HAL open science

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

Alexandre Mas, Maxime Morel, Loïc Orillard, Alix Reverdy, Juliette Blanchet, Guillaume Piton, Guillaume Evin

▶ **To cite this version:**

Alexandre Mas, Maxime Morel, Loïc Orillard, Alix Reverdy, Juliette Blanchet, et al.. Projet HYDRODEMO Évaluation de l'aléa torrentiel dans les petits bassins versants des Alpes du Nord. [Rapport de recherche] INRAE UR-ETNA; IGE. 2022. hal-03574748v2

HAL Id: hal-03574748

https://hal.science/hal-03574748v2

Submitted on 3 Mar 2022 (v2), last revised 8 Nov 2022 (v3)

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.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Projet HYDRODEMO

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

Action 1: Etat des lieux et recueil de l'information disponible concernant l'aléa torrentiel

HYDRODEMO

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

Action 1 : État des lieux et recueil de l'information disponible concernant l'aléa torrentiel

Alexandre Mas[1], Maxime Morel[1], Loïc Orillard[2], Alix Reverdy[2], Juliette Blanchet[2], Guillaume Piton[1], and Guillaume Evin[1]

[1] *Univ. Grenoble Alpes, INRAE, UR ETNA, 3800, Grenoble, France*
[2] *Univ. Grenoble Alpes, CNRS, IGE, 3800, Grenoble, France*

23 février 2022

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

Citation : Mas, Morel, Orillard, Reverdy, Blanchet, Piton et Evin. 2021. *HYDRODEMO - Action 1 : État des lieux et recueil de l'information disponible concernant l'aléa torrentiel* [Rapport de recherche] INRAE - UR ETNA, INRAE - UR RECOVER, IGE. 27 p. `https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03574748`

Résumé

Ce rapport concerne l'action 1 ``État des lieux et recueil de l'information disponible concernant l'aléa torrentiel' du projet HYDRODEMO sur l'évaluation de l'aléa torrentiel dans les petits bassins versants des Alpes du Nord. Nous présentons les différents jeux de données sélectionnés et analysés dans les autres actions du projet : Données météorologiques (principalement des réanalyses), données hydrologiques (séries observées et sélection des bassins versants pour l'action 4) et les données de transport solide (essentiellement issus des curages de plages de dépôts).

Table des matières

1 Introduction **5**
1.1 Le projet HYDRODEMO . . . 5
1.2 Pourquoi l'action 1 : État des lieux et recueil de l'information disponible concernant l'aléa torrentiel ? . . . 6

2 Données météorologiques **7**
2.1 SPAZM . . . 7
2.2 COMEPHORE . . . 8
2.3 COMEPHORE CORRIGÉ PAR AN . . . 8
2.4 SAFRAN . . . 9
2.5 Résumé des forçages météorologiques des modèles hydrologiques . . . 9
2.6 Réanalyses atmosphériques . . . 9
2.6.1 Réanalyse 20CRv2c . . . 10
2.6.2 Réanalyse ERA5 . . . 11
2.7 Classifications de type de temps . . . 11
2.7.1 Classification "EDF" . . . 11
2.7.2 Classification Lamb . . . 13

3 Données hydrologiques **15**
3.1 Travaux antécédents . . . 15
3.2 Séries de débits observés . . . 15
3.3 Données statistiques . . . 17
3.3.1 Quantiles SHYREG . . . 17
3.3.2 Autres sources . . . 17
3.4 La base de données RTM-IGE . . . 17
3.5 Description des bassins versants . . . 20

4 Données sur l'activité de transport solide **21**
4.1 Travaux antécédents . . . 21
4.1.1 Inventaire des plages de dépôt de Gruffaz [1996] . . . 21
4.1.2 Inventaire des ouvrages du Haut Grésivaudan (rapport EGIS) . . . 21
4.1.3 Etudes des Associations Syndicales (rapports Hydrétudes) . . . 21
4.1.4 Analyse des données ONF-RTM pour la méthode ECSTReM [Peteuil and Liébault, 2011] . . . 21
4.1.5 Enquête ONF-RTM sur les plages de dépôt de 2018 [Carladous and Piton, 2018] 21
4.1.6 Les EBR (Etudes de bassin de risques) . . . 22
4.2 Données de curages brutes . . . 22
4.3 La base de données "évènement" de l'ONF-RTM . . . 22
4.4 Données cartographiques . . . 24

Bibliographie **25**

1 Introduction

1.1 Le projet HYDRODEMO

Le projet HYDRODEMO a pour objectif de mieux connaître les aléas et risques liés aux crues torrentielles dans les Alpes du Nord pour pouvoir *in fine* mieux s'en prémunir. L'occurrence et la concomitance d'épisodes pluvieux intenses sur des sols plus ou moins pré-saturés génèrent, dans les Alpes du Nord comme ailleurs, des crues des cours d'eau. Dans le zones montagneuses, le relief donne aux écoulements l'énergie pour éroder, transporter et déposer des matériaux sédimentaires. Ces processus aggravent régulièrement les dommages associés aux inondations. HYDRODEMO vise à combler un manque critique de connaissance sur ce type d'aléa, tout d'abord en caractérisant l'hydrologie et le transport solide de bassins versants instrumentés, puis en définissant une méthodologie de transposition aux autres bassins versants des Alpes du Nord. Le projet est organisé en cinq actions (Fig. 1).

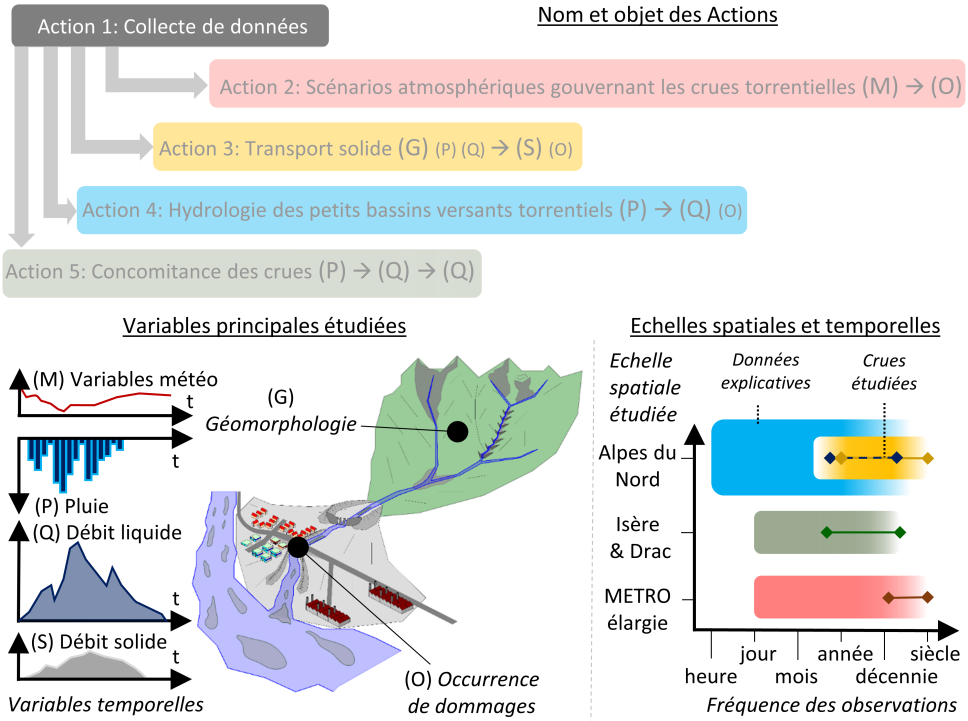

FIGURE 1 – Organisation générale des actions du projet HYDRODEMO

.

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

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

1.2 Pourquoi l'action 1 : État des lieux et recueil de l'information disponible concernant l'aléa torrentiel ?

En France, la plupart des données hydro-météorologiques proviennent d'institutions du gouvernement ou de grandes entreprises qui assurent depuis plusieurs décennies un service continu de maintien des réseaux, de la collecte et de la critique des données, et éventuellement de leur mise à disposition. En dehors de ces grands opérateurs, il existe aussi de multiples sources de données de plus petits organismes (syndicats de gestion de bassins versants, communautés de communes) qui assurent également ce type de services localement et disposent de données potentiellement exploitables, à condition d'être formatées et critiquées. L'action 1 est préalable aux autres actions d'HYDRODEMO et a consisté à faire l'état des lieux de l'information disponible et exploitable à ce jour, le présent rapport décrivant les différentes données (ou produits) exploitées dans les différentes actions.

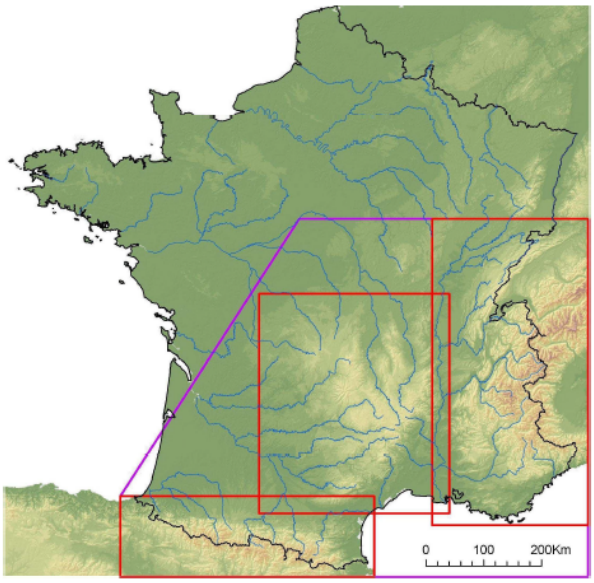

FIGURE 2 – Couverture spatiale des données SPAZM (contour violet). Les rectangles rouges délimitent des zones de calcul par massif. Tiré de Gottardi [2009].

