



HAL
open science

Caractérisation et évolution des précipitations extrêmes horaires dans les Alpes françaises

Sebastien Berghald

► **To cite this version:**

Sebastien Berghald. Caractérisation et évolution des précipitations extrêmes horaires dans les Alpes françaises. Géographie. 2024. dumas-04723319

HAL Id: dumas-04723319

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04723319v1>

Submitted on 7 Oct 2024

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

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



Université Grenoble Alpes

Institut de l'Urbanisme et de Géographie Alpine IUGA

CARACTÉRISATION ET ÉVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES HORAIRES DANS LES ALPES FRANÇAISES

Mémoire de Master

Master 2

*Domaines : Sciences Humaines et Sociales – Sciences Technologies Santé
Mention Géographie, Aménagement, Environnement et Développement*

Parcours GEOSPHERES

GEographies - eSPaces - Homme / Environnement - Ressources – Systèmes (en réseau)

Présentée et soutenue par

Sebastian BERGHALD

Le 28 juin 2024

Stage réalisé à :

Agence RTM Alpes du Nord - Service de l'Isère

et

Institut des Géosciences de l'Environnement, Université Grenoble Alpes

Encadrants :

Antoine BLANC - Chef de projet Hydraulique et Risques Émergents - RTM Alpes du Nord, Service de l'Isère

Juliette BLANCHET - Chargée de recherche CNRS, UGA

Examineurs :

Sylvain BIGOT - Professeur - UGA

Galatea TERTI - Maître de Conférences - UGA

Établissements partenaires du réseau GEOSPHERES :



Caractérisation et évolution des précipitations extrêmes horaires dans les Alpes françaises

Résumé : En général, le changement climatique global intensifie le cycle hydrologique et augmente le risque d'événements hydrométéorologiques extrêmes, tels que les fortes précipitations et les sécheresses. Cependant, il existe des variations locales et régionales, et cette tendance générale à l'augmentation des extrêmes ne se manifeste pas partout. La topographie et le climat complexe des Alpes françaises rendent la région particulièrement vulnérable aux événements induits par les précipitations, tels que les glissements de terrain et les crues torrentielles. Cette étude vise à analyser les tendances des précipitations extrêmes horaires dans les Alpes françaises en utilisant un réseau dense d'observations météorologiques et en appliquant la théorie des valeurs extrêmes généralisée (GEV). Les résultats montrent que les niveaux de retour sur 50 ans des précipitations horaires extrêmes varient selon les saisons, avec des valeurs plus élevées en été et en automne, particulièrement en septembre dans la vallée du Rhône et le long de la côte méditerranéenne. Les tendances des niveaux de retour sur 20 ans sont principalement positives, avec des augmentations significatives observées en utilisant une approche régionale avec un rayon de 45 km. Des augmentations significatives sont par exemple observées en automne dans les Alpes du Sud et en été dans les massifs internes. En février et mars, des tendances négatives faibles mais significatives sont observées dans la partie nord-est de la région.

Mots clés : Changement climatique, précipitations horaires extrêmes, GEV, Alpes françaises, niveaux de retour, tendances

Characterisation and trends of hourly rainfall extremes in the French Alps

Abstract : Global climate change generally intensifies the hydrological cycle and increases the risk of extreme hydrometeorological events, such as heavy precipitation and droughts. However, there are local and regional differences and this general trend towards more extremes cannot be found everywhere. The complex topography and climate of the French Alps make the region particularly vulnerable to precipitation-induced events like landslides and flash floods. This study aims to analyze trends in hourly extreme precipitation in the French Alps using a dense network of meteorological observations and applying Generalized Extreme Value (GEV) theory. Results show that 50-year return levels for extreme hourly precipitation vary seasonally, with higher values in summer and autumn, particularly in September in the Rhône Valley and along the Mediterranean coast. Trends in 20-year return levels are mostly

positive, with significant increases observed using a regional approach with a 45 km radius. Significant increases are for example found in autumn in the southern Alps and in summer in the inner parts of the French Alps. In February and March, weak but significant negative trends are observed in the northeastern part of the region.

Keywords : Climate change, hourly precipitation extremes, GEV, French Alps, return levels, trends

Remerciements

Un mémoire de master ne s'écrit pas seul. C'est pourquoi je tiens tout d'abord à remercier Juliette Blanchet (IGE) et Antoine Blanc (RTM), pour leur excellent encadrement, ainsi que le jury, outre Juliette, mon tuteur pédagogique Sylvain Bigot (IGE) et Galateia Terti (IGE). Je tiens également à remercier les membres du Comité de Pilotage, Pierre Verry (Chef de Service, RTM), David Penot (EDF-DTG) et Denis Roy (Météo France) pour leur temps et leurs idées. David mérite des remerciements supplémentaires pour l'accès aux données d'EDF-DTG. Je tiens également à remercier Etienne Leblois (INRAE) et Charles Obled (IGE) pour leurs idées et leur soutien. C'est grâce à Etienne Leblois que j'ai eu accès à des données anciennes (et donc précieuses).

Ce mémoire de master marque également la fin de six années d'études. Je tiens à remercier ici tous les professeurs des différentes universités qui ont partagé avec moi leur savoir et leur passion pour leur domaine et qui m'ont ouvert tant de possibilités. Et bien sûr, tous mes camarades d'études et amis pour les phases d'examen que nous avons traversées ensemble et les bons moments passés avant et après. Enfin, mes plus grands remerciements vont évidemment à mes parents, ma sœur et bien sûr ma copine pour leur soutien inconditionnel. Vous êtes tous formidables.

Avant-propos

Ce mémoire est basé sur le travail effectué dans le cadre d'un stage de cinq mois, du 4 mars au 31 juillet 2024. Ce stage, intitulé "Caractérisation et évolution des précipitations extrêmes horaires dans les Alpes françaises," est financé par l'Office National des Forêts - Agence RTM Alpes du Nord et co-encadré par l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), équipe "HydroMétéorologie, Climat et Interactions avec les Sociétés" (HMCIS). Une courte description de ces deux établissements, tirée de la description du stage, est insérée ci-dessous :

ONF-RTM

"Acteur majeur de la filière forêt-bois, l'Office national des forêts (ONF) rassemble plus de 9 000 professionnels. L'ONF gère près de 11 millions d'hectares de forêts publiques appartenant à l'État et aux collectivités territoriales.

L'Agence Restauration des Terrains de Montagnes Alpes-du-Nord regroupe 39 personnes techniques dans 3 départements avec de nombreux échanges, une structure territoriale en services départementaux et une structure d'équipes spécialisées, les pôles expertises. Les personnels techniques du RTM bénéficient de l'appui des équipes de soutien de l'ONF (RH, compta, SIG, informatique...).

La mission principale de l'agence RTM Alpes du Nord est la prévention des risques naturels en montagne, sous forme de missions d'intérêt général (MIG) pour le compte des deux ministères de tutelles de l'ONF (MASA et MTECT) et d'actions complémentaires dans le champ concurrentiel, principalement pour les collectivités.

Les principaux domaines d'activités sont : l'ingénierie-travaux, les études et les expertises liées aux risques naturels, la connaissance et l'affichage des risques naturels et le conseil aux préfetures/services de l'Etat et aux collectivités territoriales."

IGE

"L'IGE est un laboratoire de recherche basé sur le campus de Saint-Martin-d'Hères. Les thématiques de recherche sont les géosciences au sens large (hydrométéorologie, hydrologie, climat, chimie atmosphérique, chimie des sols, glaciologie. . .).

L'équipe HMCIS s'intéresse plus particulièrement aux extrêmes hydrométéorologiques (sciences physiques) et à leur impact sur la société (sciences sociales), aux ressources renouvelables. Les régions d'étude vont des Alpes européennes à l'Afrique de l'Ouest."

Table des Matières

1	Introduction	13
1.1	Problématique	14
1.2	Hypothèses	15
1.3	Objectifs	15
1.4	Méthodologie	15
1.5	Résultats	16
1.6	Plan du mémoire	16
2	Données, méthodologie et résultats	17
2.1	État de l'art	18
2.1.1	La relation de Clausius-Clapeyron	18
2.1.2	Travaux sur les périodes de retour dans les Alpes françaises	19
2.1.3	Autres travaux dans les Alpes européennes	21
2.2	Terrain de l'étude et données	24
2.2.1	Terrain de l'étude	24
2.2.2	Données pluviométriques horaires dans les Alpes françaises	28
2.3	Démarche méthodologique	33
2.3.1	Calcul des maxima saisonniers et annuels	33
2.3.2	Théorie des valeurs extrêmes	33
2.3.3	Estimation des paramètres	36
2.4	Résultats	38
2.4.1	Niveaux de retour dans un climat stationnaire	38
2.4.2	Les tendances	40
2.4.3	Influence du rayon choisi	42
2.5	Analyse des résultats	43
2.5.1	Relation température-intensité	43
2.5.2	Les motifs à grande échelle	43
3	Discussion et conclusion	53
3.1	Estimation des niveaux de retour stationnaire	54
3.2	Estimation des tendances	54
3.3	Résumé et perspectives	55
	Références	57

A Annexes	61
A.1 Information supplémentaire sur des observations de précipitation disponible dans la région	62
A.1.1 Quelques points généraux sur les stations de Météo France et d'EDF	62
A.1.2 Sources de données non utilisées	63
A.1.3 Saisonalité des paramètres de la GEV (en stationnaire)	64
A.1.4 Approche régionalisée : résultats avec des rayons différentes	66
A.2 Métadonnées	67

Table des Figures

2.1	Résumé des connaissances actuelles sur les changements observés dans la fréquence et/ou l'intensité des extrêmes pluviométriques infra-quotidiens. Pour chaque étude, l'échelle spatiale, la direction prédominante du changement et la méthodologie utilisée sont indiquées. La direction du changement comprend des analyses de différentes saisons, périodes d'analyse et mesures des extrêmes. Les grands symboles sur la carte indiquent les zones où une direction prédominante de changement est évidente à partir d'une étude à l'échelle nationale ou d'une majorité d'études régionales. Les indices de référence correspondent aux citations fournies dans le tableau complémentaire 1 de FOWLER, LENDERINK et al. (2021)). Les indices de référence sont codés par couleur pour indiquer si les résultats sont analysés dans le contexte de divers facteurs : température ou échelle de température (Clausius-Clapeyron) (rouge), circulation à grande échelle (bleu) ou urbanisation (gris). Source (figure et légende) : FOWLER, LENDERINK et al. (2021)	20
2.2	Carte des Alpes françaises : topographie, départements, villes & rivières principales. La limite entre Alpes du Nord et du Sud est montrée en jaune (Limite climatique de AUER et al. 2007). Coordonnées en Lambert 93 zone II. Source des données : IGN (MNT), Figure réalisée par S. Berghald.	25
2.3	Les massifs des Alpes, répartition de Météo France. Source des données : Météo France (massifs), IGN (MNT), Figure réalisée par S. Berghald.	26
2.4	Vue d'ensemble du réseau pluviométrique dans les Alpes françaises. La carte indique la source des données symbolisée par des carrés (Météo France) et des triangles (EDF). Un cercle autour du symbole signifie qu'il existe des données « anciennes » supplémentaires pour cette station. La couleur indique le nombre d'années avec des observations complètes, les stations avec moins de 10 ans ne sont pas représentées. La distribution de l'altitude des stations est indiquée en bas à droite. Les stations EDF sont en bleu, les stations Météo France en rouge et en gris (si moins de 25 ans d'observations). Sources des données : Openstreetmap (fond), EDF & Météo France (métadonnées des stations), Figure réalisée par S. Berghald.	28
2.5	Photo de la station Arvieux (no. 05007003, altitude 1825 m, type <i>Mercury</i>). Photo prise le 14 juin 2022. Source : Météo France.	29
2.6	Réseau d'observation et exemple d'une station EDF.	31

2.7	Diagrammes de dispersion montrant les différences des maxima saisonniers d'intensité horaire de précipitation entre les données corrigées par la méthode décrite dans le texte et les données brutes (stations Électricité de France - Direction Technique Générale (EDF-DTG)). Les valeurs manquantes ont été remplacées par -10 pour cette figure. Il est important de noter que le maximum à une station et saison donnée n'est pas forcément issu du même événement dans les données brutes et les données modifiées, si p.ex. un événement à été invalidé par l'algorithme de désagrégation. Figure réalisée par S. Berghald.	32
2.8	Influence des paramètres de la GEV sur la densité de probabilité (à gauche) et sur la relation entre période et niveau de retour (à droite) : Position μ (en haut), échelle σ (centre) et forme ξ (en bas). Les lignes pointillée montrent le niveau de retour de 20 ans pour les différents cas. Valeurs de base : $\mu = 8\text{mm}$, $\sigma = 2\text{mm}$, $\xi = 0$.	34
2.9	Influence d'une tendance dans les paramètres μ et σ pour une série temporelle fictive des maxima annuels. (a) Série temporelle (noir) avec la moyenne des maxima (rouge, en pointillés) et le niveau de retour de 20 ans (rouge, en continu) ; (b) Densité de la GEV pour chaque année entre 1960 (violet) et 2023 (jaune) ; (c) Intensités associées aux périodes de retour.	35
2.10	Le nombre de postes dans le voisinage de chaque poste. Le cercle rouge montre le rayon de 45 km autour d'un poste d'exemple (EDF 2560). Figure réalisée par S. Berghald.	37
2.11	Niveau de retour 50 ans pour chaque mois. Estimation stationnaire locale à partir des données d'EDF et de Météo France (données récentes, 25-42 ans de données). Figure réalisée par S. Berghald.	39
2.12	Niveau de retour 50 ans pour chaque mois. Estimation stationnaire locale à partir des données d'EDF en incluant les données anciennes (30-65 ans de données). Figure réalisée par S. Berghald.	40
2.13	Différence entre 1985 et 2022 normalisé par la valeur de 1985 (%/38 ans). Estimation non-stationnaire locale à partir des données d'EDF incluant les données anciennes (30-65 ans de données). Les tendances linéaires estimées avec un modèle $\mathcal{M}'_{\mu,\sigma}$ sont montrées en couleur. En violet des valeurs en dehors de l'échelle de couleur. Une triangle indique que un des modèles non-stationnaires est significativement mieux que le modèle stationnaire. Figure réalisée par S. Berghald.	46
2.14	Pour deux postes voisins : Maxima du mois d'août, tendance du maximum moyen et du niveau de retour 20 ans estimé à partir d'un modèle $\mathcal{M}'_{\mu,\sigma}$ non-stationnaire (stationnaire avant 1985). Figure réalisée par S. Berghald.	47

2.15	Maxima mensuels et tendances du maximum moyen et du niveau de retour à 20 ans estimé par approche régionale pour trois cas différents. Les valeurs issues de l'approche régionale sont montrées en noir, les observations du poste en rouge. (Toutes les observations du poste ne sont pas prises en compte pour l'estimation de la GEV en raison du <i>declustering</i> . Ce sont des événements qui ont été enregistrés à plusieurs postes dans le voisinage ; seule la valeur maximale est alors conservée.). L'estimation du maximum moyen est montrée en bleu, celle du niveau de retour 20 ans en vert. Figure réalisée par S. Berghald.	48
2.16	Différence entre 1985 et 2022 normalisé par la valeur de 1985 (%/38 ans). Estimation non-stationnaire régionale (rayon 45 km) à partir des données d'EDF incluant les données anciennes (30-65 ans de données). Les tendances linéaires estimées avec un modèle $\mathcal{M}'_{\mu,\sigma}$ sont montrées en couleur. En violet des valeurs en dehors de l'échelle de couleur. Une triangle indique que un des modèles non-stationnaires est significativement mieux que le modèle stationnaire. Figure réalisée par S. Berghald.	49
2.17	Tendances du niveau de retour 20 ans en % / 38 ans pour le mois d'Octobre pour différent rayons. Estimation locale à gauche, puis 25, 35 et 45 km. Figure réalisée par S. Berghald.	50
2.18	Mêmes tendances que sur la Figure 2.16, mais divisées par la tendance de la température moyenne à la station de la Grande-Chartreuse (1,3°C, 2°C, 2,5°C et 2°C respectivement en hiver, au printemps, en été et en automne) et représentées comme des multiples de la relation de Clausius-Clapeyron de 7%/°C. Les tendances négatives sont indiquées en orange. Figure réalisée par S. Berghald.	51
2.19	Tendances relatives des maxima saisonniers de précipitations quotidiennes selon BLANCHET, BLANC et CREUTIN (2021) : changement sur la période 1958-2017 normalisé par la valeur moyenne sur la période (%/60 ans). Première ligne : maximum annuel moyen. Deuxième ligne : niveau de retour de 20 ans. Les estimations sont obtenues avec une approche régionalisée. À chaque point de grille, le meilleur modèle non stationnaire est considéré. Les changements relatifs sont calculés par rapport aux valeurs moyennes sur la période d'étude. Troisième et quatrième ligne : pareil que ci-dessus, en masquant les points de grille non significatifs. Pour plus de détails, voir : BLANCHET, BLANC et CREUTIN (2021) (source de la figure).	52
A.1	Diagrammes en boîte des paramètres de la GEV stationnaire (cf Fig. 2.11) μ (à gauche), σ (au centre) et ξ (à droite). Première ligne : toutes les stations au nord de 45°N ; deuxième ligne : toutes les stations au sud de 45°N ; troisième ligne : l'ensemble de la région.	65

A.2	Tendances du niveau de retour 20 ans en % / 10 ans. Estimation non-stationnaire régionale (rayon 25 km) à partir des données d'EDF incluant les données anciennes (30-65 ans de données)	66
A.3	Tendances du niveau de retour 20 ans en % / 10 ans. Estimation non-stationnaire régionale (rayon 35 km) à partir des données d'EDF incluant les données anciennes (30-65 ans de données)	67

Liste des Abréviations

- EDF-DTG** – Électricité de France - Direction Technique Générale.
- GIEC** – Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat / IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IGE** – Institut des Géosciences de l'Environnement.
- INRAE** – Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.
- IUGA** – Institut d'urbanisme et de géographie alpine.
- ONF** – Office National des Forêts.
- RTM** – Service Restauration des Terrains de Montagnes.
- UGA** – Université Grenoble Alpes.

1

Introduction

Sommaire

1.1	Problématique	14
1.2	Hypothèses	15
1.3	Objectifs	15
1.4	Méthodologie	15
1.5	Résultats	16
1.6	Plan du mémoire	16

1.1 Problématique

Le changement climatique entraîne un réchauffement de l'atmosphère, plus marqué sur les continents que sur les océans. Le réchauffement atteint désormais 1.2°C à l'échelle globale, 1.7°C en France métropolitaine, et 2°C dans les Alpes françaises depuis l'ère préindustrielle. La conséquence directe de ce réchauffement est une modification profonde de la circulation atmosphérique globale et donc de l'ensemble du système climatique (IPCC 2023). L'un des principaux signes de ce changement à l'échelle globale est l'intensification du cycle de l'eau et une augmentation des extrêmes hydrométéorologiques, tels que les précipitations extrêmes et les sécheresses. On entend ici par *extrêmes* des événements qui arrivent rarement, avec des niveaux de retour associés de 20 ans ou plus¹. Toutefois, si des tendances générales sont incontestées dans la littérature scientifique et déjà observées sur l'ensemble de la planète, les tendances exactes aux niveaux local et régional sont encore difficiles à mesurer et encore plus difficiles à prévoir.

Les Alpes françaises se caractérisent par une topographie complexe, qui influence les régimes de précipitations et les risques associés de différentes manières : Premièrement, le relief local induit une forte variabilité spatiale des précipitations. Deuxièmement, les pentes abruptes, notamment lorsqu'elles sont combinées avec des sols instables sujets à l'érosion, sont plus exposées aux glissements de terrain et aux crues soudaines. Ces événements peuvent avoir des conséquences importantes (voir catastrophiques) lorsqu'ils touchent des habitations, des routes ou des infrastructures économiques et touristiques. De nombreux acteurs travaillent sur la prévention des risques naturels en montagne pour caractériser les phénomènes naturels afin de traduire ces connaissances en stratégie de prévention (affichage du risque) ou de protection (ouvrages). Ce mémoire s'intègre aux travaux des services Service Restauration des Terrains de Montagnes (RTM), qui sont les référents techniques de l'Etat sur les risques naturels en montagne.

Beaucoup de ces acteurs ont l'impression qu'une intensification des précipitations de courte durée mais de forte intensité est en cours dans les Alpes françaises, provoquant des glissements de terrain et des inondations là où aucune ou peu d'activité de ce type n'a été observée auparavant. À notre connaissance, aucune étude n'a analysé les tendances des précipitations extrêmes infra-journalières dans la région, ce qui est en grande partie dû à une profondeur temporelle des données jusqu'alors limitée. Ce n'est que maintenant que les séries d'observations commencent à être suffisamment longues pour tenter une

1. Dans la littérature, on voit souvent le terme *extrêmes* pour désigner le quantile p99, qui est dépassé trois à quatre fois par an.

analyse des tendances des précipitations extrêmes à un pas de temps horaire, ce qui est l'objectif principal de ce mémoire.

1.2 Hypothèses

Des considérations thermodynamiques simples mènent à l'hypothèse que les cumuls et les intensités des précipitations devraient augmenter avec la hausse des températures. En effet, une atmosphère plus chaude peut contenir plus de vapeur d'eau ($7\%/^{\circ}\text{C}$, relation de Clausius-Clapeyron), ce qui devrait se traduire par des quantités de précipitations plus importantes. Cependant, de nombreux autres facteurs comme des changements de la circulation et des influences météorologiques principales doivent être pris en compte, et cette augmentation théorique n'est donc pas nécessairement observée dans toutes les régions et à tous les pas de temps. Dans les Alpes françaises, BLANCHET, BLANC et CREUTIN (2021) ont montré des augmentations marquées de précipitations extrêmes à l'échelle journalière dans les Alpes du Sud, en automne. Les autres régions (Alpes du Nord) et les autres saisons ne sont pas nécessairement associées à une intensification des extrêmes au rythme de la relation de Clausius-Clapeyron.

À des pas de temps plus fins, comme à pas de temps horaire, on s'attend néanmoins à observer des tendances sur les extrêmes plus proches des théoriques $7\%/^{\circ}\text{C}$. En cause, des maxima plus largement associés à des orages locaux, notamment au printemps et en été, pour lesquels la circulation atmosphérique de grande échelle joue moins.

1.3 Objectifs

L'objectif de ce mémoire est donc de répondre aux questions suivantes : Observe-t-on des tendances significatives dans les caractéristiques des extrêmes de précipitations horaires dans les Alpes françaises ? Si oui, ces tendances sont-elles cohérentes avec les tendances des extrêmes au pas de temps journalier ?

1.4 Méthodologie

J'applique ici une approche statistique, la théorie des valeurs extrêmes généralisées, basée sur les maxima par bloc (par exemple les maxima annuels) afin de caractériser les modèles et les tendances générales des précipitations extrêmes à un pas de temps horaire. Cette analyse est basée sur des données d'observation : un réseau dense d'observations météorologiques à pas de temps horaire a été mis en place dans la région depuis les années 1990, exploité par Météo France et EDF. Les observations de Météo France ont récemment été rendues publiques en ligne, et EDF a mis ses observations à disposition pour les besoins de ce stage (signature d'une convention EDF/ONF-RTM). En outre, un ensemble de données contenant les maxima hebdomadaires de précipitations, numérisées à partir d'anciennes observations

continues utilisant des pluviographes mécaniques, a été trouvé dans les archives, ajoutant jusqu'à 25 ans d'observations pour plusieurs des stations, de sorte que la série chronologique la plus longue contient environ 65 ans de mesures continues. Avec environ 160 stations ayant plus de 25 ans d'observation (environ 70 stations ayant plus de 30 ans), nous disposons donc d'un ensemble de données suffisamment important pour obtenir des estimations des périodes de retour et des tendances des extrêmes de précipitations horaires dans les Alpes françaises.

1.5 Résultats

Les niveaux de retour stationnaire de 50 ans pour les précipitations horaires extrêmes varient saisonnièrement, avec des valeurs plus élevées en été et en automne, particulièrement en septembre dans la vallée du Rhône et sur la côte méditerranéenne. Les tendances des niveaux de retour de 20 ans montrent plus de stations avec des augmentations qu'avec des diminutions, bien que les estimations locales soient bruitées. En utilisant une approche régionale avec un rayon de 45 km, les tendances sont plus claires et majoritairement comprises entre -30 et +30 % pendant la période 1985-2022, avec des exceptions notables en juin et novembre où elles atteignent +50 - +80 % et plus. Entre mai et août, une augmentation des précipitations peut être observée, notamment dans les massifs internes. En automne, ce sont surtout les Alpes du Sud qui connaissent des tendances à la hausse. En revanche, en hiver, une diminution des précipitations est observée surtout dans les Alpes du Nord.

1.6 Plan du mémoire

Je commence par une description de la région des Alpes françaises, en détaillant ses limites géographiques, sa topographie, ainsi que l'impact du changement climatique actuel. Ensuite, je présente les données utilisées pour ce travail, suivies d'une revue de l'état de l'art sur les précipitations extrêmes et leurs tendances dans les Alpes. La démarche méthodologique est ensuite précisée, avec une introduction à la théorie des valeurs extrêmes (GEV). Dans la section des résultats, je montre les estimations des niveaux de retour en climat stationnaire ainsi que les tendances détectées. Enfin, j'analyse mes résultats et je les compare avec les tendances journalières par BLANCHET, BLANC et CREUTIN (2021)). Le mémoire se termine par une conclusion qui résume les principaux points et les implications de l'étude.

2

Données, méthodologie et résultats

Sommaire

2.1	État de l'art	18
2.1.1	La relation de Clausius-Clapeyron	18
2.1.2	Travaux sur les périodes de retour dans les Alpes françaises	19
2.1.3	Autres travaux dans les Alpes européennes	21
2.2	Terrain de l'étude et données	24
2.2.1	Terrain de l'étude	24
2.2.2	Données pluviométriques horaires dans les Alpes françaises	28
2.3	Démarche méthodologique	33
2.3.1	Calcul des maxima saisonniers et annuels	33
2.3.2	Théorie des valeurs extrêmes	33
2.3.3	Estimation des paramètres	36
2.4	Résultats	38
2.4.1	Niveaux de retour dans un climat stationnaire	38
2.4.2	Les tendances	40
2.4.3	Influence du rayon choisi	42
2.5	Analyse des résultats	43
2.5.1	Relation température-intensité	43
2.5.2	Les motifs à grande échelle	43

2.1 État de l'art

Je commence cette section par une réflexion théorique sur la réponse de l'intensité des précipitations face à un changement de température. Ensuite, quelques résultats d'une revue de la littérature réalisée par FOWLER, LENDERINK et al. (2021) sont exposés pour donner un aperçu des découvertes effectuées ailleurs. La deuxième partie traite des travaux menés sur la région des Alpes françaises concernant les précipitations extrêmes à différentes échelles temporelles. Enfin, diverses études effectuées dans d'autres parties des Alpes sur les changements de précipitations sont présentées de manière générale.

