



HAL
open science

Analyse des données de lame d'eau radar pour l'étude des pluies fortes en France métropolitaine. Une contribution à la méthode IRIP de détermination de l'aléa de ruissellement intense

A. Ekoko Safi

► To cite this version:

A. Ekoko Safi. Analyse des données de lame d'eau radar pour l'étude des pluies fortes en France métropolitaine. Une contribution à la méthode IRIP de détermination de l'aléa de ruissellement intense. Sciences de l'environnement. 2017. hal-02606539

HAL Id: hal-02606539

<https://hal.inrae.fr/hal-02606539>

Submitted on 16 May 2020

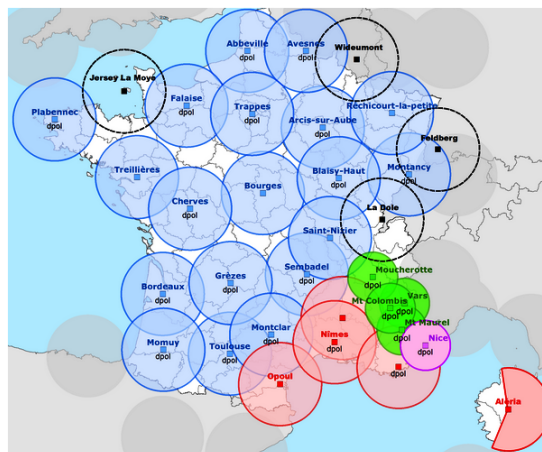
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

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

Master Sciences des Environnements Continentaux
et Côtiers
Parcours Environnement, Sols et Eaux

**Analyse des données de lame d'eau radar
pour l'étude des pluies fortes en France
métropolitaine. Une contribution à la
méthode IRIP de détermination de l'aléa
de ruissellement intense**

Mémoire de stage de fin d'études



EKOKO-SAFI Angel

Date de soutenance : 14 Septembre 2016

Tuteur universitaire : Robert LAFITE, Université de Rouen
Maître de stage : Etienne LEBLOIS, Irstea-Lyon

Remerciements

Je tiens, tout d'abord, à exprimer ma reconnaissance à Jésus-Christ pour son souffle de vie gratuite.

Ce rapport n'aurait pu aboutir sans le soutien scientifique et humain de nombreuses personnes.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Etienne LEBLOIS, mon maitre de stage, pour m'avoir confié ce travail de recherche et m'avoir encadré durant ces 6 mois. Je le remercie pour m'avoir fait profiter de ses connaissances. Un grand merci pour les différentes formations tant en géostatistique qu'en programmation informatique.

Je tiens également à remercier Pascal BREIL, chercheur en Eco-hydrologie et responsable du projet IRIP[¶] pour m'avoir confié cette étude. J'ai fait partie de l'équipe IRIP. Les résultats des pluies fortes y sont au cœur d'une discussion actuelle visant l'amélioration de la méthode d'Indicateur de Ruissellement Intense Pluvial (IRIP).

Je remercie Robert LAFITE, tuteur, pour le suivi de mon stage et ses renseignements.

De nombreuses collaborations et rencontres ont jalonné toute la durée de mon stage. C'est ainsi que Laure-Carolle DA, Nour HOUDA et Ricardo AREVALO ont pu m'apporter de précieux conseils tout au long de mon séjour à Irstea^{||} et je les en remercie.

Je tiens aussi à mentionner le plaisir que j'ai eu à travailler au sein du groupe Hydrologie-Hydraulique et ceci, grâce à la bonne ambiance qui y règne.

J'adresse mes remerciements les plus amicaux à mes colocataires de bureau : Michael OSINA, Nicolas JOLY et Meriem CHETIBI. Un grand merci à tous les trois.

Je remercie du fond de mon cœur ma famille. Merci à mes parents d'être toujours là pour que tout se passe au mieux.

Je remercie de tout mon cœur Pierre JORIS et Guy-Verlain Tshimanga pour votre relecture.

Pour finir, je remercie l'ensemble des stagiaires et employés d'Irstea pour leur accueil et leur convivialité et l'ensemble de l'équipe du Master Environnement Sols et EAUX pour leur enseignement.

Merci à toutes et à tous et bonne lecture !

¶. Indicateur de Ruissellement Intense Pluvial

||. Institut de recherche scientifique et technologique sur l'eau et l'agriculture

Lexique

Ajustement par les pluviomètres : Correction des mesures radar en se basant sur celles des pluviomètres, effectuée au pas de temps horaire.

Aléa : Probabilité de manifestation d'un phénomène (naturel, technologique) sur un espace donné.

Anisotropie : Caractérise un phénomène spatial qui s'étend davantage dans certaines directions. Autrement dit, un phénomène qui suit une direction préférentielle.

Atténuation du signal : La traversée d'une zone de pluie importante (en largeur ou en intensité) réduit la puissance du signal par atténuation ; ce phénomène est d'autant plus important que la longueur d'onde est faible ; lequel est considéré comme négligeable pour des radars dont la longueur d'onde est de 10cm, il doit être pris en compte pour des radars émettant dans la bande des 5cm.

Artéfact : Cible non météorologique (oiseaux, insectes, avions, etc.) que peut parfois rencontrer l'onde émise par le radar lors de sa propagation.

Bassin versant : Zone géographique délimitée par une ligne de crête dans laquelle toutes les eaux convergent vers un point commun appelé exutoire.

Carte de scores : Carte obtenue par la comparaison des cumuls radar journaliers aux cumuls journaliers des pluviomètres. Ces cartes sont effectuées par le centre de météorologie radar de Météo-France depuis 2007.

Code qualité : Carte de facteurs qualité accompagnant chaque lame d'eau produit toutes les cinq minutes. Ces codes évoluent dans le temps en fonction des conditions de mesure (radar en panne, altitude effective des mesures etc.).

Chronique : Données organisées en série chronologique.

Échantillon sup-seuil : Échantillon des valeurs les plus fortes d'une chronique.

Échos de sol : Se produisent lorsque le faisceau du radar qui touche le sol, renvoie des échos en provenance du relief, des constructions, des arbres et de tout autre objet massif stationnaire.

Effet de Masque : Se dit lorsque le signal radar est masqué par un élément de relief, ce qui crée une zone d'ombre radar.

Effet de pépite : Ordonnée à l'origine de la courbe du variogramme. Il représente donc la variation entre deux mesures très proches. Ceci, il traduit l'irrégularité du phénomène spatial à l'échelle de l'étude.

Enjeux : Personnes, biens, activités, éléments du patrimoine culturel ou environnemental, menacés par un aléa.

Gradex ** : Le gradex d'une variable aléatoire est le taux d'accroissement de la variable en fonction du temps de retour.

Hydrologie urbaine : Branche de l'hydrologie s'intéressant à la partie du cycle de l'eau affectée par l'urbanisation ou affectant le fonctionnement de la ville : infiltration de l'eau dans les sols et fonctionnement des nappes, ruissellement des eaux en surface et écoulements dans des biefs naturels (rivières) ou artificiels (canaux, conduites souterraines), évacuation et épuration des eaux usées, etc.

Interpolation spatiale : Estimation de valeurs entre des points de valeurs connues.

Moyenne mobile : est un type de moyenne statistique utilisée pour analyser des séries ordonnées de données, le plus souvent des séries temporelles, en supprimant les fluctuations saisonnières de façon à en souligner les tendances à long terme.

Palier : Valeur à laquelle la fonction variographique se stabilise, pour une distance appelée la portée.

Période de retour : Caractérise le temps statistique moyen entre deux occurrences (pour les pluies courantes, on parle parfois de fréquence d'apparition).

Pixel : Point élémentaire de résolution d'un document cartographique maillé.

Pluie décennale : Pluie théorique calculée à partir de l'analyse des pluies passées et qui a une chance sur dix d'être dépassée chaque année.

Portée du variogramme : Distance à partir de laquelle le palier est atteint. Elle correspond à la notion physique de zone d'influence des échantillons : pour les distances inférieures à la portée, les échantillons sont corrélés ; pour les distances supérieures ou égales à la portée les échantillons ne le sont plus.

Propagation anormale : Lors de conditions atmosphériques particulières (forte stratification des températures, passage au-dessus de surfaces évaporantes), le faisceau radar est dévié vers le sol et provoque l'apparition d'échos parasites pouvant être assimilés à tort à de la pluie.

Quantile : Valeur statistique associée à une période de retour.

Raster : Image constituée de pixels. Chaque pixel possède une valeur chiffrée.

Réfectivité : Proportion d'énergie électromagnétique réfléchie à la surface d'un matériau.

Risque : Probabilité de conséquences négatives d'un phénomène (naturel, technologique) sur les activités humaines. En d'autres termes, le risque est la confrontation entre un aléa et des enjeux humains, économiques ou environnementaux.

** . Gradient des valeurs extrêmes

Statistiques d'ordre : Statistiques qui s'appuient sur les valeurs triées d'un échantillon $X_1 \dots X_n$ sont les valeurs ordonnées $X_1 \leq X_2 \leq \dots X_{n-1} \leq X_n$. Avec $X_1 =$ minimum et $X_n =$ maximum.

Variable de Bernoulli : Variable aléatoire de la loi de Bernoulli qui conduit à deux issues possibles : Le succès ($X=1$) et l'échec ($X=0$).

Zone d'accumulation : Zone où s'accumulent les eaux de ruissellement, soit derrière un obstacle, soit par ralentissement quand la pente est moins forte, soit encore par stockage dans une dépression.

Zone contributive ou de production : Zone où les conditions au sol permettent la formation d'une lame d'eau en surface.

Zone de transfert : axes de transfert naturels ou artificiels qui interceptent et redirigent l'écoulement du ruissellement vers l'aval.

Table des matières

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| INTRODUCTION | 1 |
| CHAPITRE 1. CONTEXTE DE L'ETUDE ET ELEMENTS DE LITTÉRATURE | 3 |
| 1.1. Les précipitations | 3 |
| 1.1.1 Climatologie | 3 |
| 1.1.2 Mesure des précipitations | 4 |
| 1.1.2.1 Les pluviomètres | 4 |
| 1.1.2.2 Le radar météorologique | 5 |
| 1.1.3 Les pluies intenses | 9 |
| 1.2. Le ruissellement | 11 |
| 1.2.1 Les processus et facteurs du ruissellement | 12 |
| 1.2.1.1 Les processus du ruissellement | 12 |
| 1.2.1.2 Les facteurs du ruissellement | 12 |
| 1.2.2 La méthode d'indicateur de ruissellement intense pluvial (IRIP) | 14 |
| 1.2.2.1 Principe de la méthode IRIP | 15 |
| 1.2.2.2 Exemples d'application de la méthode IRIP | 16 |
| CHAPITRE 2. MATERIELS ET METHODES | 18 |
| 2.1. Présentation des données | 18 |
| 2.2. Présentation de l'interface des lames d'eau radar | 20 |
| 2.3. Approche statistique | 21 |
| 2.3.1 Filtrage de données | 22 |
| 2.3.1.1 Filtrage par seuil | 22 |
| 2.3.1.2 Analyse géostatistique | 24 |
| 2.3.2 Analyse régionale des précipitations | 27 |
| 2.3.2.1 Détermination des régions homogènes | 29 |
| 2.3.2.2 Sélection d'une loi statistique régionale, estimation des paramètres et détermination des quantiles | 30 |
| CHAPITRE 3. RÉSULTATS :Statistiques et cartographiques | 34 |
| 3.1 Statistique | 34 |
| 3.1.1. Résultats du filtrage des données | 34 |
| 3.1.1.1. Variogrammes des pluies | 34 |
| 3.1.1.2. Image radar avant et après le filtrage | 36 |
| 3.1.2. Cas d'étude : Echantillon sup-seuil d'une chronique des pluies dans le département de l'Ardèche. | 37 |
| 3.1.3. Les courbes : IDF, PDF, PDAF | 38 |
| 3.1.3.1. Les courbes IDF | 39 |
| 3.1.3.2 Les courbes PDF | 40 |
| 3.1.3.3 Les courbes PDAF | 41 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2. La cartographie | 42 |
| 3.2.1. Les cartes rasters des quantiles | 42 |
| 3.2.2. Cartographie des quantiles des pluies | 43 |
| CHAPITRE 4. DISCUSSION ET PERSPECTIVES | 46 |
| 4.1 Qualité des données de base et validation des résultats | 47 |
| 4.1.1 Qualité des données de base | 47 |
| 4.1.2 Validation des résultats | 47 |
| 4.2 Intérêts et limites de la méthodologie | 48 |
| 4.2.1 Intérêts | 48 |
| 4.2.2 Limites | 48 |
| 4.3 Perspectives d'amélioration | 49 |
| CONCLUSION | 50 |
| BIBLIOGRAPHIE | 51 |
| WEBOGRAPHIE | 54 |
| BILAN DU STAGE | 55 |
| TABLE DES ANNEXES | 56 |

Table des figures

| | | |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Régions climatiques françaises | 3 |
| 2 | Exemple de composite de lames d'eau cumulées sur 12 h et codes de qualité compris entre 0 (mauvais) et 100 (excellent) | 6 |
| 3 | Image Radar avec plusieurs échos parasites à gauche. Même situation après filtrage à droite | 8 |
| 4 | Carte du réseau radar métropolitain ARAMIS en 2015 à gauche. Celle de 2017 à droite | 9 |
| 5 | Épisodes pluvieux avec 80 mm et plus en 1 jour pour la pluviométrie au sol | 10 |
| 6 | Schéma illustratif des axes de ruissellement, pentes et lieux de concentration des écoulements | 14 |
| 7 | Ruissellement sur une parcelle agricole | 14 |
| 8 | Les étapes hydrologiques pouvant conduire à l'inondation par Ruissellement Intense Pluvial | 15 |
| 9 | Facteurs pour la réalisation de la carte IRIP | 16 |
| 10 | Cartographie par la méthode IRIP des zones de production, des zones de transfert, et des zones d'accumulation | 16 |
| 11 | Carte IRIP de la susceptibilité au transfert du ruissellement de surface (exemple de la Lézarde) | 17 |
| 12 | Carte de la mosaïque de lame d'eau radar en format geotiff | 19 |
| 13 | Interface de l'outil d'exploitation | 20 |
| 14 | Schéma illustratif de représentation d'un pixel cible et ses voisins dans l'espace et dans le temps | 23 |
| 15 | Schéma illustratif de grandes étapes de la méthode d'analyse géostatistique | 25 |
| 16 | Schéma illustratif des étapes de l'analyse régionale des précipitations | 28 |
| 17 | Variogrammes des pluies en 3 dimensions | 35 |
| 18 | Illustration du filtrage : A gauche Image radar avant le filtrage. A droite Image radar après le filtrage | 36 |
| 19 | Illustration des statistiques descriptives d'une chronique des pluies (échantillon sup-seuil pour le département de l'Ardèche) | 37 |
| 20 | Représentation graphique des courbes IDF | 39 |
| 21 | Représentation graphique des courbes PDF | 40 |
| 22 | Représentation graphique des courbes PDAF | 41 |
| 23 | Illustration des cartes rasters lissées par la méthode de Hosking et Wallis : (A) sans lissage, (B) lissage avec écart-type de 3 km, (C) lissage avec écart-type de 9 km | 42 |
| 24 | Répartition géographique des quantiles de pluies pour une durée de 5 minutes | 43 |
| 25 | Distribution spatiale de quantiles décennaux de 5 minutes | 45 |
| 26 | Répartition spatiale des quantiles sur des zones de 256 km ² | 46 |

Liste des tableaux

| | | |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Types de radar selon la longueur d'onde et le rayon | 9 |
| 2 | Équivalences des pluies (faible, modérée et forte) en millimètres par heure pour les régions de plaine en France métropolitaine | 11 |

Introduction

En France, à côté du débordement des cours d'eau, le ruissellement est l'une des principales causes des inondations. Il représente 45% des dommages assurés par la Caisse Centrale de Réassurance (Poulard *et al.*, 2015). Sur 143000 arrêtés de catastrophes naturelles, le ruissellement représente 43% des inondations graves pour la période de 1982-2010 (Breil et Chiavarino, 2015).

De nombreux acteurs, principalement l'État, les Collectivités territoriales et les chambres d'agriculture travaillent sur ce sujet. Ils interviennent, notamment dans la prévention du risque de ruissellement (ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables, 2006). De plus, des textes de loi encadrent ce problème ; tel est le cas de la loi sur l'eau qui vise à la maîtrise des eaux de ruissellement dans son article du 3 janvier 1992 (PPR, 2004 ; CEPRI, 2014).

Malgré certains événements qui ont marqué les esprits comme celui de Nîmes en 1988, de Vaison-la-Romaine en 1992 et ceux de la Seine-Maritime en 1998, 1999 et 2000 (ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables, 2006), Breil et Chiavarino (2015) constatent que les dégâts qui sont imputables au problème du ruissellement, restent sous-estimés (Breil et Chiavarino, 2015).

Afin de limiter les conséquences dues à cet aléa, une représentation cartographique des aléas liés aux inondations par ruissellement intense pour la France entière a été réalisée en 2016 par Irstea (Institut de recherche scientifique et technologique sur l'eau et l'agriculture)-Lyon à partir de la méthode d'Indicateur de Ruissellement Intense Pluvial (IRIP).

La méthode IRIP est qualitative. Elle est basée sur une analyse de la dynamique du ruissellement, divisée en zone contributive, zone de transfert et zone d'accumulation, à partir de différentes couches d'informations géographiques issues de l'exploitation des paramètres physiques tels que la topographie, la géologie, la pédologie et l'occupation du sol. Elle ne tient pas compte des événements météorologiques (pluies) dans sa mise en œuvre (Breil *et al.*, 2016).

Or, sans événement pluvieux, le ruissellement ne peut être généré.

Par ailleurs, il est possible de trouver des sols propices au ruissellement du fait de leurs paramètres physiques mais qui en réalité sont rarement soumis à des pluies intenses et/ou longues (Breil et Chiavarino, 2015). Ces types de sol, bien que favorables en théorie au ruissellement, peuvent ne jamais être soumis aux phénomènes d'écoulement intense. La méthode IRIP ¶ dans sa mise en œuvre actuelle entraîne la classification de ces zones

¶. Indicateur de Ruissellement Intense Pluvial

comme étant à risque; alors qu'il n'en serait rien si l'on considérait leur pluviométrie réelle.

Pour toutes ces raisons, il s'avère indispensable de prendre en compte les évènements pluvieux dans la réalisation des cartes d'aléas IRIP. L'introduction de l'information pluviométrique dans la couche de la cartographie du ruissellement intense permettrait ainsi de mieux préciser les endroits les plus exposés pour l'aide à la décision.

L'objectif principal de cette étude concerne la réalisation d'une cartographie de l'aléa pluies intenses et de leurs cumuls à l'échelle de la France métropolitaine afin d'apporter une contribution à leur connaissance, et particulièrement à l'amélioration de la méthode IRIP. ††

Pour y parvenir, deux objectifs spécifiques ont été fixés. D'abord, il s'agira de réaliser une interface d'analyses statistiques des pluies fortes. Cet outil permettra de visualiser les données d'entrée, les traiter pour enfin visualiser les résultats d'analyses.

Dans un second temps il s'agira de créer des cartes des quantiles de période de retour, afin d'en examiner la distribution géographique en France métropolitaine.

Ce travail est organisé en trois chapitres précédés d'un lexique permettant la compréhension du rapport.

Le premier chapitre définira le contexte de l'étude et éléments de littérature en présentant les précipitations en France et le ruissellement.

Le deuxième chapitre présentera, d'une part la méthodologie mise au point, puis codée sous le langage de programmation Lazarus afin d'effectuer les analyses statistiques et, d'autre part, la méthodologie utilisée sous Système d'Information Géographique (SIG) pour réaliser les différentes cartes.

Le troisième chapitre exposera les résultats des analyses statistiques et ceux de la cartographie.

Enfin, nous analyserons la pertinence et les limites de la méthodologie utilisée.

Des perspectives seront formulées avant de conclure.

††. Indicateur de Ruissellement Intense Pluvial

Chapitre 1. Contexte de l'étude et éléments de littérature

Avant d'étudier les pluies fortes pour améliorer la cartographie des aléas liés aux inondations par ruissellement intense, cette partie présente les éléments théoriques nécessaires à la compréhension de la problématique.

1.1. Les précipitations

Les précipitations constituent la principale entrée des systèmes hydrologiques continentaux que sont les bassins versants. Elles sont classées en trois types à savoir, les précipitations frontales, orographiques et convectives. Les précipitations frontales sont longues, étendues, mais peu intenses. Les précipitations orographiques présentent une intensité et une fréquence assez régulières. Les précipitations convectives ont un caractère orageux, de courte durée, de forte intensité et de faible extension spatiale (Anctil *et al.*, 2005 ; Lazri, 2014). Dans la littérature, plusieurs auteurs les qualifient d'intenses, car elles peuvent apporter en 4 heures plus d'eau que la moyenne mensuelle en un lieu donné (Anctil *et al.*, 2005 ; Lazri, 2014 ; Godart, 2009).

L'étude de la variabilité spatio-temporelle des précipitations bénéficie des connaissances géographique et climatologique qui gouvernent la façon dont s'articulent les processus du phénomène ci-dessus.

1.1.1. Climatologie

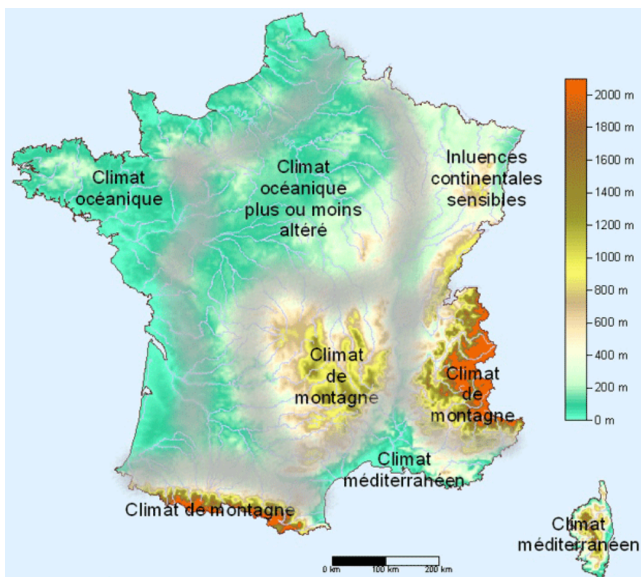


Figure 1. Régions climatiques françaises (d'après Météo-France, 2017)

La France bénéficie d'un climat tempéré et connaît une pluviométrie répartie tout au long de l'année (Godart, 2009). Les régions connaissent des climats variant selon leur latitude, leur altitude et la proximité de la mer, renforcés par leur position par rapport aux trois importants massifs montagneux (Pyrénées, Massif central, Alpes) (Anctil *et al.*, 2005).