2 Données météorologiques

Dans HYDRODEMO, les données météorologiques (précipitation, température et variables atmosphériques) exploitées dans les différentes actions proviennent de réanalyses qui assimilent les observations au sol et les sorties de modèles numériques afin de produire une donnée disponible spatialement sur des grilles régulières, sur de longues périodes (plusieurs décennies) et des échelles temporelles journalières ou infra-journalières. Ces réanalyses se substituent également aux méthodes géostatistiques qui doivent être employées lorsque des données de station doivent être interpolées pour donner une donnée spatialisée (par exemple les lames d'eau pour la modélisation hydrologique).

2.1 SPAZM

Les réanalyses SPAZM (précipitation et température) sont produites par EDF pour répondre aux divers besoins industriels de gestion de la ressource en eau, en particulier pour la production d'électricité. L'objectif principal de SPAZM est de fournir des estimations fiables en zone de montagne d'où provient la majorité de la ressource en eau utilisée pour l'hydro-électricité. Pour ce faire, la méthode de réanalyse se base sur la combinaison des observations disponibles et d'"ébauches", c'est-à-dire des champs météorologiques proposés par défaut et conditionnés au relief, au type de circulation atmosphérique et à la saison. Le principe de calcul est détaillé dans Gottardi [2009] et Gottardi et al. [2012]. Les données SPAZM sont produites sur une grille de 1 km x 1 km au pas de temps journalier, c'est-à-dire de 7h du jour jusqu'à 6h59 le lendemain. Le domaine spatial couvert est présenté sur la figure 2. Trois forçages sont disponibles : le cumul journalier de précipitation sans distinction solide ou liquide, la température journalière maximale et minimale. Les données couvrent les années civiles complètes de 1948 à 2017.

Les données SPAZM présentent plusieurs intérêts dans le cadre du projet HYDRODEMO. Tout d'abord, leur résolution spatiale est cohérente avec l'échelle des bassins versants étudiés, et elles sont

disponibles sur une période suffisamment longue (1948-2017). Ensuite, leur mode de calcul a été spécifiquement optimisé pour fournir des cumuls de précipitation fiables en montagne, en particulier grâce à l'utilisation de l'ensemble des stations disponibles (EDF, Météo France, Météo Suisse et des stations italiennes et espagnoles) ainsi que des Nivo-Pluviomètres Totalisateurs en haute montagne. De plus, les données de température et de précipitation ne sont pas calculées de manière indépendante ce qui assure une certaine cohérence entre les deux forçages et une capacité à reproduire certains phénomènes climatiques locaux. En effet, le gradient de température par rapport à l'altitude associée a un pixel pluvieux ou non pluvieux est différent. Ce gradient permet de calculer la température minimale et maximale en un pixel par rapport aux stations proches en fonction de son altitude [Gottardi, 2009].
Les données SPAZM étant produites au pas de temps journalier, la résolution temporelle n'est pas suffisante pour la modélisation hydrologique des petits bassins versants torrentiels étudiés dans les actions 2, 3 et 4 d'HYDRODEMO (avec des surfaces de l'ordre du km^2 et jusqu'à 200 km^2). Ces réanalyses ne sont donc pas directement exploitables pour ces actions (une solution étant de procéder à une étape de désagrégation temporelle).

2.2 COMEPHORE

Les réanalyses COMEPHORE sont produites par Météo-France et proviennent d'une combinaison de données radar et de mesures pluviométriques au sol. Elles sont disponibles au pas de temps horaire, sur une grille de 1 km x 1 km sur toute la France, de 1997 à 2017. Des explications détaillées sur les différentes étapes de traitement conduisant au produit final sont données dans Lobligeois [2014]. Ces réanalyses ne sont pas homogènes dans le temps car la méthode de calcul du champs de pluie journalier est différente entre les périodes 1997-2006 et 2007-2017. La principale différence de la seconde période provient de la séparation dans l'algorithme des pluies stratiformes et convectives similairement à la lame d'eau ANTILOPE. L'évolution du réseau de radar exploités introduit une inhomogénéité temporelle sur les Alpes du nord puisque le radar de la Dôle puis du Moucherotte sont utilisés à partir de 2015.

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

2.3 COMEPHORE CORRIGÉ PAR AN

Le produit dont on parle ici est un dérivé croisé des réanalyses COMEPHORE et SPAZM. L'action 5 utilise les réanalyses COMEPHORE sur les bassins de l'Isère et du Drac en entrée du modèle hydrologique MORDOR Totalement Spatialisé (MORDOR-TS). Ce modèle hydrologique fonctionnant au pas de temps journalier, les réanalyses COMEPHORE sont cumulées de 7h du jour à 6h59 du lendemain. Par ailleurs, le calage de ce modèle sur les bassins de l'Isère et du Drac a été réalisé par EDF-DTG avec le forçage SPAZM journalier. Le calage du modèle étant chronophage et complexe, il est décidé de garder le modèle déjà calé et d'adapter le forçage pluviométrique pour boucler le bilan hydrologique. La réanalyse COMEPHORE est donc normalisée par rapport au Cumul SPAZM.

La qualité des réanalyses COMEPHORE est fortement dépendante de la période étudiée, avec un changement de visibilité fort en 2015 lors de l'ajout du radar de la Dôle fin 2015 et celui du Moucherotte fin 2016. Au vu de l'évolution du réseau radar exploité et de l'algorithme menant à la réanalyse, il s'avère judicieux de corriger les précipitations de chaque pixel COMEPHORE. Pour cela, on multiplie les valeurs de chaque pixel de l'année i par le ratio :

$$\frac{Cumul.SPAZM_i}{Cumul.COMEPHORE_i},$$

où $Cumul.SPAZM_i$ et $Cumul.COMEPHORE_i$ sont les totaux annuels de précipitations pour l'année i, pour un pixel, de telle façon que le produit "COMEPHORE CORRIGE PAR AN" présente le même cumul annuel que SPAZM, pour chaque année, et pour chaque pixel.

2.4 SAFRAN

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

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

2.5 Résumé des forçages météorologiques des modèles hydrologiques

Les caractéristiques principales des trois forçages principaux décrits sont résumées dans le tableau 1. Dans HYDRODEMO, la petite taille des bassins versants nous contraint à exploiter seulement les forçages ayant une résolution temporelle et spatiale de 1 km x 1 km. Afin d'exploiter les réanalyses SPAZM, une solution consistant à désagréger temporellement les données de précipitations et de températures journalières SPAZM a été mise en oeuvre dans l'Action 4.

2.6 Réanalyses atmosphériques

Dans le cadre de l'action 2, il a été fait usage de données de réanalyses atmosphériques. Ce sont des jeux de données issus d'observations historiques de paramètres météorologiques, interpolés à l'aide d'un modèle météorologique afin d'avoir des données disponibles sur une grille régulière dans les 3 dimensions et pour un pas de temps fixe, sur l'ensemble du globe. Ces données ont notamment servi au calcul des indicateurs météorologiques permettant de caractériser les scénarios atmosphériques à l'origine des crues torrentielles.

Nom	Résolution temporelle	Résolution spatiale	Disponibilité	Forçages disponibles
COMEPHORE	Horaire	1 km x 1 km	1997 - 2017	Précipitation totale
COMEPHORE corrigé par an	Quotidien	1 km x 1 km	1997 - 2017	Précipitation totale
SPAZM	Quotidien	1 km x 1 km	1948 - 2017	Précipitation totale, température min et max
SAFRAN	Horaire	8 km x 8 km	1958 - 2018	Température, précipitation solide et liquide

Table 1 – Résumé des caractéristiques de chaque forçage.

	1000 hPa	850 hPa	700 hPa	500 hPa	Intégré
Altitude du géopotentiel (Z)	x	x	x	x*	
Energie potentielle de convection disponible (CAPE)					x*
Pression moyenne au niveau de la mer (MSLP)					x*
Vitesse verticale au niveau de pression (W)	x	x	x*	x	
Eau précipitable / Vapeur d'eau intégrée (CAPE)					x*
Humidité spécifique (Q)	x*	x*	x*	x*	
Température (T)	x*	x*	x	x*	
Vitesse longitudinale (U) et latitudinale du vent (W)	x	x*	x	x*	

Table 2 – Variables et niveaux de pression associés de 20CR utilisés dans cette étude (* pour les variables téléchargées également pour ERA5).

2.6.1 Réanalyse 20CRv2c

La principale réanalyse utilisée dans le cadre de l'action 2, est la réanalyse "Twentieth Century Reanalysis" dans sa version 2c [Compo et al., 2011], et simplement désigné par 20CR dans la suite dans ce rapport. Cette réanalyse a été choisie car il s'agit de la seule permettant d'avoir des données météorologiques jusqu'en 1851, couvrant ainsi la quasi-totalité de la plage temporelle des occurences de crues de la BD RTM-IGE (voir section 3.4). De plus, il existe au sein de l'IGE une expertise sur l'utilisation de ces données. Le choix d'utiliser uniquement 20CR sur l'ensemble de sa période (1851-2014) et non d'utiliser une réanalyse plus complexe pour compléter la période récente permet de conserver une homogénéité des indicateurs calculés. La version 2c a été sélectionnée par souci d'accessibilité des données et de stockage.