2.1.1 La relation de Clausius-Clapeyron

Une loi physique particulièrement importante dans notre contexte est la relation de Clausius-Clapeyron. Elle caractérise la courbe de transition de phase d'une matière et est définie comme suit (MARTINKOVA et KYSELY 2020) :

$$\frac{dP}{dT_K} = \frac{L}{T_K \Delta v} = \frac{\Delta s}{\Delta v} \quad (2.1)$$

où :

- P est la pression,
- T_K est la température (en Kelvin),
- L est la chaleur latente,
- Δs est le changement d'entropie spécifique,
- Δv est le changement de volume spécifique.

On peut en déduire une équation pour trouver le contenu en vapeur d'eau maximale de l'atmosphère :

$$\frac{\delta e_s}{\delta T_K} = \frac{L_v e_s}{R_v T_K^2} \quad (2.2)$$

où :

- e_s est la pression de vapeur saturante de l'eau,
- L_v est la chaleur latente de vaporisation,
- R_v est la constante des gaz parfaits pour la vapeur d'eau.

Une version empirique simplifiée de l'équation 2.2, la formule de Magnus, donne directement la pression de vapeur d'eau saturante au-dessus des surfaces d'eau liquide en fonction de la température :

$$e_s = 6.1094 \exp\left(\frac{17.625T}{T + 243.04}\right) \quad (2.3)$$

On obtient ainsi une augmentation théorique de la capacité de l'atmosphère à contenir de la vapeur d'eau d'environ 7% par augmentation de température de 1 °C. Pour générer des

nuages et des précipitations, l'air doit être (sur-)saturé. On fait donc souvent l'hypothèse que la relation de Clausius-Clapeyron s'applique, au premier ordre, également aux précipitations extrêmes. Ainsi, on trouve fréquemment dans la littérature le terme *CC-scaling*, qui correspond à l'hypothèse d'une augmentation des précipitations extrêmes de l'ordre de 7%/°C.

Tendances globales des précipitations extrêmes Dans une revue de littérature, FOWLER, LENDERINK et al. (2021) donnent une vue d'ensemble d'études effectuées au sujet des changements des précipitations extrêmes de courte durée (1-3 heures). La figure 2.1, tirée de cette publication, présente une vue d'ensemble des études analysées par les auteurs. En général, une intensification de ces événements de courte durée peut être observée dans le monde entier. Si cette intensification est généralement autour des 7% par 1 °C attendu par la relation de Clausius-Clapeyron, des relations de 2 à 3 fois CC sont aussi observées localement. Les tendances "super-CC" pourraient être expliquées par des processus menant à une intensification de la dynamique des nuages convectifs ou un changement dans le rail des précipitations, mais plus de recherche est nécessaire sur ce sujet (FOWLER, LENDERINK et al. (2021), voir aussi LORIAUX et al. (2013)). Dans ce contexte il faut noter que les zones tropicales ont été peu étudiées, notamment parce qu'il existent peu d'observations de longue durée dans ces zones (ex. PAPALEXIOU et MONTANARI 2019).

2.1.2 Travaux sur les périodes de retour dans les Alpes françaises

Au regard de l'importance d'une bonne estimation des niveaux de retour des précipitations extrêmes à tous les pas de temps pour le dimensionnement des barrages et des aménagements de protection contre les crues, de nombreuses études ont été menées sur cette question dans la région des Alpes françaises. Voici quelques-unes de ces études : GRARD et DUBAND (1969) ont adapté la méthode du GRADEX¹ pour l'évaluation des risques de fortes précipitations dans la région des Alpes. À l'époque, seules des observations journalières étaient disponibles. Dans les années 1990, la numérisation des observations continues (notamment d'EDF) a donné accès à 30-40 ans de données pour une soixantaine de postes, ce qui a permis de caractériser les pluies extrêmes aussi à des pas de temps infra-journaliers. Cette possibilité a notamment été exploitée par une série de thèses (SAIDI-BOUODINA 1996 ; KIEFFER-WEISSE 1998 ; DJERBOUA 2001). SAIDI-BOUODINA (1996) a notamment étudié l'influence de la géographie et du relief sur les précipitations extrêmes. Par exemple, elle a trouvé que l'influence de l'altitude diminue plus le pas de temps étudié est court, ce qui est aussi mis en avant dans d'autres études. Ensuite, KIEFFER-WEISSE (1998) a travaillé davantage sur l'interpolation des estimations des périodes de retour aux endroits non jaugés pour obtenir des cartes continues, et DJERBOUA (2001) a développé des méthodes pour améliorer la prévision des précipitations extrêmes².

1. Développée par EDF dans les années 1960 pour l'estimation des débits maximaux. Le GRADEX correspond au paramètre d'échelle σ de la distribution de Gumbel.

2. Les estimations des niveaux de retour de DJERBOUA (2001) ont couramment été utilisées par le RTM pour la caractérisation de l'aléa torrentiel, jusque récemment.

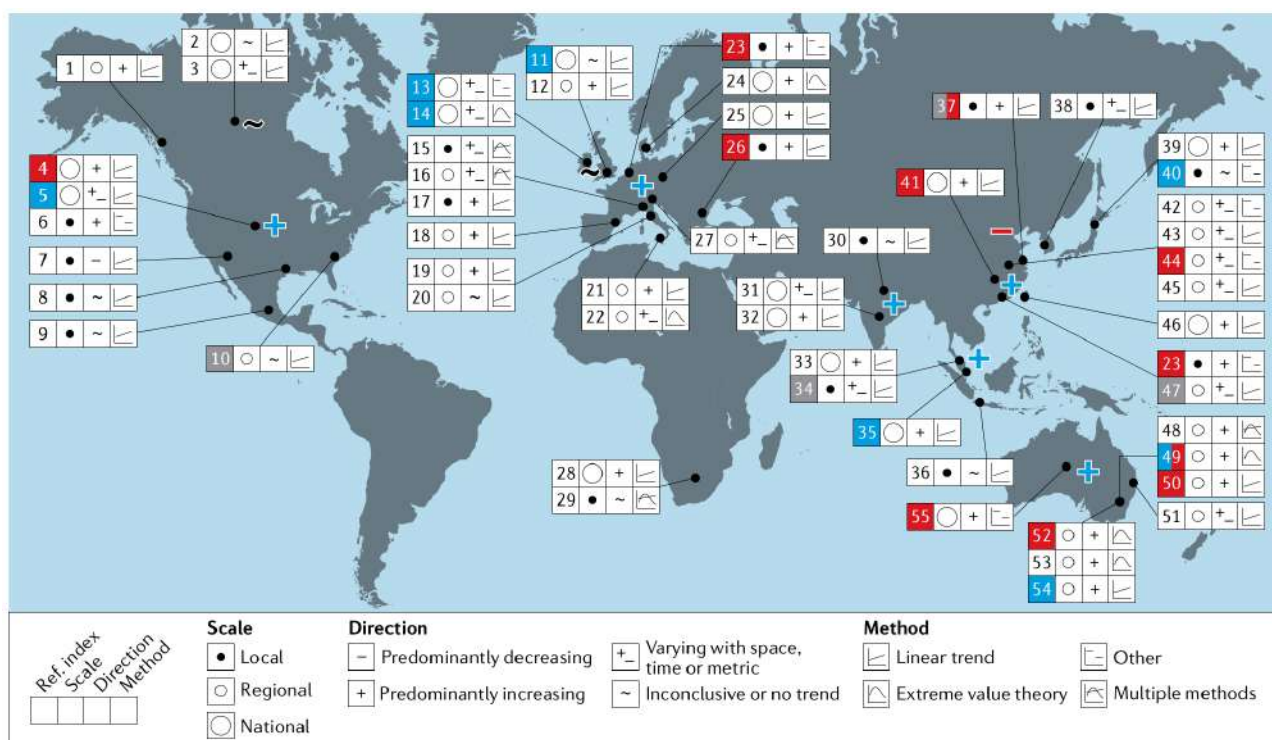


FIGURE 2.1 – Résumé des connaissances actuelles sur les changements observés dans la fréquence et/ou l'intensité des extrêmes pluviométriques infra-quotidiens. Pour chaque étude, l'échelle spatiale, la direction prédominante du changement et la méthodologie utilisée sont indiquées. La direction du changement comprend des analyses de différentes saisons, périodes d'analyse et mesures des extrêmes. Les grands symboles sur la carte indiquent les zones où une direction prédominante de changement est évidente à partir d'une étude à l'échelle nationale ou d'une majorité d'études régionales. Les indices de référence correspondent aux citations fournies dans le tableau complémentaire 1 de FOWLER, LENDERINK et al. (2021)). Les indices de référence sont codés par couleur pour indiquer si les résultats sont analysés dans le contexte de divers facteurs : température ou échelle de température (Clausius-Clapeyron) (rouge), circulation à grande échelle (bleu) ou urbanisation (gris). Source (figure et légende) : FOWLER, LENDERINK et al. (2021)

Ces dernières années, plusieurs études ont tenté de voir comment évoluent les précipitations fortes et extrêmes dans un contexte de changement climatique. Comme décrit dans la méthodologie de ce mémoire, il est possible d'adapter les méthodes de la théorie des valeurs extrêmes pour étudier des effets non stationnaires. Malheureusement, il est difficile d'obtenir des résultats robustes avec des séries temporelles assez courtes. Cela explique le manque d'études pour les pas de temps infra-journaliers. Pour les extrêmes journaliers, où des séries beaucoup plus longues sont disponibles, BLANCHET et CREUTIN (2022) ont montré qu'il fallait attendre les années 2000 pour voir apparaître des tendances significatives dans les observations dans le sud de la France. Plusieurs études ont été menées pour les extrêmes journaliers dans la région : par exemple, RIBES, THAO et al. (2019) utilisent une approche consistant en l'analyse d'une seule série temporelle agrégée des données journalières d'un certain nombre de stations dans le sud de la France. Ils ont trouvé une relation température-intensité de 1 à 3 fois celle attendue par Clausius-Clapeyron. Ils ont également constaté que la tendance des maxima annuels des précipitations journalières était inexistante jusqu'aux années 1990, et d'environ 20 à 40 % depuis. BLANCHET, BLANC et CREUTIN (2021) ont

trouvé une augmentation des précipitations journalières extrêmes notamment dans la région méditerranéenne et une diminution dans les Alpes du nord en hiver. Pour les autres saisons, les tendances obtenues sont moins organisées. Ils expliquent une partie des tendances trouvées par des changements de la circulation atmosphérique.

La faible disponibilité de données horaires rend difficile une estimation robuste des tendances des extrêmes infra-journaliers. CANTET, BACRO et ARNAUD (2011) ont proposé d'éviter ce problème en utilisant un générateur statistique de précipitations combiné à la théorie des valeurs extrêmes. Ils ont appliqué leur méthode à la France métropolitaine, qu'ils ont divisée en quatre sous-régions selon des critères statistiques : "*mediterranean*", "*highland*", "*mainland*", "*oceanic*". Dans toutes les régions à part "*mediterranean*", une augmentation de la fréquence est détectée en hiver. En été, la seule tendance significative est une augmentation de la fréquence dans la région "*mainland*" (centre et nord-est de la France).

2.1.3 Autres travaux dans les Alpes européennes

Ensemble des Alpes GIORGI et al. (2016) ont comparé des modèles climatiques régionaux à des modèles globaux et ont trouvé une augmentation du cumul des précipitations sur les hauts massifs des Alpes centrales en été. Ce phénomène n'est pas présent dans les modèles climatiques globaux. Ils attribuent cette différence à une augmentation des événements convectifs, liée à une plus grande instabilité due au réchauffement des hautes altitudes. MENEGOZ et al. (2020) ont montré que si les tendances des précipitations totales dans les Alpes européennes diffèrent selon les régions et les saisons, avec par exemple des tendances à la baisse en été, les tendances des précipitations maximales journalières sont positives dans presque toutes les régions et saisons.

Caractéristiques des précipitations extrêmes en Suisse FUKUTOME, LINIGER et SÜVEGES (2015), utilisant une approche sup-seuil (GPD), ont étudié la climatologie et les périodes de retour des précipitations au pas de temps horaire en Suisse. Ils ont trouvé, par exemple, des niveaux de retour généralement plus forts dans les pré-Alpes que dans les Alpes internes, et particulièrement intenses dans le Tessin en été et en automne, une région sous influence méditerranéenne. Cette observation est confirmée par une autre étude basée sur 12 ans d'observation radar (PANZIERA et al. 2018). Les auteurs ont montré qu'en Suisse (et ses alentours), les précipitations fortes (percentile 99.5) sont beaucoup plus élevées dans le Jura, dans la vallée du Po, et dans les pré-Alpes, alors que les massifs internes sont moins concernés. Ils expliquent cela par un accès limité à l'humidité dans les Alpes internes. Plusieurs études (BARBERO et al. 2019; SAIDI-BOUODINA 1996; SCHROEER et KIRCHENGAST 2018; BAUER et SCHERRER 2024) ont montré que, si l'altitude est un facteur important pour les précipitations (extrêmes) journalières, elle n'influence pas significativement la répartition spatiale des extrêmes horaires. En revanche, des études en Suisse (PANZIERA et al. 2018; FUKUTOME, LINIGER et SÜVEGES 2015), ainsi que dans les Alpes françaises (SAIDI-BOUODINA (1996), mes résultats), ont montré que les niveaux de retour sont généralement

plus élevés dans les pré-Alpes que dans les Alpes internes, en raison de l'instabilité renforcée par la montée des masses d'air le long des chaînes de montagne (PANZIERA et al. 2018). BAUER et SCHERRER (2024) examinent les tendances de fréquence (événements au-dessus du percentile 99) et d'intensité (maxima annuels et saisonniers) des précipitations fortes à différents pas de temps en Suisse. Pour la période 1981-2023, ils trouvent des tendances positives des intensités maximales annuelles pour les pas de temps infra-journaliers et des tendances négatives pour les pas de temps plus longs. Cependant, pour ces derniers, où des séries plus longues sont disponibles, ils constatent que les années 1970 et 1980 avaient des maxima particulièrement élevés, et qu'à long terme depuis 1901, ils observent une variabilité inter-décennale importante sans tendance à long terme. Entre 1981 et 2023, les tendances de fréquence des événements au-dessus du percentile 99 sont généralement négatives. Les auteurs attribuent cette différence à l'interaction entre processus thermodynamiques et variabilité climatique : les événements infra-journaliers intenses sont généralement des événements convectifs qui peuvent être intensifiés par une augmentation de la température. La fréquence des événements pluvieux, quant à elle, dépend de la dynamique de grande échelle.

Caractéristiques des précipitations fortes dans le Sud de l'Autriche SCHROEER et KIRCHENGAST (2018) ont étudié le *scaling factor*, c'est-à-dire la relation entre la température locale et l'intensité des précipitations, dans le sud de l'Autriche. Ils ont examiné les percentiles 98 à des pas de temps de 10 minutes, 1 heure, et 24 heures. Ils ont trouvé une sensibilité d'environ 9 %/°C pour les précipitations horaires et 12 %/°C pour les précipitations de 10 minutes, ce qui concorde avec les résultats trouvés ailleurs. Ils ont également constaté que le *scaling factor* dépend beaucoup de la région et de la saison concernée. Par exemple, dans l'ouest de la région étudiée, il devient même négatif en octobre. Ils expliquent cela par les masses d'air d'origine méditerranéenne chargées d'humidité qui arrivent à la limite sud des Alpes en automne. Dans ces situations météorologiques, la température locale est alors moins importante. Comme SAIDI-BOUODINA (1996) et BAUER et SCHERRER (2024), SCHROEER et KIRCHENGAST (2018) ne trouvent pas d'influence significative de l'altitude d'une station sur l'intensité des précipitations horaires.

Tendances des précipitations extrêmes dans le Nord de l'Italie DALLAN et al. (2022) ont développé une méthode fondée sur le concept d'*ordinary events* pour caractériser les précipitations extrêmes et leur évolution dans la province de Trente, au nord de l'Italie. Ils ont appliqué cette méthode aux observations météorologiques de 30 stations sélectionnées avec environ 30 ans de données à une résolution de 5 minutes. Leur étude a révélé une augmentation de l'intensité et de la fréquence des précipitations extrêmes dans cette région, une tendance qui s'accroît à mesure que le pas de temps étudié devient plus court. Ils attribuent cette évolution à une augmentation du nombre d'événements convectifs en été dans les massifs internes des Alpes italiennes.

En résumé

— **Relation de Clausius-Clapeyron (CC) :**

Loi physique qui décrit la relation entre la température de l'atmosphère et son contenu maximal en vapeur d'eau. Elle donne une augmentation de la capacité de l'atmosphère à contenir de la vapeur d'eau d'environ 7% par augmentation de température de 1 °C. Souvent, on fait l'hypothèse que cette relation s'applique aussi en premier ordre à l'intensité des précipitations extrêmes.

— **Tendances globales des précipitations extrêmes de courte durée :**

Globalement, une augmentation de l'intensité des précipitations extrêmes de courte durée est observée. Souvent, cette augmentation est de l'ordre de 7%/°C (CC), mais peut être beaucoup plus importante à certains endroits. En général, l'augmentation est plus forte plus le pas de temps étudié est court.

— **Patterns des précipitations extrêmes dans les Alpes occidentales :**

Dans les Alpes occidentales, les niveaux de retour des précipitations horaires sont généralement plus importants dans les Préalpes que dans les massifs internes. L'influence de l'altitude semble limitée sur les extrêmes infrajournaliers.

— **Tendances des précipitations fortes dans les Alpes européennes :**

Des études basées sur des modèles de climat régionaux ont trouvé une augmentation de l'instabilité atmosphérique dans les massifs internes des Alpes, menant à une augmentation des précipitations d'origine convective dans ces régions. Cette tendance est jusqu'alors difficile à vérifier dans les observations.

— **Tendances des précipitations extrêmes dans les Alpes françaises :**

Des études à pas de temps journalier ont notamment trouvé une augmentation de l'intensité des extrêmes journaliers en automne dans les Alpes du Sud et une diminution en hiver dans les Alpes du Nord. À notre connaissance, aucune étude n'a été faite sur les tendances des extrêmes horaires dans les Alpes françaises.

2.2 Terrain de l'étude et données

2.2.1 Terrain de l'étude

2.2.1.1 Limites et répartition territorial

Le terrain de l'étude couvre les 9 départements français situés (au moins en partie) dans les Alpes : la Savoie (73), la Haute-Savoie (74), l'Isère (38) et la Drôme (26) dans la région Auvergne-Rhône-Alpes, ainsi que les Hautes-Alpes (05), les Alpes-de-Haute-Provence (04), le Vaucluse (84), le Var (83) et les Alpes-Maritimes (06) en Provence-Alpes-Côte d'Azur. Par leur proximité, trois postes dans l'Ain (01) et un poste en Bouches-du-Rhône (13) sont également inclus dans l'analyse. La Figure 2.2 montre une carte topographique de la région, et la Figure 2.3 une carte des massifs principaux des Alpes.

2.2.1.2 Démographie et économie dans les Alpes françaises

Les Alpes françaises sont une région d'importante activité humaine. Selon un rapport du Secrétariat permanent de la Convention alpine (CONVENTION ALPINE 2015), la région compte 2,7 millions d'habitants, principalement concentrés dans les Alpes du Nord autour des villes de Grenoble (675 000 habitants), Annecy (219 000), Chambéry (216 000) et Genève avec sa zone urbaine transfrontalière (environ 300 000 habitants en France). Ces villes sont également des centres économiques et universitaires. Les Alpes du Nord constituent une destination majeure pour les sports d'hiver. L'ensemble de ces activités et infrastructures sont confrontées aux aléas naturels en zone de montagne, tels que les avalanches, les chutes de blocs, les glissements de terrain et les crues.

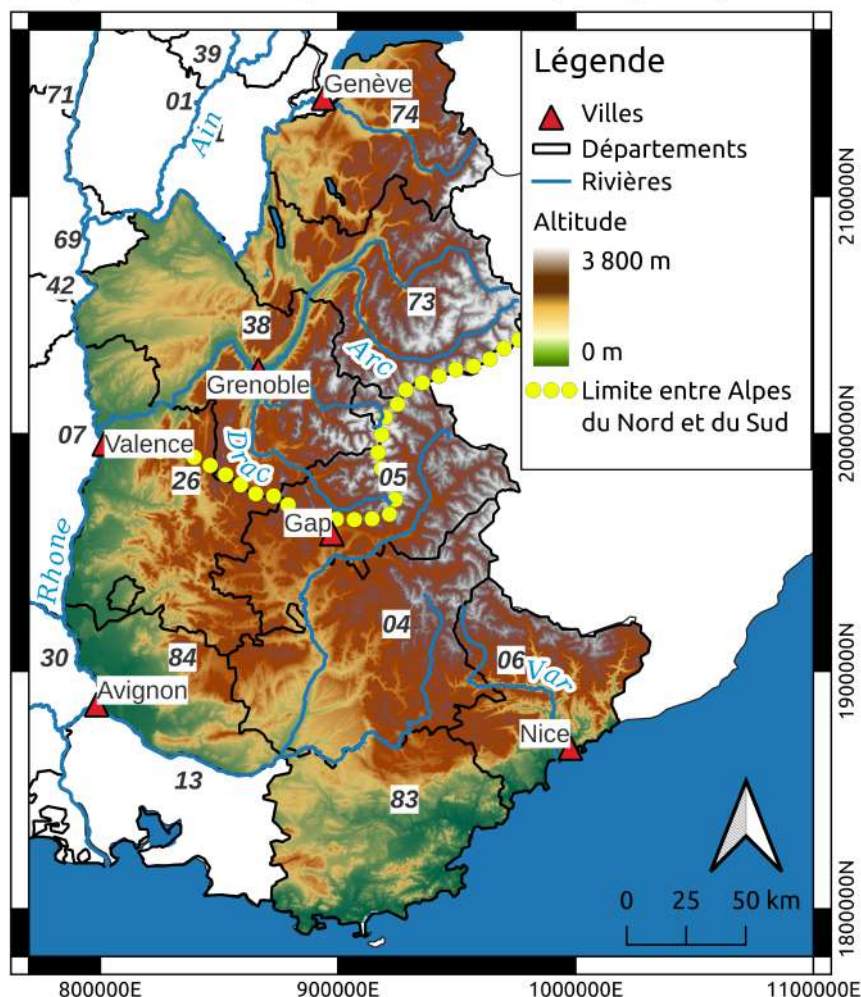
2.2.1.3 Topographie et zones climatiques : Alpes du Nord et Alpes du Sud

La topographie et le climat des Alpes françaises ont été largement décrits, par exemple par BÉNÉVENT (1926), KIEFFER-WEISSE (1998) et BLANC (2022). Les Alpes françaises sont généralement divisées en deux parties, caractérisées par des influences climatiques et des apparences différentes (AUER et al. 2007). La division entre les Alpes du Nord et les Alpes du Sud suit approximativement une ligne passant par le col de la Croix-Haute, le col Bayard et le col du Lautaret, le massif des Écrins avec ses sommets atteignant plus de 4000 mètres étant la principale division météorologique (cf Figs. 2.2, 2.3).

Les Alpes du Nord sont généralement plus élevées que les Alpes du Sud et très bien structurées : d'ouest en est, il y a d'abord les pré-Alpes (Chablais, Bornes, Bauges, Chartreuse, Vercors), suivies par les massifs centraux (Mont Blanc, Beaufortain, Belledonne, Oisans, Pelvoux). Entre les deux se trouve le Sillon alpin, une vallée majeure en direction nord-sud comprenant le Grésivaudan et la combe de Savoie. À l'est des massifs centraux se trouve la zone intra-alpine, accessible via les vallées de l'Isère supérieure (Tarentaise), de l'Arc (Maurienne) et de la Romanche.