Ainsi, chaque type de climat français (figure 1), présente des caractéristiques

pluviométriques spécifiques. Le climat océanique a une pluviométrie relativement abondante, répartie toute l'année avec un léger maximum d'octobre à février. Les pluies sont les plus souvent du type frontal, alors que le climat océanique altéré est caractérisé par une pluviométrie plus faible qu'en bord de mer, sauf aux abords des reliefs (Météo-France, 2017).

Le climat semi-continental connaît une pluviométrie annuelle relativement élevée, sauf en Alsace avec des pluies plus importantes en été, souvent à caractère orageux. En climat de montagne, les précipitations varient selon le lieu (Godart, 2009). On rencontre souvent dans ce type de climat des pluies convectives qui sont en général renforcés par la présence des reliefs.

Enfin, le climat méditerranéen est caractérisé par des pluies fortes ou convectives ayant des fréquences annuelles relativement faibles (Météo-France, 2017).

Signalons que le présent projet s'intéresse aux pluies fortes. Cependant, la connaissance de la pluviométrie générale voire les cumuls des pluies de faibles intensités, sont extrêmement importants pour d'autres applications (par exemple pour l'agriculture ou les ressources en eau).

Pour parvenir à caractériser les précipitations, il faut bien entendu disposer de données à analyser. Dans les points suivants, nous parlerons de mesure des précipitations et nous mettrons un accent plus particulier sur les lames d'eau radar. Les pluies intenses qui font l'objet de notre étude seront aussi abordées.

1.1.2. Mesure des précipitations

La mesure de la pluie reste un enjeu de l'hydrologie. Elle consiste à quantifier l'eau tombée durant un certain laps de temps (Lazri, 2014).

Généralement, les précipitations sont exprimées en hauteur ou lame d'eau précipitée par unité de surface horizontale (mm où $1mm = 1 l/m^2$). Si on rapporte cette hauteur d'eau à l'unité de temps, il s'agit d'une intensité (mm/h) (Lazri, 2014; Météo-France, 2017). Il existe deux grandes familles d'instruments de mesure des précipitations à savoir, ceux qui mesurent les précipitations au sol ponctuellement (les pluviomètres et les pluviographes), et ceux qui opèrent à distance (radars météorologiques et satellites météorologiques) (Météo-France, 2017; Anctil *et al.*, 2005). Parmi ces instruments, le pluviomètre et le radar météorologique sont les plus utilisés et nous les décrivons dans les paragraphes qui suivent.

1.1.2.1. Les pluviomètres

Les pluviomètres sont des instruments de base qui fournissent une mesure directe et ponctuelle des hauteurs d'eau précipitées au sol (Emmanuel, 2011). Ils présentent une bonne précision en termes de quantité de pluie au sol, mais en revanche, ne représentent qu'une zone restreinte autour du pluviomètre. Si on considère un réseau de pluviomètres, la répartition spatiale de la pluie n'est donc que partiellement connue, puisqu'entre deux pluviomètres il n'y a pas d'information collectée (Caseri, 2017). En raison des coûts d'exploitation, le réseau n'est pas aussi dense que l'on pourrait le souhaiter et il peut arriver qu'une précipitation orageuse ne soit pas détectée (Emmanuel, 2011 ; Anctil *et al.*, 2005).

Dans le but de connaître la fréquence des événements pluviométriques extrêmes pour approcher l'aléa d'inondation qui en découle, des réseaux de stations automatisées ont été mis en place depuis la fin des années 1980 en France . La résolution temporelle des mesures peut descendre à 6 minutes, voire 1 minute (Météo-France, 2017).

En complément aux pluviomètres ponctuels, mais offrant une résolution temporelle fine, les radars météorologiques que nous décrirons par la suite se caractérisent par des données spatialisées via des mesures indirectes.

1.1.2.2. Le radar météorologique

Le terme « radar » est l'acronyme de l'expression anglaise « Radio detection and ranging » (détection par ondes radio et mesure de distance) (Delobbe, 2006).

Le radar météorologique fournit une vision spatiale détaillée des champs pluvieux et permet ainsi d'en effectuer le suivi en temps réel (Emmanuel, 2011). La mesure indirecte des intensités pluvieuses à une résolution spatio-temporelle fine que fournissent les radars est obtenue par la mesure de la puissance de l'écho renvoyé par les cibles présentes dans l'atmosphère (Delobbe, 2006).

Le produit de base fourni par cette mesure est une image des précipitations générée en temps réel toutes les 5 minutes. En combinant les résultats des différents radars et en se basant sur les codes qualités de chaque pixel, on obtient une mosaïque continue des lames d'eau (figure 2). Le contenu détaillé des lames d'eau radar ^{††} est présenté à l'annexe 1.

^{††}. Projet Aramis Nouvelles Technologies en Hydrométéorologie Extension et REnouvellement

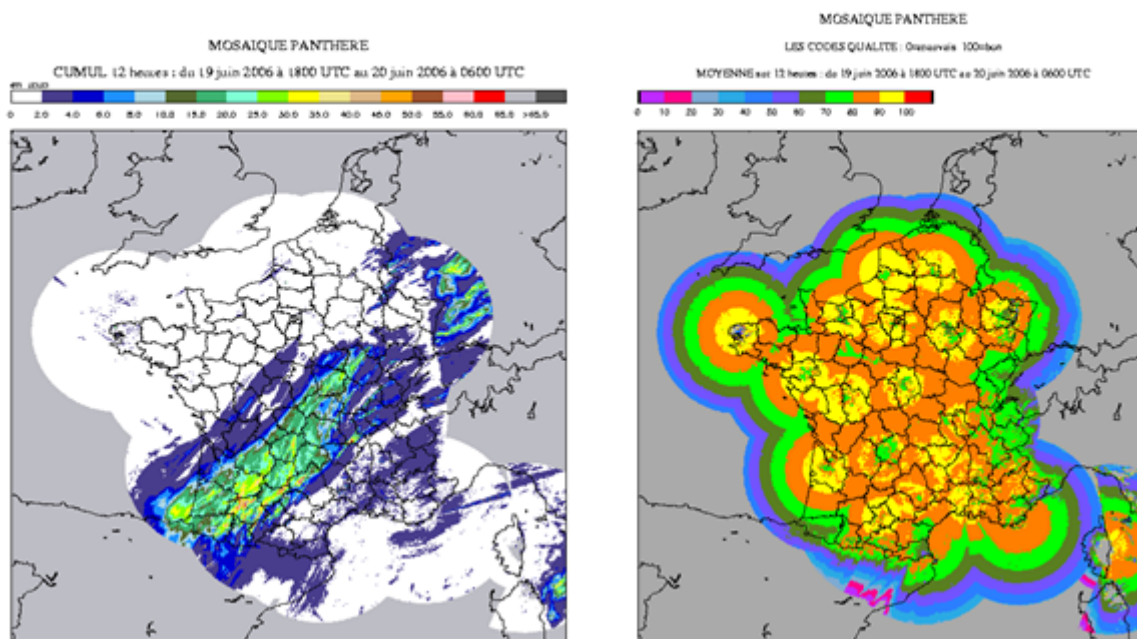


Figure 2. Exemple de composite de lames d'eau cumulées sur 12 h et codes de qualité compris entre 0 (mauvais) et 100 (excellent) (d'après Tabary, 2013)

La classification nuageuse issue de l'imagerie satellite et la texture de la réflectivité sont utilisées pour générer une probabilité de pluie. Cette dernière est alors utilisée pour filtrer la mosaïque de la lame d'eau, l'air clair et les échos résiduels (Tabary, 2007). Les mosaïques ainsi réalisées sont basées sur les codes qualités. Cependant, pour chaque pixel donné, le code qualité affecté à la mosaïque est le meilleur des codes qualités individuels (Tabary, 2013). En ce sens, il s'agit bien d'une juxtaposition d'informations et non pas d'une fusion des différentes informations issues des radars adjacents.

Utilisation des données radar météorologique

Un certain nombre de services opérationnels (privés et étatiques) disposent des images de radars du réseau Météo-France. Certains en font un usage qualitatif pour surveiller en temps réel l'évolution des précipitations sur l'agglomération (Emmanuel, 2011). D'autres les intègrent à la gestion des systèmes d'assainissement ou à la gestion des rivières urbaines dont ils ont la charge (Andrieu et Emmanuel, 2013). Actuellement, Météo-France s'en sert pour donner des alertes à temps réel (10 minutes) sur une partie du territoire. Autrement dit, sur le site de Météo-France on peut trouver des alertes des pluies pour toutes les 10 minutes par commune (Météo-France, 2017).

De manière générale, Météo-France fournit au SCHAPI,** des images des radar météorologiques sous forme de mosaïques continues. Ce dernier est le service national mandaté pour la prévision des crues en France. Il assure une veille hydro-météorologique permanente 24h sur 24 sur l'ensemble des cours d'eau suivis par l'Etat et diffuse une information sur les crues (Tabary, 2007).

La mesure indirecte des intensités pluvieuses fournie par le radar météorologique est une estimation quantitative du taux de précipitations pouvant être affecté par différentes sources d'erreur (Delobbe, 2006 ; Emmanuel, 2011). Les erreurs les plus connues sont liées à l'étalonnage du radar, à l'atténuation, à la contamination par des échos de sol et la propagation anormale, aux masques du faisceau, à l'élargissement du faisceau et son altitude croissante avec la distance et le gradient vertical de la réflectivité, aux artefacts etc. (Krajewski *et al.*, 2010 ; Tabary, 2013) .

A l'heure actuelle, malgré les incertitudes qui lui sont associées, l'imagerie radar quantitative devient suffisamment intéressante pour être exploitée d'une manière opérationnelle en hydrologie urbaine (Tabary, 2013). Ceci s'explique du fait qu'un réseau de pluviomètres a une faible densité et procure des observations ponctuelles. Le radar par contre permet de suivre en temps réel des champs de précipitations à de faibles résolutions spatio-temporelles (Roux, 1996).

Afin d'apporter des corrections aux données radar, plusieurs types de post-traitements des images radar ont été développés par Météo-France pour corriger les erreurs liées à la réflectivité (Tabary, 2007). Les principaux post-traitements effectués concernent l'élimination des échos fixes, la correction des masques, la correction de l'atténuation par les gaz, l'estimation du profil vertical de réflectivité, la correction d'atténuation et l'élimination des artefacts, le calcul du champ d'advection, la synchronisation et le lissage, les codes qualité, l'ajustement par les pluviomètres, la correction de la mosaïque, les cartes de scores sur les rapports radar/pluviomètre et l'intégration de radars étrangers comme par exemple le radar de Jersey du service météorologique britannique (Tabary *et al.*, 2013).

Des résultats de ces post-traitements sont disponibles sous forme d'archives. Deux produits de Météo-France valorisent ces réflectivités PANTHERE‡‡ et ANTILOPE¶ (Tabary, 2007 ; Andrieu et Emmanuel, 2013 ; Roche *et al.*, 2012). Ces produits ont en commun le fait qu'ils estiment la quantité de pluie à l'échelle d'un maillage de 1 km² et utilisent les données pluviométriques pour faire certaines corrections (Andrieu et Emmanuel, 2013).

** Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations

‡‡. Projet Aramis Nouvelles Technologies en Hydrométéorologie Extension et REnouvellement

¶. ANalyse par spaTialisation hOraire des PrEcipitations

La figure 3 permet de visualiser la différence qui existe entre une image radar contenant des erreurs et celle ayant subi la correction.

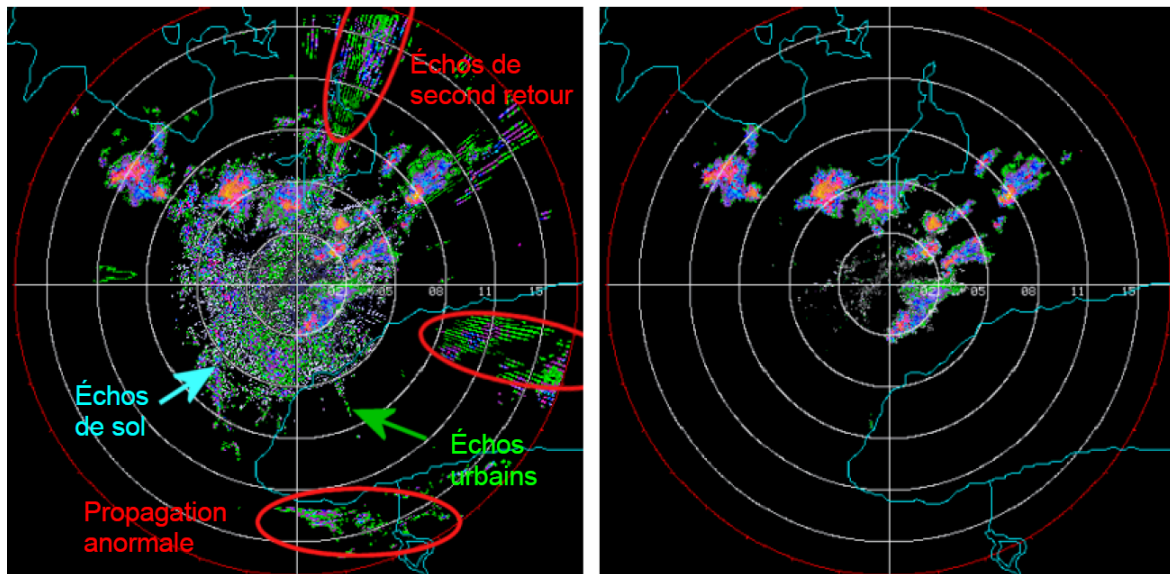


Figure 3. Image Radar avec plusieurs échos parasites à gauche. Même situation après filtrage à droite (d'après Delobbe, 2006)

Ainsi, en comparaison aux pluviomètres, les radars fournissent une meilleure information sur la variabilité spatiale et temporelle de la pluie. En revanche les pluviomètres fournissant une mesure directe sont plus précis ponctuellement. Afin d'améliorer l'estimation des champs de précipitation, les mesures effectuées par ces deux sources de mesure peuvent être combinées, afin de mieux se servir des avantages de chaque type de mesure (Casari, 2017; Emmanuel, 2011).

Le réseau radar opérationnel français

Au 31 juillet 2015, le réseau de Météo-France, baptisé ARAMIS,^{††} comptait 29 radars en métropole et 7 en Outre-mer comme le montre la figure 4.

^{††}. Application Radar à la Météorologie Infra-Synoptique

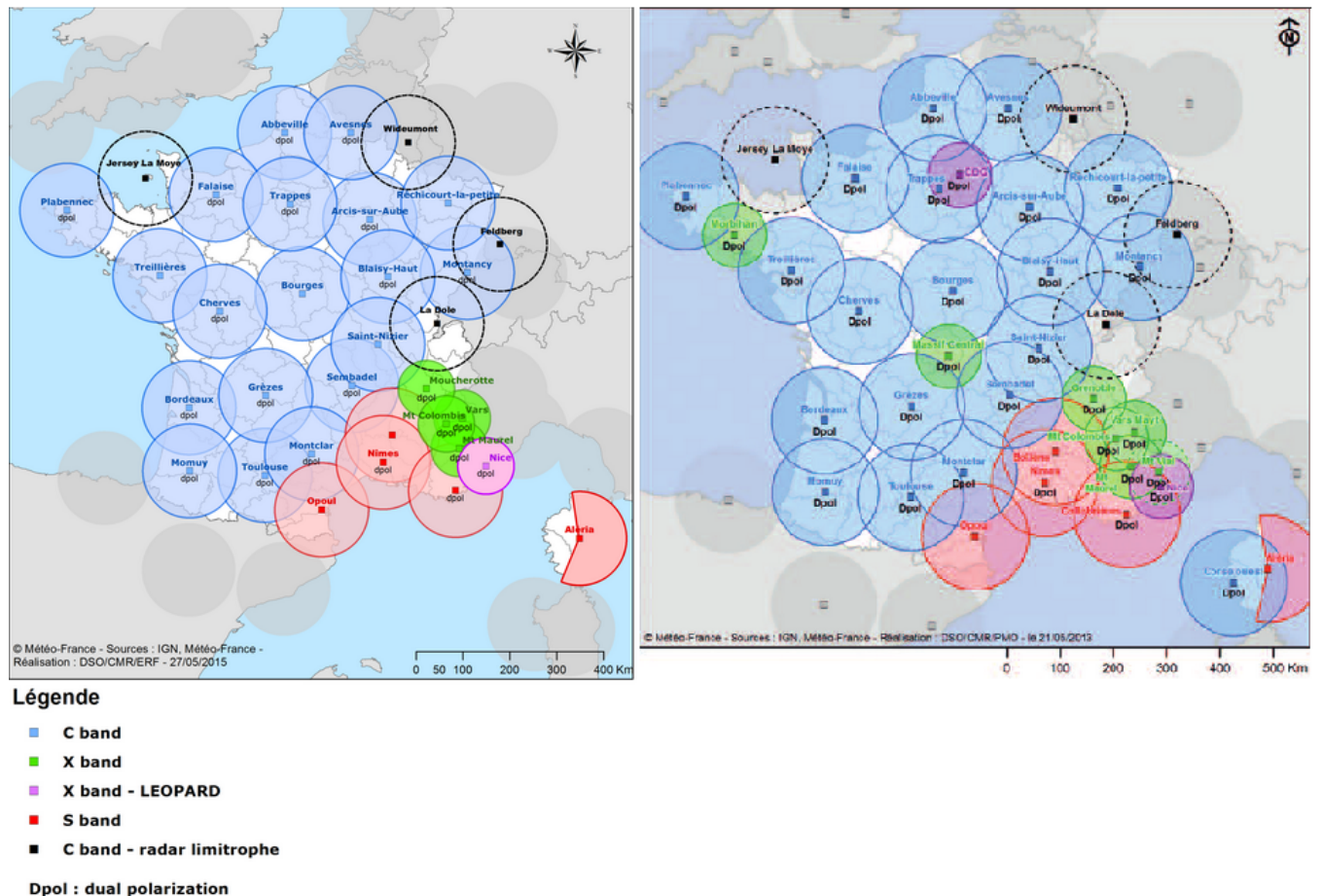


Figure 4. Carte du réseau radar métropolitain ARAMIS en 2015 à gauche. Celle de 2017 à droite (d'après Météo-France, 2017; Tabary et al., 2013)

Ces radars sont en bande X, C et S et correspondent respectivement aux longueurs d'onde de 3 cm, 5 cm et 10 cm (Tableau 1). Les radars en bande S et C ont une portée allant jusqu'à 200 kilomètres alors que ceux en bandes X ont une portée de 50 kilomètres (Météo-France, 2017; Emmanuel, 2011). Les radars en bande C sont plus adaptés pour l'estimation de la pluie stratiforme. Les radars de bande S sont plus utilisés pour l'estimation des pluies intenses. Finalement grâce à leur taille réduite, les radars en bande X sont installés le plus souvent dans des zones accidentées où leur portée est limitée par le relief.

Tableau 1. Types de radar selon la longueur d'onde et le rayon (d'après, Caseri, 2017)

| Type de radar | Longueur d'onde | Rayon |
|---------------|-----------------|--------------|
| Bande X | 3 cm | 50 à 80 km |
| Bande C | 5 cm | 100 à 200 km |
| Bande S | 10 cm | 100 à 200 km |

1.1.3. Les pluies intenses

Les pluies intenses sont définies par Météo-France (2017) comme étant des pluies qui apportent sur une courte durée (d'une heure à une journée), une importante quantité d'eau pouvant correspondre à celle reçue en un mois voire plus.

Toute la France est concernée par de fortes précipitations, que ce soit en montagne ou en plaine, en milieu urbain ou rural. Selon Douguédroit (2008), ces pluies sont observées en toutes saisons avec deux périodes plus favorables, de mai à septembre et à l'automne. Cette dernière saison est considérée comme à risque car 70% des épisodes ayant donné un cumul supérieur à 200 mm en 24 heures se sont produits entre le 25 août et le 15 novembre .

En Métropole, on observe particulièrement de fortes précipitations avec des fréquences plus élevées dans les régions méditerranéennes et montagneuses (Météo-France, 2017). Godart (2009) et Douguédroit (2008) affirment que les pluies intenses représentent l'une des caractéristiques des régions méditerranéennes où elles sont particulièrement nombreuses pendant l'automne.

Par ailleurs, dans la plupart des régions de plaine et de montagne, les cumuls de l'ordre de 50 à 100 mm en 24 heures, sont considérés comme des seuils critiques dont le dépassement peut provoquer de graves inondations lorsque la nature du terrain s'y prête (Météo-France, 2017).

Les épisodes pluvieux supérieurs à 200 mm par jour sont les plus souvent observés en Ardèche, dans le Gard, l'Hérault et la Lozère (pluies-extrêmes, 2017). Les cartes à la figure 5 illustrent le nombre d'occurrences observées d'épisodes pluvieux ayant apporté plus de 80, 100, 150 ou 200 mm en une journée climatologique sur au moins un point de mesure par département de 1967 à 2016.