La réanalyse 20CR est disponible entre 1851 et 2014 au pas de temps 6h, avec un maillage de 2° et sur 24 niveaux verticaux de pression. 20CR utilise un filtre d'ensemble de Kalmann pour produire 56 membres indépendants, donnant une idée de l'incertitude des données produites. Les données des membres 1 et 2 [1] et de la moyenne des membres [2] ont été téléchargées et moyennées au pas de temps journalier pour l'Europe de l'Ouest. Les données incluent dans cette études sont référencées dans le Tableau 2.

1. https ://portal.nersc.gov/archive/home/projects/incite11/www/20C_Reanalysis_version_2c/everymember_anal_netcdf/
2. https ://rda.ucar.edu/datasets/ds131.2/

20CR n'assimile que des données de pression au niveau du sol, permettant une homogénéité optimisée sur l'ensemble de la période couverte. Néanmoins la quantité et la qualité des données assimilées augmentent fortement avec le temps. Le modèle météorologique utilisé pour l'interpolation spatio-temporelle et celle des autres variables est le NCEP Global Forecast System. Les conditions aux limites sont les observations de concentration en glace de mer et de température de surface de l'océan.

2.6.2 Réanalyse ERA5

Une seconde réanalyse, "ECMWF fifth generation reanalysis", par la suite dans ce rapport ERA5 [Hersbach et al., 2020], a également été utilisée afin de tester la sensibilité des résultats à la réanalyse et l'impact de la qualité des données d'entrée. Il s'agit d'une réanalyse développée beaucoup plus récemment, bénéficiant d'une plus grande diversité et quantité de variables météorologiques d'entrée et de sortie, ainsi que d'une meilleure résolution temporelle et spatiale. Néanmoins la période couverte est uniquement de 1950 jusqu'à 3 mois avant le temps présent. Cette réanalyse a été choisie parmi les réanalyses couvrant la période récente, étant l'une des plus récemment produite et facilement disponible. La résolution spatiale est de 0.25° et il y a 137 différents niveaux de pression. Les données sont produites au pas de temps horaire. Les données entre 1950 et 1979 sont encore préliminaires et subiront des corrections notamment vis-à-vis de la représentation des cyclones tropicaux [ECMWF, 2021]. Les données référencées dans le Tableau 2 ont été téléchargées au pas de temps 6h entre le 01/01/1950 et le 28/02/2021 [3], puis transformées en moyennes journalières pour l'Europe de l'Ouest.

Le modèle météorologique utilisé est Integrated Forecasting System (IFS) Cy41r2. Les données assimilées incluent des observations au sol, en mer, aériennes, de sondages et satellites, de pression, température, humidité, vent, précipitation, ozone, humidité du sol et hauteur de neige. Les conditions aux limites incluent des données de rayonnement solaire, de gaz à effet de serre, de glace de mer et de température de surface de l'océan.

2.7 Classifications de type de temps

Dans le cadre de l'action 2, les dates de réaction des torrents ont également été croisées avec des classifications de circulations atmosphériques. Ce sont des classifications qui permettent de résumer pour chaque jour la direction du flux atmosphérique grande échelle en un nombre de classes déterminé.

2.7.1 Classification "EDF"

La première classification de circulations atmosphériques (ou types de temps) utilisée est celle développée par EDF dans Garavaglia et al. [2010]. Elle applique aux formes de champ de précipitation du Sud-Est de la France entre 1948 et 2019 un algorithme de classification hiérarchique ascendante, afin d'obtenir 7 classes de jours pluvieux, auxquelles s'ajoute une classe de jours secs ou à précipitation négligeable. Ensuite, le centroïde de chaque classe est calculé pour l'ensemble des données de géopotentiel 700 hPa et 1000hPa pertinentes de la zone et chaque jour est réaffecté à la classe avec le centroïde le plus proche. Les 8 classes initiales ont été groupées en 4 grandes dominantes de type de temps pour les besoins de l'action 2. Le type de temps Océanique regroupe "Oceanic wave", "Steady Atlantic" et "Southwest circulation", le Méditerranéen "South circulation", "East return" et "Central depression", le Continental correspond à "Northeast circulation" et le dernier est l'Anticyclonique. Ce groupement, appelé par la suite classification EDF, a déjà été utilisé dans d'autres études portant sur les précipitations dans les Alpes françaises du Nord, notamment Blanchet et al. [2020]. Ces 4 grands modes de circulation sont illustrés par leur géopotentiel moyen à 1000 hPa et les vents associés dans la Figure 3.

3. https ://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp# !/search ?type=dataset

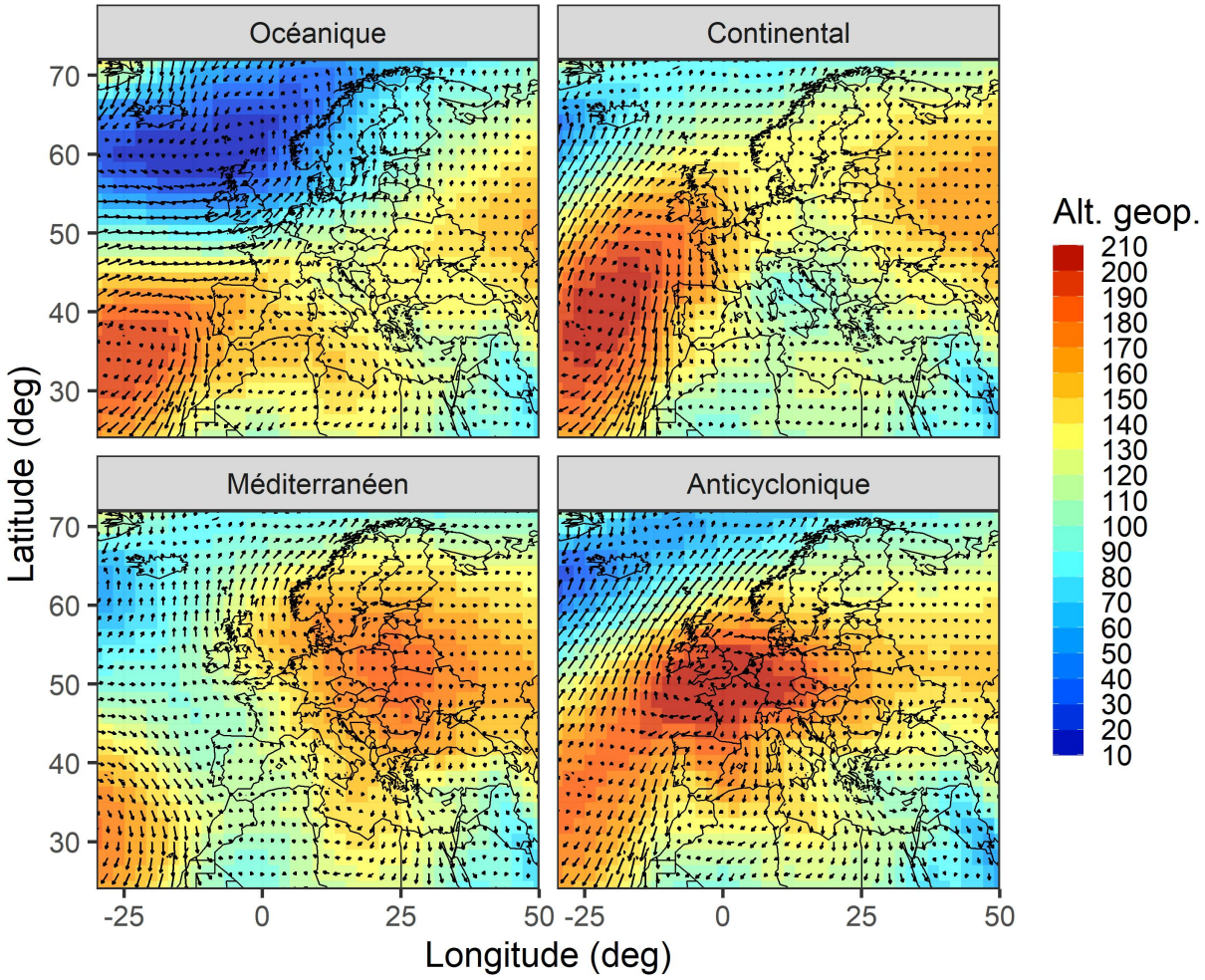

FIGURE 3 – Altitude moyenne du géopotentiel à 1000 hPa (en mètres) et vecteurs vents associés (20CR membre 1) pour la classification EDF.

N-W	SW-SE	E-NE	HP	MB
UN, CN, AN, UNW, CNW, ANW, UW, CW, AW	USW, CSW, ASW, US, CS, AS, USE, CSE, ASE	UE, CE, AE, UNE, CNE, ANE	AA	UU

Table 3 – Groupement des 27 classes initiales de Lamb en 5 grandes classes de type de temps (C=Cyclonique, A=Anticyclonique, S= Sud, W=Ouest, E=Est, N=Nord, U=Circulation peu marquée).