Les Alpes du Sud consistent principalement du bassin versant de la Durance avec ses affluents Ubaye et Verdon. Ils sont moins structurées et généralement moins élevées dans

Alpes françaises: topographie



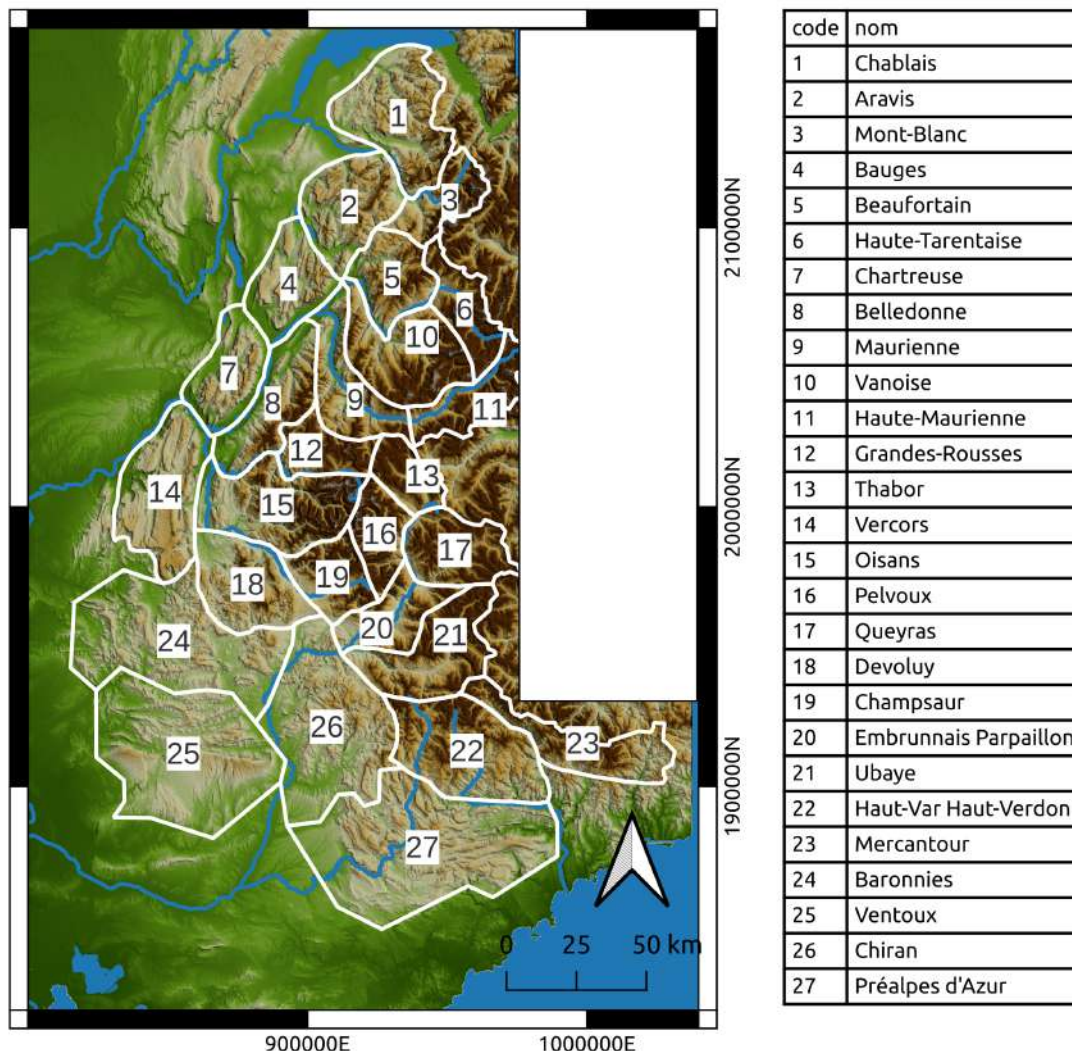
Créé: 12/06/2024

FIGURE 2.2 – Carte des Alpes françaises : topographie, départements, villes & rivières principales. La limite entre Alpes du Nord et du Sud est montrée en jaune (Limite climatique de AUER et al. 2007). Coordonnées en Lambert 93 zone II. Source des données : IGN (MNT), Figure réalisée par S. Berghald.

les zones extérieures (du Diois à l’ouest aux Alpes-Maritimes au sud) et plus élevées vers la frontière italienne (Queyras et Mercantour).

Les Alpes du Nord, sous influence atlantique, font partie des régions françaises recevant le plus de pluie, tandis que les Alpes du Sud connaissent un climat méditerranéen beaucoup plus sec. L’influence atlantique dans le nord, avec des flux de l’ouest prédominants ainsi que l’orientation nord-sud des principales chaînes de montagnes, entraîne des différences climatiques très distinctes : les pré-Alpes comme la Chartreuse et le Vercors, étant la première barrière pour les flux occidentaux, sont caractérisées par des quantités de précipitations totales élevées et des températures moyennes comparativement basses. Le sillon alpin, de basse altitude et protégé des vents d’ouest, connaît un climat doux et beaucoup plus sec. Les massifs centraux forment ensuite une deuxième barrière pour les

Les massifs des Alpes



Créé: 31/05/2024

FIGURE 2.3 – Les massifs des Alpes, répartition de Météo France. Source des données : Météo France (massifs), IGN (MNT), Figure réalisée par S. Berghald.

flux occidentaux. Cela fait que les régions intra-alpines derrière ces chaînes de montagnes, la Haute-Tarentaise et la Haute-Maurienne, connaissent un climat très sec, ensoleillé et continental. Un phénomène climatique particulier dans cette région sont les "retours d'Est", qui peuvent apporter localement des quantités de précipitations très élevées provenant de la vallée du Pô italienne et du golfe de Gênes.

Les Alpes du Sud sont caractérisées par une forte influence méditerranéenne qui diminue du sud au nord. Près de la mer Méditerranée, une forte saisonnalité entre les étés très secs et les automnes très pluvieux peut être observée. Cette région est généralement ensoleillée, mais connaît aussi souvent des événements pluvieux très intenses en automne, avec des records dépassant 100 mm en une heure (Cannes, octobre 2015) et même dépassant 500

mm en 24 heures (Saint-Martin-Vésubie, octobre 2020).

2.2.1.4 Changement climatique dans les Alpes françaises

Le climat de la Terre se réchauffe, et ce réchauffement est généralement plus élevé au-dessus des masses continentales qu'au-dessus des océans, et particulièrement élevé dans les régions de haute altitude ou de latitude élevée (IPCC / GIEC 2022). Ce dernier phénomène est principalement une conséquence de ce que l'on appelle la rétroaction glace-albédo : lorsque la couverture neigeuse ou les glaciers très réfléchissants fondent, des surfaces beaucoup plus sombres sont exposées et absorbent davantage de rayonnement solaire entrant. Outre cet effet sur la température, la diminution de la couverture neigeuse et la fonte des glaciers ont également un impact significatif sur le cycle hydrologique, ce qui a d'énormes conséquences pour l'homme et l'environnement. Il a été constaté que le changement climatique dans les Alpes a déjà un impact (avec une accélération probable à l'avenir) sur presque tous les aspects du système alpin : l'agriculture, l'écologie et la faune, la production d'énergie hydroélectrique, le tourisme d'hiver, les risques naturels tels que les chutes de pierres, les coulées de débris, les avalanches et les précipitations extrêmes (BEAUMET et al. (2021) et références). Malheureusement, il est difficile de déterminer la tendance exacte de la température dans les Alpes en raison de la topographie complexe, de la rareté des observations, en particulier à haute altitude, et de la grande variabilité décennale, ce qui entraîne des différences significatives entre les différents produits (BEAUMET et al. 2021). Les tendances futures sont également difficiles à estimer, car les modèles climatiques régionaux à haute résolution commencent à peine à être largement utilisés pour l'analyse du changement climatique régional. Les tendances futures dépendront aussi en grande partie du scénario d'émission. Toutefois, il est très probable que les tendances déjà observées se poursuivent, avec une augmentation générale de la température surtout à altitude moyenne, une diminution de la couverture neigeuse, une fonte des glaciers et une modification des régimes de précipitations vers des événements moins nombreux mais plus intenses, notamment au printemps et en été (KOTLARSKI et al. 2023).

2.2.1.5 Les aléas associés aux précipitations extrêmes dans les Alpes françaises

NAAIM-BOUVET et RICHARD (2015) donnent une vue d'ensemble des risques naturels associées au milieu de montagne. Les précipitations extrêmes jouent un rôle très important pour beaucoup de ces risques : Les pluies intenses dépassant la capacité d'infiltration du sol peuvent activer des torrents et déclencher des crues importantes au bout de quelques minutes seulement. Des glissements de terrain peuvent être activés ou accélérés si le sol est saturé en eau. En hiver, des cumuls de neige importants ou de la pluie qui tombent sur le manteau neigeux peuvent déclencher des avalanches.

2.2.2 Données pluviométriques horaires dans les Alpes françaises

Dans cette section, une description des données disponibles dans la région des Alpes françaises est donnée, ainsi qu'une explication des étapes de pré-traitement des données. Les deux gestionnaires principaux de réseaux pluviométriques dans la région sont Météo France et EDF-DTG, mais d'autres organismes sont aussi présents (voir l'annexe pour d'autres sources de données potentielles). Les réseaux d'EDF-DTG et de Météo France se complètent : si le réseau de Météo France est plus dense dans la vallée du Rhône et dans la zone méditerranéenne, les pluviomètres d'EDF-DTG sont principalement positionnés dans les massifs internes et les Alpes du Nord. Distribution, provenance et profondeur temporelle des postes disponibles sont montrées dans la Figure 2.4.

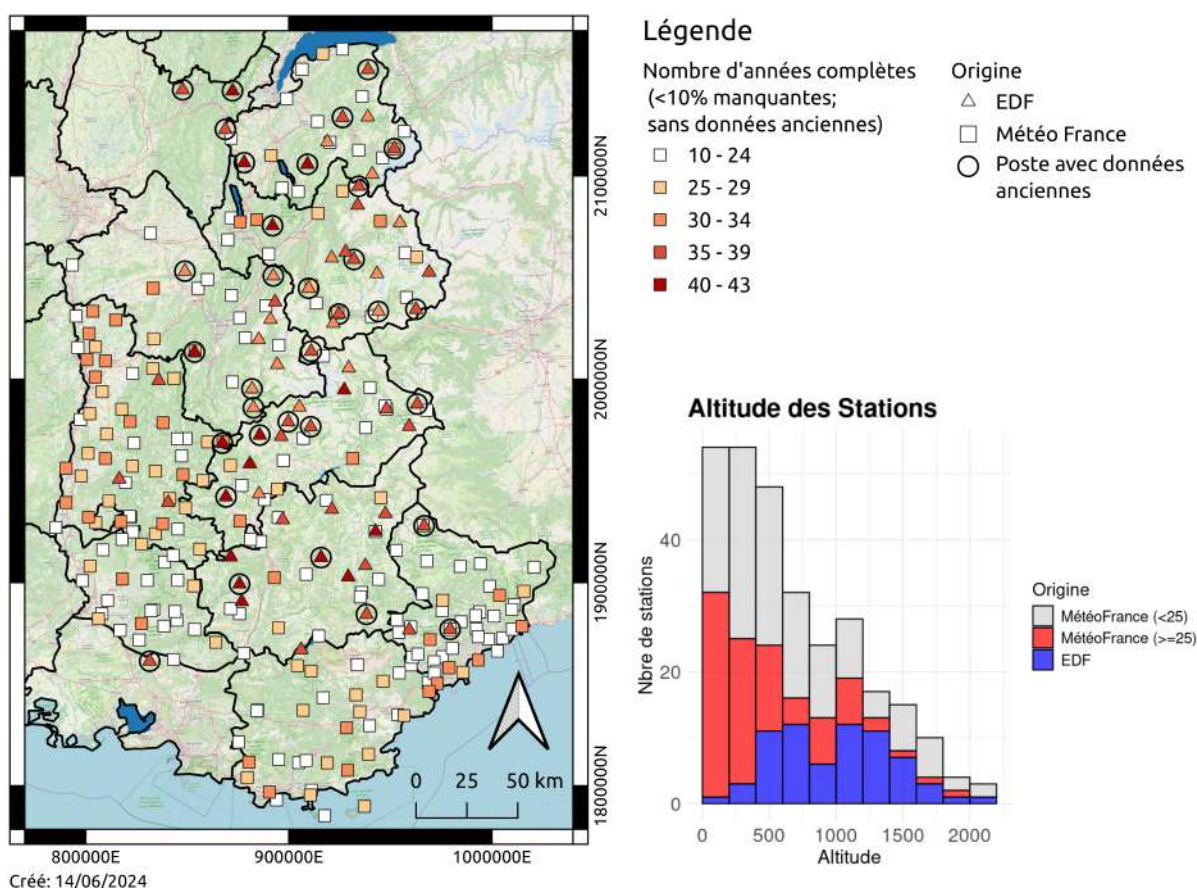


FIGURE 2.4 – Vue d'ensemble du réseau pluviométrique dans les Alpes françaises. La carte indique la source des données symbolisée par des carrés (Météo France) et des triangles (EDF). Un cercle autour du symbole signifie qu'il existe des données « anciennes » supplémentaires pour cette station. La couleur indique le nombre d'années avec des observations complètes, les stations avec moins de 10 ans ne sont pas représentées. La distribution de l'altitude des stations est indiquée en bas à droite. Les stations EDF sont en bleu, les stations Météo France en rouge et en gris (si moins de 25 ans d'observations). Sources des données : Openstreetmap (fond), EDF & Météo France (métadonnées des stations), Figure réalisée par S. Berghald.



FIGURE 2.5 – Photo de la station Arvieux (no. 05007003, altitude 1825 m, type *Mercury*). Photo prise le 14 juin 2022. Source : Météo France.

2.2.2.1 Données de Météo France

Histoire du réseau Météo France Le réseau d'observations météorologique de Météo France a une très longue histoire, mais la première à établir un réseau d'observations systématiques était la Société royale de médecine au XVIIIe siècle, qui avait pour but d'étudier les corrélations entre climat et morbidité (MÉTÉO FRANCE 2020). Ces relevés sont conservés à la Bibliothèque de l'Académie nationale de médecine (<http://meteo.academie-medecine.fr/>). Le premier réseau dédié à la prévision météorologique a été établi en 1855 avec des observateurs humains (MÉTÉO FRANCE 2020). L'automatisation "à grande échelle" des stations météorologiques en France date de la fin des années 1960 (MÉTÉO FRANCE 2020), mais il fallait attendre les années 1990 pour une automatisation de l'observation de la précipitation de manière continue dans le réseau de Météo France (disponibilité des données, voir aussi GUILLOU (2018)). En 1996, Météo France a décidé de restructurer, automatiser et homogénéiser son réseau d'observation avec le lancement du projet RADOME (Réseau d'Acquisition de Données et d'Observations Météorologiques Etendues, TARDIEU et LEROY (2003) et GUILLOU (2018)). Le réseau RADOME était finalisé en 2004, et près de 600 stations sont actuellement opérationnelles en France métropolitaine (GUILLOU 2018). Il s'agissait des stations *Xaria* fabriqué par la société *Degreane*, qui depuis 2015 sont progressivement remplacées par des stations *Mercury* de la société *Sterela* (GUILLOU (2018), Figure 2.5)

Description et disponibilité des données Les données du réseau pluviométrique font partie des données publiques de Météo France, disponibles sur meteo.data.gouv.fr (DATA.GOUV.FR et MÉTÉO FRANCE 2023) et peuvent être librement utilisées et exploitées (Licence Ouverte

2.0). Elles sont stockées dans des fichiers qui contiennent chacune toutes les stations disponibles par département et par tranche de 10 ans. Les fichiers pour les neuf départements dans les Alpes ont été téléchargés et les observations de chaque station ont été extraites individuellement (380 stations au total). Seules les stations pour lesquelles on dispose d'au moins 25 ans d'observations complètes (<10% de valeurs manquantes) ont été retenues pour les analyses (89 stations). Il est important de noter que les valeurs indiquées sont des valeurs annuelles. Le nombre d'observations complètes pour chaque mois peut être différent. Après discussion avec Denis Roy (responsable Météo France des Alpes du Nord), les données ont été jugées fiables, donc aucune contrôle ultérieure n'a été effectué.

Les pratiques de Météo France sont comme suivant :

- Les données du jour J sont expertisées à J+1.
- Des contrôles automatiques spatiaux mettent en évidence des données douteuses.
- Pour les observations horaires, les données douteuses sont soit conservées (données expertisées comme bonnes), soit supprimées ou mises à 0 (si pas de pluie).
- Il n'y a pas d'estimation de données horaires pour remplacer une donnée douteuse (elle est supprimée).
- À l'issue des contrôles, il y a une mise en cohérence avec les données 6 minutes et les données quotidiennes.

(Denis Roy, Météo France, communication personnelle)

2.2.2.2 Données d'EDF-DTG

Histoire du réseau EDF-DTG dans les Alpes Les observations hydrométéorologiques d'EDF-DTG servent principalement à évaluer et suivre dans le temps la ressource en eau disponible pour la production hydroélectrique. À cette fin, EDF-DTG gère 800 points de mesure (340 pluviomètres, 140 mesures de neige et 320 mesures de débit) dans les Alpes, les Pyrénées et le Massif central (information de 2011, PERRET et al. (2012), voir aussi figure 2.6a). Comme montré dans la figure 2.4, les postes d'observation d'EDF-DTG sont généralement situés à des altitudes plus élevées que les postes de Météo France, mais la densité reste insuffisante pour les altitudes supérieures à 1200 m, même pour les besoins d'EDF-DTG (PERRET et al. 2012). Le dispositif utilisé par EDF-DTG pour l'observation des précipitations est le pluviomètre chauffant d'une grande surface (2000 cm², Fig. 2.6b), adapté pour la mesure des précipitations solides, fréquentes en haute montagne (PERRET et al. 2012). Les premiers postes, dont nous disposons de données, ont été installés dans les années 1950 et le réseau est passé de stations entièrement mécaniques avec enregistrement des données sur papier à des stations électroniques probablement dans les années 1980. Nous disposons de données anciennes d'une cinquantaine de postes, datant des années 1950 jusqu'à environ 1990, issues d'un effort commun d'EDF-DTG et du CEMAGREF de dépouillement manuel des données enregistrées sur papier (GARÇON 1993). Des données horaires et journalières récentes pour 72 postes nous ont été mises à disposition par EDF-DTG. Ce jeu de données couvre la période des années 1980 jusqu'à 2022. Pour les séries communes entre les deux jeux de données, les séries se chevauchent partiellement entre environ 1980 et 1990.

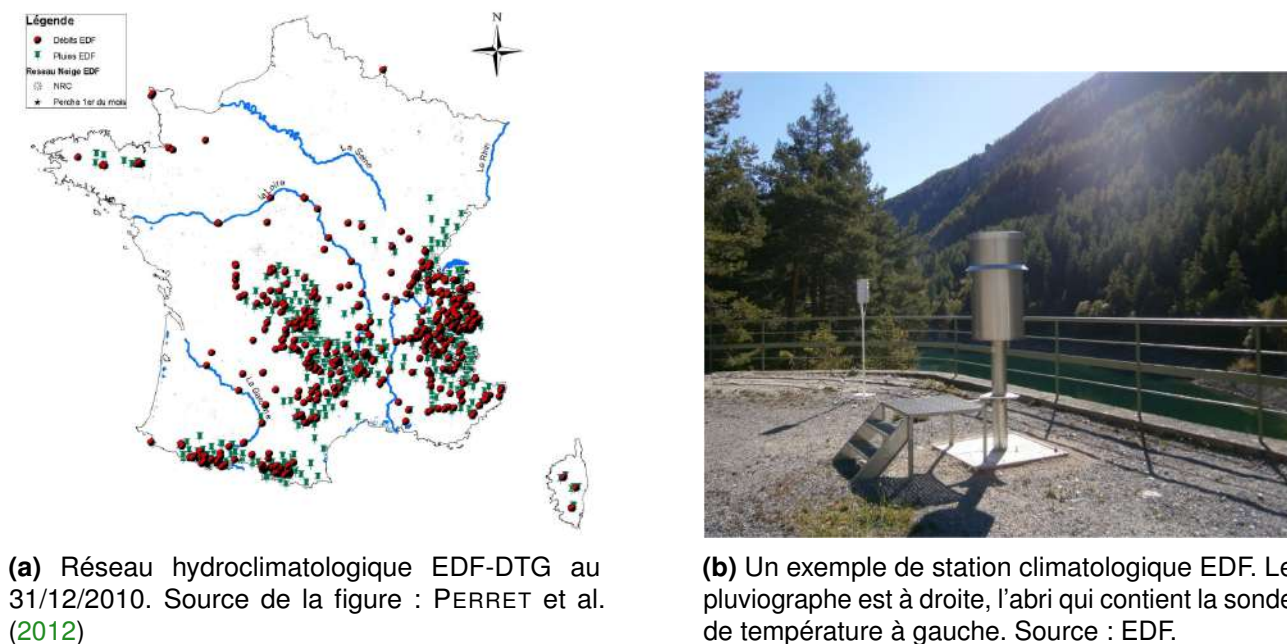


FIGURE 2.6 – Réseau d'observation et exemple d'une station EDF.

Description des données récentes Dans le cadre d'une convention entre EDF-DTG et le Service RTM, des données pluviométriques horaires et journalières pour 72 stations (dont 4 dans le département du Jura, qui n'ont pas été utilisées) ont été mises à disposition par EDF-DTG pour ce stage (montrées en triangle dans la figure 2.4). Selon David Penot (chargé d'affaires DTG – Pôle EDF Hydro Grenoble Alpes), seules les données journalières sont expertisées systématiquement. Avant toute analyse, il est donc nécessaire de contrôler et, si besoin, corriger les données horaires par désagrégation des données journalières. Pour ce faire, la méthode utilisée par EDF-DTG a été adaptée à nos besoins.

Plusieurs méthodes sont décrites dans la littérature scientifique pour corriger (voire désagréger) des séries temporelles de précipitation à pas de temps infrajournalier à partir des données journalières, voir par exemple POSCHLOD et al. (2018) et WESTRA et al. (2012) pour la méthode "Method of Fragments", qui est très similaire à l'algorithme de correction utilisé ici. En général, à partir de la valeur journalière, les valeurs horaires sont ajustées de manière à ce que pour chaque jour, la somme des valeurs horaires corresponde à la valeur journalière. La répartition de la précipitation pendant la journée est respectée dans ce processus. Pour les journées où la valeur journalière n'est pas validée, ou lorsque l'écart entre la somme des données horaires et la valeur journalière est trop grand (plus de $\pm 25\%$ de la valeur journalière), toutes les données horaires du jour sont invalidées.

Les différences entre les données ainsi corrigées et les données brutes sont visualisées dans la Figure 2.7.

Description des données "anciennes" Si les observations à pas de temps horaires voire infra-horaires par mesure automatique ont commencé dans les années 1990 pour Météo France et quelques années auparavant pour EDF-DTG, il existe également des données plus anciennes, remontant jusqu'à la fin des années 1950, relevées de manière

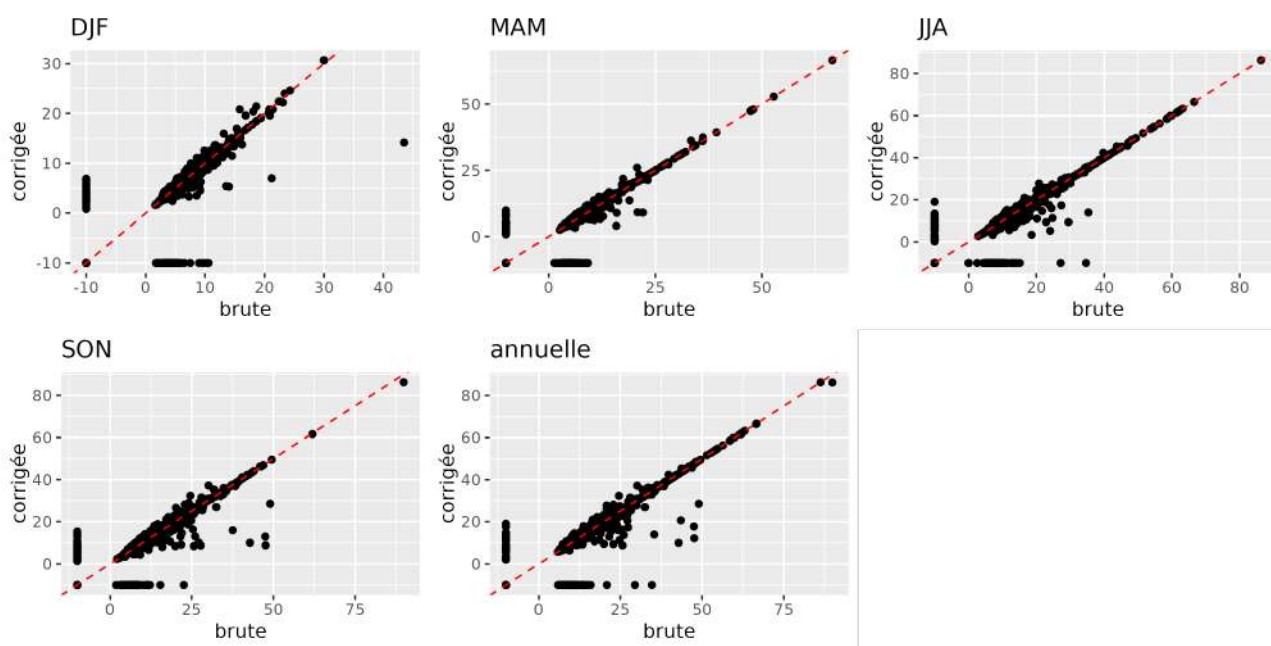


FIGURE 2.7 – Diagrammes de dispersion montrant les différences des maxima saisonniers d’intensité horaire de précipitation entre les données corrigées par la méthode décrite dans le texte et les données brutes (stations EDF-DTG). Les valeurs manquantes ont été remplacées par -10 pour cette figure. Il est important de noter que le maximum à une station et saison donnée n’est pas forcément issu du même événement dans les données brutes et les données modifiées, si p.ex. un événement a été invalidé par l’algorithme de désagrégation. Figure réalisée par S. Berghald.

continue par pluviographe mécanique, principalement par EDF-DTG. Dans le cadre du X^e Plan État-Région, les données de 65 de ces pluviographes (48 d’EDF-DTG, 17 provenant de sources diverses telles que Météo France, SRAE, CEMAGREF, DDAF) ont été dépouillées manuellement dans les années 1991-1993. Ces données ont été utilisées pour plusieurs études dans les années suivantes, notamment dans les thèses de SAIDI-BOUODINA (1996), DJERBOUA (2001) et KIEFFER-WEISSE (1998). Malheureusement, nous ne disposons que des maxima hebdomadaires aux pas de temps de 1h, 2h, 3h, 6h, 12h et 24h pour 56 postes, retrouvées dans les archives d’Institut national de recherche pour l’agriculture, l’alimentation et l’environnement (INRAE)³. Selon SAIDI-BOUODINA (1996), ces données ont été dépouillées à intervalles fixes (et non avec une fenêtre glissante). Le processus de dépouillement est décrit par GARÇON (1993). Selon ce rapport, une chaîne de traitement de qualité conséquente a été mise en place dans le cadre de ce projet. Comme nous ne disposons pas d’autres informations (notamment les métadonnées), nous n’avons pas d’autre choix que d’utiliser les données telles que nous les avons récupérées, avec toute la prudence nécessaire.

3. Merci à Etienne Leblois.

2.3 Démarche méthodologique

J'applique ici une approche statistique, la théorie des valeurs extrêmes, basée sur les maxima par bloc (par exemple les maxima annuels) afin de caractériser les modèles et les tendances générales des précipitations extrêmes.