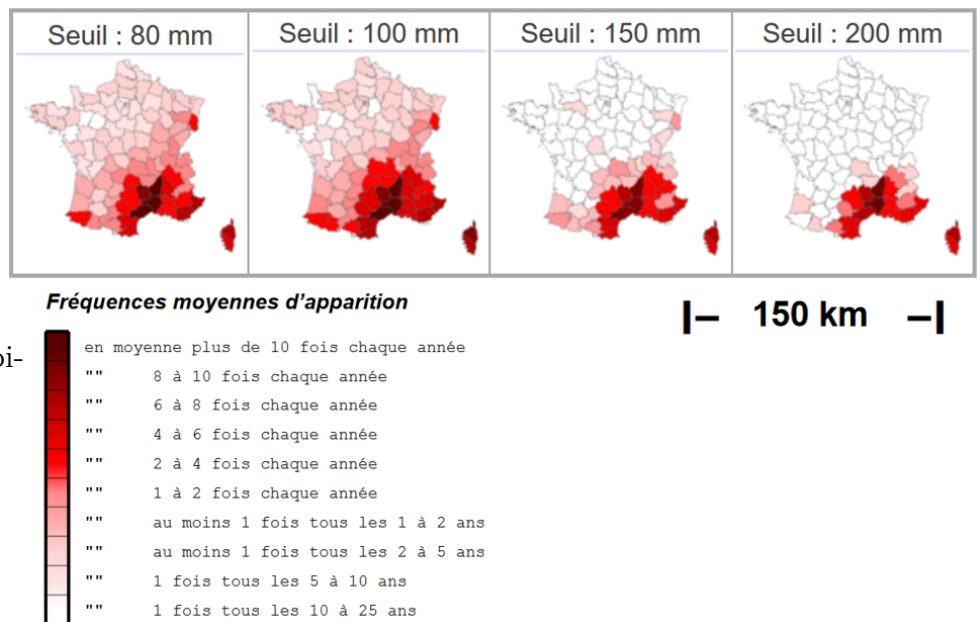


Figure 5. *Épisodes pluvieux avec 80 mm et plus en 1 jour pour la pluviométrie au sol (d'après les-pluies-extrêmes, 2017)*

De manière générale le caractère des précipitations dépend de la climatologie locale. Ce qui est à la base du manque de correspondance officielle entre l'appréciation "qualitative"

d'une pluie ("faible", "modérée" ou "forte") et son intensité chiffrée (mm/h).

En France par contre, il existe des équivalences entre l'appréciation qualitative de pluie et leur intensité chiffrée. Le tableau 2 illustre les équivalences pour les régions de plaine.

Tableau 2. *Équivalences des pluies (faible, modérée et forte) en millimètres par heure pour les régions de plaine en France métropolitaine (d'après, Pluies- extrêmes, 2017).*

| | |
|-----------------------|------------------------|
| Pluie faible continue | 1 à 3 mm par heure |
| Pluie modérée | 4 à 7 mm par heure |
| Pluie forte | 8 mm par heure et plus |

Face aux problèmes de prévention des inondations par ruissellement, se pose le problème du choix de l'événement pluvieux qui va engendrer le phénomène, et plus précisément l'intensité critique qui à l'échelle du bassin versant générera un écoulement potentiellement dangereux (PPR, 2004). La connaissance des pluies intenses d'un territoire a alors une grande importance, surtout lorsqu'il s'agit d'étudier le ruissellement, car en fonction des conditions locales, les inondations par ruissellement pluvial sont générées soit par des pluies intenses, soit par des cumuls importants (CEPRI, 2014). Dans la plupart des cas, il est conseillé d'étudier les pluies en intensité, durée, cumuls, surface et fréquence pour arriver à mieux caractériser l'aléa ruissellement. Ainsi, les résultats issus de cette étude sont généralement confrontés à ceux d'autres paramètres physiques qui font aussi partie de la genèse et la dynamique du ruissellement afin de permettre une bonne prise de décision concernant la gestion préventive du territoire.

Cependant, sur le modèle IRIP que nous décrirons par la suite, l'absence de la pluie qui est l'élément déclencheur du ruissellement ne permet pas de préciser de manière objective si les zones caractérisées comme étant à risque à cause de la présence de l'aléa ruissellement sur la cartographie, les sont réellement (Breil et Chiavarino, 2015).

Par ailleurs, pour apporter des réponses claires et objectives à la gestion du ruissellement grâce à l'outil cartographique IRIP[¶], Irstea s'est proposé de mettre en place l'étude des pluies fortes à de fines résolutions spatio-temporelles à l'aide de données radar.

C'est pour toutes ces raisons que notre projet est axé sur la connaissance des pluies fortes et de leurs cumuls, afin d'apporter notre contribution à la méthode du ruissellement intense pluvial développée par Irstea.^{††}

Comparativement à la cartographie des pluies intenses issues des pluviomètres au sol et illustrée à la figure 5, l'originalité de notre étude repose sur le fait que nos analyses se basent sur des données ayant de résolutions spatio-temporelles fines issues des radars.

¶. Indicateur de Ruissellement Intense Pluvial

††. Institut de recherche scientifique et technologique sur l'eau et l'agriculture

1.2. Le ruissellement

De nombreuses définitions sont données au phénomène de ruissellement. De manière générale, le ruissellement est décrit comme l'écoulement d'eau à la surface du sol (CEPRI, 2006).

1.2.1. Les processus et facteurs du ruissellement

Le ruissellement est un phénomène naturel complexe dans lequel de nombreux paramètres entrent en jeu.

1.2.1.1. Les processus du ruissellement

Le ruissellement est un phénomène naturel dont deux processus sont connus. Le premier est le ruissellement hortonien, ou ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration. Il apparaît quand l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration (Horton, 1933). Ce ruissellement est typique des régions semi-arides et des sols soumis au phénomène de battance (sols agricoles ou de décompaction).

Le deuxième est le ruissellement hewlettien, ou refus d'infiltration par saturation du sol par le bas (Nicolas, 2010). Il se produit quand le sol est déjà saturé en eau donc sa capacité à stocker de l'eau est nulle. L'eau, ne pouvant plus s'infiltrer, s'écoule (Breil et Chiavarino, 2015). Ce type de ruissellement est plus courant dans les zones tempérées.

En général, en bas de versant, là où la nappe est affleurante, le ruissellement est plutôt hewlettien tandis qu'en haut de versant, il est plutôt hortonien. On trouvera une description plus détaillée de ces conceptualisations par exemple chez Nicolas (2010).

1.2.1.2. Les facteurs du ruissellement

La notion de ruissellement étant intrinsèque à la définition même du bassin versant, la plupart des paramètres définissant ce dernier comme les précipitations, la topographie, la pédologie, l'occupation du sol etc., influencent ainsi la genèse et la dynamique du ruissellement (PPR, 2004).

Dans les paragraphes qui suivent, nous décrirons chacun de ces paramètres en lien avec le ruissellement.

La pluie

La pluie est le facteur déclencheur du ruissellement. Plus son intensité et sa durée sont élevées, plus la probabilité de faire face à l'aléa ruissellement est grand (PNR des Caps et Marais d'Opale, 2003). Cependant, l'étude du ruissellement pluvial nécessite une étude des pluies en intensité, durée, cumuls, surface et fréquence (CEPRI, 2014) pour mieux comprendre son comportement. Ainsi, cette compréhension permettra de mettre en place une gestion préventive afin d'éviter le risque qui peut en découler.

Dans son rapport, Nicolas (2010) parle de l'impact du régime des précipitations (précipitations fortes et courtes, précipitations faibles et longues, précipitations moyennes et de durées moyennes) sur le ruissellement. Il montre clairement que le coefficient de ruissellement est beaucoup plus important pour le régime avec des précipitations fortes et courtes que pour les deux autres régimes.

Aussi, ce régime des précipitations influe sur la capacité d'infiltration du sol. En effet, plus une pluie est forte et de courte durée, plus l'infiltration est réduite. En revanche, une pluie durable avec une faible intensité favorise l'infiltration pour autant que le sol ne soit pas saturé (CEPRI, 2014; Nicolas, 2010).

La pédologie

Le ruissellement des eaux de pluie est directement lié à la saturation du sol et à la vitesse d'infiltration. Ce caractère est propre à chaque type de sol et est fonction de sa porosité selon que l'on a des sols à texture sableuse, argileuse ou limoneuse (Nicolas, 2010). En d'autres termes, les sols à texture macroporeuse comme le sable, ont une bonne perméabilité, contrairement à ceux qui présentent une texture microporeuse comme les argiles. Celles-ci sont caractérisées comme étant les plus aptes à générer le ruissellement (PPR, 2004).

La topographie

L'effet de la pente sur le ruissellement est un sujet controversé par certains auteurs comme Janeau *et al.* (2003). En effet, l'étude de ce dernier a révélé une augmentation d'infiltration avec la pente sur des sols tropicaux en Thaïlande. Par contre, la plupart des auteurs qui ont travaillé sur les thèmes semblables, ont observé une augmentation du ruissellement avec la pente. Les détails sont repris par Nicolas (2010).

La topographie à travers la pente, ses ruptures et convexités, peut influencer la concentration d'écoulement et favoriser le ruissellement (Breil et Chiavarino, 2015). On peut observer sur un terrain plat ou à faible pente, une tendance des eaux à stagner et à s'infiltrer sous l'influence de la gravité.

Par contre sur les terrains en pente, cette même gravité incite les gouttes d'eau à descendre vers les points bas. En définitive, l'importance des vitesses d'écoulements peut être considérée comme étant fonction de la pente (fort ou faible).

Ainsi, l'observation des gradients de pentes sur une carte topographique permet de déceler des zones à risques du ruissellement (figure 6) (PPR, 2004).



Figure 6. Schéma illustratif des axes de ruissellement, pentes et lieux de concentration des écoulements (d'après, PPR, 2004)

L'occupation du sol



Figure 7. Ruissellement sur une parcelle agricole (d'après Poulard et al., 2015)

L'occupation du sol influe directement sur le coefficient de ruissellement. Une surface urbanisée, la mise à nu des sols du fait de pratiques agricoles (figure 7) etc., favorisent le ruissellement (Breil et Chiavarino, 2015).

Par ailleurs, le phénomène de ruissellement pluvial est constitué de trois zones qui sont autant de cibles à traiter de manière spécifique grâce à une stratégie de gestion du risque adaptée : les zones de production de l'aléa , les zones d'écoulement des eaux de

pluie et les zones d'accumulation, ou réceptrices (PPR, 2004).

Aussi, la cartographie de ces espaces permet de mieux connaître le phénomène et de comprendre ses impacts, dans l'objectif de mieux y faire face. La méthode IRIP que nous décrirons plus bas, s'en est inspirée. Cependant, pour réaliser cette cartographie il faudra tenir compte de l'ensemble des paramètres hydrologiques que nous avons décrit précédemment (PPR, 2004).

1.2.2. La méthode d'Indicateur de Ruissellement Intense Pluvial (IRIP)

La méthode IRIP ¶ a été développée par Irstea || Villeurbanne-Lyon en 2010 (Dehotin, 2010). Elle a pour objectif de calculer des Indicateurs du Ruissellement Intense Pluvial

¶. Indicateur de Ruissellement Intense Pluvial

||. Institut de recherche scientifique et technologique sur l'eau et l'agriculture Irstea

pour permettre une gestion préventive des espaces afin de limiter les risques liés au ruissellement. Le caractère intense dont il est question dans la méthode IRIP, qualifie le ruissellement et non la pluie, car des cumuls des pluies soutenues et non intenses peuvent provoquer du ruissellement intense (Dehotin et Breil, 2011b ; Breil et Chiavarino, 2015). En 2012, suite à un partenariat avec la SNCF, ** le logiciel de cartographie IRIP rail a été développé, afin de prendre en compte le ruissellement dans ses démarches d'analyse des risques ferroviaires et anticiper les incidents liés au ruissellement (Breil et Chiavarino, 2015).

1.2.2.1. Principe de la méthode IRIP

La méthode IRIP permet d'identifier (figure 8) :

- des zones de production (zones contributives) où les conditions au sol permettent la formation d'une lame d'eau en surface ;
- des axes de transfert naturels ou artificiels qui interceptent et redirigent l'écoulement du ruissellement vers l'aval ;
- des zones d'accumulation des eaux de ruissellement, soit derrière un obstacle, soit par ralentissement quand la pente est moins forte, soit encore par stockage dans une dépression (Gonzalez-Sosa *et al.*, 2010 ; Breil et Chiavarino, 2015).

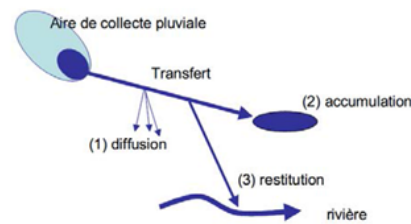


Figure 8. Les étapes hydrologiques pouvant conduire à l'inondation par Ruissellement Intense Pluvial(d'après, Dehotin *et al.*, 2015).

Trois principales données d'entrées ont été nécessaires pour la réalisation des cartes par la méthode IRIP, notamment le modèle numérique de terrain (MNT) de l'Institut national de l'information géographique et forestière, l'occupation des sols de Corine Land Cover 2006 qui est régulièrement mise à jour et la pédologie de la base des données de l'Institut national de la recherche agronomique (Breil et Chiavarino, 2015).

Le traitement géomatique de ces données de base permet de calculer des indicateurs favorables à chacune des trois étapes hydrologique suivante : Production, Transfert et Accumulation du ruissellement (Dehotin et Breil, 2011b).

La figure 9 illustre les 5 facteurs pris en compte pour la réalisation de chaque carte IRIP au long des trois étapes : la production, le transfert et l'accumulation.

***.* Société Nationale des Chemins de fer Français

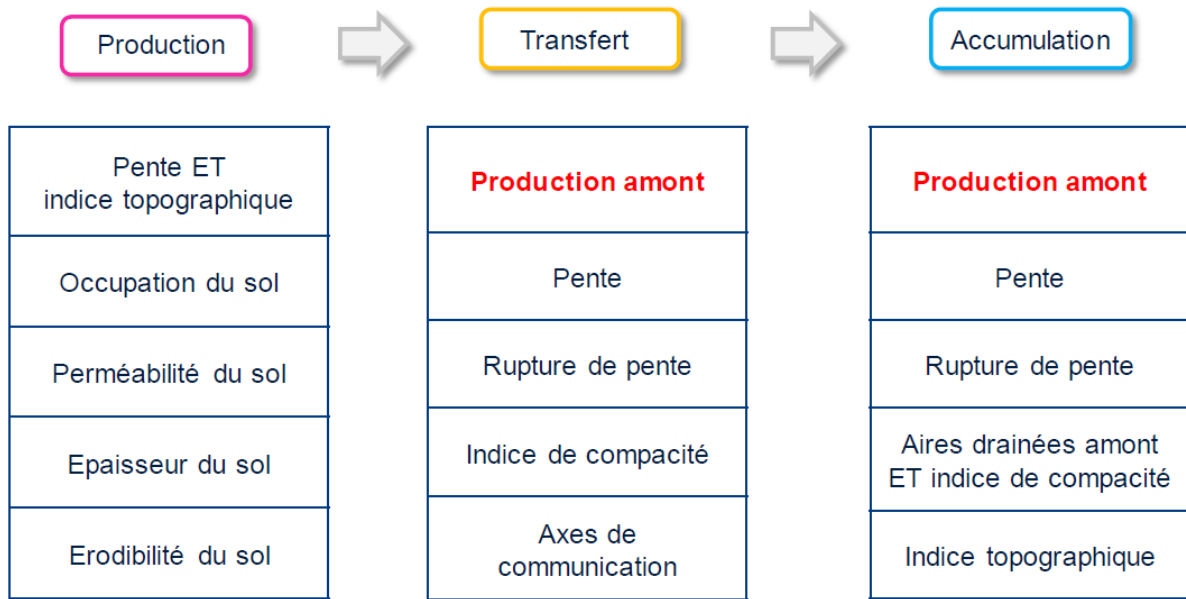


Figure 9. Facteurs pour la réalisation de la carte IRIP (d'après, Breil et al., 2016)

L'identification de trois zones précitées permet de déterminer la sensibilité d'un territoire aux inondations par ruissellement, via une analyse de la dynamique des écoulements à partir de différentes couches d'informations géographiques : topographie, pédologie, occupation du sol et structures linéaires artificielles (routes, voies ferrées, cours d'eau)(Dehotin et al., 2015).

Les trois cartes de la figure 10 illustrent les résultats produits par les différentes étapes de l'analyse géomatique développée par la méthode IRIP** pour le bassin versant du Mercier (Dehotin et al., 2015).

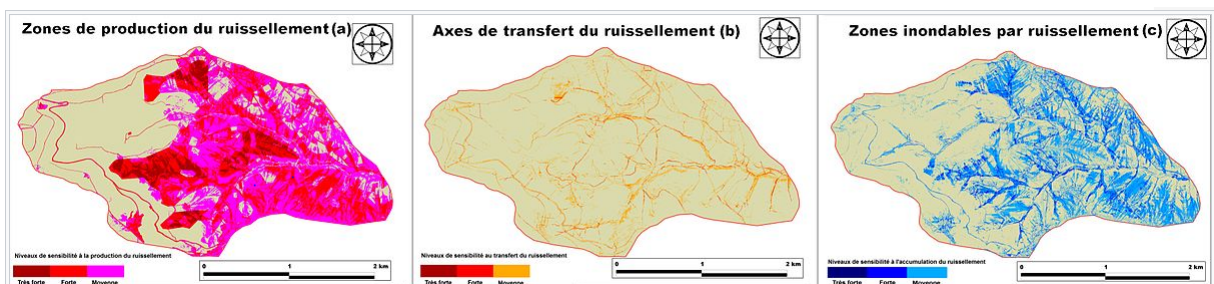


Figure 10. Cartographie par la méthode IRIP des zones de production (a) des zones de transfert (b) et des zones d'accumulation (c)(Bassin versant du Mercier) (d'après, Dehotin et al., 2015)

** Indicateur de Ruissellement Intense Pluvial

1.2.2.2. Exemples d'application de la méthode IRIP ¶

La méthode IRIP a été utilisée pour réaliser les cartes des niveaux du potentiel de production, de transfert et d'accumulation du ruissellement à l'échelle de la France (Breil et Chiavarino, 2015). Elle a été également mise en application sur différents bassins versants, comme ceux de l'Yzeron et de la Loire Amont, afin de déterminer les zones sensibles aux inondations par ruissellement intense (d'après, Dehotin *et al.*, 2015).

La SNCF †† à partir de son logiciel de cartographie IRIP rail créé sur la base du principe de la méthode IRIP, a pu identifier des sites ferroviaires soumis au ruissellement (Dehotin *et al.*, 2015).

La figure 11 présente la carte IRIP de la susceptibilité du bassin versant de la Lézarde au transfert du ruissellement de surface.

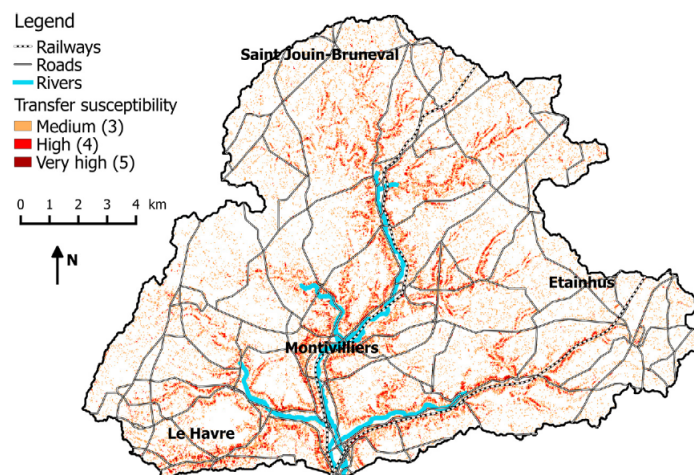


Figure 11. Carte IRIP de la susceptibilité au transfert du ruissellement de surface (exemple de la Lézarde)(d'après, Lagadec *et al.*, 2016).

¶. Indicateur de Ruissellement Intense Pluvial

††. Société nationale des chemins de fer français

Chapitre 2. Matériels et méthodes

Afin de préciser les endroits du territoire français les plus exposés au ruissellement intense pluvial, il est nécessaire d'avoir l'information sur les pluies fortes et leurs cumuls (Breil *et al.*, 2016).

Dans le cadre de cette étude, la méthode retenue consiste en une analyse exploratoire sous approche statistique à partir des données des pluies fournies par les radars météorologiques.

Pour des raisons inhérentes aux erreurs radar que nous expliquerons plus bas, ces données contiennent des valeurs manifestement exagérées par des phénomènes non météorologiques. Nous avons opté pour leur filtrage afin de réduire des aberrations pouvant conduire à des résultats erronés. D'une part, nous déterminerons par une approche intuitive le seuil au delà duquel nous rejetons les données aberrantes, et d'autre part, par une approche formelle (géostatistique), nous remplacerons les valeurs aberrantes par des valeurs estimées. Après ce filtrage, nous exploiterons ces données pour les calculs des quantiles à partir de différentes approches statistiques.

Une interface qui permet de visualiser les résultats de statistiques des pluies fortes réalisées pour l'ensemble des zones couvertes par les radars français a été développée et sera présentée. Pour finir, nous réaliserons la cartographie des quantiles des pluies.

En particulier, nous avons constitué des échantillons sup-seuil sur chaque pixel. Ils sont composés de 6 valeurs de pluies les plus fortes en moyenne sur l'année, soit 60 valeurs pour 10 ans au pas de temps de 5 minutes. A partir de ce pas de temps de base (5 minutes), nous avons cumulé les pluies. Un cumul de 15 minutes, correspond donc à la somme de trois pas de temps successifs de 5 minutes. La même approche a été adoptée pour les pas de temps de 30 à 10 jours.

Notre apport est donc, d'une part, le développement d'une interface permettant d'analyser et de présenter les résultats de pluies radar, et , d'autre part la réalisation de la cartographie des quantiles de période de retour à l'échelle de la France métropolitaine. Cette cartographie sera mise en forme à l'aide des SIG ^{††} qui sont des gestionnaires informatiques de données spatiales. Ils se révèlent être des outils très pratiques à des fins hydrologiques (Anctil *et al.*, 2005).

2.1. Présentation des données

Au cours de ce travail nous nous sommes intéressés à la lame d'eau radar qui connaît actuellement de nombreuses évolutions et dont l'usage se développe tant dans le monde

^{††}. Système d'Information Géographique

de la recherche qu'en milieu opérationnel (dans les services de prévision de crues par exemple). Les données que nous exploitons, représentent 4 téra-octets (environ 4000 giga-octets), ce qui est un volume inhabituel difficile à manipuler et une opportunité importante pour être exploitées dans le cadre de la recherche scientifique.