2.7.2 Classification Lamb

La classification EDF ne couvrant qu'une partie des dates de réaction hydrologiques utilisées dans l'action 2, un jeu de données de classification de circulations atmosphériques plus long terme a dû être développé. Ce travail a été effectué dans le cadre du stage de fin d'études de Périne Kiennemann [Kiennemann, 2021]. Dans un premier temps, des tentatives de reconstruction de la classification EDF vers le passé ont été menées sans résultats satisfaisants en terme d'homogénéité. La classification de Lamb objectivée [Jenkinson and Collison, 1977] a donc été sélectionnée, du fait de son utilisation extensive dans des études portant sur la précipitation (P. James, communication personnelle 2021), de la simplicité des données d'entrée (pression au niveau de la mer) et de la facilité d'interprétation physique des classes, basées uniquement sur des seuils d'intensité et de direction de vent et de vorticité. D'après les données 20CR de pression au niveau de la mer et avec la librairie R synoptReg [4] adaptée pour nos latitudes, les 27 classes Lamb ont pu être calculées pour chaque jour entre 1851 et 2014 et pour les membres 1, 2 et moyen de 20CR. Les données utilisées couvrent la zone entre -10 et 20°E et 35 et 55°N.

Afin de faciliter l'interprétation et le croisement avec les dates de réaction des torrents, les 27 classes ont été regroupées en 5 grandes classes de circulations atmosphériques, ci-après désignées par le terme classification Lamb : Nord à Ouest (N-W), Sud-Ouest à Sud-Est (SW-SE), Est à Nord-Est (E-NE), Haute Pression (HP) et Marais barométrique (MB). Le regroupement des 27 classes est résumé dans le Tableau 3 et les 5 grands modes de circulation sont illustrés par leur géopotentiel moyen à 1000 hPa et les vents associés dans la Figure 4. La classe MB regroupe des journées où il n'y a pas de circulation ou d'anticyclone marqués sur la zone d'étude, le champ de pression présente donc une forme assez plate. On note des similarités des classes Lamb avec certaines classes EDF en comportement moyen, mais les centres de forte pression ou les dépressions sont décalées dans l'espace. A l'échelle journalière, les différences entre les classes sont encore plus prononcées, empêchant toute comparaison entre les classes des 2 classifications. Il s'agit donc bien de deux classifications différentes avec des méthodes et des données d'entrée distinctes.

4. https ://rdrr.io/cran/synoptReg/

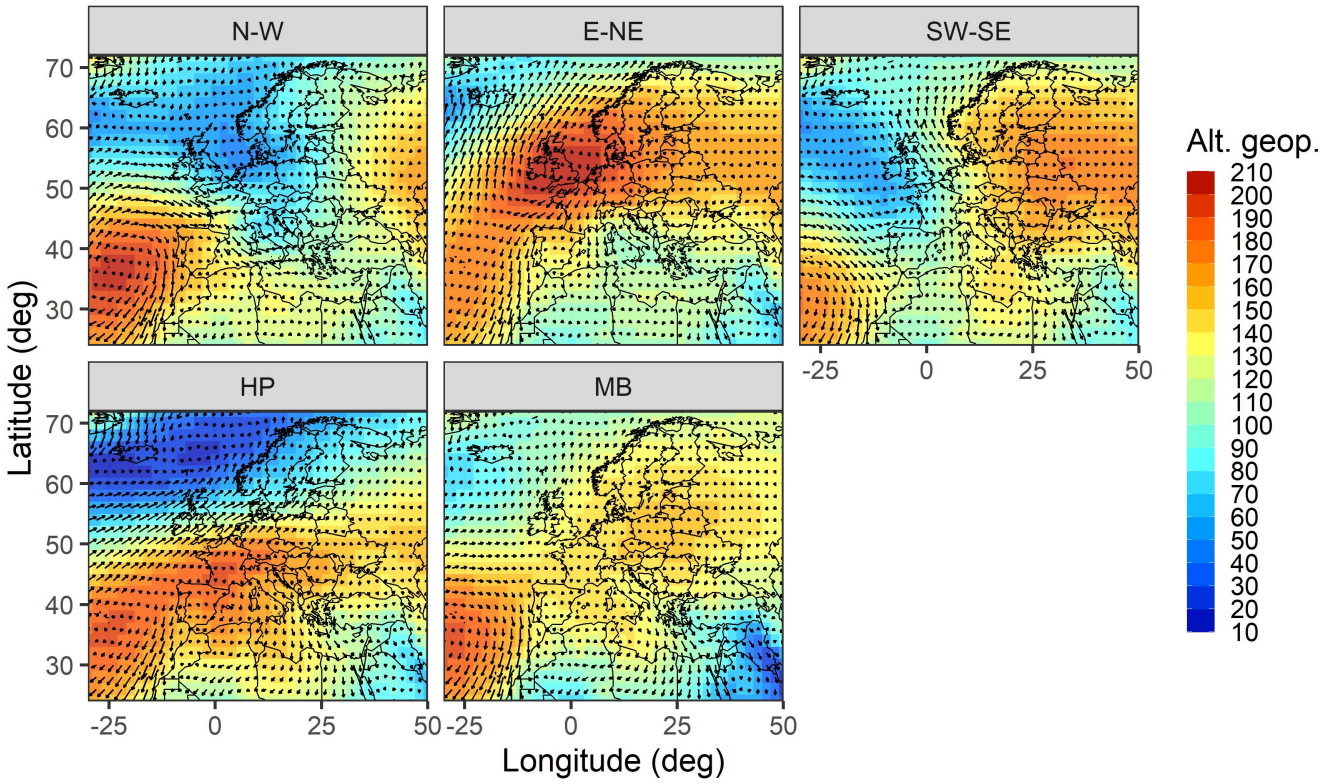

FIGURE 4 – Altitude moyenne du géopotentiel à 1000 hPa (en mètres) et vecteurs vents associés (20CR membre 1) pour la classification Lamb.

3 Données hydrologiques

3.1 Travaux antécédents

Nous listons ici quelques études qui exploitent les mesures de débits concernant de nombreux bassins versants des Alpes du Nord. Peteuil et al. [2011] proposent des méthodes de prédétermination des crues pour des bassins versants des Alpes françaises, en s'appuyant sur un échantillon de 159 bassins versants jaugés (superficie inférieure à 500 km^2 et avec au moins 7 années d'observation hydrométrique). Quefféléan [2015] évalue le temps de montée des crues torrentielles rapides à partir d'un échantillon de 133 stations françaises réparties sur les Alpes et Pyrénées, dont 65 dans les Alpes, cet échantillon ayant été obtenu dans le cadre d'un Travail de Fin d'Etudes [Unanoa, 2015]. Evin and Piton [2020a] exploitent cet échantillon afin d'analyser les liens entre magnitude et durée des crues sur ces zones Alpine et Pyrénéenne. Ces différents travaux montrent globalement une faible disponibilité de longues chroniques des débits sur les Alpes du Nord et une critique nécessaire des données, notamment en période de crue.

3.2 Séries de débits observés

Plusieurs définitions de la zone "Alpes du Nord" sont possibles [Meyzenq, 1984]. On a choisi dans un premier temps de considérer l'ensemble des bassins versants situés dans les départements de la Drôme, l'Isère, la Savoie, la Haute-Savoie et les Hautes-Alpes. Les bassins versants ont été sélectionnés dans ce domaine spatial selon des critères de taille (surface inférieure à 300 km^2) et de qualité des séries de débits mesurés. En particulier, les séries de débits trop courtes (moins de 7 ans cumulés) n'ont pas été conservées. On a de plus éliminé les bassins versants pour lesquels la qualité des mesures en hautes eaux était douteuse. Les problèmes les plus couramment rencontrés pour les bassins issus de la Banque Hydro sont notamment des mesures plafonnantes lors des crues, des écarts très importants entre deux mesures lors de crues, et des problèmes de dates [voir illustrations dans Evin and Piton, 2020b].

Dans les départements de l'Isère, la Savoie et la Haute-Savoie, tous les bassins versants répondant aux critères ont été conservés. Dans le département des Hautes-Alpes, les bassins versants appartenant au bassin du Drac ont été conservés, ainsi que quelques bassins situés aux marges des massifs classiquement partagés entre Alpes du Nord et Alpes du Sud (Dévoluy, Ecrins, Cerces). Dans le département de la Drôme, les bassins versants conservés sont ceux des cours d'eau issus des contreforts ouest et sud du massif du Vercors.

Dans le cadre de l'action 4, l'étude a donc porté sur 79 bassins versants jaugés (voir contours et exutoires à la figure **??**). La répartition des effectifs selon la provenance des séries de débits observés est la suivante :

- 73 bassins de la Banque Hydro (`http://hydro.eaufrance.fr/`). Les débits au pas de temps horaire ont été construits par interpolation des débits à pas de temps variable.
- 5 bassins de la base de données EDF, les séries de débits nous ont été fournis au pas de temps horaire.
- 1 bassin instrumenté par l'Institut des Géosciences de l'Environnement (Université Grenoble Alpes) dont la série de débit nous a été fourni au pas de temps 15 minutes.