2.3.1 Calcul des maxima saisonniers et annuels

À partir des données obtenues de Météo France et d'EDF-DTG (et après l'étape de correction de ces dernières), des intensités maximales horaires et journalières ont été calculées pour chaque station, année et mois. Suivant le critère proposé par BLANCHET, MOLINIÉ et TOUATI (2016) un maximum est considéré manquant si, pour une station, mois et année donnée, son rang (ascendant) est inférieur à $pmiss * N$, avec $pmiss$ la proportion des données manquantes et N le nombre d'année d'observations. Par exemple, si une station dispose de 30 ans d'observation et il y a 20% de valeurs manquantes pour un mois donné, la valeur de ce mois n'est pas prise en compte si son rang est inférieur à $0,2 * 30 = 6$. Ainsi, plus il y a des données manquantes sur un mois donné, plus on exige que le maximum soit élevé pour le garder. Pour les données anciennes, les maxima mensuels ont été calculé à partir des maxima hebdomadaires. Les semaines "entre deux mois" ont été attribué au mois dans lequel la semaine était majoritaire.

2.3.2 Théorie des valeurs extrêmes

Pour l'estimation des périodes de retour, on applique la théorie des valeurs extrêmes sous forme de la loi GEV (*Generalised Extreme Value distribution*) (COLES 2001 ; KATZ 2013). Cette théorie est basé sur le théorème de Fisher–Tippett–Gnedenko (COLES 2001 ; FISHER et TIPPETT 1928) qui stipule que pour des échantillons suffisamment grands (par exemple, les cumul de précipitation quotidiennes pour des années individuelles), la plus grande ou la plus petite valeur de chacun de ces échantillons (par exemple, la précipitation maximale annuelle) suit une de trois distributions limites possibles, qui peuvent toutes être résumées dans la distribution des valeurs extrêmes généralisées (GEV). La distribution GEV est décrite par des paramètres de position ($-\infty < \mu < \infty$), d'échelle ($\sigma > 0$) et de forme ($-\infty < \xi < \infty$) :

$$F(x) = \exp\left[-\left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}}\right], \quad 1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma} > 0 \quad (2.4)$$

Pour le cas où $\xi \rightarrow 0$, on obtient la distribution de Gumbel (COLES 2001) :

$$F(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]\right\}. \quad (2.5)$$

La figure 2.8 montre l'influence des différents paramètres sur la densité de probabilité. Les quantiles de la distribution peuvent alors être obtenus en inversant l'équation 2.4 :

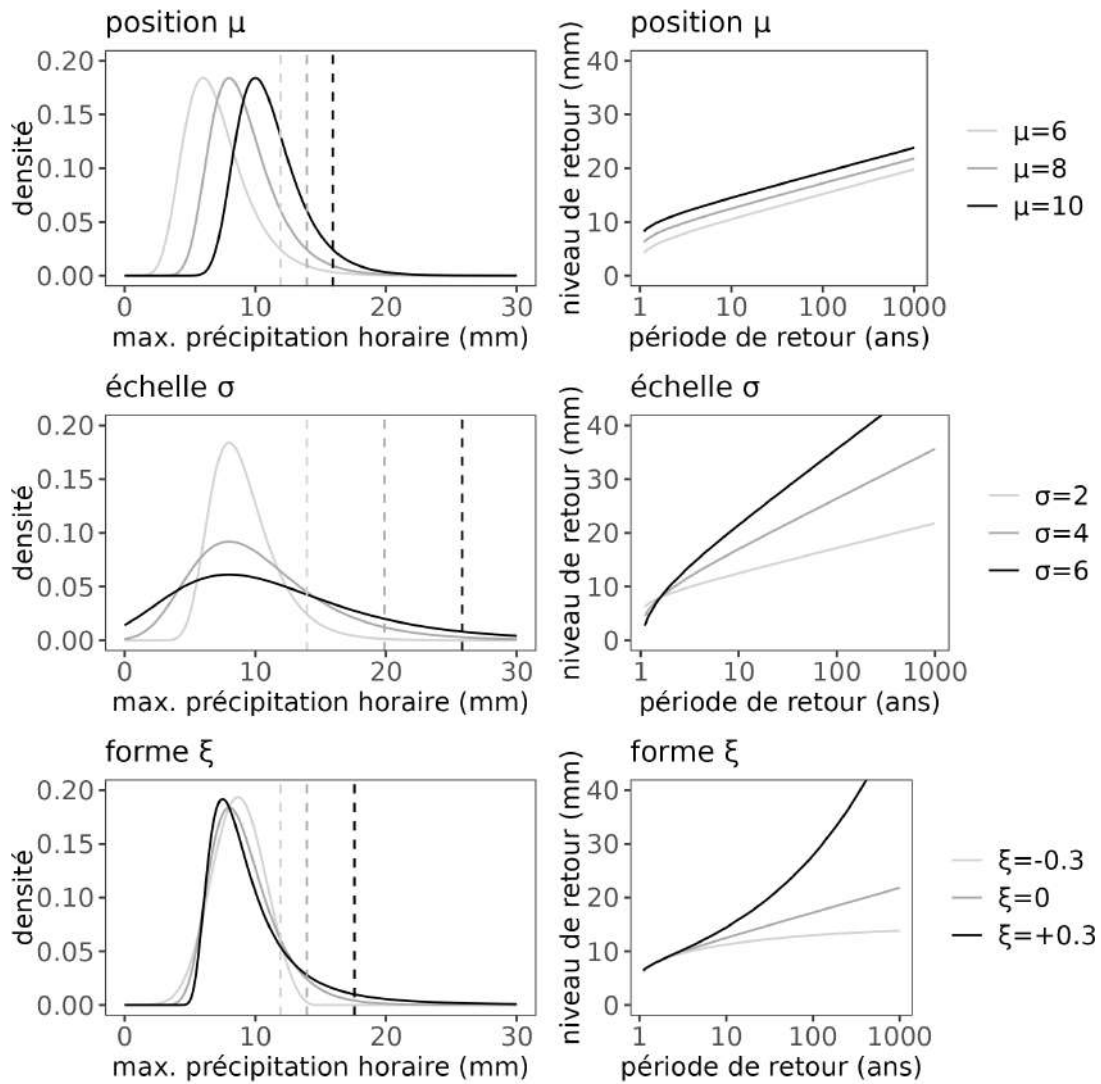


FIGURE 2.8 – Influence des paramètres de la GEV sur la densité de probabilité (à gauche) et sur la relation entre période et niveau de retour (à droite) : Position μ (en haut), échelle σ (centre) et forme ξ (en bas). Les lignes pointillée montrent le niveau de retour de 20 ans pour les différents cas. Valeurs de base : $\mu = 8\text{mm}$, $\sigma = 2\text{mm}$, $\xi = 0$.

$$x_p = \begin{cases} \mu - \frac{\sigma}{\xi} (1 - \{-\log(1-p)\}^{-\xi}), & \text{si } \xi \neq 0 \\ \mu - \sigma \log(-\log(1-p)), & \text{si } \xi = 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

où x_p correspond au niveau de retour associé à la période de retour p^{-1} (ex. $p = \frac{1}{20}$ pour une période de retour de 20 ans).

La figure 2.8 montre l'influence des différents paramètres sur la relation entre niveau et période de retour. On voit bien que c'est la forme ξ qui a l'influence principale sur les niveaux de retour élevés. Malheureusement, ξ est aussi le paramètre qui est le plus difficile à estimer.

GEV non-stationnaire La non-stationnarité peut être introduite en permettant à un ou plusieurs des paramètres de varier avec une covariable (KATZ 2013). Ici, nous utilisons le temps (donc l'année). Les paramètres μ et σ sont alors redéfinis en fonction du temps :

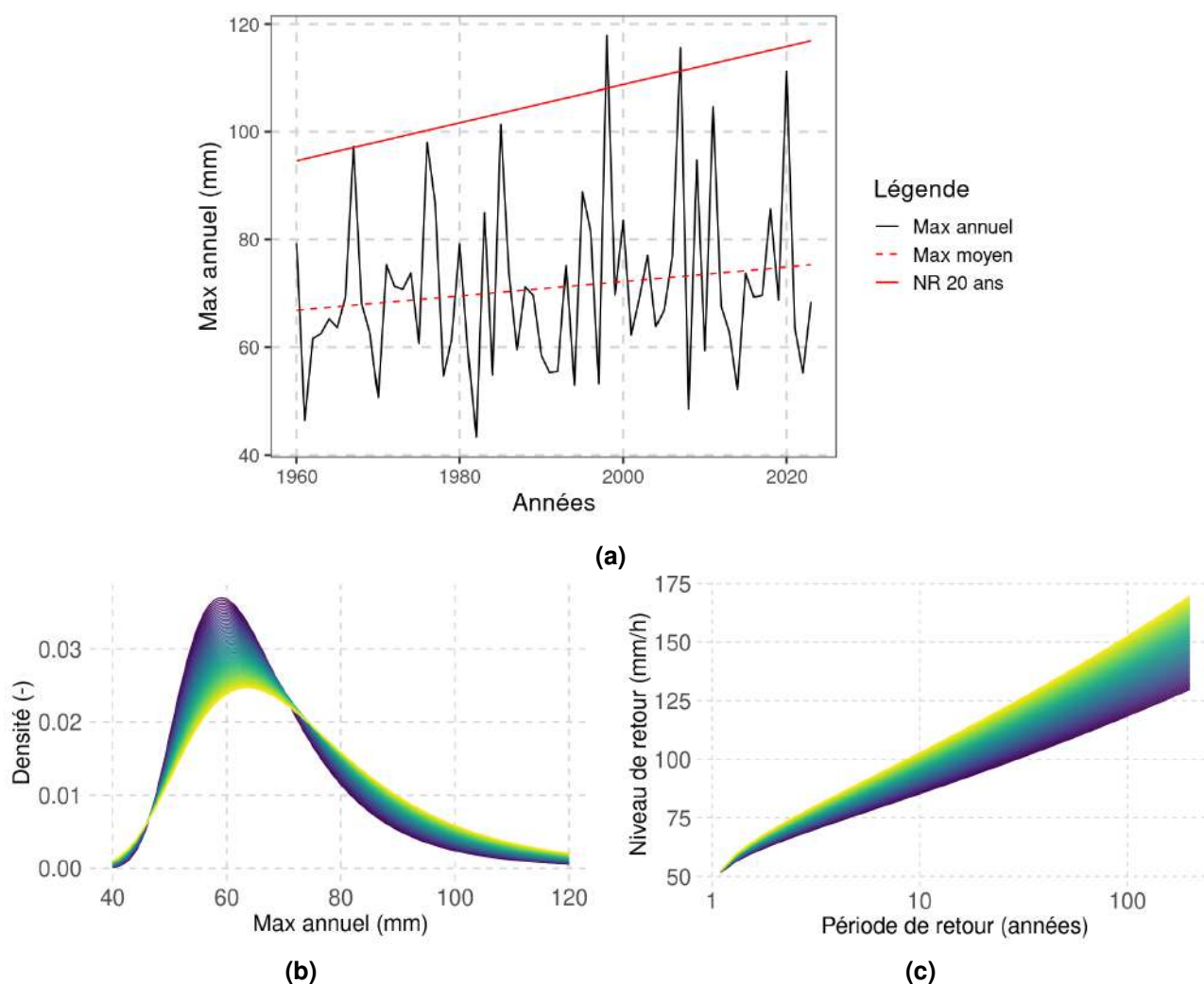


FIGURE 2.9 – Influence d’une tendance dans les paramètres μ et σ pour une série temporelle fictive des maxima annuels. (a) Série temporelle (noir) avec la moyenne des maxima (rouge, en pointillés) et le niveau de retour de 20 ans (rouge, en continu) ; (b) Densité de la GEV pour chaque année entre 1960 (violet) et 2023 (jaune) ; (c) Intensités associées aux périodes de retour.

$$(M_{\mu,\sigma}) \begin{cases} \mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t, \\ \sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_1 t \\ \xi \end{cases} \quad (2.7)$$

Bien qu’il soit théoriquement possible d’introduire un paramètre de forme $\xi(t)$ variable dans le temps, nous maintenons ici ξ constant en raison de la difficulté associée à l’estimation de ce paramètre. Nous définissons d’abord des sous-modèles du modèle décrit dans l’Eq. 2.7, à savoir \mathcal{M}_0 ($\mu_1 = 0, \phi_1 = 0$; cas stationnaire), \mathcal{M}_μ ($\sigma_1 = 0$), \mathcal{M}_σ ($\mu_1 = 0$), et $\mathcal{M}_{\mu,\sigma}$. La Figure 2.9 montre l’influence d’une tendance dans les paramètres μ et σ sur la densité de la distribution et les niveaux de retour.

Des études précédentes ont montré qu’on commence à voir des tendances significatives des précipitations journalières dans les années 1980 (ex. BLANCHET, MOLINIÉ et TOUATI (2016)). C’est aussi la période de transition entre les données anciennes et les données récentes, avec

potentiellement des inhomogénéités introduites par le changement d'instrumentation ou du post-traitement. Pour pouvoir prendre en compte ces inhomogénéités potentielles ainsi que le début des impacts du changement climatique, on définit alors les modèles non-stationnaires \mathcal{M}'_{μ} , \mathcal{M}'_{σ} , et $\mathcal{M}'_{\mu,\sigma}$ de sorte que la tendance linéaire commence en 1985, et on fait l'hypothèse de stationnarité avant. Il s'agit donc de modèles continus avec le même nombre de paramètres et la même tendance linéaire après 1985 que les modèles décrits par Eq. 2.7.

Nous utilisons ensuite un test de rapport de vraisemblance comme suggéré par COLES (2001) et KATZ (2013) pour tester les modèles non-stationnaire contre \mathcal{M}_0 . \mathcal{M}_0 est conservé si les p s de tous les modèles non-stationnaires sont $> 0,05$ (et l'hypothèse de non-stationnarité est rejetée). Sinon, le modèle qui donne la valeur de p la plus petite est retenu.

2.3.3 Estimation des paramètres

Théorie Pour estimer les paramètres de la GEV pour chaque station et mois la méthode de maximum de vraisemblance est utilisée. Pour les cas où $\xi > 0.6$ on n'a pas confiance dans l'ajustement. Dans ce cas, pour l'estimation stationnaire, on ajuste une loi Gumbel ($\xi = 0$). En non-stationnaire cela ne concerne pas beaucoup de postes à cause de l'approche régionale utilisée (cf. ci-dessus), et on invalide ces ajustements.

Approche régionalisée L'estimation de la GEV, surtout la GEV non-stationnaire qui a plus de paramètres, est malheureusement peu robuste si elle est faite sur les séries temporelles courtes d'une trentaine d'année (LANG et al. 2014). Une approche pour améliorer la robustesse consiste, pour chaque poste, à prendre en compte les données des postes voisins (BURN 1990). Cette idée, courante dans les domaines d'hydrologie, a déjà été utilisée aussi pour des études sur les précipitations dans le Sud de la France (CARREAU et al. 2013 ; BLANCHET, BLANC et CREUTIN 2021 ; CANTET, BACRO et ARNAUD 2011). L'approche est basée sur l'hypothèse que, dans une zone pas trop grande autour d'un endroit, la distribution des précipitations est homogène à un facteur de normalisation près. Suivant la notation utilisée par BLANCHET, BLANC et CREUTIN (2021) on considère $R_{i,t}$ la distribution des maxima de précipitation à un endroit i pour une année t . Alors on fait l'hypothèse que pour un endroit j dans le voisinage \mathcal{N}_i , la distribution

$$R_{j,t}^* = \frac{R_{j,t}}{\alpha_j}, \quad j \in \mathcal{N}_i \quad (2.8)$$

est égale à $R_{i,t}^* = \frac{R_{i,t}}{\alpha_i}$, où les α s sont des facteur de normalisation. Ici, j'utilise la moyenne d'une série donnée pour la normalisation, ce qui fait que tous les $R_{j,t}^*$ ont une moyenne identique ($= 1$). Dans ce cas, on peut regrouper les données normalisées d'un poste i avec celles d'autres postes voisins j , puis les multiplier par α_i pour obtenir une série temporelle pour le poste i contenant plus de valeurs, permettant ainsi une estimation plus robuste de la GEV. Pour ce faire, il est nécessaire d'introduire deux étapes avant l'estimation de la GEV : (i) Il faut vérifier si les observations dans une région donnée autour d'un poste sont bien homogène. Pour simplifier, on fait ici l'hypothèse (non-vérifiée) que c'est le cas dans un rayon

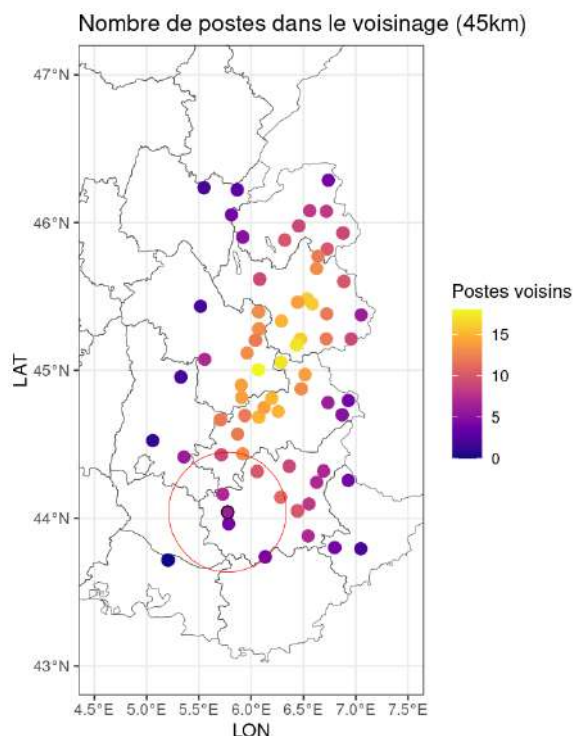


FIGURE 2.10 – Le nombre de postes dans le voisinage de chaque poste. Le cercle rouge montre le rayon de 45 km autour d'un poste d'exemple (EDF 2560). Figure réalisée par S. Berghald.

fixe autour d'un poste. Une première analyse a montré qu'il faut un rayon 45km pour faire en sorte que $>75\%$ des postes ont ≥ 5 postes dans leur voisinage. La Figure 2.10 montre pour chaque postes le nombre de postes dans le voisinage pour ce rayon. En plus d'une analyse locale, on répète l'analyse pour des rayons différents de 25km, 35km et 45km pour avoir une idée du rayon nécessaire pour voir un signal pas trop bruité. (ii) La GEV demande que les maxima considérés sont indépendants, ce qui n'est pas le cas si un événement a été observé à plusieurs endroits. Pour assurer l'indépendance des événements, on enlève donc toutes les valeurs sauf la plus haute dans les cas où des maxima ont été enregistrés à plusieurs postes dans une période de moins de 24 heures (*declustering*), suivant la procédure proposée par CARREAU et al. (2013) et BLANCHET, BLANC et CREUTIN (2021).

Implémentation Toute l'analyse est fait dans le logiciel *R* (R CORE TEAM 2024) et son extension *tidyverse* (WICKHAM et al. 2019). L'estimation des paramètres de la GEV est implémentée par le package *extRemes 2.0*, conçu entre autres pour les analyses non-stationnaires (GILLELAND et KATZ 2016). Pour les figures j'ai utilisé le package *ggplot2* disponible sous *R* (WICKHAM 2016), et le logiciel *QGIS* (QGIS DEVELOPMENT TEAM 2024) pour quelques cartes où cela était pertinent. *ChatGPT* (OPENAI 2024), un logiciel de l'intelligence artificielle générative a été utilisé pour soutenir la programmation ainsi que la formulation de ce mémoire. Aucun contenu n'a été généré par *ChatGPT*.

2.4 Résultats

Dans ce chapitre, je vais présenter les principaux résultats. Je commence par montrer les niveaux de retour sur 50 ans des précipitations horaires extrêmes, tels qu'ils sont estimés à partir de deux sous-ensembles différents de données. Ensuite, je montrerai l'influence du rayon choisi pour l'approche régionalisée et enfin, je présente plus en détail les principaux patterns trouvés en utilisant un rayon de 45 km. Pour tous les résultats, il est important de noter que l'interprétation des résultats pour les stations individuelles n'a pas beaucoup de sens : Les séries chronologiques étant relativement courtes, les estimations des niveaux de retour et des tendances peuvent être fortement influencées par la présence (ou l'absence) d'événements individuels dans les observations. Toutefois, lorsqu'une région entière présente un comportement similaire ou que les modèles généraux sont cohérents, nous pouvons avoir une confiance plus grande dans les résultats.

2.4.1 Niveaux de retour dans un climat stationnaire

La Figure 2.11 montre les périodes de retour de 50 ans des extrêmes de précipitations horaires estimées sur la base d'un sous-ensemble des données comprenant les données « récentes » d'EDF et toutes les données disponibles de Météo France. Pour chaque station, le nombre de points de données disponibles (c'est-à-dire d'années) est donc compris entre 25 et 42. Quelques patterns annuels et régionaux se dégagent : Les niveaux de retour 50 ans sont généralement faibles (<20 mm/h) pendant les mois de janvier à avril. En été, de juin à août, les niveaux de retour sur 50 ans sont plus élevés sur l'ensemble du territoire, avec les valeurs les plus basses dans les Alpes intérieures et les plus élevées dans la vallée du Rhône et le long des pentes sud-ouest des Alpes. Des valeurs très faibles sont observées sur la côte méditerranéenne, en particulier en juillet, où l'on trouve en fait les paramètres de position ξ estimés les plus faibles de toutes les stations et de tous les mois (non montré). Les niveaux de retour de 50 ans les plus élevés de tous les mois peuvent être trouvés en septembre sur la côte méditerranéenne et dans la vallée du Rhône, où les estimations atteignent 100 mm/h à certains endroits. D'octobre à décembre, le schéma général reste le même, avec les valeurs les plus élevées dans la vallée du Rhône et le long de la côte, et des valeurs décroissantes partout.

La Figure 2.12 montre le même résultat, mais en utilisant les séries temporelles beaucoup plus longues disponibles en combinant les données « récentes » d'EDF avec, là où elles sont disponibles, les données anciennes. Les estimations sont donc basées sur des séries temporelles de 30 à 65 points de données (années) disponibles et peuvent être considérées comme plus robustes. La principale différence dans les résultats par rapport à la Figure 2.11 est l'absence de données sur la vallée du Rhône et la côte méditerranéenne, où l'on trouve les valeurs les plus élevées dans la Figure 2.11. Les valeurs de retour sur 50 ans trouvées sont assez faibles pendant la saison de décembre à avril, et plus élevées entre juin et septembre, avec les valeurs estimées les plus élevées en certains points locaux en juillet et août. Les Figures 2.11 et 2.12 montrent que pour tous les mois, les niveaux de retour à 50 ans sont généralement les plus bas dans les Alpes intérieures, plus élevés dans les

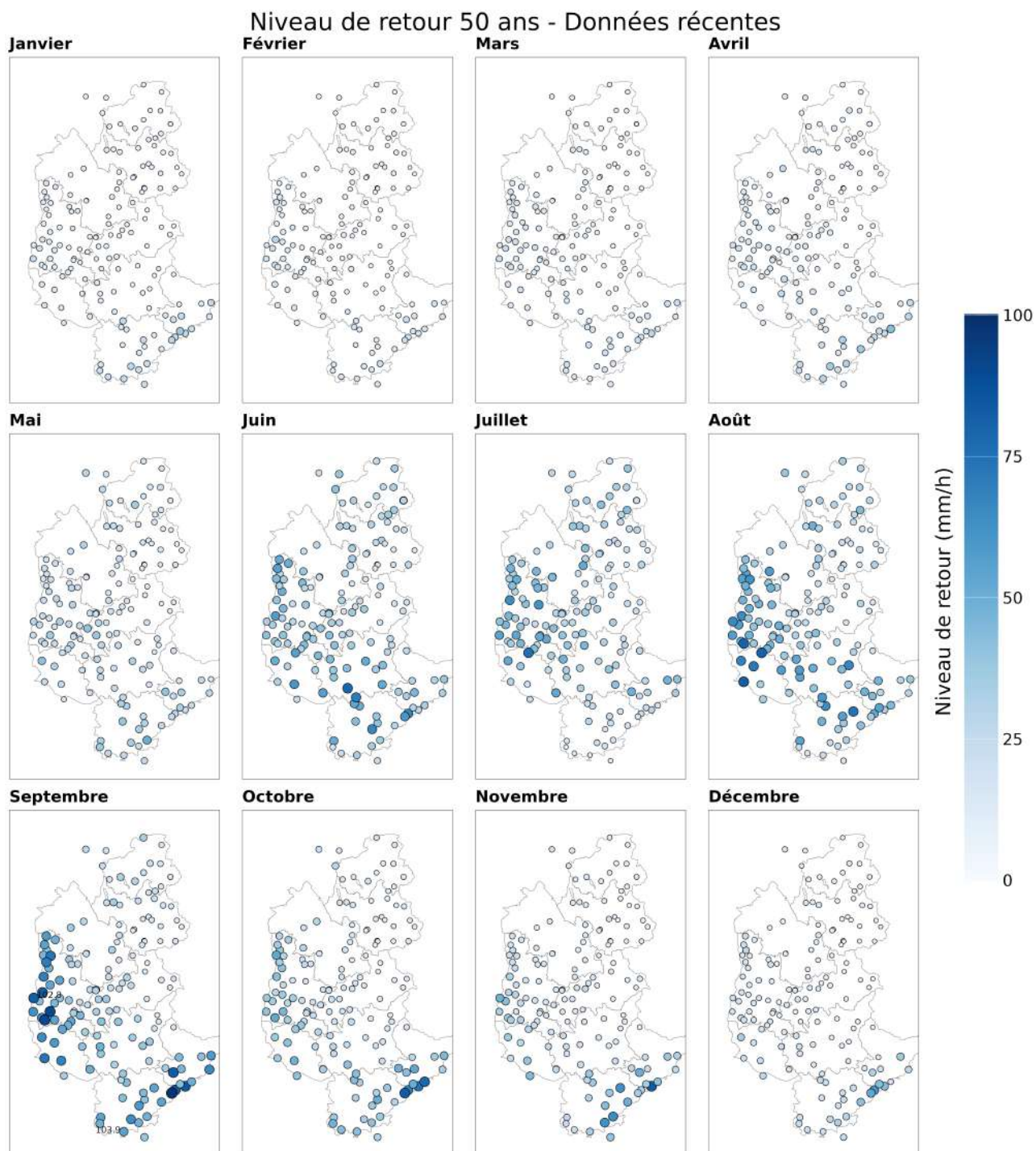


FIGURE 2.11 – Niveau de retour 50 ans pour chaque mois. Estimation stationnaire locale à partir des données d'EDF et de Météo France (données récentes, 25-42 ans de données). Figure réalisée par S. Berghald.

