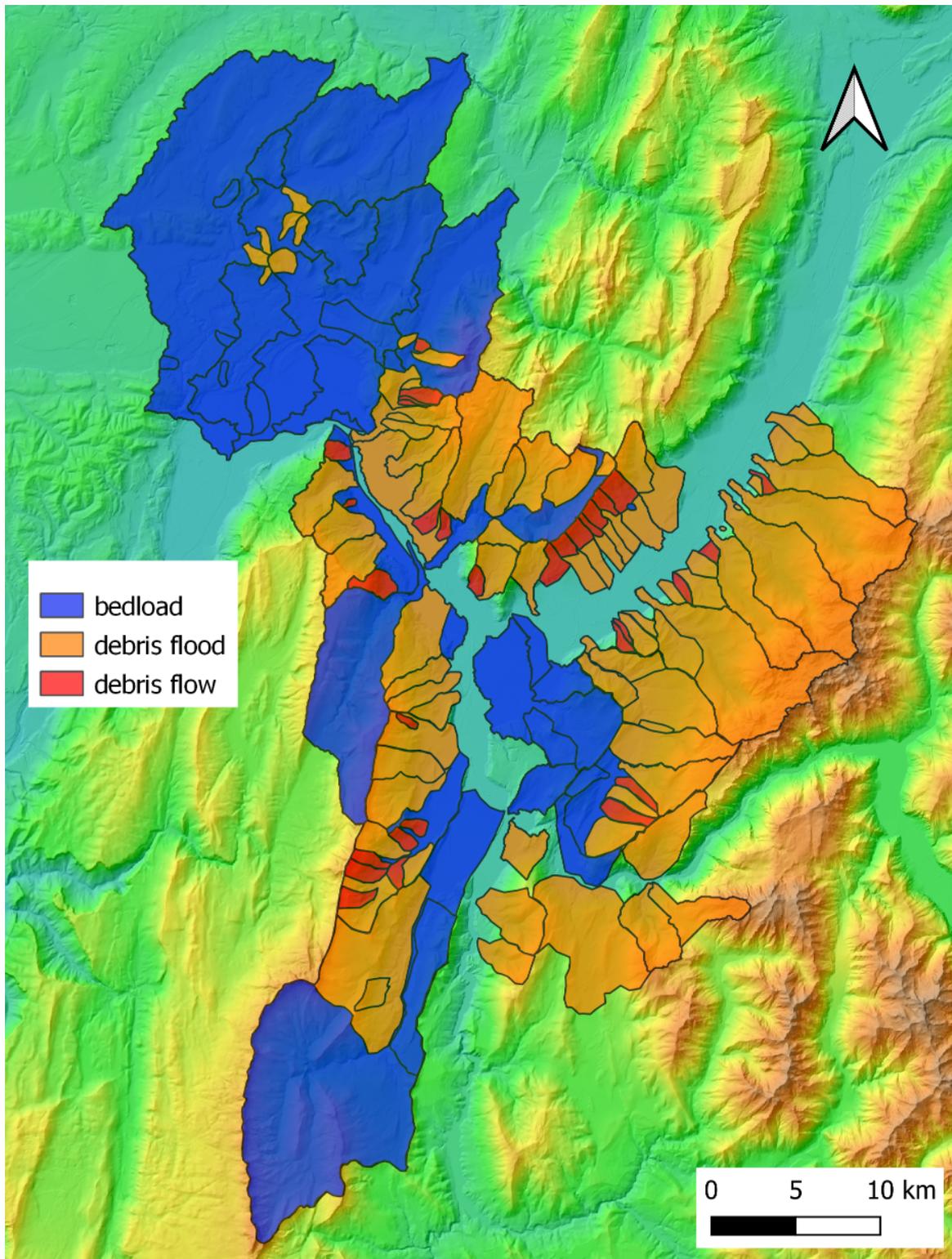


FIGURE 36 – Carte des comportements de transport sédimentaire en crue (charriage, charriage hyper-concentré ou lave torrentielle) des entités hydrologiques du “Y grenoblois”.

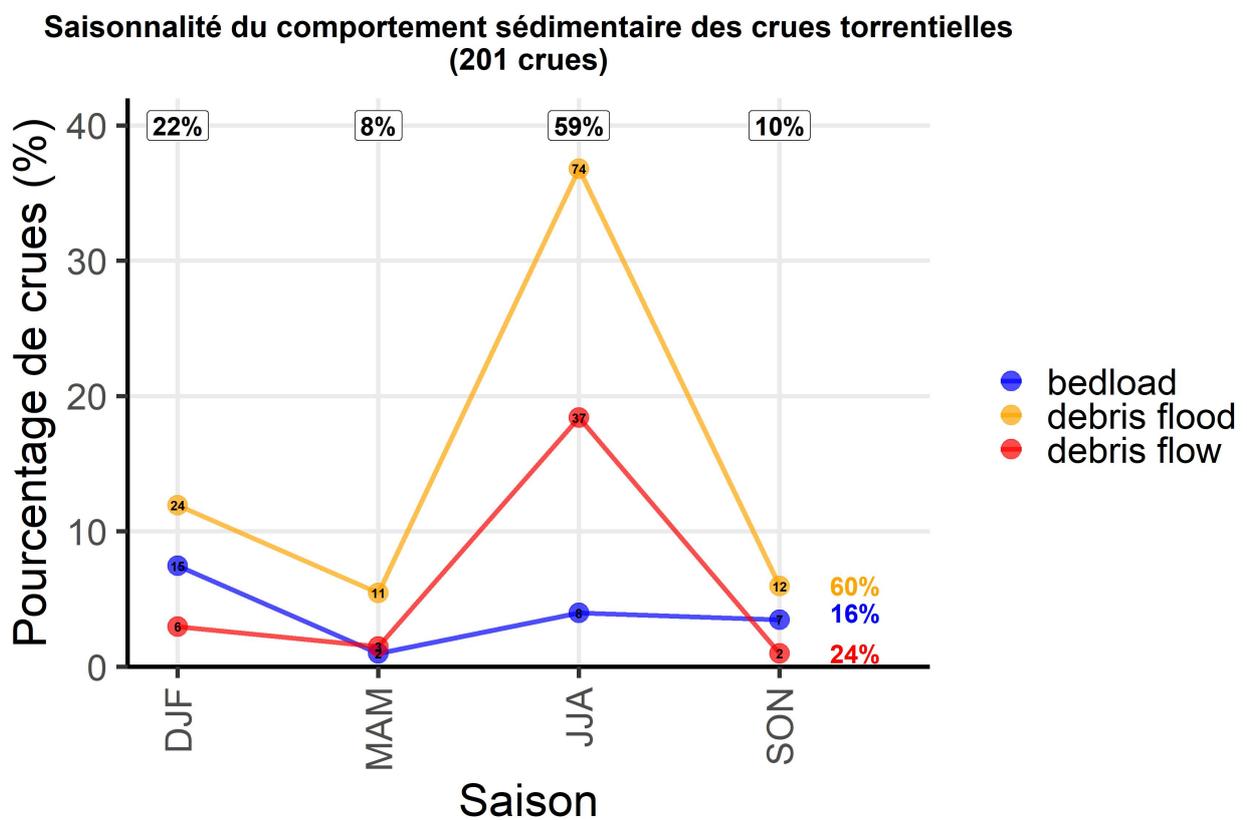


FIGURE 37 – Répartition saisonnière des crues en fonction de leur type de transport sédimentaire. Les chiffres en haut donne la saisonnalité des crues et ceux à droite donne la répartition des types sédimentaires pour les crues. Les nombres dans les bulles sont des comptes de crues.

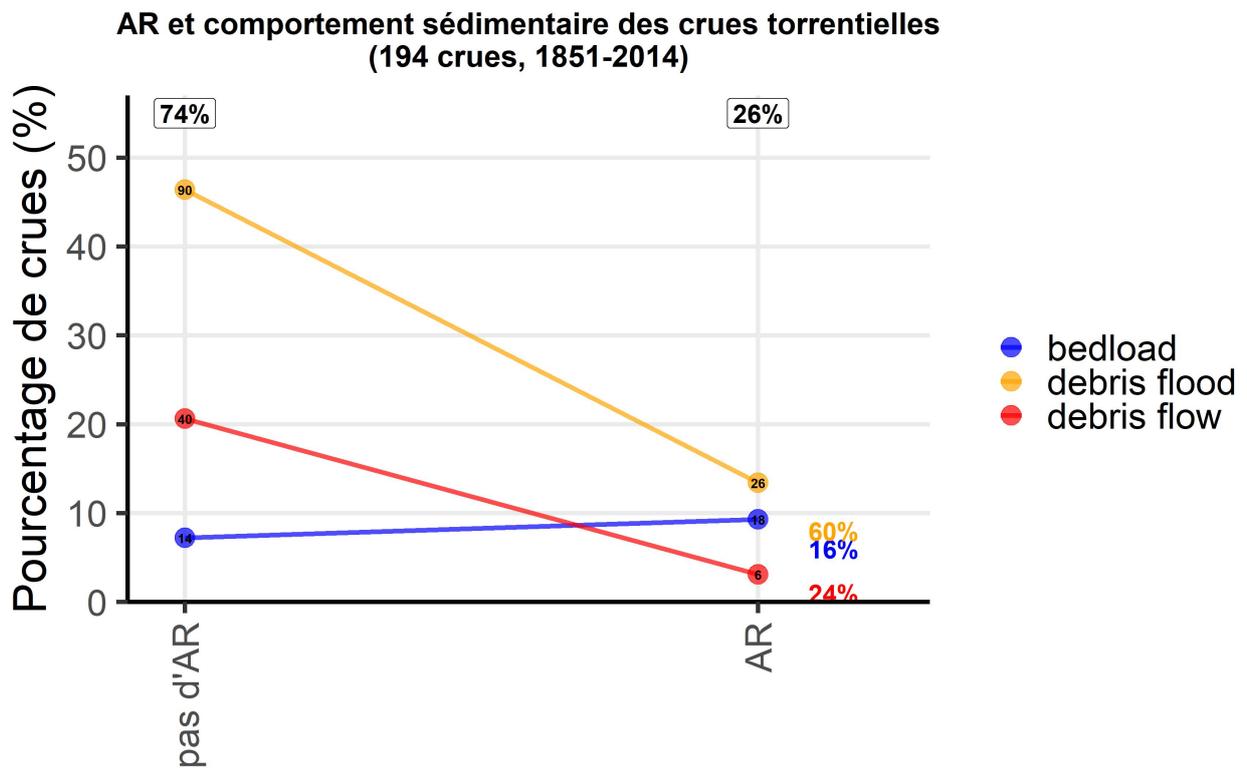
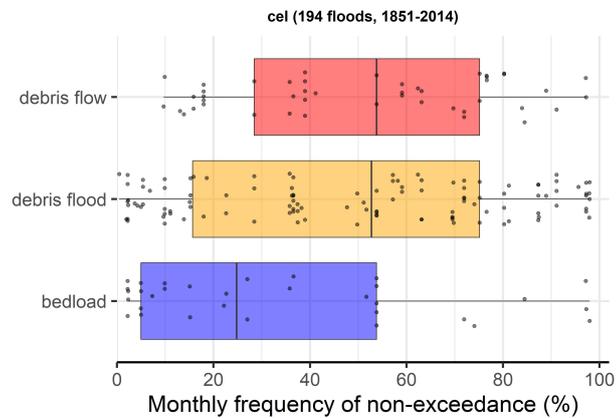
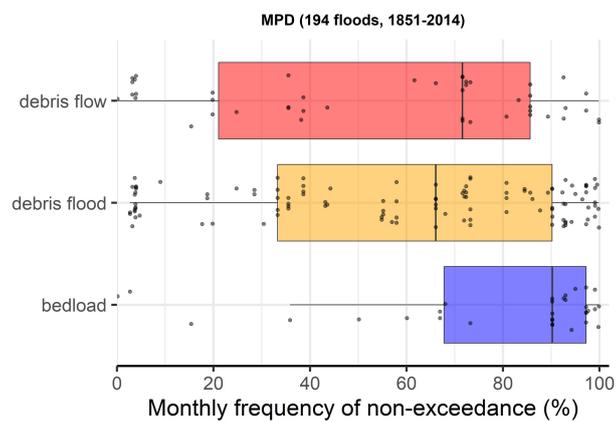


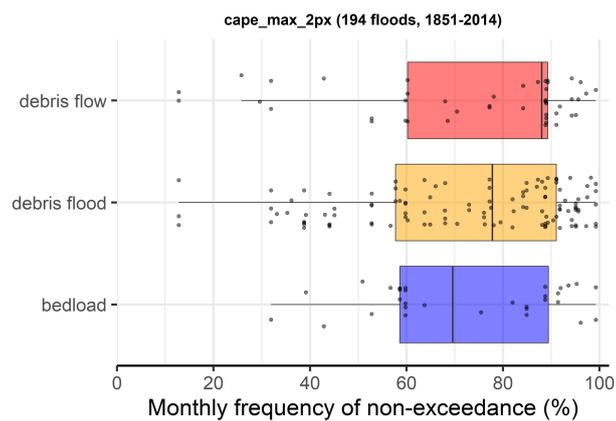
FIGURE 38 – Répartition crues en fonction de leur type de transport sédimentaire et de leur co-occurrence avec une AR ou non. Les chiffres en haut donne le pourcentage de crues lié ou non à une AR, ceux à droite la répartition des types sédimentaires pour les crues. Les nombres dans les bulles sont des comptes de crues.



(a) Célérité



(b) MPD



(c) cape_max_2px

FIGURE 39 – Distribution de 3 indicateurs hydrométéorologiques pour les crues en fréquence mensuelle au non dépassement, catégorisé par type de transport sédimentaire.

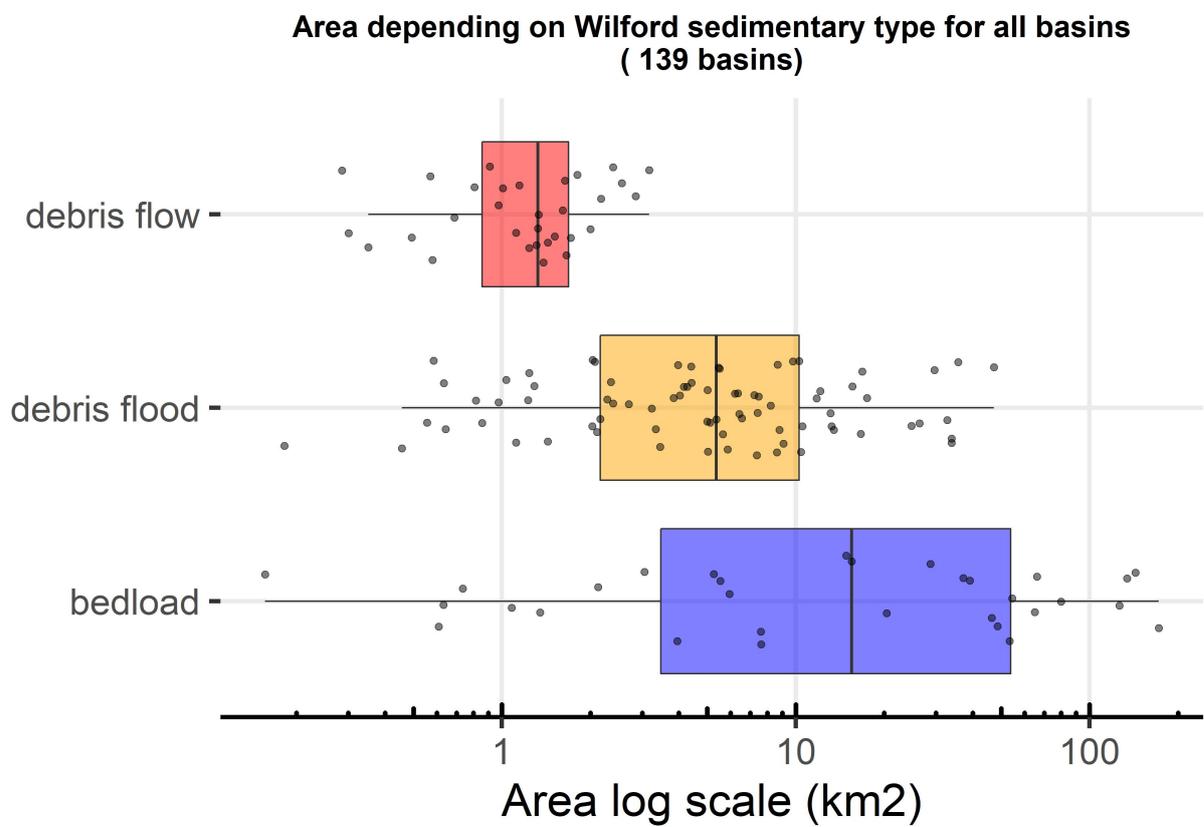


FIGURE 40 – Répartition des superficies des entités hydrologiques en fonction de leur type de transport sédimentaire.