Ces données proviennent des radars météorologiques de Météo-France et nous ont été fournies par le SCHAPI^{‡‡}. Ce service du ministère en charge de l'environnement est implanté à Toulouse et favorise les synergies avec Météo-France et les équipes scientifiques qui y sont rassemblées, afin d'alerter les réseaux hydrologiques français des risques de crues et d'inondations. Les données couvrent une période de 10 ans soit du 01 juillet 2006 au 30 juin 2016 et sont des lames d'eau de la mosaïque PANTHERE.^{††}

Ces données, nous ont été fournies sous le format geotiff (figure 12.) mesurées par centième de millimètre et possèdent une résolution temporelle originale de 5 minutes et une résolution spatiale proche de 1 km². A notre connaissance, elles n'ont pas encore été exploitées sous cette résolution de base dans une perspective climatologique.

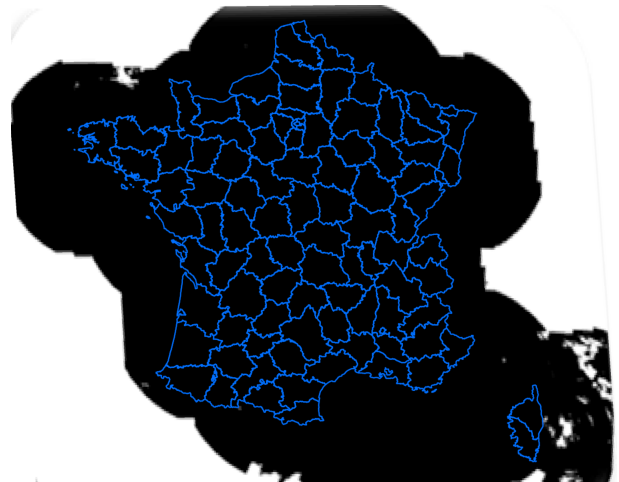


Figure 12. Carte de la mosaïque de lame d'eau radar en format geotiff (source : SCHAPI)

Concrètement, toutes les cinq minutes, le radar renvoie une matrice rectangulaire de 1351 lignes par 1452 colonnes correspondant à un tableau de 1.961.652 de valeurs des pluies. Ce qui permet d'avoir sur un pixel donné, 288 valeurs par jour et 1.052.064 valeurs sur 10 ans correspondant à environ mille milliards de valeurs totales à analyser. Dans le fichier on trouve des valeurs d'intensités de pluies non-nulles, des valeurs nulles et des valeurs manquantes. Ces dernières correspondent au manque d'informations dû à l'inaccessibilité pour les radars dans certains endroits.

Avant leur utilisation, plusieurs conversions ont été incontournables pour permettre la lecture de données, sinon leur manipulation était quasi impossible sur nos ordinateurs de bureau. Elles ont principalement concerné le passage du format Geotiff au format Ascii à l'aide de la librairie GDAL.^{**} Ensuite, la conversion sous le format binaire a été réalisée. Enfin, les chroniques de pluies ont été placées dans des blocs de 16 km * 16 km. Le total de nombre blocs réalisé s'élève à 5972 et représente environ 1.700.000 chroniques de pluies. Ces conversions très lourdes représentent pour nous un état initial.

^{‡‡}. Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations

^{††}. Projet Aramis Nouvelles Technologies en Hydrométéorologie Extension et REnouvellement

^{**}. Geospatial Data Abstraction Library

Notre choix sur l'utilisation de ces données résulte du fait la fine résolution spatio-temporelle des images radar permettra à l'équipe IRIP de pouvoir mieux traiter l'étude du ruissellement intense pluvial.

2.2. L'interface des lames d'eau radar

Afin de pouvoir répondre au besoin de chaque utilisateur intéressé par les analyses des lames d'eau radar, et, compte tenu du volume de données, nous avons jugé important de développer l'interface informatique ébauchée pour la mise en forme des données.

Cette interface est un outil convivial qui permet de lancer un traitement en accédant de manière automatisée aux données pertinentes. Elle a été développée à l'aide de l'environnement de développement intégré (EDI) Lazarus, intégrant un compilateur open source pour le langage PASCAL objet. Ainsi, elle a joué quatre rôles distincts dans cette étude à savoir : l'accès aux données, la visualisation des données d'entrée, le traitement des données statistiques et la visualisation des résultats après analyses mais avant transmission aux SIG[§] (QGIS et ArcGIS). La figure 13 présente un exemple de l'interface développée.

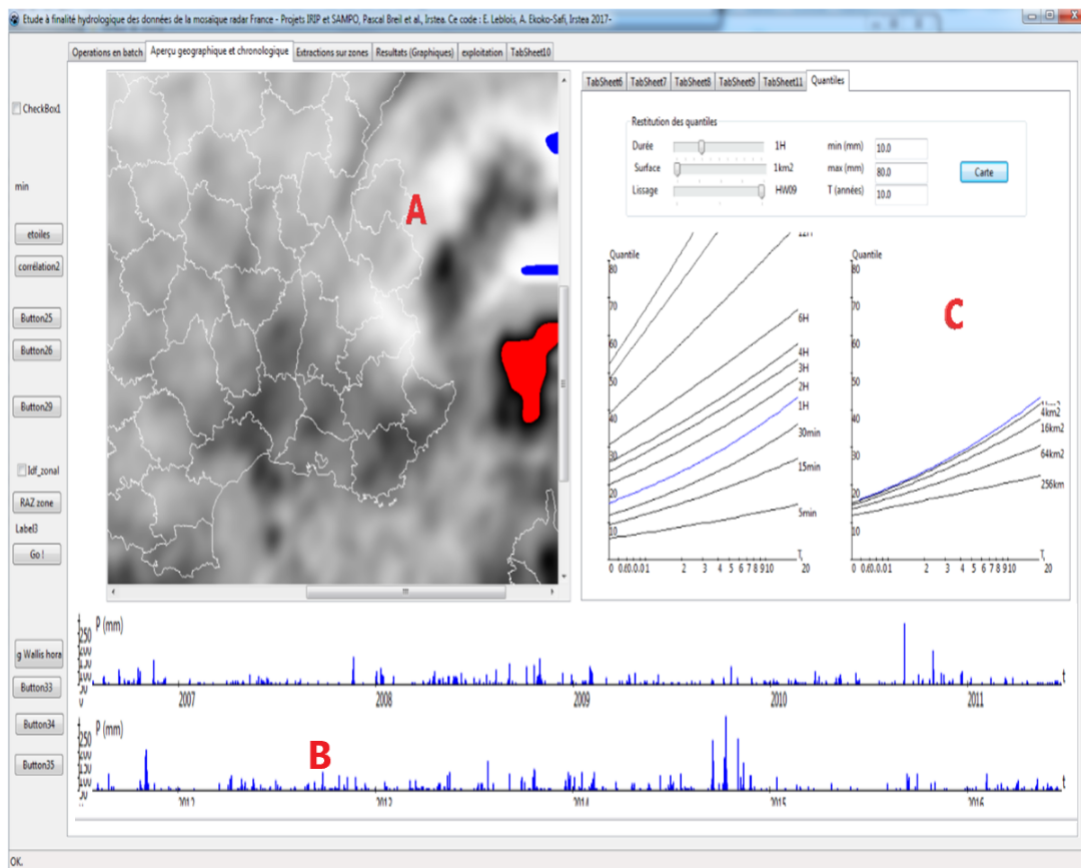


Figure 13. Interface de l'outil d'exploitation

§. Système d'Information Géographique

Cette interface est principalement composée de trois fenêtres (A, B et C) permettant la visualisation.

En effet, les fenêtres (A) et (B) permettent la visualisation de données rendues possibles par la restructuration des fichiers initiaux et la fenêtre (C) permet de visualiser les résultats de traitements automatisés. Suivant la recherche de l'utilisateur, chaque bouton restitue un jeu de résultats sous forme de valeurs numériques ou graphiques.

L'image radar située à gauche dans l'interface, contient les lames d'eau et les limites départementales françaises. Chaque point de cette image correspond à un pixel de 1 km^2 , lié à une chronique de pluies ayant environ un million de données pour une période de 10 ans.

Par ailleurs, il est intéressant de noter qu'au delà des traitements et visualisation, cette interface permet aussi d'éviter de refaire les analyses statistiques à chaque fois. Elle est facile d'utilisation et chaque bouton porte le nom d'une analyse statistique spécifique réalisée sur les données.

Avant de visualiser les résultats, l'utilisateur doit d'abord cliquer sur le bouton aperçu géographique et climatologique situé dans la fenêtre (A), puis sur l'un des boutons de la fenêtre (C) qui correspond au nom de l'analyse statistique pour laquelle il veut s'informer. Enfin, à chaque fois qu'il passera sa souris dans la fenêtre (A), la fenêtre (C) lui affichera les résultats en tout point du territoire. Parallèlement, l'interface génère des fichiers (texte ou PNG) de résultats.

2.3. Approche statistique

L'analyse de données repose sur l'utilisation des statistiques descriptives des événements extrêmes précédées du filtrage. Les statistiques servent à deux choses à savoir : la diminution de la quantité d'informations à conserver et le passage d'un espace d'événements historiques à un espace des probabilités.

Cette analyse consiste à caractériser les événements extrêmes (quantiles) en tout point du territoire afin de décrire par la suite les courbes d'Intensité-Durée-Fréquence (IDF), de pluie-durée-fréquence et de pluie-durée-aire-fréquence.

Les courbes IDF sont obtenues à partir d'ajustement statistique des observations effectuées à une station pluviométrique. Elles traduisent l'évolution de l'intensité moyenne maximale (i) (mesurée en mm/h) de la pluie en fonction de la durée (D) (mesurée en minutes) et de la fréquence (F) ou période de retour ($T=1/F$) (Ghanmi, 2014).

En effet, les relations entre l'intensité, la durée et la fréquence d'apparition des pluies sont étudiées statistiquement et reportées selon des courbes caractéristiques appelées les courbes IDF. Lorsqu'on remplace les intensités par des quantiles, on parle des courbes de pluie-durée-fréquence (PDF) et lorsqu'on introduit dans cette dernière relation la surface,

on parle des courbes de pluie-durée-aire-fréquence (PDAF).

Notons que l'IDF est l'information qui est calculée de manière classique à partir d'un poste pluviométrique pour caractériser les pluies fortes d'un lieu.

L'étude des pluies fortes en intensité, durée et fréquence est nécessaire pour connaître l'aléa, puis le risque lié au ruissellement pluvial.

Il existe une relation entre ces trois paramètres. Pour une même fréquence d'apparition, donc un même temps moyen de retour, l'intensité d'une pluie est d'autant plus forte que sa durée est courte. Plus l'intensité et la durée des pluies sont élevées, plus le risque du ruissellement est grand. L'aléa ruissellement est lié à la fois aux intensités d'une pluie mais aussi à la durée des intensités fortes.

2.3.1. Filtrage de données

Bien que ces données aient été filtrées à la base par Météo-France, nous avons procédé à un examen visuel des images radar à l'aide de l'interface (figure 14) développée à partir de notre algorithme. Cette vue générale nous a permis de faire une première critique sur nos données.

De cette image radar que nous présenterons dans les résultats, il ressort la présence des phénomènes non météorologiques qui semblent être des artefacts. En effet, en passant la souris sur un bon nombre des points qui se situent à l'endroit où se trouvent les phénomènes jugés non-météorologiques du fait de leurs structures spatiales radiales par exemple, l'interface nous affiche des valeurs de pluies supérieures à 50 mm au pas de temps de 5 minutes. Ce qui nous paraît absurde, car la valeur maximale record de pluies observée en France à l'aide des pluviomètres automatiques depuis 1980 et au pas de temps de 6 minutes s'élève à 36 mm. C'est pour cette raison que nous nous sommes orientés vers le filtrage des données d'entrée afin de réduire et/ou de supprimer ces erreurs.

Pour y parvenir, nous avons proposé deux méthodes de filtrage, à savoir : le filtrage par seuil et le filtrage par l'analyse géostatistique.

2.3.1.1. Filtrage par seuil

Cette méthode est une approche intuitive. Elle nous a permis de supprimer quelques données de pluies considérées comme aberrantes au regard de l'image radar que nous présenterons dans la partie des résultats pour une comparaison avec celle obtenue après le filtrage.

Principe de la méthode

Par hypothèse raisonnable, le seuil considéré pour qualifier une donnée de "aberrante" est vu de deux façons.

La première consiste à considérer que dans l'absolu, cette valeur ne peut exister dans la nature et la seconde se fait en jugeant une pluie beaucoup trop forte par rapport aux mesures qui lui sont contiguës (valeur ne pouvant non plus exister dans la nature).

Ces valeurs aberrantes sont donc, remplacées dans le fichier par le code de valeur manquante (65535) et ne sont pas prises en compte dans les calculs.

Par ailleurs, il est important de noter que cette méthode considère pour cible, le pixel qui contient une valeur de pluie jugée forte par les critères du filtrage. Par conséquent, il est comparé avec ses voisins dans le temps et dans l'espace pour être validé ou non.

Dans l'espace, un pixel est observé comme situé dans une couche à deux dimensions. Si on rajoute le temps, il est donc représenté en trois dimensions (Figure 14). En effet, dans le temps et dans l'espace, un pixel cible est entouré de huit voisins (chaque couche a une taille de 3*3). Pour trois dimensions, ce même pixel est donc entouré de 26 voisins auxquels il peut être comparé pour enfin être considéré valide ou invalide.

Sur la figure 14, (t) représente la dimension temporelle où se situe la cible, (t-1) et (t+1) représentent respectivement la dimension qui précède et celle qui suit la cible (t).

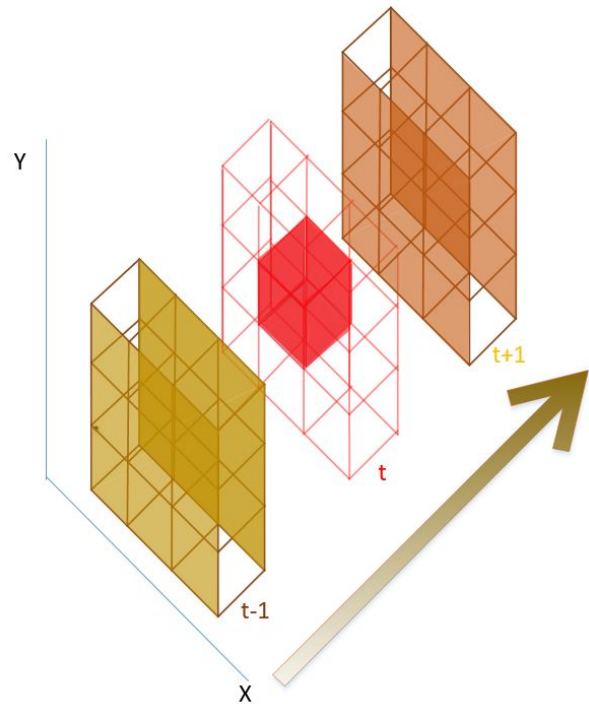


Figure 14. Schéma illustratif de représentation d'un pixel cible et ses voisins dans l'espace et dans le temps

Application de la méthode

Les critères fixés pour le pas de temps de 5 minutes, considèrent comme **donnée manquante**, toute pluie :

1. supérieure à 5 mm et ayant moins de 6 voisins pluvieux.
2. supérieure à 10 mm et ayant moins de 10 voisins pluvieux.
3. supérieure à 36 mm quelque soit le nombre de voisins pluvieux.

Les pixels radar dont la valeur ne respecte pas les critères fixés ont été considérés comme présentant des intensités anormalement élevées et ont été considérés invalides.

Le choix de cette méthode porte sur deux aspects :

- Le premier concerne le fait que nous jugeons incohérent de trouver dans la nature pour une résolution spatio-temporelle fine, des pluies présentant des intensités anormalement élevées seules (par exemple une pluie supérieure à 5mm en 5 minutes).
- le deuxième résulte du fait qu'après la fouille des valeurs maximales de pluies en 6 minutes sur la base de données de Météo-France (annexe 4), nous avons constaté que depuis la mise en place des pluviomètres automatiques en 1980, la valeur record rencontrée s'élève à 36 mm et a été observée en Drôme (Rhône-Alpes) le 20 septembre 1982.

Ainsi, cette valeur maximale de pluies record en 6 minutes sur une période de 37 ans, a été retenue comme notre valeur de référence à laquelle aucune donnée radar à notre disposition ne pourra être supérieure. Bien que nos données s'échelonnent de 2006 à 2016, nous n'avons pas utilisé cette période pour choisir le seuil de référence, car la valeur record certifiée en 1982 nous a paru statistiquement représentative.

De plus, il nous a paru logique de considérer une plus longue période pour retenir le seuil, compte tenu de la fine résolution spatiale du radar relativement au pluviomètre. Autrement dit, le pluviomètre ne nous apporte des informations que sur quelques points très distants et fixes (mesure ponctuelle), alors que le radar nous informe sur les pluies à résolution fine et ayant de grandes portées (80 à 200 km). Donc, si nous ne prenons en compte que notre période pour déterminer le seuil de rejet des aberrations, il y a de fortes chances de perdre de données sur des pluies réellement observées qui se trouvent aux endroits sans les pluviomètres.

Par ailleurs, il nous semble intéressant de signaler qu'avant d'arriver au seuil absolu de 36 mm, nous avons procédé à plusieurs tentatives. Cependant, les différents seuils absolus essayés n'avaient pas de base formelle et nous conduisaient à des résultats non satisfaisants.

2.3.1.2. Analyse géostatistique

La géostatistique se définit comme l'étude des phénomènes régionalisés. Elle est construite à partir des phénomènes qui s'étendent dans l'espace géographique (qui incluent éventuellement l'axe temporel) et y présentent une « organisation » ou « structure » (Journel et Huijbregts, 1989).

Après le filtrage par seuil, cette méthode nous a permis de poursuivre le nettoyage de notre fichier.

Principe de la méthode

Le schéma 15 ci-dessous reprend les grandes étapes de l'analyse géostatistique réalisée pour cette étude.

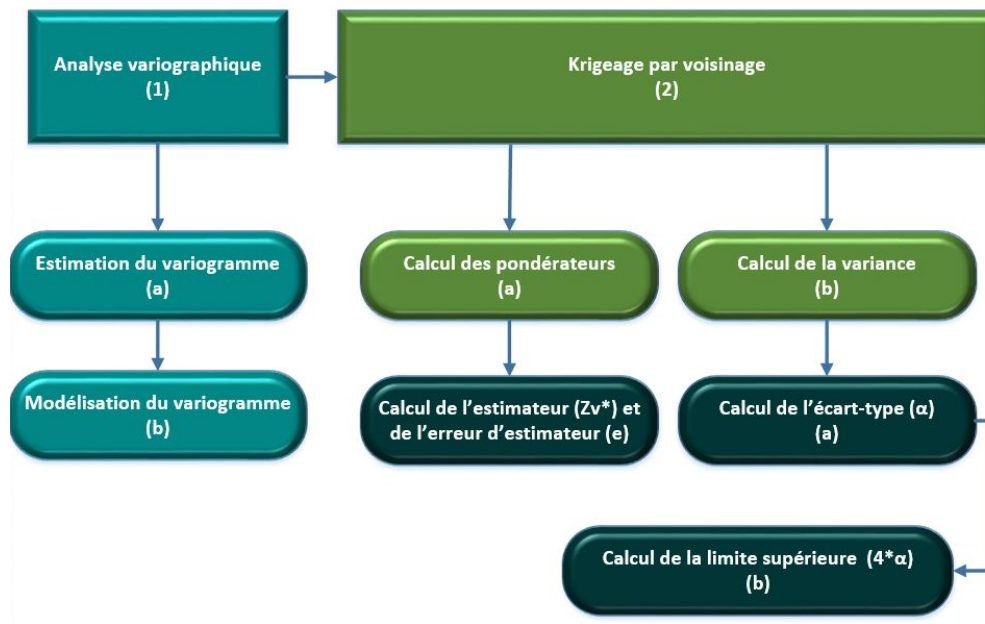


Figure 15. Schéma illustratif de grandes étapes de la méthode d'analyse géostatistique.

En statistiques spatiales, les données sont collectées dans des lieux où on a relevé la position géographique, dans le but d'utiliser cette information spatiale dans la modélisation statistique. En particulier, on cherche à modéliser ce que l'expérience courante nous enseigne : deux données proches géographiquement tendent à être similaires en valeur (Rivoirard, 2001).

Deux étapes sont importantes dans une étude géostatistique :

1. L'identification des caractéristiques des variables aléatoires dont l'outil principal utilisé est le variogramme, défini par la formule (Chilès, 2004) :

$$\gamma(h) = 1/2E[(Z(x+h) - Z(x))^2] \quad (1)$$

où

$\gamma(h)$: est le variogramme expérimental

x : est le vecteur de coordonnées

h : est le vecteur de distance

Z : est la valeur observée

D'après cette équation (1), le variogramme est essentiellement une variance à une certaine distance. Cet outil mathématique de la géostatistique permet d'une part de décrire la structure spatiale et de voir la détérioration de la corrélation entre les points mesurés quand la distance augmente, et d'autre part de préciser certaines caractéristiques qualitatives et quantitatives du milieu (continuité, anisotropie, etc.) (Deverly. F, 1984). Il est calculable même si la moyenne n'est pas bien connue contrairement à la covariance ;

2. l'utilisation des caractéristiques du variogramme et d'autres valeurs connues pour l'estimation optimale aux points (ou sur des volumes) non mesurés. La méthode utilisée est le krigeage défini par la formule (Chilès,2004) :

$$Z_v^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i \quad (2)$$

où

Z_v^* : est un estimateur de Z_v

λ_i : sont des pondérateurs à affecter aux points de données

Z_i : est la valeur observée au point x_i de la variable aléatoire

C'est l'une des méthodes d'interpolation spatiale qui permet d'estimer les valeurs inconnues à partir d'un voisinage de points échantillonnés et de calculer en même temps l'erreur d'estimation associée (Journel et Huijbregts, 1989).

$$e = Z_v - Z_v^* \quad (3)$$

où

e : est l'erreur d'estimation

Z_v : est la valeur observée

Z_v^* : est un estimateur de Z_v

Application de la méthode

Les formules décrites précédemment ont été introduites dans l'algorithme et les variogrammes ont été ainsi ajustés à l'aide du modèle exponentiel ci-dessous, afin de décrire la structure spatio-temporelle de nos données.

$$\gamma(h) = C[1 - \exp(\frac{-h}{3a})] \quad (4)$$

où :

$\gamma(h)$: est le variogramme théorique

C : est la variance

a : est la portée pratique du variogramme

h : est la distance entre deux points de mesure

Cette description a permis de voir la détérioration de la corrélation entre les points mesurés lorsque leur distance augmente. Ainsi, les variogrammes ont été calculés en trois dimensions pour des pluies non-nulles et l'intermittence, afin de s'assurer de la direction de la continuité spatiale. De ce fait, la première dimension concerne la direction Ouest-Est, la deuxième concerne la direction Sud-Nord et la troisième dimension est temporelle. Une fois que nous avons calculé les variogrammes, les données aberrantes ont été donc estimées à l'aide de la méthode du krigeage. Cette méthode d'interpolation spatiale a consisté à estimer chaque valeur de pluie radar à partir de son voisinage, sur la base du principe selon lequel des objets rapprochés dans l'espace tendent à posséder des caractéristiques similaires. Enfin, l'erreur associée à chaque valeur estimée a été calculée et une limite de référence correspondant à quatre écart-type d'estimation a été fixée.