Préalpes et les plus élevés dans la vallée du Rhône et le long de la côte méditerranéenne (uniquement visible dans la Figure 2.12), ce qui est cohérent avec les patterns trouvés en France et en Suisse par d'autres études (ex. PANZIERA et al. 2018 ; FUKUTOME, LINIGER et SÜVEGES 2015 ; SAIDI-BOUODINA 1996).

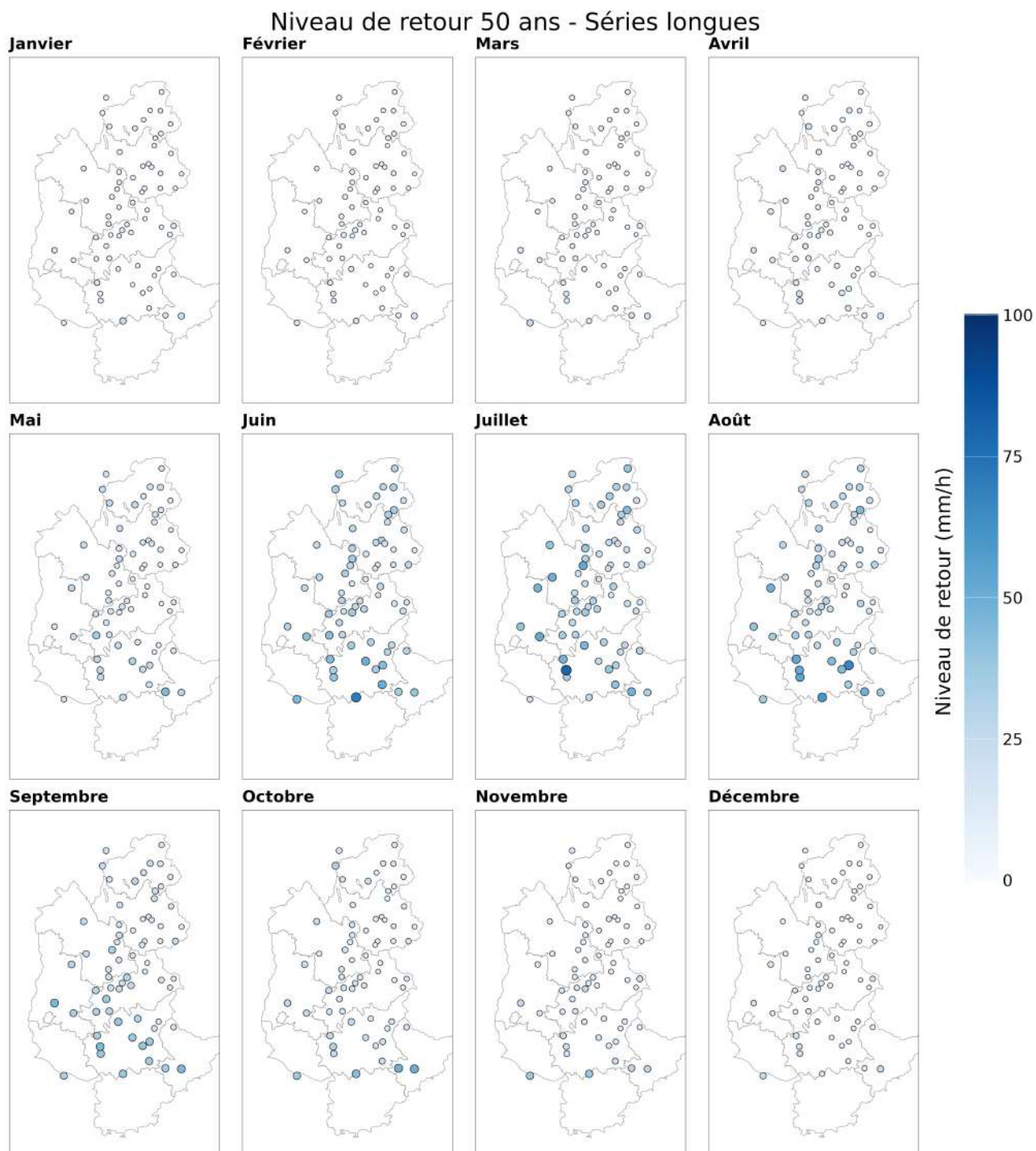


FIGURE 2.12 – Niveau de retour 50 ans pour chaque mois. Estimation stationnaire locale à partir des données d'EDF en incluant les données anciennes (30-65 ans de données). Figure réalisée par S. Berghald.

2.4.2 Les tendances

Comme le montre la Figure 2.13, les tendances basées sur estimation locale sont dans l'ensemble assez bruitées. Ceci est aussi illustré dans la Figure 2.14 qui montre les tendances du niveau de retour et du maximum moyen pour le mois d'août pour deux postes voisins dans la vallée de la Romanche. Dans l'ensemble, plus de stations présentent une tendance significative à la hausse qu'une tendance à la baisse.

En utilisant une approche locale-régionale avec un rayon de 45 km, le nombre de valeurs prises en compte pour l'estimation des niveaux de retour et des tendances est plus élevé (cf. Fig. 2.15) et les résultats sont beaucoup moins bruités et montrent des différences importantes d'un mois à l'autre (Fig. 2.16). La plupart des tendances se situent entre -30 et +30 % entre 1985 et 2022, les exceptions notables étant les mois de juin et de novembre, où les tendances atteignent 50-80 % sur ces 38 ans.

Mois par mois, les tendances observées sont les suivantes :

- Janvier : les tendances sont globalement faibles, avec des tendances positives dans les Alpes du Sud (non significatives) et dans l'est de la Savoie (significatives). Le reste des Alpes du Nord présente des tendances négatives (partiellement significatives).
- Février : on observe un gradient clair avec des tendances positives non significatives dans le sud-ouest de la région et des tendances négatives dans le nord-est, qui sont significatives dans la plupart de la Haute-Savoie.
- Mars : les tendances sont globalement négatives, et à nouveau significatives en Haute-Savoie.
- Avril : le mois est marqué par des tendances positives significatives sur la majeure partie de la région, à l'exception de la zone comprise entre les massifs de la Vanoise et du Queyras, à l'est, qui connaît des tendances négatives significatives.
- Mai : les tendances sont significativement positives sur la majeure partie du terrain, les tendances les plus fortes étant observées dans le sud-est. Cependant, une bande s'étendant approximativement du massif du Vercors à la Vanoise présente des tendances négatives faibles mais significatives.
- Juin : des tendances positives sont observées sur l'ensemble de la région, à l'exception d'une petite zone dans l'est de la Haute-Savoie. Ces tendances sont particulièrement significatives dans la moitié est du terrain et atteignent jusqu'à 50 % / 38 ans.
- Juillet : des tendances positives sont également observées dans la majeure partie du terrain, mais des tendances négatives (non significatives) peuvent être observées dans les parties sud-ouest.
- Août : des tendances positives significatives sont observées sur l'ensemble du terrain avec quelques valeurs isolées à l'ouest et, comme en juin, une région de tendances négatives faibles mais significatives dans l'est de la Haute-Savoie.
- Septembre : les tendances sont significativement positives dans les Hautes-Alpes et les Alpes-de-Haute-Provence, mais moins organisées et faibles ailleurs.
- Octobre : on observe des tendances positives partiellement significatives dans l'est et le sud-est, et des tendances faiblement négatives et majoritairement non significatives ailleurs.
- Novembre : les tendances les plus fortes sont observées en novembre : la quasi-totalité du terrain présente des tendances positives significatives allant jusqu'à 80 % / 38 ans.

- Décembre : des tendances positives significatives sont observées dans la plupart des Alpes du Sud, tandis que les tendances sont globalement faibles dans les Alpes du Nord.

En résumé

En résumé, les principales tendances observées sont les suivantes :

- Une faible diminution de janvier à mars dans les Alpes du Nord
- Des tendances généralement positives en avril et en mai, avec quelques exceptions locales
- Une augmentation de l'intensité pendant les mois d'été, qui est significative en particulier dans les massifs internes. L'exception notable ici est la partie sud-ouest de la région où l'on trouve des tendances négatives non significatives.
- De septembre à décembre, une diminution non significative dans les Alpes du Nord, et une augmentation significative dans les Alpes du Sud. En novembre, une augmentation forte est observée dans l'ensemble de la région.

2.4.3 Influence du rayon choisi

L'influence du choix du rayon pour l'approche régionalisée a également été testée. Alors que la différence entre l'approche locale d'une part et le rayon de 45 km d'autre part est très évidente, l'influence du rayon choisi semble jouer un rôle moins important (cf Fig. 2.13, 2.16, A.2, A.3). En général, plus le rayon est grand, plus les modèles généraux sont lisses et moins il y a de valeurs aberrantes. Le cas le plus intéressant est peut-être celui du mois d'octobre (cf Fig. 2.17) : Dans l'estimation locale, aucun schéma concluant ne peut être trouvé, ce qui est également le cas dans l'estimation régionalisée avec un rayon de 25 km. En utilisant un rayon de 35 km, deux régions distinctes commencent à émerger, avec des tendances positives dans le sud et l'est et des tendances négatives dans le nord et le massif des Ecrins. Cependant, lorsque l'on utilise un rayon de 45 km, les deux régions commencent clairement à se séparer en sud-est (tendances positives) et nord-ouest (tendances négatives). Un autre cas remarquable est celui de la partie sud-ouest du domaine en juillet, où des tendances négatives (non significatives) « commencent à apparaître » lorsque l'on augmente le rayon. Plus en détail, la comparaison entre les Figures 2.15a et 2.14b pour le poste EDF 1778 montre que la méthode locale-régionale n'augmente pas seulement le nombre de valeurs prises en compte pour l'estimation des niveaux de retour, mais peut aussi rallonger la longueur des séries.

2.5 Analyse des résultats

2.5.1 Relation température-intensité

Avant de discuter des moteurs physiques possibles des tendances observées, il est pertinent de considérer comment ces tendances évoluent avec le changement de température observé dans la région. Comme indiqué dans la Section 2.2.1.4, la tendance exacte de la température dans les Alpes françaises est difficile à déterminer. Une analyse à l'échelle européenne réalisée par TWARDOSZ, WALANUS et GUZIK (2021) a révélé des tendances dans cette région comprises entre 0,4°C par décennie en automne et 0,7°C par décennie en été pour la période 1985-2020. Une étude de BEAUMET et al. (2021) portant sur les Alpes françaises a également trouvé les tendances de température les plus faibles en automne (0,2°C par décennie) et les plus fortes en été (jusqu'à 0,6°C par décennie dans les Alpes internes). Cependant, ces tendances sont calculées sur la période 1959-2010.

Comme le montrent, par exemple, RIBES, CORRE et al. (2016) et RIBES, BOÉ et al. (2022), des tendances significatives de la température en France peuvent être observées depuis les années 1970-1980. Il est donc logique que la première étude mentionnée montre des tendances linéaires plus fortes. La tendance de la température moyenne en France métropolitaine trouvée par RIBES, BOÉ et al. (2022) en 2020 est d'environ 1,66°C par rapport à la période 1900-1930. Si nous supposons que la majeure partie de cette augmentation a eu lieu au cours des 40 dernières années, cela se traduirait par une tendance linéaire d'environ 0,4°C par décennie.

Une analyse visuelle rapide des graphiques d'évolution saisonnière des températures pour la station de la Grande-Chartreuse fournis par Météo France (ClimatHD) montre des tendances similaires d'environ 0,4°C/décennie en hiver, 0,5°C/décennie au printemps et à l'automne et 0,7°C/décennie en été. Sur l'ensemble de la période étudiée ici, cela représente un réchauffement d'environ 1,3°C, 2°C, 2,5°C et 2°C respectivement en hiver, au printemps, en été et en automne. Dans la Figure 2.18, je montre les tendances de la Figure 2.16 divisées par ces tendances moyennes de température des saisons respectives en tant que multiples de la relation de Clausius-Clapeyron de 7%/°C. L'échelle résultante se situe entre 1*CC et 2*CC pour la plupart des tendances positives, et atteint 5*CC à 7*CC pour les Alpes du Sud en novembre et décembre.

Les résultats globaux, avec leurs différences régionales et saisonnières, montrent que les tendances observées ne peuvent pas être expliquées uniquement par des effets thermodynamiques et que des changements dynamiques dans les circulation météorologiques à plus grande échelle doivent être pris en compte.

2.5.2 Les motifs à grande échelle

Dans cette section, j'essaie de donner quelques explications possibles des tendances observées.

Changement des circulations atmosphériques en hiver Pendant les mois d'hiver, très peu de convection a lieu, donc les précipitations horaires maximales peuvent probablement être attribuées à des événements de précipitations stratiformes. À cette saison, les tendances globales sont très similaires à celles observées pour les extrêmes de précipitations quotidiennes. BLANCHET, BLANC et CREUTIN (2021) (voir Figure 2.19) montrent une influence atlantique croissante, surtout pendant les mois d'hiver. Ces flux d'ouest ont été identifiés comme la principale origine des fortes précipitations en hiver. BLANCHET, BLANC et CREUTIN (2021) montrent aussi des tendances négatives des niveaux de retour de 20 ans des précipitations journalières, les plus prononcées dans les massifs internes, similaires aux tendances observées ici en février et mars. Cela suggère que les tendances des extrêmes horaires sont aussi liées aux circulations atmosphériques en hiver comme montré par BLANCHET, BLANC et CREUTIN (2021).

Différentes influences en avril et mai Les tendances en avril et mai sont difficiles à interpréter. Comme il s'agit de mois de transition, plusieurs facteurs pourraient jouer un rôle. Une activité orageuse qui se développe plus tôt dans l'année ou un changement des flux dominants pourraient être des explications. Très probablement, c'est un mélange de différents facteurs.

Intensification (thermo)dynamique des événements convectifs en été Les mois d'été, de juin à août, montrent des tendances à la hausse sur (presque) toute la région, ce qui n'est pas le cas pour les précipitations journalières (BLANCHET, BLANC et CREUTIN 2021). Cela suggère que l'intensification des précipitations horaires est principalement liée à des événements convectifs et est probablement le résultat d'une augmentation thermodynamique directe de l'humidité dans l'atmosphère ainsi que d'une intensification de la dynamique interne des orages en raison d'une disponibilité énergétique plus élevée (lien réchauffement-intensité de 1*CC à 2*CC). Le fait que les tendances les plus marquées en été sont observées dans les Alpes internes est également en accord avec GIORGI et al. (2016), qui ont trouvé une augmentation de l'activité convective en haute altitude dans les Alpes internes. Les tendances négatives (non significatives) en juillet pourraient être dues à une tendance générale vers des conditions très sèches dans la région méditerranéenne en été, entraînant une diminution de la disponibilité de l'humidité.

Augmentation de l'influence méditerranéenne en automne Les mois de septembre à décembre connaissent des tendances à la hausse des niveaux de retour de 20 ans dans la partie sud du domaine, atteignant jusqu'aux Alpes du Nord en novembre. Ce pattern général est cohérent avec les tendances trouvées par BLANCHET, BLANC et CREUTIN (2021), ce qui suggère que les tendances des extrêmes horaires sont également liées aux circulations atmosphériques. La saison d'automne dans cette région est caractérisée par des périodes de fortes intensités de précipitations provenant d'une forte évaporation sur la mer Méditerranée encore chaude ainsi que de l'arrivée des cyclones d'automne provoquant un flux méridional de la mer vers l'intérieur. Comme le montre la Figure 2.11, cette influence est la plus forte en septembre puis "se retire" vers la côte jusqu'en décembre. Étant donné que les températures

moyennes de la surface de la mer (SST) en Méditerranée augmentent (PASTOR, VALIENTE et KHODAYAR 2020), ce type de systèmes météorologiques pourrait être intensifié, ce qui expliquerait en partie les tendances à la hausse.

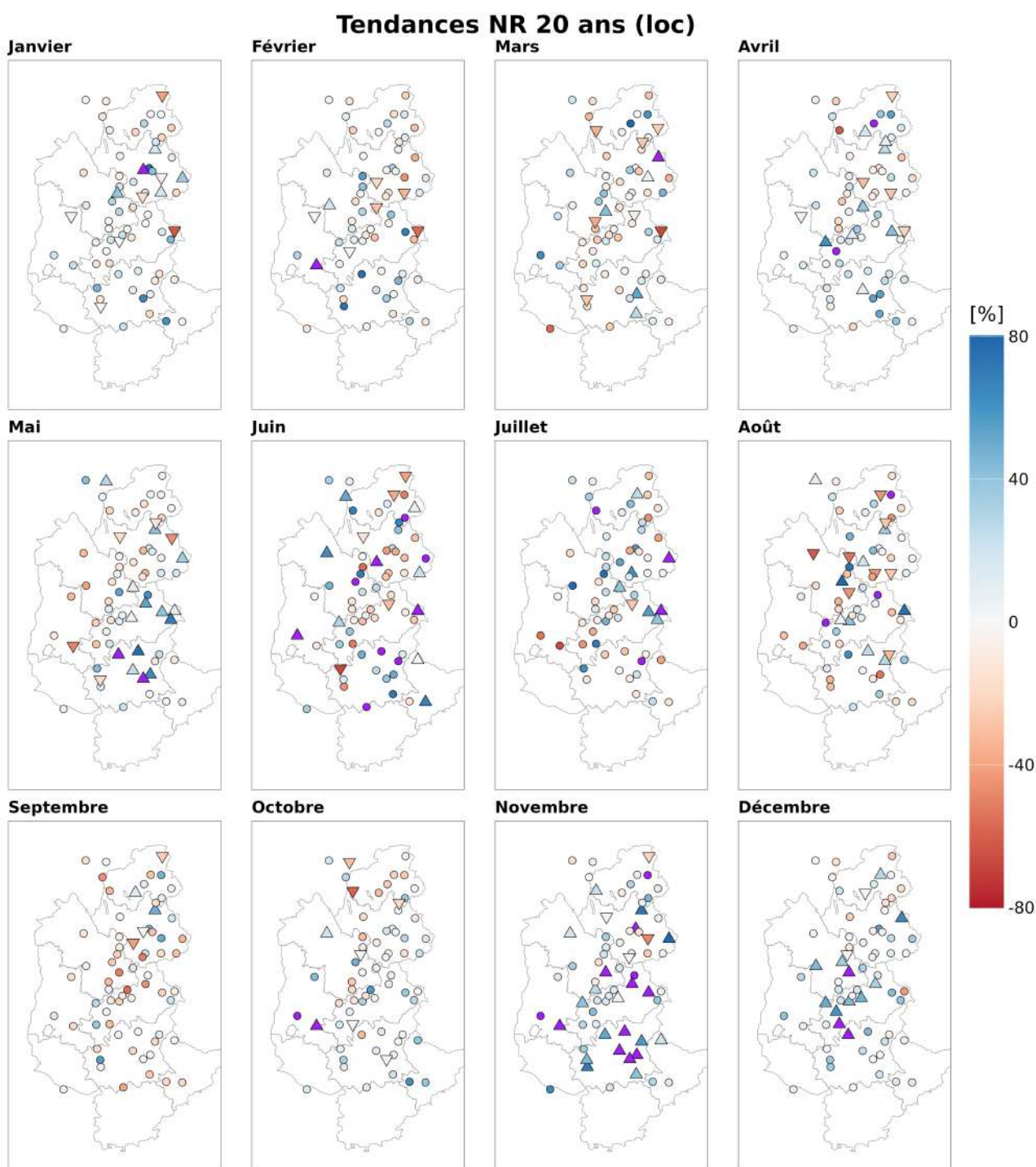


FIGURE 2.13 – Différence entre 1985 et 2022 normalisé par la valeur de 1985 (%/38 ans). Estimation non-stationnaire locale à partir des données d'EDF incluant les données anciennes (30-65 ans de données). Les tendances linéaires estimées avec un modèle $\mathcal{M}'_{\mu,\sigma}$ sont montrées en couleur. En violet des valeurs en dehors de l'échelle de couleur. Une triangle indique que un des modèles non-stationnaires est significativement mieux que le modèle stationnaire. Figure réalisée par S. Berghald.

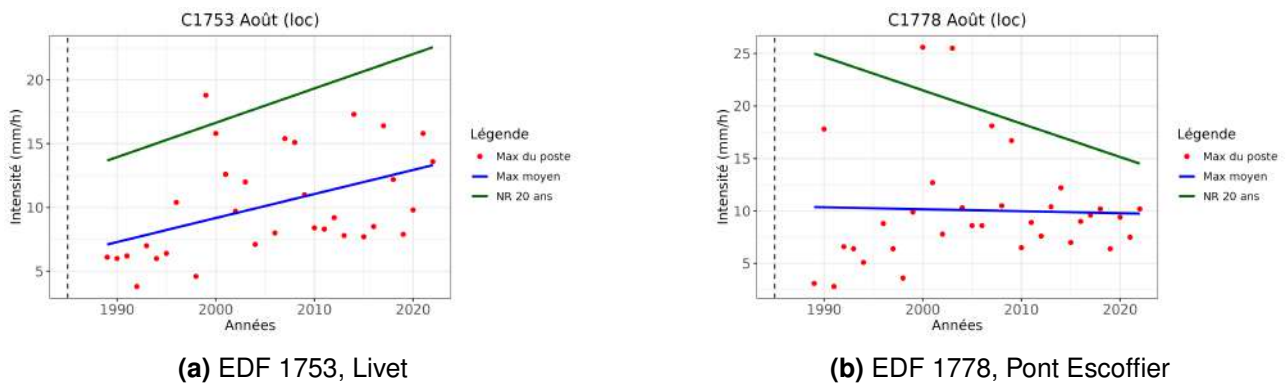
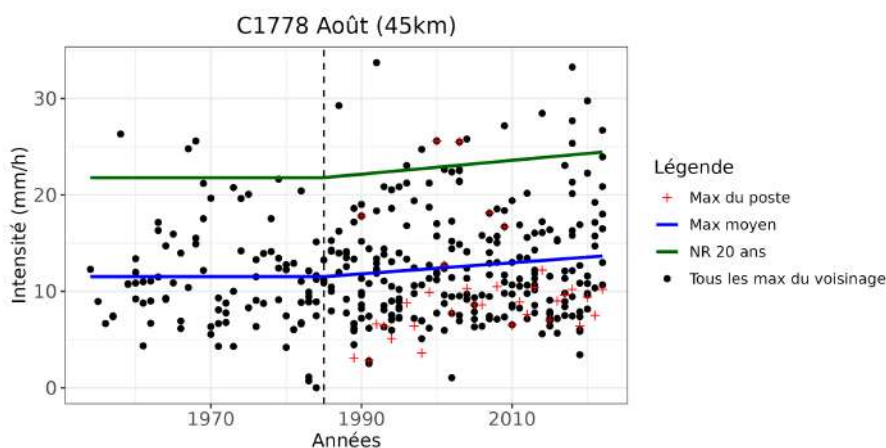
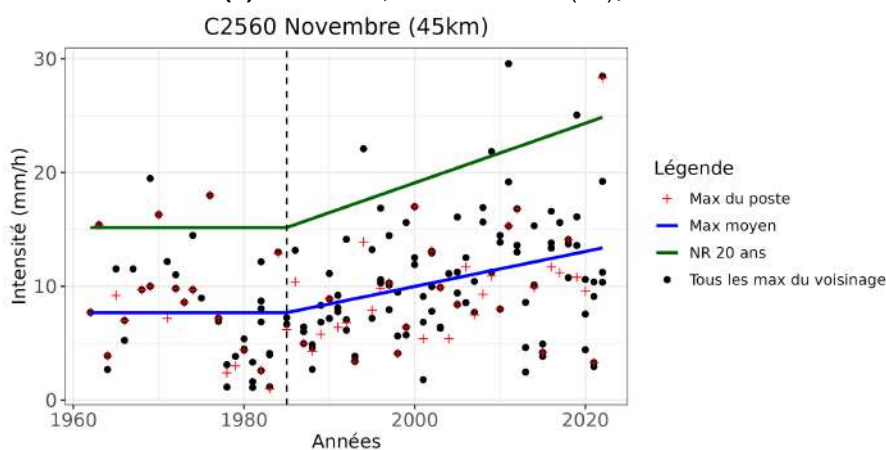


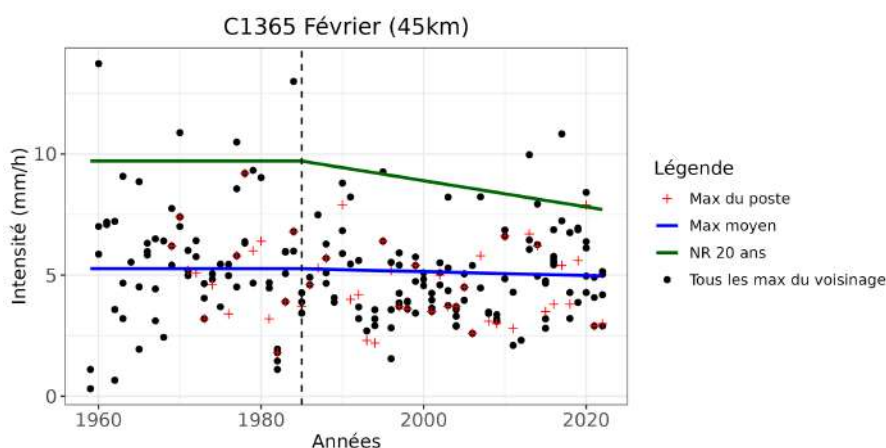
FIGURE 2.14 – Pour deux postes voisins : Maxima du mois d’août, tendance du maximum moyen et du niveau de retour 20 ans estimé à partir d’un modèle $\mathcal{M}'_{\mu,\sigma}$ non-stationnaire (stationnaire avant 1985). Figure réalisée par S. Berghald.