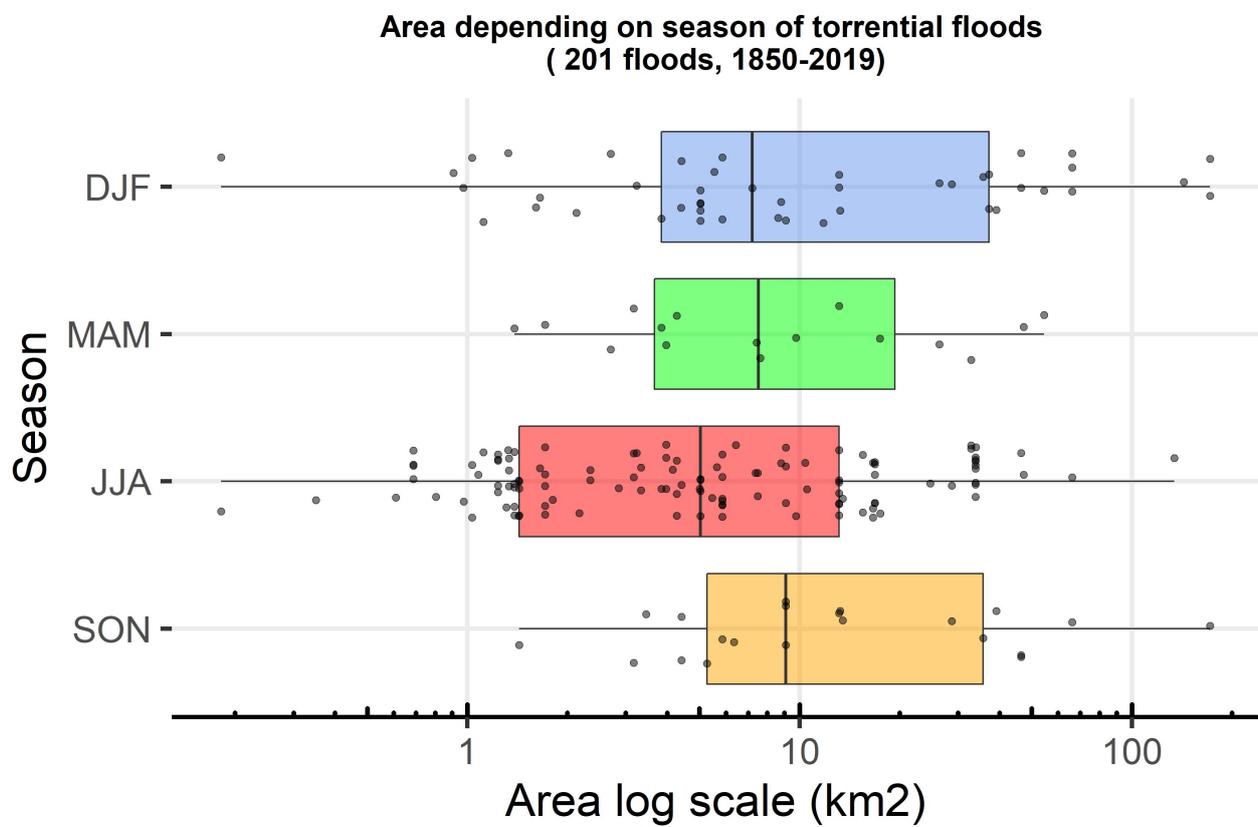


FIGURE 41 – Répartition des superficies des entités hydrologiques en crue en fonction de la saison.

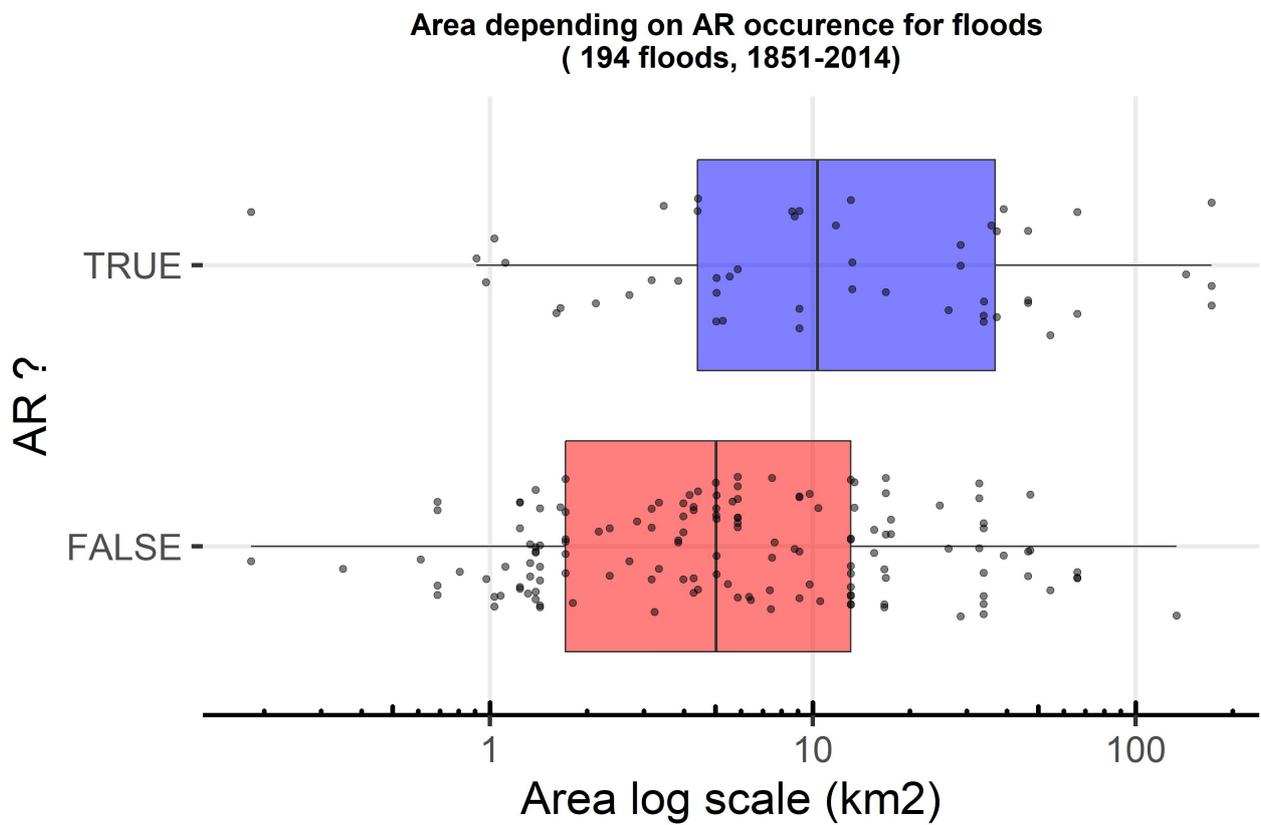


FIGURE 42 – Répartition des superficies des entités hydrologiques en crue en fonction de la présence ou non d'une AR.

4 Discussion

4.1 Limitations de la base de données RTM-IGE

Une des sources primaires d'informations dans cette étude est la base de données RTM-IGE d'occurrences de crues ou séquences de crues remarquées [Creutin et al., In Press]. Nous allons donc discuter plus en détail les limitations qui peuvent découler de son usage.

Tout d'abord, de par sa construction, elle n'est pas exempte d'une part de subjectivité, notamment dans le processus de regroupement des crues en séquence hydrométéorologiques de même origine. Cela pourrait impacter les résultats si deux crues originaires de systèmes météorologiques distincts ont été incluses dans le même évènement. Le soin apporté à limiter la durée de ces séquences et l'analyse conjointe des rapports d'expert de terrain quand disponibles restreint grandement cette possibilité. De plus au cours de notre étude l'impact du choix de la date de l'évènement le plus remarqué ou de l'ensemble des dates des séquences a été mené à plusieurs reprises.

Une autre limitation a trait à l'échelle spatiale de la base de données. En effet, le recoupement entre systèmes précipitant et "Y grenoblois" est rarement parfait et en fonction de la position du système, un système localisé pourrait faire réagir autant de torrents qu'un système majeur mais ne chevauchant que très partiellement la zone d'étude. L'information portant sur le nombre de torrents ayant réagi par évènement doit donc être interprétée en prenant en compte cette considération. De même la résolution journalière de la base de données est parfois problématique notamment pour les crues se produisant en début ou fin de journée. Les crues torrentielles pouvant se produire en quelques heures, il est alors complexe de déterminer si les causes atmosphériques à l'origine de la crue s'observent pour la veille ou le jour-même.

Ensuite, le lien entre observations des dégâts et conditions atmosphériques n'est pas forcément toujours identique. En effet, plusieurs facteurs intermédiaires peuvent rentrer en compte : enneigement, rupture d'ouvrage, embâcles (bien que Creutin et al. [In Press] ont montré qu'à partir d'une certaine intensité de crue ces 3 facteurs étaient négligeables), exposition de la population et des infrastructures, qualité de l'observation, état hydrique du bassin versant, disponibilité sédimentaire... Toutefois, la BD RTM-IGE se détache fortement de ces aspects en considérant des évènements torrentiels d'intensité majeure (temps de retour supérieur à la décennale). Ce lien n'est pas forcément stable dans le temps non plus à travers les changements climatiques, d'exposition au risque (urbanisation, ouvrages de protection...), de changement d'occupation des sols et de qualité des archives sur ces évènements (précision de la datation, lacunes...). On observe notamment récemment un plus grand nombre de crues torrentielles en été, principalement sur la Chartreuse et le Vercors, qui semble au moins pour partie lié à une augmentation des précipitations extrêmes, mais l'étude des variations temporelles dépasse le cadre de cette étude (J. blanchet, communication personnelle, 2021). Même si le lien exact entre conditions atmosphériques et observations des dégâts peut changer, il n'en reste pas moins que ce sont des évènements hydrologiques extrêmes et souvent touchant plusieurs torrents, qui sont donc pour grandes parties gouvernés par des systèmes météorologiques grande échelle (fronts, AR, convection organisée...).

4.2 Classifications de type de temps

4.2.1 Classification EDF

L'usage de la classification de TT EDF nous a permis de montrer que les TT Océanique et Méditerranéen étaient les plus générateurs de crues. Le TT Méditerranéen étant moins présent dans la

climatologie cela signifie qu'à occurrence égale il est encore davantage générateur. L'Océanique est pratiquement le seul TT générateur en hiver, période où la France est située dans l'axe des tempêtes en provenance de l'Atlantique. En été le TT Méditerranéen domine les crues, associé donc à des flux de Sud ou des retour d'Est. On retrouve également des crues Océaniques. Enfin en été on a relevé quelques crues sous conditions anticycloniques qui laissent supposer des situations de convection organisée.

La prise en compte de l'ensemble des dates et non seulement des dates de référence dans l'étude de la saisonnalité a montré un impact marginal, avec surtout l'ajout de jours anticycloniques situés en bordure temporelle d'une séquence d'un autre TT. Il reste donc pertinent de considérer le TT du jour le plus remarqué d'une séquence comme le TT associé à cette séquence.

L'étude du nombre de torrents réagissant pour chaque évènement a permis de mettre en évidence qu'au delà de 5 torrents réagissant on ne retrouvait que les TT Océanique et Méditerranéen. Cela voudrait dire que ces deux TT sont les seuls à pouvoir causer des réactions de très grande ampleur sur le "Y grenoblois". Néanmoins une conclusion définitive nécessiterait davantage de données. On retrouve ces deux mêmes TT sur les évènements concomitants torrent-rivière. Une interprétation est que les conditions anticycloniques ne permettent pas une convection organisée de suffisante ampleur pour faire réagir un très grand nombre de torrents et/ou une rivière, tandis que les flux continentaux ne seraient pas assez chargés en humidité.

Enfin, nous avons montré la nécessité d'un TT stable sur au moins quelques jours pour conduire à une situation génératrice de crues. Les situations changeant de TT d'un jour à l'autre semblent peu propices aux crues, quel que soit le TT concerné.

4.2.2 Classification Lamb

En complément du TT EDF très adapté aux évènements hydrométéorologiques extrêmes des Alpes françaises, mais ne remontant que jusqu'en 1948, nous avons utilisé la classification de TT long terme Lamb entre 1851 et 2014. Nous rappelons qu'il n'existe pas de correspondance directe entre les classes de ces classifications, mais plutôt une part importante d'intersections. De plus si les classes de Lamb sont bien distinctes spatialement en ce qui concerne les directions de flux, par construction les classes d'EDF peuvent se chevaucher spatialement et deux flux de Sud-Ouest légèrement différents peuvent être l'un Océanique et l'autre Méditerranéen.

On retrouve un motif partiellement similaire au TT EDF en terme de TT générateur des crues : un TT, le N-W domine les crues hivernales, tandis que les crues estivales sont issues d'une diversité de TT. On retrouve donc notre dominance des crues sous flux plus ou moins zonaux en hiver et un mélange d'influences locales et grande échelle en été. Notamment les crues sous HP et MB pointent vers des systèmes locaux, probablement de convection organisée. Le TT de N-W est particulièrement générateur, avec 36% des crues pour seulement 13% d'occurrences climatologique.

La prise en compte de l'ensemble des dates des séquence de crues ne change pas les conclusions globales, mais il est intéressant de noter que beaucoup de séquence de crues sous flux grande échelle en été (N-W, SE-SW ou E-NE) sont associées à plusieurs nouveaux jours de HP. Il semblerait donc qu'une combinaison de flux synoptiques et de HP soit favorable aux séquences d'occurrences de crues.

Comme pour le TT EDF, dans le cas de Lamb les occurrences de crues se produisent pour des séquences de TT persistants par rapport à leur climatologie. Il semble donc que la stabilité du flux (ou de son absence) sur quelques jours soit une condition préalable aux situations de crue.

Les résultats présentés ici sont assez peu sensibles au choix du membre de 20Cr utilisé pour la détermination du TT Lamb, que ce soit en terme de saisonnalité ou de persistance. Dans ce cas il semble donc que le choix du membre ait une influence limitée. Par contre le choix de la réanalyse entre ERA5 et 20CR change la saisonnalité du TT, notamment de HP et N-W en été, impactant aussi le TT des crues. Si l'on considère la réanalyse ERA5 comme référence, étant plus résolue dans l'espace et le temps et bénéficiant de plus de données assimilées, il semblerait donc que 20CR tendrait à générer trop de HP au détriment des flux de N-W en été.