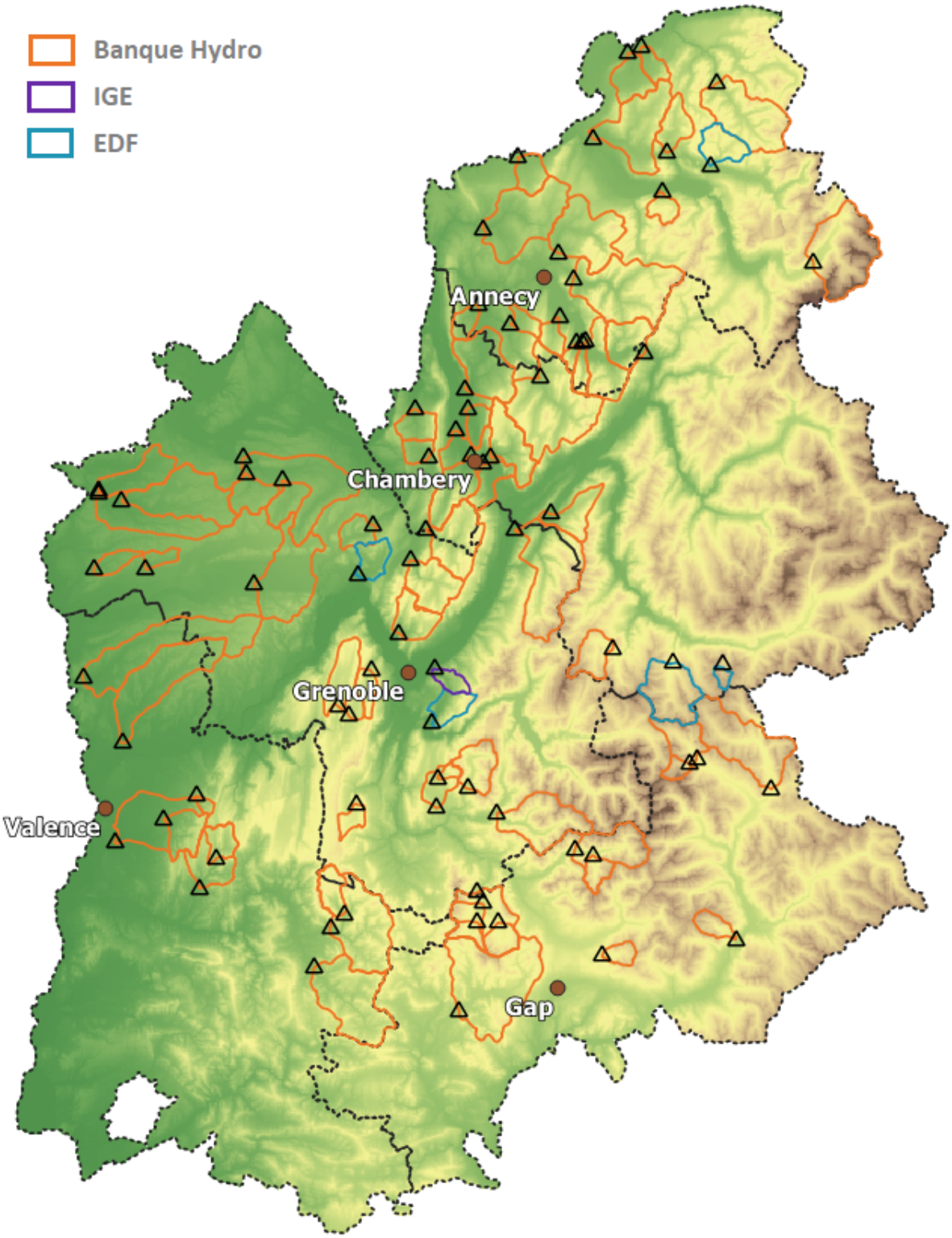

FIGURE 5 – Localisation des exutoires et contours des 79 bassins versants jaugés étudiés dans le cadre de l'action 4. La couleur des contours identifie l'origine des débits observés.

Dans le cadre de l'action 5, le modèle hydrologique MORDOR TS a été calé puis validé par EDF DTG dans une étude interne à EDF. La méthode utilisée est décrite dans la thèse de Laura Rouhier [2018]. Les séries de débits utilisées pour caler le modèle sont majoritairement des débits naturels reconstitués par EDF à différents points de contraintes visibles sur la Figure 6.

3.3 Données statistiques

3.3.1 Quantiles SHYREG

Shyreg est une méthode de prédétermination des quantiles de débit de pointe régionalisée sur la France entière. Les données sont produites sur une grille régulière de 1 km^2. Ces données sont comparées aux quantiles issus des simulations de MORDOR-SD sur les bassins non jaugés.

3.3.2 Autres sources

Les estimations de quantiles de débit de pointe et de débits événementiels ont été recherchés sur un échantillon réduit de bassins versants non jaugés. Les données sont principalement issues :

- des études menées sur les plages de dépôts et finalisées en 2012 par le bureau d'études Hydrétudes,
- de la cartographies des aléas naturels prévisibles effectuée par le bureau d'étude Alp'Géorisques dans le cadre de l'élaboration du PLUi de Grenoble Alpes Metropole,
- des retours d'expériences et études menées après les crues des torrents de Belledonne d'août 2005.

3.4 La base de données RTM-IGE

Dans le cadre de l'action 2, les dates de référence pour les manifestations hydrologiques sont issues de la Base de Données RTM-IGE. Cette base de données référence des évènements hydrologiques marquants de par leurs impacts sur les infrastructures ou des vies humaines. Elle consiste en 104 séquences d'un à plusieurs jours où un ou plusieurs torrents et/ou rivières ont causé des dégâts remarqués. Dans le cadre de cette étude, seuls les évènements incluant au moins une réaction torrentielle ont été retenus, soit 70 évènements. Cette base de données inclut l'ensemble des 139 unités torrentielles (telles que définies par le RTM) qui recoupent le territoire des 75 communes constituant l'ensemble du territoire conjoint de l'agglomération INSEE grenobloise et de la Métropole grenobloise ("Y" grenoblois), ainsi que 5 tronçons de trois rivières (Isère, drac, Romanche). Elle couvre la période 1850-2019. Elle a été constituée à partir des dates recensées dans la BD-RTM Evènements [5] complétées par différentes publications de recherche et d'organismes publics. Seules les crues couvrant la zone d'étude et datées précisément ont été conservées, puis les crues d'intensité très faible et isolées temporellement ont été retirées, avant de finalement combiner les données du RTM et des sources complémentaires, en groupant au sein d'un même évènement hydro-météorologique les crues ayant eu lieu pour des jours voisins. Pour une description plus complète de la base de données et de sa constitution, le lecteur est renvoyé vers Creutin et al. [2022].

Les évènements torrentiels recensés dans la BD RTM-IGE ont un temps de retour de l'ordre de 2,5 ans à l'échelle du "Y" grenoblois (70 crues sur 170 ans), tandis que à l'échelle du torrent les crues ont un temps de retour de l'ordre de la plus-que-décennale à la plus-que-centennale (1 à 11 crues sur 170 ans), voir Figure 7.

5. Voir site internet : https ://rtm-onf.ign.fr/query/show-query-form/SCHEMA/RAW_DATA

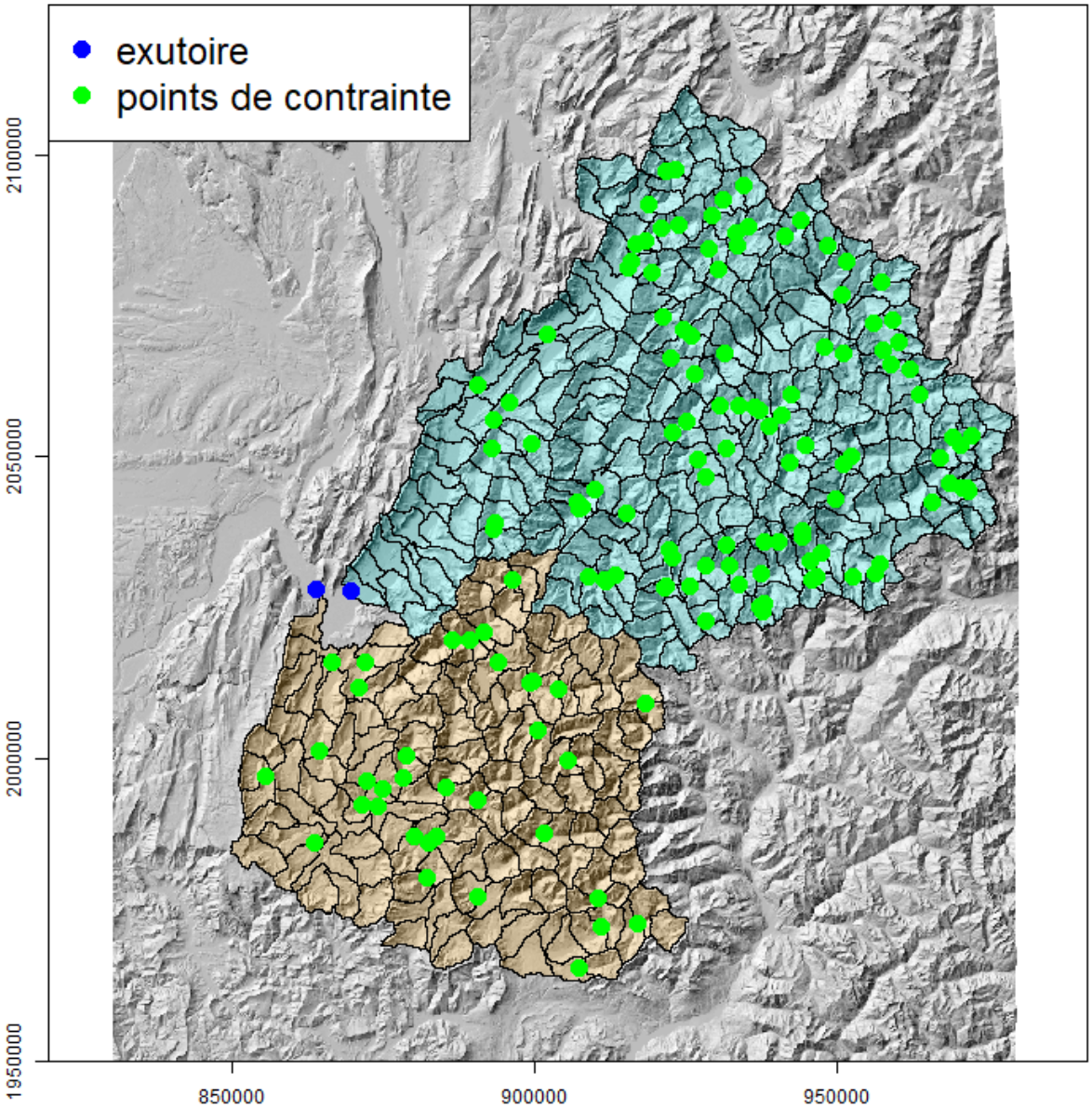

FIGURE 6 – Localisation des stations hydrométriques et contours des entités étudiées des bassins de l'Isère et du Drac dans le cadre de l'action 5. Les points représentent la localisation des séries de débit utilisées.