(a) EDF 1778, Pont Escoffier (38), août



(b) EDF 2560, Saint-Étienne-les-Orgues (04), novembre



(c) EDF 1365, Cluses-Pressy (74), février

FIGURE 2.15 – Maxima mensuels et tendances du maximum moyen et du niveau de retour à 20 ans estimé par approche régionale pour trois cas différents. Les valeurs issues de l’approche régionale sont montrées en noir, les observations du poste en rouge. (Toutes les observations du poste ne sont pas prises en compte pour l’estimation de la GEV en raison du *declustering*. Ce sont des événements qui ont été enregistrés à plusieurs postes dans le voisinage ; seule la valeur maximale est alors conservée.). L’estimation du maximum moyen est montrée en bleu, celle du niveau de retour 20 ans en vert. Figure réalisée par S. Berghald.

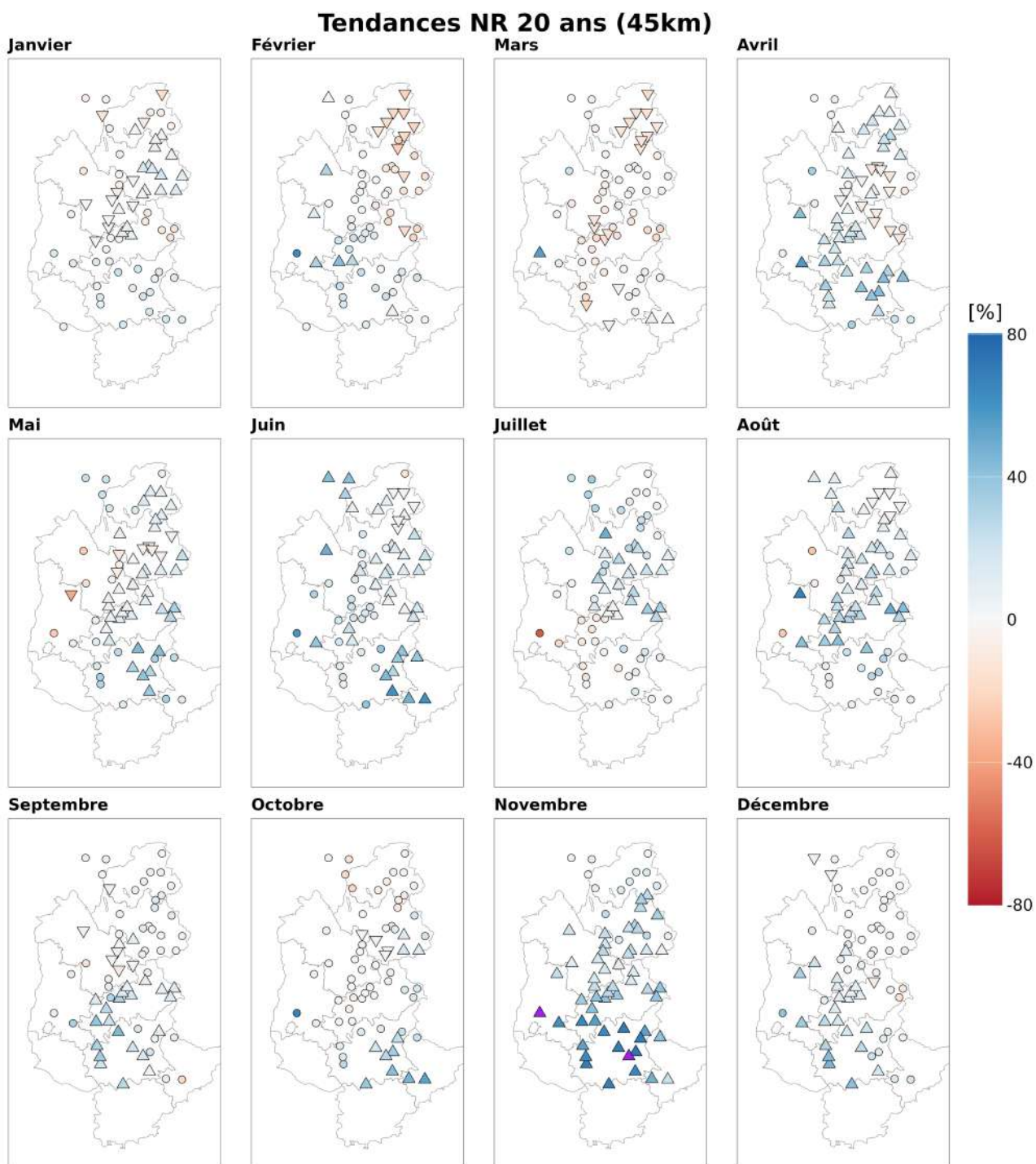


FIGURE 2.16 – Différence entre 1985 et 2022 normalisé par la valeur de 1985 (%/38 ans). Estimation non-stationnaire régionale (rayon 45 km) à partir des données d'EDF incluant les données anciennes (30-65 ans de données). Les tendances linéaires estimées avec un modèle $\mathcal{M}'_{\mu,\sigma}$ sont montrées en couleur. En violet des valeurs en dehors de l'échelle de couleur. Une triangle indique que un des modèles non-stationnaires est significativement mieux que le modèle stationnaire. Figure réalisée par S. Berghald.

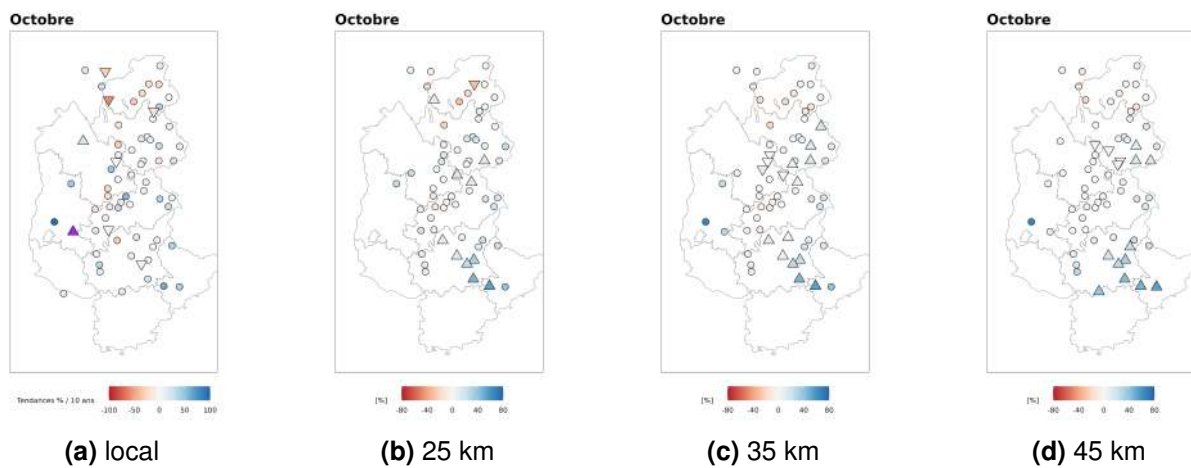


FIGURE 2.17 – Tendances du niveau de retour 20 ans en % / 38 ans pour le mois d’Octobre pour différent rayons. Estimation locale à gauche, puis 25, 35 et 45 km. Figure réalisée par S. Berghald.



FIGURE 2.18 – Mêmes tendances que sur la Figure 2.16, mais divisées par la tendance de la température moyenne à la station de la Grande-Chartreuse (1,3°C, 2°C, 2,5°C et 2°C respectivement en hiver, au printemps, en été et en automne) et représentées comme des multiples de la relation de Clausius-Clapeyron de 7%/°C. Les tendances négatives sont indiquées en orange. Figure réalisée par S. Berghald.

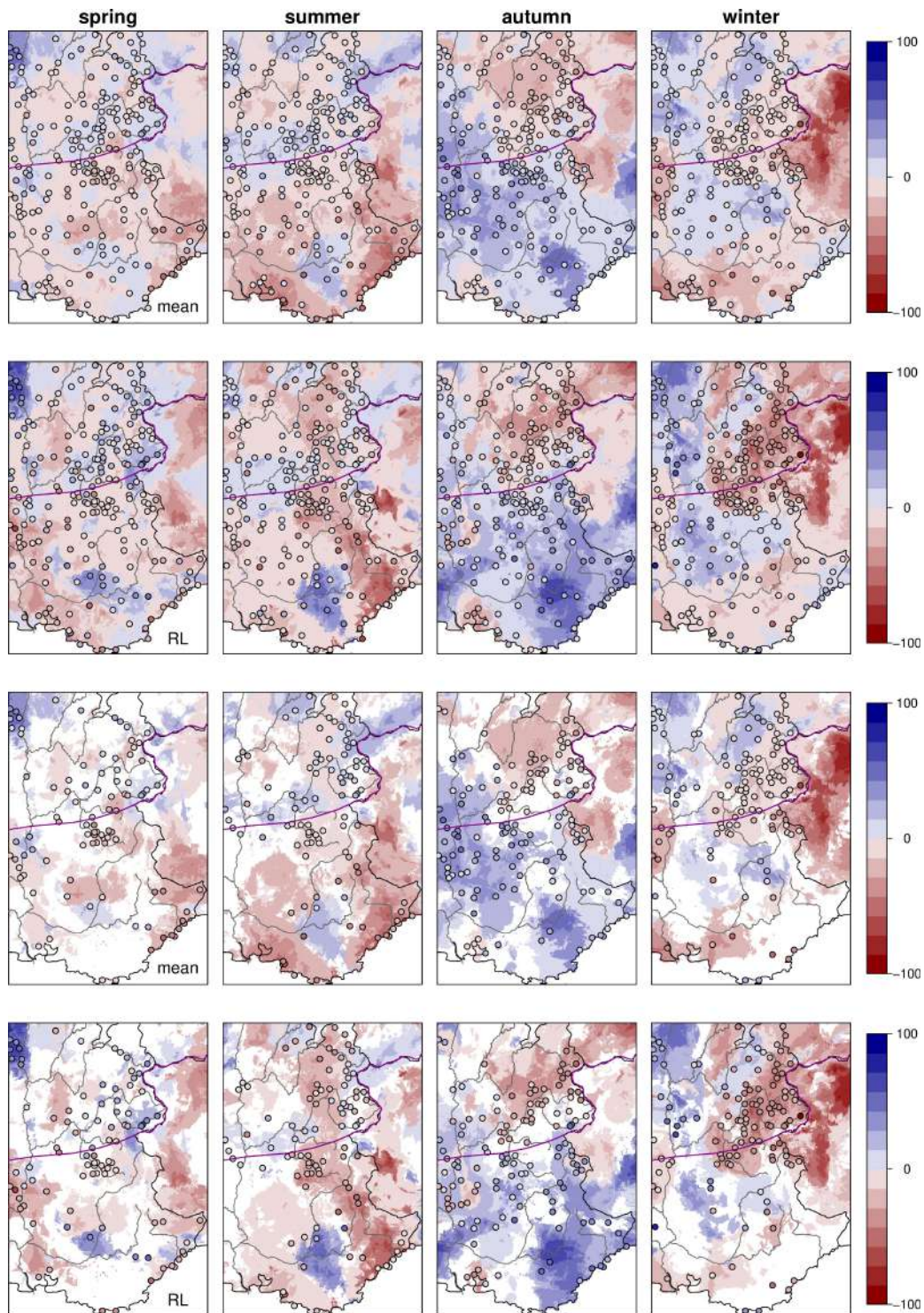


FIGURE 2.19 – Tendances relatives des maxima saisonniers de précipitations quotidiennes selon BLANCHET, BLANC et CREUTIN (2021) : changement sur la période 1958-2017 normalisé par la valeur moyenne sur la période (%/60 ans). Première ligne : maximum annuel moyen. Deuxième ligne : niveau de retour de 20 ans. Les estimations sont obtenues avec une approche régionalisée. À chaque point de grille, le meilleur modèle non stationnaire est considéré. Les changements relatifs sont calculés par rapport aux valeurs moyennes sur la période d'étude. Troisième et quatrième ligne : pareil que ci-dessus, en masquant les points de grille non significatifs. Pour plus de détails, voir : BLANCHET, BLANC et CREUTIN (2021) (source de la figure).

3

Discussion et conclusion

Sommaire

3.1 Estimation des niveaux de retour stationnaire	54
3.2 Estimation des tendances	54
3.3 Résumé et perspectives	55
Références	57

DANS ce mémoire, j'ai appliqué la théorie généralisée des valeurs extrêmes à un ensemble de données d'observations horaires de l'intensité des précipitations dans les Alpes françaises. D'abord, en utilisant un cadre stationnaire, j'ai estimé les niveaux de retour de l'intensité des précipitations horaires sur une base mensuelle. Ceci peut, dans une certaine mesure, être considéré comme une mise à jour du travail de DJERBOUA (2001) avec les séries temporelles beaucoup plus longues disponibles. Ensuite, en appliquant un cadre non stationnaire, j'ai montré que les caractéristiques des extrêmes de précipitations horaires dans les Alpes françaises ont changé depuis les années 1980.

3.1 Estimation des niveaux de retour stationnaire

J'ai appliqué la théorie des valeurs extrêmes stationnaires à des séries temporelles de plus de 25 ans d'observations. Bien que cette méthode soit largement utilisée dans l'étude des extrêmes, elle n'est pas sans limite. Notamment, les estimations dépendent fortement de la qualité et de la longueur des séries temporelles. Il est donc important de garder à l'esprit que la présence (ou l'absence) d'événements uniques peut considérablement influencer les estimations du GEV. Par exemple, dans les Figures 2.12 et 2.13, certains points individuels se détachent de leurs environs, ce qui n'est probablement pas dû au fait que la climatologie de cette station est très différente de celle des environs. Cependant, comme nous l'avons déjà dit, les modèles généraux sont largement cohérents et ne surprennent pas les personnes qui connaissent le climat de la région, ce qui nous donne confiance dans la méthodologie.

Une autre hypothèse forte doit également être prise en compte : l'hypothèse de stationnarité. Si la distribution des précipitations horaires (c'est-à-dire le climat) n'est pas stationnaire, toute estimation basée sur un cadre stationnaire s'accompagnera d'une incertitude supplémentaire. Dans ce mémoire, j'ai montré que l'hypothèse de non-stationnarité ne s'applique pas partout, et qu'il est donc nécessaire d'appliquer un cadre non-stationnaire pour obtenir une meilleure estimation des niveaux de retour à un moment donné dans le temps.

Enfin, et cela est lié au point précédent, pour estimer une seule distribution sur une série temporelle on suppose qu'elle viennent toutes de la même distribution. Ceci est difficile dans le monde réel, car par exemple, les maxima des précipitations horaires extrêmes peuvent être générés par des mécanismes météorologiques très différents, tels que les précipitations stratiformes ou convectives. En utilisant une analyse mensuelle, nous pouvons surmonter ce problème dans une certaine mesure, car les extrêmes de précipitations sont susceptibles d'être causés par un type de temps dominant dans les mois individuels.

3.2 Estimation des tendances

La non-stationnarité est introduite dans le cadre statistique en permettant à une ou plusieurs variables de la distribution de varier linéairement avec le temps. Plusieurs hypothèses sont prises ici, qui introduisent chacune potentiellement une certaine incertitude : (i) Nous supposons que la distribution change linéairement avec le temps, ce qui est très simplificateur

puisqu'il n'y a pas de dépendance physique directe des précipitations par rapport au temps. Nous utilisons la linéarité ici car c'est la plus simple des tendances et la "vraie" relation physique est inconnue (si elle était connue, tout cet exercice serait inutile). (ii) D'un point de vue statistique, l'introduction du temps comme covariable signifie des paramètres supplémentaires à estimer, ce qui se traduit à son tour par une incertitude (beaucoup) plus élevée des estimations si la même quantité de données est utilisée. C'est ce que montre, par exemple, la comparaison entre la Figure 2.12 et la Figure 2.13 : Alors que les niveaux de retour stationnaires sont largement cohérents dans l'espace et le temps, les tendances estimées sont principalement caractérisées par du bruit dans l'approche locale. Ici, j'ai utilisé une approche régionalisée afin de surmonter ce problème : j'ai regroupé les maxima observés à chaque station individuelle avec les maxima mis à l'échelle de ses environs, augmentant ainsi considérablement le nombre de points de données disponibles pour l'estimation de la valeur de retour. Cette approche s'accompagne d'une autre hypothèse forte : Nous supposons que le voisinage de chaque station est statistiquement homogène, ce qui n'est pas nécessairement le cas. D'autres études (ex. CARREAU et al. 2013) ont donc utilisé une procédure itérative combinée à un test d'homogénéité afin de trouver le meilleur rayon pour chaque station (par exemple la source), ce qui n'entrait pas dans le cadre de ce projet. En utilisant un rayon de 45km, j'ai trouvé des tendances qui semblent spatialement cohérentes.

3.3 Résumé et perspectives

Les niveaux de retour stationnaires trouvés constituent une mise à jour importante des résultats plus anciens basés sur la théorie GEV, notamment les résultats de KIEFFER-WEISSE (1998) et DJERBOUA (2001) qui sont dans une certaine mesure dépassés par le changement climatique en cours. Cependant, d'autres produits pour l'estimation des niveaux de retour existent (notamment SHYREG) et sont largement utilisés dans les Alpes françaises, par exemple pour le dimensionnement des aménagements de protection contre les crues. Il serait donc très intéressant de comparer les résultats présentés ici avec d'autres produits pour voir si les niveaux de retour obtenus par les différentes méthodes sont cohérents, ce qui augmenterait considérablement la confiance dans les résultats.

Le résultat le plus important de cette étude réside dans la détection de tendances significatives et partiellement fortes des extrêmes de précipitations horaires en toutes saisons. En hiver, ces tendances sont généralement faibles et partiellement négatives. Durant cette saison, les précipitations horaires ne sont généralement pas très intenses, et les inondations sont généralement générées par des événements de précipitations à grande échelle de longue durée ou des périodes de forte fonte des neiges. Cependant, les tendances partiellement fortes et positives (de l'ordre de 10% par décennie) durant les mois d'été sont intéressantes : comme les niveaux de retour sont déjà assez élevés en raison de la forte activité convective, cette augmentation relative se traduit par une augmentation absolue élevée des intensités de précipitations extrêmes. De plus, tant la littérature disponible issue d'études ailleurs (ex. FOWLER, ALI et al. 2021 ; CANNON, JEONG et YAU 2024 ; AYAT et al. 2022) que le ressenti général des praticiens de la région (par exemple RTM ou Météo France) suggèrent

que l'augmentation de l'intensité des précipitations pourrait être plus élevée à mesure que l'intervalle de temps considéré est plus court. Les tendances que je présente dans ce mémoire pour les intensités horaires sont déjà significativement plus fortes que celles trouvées par BLANCHET, BLANC et CREUTIN (2021) pour les précipitations quotidiennes. Il est possible que l'étude des intensités de précipitations infra-horaires (par exemple 6 ou 15 minutes) révèle des tendances encore plus élevées, ce qui aurait de conséquences importantes, par exemple, pour l'occurrence de crues éclairs. Malheureusement, contrairement à Météo France, EDF ne stocke pas opérationnellement de données à des pas de temps aussi courts. Cependant, certaines des stations de Météo France sont en fonctionnement depuis suffisamment longtemps pour qu'une analyse de tendance soit possible, au moins pour les tendances des maxima moyens mensuels et annuels.

Références

- AUER, Ingeborg et al. (jan. 2007). « HISTALP—historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region ». In : *International Journal of Climatology* 27.1, p. 17-46.
- AYAT, Hooman et al. (nov. 2022). « Intensification of subhourly heavy rainfall ». In : *Science* 378.6620, p. 655-659.
- BARBERO, Renaud et al. (déc. 2019). « A synthesis of hourly and daily precipitation extremes in different climatic regions ». In : *Weather and Climate Extremes* 26.
- BAUER, Victoria M. et Simon C. SCHERRER (mai 2024). « The observed evolution of sub-daily to multi-day heavy precipitation in Switzerland ». In : *Atmospheric Science Letters*.
- BEAUMET, Julien et al. (déc. 2021). « Twentieth century temperature and snow cover changes in the French Alps ». In : *Regional Environmental Change* 21.4, p. 114.
- BÉNÉVENT, Ernest (1926). *Le climat des Alpes françaises / Ernest Bénévent*. fre. Paris.
- BLANC, Antoine (2022). *Grenoble Alpes Métropole et son adaptation au changement climatique - Caractérisation et évolution des scénarios atmosphériques générateurs de précipitations extrêmes dans les Alpes du Nord françaises*. fre.
- BLANCHET, Juliette, Antoine BLANC et Jean-Dominique CREUTIN (sept. 2021). « Explaining recent trends in extreme precipitation in the Southwestern Alps by changes in atmospheric influences ». In : *Weather and Climate Extremes* 33.
- BLANCHET, Juliette et Jean-Dominique CREUTIN (2022). *Instrumental agreement and retrospective analysis of trends in 1 precipitation extremes in the French Mediterranean Region*. Rapp. tech.
- BLANCHET, Juliette, Gilles MOLINIÉ et Julien TOUATI (août 2016). « Spatial analysis of trend in extreme daily rainfall in southern France ». In : *Climate Dynamics* 51.3, p. 799-812.
- BURN, Donald H. (oct. 1990). « Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach ». In : *Water Resources Research* 26.10, p. 2257-2265.
- CANNON, Alex J., Dae-Il JEONG et Ka-Hing YAU (juin 2024). « Updated Observations Provide Stronger Evidence for Increases in Subhourly to Hourly Extreme Rainfall in Canada ». In : *Journal of Climate* 37.12, p. 3393-3411.
- CANTET, Philippe, Jean-Noël BACRO et Patrick ARNAUD (mars 2011). « Using a rainfall stochastic generator to detect trends in extreme rainfall ». In : *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 25.3, p. 429-441.

- CARREAU, Julie et al. (2013). « Extreme rainfall analysis at ungauged sites in the South of France : comparison of three approaches ». In : *Journal de la Société Française de Statistique* 154.2, p. 119-138.
- COLES, Stuart (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. London : Springer London.
- CONVENTION ALPINE (2015). *RSA5 : Les Changements Démographiques dans les Alpes*. Rapp. tech. Innsbruck : Secrétariat permanent de la Convention alpine.
- DALLAN, Eleonora et al. (2022). « Enhanced summer convection explains observed trends in extreme subdaily precipitation in the northeastern Italian Alps ». In : 1. URL : <https://doi.org/10.1002/essoar.10507107/v2>.
- DATA.GOUV.FR et MÉTÉO FRANCE (2023). *La météo et le climat en Open Data*. URL : <https://meteo.data.gouv.fr/datasets/donnees-climatologiques-de-base-horaires/>.
- DJERBOUA, Abdelatif (2001). « Prédétermination des pluies et crues extrêmes dans les Alpes franco-italiennes : prévision quantitative des pluies journalières par la méthode des analogues. » Thèse de doct. Grenoble : Grenoble INP.
- FISHER, R. A. et L. H. C. TIPPETT (avr. 1928). « Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample ». In : *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 24.2, p. 180-190.
- FOWLER, Hayley J., Haider ALI et al. (avr. 2021). « Towards advancing scientific knowledge of climate change impacts on short-duration rainfall extremes ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 379.2195.
- FOWLER, Hayley J., Geert LENDERINK et al. (fév. 2021). *Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes*.
- FUKUTOME, S., M. A. LINIGER et M. SÜVEGES (mai 2015). « Automatic threshold and run parameter selection : a climatology for extreme hourly precipitation in Switzerland ». In : *Theoretical and Applied Climatology* 120.3-4, p. 403-416.
- GARÇON, Rémy (1993). *Préfecture de la Région Rhône-Alpes Contrat de Plan Etat-Région Rhône-Alpes Programme de recherche sur les risques naturels Action conjointe EDF-DTG-CEMAGREF*. Rapp. tech. URL : https://risknat.org/wp-content/uploads/2021/08/02-Garcon_1993-Courbes_IDF.pdf.
- GILLELAND, Eric et Richard W. KATZ (2016). « extRemes 2.0 : An Extreme Value Analysis Package in *R* ». In : *Journal of Statistical Software* 72.8.
- GIORGI, Filippo et al. (août 2016). « Enhanced summer convective rainfall at Alpine high elevations in response to climate warming ». In : *Nature Geoscience* 9.8, p. 584-589.
- GRARD, R. et D. DUBAND (1969). « Evaluation des risques de fortes précipitations sur les régions alpines françaises selon la saison - Utilisation du GRADEX ». In : *La Météorologie* 5.10-11, p. 217-227.
- GUILLOU, Yann (fév. 2018). « L'automatisation des observations météorologiques de surface à Météo-France. Une r-évolution ». In : *La Météorologie* 100 Spécial Anniversaire 25 ans, p. 96.

- IPCC (2023). *Climate Change 2023 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Sous la dir. de CORE WRITING TEAM, H. LEE et J. ROMERO. Geneva, Switzerland : IPCC.
- IPCC / GIEC (mai 2022). « High Mountain Areas ». In : *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Cambridge University Press, p. 131-202.
- KATZ, Richard W. (2013). « Statistical Methods for Nonstationary Extremes ». In : p. 15-37.
- KIEFFER-WEISSE, Anne (1998). « Étude des précipitations exceptionnelles de pas de temps court en relief accidenté (Alpes françaises) - Méthode de cartographie des précipitations extrêmes ». Thèse de doct. Grenoble : Grenoble INP.
- KOTLARSKI, Sven et al. (jan. 2023). « 21st Century alpine climate change ». In : *Climate Dynamics* 60.1-2, p. 65-86.
- LANG, Michel et al. (avr. 2014). « Résultats du projet ExtraFlo (ANR 2009-2013) sur l'estimation des pluies et crues extrêmes ». In : *La Houille Blanche* 2, p. 5-13.
- LEJEUNE, Yves et al. (jan. 2019). « 57 years (1960-2017) of snow and meteorological observations from a mid-altitude mountain site (Col de Porte, France, 1325 m of altitude) ». In : *Earth System Science Data* 11.1, p. 71-88.
- LORIAUX, Jessica M. et al. (nov. 2013). « Understanding Convective Extreme Precipitation Scaling Using Observations and an Entraining Plume Model ». In : *Journal of the Atmospheric Sciences* 70.11, p. 3641-3655.
- MARTINKOVA, Marta et Jan KYSELY (juill. 2020). « Overview of Observed Clausius-Clapeyron Scaling of Extreme Precipitation in Midlatitudes ». In : *Atmosphere* 11.8, p. 786.
- MENEGOZ, Martin et al. (nov. 2020). « Contrasting seasonal changes in total and intense precipitation in the European Alps from 1903 to 2010 ». In : *Hydrology and Earth System Sciences* 24.11, p. 5355-5377.
- MÉTÉO FRANCE (fév. 2020). *Une brève histoire de l'observation*. URL : <https://meteofrance.com/magazine/meteo-histoire/observation/une-breve-histoire-de-lobservation>.
- NAAIM-BOUVET, Florence et Didier RICHARD (2015). *Les risques naturels en montagne*. fre ; eng. 1^{re} éd. Paris, France : Editions Quae.
- OBLED, Charles, Didier RICHARD et Sophie TIESLER (nov. 2000). *Etude de réseaux hydro-pluviométriques dans les grandes communautés urbaines*. Rapp. tech. INP Grenoble, CEMAGREF, ENSHMAG, LTHE.
- OPENAI (2024). *ChatGPT*. URL : <https://chat.openai.com/chat>.
- PANZIERA, L. et al. (août 2018). « A 12-year radar-based climatology of daily and sub-daily extreme precipitation over the Swiss Alps ». In : *International Journal of Climatology* 38.10, p. 3749-3769.
- PAPALEXIOU, Simon Michael et Alberto MONTANARI (juin 2019). « Global and Regional Increase of Precipitation Extremes Under Global Warming ». In : *Water Resources Research* 55.6, p. 4901-4914.