4.3 Indicateurs hydrométéorologiques du géopotential

L'étude des indicateurs hydrométéorologiques du géopotential a tout d'abord mis en évidence que les crues hivernales et/ou concomitantes torrent-rivière se produisaient pour de faibles singularités et de relativement faibles célérités. Elles sont donc la conséquence de systèmes météorologiques reproductibles et relativement stationnaire. Ce résultat est cohérent avec la tendance des crues hivernales à être liées à des flux zonaux et aux crues en général d'être associées à des TT persistants, comme l'a montré l'étude des TT Lamb et EDF. Ces crues hivernales seraient donc le résultat de l'influence synoptique de flux zonaux relativement persistants. Cette hypothèse est également valable pour les crues concomitantes torrent-rivière qui de part leur échelle régionale sont liées à des flux grande échelle. A l'opposé en été, les influences atmosphériques sont plus variées et se traduisent par une distribution des valeurs de célérité-singularité similaires à la climatologie. Ces deux indicateurs ne sont donc que partiellement de bons discriminants. Ces conclusions générales sont peu sensibles au choix de la réanalyse contrairement aux résultats des TT. L'impact du choix d'utiliser les dates de références des occurrences de crues plutôt que l'ensemble des dates des séquences est aussi plus limité que pour les TT, de par la nature continue des indicateurs, (par opposition aux classes discrètes de TT). Cette approche est d'autant plus valable que les dates de références sont les événements de crues torrentielles les plus remarquables de par leur dégâts et donc le plus souvent les plus susceptibles d'avoir une signature atmosphérique marquée.

En ce qui concerne les autres indicateurs du géopotential, on note une tendance des crues à se produire pour de relativement fortes valeurs de MPD et assez faibles valeurs de r_{sing} . Les flux caractérisés les plus marqués (différence de pression la plus forte mais forte ressemblance à ses plus proches voisins) sont donc légèrement plus générateur de crues. Néanmoins ces indicateurs restent trop peu discriminants entre occurrences de crues et climatologie, particulièrement en été. Cette tendance des événements hydrométéorologiques extrêmes vis-à-vis des indicateurs se retrouve de façon plus marquée au niveau des 1% de cumuls de précipitation les plus forts sur 3 jours sur les bassins versants du Drac et de l'Isère, dans les résultats de Blanc et al. [2021]. La Figure 43 [Blanc et al., 2021] montre effectivement que ces événements de précipitations extrêmes à cette échelle régionale ont davantage tendance à se produire pour de forts MPD et faibles r_{sing} et cel. A cette échelle régionale les extrêmes de précipitation sont donc davantage gouvernés par la forme du champ de géopotential et des systèmes météorologiques synoptiques que les crues torrentielles à l'échelle du "Y grenoblois".

Lors de l'interprétation des résultats sur les indicateurs du géopotential, il est nécessaire de garder à l'esprit que l'incertitude liée aux données 20CR augmente dans le temps, particulièrement lorsque l'indicateur porte sur une forme de champ. En effet, le nombre plus faible de mesures de pression assimilées avant 1950 (et encore moins avant 1900) tendrait à lisser le champ de géopotential entre les centres d'actions (Antoine Blanc, communication personnelle, 2021). La divergence entre les membres pour un indicateur comme la célérité serait donc accentuée, le membre moyen différant des membres individuels en accentuant ce lissage de par sa construction. On observerait également moins d'hétérogénéité et donc de variabilité d'un jour à l'autre et donc des valeurs de célérité anormalement

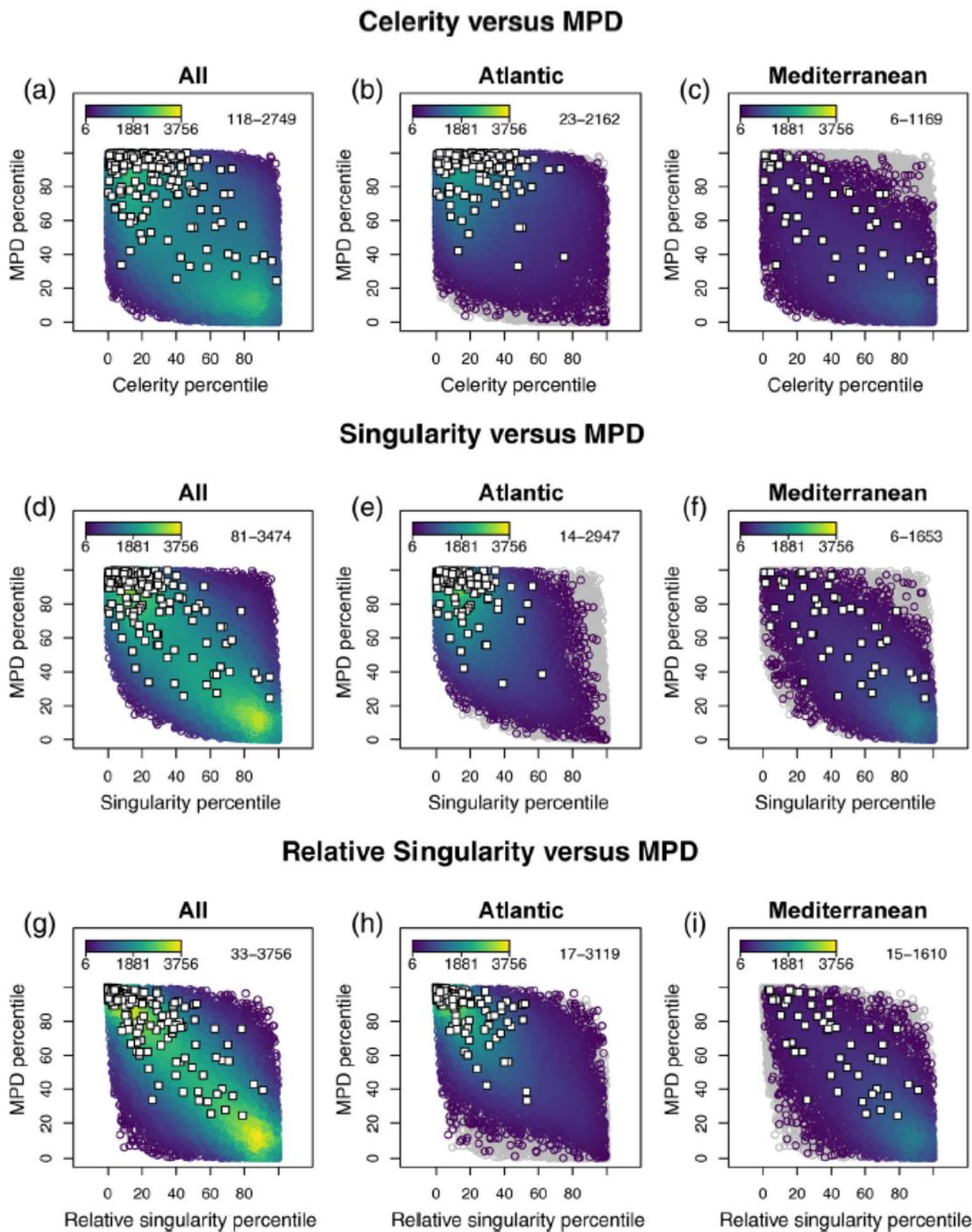


FIGURE 43 – Issue de la Figure 9 de Blanc et al. [2021]. Distribution des valeurs par couples d’indicateurs du géopotential des séquences les plus fortes de 3 jours de cumul de précipitation sur les bassins versants du Drac et de l’Isère, par rapport au reste de la climatologie (1950-2017, ERA5). La densité de la climatologie est représentée par l’échelle de couleur (nombre de voisins dans un rayon de 0,5 écart-type). Les occurrences de précipitations extrêmes sont représentés par les carrés blancs. Les axes sont en fréquence au non-dépassement. Colonne de gauche toutes les dates, colonne centrale dates avec TT Méditerranéen uniquement, colonne de droite Océanique uniquement. Les nombres en haut à droite indique la densité minimale et maximale du graphe considéré.

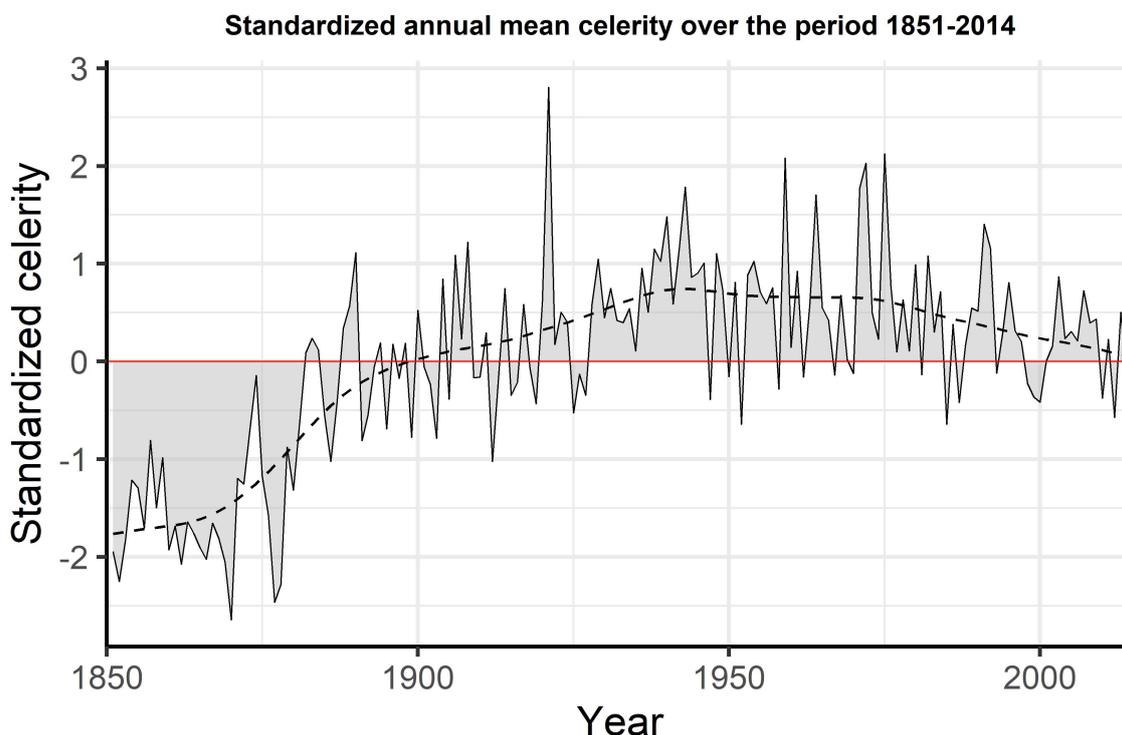


FIGURE 44 – Chronique de la célérité moyenne annuelle standardisée (20CR membre 1, 1851-2014). La courbe pointillée représente un lissage par spline cubique.

faibles. Sur ce même sujet, Wang et al. [2013] ont montré qu’il existait un lien entre augmentation du nombre d’observations assimilées dans 20CRv2 et diminution de la dispersion des membres relatif à un index d’activité cyclonique extra-tropical. Rodrigues et al. [2018] ont également montré que la persistance calculée à partir de 20CR (un indicateur apparenté à la célérité) augmentait avant 1925, puis se stabilisait et que la tendance était beaucoup plus prononcée pour le membre moyen que pour la moyenne des membres. On observe cette même augmentation, suivie d’une stabilisation avant 1880 pour la célérité du membre 1 de 20CR avec nos données (Figure 44). Nous avons testé l’impact de cette célérité plus faible en reproduisant le calcul d’analogie et les croisements d’indicateurs pour la période 1881-2014 (non montré par souci de concision). Ce changement de période n’a pas modifié les conclusions dressées jusqu’ici (de même que l’usage d’ERA5 entre 1950 et 2019).

Enfin, cette étude des indicateurs du géopotential pour les crues torrentielles est limitée dans l’usage qu’il peut en être fait seul, sans interactions avec d’autres variables météorologiques. En effet, face au changement climatique, le lien entre circulations atmosphériques et précipitations intenses puis ensuite crues, n’est pas forcément conservé. En effet, une même circulation peut porter des masses d’air plus ou moins chaudes, instables, chargées en humidité... L’utilisation d’une plus vaste gamme d’indicateurs est donc nécessaire.

4.4 Autres indicateurs hydrométéorologiques

L’étude des nouveaux indicateurs hydrométéorologiques a permis de sélectionner les indicateurs les plus performants pour discriminer les occurrences de crues du reste de la climatologie, ainsi que d’affiner notre compréhension des scénarios atmosphériques les plus générateurs de crues torrentielles pour le "Y grenoblois".

Tout d'abord, nous avons mis en évidence que pour les variables météorologiques différentes du champ de géopotential et des rivières atmosphériques, l'échelle d'étude la plus pertinente était les Alpes françaises et non l'Europe de l'Ouest. Nous avons aussi mis en évidence la mauvaise performance de notre indicateur estimant l'intensité des fronts. Ce résultat est sûrement lié à la trop faible résolution spatiale de 20CR comparé à la taille des fronts. La température s'est aussi avéré un mauvais discriminant, probablement du fait de la contribution marginale ou nulle de la fonte nivale dans les crues considérées. Par contre les autres nouveaux indicateurs sur les autres variables météorologiques se sont prouvés généralement plus performants que ceux portant sur le géopotential. De même que les indicateurs se sont prouvés plus performants lorsque calculé par TT Lamb. En effet, une fois supprimé le signal de fond saisonnier et par TT, le TT plus que la période de l'année semble conditionner les mécanismes atmosphériques générateurs de crues.

Ainsi, l'ensemble des crues à tendance à se produire pour des valeurs (pour les Alpes françaises) d'instabilité, d'humidité atmosphérique et de transport de vapeur d'eau relativement élevées par rapport à la climatologie. Similairement si l'on considère seulement les crues sous flux de N-W, les facteurs dominants sont un fort MPD (proxy de l'intensité du flux en altitude), une relative stationnarité, de fortes instabilité, humidité, transport de vapeur d'eau, vitesse horizontale et verticale du vent. Pour E-NE, le vent, le transport de vapeur et le MPD sont faibles, tandis que la singularité, l'instabilité, l'humidité et la température sont élevées. Pour SW-SE, la singularité est faible, tandis que l'instabilité, l'humidité, le transport de vapeur, le vent et la température sont fortes. Pour HP, les conditions de géopotential sont peu singulières, alors que l'instabilité, le transport de vapeur, le vent et l'humidité sont fortes. Il est surprenant de retrouver de fortes valeurs de vent sous HP, mais il faut garder à l'esprit qu'il s'agit de conditions locales et relatives à ce TT. Enfin dans le cas de MB, même si de manière moins marquée, le MPD, le vent et le transport de vapeur sont faibles, tandis que la célérité et la singularité sont fortes. Cette diversité de mécanismes par TT illustre bien la difficulté de discriminer les occurrences de crues du reste de la climatologie par une approche saisonnière.