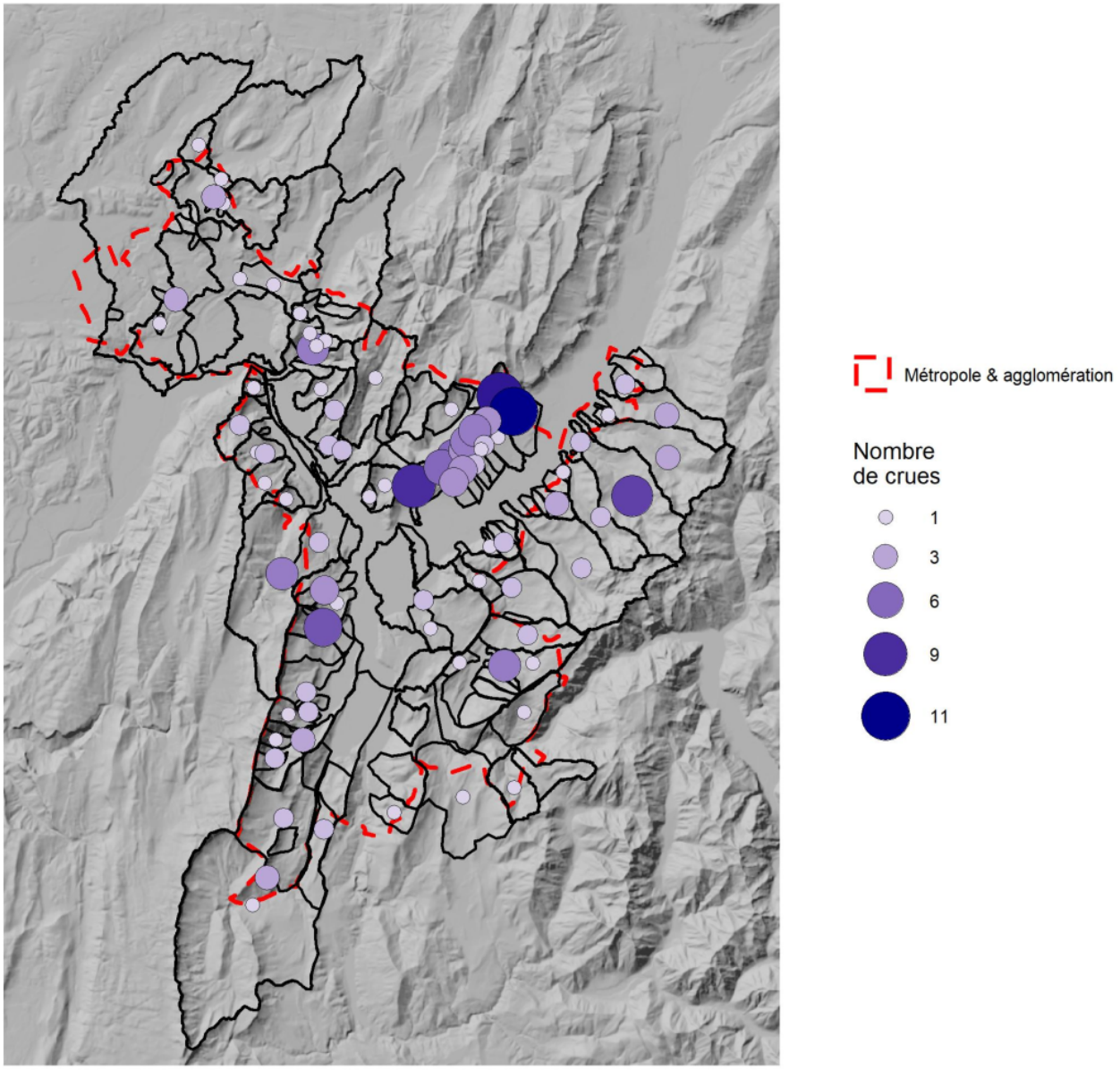

FIGURE 7 – Nombre de crues torrentielles référencées par bassin (en liseré noir) de la BD RTM-IGE (1850-2019).

3.5 Description des bassins versants

Action 2 : Dans le cadre de l'étude des scénarios atmosphériques gouvernant les crues torrentielles, la couverture des bassins versants correspondant aux entités hydrologiques référencées dans la BD RTM-IGE a été déterminée. Ces bassins versants sont par la suite utilisés pour croiser informations météorologiques et géomorphologiques, ainsi que pour la communication visuelle des résultats. Dans ce but, les entités hydrologiques telles que définies par le RTM [6], et comprises dans la zone couverte par les communes de l'agglomération INSEE grenobloise et/ou de la Métropole Grenobloise (BD ADMIN EXPRESS [7]) sont croisées avec les bassins versants correspondants de la Base Nationale des Bassins Versants [8]. Dans le cas de bassins versants plus petits ou d'exutoires différents pour le RTM, les cours d'eau de la BD CARTHAGE [9] et le MNT de la BD ALTI 75m [10] sont utilisés pour déterminer les contours des bassins versants correspondants.

Enfin, le MNT de la BD ALTI 25m [11] et les cours d'eau de la BD CARTHAGE ont été utilisés pour déterminer des paramètres géomorphologiques sélectionnés au sein de l'action 3, afin de les croiser avec les indicateurs météorologiques de l'action 2.

Action 4 : L'utilisation du modèle MORDOR-SD implique de connaître la topographie du bassin. Cette dernière est extraite de la BD Alti à la résolution 25m. L'indice de développement et de persistance des réseaux (IDPR) produit par le BRGM [Mardhel, 2006] a été utilisé pour évaluer la répartition entre ruissellement et infiltration sur les bassins versants. Les données descriptives d'occupation du sol présentées pour certains bassins sont issus de la base de données OSO 2018 au format raster.

Action 5 : L'utilisation du modèle MORDOR-TS implique un certain découpage des bassins de l'Isère et du Drac par entité ainsi qu'un schéma de routage qui a été établi par l'équipe de EDF DTG. Le découpage des bassins de l'Isère à Grenoble et du Drac à Fontaine est visible sur la Figure 6.

6. Données communiquées par le RTM
7. Voir site internet : https ://www.data.gouv.fr/en/datasets/admin-express/
8. Données produites par le SCHAPI
9. Voir site internet : http ://services.sandre.eaufrance.fr/telechargement/geo/ETH/BDCarthage/
10. Voir site internet : https ://www.data.gouv.fr/en/datasets/bd-alti-r-75-m-250-m-1-000-m/
11. Voir site internet : https ://geoservices.ign.fr/documentation/diffusion/telechargement-donnees-libres.html

4 Données sur l'activité de transport solide

4.1 Travaux antécédents

4.1.1 Inventaire des plages de dépôt de Gruffaz [1996]

Un premier inventaire des plages de dépôts localisés dans les onze départements[12] français où est présent un service ONF-RTM a été réalisé par Gruffaz [1996]. A l'époque, 188 plages de dépôts ont été inventoriées sur 155 torrents. Les caractéristiques principales du bassin versant drainé, de l'ouvrage de dépôt et des enjeux en aval étaient renseignées ainsi que les travaux et adaptations de l'ouvrage, notamment les curages.

4.1.2 Inventaire des ouvrages du Haut Grésivaudan (rapport EGIS)

La Communauté de Communes du Pays du Grésivaudan (CCPG) a mandaté le bureau d'études EGIS Eau en 2012 afin de réaliser une étude des cours d'eau sur le territoire de la CCPG. Cette étude comprend un état des lieux des ouvrages hydrauliques présents sur le territoire. Elle a ainsi notamment permis de recenser et localiser l'ensemble des plages de dépôts (gérées par les communes, les associations syndicales ou l'ONF-RTM) présentes ou en projet. L'étude ne fournit pas de données relatives aux historiques de curages des plages de dépôts. Par contre quelques caractéristiques des ouvrages répertoriés sont généralement disponibles (dimensions, volumes de stockage, enjeux liés aux ouvrages, photographies…).