- PASTOR, Francisco, Jose Antonio VALIENTE et Samiro KHODAYAR (août 2020). « A Warming Mediterranean : 38 Years of Increasing Sea Surface Temperature ». In : *Remote Sensing* 12.17, p. 2687.
- PERRET, C. et al. (juin 2012). *Le réseau d'observation hydroclimatologique de montagne d'EDF-Etat des lieux. Mesures de débit par dilution d'un traceur fluorescent*.
- POSCHLOD, B. et al. (déc. 2018). « Comparison and Evaluation of Statistical Rainfall Disaggregation and High-Resolution Dynamical Downscaling over Complex Terrain ». In : *Journal of Hydrometeorology* 19.12, p. 1973-1982.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM (2024). *QGIS Geographic Information System*. URL : <https://www.qgis.org>.
- R CORE TEAM (2024). *R : A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria. URL : <https://www.R-project.org/>.
- RIBES, Aurélien, Julien BOÉ et al. (oct. 2022). « An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint ». In : *Earth System Dynamics* 13.4, p. 1397-1415.
- RIBES, Aurélien, Lola CORRE et al. (sept. 2016). « Issues in estimating observed change at the local scale - a case study : the recent warming over France ». In : *International Journal of Climatology* 36.11, p. 3794-3806.
- RIBES, Aurélien, Soulivanh THAO et al. (jan. 2019). « Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean ». In : *Climate Dynamics* 52.1-2, p. 1095-1114.
- SAIDI-BOUODINA, Samia (1996). « Étude des pluies extrêmes dans la région des Alpes françaises et leur relation avec la topographie ». Thèse de doct. Grenoble : Grenoble INP.
- SCHROEER, K. et G. KIRCHENGAST (juin 2018). « Sensitivity of extreme precipitation to temperature : the variability of scaling factors from a regional to local perspective ». In : *Climate Dynamics* 50.11-12, p. 3981-3994.
- TARDIEU, Jean et Michel LEROY (2003). *Radome, le réseau temps réel d'observation au sol de Météo-France Pourquoi Radome ?* Rapp. tech., p. 40.
- TWARDOSZ, Robert, Adam WALANUS et Izabela GUZIK (oct. 2021). « Warming in Europe : Recent Trends in Annual and Seasonal temperatures ». In : *Pure and Applied Geophysics* 178.10, p. 4021-4032.
- WESTRA, Seth et al. (jan. 2012). « Continuous rainfall simulation : 1. A regionalized subdaily disaggregation approach ». In : *Water Resources Research* 48.1.
- WICKHAM, Hadley (2016). *ggplot2 : Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer International Publishing. URL : <https://ggplot2.tidyverse.org>.
- WICKHAM, Hadley et al. (nov. 2019). « Welcome to the Tidyverse ». In : *Journal of Open Source Software* 4.43, p. 1686.



Annexes

Sommaire

A.1	Information supplémentaire sur des observations de précipitation disponible dans la région	62
A.1.1	Quelques points généraux sur les stations de Météo France et d'EDF	62
A.1.2	Sources de données non utilisées	63
A.1.3	Saisonalité des paramètres de la GEV (en stationnaire)	64
A.1.4	Approche régionalisée : résultats avec des rayons différentes	66
A.2	Métadonnées	67

A.1 Information supplémentaire sur des observations de précipitation disponible dans la région

A.1.1 Quelques points généraux sur les stations de Météo France et d'EDF

Même si les données faisaient objet d'un contrôle par les services responsables, il reste la possibilité que quelques problèmes ont échappé à ces services. DJERBOUA (2001) a détecté deux problèmes majeurs avec le réseau de pluviographes dans la région : (i) Le problème d'échantillonnage lié à des séries temporelles trop courtes, et (ii) les stations répétées car fournies par deux organismes différentes. Par exemple, suite à un accord entre EDF et Météo France dans les années 1970, quelques stations étaient en gestion commune, mais le traitement des données était fait par chaque organisme à sa manière. Les stations répétées détectées par DJERBOUA (2001) ne sont pas incluses, ou juste une fois, dans notre jeu de données. Par contre, j'ai trouvé plusieurs stations localisées au même endroit (à quelques mètres près) et donc potentiellement répétées :

- Coursegoules, 06 (6050002, exclu, car <25 années complètes, 1998-2024) et EDF (C2816).
- Allos, 04 : EDF (C2602, 1980-2024) et Météo France (4006005, 2010-2024, exclu)
- Saint-Etienne-de-Tinée, 06 : EDF (C2822, 1983-2022) et Météo France (6120004, 2007-2024, exclu)
- Arvieux, 05 : EDF (C2436, 1984-2022), Météo France (5007001, 1987-2020, exclu)
- Chamonix, 74 : EDF (C1344, 1983-2022) et Météo France (74056001, 1992-2024)

Un autre problème potentiel est la possibilité qu'il y a des postes qui existent sous deux noms différents, par exemple suite à un déplacement de la station. Suite à une analyse visuelle de la carte des stations, je pense que c'est très probablement le cas pour :

- Nyons, 26 (26220009 : 1992-2004, 26220010 : 2004-2021, 0,5km)
- Murs, 84 (84085003 : 1993-2007, 84085004 : 2007-2024, 1,5km)
- Saint-Maximin-la-Sainte-Baume, 83 (83116004 : 1997-2012, 83116022 : 2006-2024, 0,5km)
- Pégomas, 06 (6090001 : 1993-2010, 6090002 : 2010-2024, 5,5km)
- Saint-André-les-Alpes / La Mure-Argens, 04 (4173002 : 1993-2005, 4136001 : 2005-2024, 2km)
- Arvieux, 05 (5007001 : 1987-2020, 5007003 : 2007-2024, EDF-C2436 : 1984-2022). Les postes Météo France sont supprimés, la station EDF gardée.

Toutes ces stations sont supprimées car séries temporelles trop courtes.

A.1.2 Sources de données non utilisées

Dans la région des Alpes et pré-Alpes françaises, il y a d'autres acteurs qui gèrent des réseaux de pluviographes (pour la plupart très localisées). Ici, j'inclus une liste de toutes les données et acteurs que j'ai pu trouver (Merci à Brice Boudevillain, Charles Obled et Etienne Leblois) :

- Le Groupe régional d'experts sur le climat en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (GREC-SUD) a instrumenté depuis 50 ans le bassin versant du Réal Collobrier (83) avec, entre autres, 15 pluviographes. Plus d'infos sur le site du GREC-SUD : <http://www.grec-sud.fr/>.
- Les gestionnaires du réseau autoroutier, étant obligés de fournir des informations sur les panneaux d'affichage en temps réel au cas de fortes précipitations, ont parfois aussi leur propres pluviographes le long des autoroutes. C'était visiblement le cas pour l'autoroute A8 qui relie Aix-en-Provence à la Côte d'Azur (Merci Charles Obled). La disponibilité et qualité de ces données est inconnue.
- Le Centre d'Information Régional Agrométéorologique de la région PACA (CIRAME) entretient un réseau de stations météorologique notamment dans la région PACA, mais certains postes sont aussi en Rhône-Alpes. Une partie de ces données est disponible en libre accès, le reste est payant. <http://www.agrometeo.fr/>
- Depuis 2007, une association d'amateurs de la météorologie (ROMMA) a mis en place un réseau de stations météorologiques dans l'ensemble du territoire des Alpes françaises. www.romma.fr
- Sur le Col de Porte (Chartreuse) le Centre d'Etudes de la Neige (CEN) entretient un site nivo-météorologique depuis 1961. Des observations à pas de temps horaires étaient faites depuis 1993 pendant les mois d'octobre à juin (calibration des instruments en été), et pour toute l'année depuis 2015 (LEJEUNE et al. 2019).
- La Ville de Marseille a installé, sur son territoire, cinq pluviographes en 1985, augmenté à 25 pluviographes en 1990 sur un territoire d'environ 180 km². En 2000, ce réseau était géré par le Service d'Assainissement Marseille (SERAM). Les informations les plus actuelles que j'ai datent de novembre 2000. (OBLED, RICHARD et TIESLER 2000).
- Un réseau de pluviographes dense est également installé sur le territoire de la ville de Genève. Le Département du territoire (DT), Service de l'Ecologie de l'Eau (SECOE), Entité Dynamique de l'Eau du Canton de Genève en est en charge. Six pluviographes qui était installé avant l'année 2000 ont encore actifs. Les métadonnées sont disponible sur le site du SITG : https://ge.ch/sitg/sitg_catalog/sitg_donnees. En théorie, les données peuvent être téléchargées ici : https://www.vhg.ch/xt_vh_718536/station_list.php?cfg=display_VH_PLUVIO*mode_map.
- La région du Piémont en Italie dispose également d'un réseau dense de pluviographes géré par le service ARPA Piemonte. L'accès au données directement sur internet (<https://>

[//www.arpa.piemonte.it/dati-ambientali/riciesta-dati-orari-meteorologici](http://www.arpa.piemonte.it/dati-ambientali/riciesta-dati-orari-meteorologici)) est limité, mais les données peuvent être fournies sous demande (info.meteo@arpa.piemonte.it).

A.1.3 Saisonalité des paramètres de la GEV (en stationnaire)

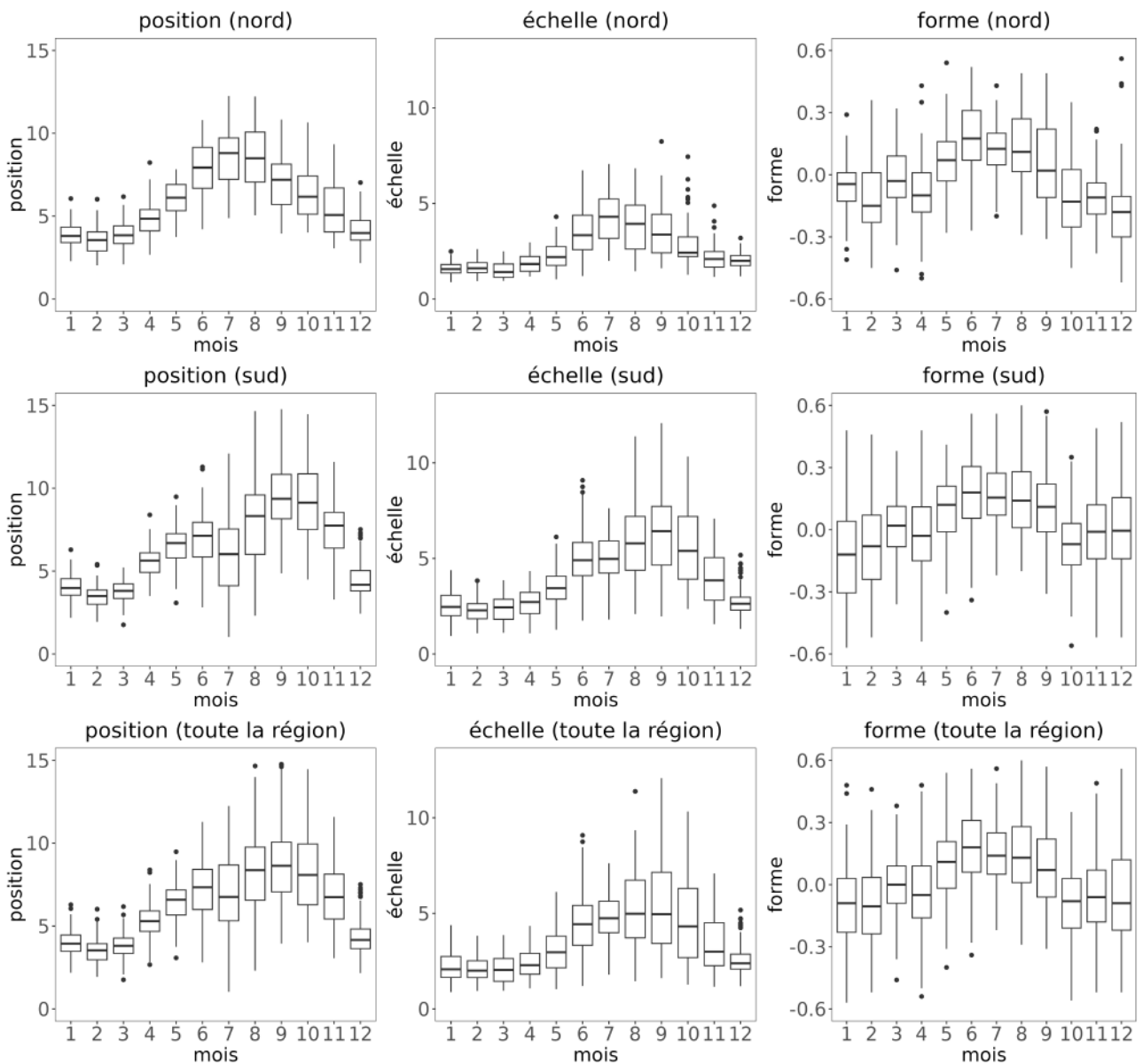


FIGURE A.1 – Diagrammes en boîte des paramètres de la GEV stationnaire (cf Fig. 2.11) μ (à gauche), σ (au centre) et ξ (à droite). Première ligne : toutes les stations au nord de 45°N ; deuxième ligne : toutes les stations au sud de 45°N ; troisième ligne : l'ensemble de la région.

A.1.4 Approche régionalisée : résultats avec des rayons différents

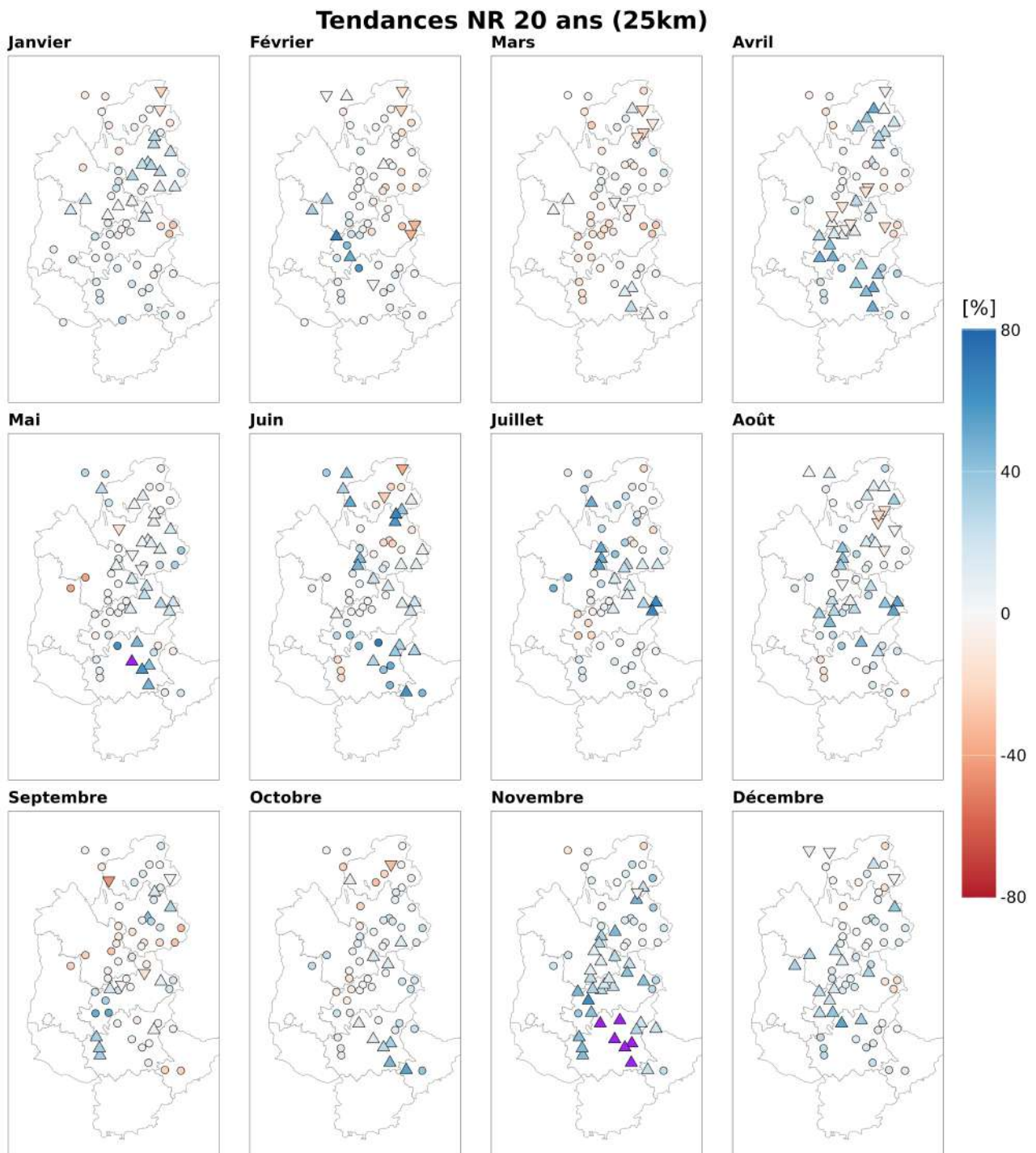


FIGURE A.2 – Tendances du niveau de retour 20 ans en % / 10 ans. Estimation non-stationnaire régionale (rayon 25 km) à partir des données d'EDF incluant les données anciennes (30-65 ans de données)

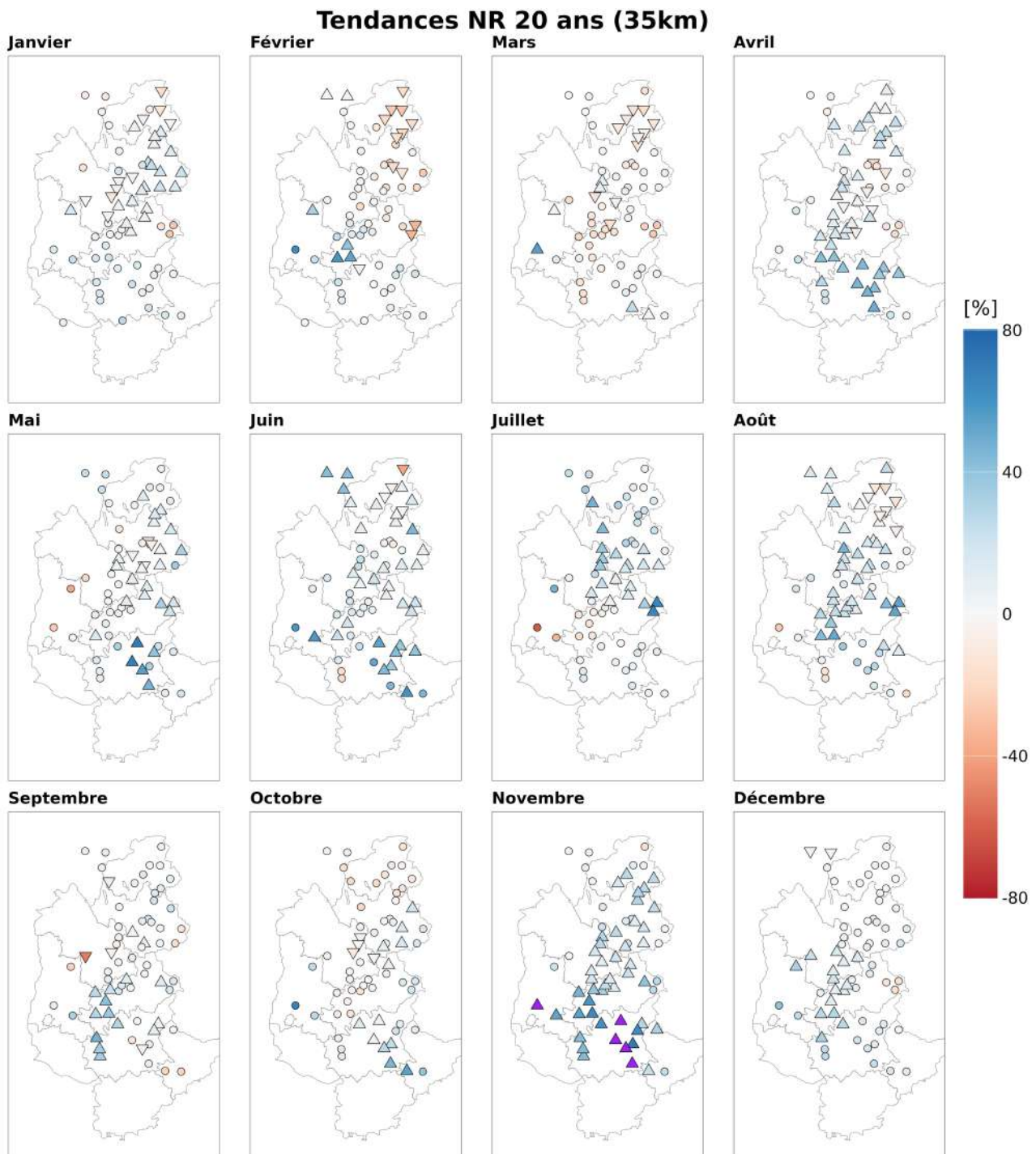


FIGURE A.3 – Tendances du niveau de retour 20 ans en % / 10 ans. Estimation non-stationnaire régionale (rayon 35 km) à partir des données d'EDF incluant les données anciennes (30-65 ans de données)

A.2 Métadonnées

Le tableau suivant inclut les métadonnées des stations montrées dans la figure 2.4 (sans données anciennes, voir p.ex. KIEFFER-WEISSE (1998) pour plus d'information sur ces données) : Numéro et nom du poste, coordonnées en WGS84, l'altitude, nombre d'années complètes, début et fin des séries temporelles disponibles. Les numéros des postes d'EDF-

DTG commencent par C, celles des postes de Météo France par le numéro du département où est située la station. Seules les stations avec plus de 10 années complètes (<10% de valeurs manquantes) sont incluses.