Généralement les crues se produisent donc pour des conditions (sur les Alpes françaises) plus humides, plus instables et avec plus de transport de vapeur que la climatologie des journées de la même période et du même TT. On retrouve donc une influence synoptique à travers l'apport d'humidité, combinée à un déclencheur local lié à l'instabilité potentielle. Une exception notable concerne les situations de MB où le vent et le transport de vapeur sont particulièrement faibles même pour des MB. L'influence est alors bien plus locale et probablement inférieure à la résolution des mailles 20CR ($2 \times 2^\circ$). Ces sont également des journées peu stationnaires et singulières, même pour des MB. Une autre exception, sont les crues sous flux d'E-NE, qui bien que se produisant pour de fortes instabilités et humidités, ont lieu pour de faibles vents, MPD et transport de vapeur. La reproductibilité des situations est aussi faible (forte singularité) même pour des flux d'E-NE. On est donc sur des situations singulières, sans circulation de grande échelle très marquée mais avec une forte instabilité et humidité locale.

En terme de sensibilité des résultats, on relève que la sensibilité au choix du membre est assez limitée, bien que non négligeable tandis que celle au choix de la réanalyse est bien plus importante. Il est important de garder à l'esprit que cela va être d'autant plus vrai pour les événements de crues les plus anciens pour lesquels les membres 20CR sont les plus différents du fait du plus petit nombre d'observations assimilées [Wang et al., 2013]. De même une part de cette sensibilité sera par construction plus forte pour les indicateurs portant sur les variables les plus "complexes" (celles dont le calcul à partir des mesures de pression au sol est le plus indirect et multi-paramètres, comme la CAPE). La comparaison des indicateurs entre ERA5 et 20CR présente des résultats contrastés. Globalement les performances sont meilleures avec ERA5, mais cela n'est pas toujours perceptible sur les indicateurs calculés sur le minimum ou maximum de 2 pixels (les performances de la `cape_max_2px` baissent

notablement), mais davantage sur la moyenne sur 2 pixels (non montré par souci de concision). Cela découle de notre volonté d'appliquer les mêmes statistiques et zones de calcul aux 2 réanalyses afin de pouvoir comparer l'impact de la qualité de leur données et pas de l'intérêt de pouvoir utiliser ERA5 sur des zones plus locales. Ainsi le minimum ou maximum des pixels ERA5 sur une zone de $2 \times 2^\circ$ ne se trouvera pas forcément sur le "Y grenoblois" hors des périodes de crues et la climatologie peut donc être faussée par des conditions atmosphériques extrêmes se produisant à proximité sans affecter la métropole. Un résultat particulièrement intéressant découlant de l'usage d'ERA5 est l'augmentation de performance importante de certains indicateurs pour les situations de MB (en terme de SPD) : $q700_max_2px$ passe de 0.2 à 0.49, $pwat_avrg_2px$ de 0.09 à 0.35, $cape_avrg_2px$ de 0.07 à 0.36 et $v700_max_2px$ de 0.09 à 0.35. Pour ces dates de MB, il semble que l'avantage découlant de la plus grande variété de données assimilées et de la plus forte résolution spatio-temporelle de calcul d'ERA5 est encore plus prononcé que pour d'autres. Il semble que ces situations de MB soient associées à une humidité et un vent localement fort (et donc mieux résolu dans ERA5) et à une instabilité et une humidité moyenne régionale forte (et donc mieux représentée avec plus de données assimilées et une résolution de calcul élevée). Les moins bonnes performances des indicateurs pour le TT MB sont donc en partie compensées lorsque l'on bénéficie d'une réanalyse plus complexe. Une autre part de ces moins bonnes performances réside aussi sûrement dans le fait que certaines situations de MB sont des versions peu marquées de flux zonaux, méridionaux ou continentaux et donc MB regroupe des valeurs d'indicateurs un peu plus variées que les autres TT.

Pour continuer, le croisement des indicateurs par paires nous montre pour les occurrences de crues une relative corrélation entre les indicateurs : plus fort IVT pour plus forte CAPE, plus forte CAPE pour plus forte PWAT... L'usage de 2 indicateurs apporte donc peu d'informations par rapport aux indicateurs pris individuellement.

L'ensemble de ces résultats sont à nuancer dans le cas de l'étude des valeurs de SPD par TT, pour le TT possédant la plus faible représentativité dans les occurrences de crues, c'est-à-dire E-NE avec 6 occurrences entre 1851 et 2014. Dans ce cas la taille de l'échantillon, peut biaiser le calcul de SPD en le rendant très sensible à la valeur d'une seule journée.

En ce qui concerne les AR, il s'agit d'une situation très génératrice de crues (presque 1/3 des séquences d'occurrences torrentielles), particulièrement en hiver ou c'est presque la seule situation génératrice. Les situations avec des circulations en provenance de l'Océan Atlantique particulièrement marquées et chargées en humidité sont donc d'un fort intérêt pour l'étude des crues même à l'échelle torrentielle. Un fort nombre de crues torrentielles a donc une origine grande échelle et pas uniquement locale.

Enfin, il est intéressant de comparer les performances de l'approche par indicateurs à celle par TT en terme de discrimination entre occurrences de crues et climatologie et donc en terme de capacité à isoler des scénarios davantage générateurs de crues torrentielles pour le "Y grenoblois". Une manière d'effectuer cela est de s'intéresser aux probabilités conditionnelles, c'est-à-dire connaissant un paramètre atmosphérique (TT, indicateur ou présence d'AR) quel pourcentage des dates sont des dates de référence d'occurrences de crues. Ainsi pour le TT EDF la plus forte probabilité conditionnelle est celle d'avoir un évènement torrentiel sachant qu'on est en conditions Méditerranéennes : environ 1 pour 350 (19 occurrences de crues entre 1948 et 2019, pour des conditions Méditerranéennes 25% de la période). La plus faible est de 1/2000 avec le TT Anticyclonique (et 1/500 pour l'Océanique et 1/750 pour le Continental). Pour le TT Lamb, on obtient (avec le membre 1) entre 1/325 pour le N-W et 1/1650 pour le E-NE (1/500 pour MB, 1/1100 pour SE-SW et 1/1250 pour HP).

Dans le cas des rivières atmosphériques ce chiffre monte jusqu'à 1/120 chances d'avoir une date de

référence d'occurrence de crues sachant que l'on est en situation de rivière atmosphérique.

Si l'on considère l'un de nos indicateurs les plus performants en terme de SPD , la `pwat_min_2px`, 50% des crues sont supérieures à 83,5% de la climatologie (1851-2014, 20CR membre1, 66 évènements). Sachant que l'on a une fréquence au non-dépassement supérieure ou égale à 83,5% pour `pwat_min_2px` on a donc 1 chance sur 300 d'avoir un évènement torrentiel.

On voit donc bien l'intérêt de l'approche par indicateurs qui donne une discrimination pour l'ensemble des crues similaire à la meilleure discrimination pour un seul TT. Cet avantage se cumule à celui de multiplier les variables météorologiques considérées et donc de ne pas devoir se baser sur une stabilité temporelle du lien circulation-précipitation qui n'est pas forcément vraie en contexte de changement climatique. Néanmoins l'analyse du TT est une étape nécessaire à la compréhension des phénomènes et à la construction des indicateurs. De plus les performances du TT sont meilleures lorsque l'on étudie également sa persistance.

4.5 Indicateurs et paramètres géomorphologiques

Notre étude croisée entre type de transport sédimentaire du bassin en crue et caractéristiques atmosphériques associées n'a pas permis de mettre en évidence de forts liens entre les deux. Néanmoins, les crues à charriage semblent plus associées, à la période hivernale et automnale que les autres, ainsi qu'aux situations d'AR, de fort MPD, de faible célérité et de faible CAPE. Tous ces résultats sont cohérents avec des systèmes météorologiques hivernaux (ou automnaux) de grande échelle, stationnaires et à flux marqué, déjà décrits pour les crues hivernales. Une part de cette tendance s'explique par la plus grande superficie de ces entités hydrologiques, assez fortement corrélée au mode de calcul du type de transport sédimentaire. En effet, les bassins versants réagissants aux AR ont tendance à être plus étendus, tout comme ceux qui réagissent en hiver et en automne (et les quelques-uns du printemps). Une autre partie d'explication vient sûrement de la pente de ces bassins versants qui les rend plus ou moins sensibles à des systèmes locaux ou de grande échelle.

Cette approche reste néanmoins limitée, principalement du fait de l'incertitude liée à la classification de type de transport sédimentaire. Tout d'abord, celle-ci n'inclut que des paramètres géomorphologiques simples : superficie, longueur du cours d'eau et différence d'altitude et aucune information sur la disponibilité sédimentaire. Ensuite, nous l'appliquons à des entités hydrologiques qui sont parfois des collections de torrents parallèles plutôt que des bassins versants au sens strict du terme, et donc le lien entre superficie et longueur du cours d'eau majeur peut être rompu. Cette longueur est par elle-même subjective dans son estimation, étant donné qu'il est difficile d'estimer le point haut du cours d'eau et que la position de l'exutoire est également imprécise pour les entités ne se terminant pas à une jonction hydrologique (impactant aussi par là-même la superficie). Néanmoins, malgré cela nous avons quand même pu mettre en évidence un début de lien entre systèmes météorologiques de grande échelle générateurs de crues et réactions des plus grands bassins versants torrentiels.

5 Conclusion

L'Action 2 du projet HYDRODEMO a donc réutilisé ou développé plusieurs classifications de circulation atmosphériques et indicateurs statistiques afin de caractériser plus finement les scénarios atmosphériques les plus générateurs de crues torrentielles sur le "Y grenoblois". Ces variables ont été croisées avec les dates d'occurrences des crues dommageables de la BD RTM-IGE afin de pouvoir comparer leur comportement dans la climatologie à celui des dates de crues et ainsi pouvoir estimer les plus discriminantes.

La plupart des évènements torrentiels ont lieu en été, avec un maximum secondaire en hiver. En ce qui concerne le TT EDF, la majorité des crues ont lieu pour les TT Méditerranéen et Océaniques (environ 40% chacun), avec quasi-exclusivement des évènements Océaniques en hiver et une dominance du Méditerranéen en été. Ce sont pour tous les TT les séquences les plus persistantes qui génèrent les évènements torrentiels.

Pour le TT Lamb, moins en usage dans la littérature pour les Alpes, mais disponible jusqu'en 1851, ce sont les flux de N-W qui génèrent le plus de crues (plus de 1/3). Le TT N-W est pratiquement le seul générateur de réactions en hiver, tandis qu'en été les 5 TT se partagent plus ou moins les évènements torrentiels. Comme pour le TT EDF, les périodes de TT persistants sont celles qui génèrent le plus de crues. Le choix du membre de 20CR a peu d'impact sur notre étude, mais ce n'est pas le cas du choix de la réanalyse. Par comparaison avec ERA5, il semble que 20CR présente trop de journées de HP en été et pas assez de N-W.

L'étude des indicateurs portant sur la forme du champ d'altitude du géopotential à 500hPa a mis en évidence que la singularité et la célérité (et les autres indicateurs du géopotential en général) discriminait mal les situations génératrices de crues du reste de la climatologie, sauf dans le cas des crues hivernales, Océaniques ou concomitantes torrents-rivières qui se produisent pour des situations peu singulières et relativement stationnaires. Même si cette tendance est peu marquée, un nombre non négligeable d'occurrences de crues se produisent pour de forts MPD et faibles singularité relatives, particulièrement en hiver.

Face aux performances modérées des indicateurs déjà en usage, nous avons développé de nouveaux indicateurs portant sur d'autres variables météorologiques. Afin de tester la capacité de ces indicateurs à discriminer des scénarios générateurs de crues torrentielles, nous avons mis en place une méthodologie basée sur la fréquence mensuelle et par TT Lamb au non-dépassement (pour se détacher de la saisonnalité et des influences du TT), avant de calculer un Score de Pouvoir Discriminant (SPD), basé sur la distribution de cette fréquence pour les occurrences de crues relativement à la climatologie. Ce SPD est calculé pour l'ensemble des crues, puis uniquement pour les crues d'un TT donné.

Les meilleurs indicateurs sont ceux calculés "localement" à l'échelle des Alpes françaises plutôt qu'à l'échelle de l'Europe de l'Ouest. Ils portent sur la CAPE, la PWAT, l'IVT, l'humidité spécifique et le vent. Les crues de N-W, SW-SE et HP se produisent pour de fortes valeurs d'humidité atmosphérique, d'instabilité potentielle, de transport de vapeur et de vent relativement à la saison et au TT concerné. Les crues d'E-NE se produisent aussi pour de fortes humidités et instabilités locales, mais le vent et le transport d'humidité sont faibles pour le mois et le TT. Les crues sous MB sont les moins bien discriminées. En effet, il semblerait que les influences atmosphériques à l'origine des crues dans ce cas-là soient beaucoup plus locales, avec un vent et un transport de vapeur faibles même pour ce TT. Cette hypothèse est confirmée par les meilleurs SPD lorsque l'on utilise la réanalyse ERA5 mieux résolue spatialement. La sensibilité des résultats au choix du membre est modérée, même si elle peut

être plus conséquente dans le cas du MB ou de certains indicateurs non retenus. L'utilisation de la réanalyse ERA5 assimilant plus de données et mieux résolue dans le temps et l'espace permet une meilleure discrimination entre crues et climatologie, à condition d'adapter la zone utilisée pour le calcul. C'est particulièrement vrai pour les situations de MB où les mécanismes atmosphériques sont davantage locaux. L'usage d'ERA5 a pour avantage de bénéficier d'une réanalyse de meilleure qualité pour la période récente et de se détacher des problématiques de différence croissante entre les membres de 20CR en remontant avant 1950, particulièrement pour la célérité et les variables météorologiques complexes comme la CAPE. Par contre, cette approche ne peut pas remplacer celle avec 20CR dans l'état actuel des choses, car elle diminue trop l'échantillon de crues considéré.

Nous avons également développé un algorithme d'identification des jours de fort transport zonal de vapeur d'eau ou rivière atmosphériques (AR). Cela a permis de mettre en évidence que malgré une faible occurrence dans la climatologie (4%), les AR sont associés à presque 30% des crues et 80% des crues en hiver.

Globalement on a deux grandes périodes marquées de crues torrentielles : l'hiver avec 20% des crues et l'été avec 58% des crues. Les crues hivernales se produisent sous des flux zonaux marqués entraînant des vents et un transport important de vapeur d'eau vers les Alpes, régulièrement sous forme de rivières atmosphériques. Les crues estivales, se produisent sous une variété d'influences : locales, zonales ou méridionales. Pour les flux de Nord à Sud-Est elles sont associées à de forts transports de vapeur, vent, humidité et instabilité relativement à leur TT et leur saison. L'influence semble donc globale, avec des déclencheurs plus locaux. Cela pointe davantage vers des systèmes comme les fronts, les tempêtes ou les rivières atmosphériques. Lors de hautes pressions, l'instabilité, l'humidité, le vent et le transport de vapeur sont aussi marqués par rapport à ce TT. Le flux étant par nature plus divergent, il pourrait s'agir de conditions localement humides et instables, de type convection et orages organisés et les fortes valeurs d'IVT et de vent ne le serait que relativement au TT. Pour les crues d'E-NE, on serait dans des conditions similaires avec une forte instabilité et une humidité sourcée localement, le vent étant faible et venant du continent. Enfin, pour les situations de marais barométrique on se trouverait dans des conditions avec des vents faibles et une instabilité et une humidité encore plus locales, sous forme de cellules orageuses organisées.

Une condition supplémentaire dans l'ensemble de ces scénarios est la persistance du TT générateur pendant au moins quelques jours, permettant ainsi soit un fort cumul de précipitations, soit un fort apport d'humidité et/ou un développement d'instabilités.