Les valeurs de pluies au delà de la limite de référence devraient être considérées comme aberrantes et donc remplacées par les valeurs krigées correspondantes. Telle était du moins l'intention. Malheureusement la variance de krigeage n'est facile à interpréter en terme d'intervalle de confiance qu'avec des données gaussiennes, ce que la pluie n'est pas. Cette démarche formelle, élégante dans son principe est restée inachevée. Elle donne cependant un élément de base théorique au filtrage par seuil avec le voisinage.

2.3.2. Analyse régionale des précipitations

L'analyse régionale décrit par Hosking et Wallis (1997) est utilisée pour établir les quantiles à n'importe quel site à l'intérieur d'une région donnée (Journel et Huijbregts, 1989). Elle permet la consolidation de l'information régionale et, par conséquent, peut conduire à une estimation différente de la distribution obtenue localement, à une station donnée (Onibon, 2004).

Il existe deux grandes étapes pour estimer les quantiles de période de retour sur base de la théorie des moments linéaires (L-moments). La première consiste à former des groupes hydrologiques homogènes. La seconde consiste à sélectionner une loi statistique régionale correspondant au type d'échantillonnage, puis déterminer les paramètres de cette loi pour enfin estimer les quantiles (Figure 16).

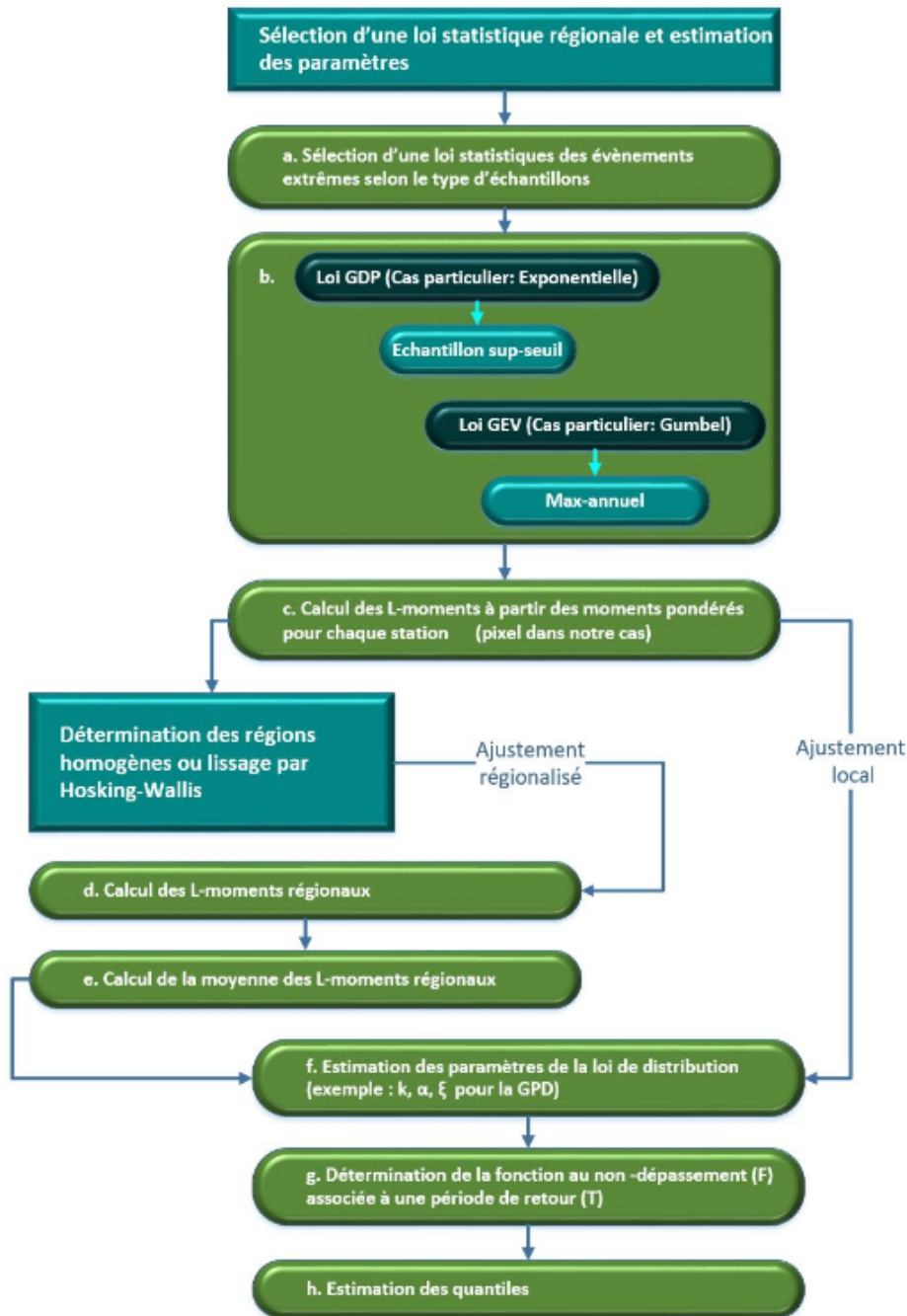


Figure 16. Schéma illustratif des étapes de l'analyse régionale des précipitations.

En règle générale pour estimer les caractéristiques d'un événement pluvieux de période de retour T avec précision, il est nécessaire de disposer d'une durée d'observation suffisante, de l'ordre de 5 à 7 fois T , 3 fois étant considéré de manière empirique comme un minimum. Par contre, si la durée d'observations est insuffisante mais qu'il existe localement plusieurs stations d'observations, il est possible de consolider les données des stations afin d'améliorer la précision des estimations pour des périodes de retour élevées (Anctil *et al.*, 2005).

La consolidation des chroniques de pluies situées dans une même zone homogène à partir

de l'analyse régionale, nous a été d'une grande importance du fait qu'à la base nous avons une durée d'observations faible (10 ans) pour prétendre estimer une période de retour 10 ans ($T=10$). Car comme décrit plus haut, il nous faudrait au moins 30 années d'observations. Ainsi, à l'aide des échantillons sup-seuils et de la consolidation de nos données, nous avons été capable de déterminer les quantiles de période de retour 10 ans et plus. Nos échantillons sup-seuil sont constitués de 6 plus fortes valeurs des pluies en moyenne par an, soit 60 valeurs pour 10 ans au pas de temps de 5 minutes, ainsi que leurs cumuls (15, 30, 60, 120, 240, 360, 720, 1440, 2880, 5660, 14400 minutes). Ceci nous a permis d'estimer avec fiabilité une pluie décennale puisque nous disposons dans notre échantillon d'analyse de 6 valeurs par année au lieu d'être limité à une seule valeur comme pour un échantillon max-annuel. L'échantillon sup-seuil est plus riche et stable que l'échantillon max-annuel, même s'il contient nécessairement des valeurs plus faibles. Nous avons ensuite ajusté une loi généralisée de Pareto (GPD **) sur tous les échantillons sup-seuil supposés tirés d'un processus homogène.

2.3.2.1. Détermination des régions homogènes

Comme nous venons de l'évoquer, la première étape de l'estimation régionale d'une variable hydro-météorologique est la décomposition de la zone d'étude en groupes homogènes de stations (Onibon, 2004 ; Godart, 2009). Il existe plusieurs manières permettant d'estimer une zone homogène :

1. La première concerne la définition d'une zone homogène par une autorité compétente au sens scientifique ou administratif selon le besoin exprimé. Dans ce cas l'hydrologue peut cependant, vérifier l'homogénéité de la zone à l'aide des méthodes statistiques.
2. la deuxième consiste de faire appel aux méthodes de partitionnement comme la méthode des moments linéaires, l'analyse en composante principale, la méthode de K-means, la méthode de Kohonen, etc...
3. La troisième méthode est celle qui consiste à faire le lissage à partir des moyennes mobiles ou moyennes glissantes. Chaque pixel est considéré comme étant un point central qu'on affecte d'une loi régionale lui accordant plus de poids. Tout le voisinage contribue à la loi régionale. Le voisinage est ensuite centré sur le pixel suivant. Notre travail valorise cette méthode.

Dans notre étude, nous avons d'abord calculé les moyennes mobiles avec un écart-type correspondant à 3 km. Ensuite nous avons fait la même chose avec 9 km. Ceci a été réalisé grâce à la méthode de Hosking et Wallis (1997) qui permet la consolidation de données régionales.

** . Generalized Pareto Distribution

Notre choix s'est porté sur cette méthode parce qu'elle permet d'atténuer la variabilité exagérée des ajustements locaux en regroupant tous les pixels situés dans un voisinage raisonnable.

2.3.2.2. Sélection d'une loi statistique régionale, estimation des paramètres et détermination des quantiles

Comme nous l'avons présenté, l'analyse de fréquence régionale est basée sur la théorie des moments linéaire notée "L-moments". Cette méthode est adaptée pour les ajustements des lois statistiques des événements extrêmes et a été développée par Hosking (1990) à partir des moments de probabilité pondérés (Onibon *et al.*, 2004 ; Hosking, 1990 ; Hosking et Wallis, 1997). Elle permet à l'aide d'une loi statistique régionale, d'imposer à toutes les valeurs d'une zone homogène donnée, une distribution statistique commune malgré la présence des valeurs extrêmes afin de mieux estimer les quantiles.

Il existe plusieurs lois d'ajustements des événements extrêmes (annexe 2), par exemple la GEV^{††} et la GPD^{**}. La loi généralisée de Pareto (GPD) ajuste au mieux les échantillons au dessus d'un seuil donné (échantillon sup-seuil), contrairement à la loi générale des valeurs extrêmes (GEV) qui convient mieux aux échantillons de maxima annuels des pluies. Il est important de noter qu'un échantillon sup-seuil est constitué par un nombre élevé de valeurs de pluies en moyenne par année, par contre, un échantillon max-annuel ne prend en compte dans son échantillon qu'une seule valeur maximale par année. C'est dans cette logique que nous avons opté pour les échantillons sup-seuil compte tenu du fait que nous disposions d'un nombre d'années d'étude faible. Ceci nous a permis d'avoir des résultats plus robustes qu'en utilisant un échantillonnage classique par valeurs maximales annuelles, qui est plus sensible à la distribution d'échantillonnage du fait de la quantité réduite d'information utilisée.

La méthode des L-moments nous a permis à partir de la loi GPD et des échantillons sup-seuil, de régionaliser nos données. En d'autres termes, elle nous a permis d'imposer à toutes les valeurs d'une zone homogène donnée, une distribution statistique commune. Ce qui nous a autorisé à partir des L-moments régionaux, de calculer les paramètres de la loi GPD permettant l'estimation des quantiles des périodes de retour.

Principe de la méthode

La méthode des moments linéaires présente trois étapes de calculs :

††. Generalized Extreme Value

**.. Generalized Pareto Distribution

1. Calculs des moments pondérés

$$b0 = \frac{1}{n} \sum_1^n xi \quad (5)$$

$$b1 = \frac{1}{n(n-1)} \sum_1^{n-1} (n-i)xi \quad (6)$$

$$b2 = \frac{1}{n(n-1)(n-2)} \sum_1^{n-2} (n-i-1)xi \quad (7)$$

$$b3 = \frac{1}{n(n-1)(n-2)(n-3)} \sum_1^{n-3} (n-i)(n-i-1)(n-i-2)xi \quad (8)$$

où

$b0$ correspond à la moyenne arithmétique

$b1$: se comporte comme la variance

$b2$: se comporte comme le coefficient d'asymétrie

$b3$: se comporte comme le coefficient d'aplatissement

2. Le calcul des L-moments ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$) à partir des moments classiques pondérés ($b0, b1, b2, b3$) comme-suit :

- $\lambda_1 = b0$: L-moment d'ordre 1
- $\lambda_2 = 2b1 - b0$: L-moment d'ordre 2
- $\lambda_3 = 6b2 - 6b1 + b0$: L-moment d'ordre 3
- $\lambda_4 = 20b3 - 30b2 + 12b1 - b0$: L-moment d'ordre 4

Comme pour les moments conventionnels, les L-moments $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ et λ_4 se comportent à peu près comme la moyenne arithmétique, la variance, le coefficient d'asymétrie et le coefficient d'aplatissement respectivement.

Sur la base des moments linéaires (λ), les échantillons locaux peuvent être ajustés par la loi généralisée de Pareto.

3. le calcul des L-moments régionaux . C'est la régionalisation des L-moments. Il s'agit de calculer la moyenne des moments linéaires d'une région donnée. Ces L-moments régionaux sont ainsi obtenus comme suit :

$$\lambda_1 r = \frac{\sum_{j=1}^{ne} w_j \lambda_{1j} / \lambda_{1j}}{\sum_{j=1}^{ne} w_j} \quad (9)$$

$$\lambda_2 r = \frac{\sum_{j=1}^{ne} w_j \lambda_{2j} / \lambda_{1j}}{\sum_{j=1}^{ne} w_j} \quad (10)$$

$$\lambda_3 r = \frac{\sum_{j=1}^{ne} w_j \lambda_{3j} / \lambda_{1j}}{\sum_{j=1}^{ne} w_j} \quad (11)$$

$$w_{i+d_i, j+d_j} = \exp\left(-1/2 \frac{(d_i^2 + d_j^2)}{\sigma^2}\right) \quad (12)$$

où

$\lambda_1 r$: L-moment régional d'ordre 1

$\lambda_2 r$: L-moment régional d'ordre 2

$\lambda_3 r$: L-moment régional d'ordre 3

w_j : Poids à la station j

d_i, d_j : Décalage i et j

Le choix des poids détermine précisément la régionalisation effectuée à l'équation 12.

Que l'on fasse des ajustements locaux ou régionaux, les paramètres de la loi (GPD**) et les quantiles se calculent comme-suit :

$$k = (1 - 3\lambda_3/\lambda_2)/(1 + \lambda_3/\lambda_2) \quad (13)$$

où

k : est le paramètre de forme

λ_2 et λ_3 : sont les L-moments d'ordre 2 et 3 respectivement.

$$\alpha = (1 + k)(2 + k)\lambda_2 \quad (14)$$

où

α : est le paramètre d'échelle.

$$\xi = \lambda_1 - (2 + k)\lambda_2 \quad (15)$$

où

ξ : est le paramètre de position.

** . Generalized Pareto Distribution

La fonction d'estimation des quantiles (pour chaque période de retour ou fréquence) se présente sous forme :

$$\boxed{x(F) = \xi + \alpha(1 - (1 - F)^k/k)} \quad k \neq 0 \quad (16)$$

$$\boxed{x(F) = \xi - \alpha \log(1 - F)} \quad k = 0 \quad (17)$$

La fonction au non-dépassement pour les échantillons sup-seuil se présente comme-suit :

$$\boxed{F = 1 - 1/nT} \quad (18)$$

où :

F : est la fonction au non-dépassement

T : est la période de retour

n : est la densité d'échantillonnage

4. Dans le cas de régions homogènes, les échantillons régionaux sont multipliés par un facteur (moyenne au site) afin d'avoir une seule loi commune pour toute la zone d'étude constituée des régions homogènes, à ce facteur multiplicatif près.

Application de la méthode

Les formules décrites précédemment ont été introduites dans notre algorithme et les estimateurs des paramètres de la loi généralisée de Pareto (GPD**) ont été déduits à partir des L-moments régionaux afin de calculer les quantiles. Les courbes d'IDF^{††} sont réalisées. Le choix de cette méthode repose sur le fait que les moments linéaires (L-moments), sont moins sensibles que les moments classiques à la présence de données atypiques. Ceci résulte du fait que les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement classiques contiennent des puissances 3 et 4, et donc surpondèrent les données extrêmes. Ce qui n'est pas le cas des L-moments qui sont des combinaisons linéaires des données. C'est l'intérêt des statistiques d'ordre.

** . Generalized Pareto Distribution

†† . Intensité-Durée-Fréquence

Chapitre 3. Résultats : Statistiques et cartographiques

Les résultats se présentent sous différentes formes. Ils peuvent être observés en appuyant sur l'un des boutons de l'interface réalisée comme décrit précédemment, suivant l'analyse que l'on recherche. Les résultats statistiques sont présentés sous forme graphique ou sous forme de valeurs numériques.

Après l'extraction des rasters des quantiles des pluies pour différentes durées, la présentation est réalisée sous forme cartographique. Les paramètres libres (durée d'intérêt, période de retour et surface considérée) rendent difficilement envisageable une exportation systématique. C'est pourquoi, nous nous bornerons aux quantiles les plus utiles.

3.1. Statistique

Comme évoqué tout au long du rapport, l'analyse régionale des pluies a été rendue possible grâce à des statistiques descriptives, afin de caractériser les événements extrêmes (quantiles) en tout point du territoire pour enfin décrire les courbes d'Intensité-Durée-Fréquence (IDF), de Pluie-Durée-Fréquence (PDF) et celles de Pluie-Durée-Aire-Fréquence (PDAF). Ces analyses ont été précédées du nettoyage de données afin de réduire les erreurs dues aux radars pouvant conduire à de fortes variabilités dans les calculs statistiques.

3.1.1. Résultats du filtrage des données

Afin de vérifier de manière formelle la présence des erreurs radar à partir du comportement des données spatiales, nous avons tout d'abord procédé à l'analyse variographique. Ensuite nous avons soumis ces données au filtrage par seuil et le filtrage par géostatistique via la méthode du krigeage.

3.1.1.1. Variogrammes des pluies

La figure 17 présentée ci-dessous, illustre les variogrammes des pluies en trois dimensions (dimension Ouest-Est, Sud-Nord et temporelle).

Ces variogrammes ont été calculés avec des données brutes avant de procéder au filtrage. L'analyse variographique que nous avons présenté au paragraphe 2.3.1.2, est l'une des deux étapes de la géostatistique. Elle consiste à décrire la structure spatiale et de voir l'augmentation de la variabilité entre les points de mesure lorsque la distance augmente. Le variogramme est un outil formel qui permet de détecter les anomalies dans les données

spatiales. Il s'intéresse à la variabilité en général et il reste correct dans la mesure où les valeurs aberrantes ne sont pas très nombreuses.

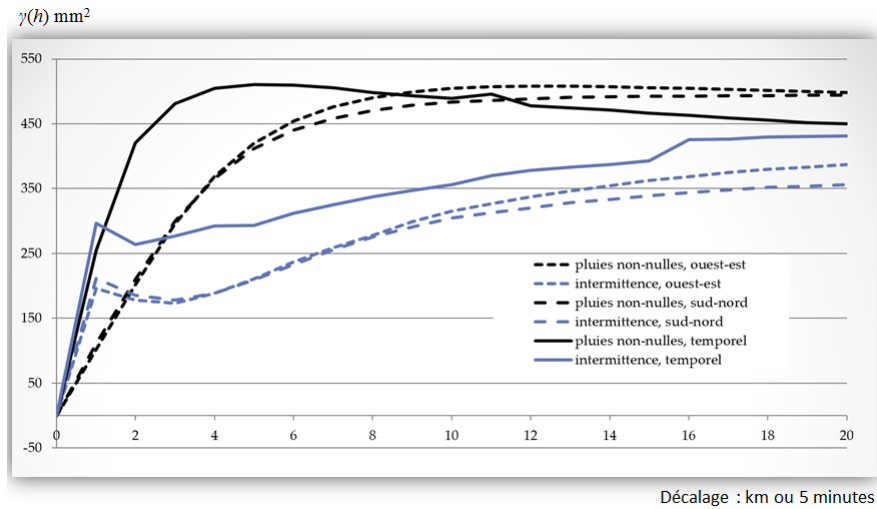


Figure 17. Variogrammes des pluies en 3 dimensions.

Nous rappelons que l'analyse variographique de données a été réalisée en trois dimensions à savoir : la dimension Ouest-Est, Sud-Nord et temporelle. Sur l'axe des abscisses, le graphique porte le décalage ou la distance entre les points de mesure séparés de 1 km (pour la vue spatiale) ou 5 minutes (pour la vue temporelle). L'axe des ordonnées porte la variabilité des pluies exprimée en mm^2 .

Ce graphique présente des courbes de variogrammes pour des pluies non-nulles et l'intermittence.

Au regard des variogrammes des pluies non-nulles, il ressort l'absence d'effet de pépite. Cela résulte de l'absence de fortes variations entre des mesures des pluies rapprochées. De plus, chaque variogramme présente un palier et une portée. Cela permet d'observer l'endroit où il n'y a plus de corrélation entre les valeurs mesurées lorsque la distance augmente. Du point de vue temporel, nous observons un palier à partir d'un décalage d'environ 20 minutes. Cette limite marque le délai après lequel les pluies deviennent indépendantes les unes des autres. En regardant sur la vue spatiale de ces pluies, les paliers s'observent à partir d'environ 8 à 14 km et ceci marque l'indépendance des données.