Num_Poste	Nom_Usuel	LAT	LON	ALTI	Nbre_Ann	DEBUT	FIN	Source
C1220	Chalain Marigny	46.68567	5.77021	464	31	1980	2022	EDF
C1230	Cernon Vouglans	46.39775	5.65305	515	30	1981	2022	EDF
C1240	Les Rousses	46.48081	6.06085	1115	31	1980	2022	EDF
C1248	Etables	46.38032	5.82013	400	27	1987	2022	EDF
C1252	Izernore Trablettes	46.23618	5.54982	430	26	1981	2022	EDF
C1272	Chezery	46.22179	5.8679	580	31	1980	2022	EDF
C1280	Génissiat Injoux	46.05276	5.81112	335	33	1984	2022	EDF
C1316	Abondance Frogy	46.28582	6.73894	1000	33	1981	2022	EDF
C1344	Chamonix	45.92945	6.87815	1035	36	1983	2022	EDF
C1350	Les Contamines	45.82232	6.72898	1181	31	1987	2022	EDF
C1365	Gluses Pressy	46.08025	6.55976	475	37	1981	2022	EDF
C1371	Le Grand Bornand	45.97637	6.45556	1300	31	1989	2022	EDF
C1380	Samoens	46.07628	6.72032	695	27	1986	2022	EDF
C1406	Thones	45.88145	6.32171	625	36	1980	2022	EDF
C1422	Aillon Le Jeune	45.61755	6.08199	900	35	1981	2022	EDF
C1432	Vallières	45.90192	5.92141	310	41	1980	2022	EDF
C1510	Ste-Foy Le Miroir	45.60154	6.88673	1225	30	1986	2022	EDF
C1524	Moutiers	45.48461	6.53448	480	34	1987	2022	EDF
C1525	Valmorel	45.46137	6.44504	1400	33	1989	2022	EDF
C1540	Pralognan	45.38148	6.7231	1420	30	1987	2022	EDF
C1548	Vignotan	45.44999	6.58365	600	37	1984	2022	EDF
C1571	Roselend Beaufort	45.68856	6.62532	1580	36	1985	2022	EDF
C1580	Belleville Hauteluce	45.77221	6.63866	1215	37	1984	2022	EDF
C1604	Grand Scala	45.21389	6.95506	1720	39	1981	2022	EDF
C1610	Bonneval Tralenta	45.3747	7.05167	1830	35	1983	2022	EDF
C1624	Avrieux Villarodin	45.21416	6.71866	1100	34	1988	2022	EDF

Num_Poste	Nom_Usuel	LAT	LON	ALTI	Nbre_Ann	DEBUT	FIN	Source
C1633	Le Chatelard	45.21249	6.47116	740	38	1983	2022	EDF
C1638	Valloire	45.17277	6.4331	1435	33	1986	2022	EDF
C1664	Le Glandon Ste Marie	45.33302	6.28966	545	29	1987	2022	EDF
C1702	Fond De France	45.27999	6.07474	1085	34	1984	2022	EDF
C1706	Allevard	45.39543	6.07168	495	28	1988	2022	EDF
C1732	Grave	45.0542	6.28558	1798	37	1985	2022	EDF
C1750	Allemont Le Rivier	45.20383	6.04106	1270	32	1986	2022	EDF
C1753	Livet	45.11687	5.96171	703	33	1989	2022	EDF
C1778	Pont Escoffier	45.00339	6.06955	766	34	1989	2022	EDF
C1804	Champoleon Les Borels	44.72097	6.25918	1270	39	1984	2022	EDF
C1812	St Bonnet	44.68412	6.0729	1020	38	1984	2022	EDF
C1814	Molines	44.74703	6.1216	1240	35	1984	2022	EDF
C1820	La Chapelle Valgaudemar	44.81012	6.19522	1265	35	1988	2022	EDF
C1832	St Etienne En Dévoluy	44.69443	5.94047	1265	40	1980	2022	EDF
C1844	Pellafof Le Sautet	44.81661	5.90897	800	33	1989	2022	EDF
C1857	Valbonnais	44.90053	5.90601	790	35	1988	2022	EDF
C1911	Charavines Les Vannes	45.43359	5.51723	510	31	1986	2022	EDF
C1940	Villard De Lans	45.07444	5.55696	1040	40	1980	2022	EDF
C1954	Bouvante Forêt Lente	44.95501	5.32653	1080	32	1985	2022	EDF
C2121	Rémuzat	44.41361	5.35642	450	34	1987	2022	EDF
C2122	Dieulefit	44.525	5.05916	380	35	1987	2022	EDF
C2412	Monetier Les Bains	44.97155	6.51402	1460	36	1987	2022	EDF
C2420	Pelvoux Les Claux	44.87585	6.47918	1250	41	1981	2022	EDF
C2430	Abries Ristolas	44.79535	6.92817	1540	38	1984	2022	EDF
C2432	St Véran	44.69867	6.87023	2010	39	1984	2022	EDF
C2436	Arvieux	44.78139	6.73562	1550	39	1984	2022	EDF

Num_Poste	Nom_Usuel	LAT	LON	ALTI	Nbre_Ann	DEBUT	FIN	Source
C2474	Fours St Laurent	44.3191	6.69254	1660	39	1984	2022	EDF
C2500	Seyne Les Alpes	44.35146	6.36451	1210	40	1983	2022	EDF
C2514	Barcillonnette	44.43491	5.91921	850	33	1990	2022	EDF
C2520	Lus La Croix Haute	44.66615	5.70679	1035	36	1980	2022	EDF
C2523	Montmaur	44.56943	5.87137	900	38	1980	2022	EDF
C2526	Serres	44.42818	5.71465	670	41	1980	2022	EDF
C2531	Clamensane	44.31591	6.058	700	36	1986	2022	EDF
C2539	Chateauneuf-Miravail	44.162	5.72754	670	39	1981	2022	EDF
C2558	Forcalquier	43.96215	5.78402	535	42	1981	2022	EDF
C2560	St-Etienne-Les-Orgues	44.04019	5.77499	690	41	1981	2022	EDF
C2575	Mallemort	43.71563	5.20609	150	34	1986	2022	EDF
C2582	Marcoux St Martin	44.14063	6.28269	700	40	1981	2022	EDF
C2602	Allos	44.24291	6.62619	1445	41	1980	2022	EDF
C2608	Thorame	44.09499	6.55185	1160	37	1983	2022	EDF
C2620	Lambruisse	44.04918	6.44338	1125	42	1980	2022	EDF
C2626	Castillon Demandolx	43.87934	6.54319	900	38	1983	2022	EDF
C2651	Ste Croix	43.73765	6.13363	500	33	1987	2022	EDF
C2814	Bas Thorenc Andon	43.7997	6.79907	1170	37	1980	2022	EDF
C2816	Coursegoules	43.79205	7.04851	1000	36	1984	2022	EDF
C2822	St Etienne De Tinée	44.25566	6.92661	1140	40	1983	2022	EDF
4006005	Allos_SAPC	44.2425	6.62533	1400	13	2010	2024	MétéoFrance
4019001	Barcelonnette	44.39117	6.67017	1155	25	1998	2024	MétéoFrance
4049001	St Auban	44.06217	5.98967	458	31	1993	2024	MétéoFrance
4068001	Dauphin	43.90983	5.76717	427	20	2003	2024	MétéoFrance
4070009	Digne Les Bains	44.07	6.18667	554	20	2003	2024	MétéoFrance
4115001	Meailles_SAPC	44.03117	6.6295	1090	16	2007	2024	MétéoFrance

Num_Poste	Nom_Usuel	LAT	LON	ALTI	Nbre_Ann	DEBUT	FIN	Source
4126001	Montclar_SAPC	44.39183	6.33333	1197	15	2007	2024	MétéoFrance
4134002	La Motte Du Caire	44.32667	6.0305	665	17	1992	2024	MétéoFrance
4136001	La Mure-Argens	43.977	6.52017	920	18	2005	2024	MétéoFrance
4173002	St Andre Alpes	43.95833	6.51167	882	11	1993	2005	MétéoFrance
4192001	St Michel L Obs	43.93333	5.71333	650	10	1993	2003	MétéoFrance
4209005	Sisteron	44.2245	5.916	500	24	1998	2024	MétéoFrance
4230001	Valensole	43.8395	6.00083	600	28	1995	2024	MétéoFrance
5007001	Arvieux La Chalp	44.78117	6.73667	1690	11	1996	2007	MétéoFrance
5007003	Arvieux	44.796	6.728	1825	15	2007	2024	MétéoFrance
5046001	Embrun	44.57117	6.50867	873	30	1993	2024	MétéoFrance
5055001	La Faurie	44.56667	5.75017	825	26	1997	2024	MétéoFrance
5061009	Gap	44.57767	6.07983	885	20	2003	2024	MétéoFrance
5070003	Laragne Monteglin	44.31917	5.7945	565	30	1993	2024	MétéoFrance
5118003	Ribiers	44.2355	5.855	520	10	2002	2012	MétéoFrance
5120002	Ristolas	44.76567	6.9845	1670	18	2004	2024	MétéoFrance
5126001	Rosans	44.3875	5.46217	625	29	1993	2024	MétéoFrance
5136002	St Crepin	44.7045	6.6	906	17	2006	2024	MétéoFrance
5145002	St Jean-St-Nicolas	44.67083	6.20983	1210	20	2003	2024	MétéoFrance
5158001	Le Saix	44.47583	5.8155	801	19	2003	2024	MétéoFrance
5170001	Tallard	44.45217	6.03333	593	29	1993	2024	MétéoFrance
5181002	Villar D'arene	45.03083	6.36167	1665	18	2004	2024	MétéoFrance
5183001	Villar St Pancrace	44.88033	6.64033	1310	20	2003	2024	MétéoFrance
5184002	Vitrolles	44.40867	5.95167	595	14	1997	2012	MétéoFrance
6004009	Antibes_SAPC	43.59917	7.11117	32	27	1993	2024	MétéoFrance
6005001	Ascros	43.922	7.01367	1173	29	1993	2024	MétéoFrance
6015001	Berre-Des-Alpes	43.83833	7.32167	715	16	1993	2010	MétéoFrance

Num_Poste	Nom_Usuel	LAT	LON	ALTI	Nbre_Ann	DEBUT	FIN	Source
6022002	Bouyon	43.823	7.11817	723	12	1993	2005	MétéoFrance
6023004	Breil Sur Roya	43.94017	7.51367	305	26	1993	2024	MétéoFrance
6029001	Cannes	43.5565	6.9505	2	31	1993	2024	MétéoFrance
6033002	Carros_SAPC	43.78633	7.2095	78	22	1998	2024	MétéoFrance
6037002	Caussols	43.75233	6.92317	1268	30	1993	2024	MétéoFrance
6038001	Chateauneuf Grasse	43.67367	6.991	388	11	2012	2024	MétéoFrance
6050002	Coursegoules_SAPC	43.792	7.0485	985	24	1998	2024	MétéoFrance
6059003	Eze	43.73883	7.36583	704	21	1998	2024	MétéoFrance
6069008	Grasse	43.65367	6.9395	183	15	1993	2007	MétéoFrance
6074005	Lantosque_SAPC	43.972	7.307	550	17	2006	2024	MétéoFrance
6075006	Levens_Reservoirs	43.86167	7.23667	668	12	1993	2008	MétéoFrance
6075007	Levens	43.84633	7.21	691	15	2008	2024	MétéoFrance
6077006	Peira Cava	43.92917	7.36333	1443	30	1993	2024	MétéoFrance
6079002	Mandelieu La Napoule_SAPC	43.52367	6.89867	104	30	1993	2024	MétéoFrance
6081001	Le Mas	43.81367	6.80933	1525	17	2006	2024	MétéoFrance
6083005	Menton	43.78583	7.48867	216	31	1993	2024	MétéoFrance
6084002	Mouans Sartoux	43.61183	6.95117	165	14	1994	2009	MétéoFrance
6088001	Nice	43.64883	7.209	2	30	1993	2024	MétéoFrance
6088007	Nice-Rimiez	43.73867	7.27917	238	14	2009	2024	MétéoFrance
6088009	Nice-St Roman	43.75167	7.21667	323	15	1993	2009	MétéoFrance
6090001	Pegomas-Tanneron	43.56267	6.897	483	16	1993	2010	MétéoFrance
6090002	Pegomas	43.60267	6.93667	109	13	2010	2024	MétéoFrance
6091003	Peille	43.77517	7.42833	1106	23	1993	2024	MétéoFrance
6094002	Peone	44.09967	6.93083	1784	21	2002	2024	MétéoFrance
6099004	Puget Theniers_SAPC	43.95683	6.89233	449	18	1997	2024	MétéoFrance
6102001	Rimplas_SAPC	44.06717	7.1335	1130	16	2007	2024	MétéoFrance

Num_Poste	Nom_Usuel	LAT	LON	ALTI	Nbre_Ann	DEBUT	FIN	Source
6106002	Roquesteron	43.87633	7.00617	405	16	1993	2009	MétéoFrance
6116002	St Auban	43.847	6.727	1048	13	1993	2007	MétéoFrance
6118001	St Cezaire	43.64517	6.79767	474	11	1993	2005	MétéoFrance
6118002	St Cezaire Sur Siagne	43.67867	6.809	694	17	2005	2024	MétéoFrance
6120004	St Etienne De Tinee_SAPC	44.25767	6.92117	1150	16	2007	2024	MétéoFrance
6121001	Cap Ferrat	43.68333	7.32833	138	11	1996	2008	MétéoFrance
6125001	St Martin D'entraunes_SAPC	44.15467	6.747	1642	16	2007	2024	MétéoFrance
6127003	St Martin Vesubie	44.07367	7.25817	1044	21	1993	2013	MétéoFrance
6130002	St Vallier	43.69133	6.843	708	12	1993	2005	MétéoFrance
6136003	Sospel	43.88333	7.45	360	10	1993	2003	MétéoFrance
6136005	Sospel	43.86283	7.43367	843	19	2004	2024	MétéoFrance
6148001	Tourrettes Sur Loup	43.70817	7.05583	311	18	1993	2012	MétéoFrance
6152002	Valbonne-Sophia	43.62317	7.0285	238	31	1993	2024	MétéoFrance
6154002	Valderoure	43.79233	6.7345	1105	13	1993	2005	MétéoFrance
6163007	Tende_SAPC	44.04317	7.586	636	22	1993	2024	MétéoFrance
26002003	Albon	45.25233	4.82233	153	22	2001	2024	MétéoFrance
26035001	Beaufort-S-Gerv	44.778	5.139	379	30	1993	2024	MétéoFrance
26047001	Bellegarde-En-D	44.53517	5.45433	1017	30	1992	2024	MétéoFrance
26050001	Besignan	44.3205	5.317	556	30	1992	2024	MétéoFrance
26056001	Bourdeaux	44.58017	5.14283	432	28	1994	2024	MétéoFrance
26063002	Buis -Baronnies	44.27783	5.27067	390	27	1992	2021	MétéoFrance
26064001	Valence-Chabeui	44.91483	4.97183	163	26	1997	2024	MétéoFrance
26074001	Chapelle-En-Vercors_SAPC	44.9615	5.42217	879	29	1994	2024	MétéoFrance
26086003	Chatillon-En-Di	44.69333	5.48167	570	10	1992	2003	MétéoFrance
26100001	Combovin	44.8345	5.09	820	25	1992	2021	MétéoFrance
26113003	Die	44.76767	5.3435	384	30	1992	2024	MétéoFrance

Num_Poste	Nom_Usuel	LAT	LON	ALTI	Nbre_Ann	DEBUT	FIN	Source
26115001	Divajeu	44.72683	4.99033	175	25	1992	2019	MétéoFrance
26116002	Donzere	44.42917	4.72533	66	30	1992	2024	MétéoFrance
26124001	Etoile	44.819	4.8895	145	29	1994	2024	MétéoFrance
26142001	Glandage_SAPC	44.67467	5.61517	1007	29	1994	2024	MétéoFrance
26165001	Livron	44.79417	4.83067	98	21	1993	2021	MétéoFrance
26167001	Luc-En-Diois	44.61733	5.451	537	24	1992	2017	MétéoFrance
26168001	Lus L Croix Hte	44.67283	5.71083	1059	30	1992	2024	MétéoFrance
26176001	Marsanne	44.64333	4.87167	280	28	1992	2021	MétéoFrance
26177001	Marsaz	45.11317	4.93867	213	27	1992	2021	MétéoFrance
26179001	Mercuriol	45.0585	4.8835	153	30	1993	2024	MétéoFrance
26188001	Mollans-S-Ouvez	44.23417	5.18317	280	27	1993	2021	MétéoFrance
26191001	Montboucher-S-J	44.545	4.82417	136	27	1992	2021	MétéoFrance
26198001	Montelimar	44.58117	4.733	73	33	1990	2024	MétéoFrance
26202001	Montjoux	44.5095	5.09717	491	24	1992	2017	MétéoFrance
26211001	Montsegur-S-Lau	44.3615	4.86083	146	31	1992	2024	MétéoFrance
26220009	Nyons - Csp	44.35667	5.12167	270	11	1992	2004	MétéoFrance
26220010	Nyons P182	44.35917	5.1155	316	16	2004	2021	MétéoFrance
26258001	Puy-St-Martin	44.61817	4.97683	211	31	1992	2024	MétéoFrance
26264002	Remuzat	44.43167	5.367	475	28	1992	2021	MétéoFrance
26273002	Rochefort-Samson_SAPC	44.99067	5.16517	368	24	1993	2024	MétéoFrance
26281001	Romans_SAPC	45.05017	4.99867	156	30	1992	2024	MétéoFrance
26292002	St-Auban	44.29483	5.40983	625	21	2002	2024	MétéoFrance
26295001	St-Barthelemy-V_SAPC	45.17383	4.9025	203	31	1992	2024	MétéoFrance
26298001	St-Christophe-L_SAPC	45.22933	5.07183	452	31	1992	2024	MétéoFrance
26307001	St-Jean-En-Roya	45.00917	5.2925	308	29	1994	2024	MétéoFrance
26313001	St-Marcel-Les-V-Inra	44.98017	4.93133	190	30	1992	2024	MétéoFrance

Num_Poste	Nom_Usuel	LAT	LON	ALTI	Nbre_Ann	DEBUT	FIN	Source
26321003	St-Nazaire-Le-D	44.5545	5.28483	607	27	1992	2022	MétéoFrance
26327001	St Roman-Diois	44.69383	5.42833	545	20	2003	2024	MétéoFrance
26328001	St Sauveur En Diois	44.68267	5.15783	338	10	2013	2024	MétéoFrance
26330001	St-Sorlin-En-Va	45.27117	4.93033	237	31	1992	2024	MétéoFrance
26340001	Sederon	44.20233	5.53883	804	29	1994	2024	MétéoFrance
26348001	Taulignan	44.43017	4.98983	257	26	1993	2020	MétéoFrance
26361001	Valdrome	44.50533	5.57667	786	29	1994	2024	MétéoFrance
26377003	Vinsobres	44.33733	5.06017	346	30	1992	2024	MétéoFrance
26380002	Gervans	45.1125	4.82883	157	10	2009	2021	MétéoFrance
38053003	Bourgoin	45.608	5.30933	358	20	2003	2024	MétéoFrance
38095001	Chatte_SAPC	45.14017	5.306	272	27	1996	2024	MétéoFrance
38133001	Coublevie	45.35533	5.59633	300	19	2004	2024	MétéoFrance
38191002	Alpe-D'huez	45.08783	6.08567	1860	21	2002	2024	MétéoFrance
38269004	La Mure- Radome	44.935	5.78617	885	20	2003	2024	MétéoFrance
38336001	Reventin	45.47867	4.81067	295	19	2004	2024	MétéoFrance
38362001	St Supre_SAPC	45.39267	5.65733	450	16	2007	2024	MétéoFrance
38384001	Grenoble-St Geoirs	45.364	5.31333	384	31	1993	2024	MétéoFrance
38442008	St-Pierre-Les Egaux	45.31733	5.80383	950	18	2005	2024	MétéoFrance
38504002	Pipay_SAPC	45.26533	6.016	1578	13	2009	2024	MétéoFrance
38538002	Grenoble - Lvd	45.21717	5.8485	220	24	1999	2024	MétéoFrance
38548001	Villard-De-Lans	45.0785	5.561	1027	29	1994	2024	MétéoFrance
38567002	Chamrousse	45.128	5.87833	1730	21	2002	2024	MétéoFrance
73011004	Albertville Jo	45.66233	6.37183	332	26	1992	2020	MétéoFrance
73051001	Mont Du Chat	45.6605	5.8215	1496	18	2005	2024	MétéoFrance
73054001	Bourg St Maurice	45.61267	6.76333	865	30	1993	2024	MétéoFrance
73098003	Feclaz_SAPC	45.64717	5.98367	1328	30	1993	2024	MétéoFrance

Num_Poste	Nom_Usuel	LAT	LON	ALTI	Nbre_Ann	DEBUT	FIN	Source
73132003	Col-Des-Saisies	45.755	6.53533	1614	25	1992	2024	MétéoFrance
73144001	Mont Cenis	45.26933	6.89917	2032	15	1996	2024	MétéoFrance
73157004	Frejus	45.19367	6.67417	1228	19	1994	2016	MétéoFrance
73171002	Montmelian	45.49383	6.04917	264	20	2003	2024	MétéoFrance
73191005	Lac Aiguebelette	45.56483	5.79583	375	16	2004	2021	MétéoFrance
73248003	St Jean De Maur	45.26667	6.33333	610	10	1992	2005	MétéoFrance
73255003	Ste Marie Guines	45.3435	6.30717	460	26	1997	2024	MétéoFrance
73261003	St Michel Maur_SAPC	45.21817	6.4645	698	26	1997	2024	MétéoFrance
73296005	Tignes_SAPC	45.467	6.90717	2084	21	1996	2024	MétéoFrance
73304005	Val D'isere Jos	45.44483	6.97817	1850	26	1992	2024	MétéoFrance
73329001	Chambery-Aix	45.64133	5.878	235	32	1991	2024	MétéoFrance
74042003	Bonneville	46.0685	6.39983	453	20	2003	2024	MétéoFrance
74056001	Chamonix	45.9295	6.8775	1042	27	1992	2024	MétéoFrance
74056005	Le Tour	46.00383	6.9485	1500	13	2010	2024	MétéoFrance
74060001	Chapelle Saint-Maurice_SAPC	45.78233	6.15217	970	13	2008	2024	MétéoFrance
74105002	Douvaine Sa	46.30233	6.31833	470	14	2009	2024	MétéoFrance
74119003	Evian Sa	46.38233	6.5825	725	21	2002	2024	MétéoFrance
74133001	Gaillard	46.176	6.21033	399	10	2013	2024	MétéoFrance
74135001	Giez	45.76267	6.25533	478	14	2008	2024	MétéoFrance
74136005	Le Grand-Bornand	45.97333	6.47183	1430	17	2005	2024	MétéoFrance
74143003	Houches (Les)	45.8925	6.80067	1004	10	2013	2024	MétéoFrance
74182001	Meythet	45.92817	6.094	455	28	1992	2024	MétéoFrance
74191003	Le Pleney	46.16833	6.69283	1515	21	1998	2024	MétéoFrance
74256001	Sallanches	45.932	6.651	541	10	2013	2024	MétéoFrance
74281001	Thonon-Inra	46.36667	6.455	376	29	1993	2024	MétéoFrance
74285002	Usinens Sa	46.013	5.8445	452	19	2004	2024	MétéoFrance

Num_Poste	Nom_Usuel	LAT	LON	ALTI	Nbre_Ann	DEBUT	FIN	Source
83002004	Aiguines_SAPC	43.7945	6.24483	563	17	2004	2024	MétéoFrance
83004004	Les Arcs_SAPC	43.451	6.47083	55	26	1997	2024	MétéoFrance
83007004	Aups	43.641	6.1875	497	29	1994	2024	MétéoFrance
83019002	Bormes Les Mimosas	43.19517	6.37933	88	31	1993	2024	MétéoFrance
83031001	Le Luc	43.38317	6.38617	80	31	1993	2024	MétéoFrance
83035001	Le Castellet	43.25217	5.78467	417	31	1993	2024	MétéoFrance
83035002	Le Castellet_SAPC	43.184	5.77017	66	26	1997	2024	MétéoFrance
83042001	Cogolin_SAPC	43.26167	6.51033	31	26	1998	2024	MétéoFrance
83043005	Collobrieres_SAPC	43.23217	6.258	128	25	1994	2024	MétéoFrance
83044003	Comps-Sur-Artuby	43.65883	6.47133	892	21	1998	2024	MétéoFrance
83049003	Cuers-Pouverel	43.2395	6.08583	121	11	1994	2009	MétéoFrance
83049005	Cuers	43.24767	6.13133	72	23	1998	2024	MétéoFrance
83050007	Draguignan_SAPC	43.52617	6.45333	173	27	1996	2024	MétéoFrance
83051001	Entrecasteaux	43.52133	6.25217	279	24	1998	2024	MétéoFrance
83061001	Frejus	43.4235	6.738	7	29	1993	2024	MétéoFrance
83061005	Frejus-Plaine	43.42883	6.7015	7	11	1998	2009	MétéoFrance
83069001	Hyeres	43.09433	6.14633	2	28	1994	2024	MétéoFrance
83069002	Porquerolles	43	6.22683	135	18	2005	2024	MétéoFrance
83069003	Ile Du Levant	43.0325	6.46933	118	27	1994	2024	MétéoFrance
83069016	Hyeres-Plage	43.11567	6.1545	9	11	1997	2009	MétéoFrance
83077001	Meounes Les Montrieux_SAPC	43.258	5.96483	309	11	2012	2024	MétéoFrance
83083001	Montfort-Sur-Argens_SAPC	43.46967	6.127	141	28	1993	2024	MétéoFrance
83093005	Plan D'aups - Ste Baume_SAPC	43.34267	5.72833	605	16	2007	2024	MétéoFrance
83102005	Regusse	43.66817	6.10517	561	26	1997	2024	MétéoFrance
83116004	St Maximin-Olli	43.48067	5.85117	295	15	1997	2012	MétéoFrance
83116022	St Maximin La Ste Baume	43.4775	5.84783	294	17	2006	2024	MétéoFrance

Num_Poste	Nom_Usuel	LAT	LON	ALTI	Nbre_Ann	DEBUT	FIN	Source
83124002	Seillans	43.58017	6.62217	278	25	1998	2024	MétéoFrance
83137001	Toulon	43.11583	5.90067	3	30	1993	2024	MétéoFrance
83138002	Tourrettes	43.61267	6.72417	240	16	1994	2011	MétéoFrance
83148002	Vidauban	43.38667	6.525	282	14	2009	2024	MétéoFrance
83150002	Vinon Sur Verdon	43.734	5.78267	271	21	2002	2024	MétéoFrance
83153001	Cap Cepet	43.07933	5.94083	115	23	1995	2020	MétéoFrance
84001001	Aithen	43.98983	4.96217	35	13	1994	2007	MétéoFrance
84003003	Apt	43.892	5.38183	222	16	2007	2024	MétéoFrance
84007005	Avignon	43.91133	4.9025	34	27	1996	2024	MétéoFrance
84009002	La Bastide Des Jourdans	43.78733	5.615	381	29	1993	2024	MétéoFrance
84017006	Chalet Reynard	44.15117	5.31967	1455	15	1994	2015	MétéoFrance
84020004	Bonnieux/Plaine	43.86833	5.30167	175	14	1993	2007	MétéoFrance
84025001	Cabrieres D'avignon	43.88367	5.16483	142	31	1993	2024	MétéoFrance
84026003	Cadenet	43.71883	5.353	152	16	2007	2024	MétéoFrance
84028001	Cairanne	44.215	4.94333	118	13	1994	2007	MétéoFrance
84031001	Carpentras	44.08367	5.05833	98	31	1993	2024	MétéoFrance
84033001	Castellet/Val.	43.84833	5.48833	288	15	1993	2007	MétéoFrance
84035003	Cavaillon	43.8565	5.03233	70	18	1994	2013	MétéoFrance
84036001	Gadagne	43.93317	4.9245	110	12	1993	2005	MétéoFrance
84037002	Chateauneuf Du Pape	44.0815	4.81133	106	18	1994	2012	MétéoFrance
84064001	Lapalud	44.3205	4.65817	46	17	1994	2024	MétéoFrance
84082001	Mormoiron	44.07283	5.20967	308	18	1994	2012	MétéoFrance
84085003	Murs-Salut	43.94333	5.24167	470	14	1993	2007	MétéoFrance
84085004	Murs	43.93817	5.2255	488	16	2007	2024	MétéoFrance
84086001	Oppede Crete Du Petit Luberon	43.811	5.146	672	18	1997	2024	MétéoFrance
84087001	Orange	44.1445	4.861	57	29	1993	2024	MétéoFrance

Num_Poste	Nom_Usuel	LAT	LON	ALTI	Nbre_Ann	DEBUT	FIN	Source
84094001	Puymeras	44.2895	5.13133	392	16	2007	2024	MétéoFrance
84107002	St Christol	44.04067	5.49283	836	28	1994	2024	MétéoFrance
84118001	St Saturnin Les Apt	43.93083	5.372	322	13	1994	2008	MétéoFrance
84123004	Sault	44.06833	5.39667	670	13	1994	2007	MétéoFrance
84125003	Savoillan	44.17983	5.37517	510	22	1993	2016	MétéoFrance
84137001	Vaison La Romaine	44.25833	5.06333	240	13	1994	2007	MétéoFrance
84150001	Visan	44.33667	4.9055	141	26	1994	2024	MétéoFrance