La comparaison des différentes approches pour caractériser les scénarios atmosphériques générateurs de crues torrentielles pour le "Y grenoblois" a mis en évidence leur complémentarité. Néanmoins certains sont plus prometteurs que d'autres, c'est le cas des rivières atmosphériques et des indicateurs portant sur les nouvelles variables atmosphériques. Ces derniers performant similairement aux classifications de type de temps, mais de manière plus homogène lorsque calculé par TT.

Enfin, le croisement des scénarios atmosphériques générateurs de crues avec les types de transport sédimentaire des entités hydrologiques en crue a permis de mettre en évidence un début de lien entre systèmes météorologiques de grande échelle (hivernaux, AR...) et crues à charriage/entité hydrologiques de grande superficie.

La poursuite de ces travaux devra passer par la démarche de continuer à développer et affiner les indicateurs météorologiques proposés. Notamment en les croisant entre eux ou en appliquant une approche à deux niveaux d'analogie. L'étude de sensibilité devra également être poursuivie si possible

en calculant la moyenne des indicateurs sur les 56 membres de 20CR (plutôt que les indicateurs sur le membre moyen). Cela nécessite bien entendu une puissance de calcul et de stockage supérieure. Si ces conditions sont réunies l'étude pourrait également être reprise au pas de temps 6h.

Il serait également intéressant de développer des indicateurs adaptés spécifiquement à la meilleure résolution spatio-temporelle d'ERA5. Pour cela il faudrait bénéficier d'une base de données d'occurrence de crues plus extensive, soit en poursuivant le travail d'archives pour combler les lacunes temporelles, soit en étendant la zone d'étude (ces 2 approches ont aussi leur intérêt en conservant les données 20CR afin de consolider l'échantillon). L'extension de la zone d'étude aurait pour avantage secondaire de diminuer les problématiques liées au recouvrement partiel entre les systèmes précipitants et le "Y grenoblois", réduisant le biais sur l'estimation du nombre de torrents réagissant lors d'un événement.

Finalement, la prochaine étape est d'utiliser ces scénarios atmosphériques et les indicateurs associés, afin d'étudier l'évolution dans le passé et dans le futur des conditions génératrices de crues torrentielles pour la région. Des travaux sont en cours au sein de l'équipe HMCIS sur différentes problématiques en lien avec cette étude et devrait poursuivre dans certaines de ces directions : évolution passée et future des indicateurs de géopotential, évolution passée des indicateurs hydrométéorologiques et des types de temps, évolution passée des précipitations, caractérisation plus poussée des crues torrentielles et de rivières de la BD RTM-IGE et impact des changements de méthodes d'archivage.

Références

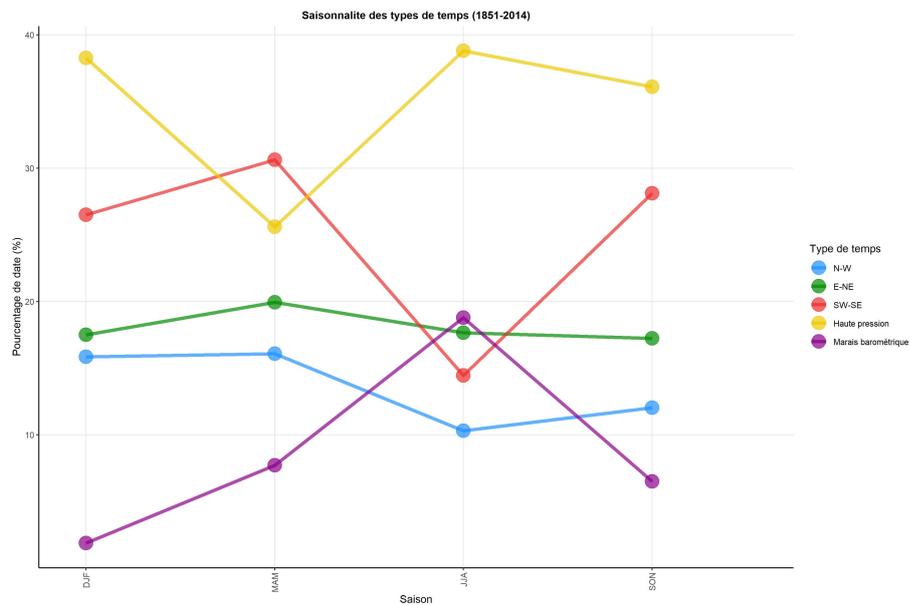
- I. Auer, R. Böhm, A. Jurkovic, W. Lipa, A. Orlik, R. Potzmann, W. Schöner, M. Ungersböck, C. Mattalla, K. Briffa, P. Jones, D. Efthymiadis, M. Brunetti, T. Nanni, M. Maugeri, L. Mercalli, O. Mestre, J.-M. Moisselin, M. Begert, G. Müller-Westermeier, V. Kveton, O. Bochnicek, P. Stastny, M. Lapin, S. Szalai, T. Szentimrey, T. Cegnar, M. Dolinar, M. Gajic-Capka, K. Zaninovic, Z. Majstorovic, and E. Nieplova. HISTALP—historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *International Journal of Climatology*, 27(1) :17–46, Jan. 2007. ISSN 08998418, 10970088. 10.1002/joc.1377. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.1377>.
- A. Blanc, J. Blanchet, and J. Creutin. Characterizing large-scale circulations driving extreme precipitation in the Northern French Alps. *International Journal of Climatology*, page joc.7254, June 2021. ISSN 0899-8418, 1097-0088. 10.1002/joc.7254. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.7254>.
- J. Blanchet and J.-D. Creutin. Explaining Rainfall Accumulations over Several Days in the French Alps Using Low-Dimensional Atmospheric Predictors Based on Analogy. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59(2) :237–250, Feb. 2020. ISSN 1558-8424, 1558-8432. 10.1175/JAMC-D-19-0112.1. URL <https://journals.ametsoc.org/jamc/article/59/2/237/346041/Explaining-Rainfall-Accumulations-over-Several>.
- J. Blanchet, S. Stalla, and J.-D. Creutin. Analogy of multiday sequences of atmospheric circulation favoring large rainfall accumulation over the French Alps. *Atmospheric Science Letters*, 19(3) :e809, Mar. 2018. ISSN 1530261X. 10.1002/asl.809. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/asl.809>.
- J. Blanchet, J.-D. Creutin, and A. Blanc. Retreating winter and strengthening autumn Mediterranean influence on extreme precipitation in the Southwestern Alps over the last 60 years. *Environmental Research Letters*, Sept. 2020. ISSN 1748-9326. 10.1088/1748-9326/abb5cd. URL <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abb5cd>.
- D. Bolton. The Computation of Equivalent Potential Temperature. *Monthly Weather Review*, 1980.
- A. Bárdossy and F. Filiz. Identification of flood producing atmospheric circulation patterns. *Journal of Hydrology*, 313(1-2) :48–57, Nov. 2005. ISSN 00221694. 10.1016/j.jhydrol.2005.02.006. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169405000284>.
- H. Caspary. Recent winter floods in Germany caused by changes in the atmospheric circulation across Europe. *Physics and Chemistry of the Earth*, 20(5-6) :459–462, Oct. 1995. ISSN 00791946. 10.1016/S0079-1946(96)00006-7. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079194696000067>.
- G. P. Compo, J. S. Whitaker, P. D. Sardeshmukh, N. Matsui, R. J. Allan, X. Yin, B. E. Gleason, R. S. Vose, G. Rutledge, P. Bessemoulin, S. Brönnimann, M. Brunet, R. I. Crouthamel, A. N. Grant, P. Y. Groisman, P. D. Jones, M. C. Kruk, A. C. Kruger, G. J. Marshall, M. Maugeri, H. Y. Mok, . Nordli, T. F. Ross, R. M. Trigo, X. L. Wang, S. D. Woodruff, and S. J. Worley. The Twentieth Century Reanalysis Project : The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(654) :1–28, Jan. 2011. ISSN 00359009. 10.1002/qj.776. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/qj.776>.
- J. D. Creutin, J. Blanchet, A. Reverdy, A. Brochet, C. Lutoff, and Y. Robert. Reported occurrence of multiscale flooding in an Alpine conurbation over the long run (1850-2019). *Journal of Hydrology*, page 48, In Press.

- R. Davies-Jones. An Efficient and Accurate Method for Computing the Wet-Bulb Temperature along Pseudoadiabats. *Monthly Weather Review*, 136(7) :2764–2785, July 2008. ISSN 1520-0493, 0027-0644. 10.1175/2007MWR2224.1. URL <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/2007MWR2224.1>.
- M. France. Climat de la région Rhône-Alpes. Technical report, 2010.
- P. Froidevaux and O. Martius. Exceptional integrated vapour transport toward orography : an important precursor to severe floods in Switzerland : Integrated Vapour Transport and Floods in Switzerland. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(698) :1997–2012, July 2016. ISSN 00359009. 10.1002/qj.2793. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/qj.2793>.
- F. Garavaglia, J. Gailhard, E. Paquet, M. Lang, R. Garçon, and P. Bernardara. Introducing a rainfall compound distribution model based on weather patterns sub-sampling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(6) :951–964, June 2010. ISSN 1607-7938. 10.5194/hess-14-951-2010. URL <https://hess.copernicus.org/articles/14/951/2010/>.
- F. Gottardi, C. Obled, J. Gailhard, and E. Paquet. Statistical reanalysis of precipitation fields based on ground network data and weather patterns : Application over French mountains. *Journal of Hydrology*, 432-433 :154–167, Apr. 2012. ISSN 00221694. 10.1016/j.jhydrol.2012.02.014. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S002216941200114X>.
- H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, A. Horányi, J. Muñoz-Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, S. Abdalla, X. Abellan, G. Balsamo, P. Bechtold, G. Biavati, J. Bidlot, M. Bonavita, G. Chiara, P. Dahlgren, D. Dee, M. Diamantakis, R. Dragani, J. Flemming, R. Forbes, M. Fuentes, A. Geer, L. Haimberger, S. Healy, R. J. Hogan, E. Hólm, M. Janisková, S. Keeley, P. Laloyaux, P. Lopez, C. Lupu, G. Radnoti, P. Rosnay, I. Rozum, F. Vamborg, S. Villaume, and J. Thépaut. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730) :1999–2049, July 2020. ISSN 0035-9009, 1477-870X. 10.1002/qj.3803. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.3803>.
- J. Jacobeit, A. Philipp, and M. Nonnenmacher. Atmospheric circulation dynamics linked with prominent discharge events in Central Europe. *Hydrological Sciences Journal*, 51(5) :946–965, Oct. 2006. ISSN 0262-6667, 2150-3435. 10.1623/hysj.51.5.946. URL <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1623/hysj.51.5.946>.
- A. Jenkinson and F. Collison. An initial climatology of gales over the North Sea Synoptic climatology. *Synoptic Climatology Branch Memorandum*, page 18, 1977.
- P. Kiennemann. Étude de l'évolution passée des scénarios atmosphériques gouvernant les crues torrentielles de la métropole grenobloise. Technical report, July 2021.
- J. Kochendorfer, R. Nitu, M. Wolff, E. Mekis, R. Rasmussen, B. Baker, M. E. Earle, A. Reverdin, K. Wong, C. D. Smith, D. Yang, Y.-A. Roulet, S. Buisan, T. Laine, G. Lee, J. L. C. Aceituno, J. Alastrué, K. Isaksen, T. Meyers, R. Brækkan, S. Landolt, A. Jachcik, and A. Poikonen. Analysis of single-shielded and unshielded measurements of mixed and solid precipitation from WMO-SPIECE. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(7) :3525–3542, July 2017. ISSN 1607-7938. 10.5194/hess-21-3525-2017. URL <https://hess.copernicus.org/articles/21/3525/2017/>.
- D. A. Lavers and G. Villarini. The nexus between atmospheric rivers and extreme precipitation across Europe. *Geophysical Research Letters*, 40(12) :3259–3264, June 2013. ISSN 00948276. 10.1002/grl.50636. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/grl.50636>.

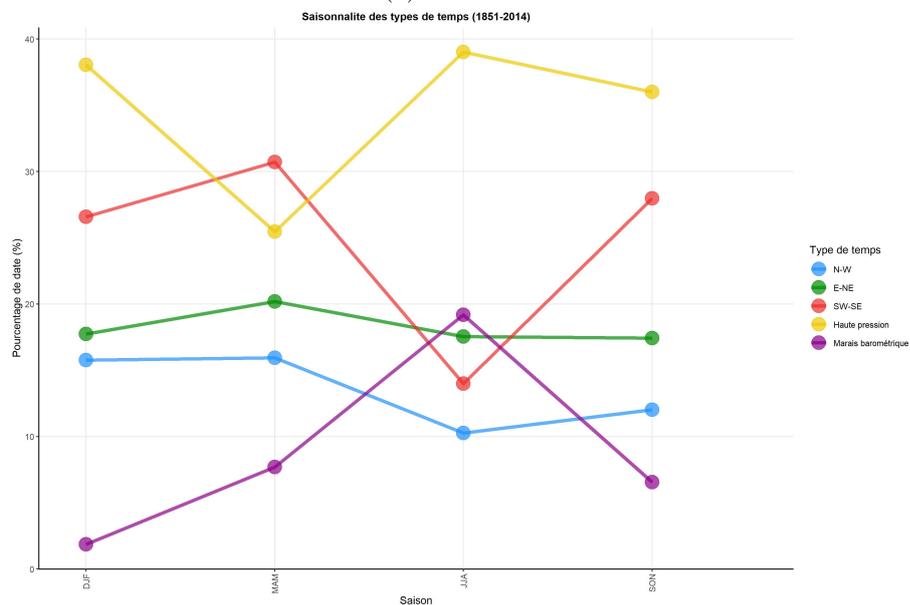
- N. Mastrantonas, P. Herrera-Lormendez, L. Magnusson, F. Pappenberger, and J. Matschullat. Extreme precipitation events in the Mediterranean : Spatiotemporal characteristics and connection to large-scale atmospheric flow patterns. *International Journal of Climatology*, 41(4) :2710–2728, Mar. 2021. ISSN 0899-8418, 1097-0088. 10.1002/joc.6985. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.6985>.
- T. Petrow, J. Zimmer, and B. Merz. Changes in the flood hazard in Germany through changing frequency and persistence of circulation patterns. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(4) :1409–1423, Aug. 2009. ISSN 1684-9981. 10.5194/nhess-9-1409-2009. URL <https://nhess.copernicus.org/articles/9/1409/2009/>.
- G. Plaut, E. Schuepbach, and M. Doctor. Heavy precipitation events over a few Alpine sub-regions and the links with large-scale circulation, 1971-1995. *Climate Research*, 17 :285–302, 2001. ISSN 0936-577X, 1616-1572. 10.3354/cr017285. URL <http://www.int-res.com/abstracts/cr/v17/n3/p285-302/>.
- C. Prudhomme and M. Genevier. Can atmospheric circulation be linked to flooding in Europe? *Hydrological Processes*, 25(7) :1180–1190, Mar. 2011. ISSN 08856087. 10.1002/hyp.7879. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/hyp.7879>.
- D. Rodrigues, M. C. Alvarez-Castro, G. Messori, P. Yiou, Y. Robin, and D. Faranda. Dynamical Properties of the North Atlantic Atmospheric Circulation in the Past 150 Years in CMIP5 Models and the 20CRv2c Reanalysis. *Journal of Climate*, 31(15) :6097–6111, Aug. 2018. ISSN 0894-8755, 1520-0442. 10.1175/JCLI-D-17-0176.1. URL <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI-D-17-0176.1>.
- H. Sodemann and E. Zubler. Seasonal and inter-annual variability of the moisture sources for Alpine precipitation during 1995-2002. *International Journal of Climatology*, pages n/a–n/a, 2009. ISSN 08998418, 10970088. 10.1002/joc.1932. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/joc.1932>.
- S. Teweles and H. B. Wobus. Verification of Prognostic Charts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 35(10) :455–463, Dec. 1954. ISSN 0003-0007, 1520-0477. 10.1175/1520-0477-35.10.455. URL <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0477-35.10.455>.
- T. Turkington, J. Ettema, C. J. van Westen, and K. Breinl. Empirical atmospheric thresholds for debris flows and flash floods in the southern French Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(6) :1517–1530, June 2014. ISSN 1684-9981. 10.5194/nhess-14-1517-2014. URL <https://nhess.copernicus.org/articles/14/1517/2014/>.
- X. L. Wang, Y. Feng, G. P. Compo, V. R. Swail, F. W. Zwiers, R. J. Allan, and P. D. Sardeshmukh. Trends and low frequency variability of extra-tropical cyclone activity in the ensemble of twentieth century reanalysis. *Climate Dynamics*, 40(11-12) :2775–2800, June 2013. ISSN 0930-7575, 1432-0894. 10.1007/s00382-012-1450-9. URL <http://link.springer.com/10.1007/s00382-012-1450-9>.
- D. J. Wilford, M. E. Sakals, J. L. Innes, R. C. Sidle, and W. A. Bergerud. Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides*, 1(1) :61–66, Mar. 2004. ISSN 1612-510X, 1612-5118. 10.1007/s10346-003-0002-0. URL <http://link.springer.com/10.1007/s10346-003-0002-0>.
- J. D. Wille. West Antarctic surface melt triggered by atmospheric rivers. *Nature Geoscience*, 12 :8, 2019.