4.1.3 Etudes des Associations Syndicales (rapports Hydrétudes)

Sous la maîtrise d'ouvrage de l'Union des Associations Syndicales (AS) de gestion des cours d'eau en Isère, des études ont été menées sur 30 plages de dépôts gérées par les AS. Ces études ont été finalisées en 2012 par le bureau d'études Hydrétudes et ont pour objectif, notamment, de proposer un document de gestion, d'entretien et de suivi pour chaque plage de dépôts. Des historiques des curages réalisés ont généralement été établis pour ces plages de dépôts. Ces études ont été réalisées pour la majorité des plages de dépôts gérées par les AS. Toutefois, certains ouvrages à faibles enjeux n'ont pas fait l'objet d'études.

4.1.4 Analyse des données ONF-RTM pour la méthode ECSTReM [Peteuil and Liébault, 2011]

Dans le cadre de l'élaboration de la méthode ECSTReM (Estimation de la Charge Sédimentaire des Torrents par Régressions Multivariées), la Direction Technique de l'ONF-RTM et l'unité ETNA du CEMAGREF ont rassemblé des informations relatives à la production sédimentaire de 72 bassins versants dans les Alpes du Nord [Liébault et al., 2010, Peteuil and Liébault, 2011, Peteuil et al., 2012]. Ces données des productions sédimentaires sont issues de la compilation des registres de suivis de curages des plages de dépôts ONF-RTM et des informations relatives aux « évènements » base de données ONF-RTM (BD RTM, voir § 4.3). Ces deux sources de données proviennent des services ONF-RTM qui assurent la gestion de ces bassins versants.

4.1.5 Enquête ONF-RTM sur les plages de dépôt de 2018 [Carladous and Piton, 2018]

En 2018, l'ONF-RTM a lancé une enquête afin de mettre à jour l'inventaire du parc des plages de dépôts établi par Gruffaz [1996]. L'objectif de cette enquête était également d'améliorer la compréhen-

12. Alpes : Hautes-Alpes, Alpes de Haute Provence, Alpes Maritimes, Isère, Savoie, Haute Savoie et Pyrénées : Ariège, Haute-Garonne, Hautes-Pyrénées, Pyrénées-Atlantiques et Pyrénées-Orientales.

sion du fonctionnement des plages de dépôts gérés par l'ONF-RTM en recueillant les connaissances de terrain sur la gestion, la maintenance adaptative et les éventuels dysfonctionnements de ces ouvrages. Une fiche standardisée, inspirée de celle de Gruffaz [1996] puis enrichie, a été conçue afin d'informer les caractéristiques des ouvrages de plages de dépôts (par exemple : dimensions de l'ouvrages, enjeux, dysfonctionnements, historiques des travaux réalisés). Cette enquête a permis également de mettre à jour l'historique de suivi des curages pour une partie des plages de dépôts de l'ONF-RTM (particulièrement les plages de dépôts des bassins « ECSTReM » dont les historiques s'arrêtaient en 2009).

4.1.6 Les EBR (Etudes de bassin de risques)

Un certain nombre d'EBR réalisées par l'ONF-RTM entre l'inventaire 2018 et l'été 2020 ont été mises à disposition du projet HydroDemo pour compléter les séries temporelles de données de curage ou pour compléter des informations liées à des évènements.

4.2 Données de curages brutes

A partir de l'inventaire de la CCPG et des données des rapports des ASA, il a été identifié la présence d'un ou de plusieurs ouvrages sur un certain nombre de communes de la vallée du Grésivaudan ainsi que du Sud-Grésivaudan. Des contacts [13] ont été pris par INRAE, avec plus ou moins de succès, pour récupérer les séries temporelles des curages disponibles permettant d'enrichir la base de donnée. La teneur et la qualité des données était variable (volume moyen annuel, données ponctuelles de curage majeur, série complète de données).

Le SM3A (Syndicat Mixte d'Aménagement de l'Arve et de ses Affluents) réalise un suivi de l'Arve et de ses affluents, en particulier des volumes de curage opérés dans les zones d'exhaussement des cours d'eau (directement dans le lit) ainsi qu'au droit d'ouvrages de sédimentation. Un fichier de 420 données de curages couvrant la fenêtre temporelle 1988-2020 a été partagé par le SM3A avec INRAE. Ce fichier a permis de compléter des séries temporelles d'ouvrages inventoriés en 2018. 18 ouvrages de sédimentation régulièrement entretenus mais non connus précédemment ont été ajoutés au jeu de données. Un certain nombre des curages étant toutefois réalisés ponctuellement suite à un évènement torrentiel majeur et probablement isolé, ils ne constituent pas une réelle série temporelle. Ces données n'ont pu être intégrées à la base de données.

4.3 La base de données "évènement" de l'ONF-RTM

La base de données évènement de l'ONF-RTM ("BD RTM", `https://rtm-onf.ign.fr/`) constitue un système structuré d'informations sur les risques naturels en montagne. La BD RTM recense et décrit plus de 30 000 évènements dans 11 départements français des Alpes et Pyrénées. La plupart des évènements recensés sont survenus récemment (à partir de 1980) toutefois la BD RTM peut également contenir des renseignements relatifs à des évènements historiques anciens (du 14ème au 20ème siècle). La mise à disposition des données rassemblées par les services ONF-RTM concernant les évènements recensés vise à informer et sensibiliser le public et les professionnels sur les phénomènes naturels et leurs impacts. En complément de l'accès publique permis par l'interface web, l'ONF-RTM a mis à disposition d'HYDRODEMO un accès direct aux données sources. La BD RTM se présente alors sous la forme d'une interface de requête sur les différents champs de la base de données avec un affichage cartographique. Cette base de données est composée de plusieurs objets dont :

13. Liste de communes contactées : La Tronche, Domène, Vaulanvey-le-Haut, Eybens et Gières

Table 4 – Principaux champs pour les Evènements-RTM

Champs	*Définition*
Id Evènement	Identifiant unique de l'évènement
Phénomène	Type de phénomène naturel (avalanche, glissement de terrain, crue torrentielle, etc.)
Site Associé	Site-RTM associé à l'évènement.
Intensité	Importance des impacts des évènements
Nature	Description du phénomène qui s'est produit (éventuellement les volumes de sédiments charriés).
Zone de départ	Description du secteur d'origine du phénomène
Zone d'arrivée	Description du secteur d'arrivée du phénomène.
Date	Date de l'évènement. Cela peut être le jour, le mois et l'année de l'évènement, voir le trimestre, le semestre, la décennie ou le siècle.

— Le « site » (Site-RTM) qui correspond à une zone d'étude d'un phénomène naturel identifié en un lieu (ce dernier peut avoir été touché par un ou plus évènements). L'emprise d'un Site-RTM est défini par les agents de l'ONF-RTM. Ils prennent en compte l'emprise des phénomènes : l'ensemble du bassin versant d'un torrent jusqu'à son cône de déjection constitue généralement un Site-RTM qui peut éventuellement couvrir plusieurs communes.
— L'« évènement » (Evènement-RTM) correspond à la manifestation observée d'un phénomène naturel à une date et un endroit données. Avec une précision variable, il existe une description des principales caractéristiques (localisation exacte, causes, impacts, intensité) pour chaque Evènement-RTM (Tableau 4). Des "*Fiches Evènements*" sont associés à chaque Evènements-RTM entré dans la BD RTM. Elles sont régulièrement renseignées dans la BD RTM par les agents des services ONF-RTM. Dans la BD RTM, chaque Evènement-RTM se produit nécessairement sur un seul Site-RTM. Chaque Evènement-RTM est également relatif à un type de phénomène (crue torrentielle, avalanche, etc.).

Il existe d'autres objets, que nous ne détaillerons pas, tels que les ouvrages, les dispositifs (regroupement d'un ou plusieurs ouvrages pour lutter conjointement contre un phénomène précis), les expertises, ou les interventions. Tous ces objets sont hiérarchisés dans la BD RTM. Par exemple, un ouvrage est associé à un dispositif qui est lui-même associé à un Site-RTM. Chaque Site-RTM est cartographié dans la BD RTM. Ce n'est pas forcément le cas des autres objets.

Dans le cas des phénomènes de type "crues torrentielles", il arrive que les agents des services RTM renseignent des caractéristiques supplémentaires telles que des estimations de volumes de sédiments charriés ou l'occurrence de lave torrentielle. Ces informations sont complémentaires au champs d'intensité (Tableau 4) et permettent ainsi de quantifier l'évènement en terme d'apport de sédiments en plus d'évaluer l'intensité de celui-ci.

L'interface de requête des champs de la BD RTM offre la possibilité de construire et d'exporter des tableaux de données. L'agrégation des informations associées aux plages de dépôts avec les informations associées tirées de Fiches Evènements qui sont rattachées à un site RTM plutôt qu'à un ouvrage est décrit dans le rapport final HYDRODEMO de l'Action 3.

4.4 Données cartographiques

Les indicateurs géomorphologiques descripteurs des bassins versants étudiés dans le cadre du projet ont été extraits d'un certain nombre de bases de données auxquelles INRAE a accès via ses conventions, notamment :

- La BD Alti [14] (résolution à 25 m) pour l'altitude ;
- La BD Corine Land Cover [15] (CLC, version de 2018) pour l'occupation des sols (données vectorielles) ;
- La BD FORETS V2 [16] pour l'identification des sols nus (données vectorielles) ;
- La BD TOPO [17] pour le tracé du réseau hydrographique et du réseau routier (données vectorielles) ;
- La BD CARTO [18] pour la délimitation des lacs et glaciers (données vectorielles) ;
- La BD Charm-50 du BRGM [19] pour la géologie (données vectorielles) ;
- Les orthophotos

Les traitements et analyses cartographiques ont été réalisés sur le logiciel QGIS [QGIS Development Team, 2009]. Les cartographies de bassin versant ont été réalisées à l'aide de l'outil SediConnect [Crema and Cavalli, 2018] sur la BD Alti (25m).