En nous focalisant sur les variogrammes de l'intermittence, nous observons que l'effet de pépite est nécessairement présent sur toutes les dimensions. Cela pourrait s'expliquer du fait qu'il s'agit d'une variable discontinue de Bernoulli. Ensuite, sur environ 20 km et 100 minutes, respectivement pour les dimensions spatiale et temporelle, aucun palier n'est observé. Autrement dit, l'intermittence des pluies n'atteint pas d'indépendance aux échelles observées.

En définitive, que ce soit pour les pluies non-nulles ou pour l'intermittence, toutes les

deux ne suivent pas de direction préférentielle et la variabilité peut donc être considérée comme spatialement isotrope.

Par ailleurs, il est important de noter qu'après l'analyse variographique ci-dessus, les valeurs aberrantes détectées par la méthode du krigeage, pourraient être remplacées par leurs estimations. Ce qui serait un apport très utile, mais pas suffisant du fait que la méthode du krigeage se base sur le voisinage rapproché pour estimer une valeur observée ou manquante. Cette approche a permis essentiellement de bien estimer les artéfacts isolés parmi les vraies pluies ayant des valeurs proches.

3.1.1.2. Image radar avant et après le filtrage

La figure 18 ci-dessous, présente les résultats du filtrage de données radar.

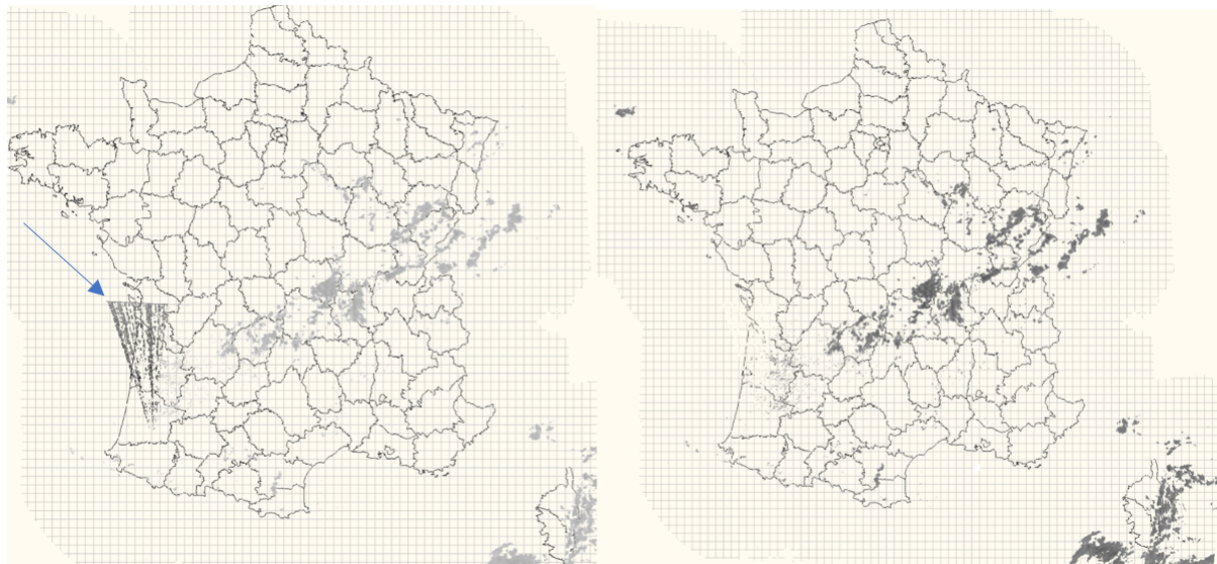


Figure 18. *Illustration du filtrage : A gauche Image radar avant le filtrage. A droite Image radar après le filtrage*

Comme cela a été expliqué au paragraphe 2.3.1, avant le filtrage, la plupart des phénomènes non météorologiques possédaient des valeurs supérieures à 50 mm au pas de temps de 5 minutes. C'est l'une des raisons qui nous avait conduit à soumettre nos données au filtrage.

La figure à gauche présente l'image radar avant le filtrage. Sur cette image, nous observons visiblement la présence des phénomènes non météorologiques. L'image à droite a été réalisée avec un seuil absolu de 36 mm selon notre hypothèse. C'est ce seuil qui nous a permis de supprimer tous les artéfacts qui étaient visibles sur l'image initiale. Plusieurs images radar ont été vérifiées de la même façon.

En comparant les deux images, il ressort une différence visible. Nous observons la suppression de tous les artéfacts qui étaient visibles sur l'image avant le filtrage. Ces valeurs

aberrantes représentent environ 1% de l'ensemble de pluies non-nulles de départ. Globalement, la méthode du filtrage que nous avons développé, a permis de nettoyer le fichier de données radar. Ces résultats constituent pour nous une étape car nous avons enfin travaillé avec des données relativement saines.

3.1.2. Cas d'étude : Echantillon sup-seuil d'une chronique des pluies dans le département de l'Ardèche.

Étant donné le nombre des chroniques disponibles, nous nous focaliserons ici sur un seul pixel. Chaque point de l'image radar, correspond à une chronique de pluies de 10 années que l'on peut appréhender en statistiques descriptives. La figure 19 en est un exemple pour un pixel localisé dans le département de l'Ardèche.

Dans cette figure, nous ne présenterons que les résultats de quelques éléments des statistiques descriptives associés aux chroniques de pluies obtenus en appuyant sur le bouton de l'interface correspondant à cette requête.

| Echantillons sup-seuil | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------|---------|------------|-------|---------|------------|-------|---------|------------|-------|---------|------------|-------|
| Durée (min) | 5 | | | 15 | | | 30 | | | 4320 | | |
| OBS.n | 1051960 | | | 350604 | | | 175269 | | | 1162 | | |
| Ind.m | 0.07839 | | | 0.10175 | | | 0.12368 | | | 0.82358 | | |
| PNN.m (mm) | 0.147 | | | 0.34 | | | 0.56 | | | 12.087 | | |
| PNN.s (mm) | 0.404 | | | 0.953 | | | 1.546 | | | 22.494 | | |
| disponible (j) | 3652.6 | | | 3652.1 | | | 3651.4 | | | 3486 | | |
| Principales valeurs observées | | | | | | | | | | | | |
| rang | valeur | date | heure | valeur | date | heure | valeur | date | heure | valeur | date | heure |
| 1 | 19.9 | 28/07/2006 | 02:20 | 39.43 | 28/07/2006 | 02:15 | 39.94 | 28/07/2006 | 02:00 | 193.13 | 12/09/2015 | 00:00 |
| 2 | 18.21 | 29/09/2013 | 00:35 | 33.7 | 29/09/2013 | 00:30 | 38.3 | 29/09/2013 | 00:30 | 160.11 | 17/01/2014 | 01:00 |
| 3 | 16.26 | 22/05/2011 | 15:10 | 25.82 | 14/11/2014 | 21:15 | 33.86 | 14/11/2014 | 21:00 | 152.13 | 05/09/2010 | 02:00 |
| 4 | 12.67 | 14/11/2014 | 21:20 | 20.3 | 08/07/2007 | 21:15 | 32.73 | 12/08/2008 | 14:30 | 146.62 | 16/11/2006 | 03:00 |
| 5 | 12.2 | 09/07/2013 | 14:20 | 19.44 | 09/07/2013 | 14:30 | 25.96 | 03/09/2008 | 19:00 | 145.61 | 17/09/2014 | 04:00 |
| 6 | 12.07 | 08/07/2007 | 21:20 | 19.1 | 24/09/2012 | 02:15 | 25.72 | 03/06/2008 | 17:00 | 141.03 | 02/11/2011 | 05:00 |
| 7 | 11.57 | 11/06/2012 | 17:40 | 19.02 | 22/05/2011 | 15:00 | 24.48 | 22/05/2011 | 15:00 | 130.01 | 29/10/2010 | 06:00 |
| 8 | 11.26 | 20/10/2013 | 09:25 | 18.73 | 03/06/2008 | 16:45 | 23.85 | 14/08/2011 | 15:30 | 122.05 | 28/09/2013 | 07:00 |
| 9 | 10.91 | 14/11/2014 | 22:15 | 18.52 | 12/08/2008 | 15:45 | 23.56 | 12/09/2015 | 19:30 | 120.91 | 10/08/2008 | 08:00 |
| Ajustements bruts (6 valeurs par an, pas de temps fixe). | | | | | | | | | | | | |
| x0 (mm) | 9.958 | | | 17.434 | | | 23.737 | | | 107.688 | | |
| gr (mm) | 2.928 | | | 4.881 | | | 7.287 | | | 37.189 | | |
| p10 (mm) | 16.7 | | | 28.672 | | | 40.517 | | | 193.318 | | |

Figure 19. Illustration des statistiques descriptives d'une chronique des pluies (échantillon sup-seuil pour le département de l'Ardèche)

Pour un échantillon sup-seuil de plusieurs durées (5, 15, 30 et 4320 minutes), les éléments descriptifs sont donnés. Nous observons pour chaque durée le nombre de données des pluies non-nulles observées (OBS.n), la moyenne de l'intermittence des pluies (Ind.m), la moyenne des pluies non-nulles (PNN.m), l'écart-type (PNN.s), la pluie d'une période de retour 1 an (x0), le gradex** (gr) et la pluie décennale (p10). Nous observons également la série de neuf plus fortes valeurs des événements pluvieux sur 10 ans et leur date précise

** gradient des valeurs extrêmes

de survenue.

Ces informations pourraient déjà permettre à l'équipe IRIP de confronter nos résultats aux données de l'aléa ruissellement à leur disposition. Regarder par exemple ce qui s'était produit aux différents endroits du territoire, aux dates et heures indiquées. Aussi, confronter ces résultats aux données de dégâts et voir si ces événements ont été enregistrés aux dates et heures indiquées. Les données de dégâts sont disponibles à Irstea^{||} et viennent de la base de dégâts développée par Saint-Martin et al. (2016).

Ces résultats peuvent intéresser plus d'un chercheur, afin de remonter dans le temps et voir ce qui s'était passé concernant la crue, l'inondation ou le ruissellement. Cela pourrait apporter une valeur ajoutée à la gestion de l'environnement car à notre connaissance, ces données ont été utilisées à des fins de prévisions et non pas pour celles à caractère climatologique.

3.1.3. Les courbes : IDF, PDF, PDAF

Comme nous l'avons présenté au point 2.2.3, une fois qu'on sait estimer les paramètres de la loi généralisée de Pareto (GPD) en tout point du territoire, on peut alors proposer une représentation graphique qui met en relation l'intensité, la durée, la fréquence (ou période de retour T) et la surface. Le quantile étant la valeur associée à chaque période de retour, par exemple un quantile associé à la période de retour $T=10$ ans, donnera la valeur de la pluie décennale suivant l'équation 16.

Nous rappelons le principe : La représentation graphique de la relation précitée pour une seule durée est nommée courbe d'IF[‡], pour plusieurs durées, ce sont les courbes d>IDF.^{**} Ensuite, lorsque ces courbes sont réalisées pour une surface donnée, on parle dans ce cas des courbes d'IDAF.^{††} Enfin, lorsqu'on décide de mettre en relation les pluies fortes (quantiles), la durée et la fréquence, on parle de PDF[†] et de PDAF^{‡‡} lorsque cette dernière relation est fonction d'une surface.

Toutes ces analyses sont des variantes d'une seule et même approche, mais appliquées à des variables d'intérêt pluviométriques différentes.

^{||}. Institut de recherche scientifique et technologique sur l'eau et l'agriculture

[‡]. Intensité-Fréquence

^{**}. Intensité-Durée-Fréquence

^{††}. Intensité-Aire-Durée-Fréquence

[†]. Pluie-Durée-Fréquence

^{‡‡}. Pluie-Durée-Aire-Fréquence

3.1.3.1. Les courbes IDF

La figure 20, nous présente les courbes qui mettent en relation l'intensité, la durée et la fréquence réalisées pour 11 pas de temps notamment 5,15, 30 minutes et 1, 2, 3, 4, 6, 12, 16, 24 heures pour de période de retour de 10 ans.

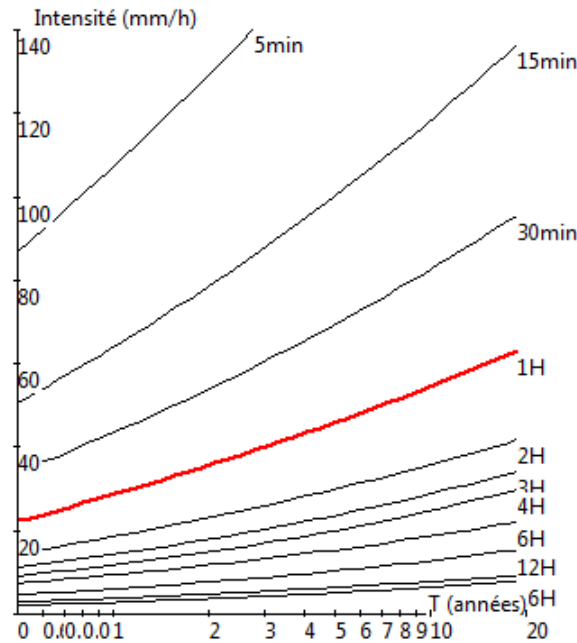


Figure 20. Représentation graphique des courbes IDF

Comme évoqué plus haut, ces courbes viennent confirmer pour les lames d'eau radar, la relation qui existe entre ces trois paramètres (intensité-durée-fréquence).

Nous observons que pour une même fréquence d'apparition d'une pluie forte (pour le même temps de retour), l'intensité de cette pluie est d'autant plus forte que sa durée est courte. Par exemple pour ces courbes IDF obtenues sur les Cévennes et pour une pluie décennale ($T=10$), les intensités d'environ 45 et 80 mm par heure correspondent aux durées respectives de 1 heure et de 30 minutes. Nous voyons bien que l'intensité est plus élevée pour une faible durée.

Les précipitations extrêmes de courte durée peuvent dépasser la capacité d'infiltration du sol, cela pourrait engendrer l'aléa ruissellement selon la vision de Horton (1933).

3.1.3.2. Les courbes PDF

La figure 21 présente la relation entre le quantile, la durée et la fréquence.

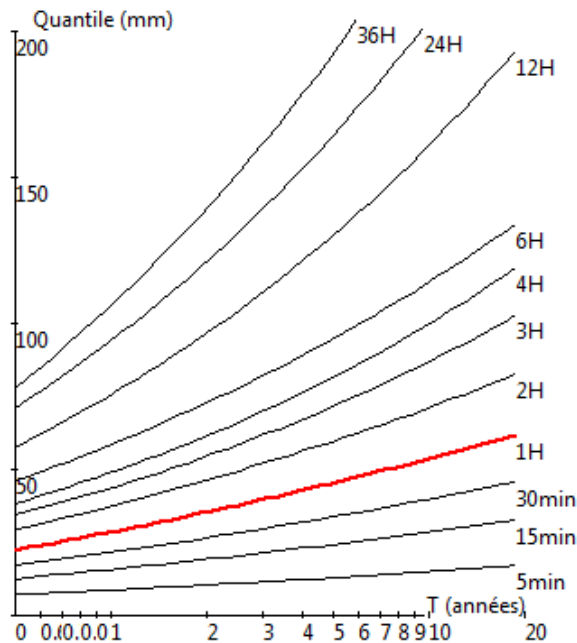


Figure 21. Représentation graphique des courbes PDF

Nous observons sur les courbes PDF ^{‡‡} l'augmentation des quantiles avec la durée. Pour une même période de retour (exemple 10 ans), plus les pluies sont cumulées plus la hauteur des pluies décennales est élevée ce qui est assez logique. Signalons que, les courbes de PDF ont leur utilité mais sont strictement équivalentes aux IDF quant aux informations apportées. Le comportement des courbes PDF est typique à la vision du ruissellement Hewlettien selon laquelle le ruissellement se forme par refus d'infiltration après saturation du sol provoquée par l'accumulation des pluies de longues durées.

^{‡‡}. Pluie-Durée-Fréquence

3.1.3.3. Les courbes PDAF[†]

La figure 22 présente les courbes de pluie, durée, surface et fréquence.

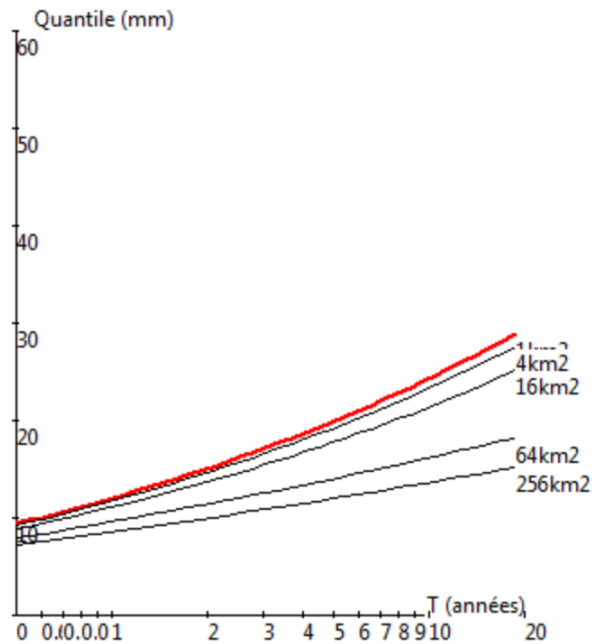


Figure 22. Représentation graphique des courbes de PDAF

Cette figure montre l'exemple des courbes de pluie-durée-surface-fréquence pour les surfaces allant de 1 à 256 km². Les quantiles correspondant à un pixel (1 km²) sont en rouge. Pour des surfaces de domaines plus grande, les quantiles sont moindres.

L'information apportée par ces courbes consiste à montrer la notion de l'abattement. Ainsi, pour une quantité de pluie donnée, la probabilité de l'observer est plus grande en moyenne sur un point ponctuel ou une petite surface que sur de grandes surfaces.

Notons cependant que à l'échelle du bassin versant, l'impact d'une pluie forte dépend aussi des autres caractéristiques géométriques comme son relief et sa forme. Par exemple la forme d'un bassin versant pourrait influencer l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire. La forme allongée favorise, pour une même pluie, les faibles débits de pointe de crue, ceci en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus importants. Les courbes PDAF ignorent cet aspect pour ne retenir que l'effet de la superficie.

†. Pluie-Durée-Aire-Fréquence

3.2. La cartographie

Comme annoncé depuis le début, notre mission était d'étudier les pluies fortes à l'échelle de la France métropolitaine et les présenter sous différentes formes dont l'une est la cartographie. A l'aide de notre interface, nous avons créé des rasters des quantiles des pluies pour 11 durées et 5 surfaces différentes.

3.2.1. Les cartes rasters des quantiles

Avant de mettre en forme nos cartes rasters sous les SIG[§], nous les avons lissées.

Les cartes à la figure 23 nous présentent les résultats des lissages effectués par la méthode de Hosking et Wallis afin de supprimer les fluctuations dues à de fortes variabilités dans nos échantillons. Comme cela a été évoqué au paragraphe 2.3.2.1, ces lissages ont été réalisés sous un noyau gaussien, d'une part à partir d'un écart-type de 3 km et d'autre part par un écart-type de 9 km.

Le lissage n'est pas que cosmétique, il représente une hypothèse hydrologique qui est l'homogénéité locale. Il est traité de façon statistiquement appropriée.

La première image (A) présente la carte réalisée avant le lissage. Les fluctuations sont visibles et se présentent par des irrégularités sur l'image. C'est pour cela que nous avons tenté le premier lissage (B), avec les moyennes mobiles à 3 km d'écart-type, afin de supprimer ces fluctuations. Cependant, les résultats n'étant pas satisfaisants nous avons augmenté l'écart-type à 9 km. Cela nous a permis de supprimer ces fluctuations comme nous le montre l'extrait de la carte (C). Enfin, nos cartes lissées ont été placées sous SIG pour leur mise en forme.

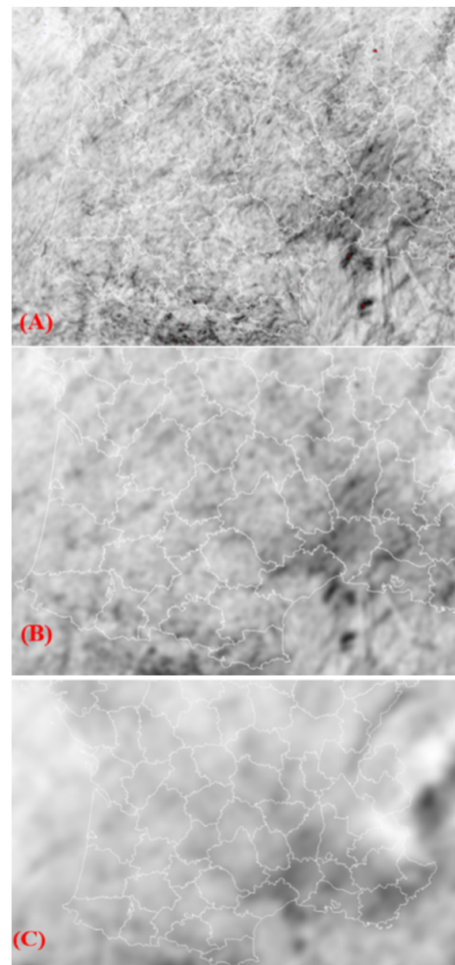


Figure 23. Illustration des cartes rasters lissées par la méthode de Hosking et Wallis : (A) sans lissage, (B) lissage avec 3 km d'écart-type, (C) lissage avec 9 km écart-type

§. Système d'Information Géographique

3.2.2. Cartographie des quantiles des pluies

Dans cette partie, nous présenterons les cartes de quantiles pour quelques résolutions spatio-temporelles. La période de retour définie étant de 10 ans, à l'échelle de la France métropolitaine.

A. Distribution géographique des quantiles

Afin d'avoir une vision spatialisée des pluies fortes en France métropolitaine, la figure 24 présente la répartition géographique des quantiles des pluies pour une résolution spatiale de 1 km² et une résolution temporelle de 5 minutes.