ANNEXES

A Classification de Type de Temps Lamb pour les membres 2 et moyen de 20CR

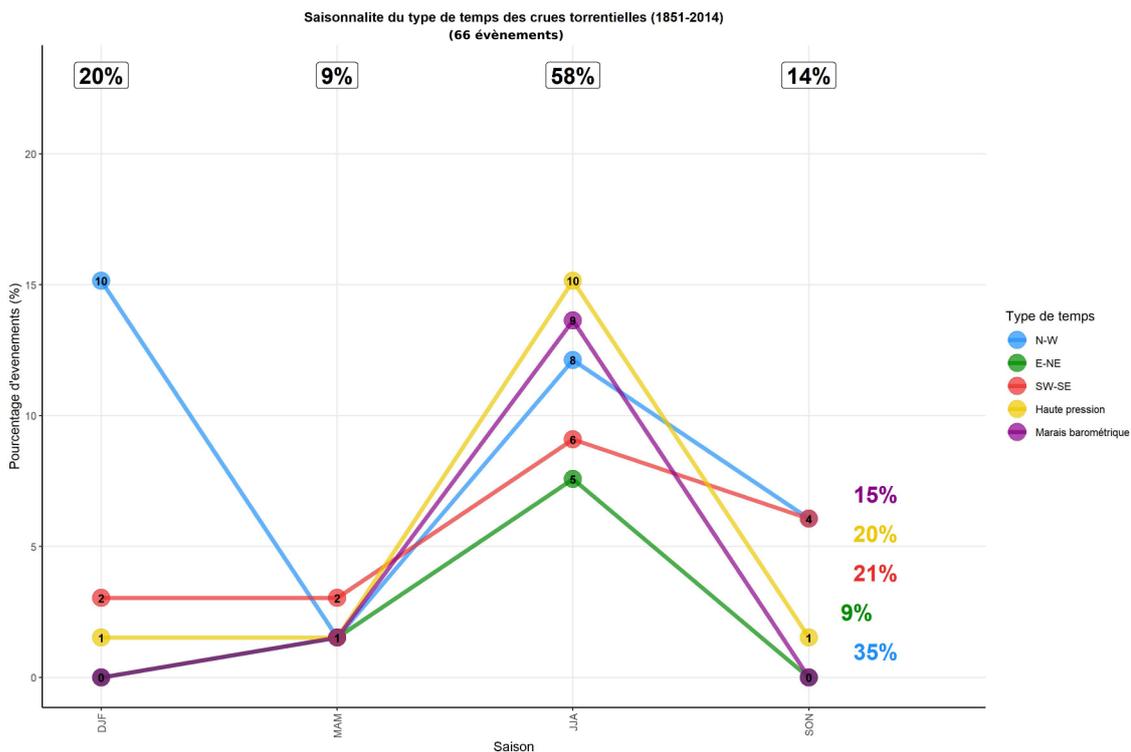


(a) Membre 2

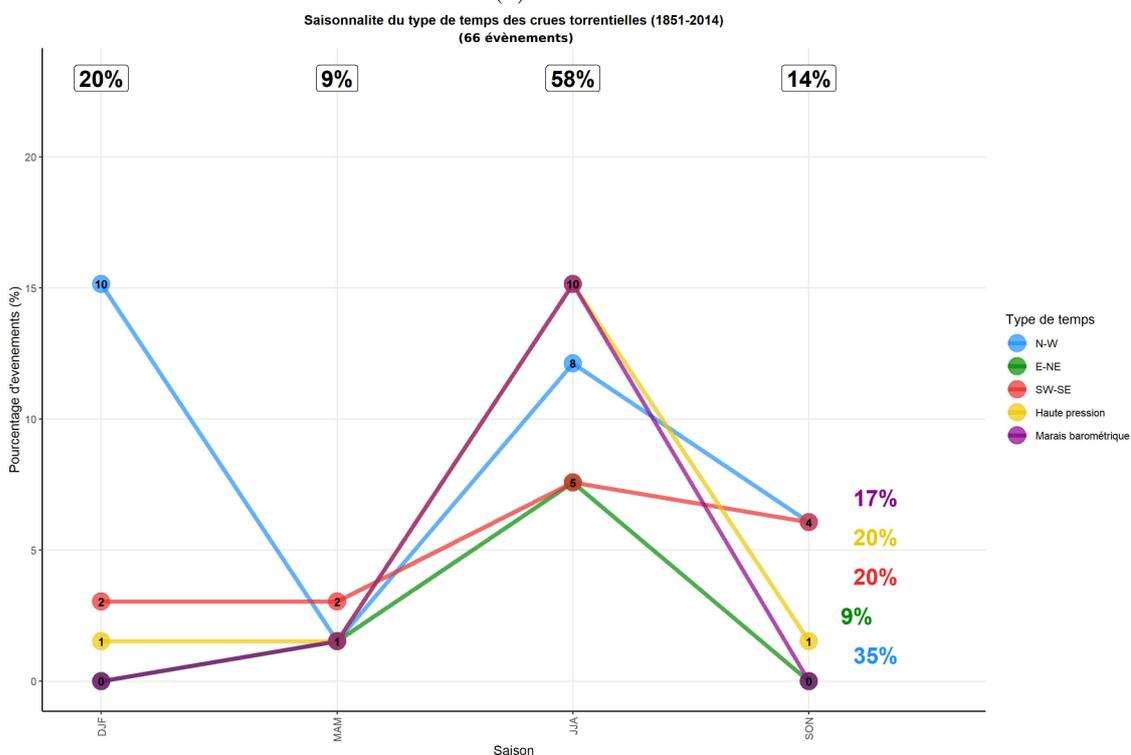


(b) Membre moyen

FIGURE 45 – Climatologie du TT Lamb (pourcentage de date de la saison)

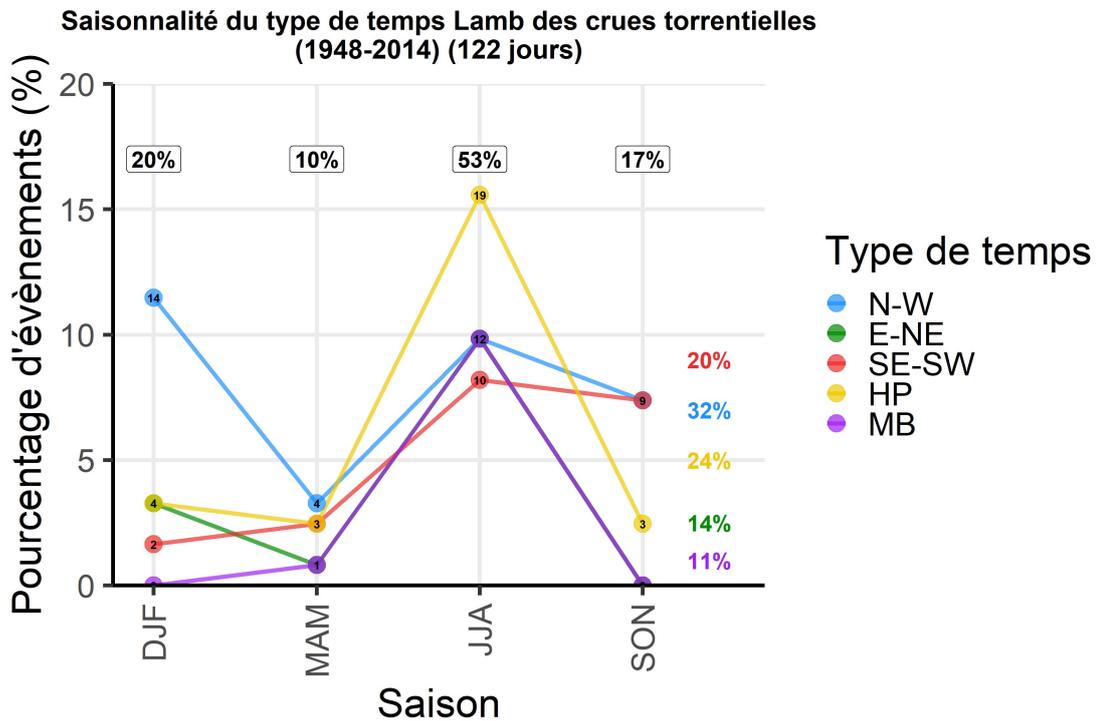


(a) Membre 2

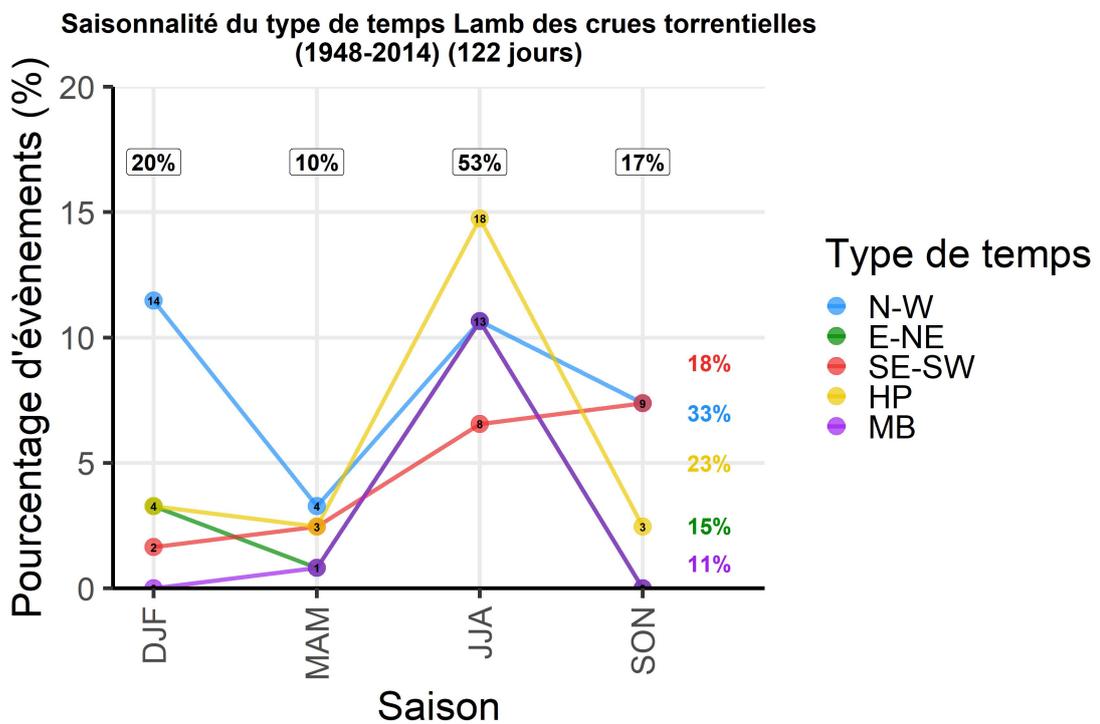


(b) Membre moyen

FIGURE 46 – Saisonnalité du TT Lamb pour les dates d’occurrence de crues. Le pourcentage en haut est l’occurrence saisonnière et celui à droite l’occurrence par TT. Les chiffres dans les bulles correspondent au nombre d’évènements.