Les indicateurs pluviométriques et hydrologiques ont été extraits des jeux de données décrits dans les sections précédentes au droit des bassins versants étudiés.

14. Voir site internet : `https://geo.data.gouv.fr/fr/datasets/22355590527b92116abf42a509b6defdbf4c0e33`
15. Voir site internet : `https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover`
16. Voir site internet : `https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?article646`
17. Voir site internet : `https://artificialisation.biodiversitetousvivants.fr/bases-donnees/bd-topo`
18. Voir site internet : `https://geo.data.gouv.fr/fr/datasets/926e7908be05110468140c93f773e06e9317a438`
19. Voir site internet : `http://www.geocatalogue.fr/Detail.do?fileIdentifier=94636790-8615-11dc-9e02-0050568151b7`

Références

J. Blanchet, J.-D. Creutin, and A. Blanc. Retreating winter and strengthening autumn Mediterranean influence on extreme precipitation in the Southwestern Alps over the last 60 years. *Environmental Research Letters*, Sept. 2020. ISSN 1748-9326. 10.1088/1748-9326/abb5cd. URL https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abb5cd.

S. Carladous and G. Piton. Mise à jour inventaire et retour d'expériences sur les plages de dépôt. Technical Report MIG MTES (Action C2), ONF-RTM & IRSTEA ETNA, 2018.

G. P. Compo, J. S. Whitaker, P. D. Sardeshmukh, N. Matsui, R. J. Allan, X. Yin, B. E. Gleason, R. S. Vose, G. Rutledge, P. Bessemoulin, S. Brönnimann, M. Brunet, R. I. Crouthamel, A. N. Grant, P. Y. Groisman, P. D. Jones, M. C. Kruk, A. C. Kruger, G. J. Marshall, M. Maugeri, H. Y. Mok, . Nordli, T. F. Ross, R. M. Trigo, X. L. Wang, S. D. Woodruff, and S. J. Worley. The Twentieth Century Reanalysis Project : The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(654) :1–28, Jan. 2011. ISSN 00359009. 10.1002/qj.776. URL http://doi.wiley.com/10.1002/qj.776.

S. Crema and M. Cavalli. SedInConnect : a stand-alone, free and open source tool for the assessment of sediment connectivity. *Computers & Geosciences*, 111 :39–45, Feb. 2018. ISSN 0098-3004. 10.1016/j.cageo.2017.10.009. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300416308275.

J.-D. Creutin, J. Blanchet, A. Reverdy, A. Brochet, C. Lutoff, and Y. Robert. Reported Occurrence of Multiscale Flooding in an Alpine Conurbation over the Long Run (1850–2019). *Water*, 14(4) : 548, Jan. 2022. ISSN 2073-4441. 10.3390/w14040548. URL https://www.mdpi.com/2073-4441/14/4/548. Number : 4 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

ECMWF. ERA5 back extension 1950-1978 (Preliminary version) : tropical cyclones are too intense, 2021. URL https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5+back+extension+1950-1978+%28Preliminary+version%29%3A+tropical+cyclones+are+too+intense.

G. Evin and G. Piton. Analyse bivariée des liens entre magnitude et durée des crues en zones Alpine et Pyrénéenne. Technical Report hal-02509705 , INRAE ; DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques - Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire), 2020a. URL https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02509705/.

G. Evin and G. Piton. Analyse bivariée des liens entre magnitude et durée des crues en zones alpine et pyrénéenne. Rapport de recherche, INRAE ; DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques - Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire), 2020b.

F. Garavaglia, J. Gailhard, E. Paquet, M. Lang, R. Garçon, and P. Bernardara. Introducing a rainfall compound distribution model based on weather patterns sub-sampling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(6) :951–964, June 2010. ISSN 1607-7938. 10.5194/hess-14-951-2010. URL https://hess.copernicus.org/articles/14/951/2010/.

F. Gottardi. *Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne. Utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement. Application aux grands massifs montagneux français.* PhD thesis, Institut National Polytechnque de Grenoble, 2009.

F. Gottardi, C. Obled, J. Gailhard, and E. Paquet. Statistical reanalysis of precipitation fields based on ground network data and weather patterns : Application over french mountains. *Journal of Hydrology*, 432-433 :154–167, 2012.

F. Gruffaz. Etude de description et analyse des plages de dépôt torrentilles réalisées dans les Alpes et Pyrénées Françaises. Technical Report Bilan d'étape, RTM, 1996.

H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, A. Horányi, J. Muñoz-Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, S. Abdalla, X. Abellan, G. Balsamo, P. Bechtold, G. Biavati, J. Bidlot, M. Bonavita, G. Chiara, P. Dahlgren, D. Dee, M. Diamantakis, R. Dragani, J. Flemming, R. Forbes, M. Fuentes, A. Geer, L. Haimberger, S. Healy, R. J. Hogan, E. Hólm, M. Janisková, S. Keeley, P. Laloyaux, P. Lopez, C. Lupu, G. Radnoti, P. Rosnay, I. Rozum, F. Vamborg, S. Villaume, and J. Thépaut. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730) :1999–2049, July 2020. ISSN 0035-9009, 1477-870X. 10.1002/qj.3803. URL `https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.3803`.

A. Jenkinson and F. Collison. An initial climatology of gales over the North Sea Synoptic climatology. *Synoptic Climatology Branch Memorandum*, page 18, 1977.

P. Kiennemann. Étude de l'évolution passée des scénarios atmosphériques gouvernant les crues torrentielles de la métropole grenobloise. Technical report, July 2021.

F. Liébault, C. Peteuil, C. Jousse, B. Fragnol, J. Theule, F. Berger, J. Lopez Saez, A. Gotteland, M. Jaboyedoff, and A. Loye. L'utilisation des plages de dépôts pour la mesure du transport solide torrentiel : applications dans le département de l'Isère. Technical Report Programme de recherche 2008, PGRN, 2010.

F. Lobligeois. *Mieux connaître la distribution spatiale des pluies améliore-t-il la modélisation des crues ? Diagnostic sur 181 bassins versants français.* PhD thesis, AgroParisTech, 2014.

V. Mardhel. Carte de vulnerabilité intrinsèque simplifiée des eaux souterraines de la région Aquitaine. Rapport technique BRGM/RP-55311-FR, BRGM, 2006.

C. Meyzenq. A propos de la limite Alpes du Nord - Alpes du Sud. limites, pays de marge et organisation spatiale en montagne, évolution des concepts. *Revue de géographie alpine*, 72 :241–251, 1984.

C. Peteuil and F. Liébault. ECSTReM, une méthode pratique pour prédire la production sédimentaire an-nuelle et événementielle des torrents à partir d'observations originales spécifiques aux Alpes françaises. In *Actes du Colloque Eaux en Montagne de la Société Hydrotechnique de France*, page 6, Lyon, France, 2011.

C. Peteuil, N. Mathys, A. I. Martin, R. Zegrar, D. Porcheron, A. Riess, and T. Cipriani. Prédétermination des crues sur les bassins versants torrentiels : faisabilité d'une synthèse hydrologique régionale fondée sur la prise en compte de facteurs géographiques locaux. Technical report, Rapport PGRN, 2011.

C. Peteuil, F. Liébault, and O. Marco. ECsTREM, a practical approach for predicting the sediment yield in torrents of the French Alps [ECsTREM, une approche pratique pour predire la production sedimentaire des torrents des Alpes Françaises]. In *INTERPRAEVENT Conference Proceedings*, volume 1, pages 293 – 304, 2012.

QGIS Development Team. *QGIS Geographic Information System.* Open Source Geospatial Foundation, 2009. URL `http://qgis.osgeo.org`.

Y. Quefféléan. Evaluation du temps de montée des crues torrentielles rapides. Technical report, ONF/RTM : Direction Forêts et Risques Naturels, Département Risques Naturels, Pôle RTM, 2015.

P. Quintana Segui. *Simulation hydrologique en région méditerranéenne avec SAFRAN-ISBA-MODCOU. Amélioration de la physique et évaluation des risques dans le cadre du changement climatique.* PhD thesis, Université Toukouse III - Paul Sabatier, 2008.

L. Roger. Validation et utilisation climatologiques de la ré-analyse de lame d'eau radar Comephore étendue. Stage de fin d'étude, Météo-France, Toulouse, 2017. 77 p.

L. Rouhier. *Régionalisation d'un modèle hydrologique distribué pour la modélisation de bassins non jaugés. Application aux vallées de la Loire et de la Durance.* Thèse de doctorat, Sorbonne Université, 2018.

S. Unanoa. Analyse des gradients de montée de crue des bassins versants Alpins et Pyrénéens français. Technical report, Mémoire présenté pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de l'ENGEES, 2015. 79 pages.

J.-P. Vidal, E. Martin, L. Franchistéguy, M. Baillon, and S. Jean-Michel. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over france with the safran system. *International Journal of Climatology*, 30 (11) :1627–1644, 2010.

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

Rejoignez-nous sur :

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

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

INRAE