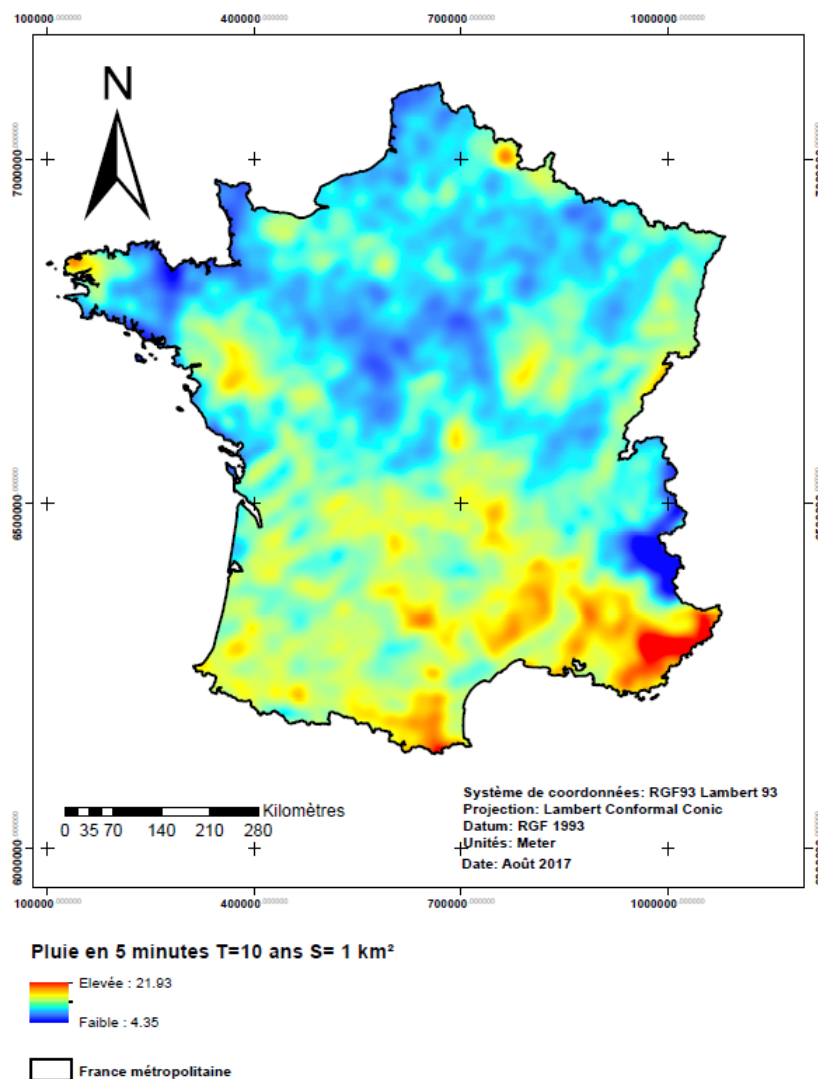


Figure 24. Répartition géographique des quantiles de pluies pour une durée de 5 minutes

Il est intéressant d'observer comme évoqué dans les généralités (cf. figure 5) que toute la France est concernée par les pluies fortes. La région méditerranéenne est caractérisée par

des valeurs relativement fortes, comparé au reste du territoire. La partie majeure au nord du territoire est dominée par de quantiles faibles.

Les contreforts du massif central, les Pyrénées orientales, le sud-est (Var, Alpes maritime) et les Cévennes vivarais qui sont connus par de pluies intenses, sont déjà bien représentés pour des quantiles de 5 minutes. Par contre les valeurs faibles observées dans les Alpes externes sont ambiguës car nous savons que les radars sont difficilement accessibles dans les Alpes internes mais pas dans les Alpes externes. A notre connaissance, l'effet d'abri existe mais il se pourrait que cette sous-estimation de mesures provienne de l'effet de masque de radar dû à son inaccessibilité à certains endroits masqués par les chaînes de montagne.

Nous observons également de fortes pluies aux endroits qui sont en général caractérisés par de pluies faibles par exemple les départements de Finistère, de Loire-Atlantique et de Maine et Loire.

Globalement, les hauteurs de précipitations sont plus élevées au sud et diminuent vers le Nord.

Les cartes de résolutions temporelles de 30 minutes et d'une heure pour la même résolution spatiale (1 km²) sont représentées aux annexes 6 et 7. Elles montrent avec plus de précision de fortes précipitations localisées dans la région méditerranéenne comparative-ment à la carte de 5 minutes.

En conclusion cette carte des quantiles en 5 minutes montre une continuité des événements pluvieux qui en général ne sont pas visibles sur les cumuls. Ce qui représente une vraie valeur ajoutée pour l'étude des pluies dans les petits bassins versants, afin de pouvoir mieux étudier les aléas (érosion, ruissellement, etc.).

B. Distribution statistique des pluies décennales

La figure 25 présente la distribution des quantiles décennaux d'après notre base radar.

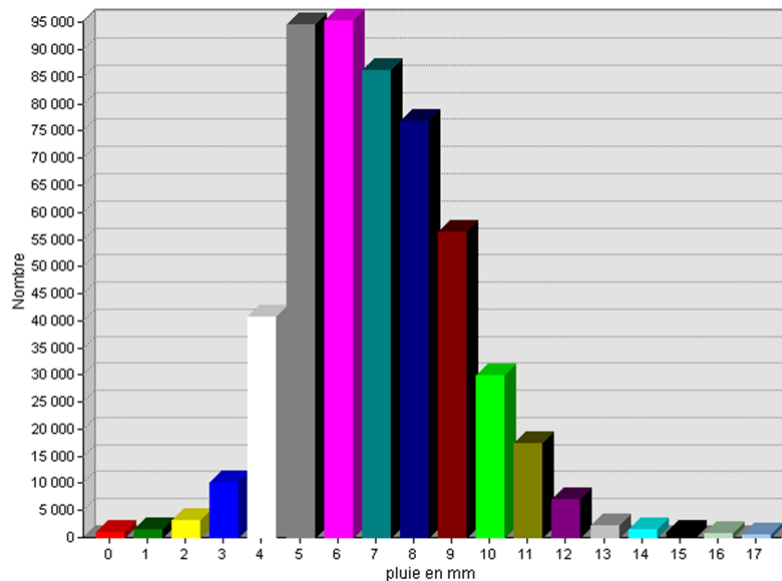


Figure 25. *Distribution spatiale de quantiles décennaux de 5 minutes*

Dans l'histogramme de la figure précédente (figure 24), nous observons des valeurs usuelles variant entre environ 4 et 14 mm de hauteur. Le quantile de 6 mm est la plus observée et représente 15%. La réalité des valeurs inférieures à 4 mm paraît devoir être confirmée.

Par ailleurs, après le lissage de données par la méthode de Hosking et Wallis, la valeur maximale s'élève à 21 mm de hauteur. En supprimant le lissage de la carte à partir de l'interface précédemment décrit, nous retrouvons approximativement de valeurs des pluies observées à partir des pluviomètres au sol. Nous citons par exemple les événements pluvieux du 09 novembre 2014 (25 mm) et du 28 juillet 2013 (28 mm) observés respectivement dans les départements de Var et de Gard. La régionalisation de Hosking et Wallis (1997) revient à diluer ces événements sur le voisinage.

Les histogrammes de résolutions temporelles de 30 minutes et de 3 heures pour la même résolution spatiale (1 km²) sont représentés aux annexes 8 et 9. Nous observons bien l'augmentation générale des quantiles avec la durée. Curieusement, la valeur la plus fréquente de 13 mm est la même pour la durée de 30 minutes et de 3 heures.

C. Distribution géographique des quantiles pour une surface fixée

La figure 26 présente la carte régionale des quantiles des pluies sur les pas de temps de 5 minutes et de surface de 256 km².

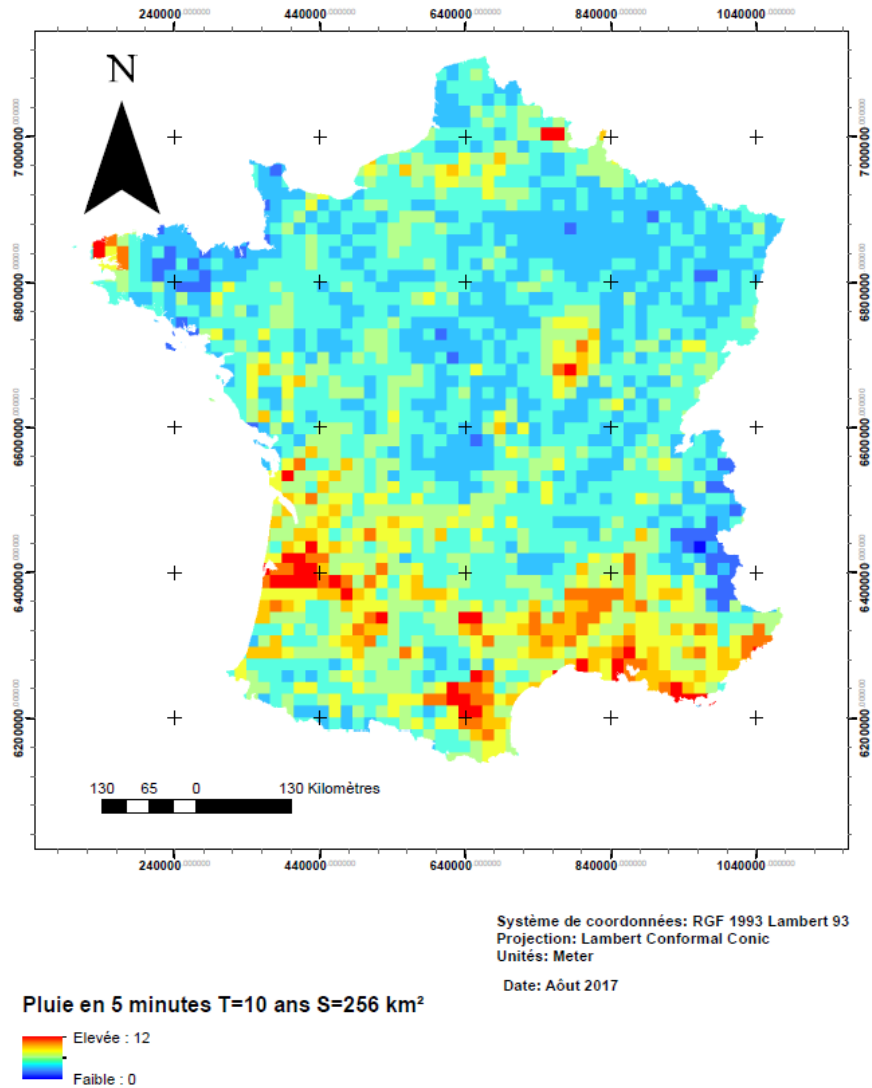


Figure 26. Répartition spatiale des quantiles sur des zones de 256 km²

Sur les quantiles des pluies régionalisés, nous observons une diminution de l'échelle avec des quantiles variant entre 0 et 12 mm de hauteur. Comparativement à la surface de 1 km², la tendance globale est la même avec moins de pluie pour la surface de 256 km². Nous observons par exemple de faibles quantités des pluies dans les départements de Jura, de Haut-Rhin et de Doubs qui montraient de fortes valeurs des pluies ponctuelles.

Pour la même surface, les cartes sont représentées aux annexes 10 et 11. Sur les pas de temps de 30 minutes et de 3 heures, nous observons de différences à proprement dites entre elles. Plus la durée augmente moins on a de précision sur des quantiles de base au pas de temps de 1 km². Les Cévennes et le Languedoc-Roussillon se dessinent clairement pour le pas de temps de 3 heures.

Dans l'ensemble de la France, les quantiles deviennent moins visibles lorsque la surface augmente. Les deux cas (augmentation de la durée, augmentation de la surface) correspondent à un même effet d'échelle affectant les pluies fortes.

Chapitre 4. Discussion et perspectives

Les résultats de notre étude reposent notamment sur la qualité des données utilisées en entrée. Nous montrerons tout d'abord les améliorations de cette qualité dans notre étude et nous proposerons des méthodes pour affiner le filtrage et/ou les résultats.

Ensuite, nous effectuerons une analyse critique de l'intérêt mais aussi des limites de la méthodologie afin de dégager des perspectives d'amélioration.

4.1. Qualité des données de base et validation des résultats

4.1.1. Qualité des données de base

Les données utilisées sont celles qui ont été collectées de 2006 à 2016 et qui ont servi à la réalisation des modèles de prévision en temps réel qui permettent d'alerter les réseaux hydrologiques français des risques de crues et d'inondations. Elles ont été utilisées sans ambiguïté au pas de temps horaire dans plusieurs études, par exemple pour la modélisation pluie-débit (Caseri, 2017 ; Emmanuel, 2011).

Afin de mieux appréhender le comportement du ruissellement intense pluvial, il a été proposé d'utiliser les données à leur pas de temps de base de 5 minutes. Cependant, un simple contrôle visuel a mis en lumière des phénomènes non-météorologiques captés par les radars.

Ceci nous a amené à développer différentes méthodes de pré-traitement des données de base. Ces méthodes nous ont permis de supprimer visiblement les phénomènes non météorologiques qui étaient présents dans le fichier initial.

4.1.2. Validation des résultats

Les résultats de notre étude ont été obtenus grâce aux analyses statistiques appropriées aux événements extrêmes. Cependant, pour son utilisation, nous proposons deux démarches pouvant permettre de les valider.

1. **Démarche de validation** : Elle consiste à rapprocher la cartographie des pluies fortes que nous avons réalisé à celle de la pluviométrie au sol au pas de 6 minutes pour la même période. C'est tenter de valider des mesures riches en terme de résolution à des valeurs fiables, quoique d'une densité beaucoup plus faible.

2. **Démarche de fusion des données** : Elle consiste à faire l'ajustement spatialisé sur toute la lame d'eau radar (tout le fichier de données) au pas de 5 minutes à partir des données des mesures pluviométriques au sol au pas de 6 minutes. Ce qui permettra de nettoyer tout le fichier à l'amont afin d'éviter les erreurs dues à l'ajustement horaire effectué par Météo-France. Notons qu'il s'agit de méthodes extrêmement lourdes qui restent toute fois réalisables.

4.2. Intérêts et limites de la méthodologie

4.2.1. Intérêts

Cette étude a permis de travailler sur des données conçues à l'origine pour faire des modèles de prévisions des crues et d'inondations afin de résoudre un problème hydrologique. Nous les avons exploitées à leur pas de temps de base que Météo-France n'utilise pas sous l'angle climatologique à notre connaissance. Pour réaliser les prévisions, elle se sert des images en temps réel.

Le filtrage par la méthode du seuil et par la méthode de géostatistique a permis de supprimer les artéfacts qui auraient pu conduire à des analyses statistiques erronées. Deux observations situées l'une près de l'autre spatialement devraient, en moyenne être plus semblables que deux observations éloignées. Cet argument de nature géostatistique nous a permis de filtrer nos données de manière réaliste.

La méthodologie de l'analyse de fréquence régionale basée sur la théorie des moments linéaires a été d'une grande importance pour mener à bien cette étude et atteindre notre objectif. Sans cette méthode, nous ne pourrions arriver à la régionalisation de nos données pour enfin, cartographier les quantiles de période de retour.

4.2.2. Limites

Compte tenu du mauvais rapport entre le temps imparti et le volume de travail à réaliser, il convient de signaler que notre méthodologie présente un certain nombre de limites.

D'une part, nous n'avons pas pu mettre en place les chemins de drainage permettant d'étudier les pluies fortes à l'échelle de bassins versants particuliers. Ce qui nous aurait permis au delà des pluies fortes par superficie arbitraire, de déterminer aussi les pluies des bassins versants concrets.

D'autre part, nous n'avons pas pu confronter nos données d'entrée à des données de la pluviométrie au sol (6 minutes), telles que celles collectées par la ville de Lyon et

disponibles à Irstea^{||}. Globalement, cela nous aurait permis de faire un jugement objectif sur nos données d'entrée avant sa validation complète.

4.3. Perspectives d'amélioration

Ce travail doit être considéré comme une première étape qui mériterait de nombreux approfondissements comme :

- rapprocher la cartographie des pluies fortes à celle de la méthode de l'Indicateur du Ruissellement Intense Pluvial (IRIP) afin de réaliser la cartographie du ruissellement intense conditionnée par la pluie.

La cartographie ainsi réalisée, permettrait de préciser de manière objective, les endroits du territoire français les plus exposés aux écoulements intenses.

- Inclure le chemin de drainage sur toute la France afin d'extraire les pluies des bassins. Cela permettrait au delà de la connaissance des pluies fortes en intensité- durée- fréquence comme déterminée par zone homogène, de rajouter la surface pour avoir les courbes d'IDAF^{**} propres à chaque bassin.

Ces courbes sont très utiles dans le sens où elles constitueront un moyen pertinent de connaissance des pluies fortes tombées relativement à une surface donnée et à une période de retour donnée.

De telles données constitueront le point de départ pour mieux se protéger contre les inondations, en déterminant l'impact qu'auraient les pluies fortes, selon qu'elles se trouveraient dans un bassin versant élémentaire ou un grand bassin versant. La superficie d'un bassin versant est un paramètre hydrologique incontournable puisque la quantité d'eau drainée est proportionnelle au bassin (taille, forme etc.).

- Étudier le phénomène d'épicentrage qui consiste à évaluer la relation entre la variabilité des phénomènes locaux, et leur occurrence au sein d'un territoire donné, ou le long d'une ligne donnée (par exemple sur une ligne de transport)
- Enfin, rajouter dans cette étude l'information sur la répartition des pluies fortes selon les saisons . Cela permettrait par exemple de mieux traduire les nuances entre les différents climats. C'est aussi important dans la mesure où la couverture du sol peut varier.

^{||}. Institut de recherche scientifique et technologique sur l'eau et l'agriculture Irstea

^{**}. Intensité-Durée-Aire-Fréquence

Conclusion

La pluie est l'un des paramètres physiques qui influe sur la genèse et la dynamique du ruissellement. En fonction des conditions locales, les inondations par ruissellement pluvial sont générées soit par des pluies intenses, soit par des cumuls importants. Une gestion préventive des espaces pour se protéger des aléas liés aux inondations par ruissellement pluvial, nécessite l'étude des pluies en intensité, durée, cumul, surface et fréquence .

L'objectif principal de cette étude était de faire une analyse exploratoire des lames d'eau radar pour l'étude des pluies fortes à l'échelle de la France métropolitaine. Cette analyse sera une contribution à la méthode d'indicateur du ruissellement intense pluvial créée en 2010 par Irstea et qui a permis de mettre en place la représentation cartographique des aléas liés aux inondations par ruissellement intense en France, mais qui est parfois controversée à cause de l'absence du paramètre déclencheur du ruissellement qu'est la pluie.

Tout d'abord, nous avons développé une interface d'analyse statistique permettant d'accéder, de visualiser et de traiter les données de lames d'eau radar. Cet outil permet également d'automatiser les analyses statistiques afin de les rendre accessibles aux utilisateurs intéressés en cliquant sur le bouton correspondant à la requête.

Ensuite, nous avons développé des méthodes de post-traitements des lames d'eau suite à la présence inattendue des artéfacts sur les images radar. Les différents critères mis en place ont permis de supprimer les aberrations visibles sur les images radar initiales.

Ensuite, nous avons effectué des analyses statistiques descriptives afin de caractériser les quantiles des pluies en tout point de la France métropolitaine et décrire par la suite les courbes d'intensité-durée-fréquence-surface.

Enfin nous avons terminé par la mise en forme de la cartographie des quantiles sous système d'information géographique afin d'en examiner la distribution géographique en France métropolitaine.

Les résultats de ce projet confirment la possibilité et l'intérêt de l'utilisation des données radar de résolution spatio-temporelle fine dans le cadre d'applications hydrologiques.

Ce travail est une étape initiale vers l'amélioration de la méthode du ruissellement intense pluvial afin de pallier une limite qui lui a été reprochée jusqu'à ce jour et une révolution de l'utilisation de données radar pour répondre aux études d'ordre hydro-climatologique.

Bibliographie

- Alila Y. **2000**. Regional rainfall depth-duration-frequency equations for Canada. *Water Resources Research*. Vol. 36. N^o 7. 1767-1778.
- Anctil F., Rousselle J., Lauzon N. **2005**. Hydrologie : Cheminement de l'eau. Presses internationales Polytechnique. ISBN 2553011512. 317 p.
- Andrieu H., Emmanuel I. **2013**. Le radar météorologique en hydrologie urbaine. *La Météorologie*. Vol 1. N^o 83. 28-34.
- Breil P., Lagadec L-R., Gonzalez-Sosa E. **2016**. Inondation pluviale et développement périurbain. *Novatech*. 1-6.
- Caseri A. **2017**. Apport de la simulation conditionnelle géostatistique pour la prévision immédiate d'ensemble de pluies et l'alerte aux crues rapides. Thèse de doctorat. Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech). Paris. 197 p.
- CEPRI. **2006**. Sensibiliser les populations exposées au risque d'inondation : Comprendre les mécanismes du changement de la perception et du comportement. Guide de sensibilisation. 60 p.
- CEPRI. **2014**. Gérer les inondations par ruissellement pluvial. Guide de sensibilisation. 92 p.
- Chiavarino A., Breil P. **2015**. Étude de la sensibilité de la France aux inondations par ruissellement. Rapport. 48 p.
- Chilès J-P. **2004**. La modélisation géostatistique de la variabilité spatiale et ses applications. Thèse de doctorat. Pierre et Marie Curie. Paris. 72 p.
- Dehotin J., Breil P. **2011a**. Cartographie de l'aléa ruissellement. Rapport. 76 p.
- Dehotin J., Breil P. **2011b**. Cartographie de l'aléa inondation par ruissellement. Rapport. 34 p.
- Dehotin J., Chazelle B., Laverne H., Hasnaoui A., Lambert L., Breil P., Braud I. **2015**. Mise en œuvre de la méthode de cartographie du ruissellement IRIP pour l'analyse des risques liés aux écoulements sur l'infrastructure ferroviaire. *La Houille Blanche*. Vol 1. N^o 6. 56-64.
- Delobbe L. **2006**. Estimation des précipitations à l'aide d'un radar météorologique. Rapport Institut Royal Météorologique de Belgique. Rapport. 48 p.
- Douguédroit A. **2008**. Précipitations extrêmes et « Crues Urbaines » à Marseille (France) de 1861 à 2007. *Bulletin de la Société géographique de Liège*. Vol 1. N^o 51. 105-114.