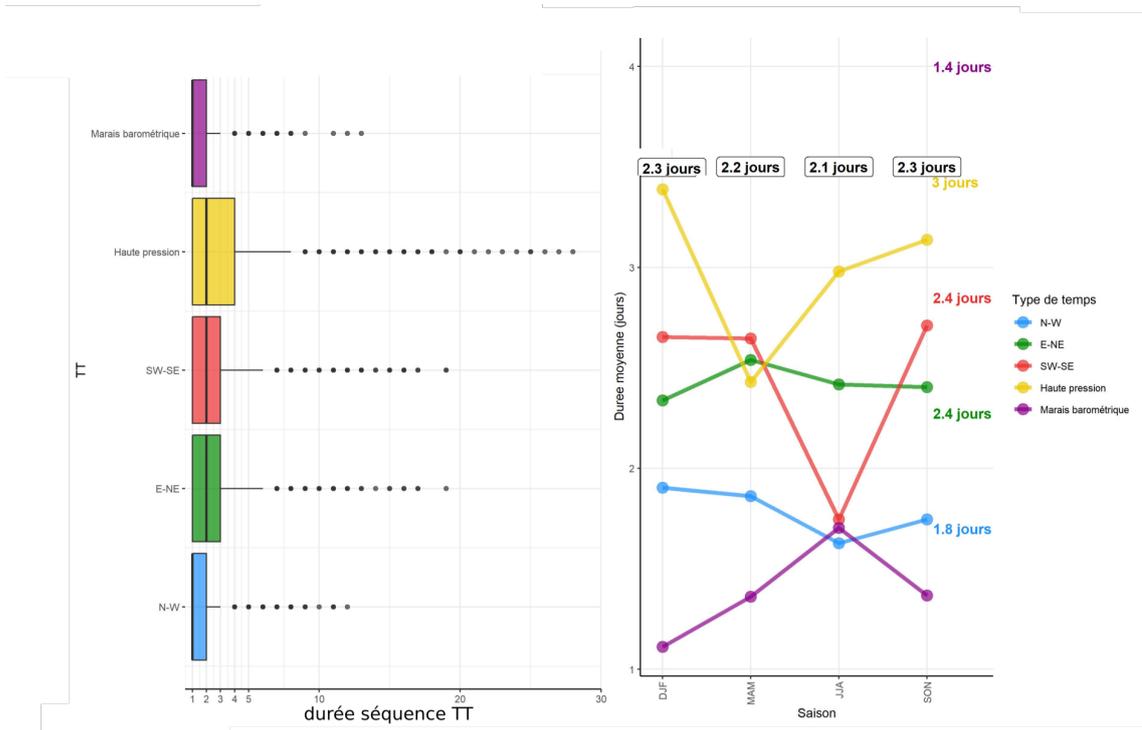


(a) Membre 2

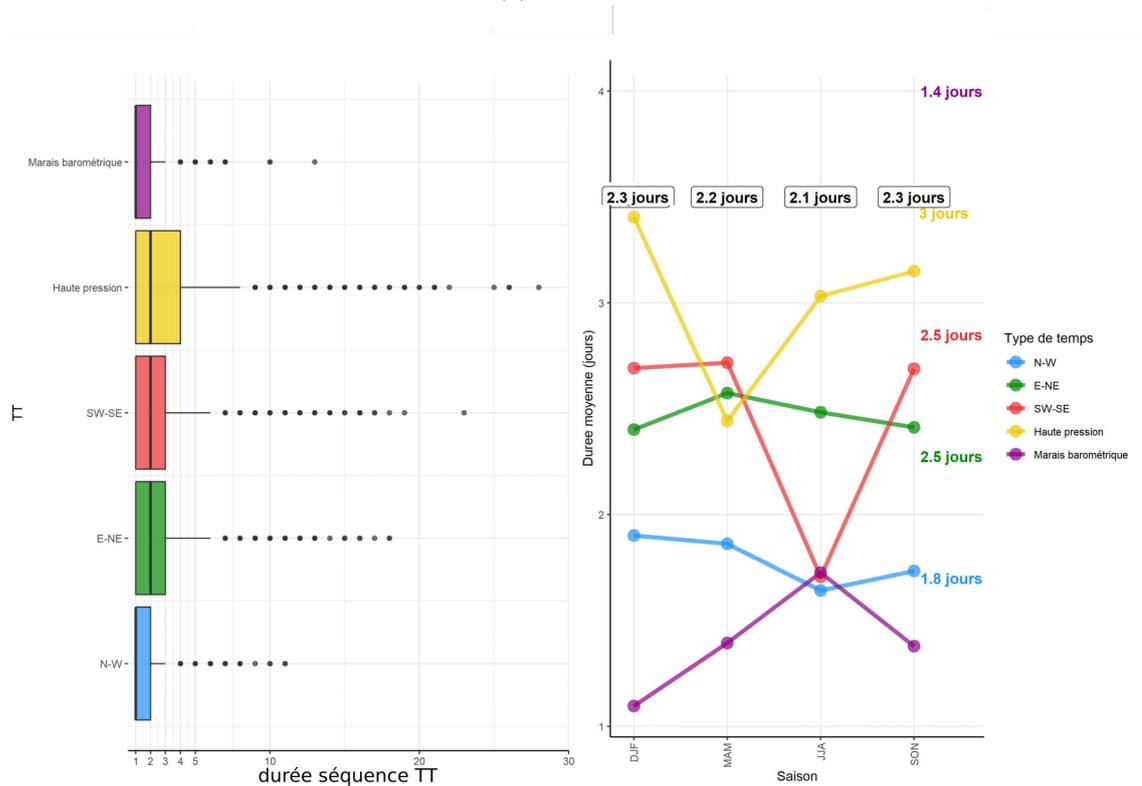


(b) Membre moyen

FIGURE 47 – Saisonnalité du TT Lamb pour l’ensemble des dates d’occurrence de crues. Le pourcentage en haut est l’occurrence saisonnière et celui à droite l’occurrence par TT. Les chiffres dans les bulles correspondent au nombre d’occurrence de crues toutes séquences confondues.

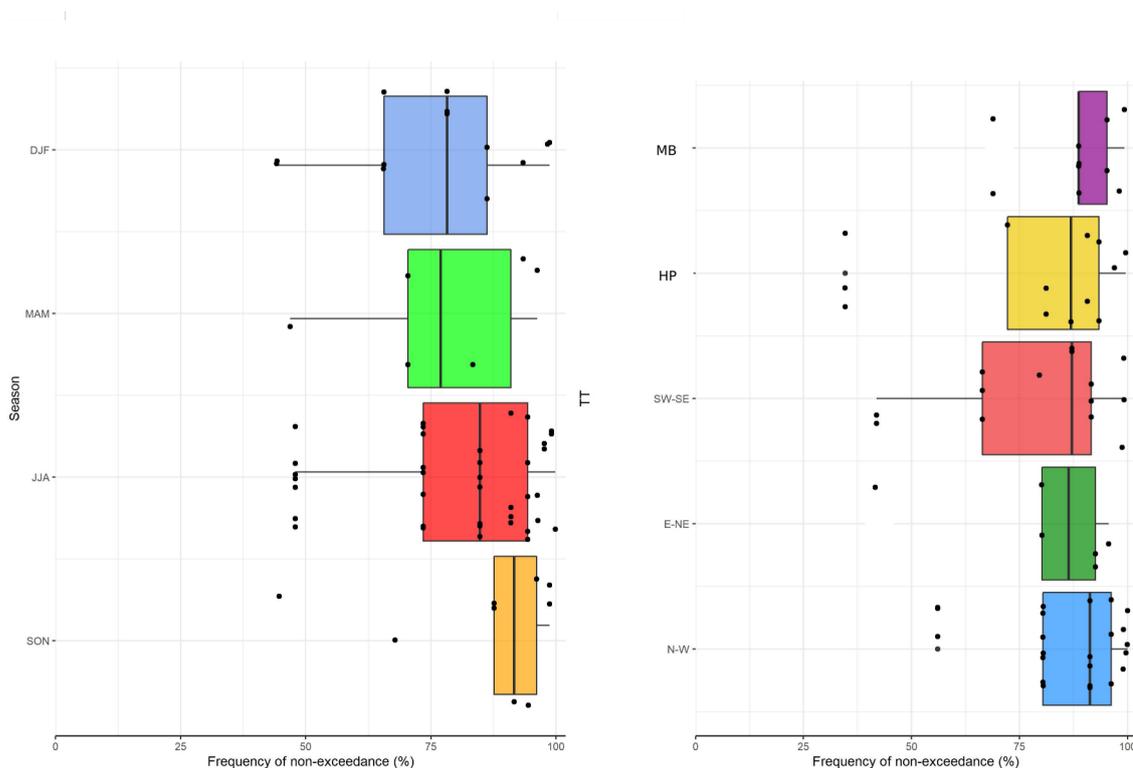


(a) Membre 2

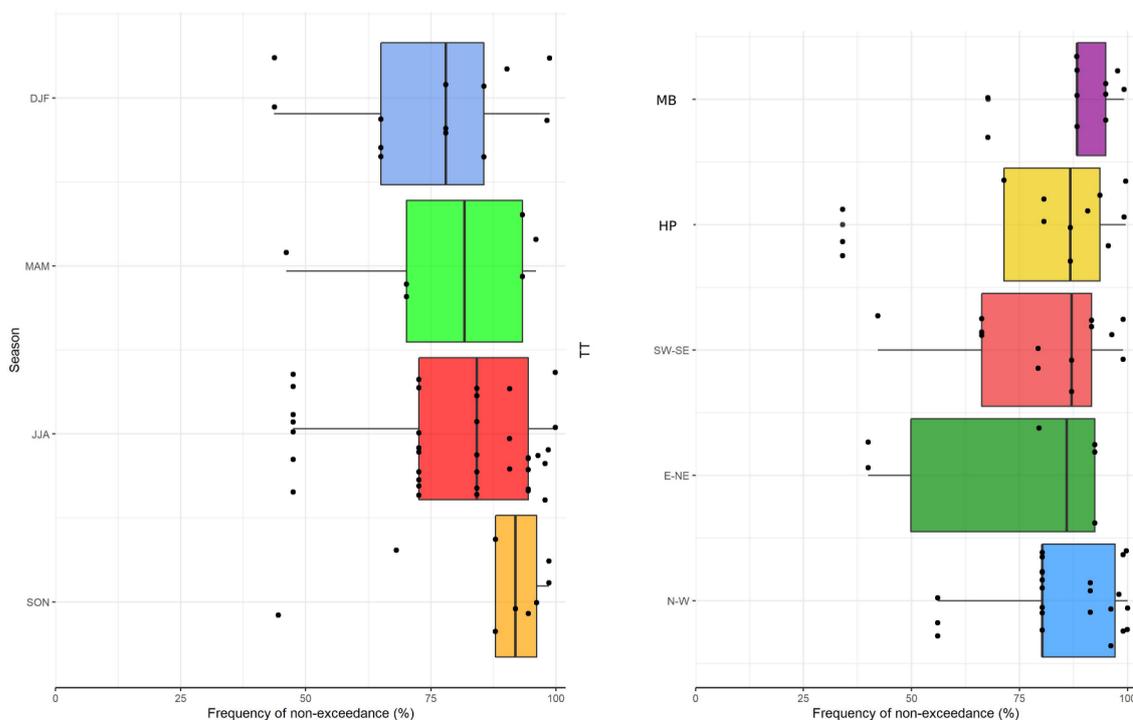


(b) Membre moyen

FIGURE 48 – A gauche : distribution des durées de séquence de TT Lamb dans la climatologie (1851-2014). A droite : saisonnalité de cette durée par TT



(a) Membre 2



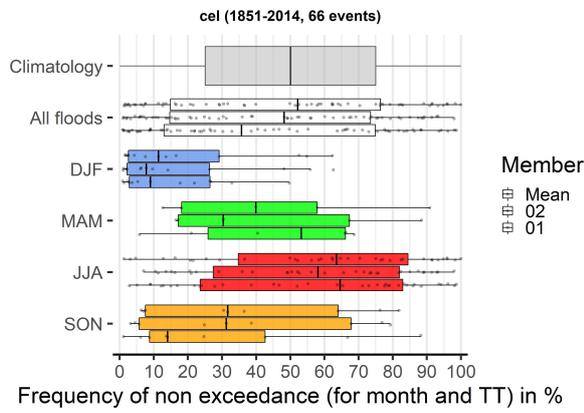
(b) Membre moyen

FIGURE 49 – A gauche : fréquence au non-dépassement saisonnière de la persistance du TT Lamb des dates de référence d'occurrence de crue pour le membre 1 de 20CR (1851-2014). A droite : identique mais pour une fréquence au non-dépassement par TT

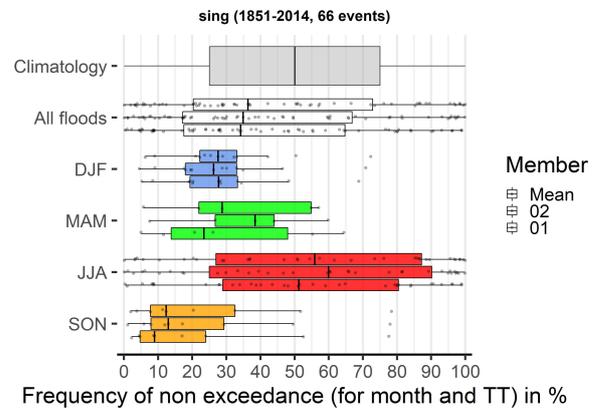
B Performances des indicateurs hydrométéorologiques

	sc	sc_dif	scNW	scNW_dif	scENE	scENE_dif	scSWSE	scSWSE_dif	scSP	scSP_dif	scNB	scNB_dif
cel	0.03	0.05	0.25	0.09	0.25	0.25	0.21	0.12	0.04	0.07	0.29	0.17
celnel	0.02	NA	0	NA	0.55	NA	0.23	0.05	0.43	NA	0.26	0.12
siing	0.07	0	0.15	0.02	0.76	0.17	0.21	0.22	0.33	0.05	0.22	0.04
siingnel	0.05	NA	0.1	NA	0.68	NA	0.13	0.35	0.35	NA	0.24	NA
rsing	0.08	NA	0.3	NA	0.18	NA	0.25	NA	0.23	NA	0.11	NA
rsingnel	0.11	NA	0.29	NA	0.17	NA	0.28	NA	0.44	NA	0.2	NA
MFD	0.1	0.02	0.23	0.02	0.61	0.11	0.22	0.21	0.32	0.2	0.18	0.07
cape_avg_20x	0.28	0.08	0.24	0.14	0.74	0.13	0.57	0.06	0.5	0.03	0.08	0.07
cape_max_20x	0.3	0.1	0.25	0.08	0.66	0.07	0.53	0.09	0.47	0.1	0.09	0.13
cape_min_20x	0.24	0.01	0.2	0.1	0.74	0.15	0.46	0	0.53	0.24	0.05	0.03
lvt_avg	0.16	0.07	0.37	0.08	0.09	0.03	0.2	0.21	0.59	0.09	0.2	0.05
lvt_avg_20x	0.28	0.05	0.51	0.06	0.48	0.02	0.35	0.25	0.59	0.06	0.12	0.2
lvt_max_20x	0.28	0.04	0.47	0.08	0.48	0.1	0.31	0.66	0.66	0.12	0.09	0.1
lvt_min_20x	0.25	0.06	0.53	0.06	0.29	0.43	0.36	0.27	0.6	0.08	0.12	0.21
lvt_q95	0.12	0.04	0.41	0.11	0.09	0.05	0.24	0.16	0.27	0.2	0.23	0.18
pwat_avg	0.16	0.06	0.29	0.06	0.59	0.23	0.16	0.11	0.13	0.11	0.09	0.12
pwat_avg_20x	0.32	0.08	0.47	0.08	0.65	0.1	0.2	0.12	0.55	0.17	0.05	0.12
pwat_max_20x	0.28	0.09	0.46	0.1	0.56	0.08	0.19	0.14	0.46	0.07	0.04	0.04
pwat_min_20x	0.31	0.06	0.5	0.04	0.72	0.08	0.2	0.17	0.53	0.16	0.07	0.1
pwat_q95	0.13	0.03	0.36	0.07	0.36	0.24	0.18	0.13	0.14	0.15	0.09	0.13
q700_avg	0.14	0.09	0.32	0.01	0.59	0.08	0.19	0.13	0.11	0.08	0.07	0.13
q700_avg_20x	0.29	0.04	0.48	0.19	0.6	0.2	0.23	0.14	0.51	0.11	0.07	0.04
q700_max_20x	0.29	0.06	0.46	0.19	0.59	0.25	0.21	0.2	0.48	0.22	0.06	0.09
q700_min_20x	0.31	0.04	0.49	0.09	0.63	0.14	0.19	0.09	0.3	0.06	0.05	0.06
q700_q95	0.13	0.09	0.31	0.21	0.29	0.16	0.13	0.17	0.08	0.06	0.08	0.06
1850_avg	0.12	0.04	0.21	0.01	0.43	0.11	0.13	0.08	0.07	0.06	0.03	0.06
1850_avg_20x	0.16	0.02	0.26	0.07	0.48	0.15	0.18	0.09	0.17	0.04	0.04	0.05
1850_max_20x	0.17	0.01	0.24	0.06	0.39	0.12	0.22	0.06	0.18	0.02	0.1	0.02
1850_min_20x	0.01	0.01	0.15	0.08	0.3	0.33	0.1	0.04	0.21	0.21	0.12	0.06
1850_MFD	0.14	0	0.27	0.03	0.54	0.09	0.16	0.12	0.15	0.03	0.03	0.01
1850_q5	0.09	0.06	0.11	0.06	0.44	0.21	0.18	0.08	0.08	0.09	0.16	0.11
1850_q95	0.07	0.04	0.08	0.08	0.38	0.06	0.35	0.09	0.09	0.17	0.11	0.06
1850_avg	0.1	0.03	0.22	0.05	0.47	0.08	0.14	0.07	0.04	0.06	0.07	0.06
1850_avg_20x	0.12	0.03	0.21	0.07	0.46	0.25	0.19	0.14	0.08	0.07	0.12	0.14
1850_max_20x	0.11	0.03	0.17	0.08	0.34	0.19	0.19	0.18	0.11	0.07	0.11	0.16
1850_min_20x	0.05	0.09	0.18	0.06	0.51	0.16	0.16	0.18	0.13	0.19	0.17	0.12
1850_MFD	0.14	0.03	0.25	0.03	0.5	0.13	0.15	0.14	0.07	0.07	0.03	0.03
1850_q5	0.08	0.02	0.12	0.04	0.5	0.09	0.16	0.06	0.06	0.07	0.13	0.04
1850_q95	0.09	0.08	0.26	0.1	0.45	0.12	0.21	0.13	0.1	0.16	0.08	0.1
v700_avg	0.06	0.04	0.23	0.04	0.33	0.14	0.2	0.09	0.28	0.05	0.19	0
v700_avg_20x	0.14	0.05	0.31	0.09	0.71	0.11	0.37	0.09	0.44	0.09	0.19	0.03
v700_max_20x	0.17	0.09	0.36	0.2	0.7	0.04	0.32	0.13	0.53	0.04	0.24	0.08
v700_min_20x	0.13	0.04	0.32	0.11	0.69	0.1	0.4	0.11	0.43	0.14	0.02	0.08
v700_q95	0.05	0.05	0.37	0.13	0.13	0.28	0.19	0.06	0.25	0.07	0.19	0.06
v700_MFD	0.06	0.11	0.37	0.09	0.5	0.31	0.22	0.26	0.14	0.08	0.11	0.04
front_MD	0.16	0.09	0.1	0.07	0.39	0.2	0.08	0.07	0.11	0.12	0.18	0.08

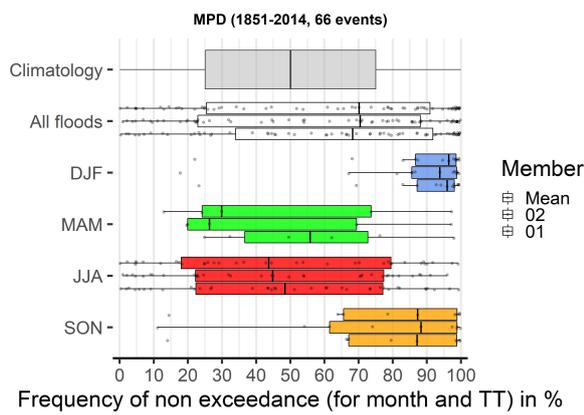
FIGURE 50 – Valeurs du SPD (sc) moyenné sur les 3 membres 20CR (en rouge) et de l'écart maximal de SPD (sc_dif) entre les membres (en violet) (1851-2014, 66 évènements). Plus le rouge intense, plus le SPD moyen est fort et plus le violet est intense, plus la différence de SPD est importante. Les 2 premières colonnes sont calculées pour l'ensemble des évènements torrentiels et le 8 suivantes uniquement pour les évènements de la saison concernée. Une valeur NA signifie que la disponibilité des données n'a permis le calcul de l'indicateur que pour le membre 1 et donc qu'il est impossible de calculer une différence et que la moyenne est faite sur une seule valeur.



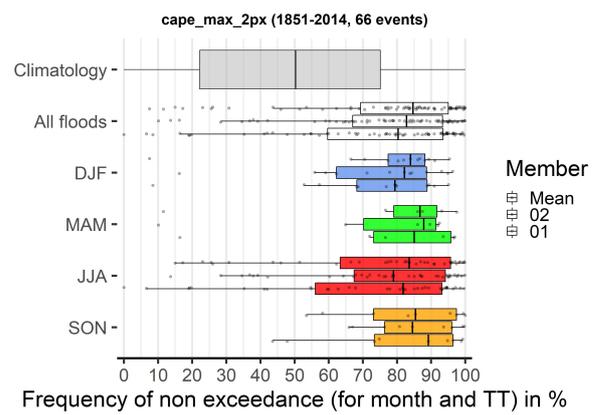
(a)



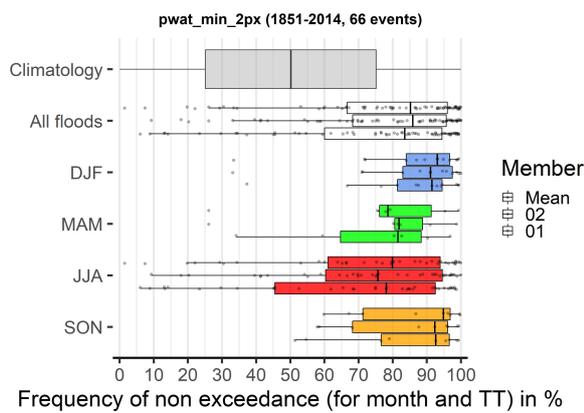
(b)



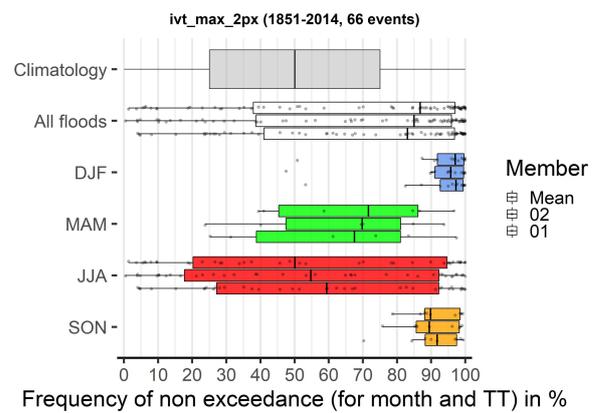
(c)



(d)



(e)



(f)

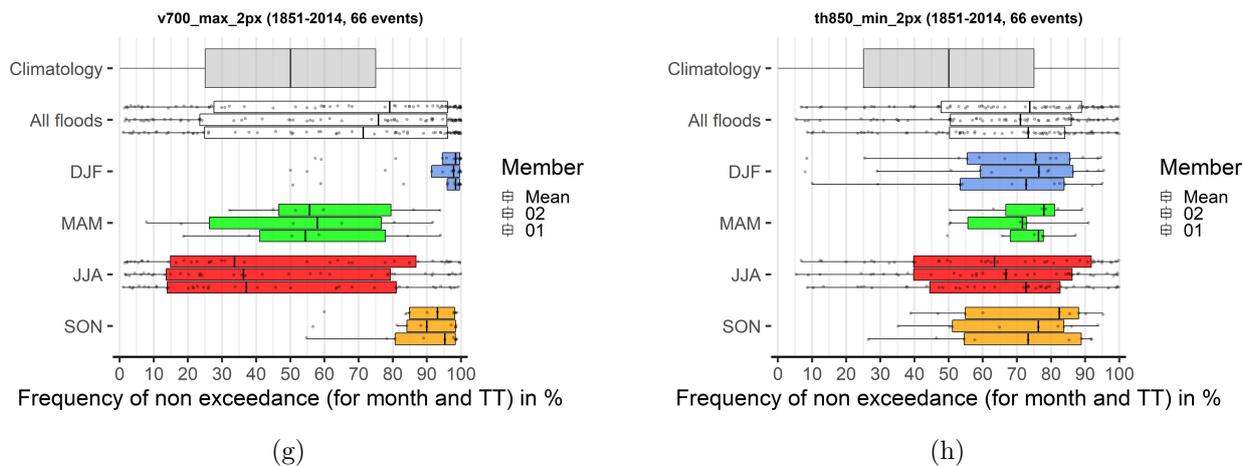
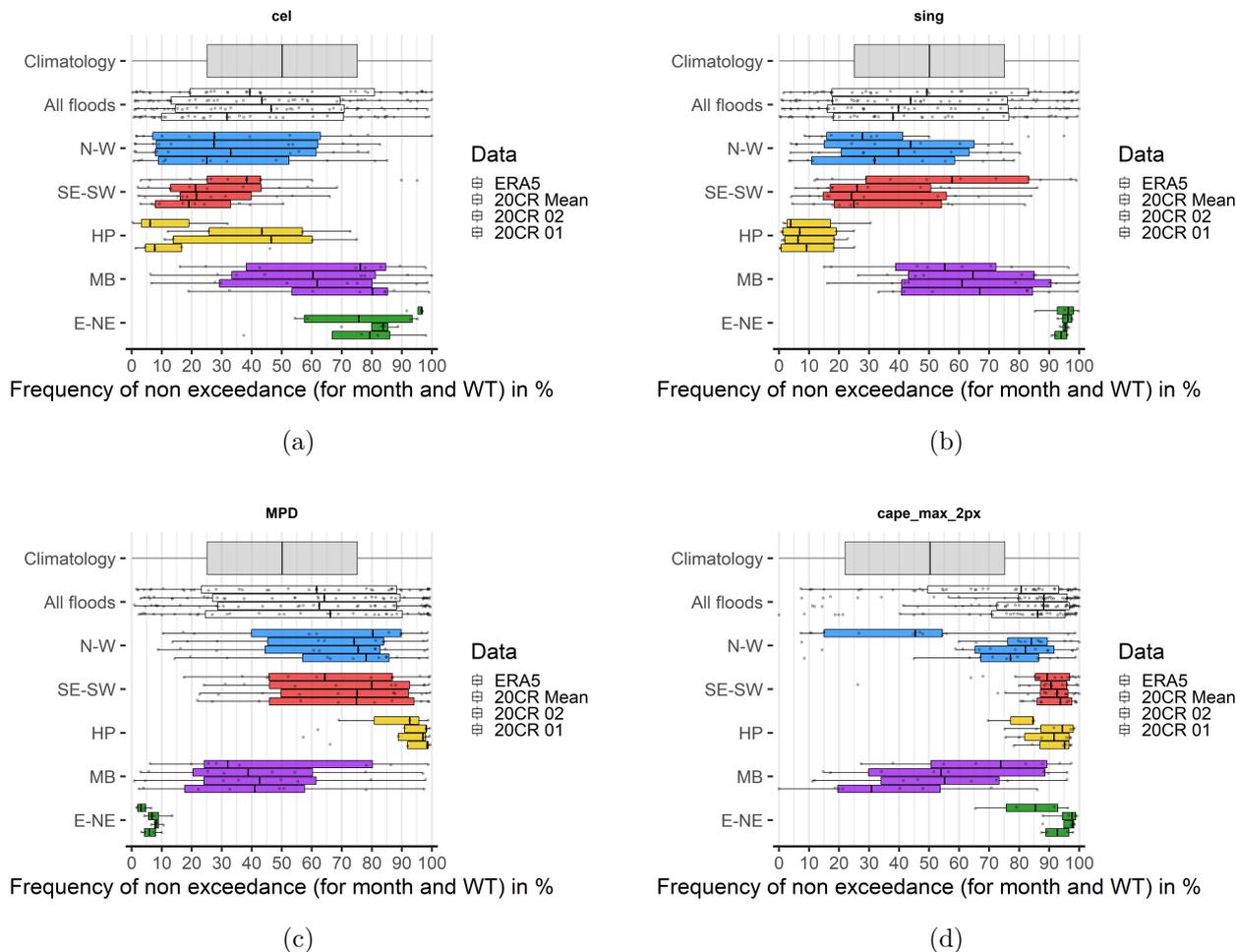


FIGURE 51 – Distribution des valeurs d’indicateurs des séquences d’occurrences de crues (66 évènements, 1851-2014) en fréquence au non dépassement par mois et par TT. De bas en haut : ensembles des dates 1851-2014, ensemble des séquences d’occurrences de crues, puis séquences d’occurrence de crues groupées par chacune de 4 saisons. Dans chaque cas, un diagramme à moustache par membre 20CR (de bas en haut moyen, 2 et 1).



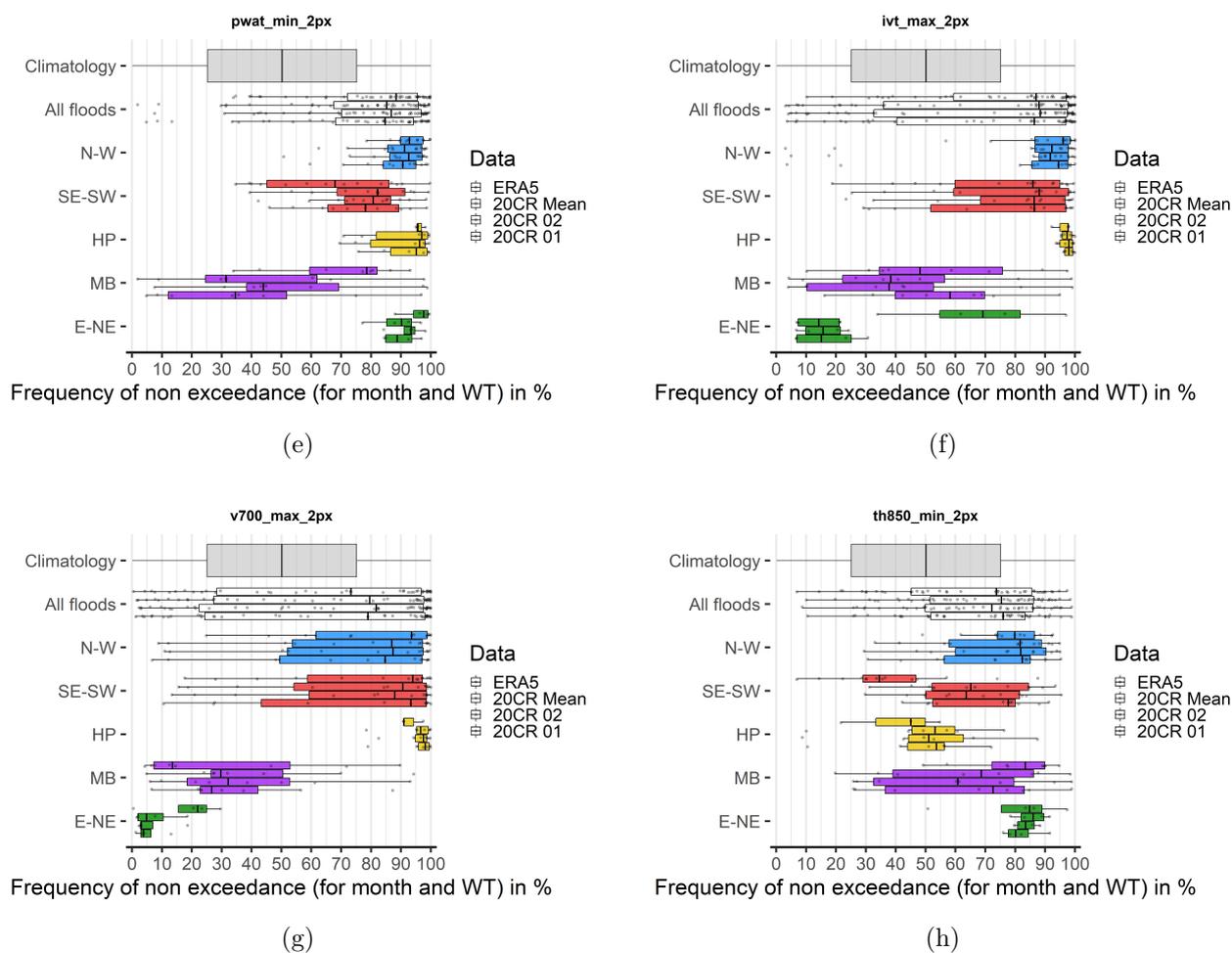


FIGURE 52 – Distribution des valeurs d'indicateurs des séquences d'occurrences de crues (42 évènements, 1950-2014) en fréquence au non dépassement par mois et par TT. De bas en haut : ensembles des dates 1950-2014, ensemble des séquences d'occurrences de crues, puis séquences d'occurrence de crues groupées par chacune de 4 saisons. Dans chaque cas, un diagramme à moustache pour ERA5 et un par membre 20CR (de bas en haut moyen, 2 et 1).