Deverly F. **1984**. Echantillonnage et Géostatistique. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. 163 p.

Emmanuel I. **2011**. Évaluation de l'apport de la mesure de pluie par radar météorologique pour la modélisation pluie-débit de petits bassins versants. Thèse de doctorat. Institut Français des Sciences Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. Nantes. 274 p.

Ghanmi H. **2014**. Estimation des courbes Intensité-Durée-Aire-Fréquence (IDAF) de la région de Tunis dans un contexte multifractal. Thèse de doctorat. Université de Versailles Saint-Quentin. Yvelines. 154 p.

Godart A. **2009**. Les précipitations orographiques organisées en bandes dans la région Cévennes-Vivarais. Caractérisation et contribution au régime pluviométrique. Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier – Grenoble 1. Grenoble. 337 p.

Gonzalez-Sosa E., Braud I., Dehotin J., Lassabatere L., Angulo-Jaramillo R., Lagouy M., Branger F., Jacqueminet C., Kermadi S., Michel K. **2010**. Impact of land use on the hydraulic properties of the topsoil in a small French catchment. *Hydrological Processes* . Vol. 24. N° 17. 2382-2399.

Horton R. **1933**. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *American Geophysical Union Transactions*. Vol 14. 446-460.

Hosking J-R-M. **1990**. L-moments : analysis and estimation of distribution using linear combination of order statistics. *Journal of Royal. Statistical Society. Series B*. Vol. 52. N° 1. 105–125.

Hosking J-R-M., Wallis J-R. **1993**. Some statistics useful in regional frequency analysis. *Water resources research* . Vol 29. N° 2. 271-281.

Hosking J-R-M., Wallis J-R. **1997**. Regional frequency analysis : An approach based on L-moments. Cambridge university press. ISBN 065216019400. 224 p.

Journel A-G., Huijbregts C-J. **1989**. Mining Geostatistics. Academic Press : Centre de Géostatistique Fontainebleau. France. ISBN 0123910501. 600p.

Krajewski W-F., Villarini G., Smith J-A. **2010**. Radar-Rainfall Uncertainties Where are We after Thirty Years of Effort? *American Meteorological Society*. 87-94.

Lagadec L-R., Patrice P., Braud I., Chazelle B., Moulin L., Dehotin J., Hauchard E., Breil P. **2016**. Description and evaluation of a surface runoff susceptibility mapping method. *Journal of Hydrology*. Vol. 1. N° 541. 495-509.

Lazri M. **2014**. Analyse des variations spatio-temporelles des précipitations par télédétection active et passive. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou. 125 p.

Ministère de l'Écologie, du Développement et de L'Aménagement Durables. **2006**. Les collectivités locales et le ruissellement pluvial : Risques naturels majeurs. Rapport. 82 p.

Nicolas M. **2010**. Étude expérimentale et numérique du ruissellement de surface : effets des variations d'intensité de la pluie. Application à une parcelle de vigne en Cévennes-Vivarais. Thèse de doctorat. Université de Grenoble. 230 p.

Onibon H., Ouarda T-B-M-J., Barbet M., St-Hilaire A., Bobee B., Bruneau P. **2004**. Analyse fréquentielle régionale des précipitations journalières maximales annuelles au Québec. *Journal des Sciences Hydrologiques*. Vol. 4. N^o 49. 717-735.

Parc Naturel Régional (PNR) des Caps et Marais d'Opale. **2003**. Guide technique de la lutte contre l'érosion des sols en Caps et Marais d'Opale. 44 p.

Poulard C., Breil P., Hauchard E., Dehotin J., Lagadec L.R., Patrice P. **2015**. Le ruissellement, comprendre pour diagnostiquer et agir. *Techni.Cités*. Vol 1. N^o 281. 21-28.

PPR. **2004**. Les risques d'inondation : Le ruissellement péri-urbain. Rapport. 64 p.

Rivoirard J. **2001**. Which Models for Collocated Cokriging? *Mathematical Geology*. Vol 33. N^o 2. 117-131.

Roux C. **1996**. Analyse des précipitations en hydrologie urbaine. Exemple de la Seine-Saint-Denis. Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Paris. 291 p.

Saint-Hilaire A., Ouarda T.B.M.J., Lachance M., Bobée B., Barbet M., Bruneau P. **2003**. La régionalisation des précipitations : une revue bibliographique des développements récents. *Revue des sciences de l'eau*. Vol 16. N^o 1. 27-54.

Saint-Martin C., Fourchier C., Javelle P., Douvinet., Vinet F. **2016**. Assessing the exposure to floods to estimate the risk of flood-related damage in French Mediterranean basins. E3S Web conferences 7 : 04013 DOI : 10.105/e3sconf/20160704013

Tabary P. **2007**. The new French radar rainfall product. Part I : Methodology. *Wea. Forecasting*. Vol 1. N^o 22. 393-408.

Tabary P., Augros C., Champeaux J-L., Chèze J-L., Faure D., Idziorek D., Lorandel R., Urban B., Vogt V. **2013**. Le réseau et les produits radars de Météo-France. *La Météorologie*. Vol 1. N^o 83. 15-27.

Wébographie

(1) Météo France. Comprendre : Tout savoir sur la météo, le climat et Météo-France. <http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/observer-le-temps/moyens/les-radars-meteorologiques>, consulté le 05/05/17.

(2) Pluies extrêmes en France métropolitaine. <http://pluiesextremes.meteo.fr/france-metropole/>, consulté le 06/08/17.

Bilan du stage

Ce stage a été pour moi une nouvelle expérience professionnelle de six mois. Il m'a permis de travailler sur une thématique qui me passionne et de percevoir comment l'Institut de recherche scientifique et technologique sur l'eau et l'agriculture (Irstea) aborde les problématiques hydrologiques.

Au-delà d'enrichir mes connaissances en hydrologie, statistique et informatique, ce stage m'a permis de comprendre dans quelle mesure le travail de recherche en hydrologie demande des compétences pluridisciplinaires.

A travers la mission qui m'a été confiée, j'ai pu apprendre le langage de programmation informatique Lazarus et le langage de description Latex respectivement pour l'analyse de données radar et pour la rédaction de mon rapport. J'ai pu également améliorer mes compétences en SIG^{††} et j'ai suivie plusieurs formations notamment, sur les bases de la géostatistique et de la simulation pluie-débit en hydrologie, sur le langage de programmation Lazarus et sur les calculs des maximaux des blocs lorsqu'il s'agit de déterminer les max-annuels par bloc.

En plus de celle-ci, j'ai pu participer à des réunions, des présentations des thèses et des séminaires au sein d'Irstea^{‡‡}.

Ce stage a été très enrichissant car il m'a permis de travailler avec différentes personnes et de contacter différentes structures comme SCHAPI^{‡‡}, Météo-France et son concurrent allemand CALAMAR^{**} pour des renseignements concernant les traitements des données radar PANTHERE[¶]. J'ai pu aussi rencontrer des prévisionnistes qui travaillent sur ces pluies.

En terme de difficultés, il est important de mentionner le fait que le volume des données à traiter (4 tera-octets) et les objectifs assignés étaient quasi-disproportionnés et très ambitieux pour un stage de 6 mois. De plus, j'ai eu des difficultés sur la prise en main sur la programmation informatique sous le langage Lazarus.

Il est à noter que ce travail a été réalisé avec des moyens de calcul informatique totalement sous-dimensionnés. Cette puissance de traitement est incontournable pour atteindre les objectifs et explorer les pistes envisagées. Nous proposons que ces moyens soient alloués par acquisition ou par des accords de coopération avec ceux qui en disposent.

††. Système d'Information Géographique

‡‡. Institut de recherche scientifique et technologique sur l'eau et l'agriculture Irstea

‡‡. Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations

** . CALibration LAMe d'eau à l'Aide d'un Radar

¶. Projet Aramis Nouvelles Technologies en Hydrométéorologie Extension et REnouvellement

TABLE DES ANNEXES

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Annexe 1 : Contenu détaillé des lames d'eau radar PANTHERE..... | I |
| Annexe 2 : Distributions statistiques utilisées en analyse régionale des précipitations | II |
| Annexe 3 : Valeurs maximales de pluies (mm) observées par région économique et département sur des pas de temps de 6 minutes..... | III |
| Annexe 4 : Répartition géographique des quantiles décennaux sur des zones de 1km ² en 30 minutes..... | VI |
| Annexe 5 : Répartition géographique des quantiles décennaux sur des zones de 1km ² en 3 heures..... | VII |
| Annexe 6 : Distribution statistique des pluies décennales sur des surfaces de 1km ² en 30 minutes..... | VIII |
| Annexe 7 : Distribution statistique des pluies décennales sur des surfaces de 1km ² en 3 heures..... | IX |
| Annexe 8 : Répartition spatiale des quantiles sur des zones de 256 km ² en 30 minutes..... | X |
| Annexe 9 : Répartition spatiale des quantiles sur des zones de 256 km ² en 3 heures..... | XI |

Annexe 1 : Contenu détaillé des lames d'eau radar PANTHERE (Tabary et al, 2013)

| Produit | Période | Résolution spatiale | Dimension(ligne x colonne) | Projection | Coin Nord Ouest |
|------------------------------|-----------|----------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------|
| Mosaïque de lame d'eau radar | 5 minutes | 1 km ² à la latitude de référence | 1536 x 1536 | Stéréographie polaire WGS84 | 53.670°N 9.965 °O au coin haut-gauche du pixel haut-gauche |

| Latitude de référence | Délais de production | Données entrantes | Unité | Type de précipitation | Format | Code de qualité |
|-----------------------|----------------------|-------------------|----------------|----------------------------------|---------|-----------------------------|
| 45 °N | 120 secondes | Radars métropole | Centième de mm | stratiforme, convective et mixte | Geotiff | 0(mauvais à 100(excellent)) |

Annexe 2 : Distributions statistiques utilisées en analyse régionale des précipitations (ST-Hilaire *et al.*, 2003)

| Distribution statistique | Fonction de densité de probabilité |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| General Extreme Value | $f(x) = \frac{1}{\alpha} [1 - \frac{k}{\alpha}(x-u)] \exp\{-[1 - k(\frac{x-u}{\alpha})]^{1/k}\}$ |
| Gamma | $f(x) = \frac{[s \alpha^s \lambda - 1] e^{-\alpha x}}{\Gamma(\lambda)}$ |
| Log-normal | $f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{[-\ln(x-u)]}{2\sigma^2}\right)$ |
| Pareto généralisée | $f(x) = \frac{1}{\alpha^*} (1 - \frac{k}{\alpha}x)^{1/k-1}, k \neq 0; f(x) = \frac{1}{\alpha^*} e^{-x/\alpha^*}, k$ |
| Log-normale (3 paramètres) | $f(x) = \frac{1}{(x-m)\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{[-\ln(x-m-u)]}{2\sigma^2}\right)$ |
| Pearson Type 3 | $f(x) = \frac{\alpha^\lambda (x-m)^{\lambda-1} e^{-[\alpha(\ln(x-m))]}{\Gamma(\lambda)}$ |
| Two component Extreme Value | $f(x) = [\frac{\Lambda_1}{\Theta_1} e^{\frac{-x}{\Theta_1}} + \frac{\Lambda_2}{\Theta_2} e^{\frac{-x}{\Theta_2}}] \{e^{-\Lambda_1 e^{-\frac{x}{\Theta_1}}} - \Lambda_2 e^{-\frac{x}{\Theta_2}}\}$ |
| Gumbel | $f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\{-\frac{x-u}{\alpha}\} e^{-\frac{x-u}{\alpha}}$ |
| Logistique généralisée | $f(x) = \frac{1}{b} e^{\frac{a-x}{b}} \{1 + e^{\frac{a-x}{b}}\}^{-2}, c = 0; f(x) = \frac{1}{b} [1 - c(\frac{x-a}{b})]^{-\frac{1-c}{c}} \{1 + [1 - c(\frac{x-a}{b})]\}^{\frac{1-c}{c}}, c \neq 0$ |

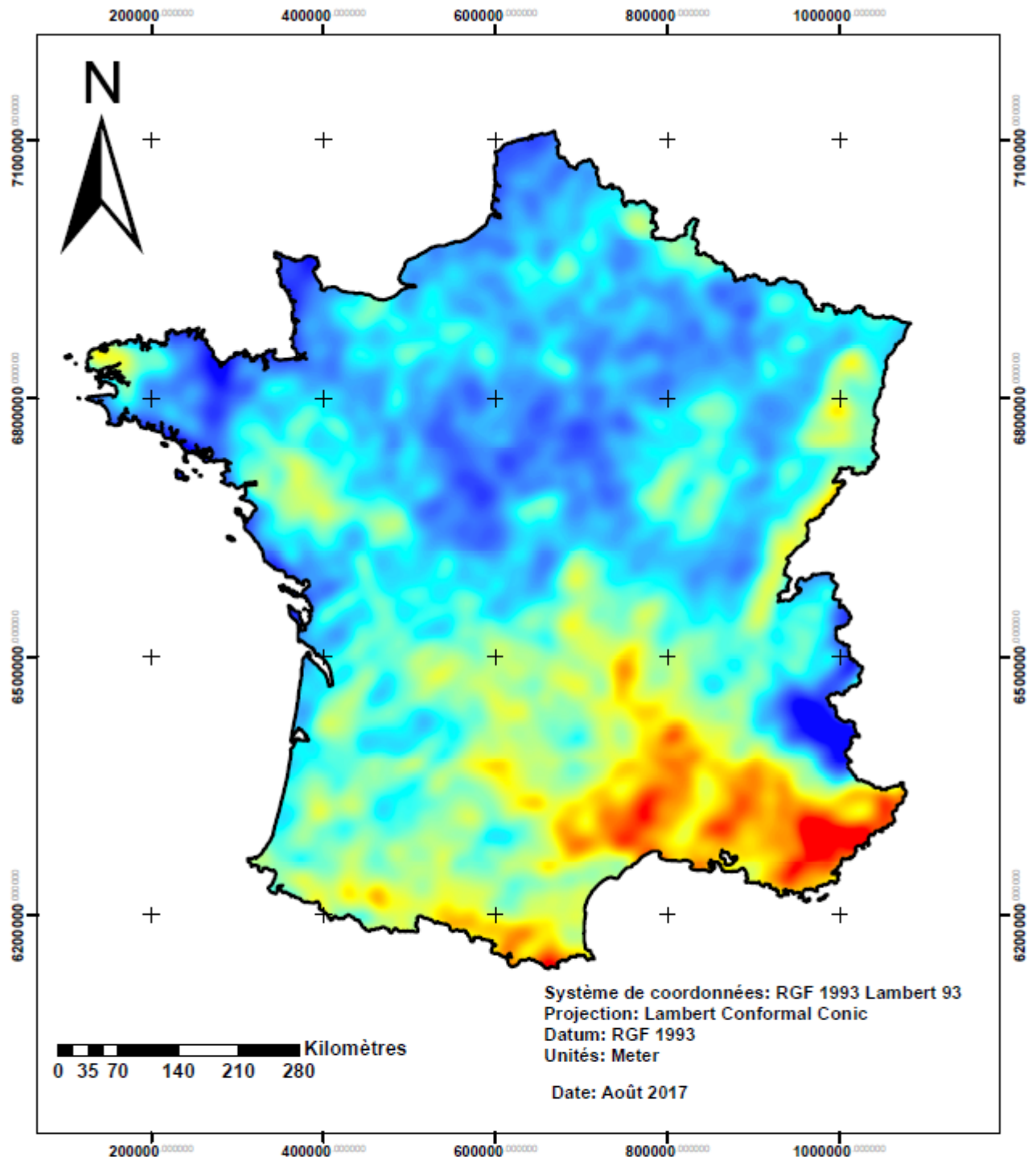
Annexe 3 : Valeurs maximales de pluies (mm) observées par région économique et département sur des pas de temps de 6 minutes (Pluies-extrêmes, 2017)

| Région | Département | Année | Valeurs maximales de pluies en 6 minutes (mm) |
|------------------------------------------|----------------------|------------|-----------------------------------------------|
| Alsace | Bas-Rhin | 31/07/1991 | 20 |
| | Haut-Rhin | 28/05/2003 | 18 |
| Aquitaine Aquitaine | Dordogne | 17/04/1990 | 20 |
| | Gironde | 20/08/2002 | 23 |
| | Landes | 27/12/1997 | 20 |
| | Lot-et-Garonne | 04/07/2006 | 22 |
| | Pyrénées-Atlantiques | 17/09/2007 | 23 |
| Auvergne Auvergne | Allier | 28/07/2008 | 18 |
| | Cantal | 03/07/2008 | 24 |
| | Haute-Loire | 22/08/2012 | 20 |
| | Puy-de-Dôme | 01/08/2009 | 20 |
| Basse Normandie Basse Normandie | Calvados | 16/06/1997 | 22 |
| | Manche | 01/05/2007 | 17 |
| | Orne | 28/08/1988 | 19 |
| Bourgogne Bourgogne | Côte-d'Or | 19/06/2013 | 21 |
| | Nièvre | 30/03/2007 | 26 |
| | Saône-et-Loire | 26/06/2009 | 19 |
| | Yonne | 19/07/2007 | 25 |
| Bretagne Bretagne | Côtes-d'Armor | 01/05/2011 | 20 |
| | Finistère | 12/10/2005 | 20 |
| | Ille-et-Vilaine | 24/10/1998 | 15 |
| | Morbihan | 11/06/2015 | 17 |
| Centre Centre | Cher | 18/07/1983 | 18 |
| | Eure-et-Loir | 05/05/2012 | 17 |
| | Indre | 07/08/2008 | 19 |
| | Indre-et-Loire | 27/07/2013 | 18 |
| | Loir-et-Cher | 27/05/2008 | 17 |
| | Loiret | 19/06/2013 | 18 |
| Champagne- Ardenne | Ardennes | 27/07/1993 | 25 |
| | Aube | 05/07/2012 | 16 |
| | Marne | 27/07/2012 | 16 |

| | | | |
|-----------------------------|------------------------------|-------------------|-----------|
| | Haute-Marne | 12/09/2000 | 19 |
| Corse | Corse-du-Sud | 21/07/2013 | 20 |
| | Haute-Corse | 03/05/2007 | 25 |
| Franche-Comté | Doubs | 07/08/2002 | 19 |
| | Jura | 28/07/2001 | 16 |
| | Haute-Saône | 03/07/2008 | 21 |
| | Territoire de Belfort | 06/06/1980 | 30 |
| Haute-Normandie | Eure | 15/09/1986 | 17 |
| | Seine-Maritime | 18/08/2011 | 21 |
| Île-de-France | Paris | 02/07/1995 | 18 |
| | Seine-et-Marne | 13/02/1996 | 16 |
| | Yvelines | 23/06/2005 | 18 |
| | Essonne | 10/08/1986 | 15 |
| | Hauts-de-Seine | 05/08/1997 | 14 |
| | Seine-Saint-Denis | 06/07/2006 | 9 |
| | Val-de-Marne | 06/07/2006 | 16 |
| | Val-d'Oise | 02/07/2000 | 20 |
| Languedoc-Roussillon | Aude | 13/08/2015 | 22 |
| | Gard | 28/07/2013 | 28 |
| | Hérault | 12/09/2015 | 25 |
| | Lozère | 09/10/2002 | 22 |
| | Pyrénées-Orientales | 03/11/2011 | 21 |
| Limousin | Corrèze | 12/07/2011 | 22 |
| | Creuse | 15/08/2001 | 18 |
| | Haute-Vienne | 02/10/2003 | 16 |
| Lorraine | Meurthe-et-Moselle | 22/07/2013 | 16 |
| | Meuse | 04/08/2014 | 14 |
| | Moselle | 08/08/2009 | 17 |
| | Vosges | 10/06/2010 | 13 |
| Midi-Pyrénées | Ariège | 04/08/1999 | 18 |
| | Aveyron | 02/11/2008 | 23 |
| | Haute-Garonne | 13/07/1995 | 17 |
| | Gers | 09/08/2001 | 20 |
| | Lot | 04/07/2006 | 20 |
| | Hautes-Pyrénées | 07/05/1999 | 20 |
| | Tarn | 31/08/2015 | 19 |
| | Tarn-et-Garonne | 10/06/2007 | 21 |
| Nord-Pas-de-Calais | Nord | 07/07/1991 | 22 |
| | Pas-de-Calais | 22/07/2004 | 14 |
| Pays de la Loire | Loire-Atlantique | 27/07/2013 | 20 |

| | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------|-----------|
| | Maine-et-Loire | 26/07/2013 | 19 |
| | Mayenne | 27/07/2013 | 15 |
| | Sarthe | 07/06/1997 | 16 |
| | Vendée | 31/05/2008 | 17 |
| Picardie | Aisne | 11/07/1984 | 22 |
| | Oise | 27/08/1977 | 16 |
| | Somme | 05/06/201 | 16 |
| Poitou-Charentes | Charente | 09/08/1992 | 25 |
| | Charente-Maritime | 15/07/2003 | 17 |
| | Deux-Sèvres | 15/02/1992 | 20 |
| | Vienne | 21/07/1998 | 20 |
| Provence-Alpes-Côte d'Azur | Alpes-de-Haute-Provence | 24/08/2015 | 20 |
| | Hautes-Alpes | 22/07/2013 | 16 |
| | Alpes-Maritimes | 03/10/2015 | 22 |
| | Bouches-du-Rhône | 20/05/2012 | 20 |
| | Var | 09/11/2014 | 25 |
| | Vaucluse | 22/09/1980 | 22 |
| Rhône-Alpes | Ain | 07/08/2013 | 17 |
| | Ardèche | 08/06/2009 | 23 |
| | Drôme | 20/09/1982 | 36 |
| | Isère | 02/08/2007 | 19 |
| | Loire | 10/06/2007 | 17 |
| | Rhône | 10/10/2013 | 21 |
| | Savoie | 24/08/2009 | 23 |
| | Haute-Savoie | 18/06/2003 | 19 |
| Andorre | Andorre | 28/09/2003 | 13 |

Annexe 4 : Répartition géographique des quantiles décennaux sur des zones de 1km² en 30 minutes

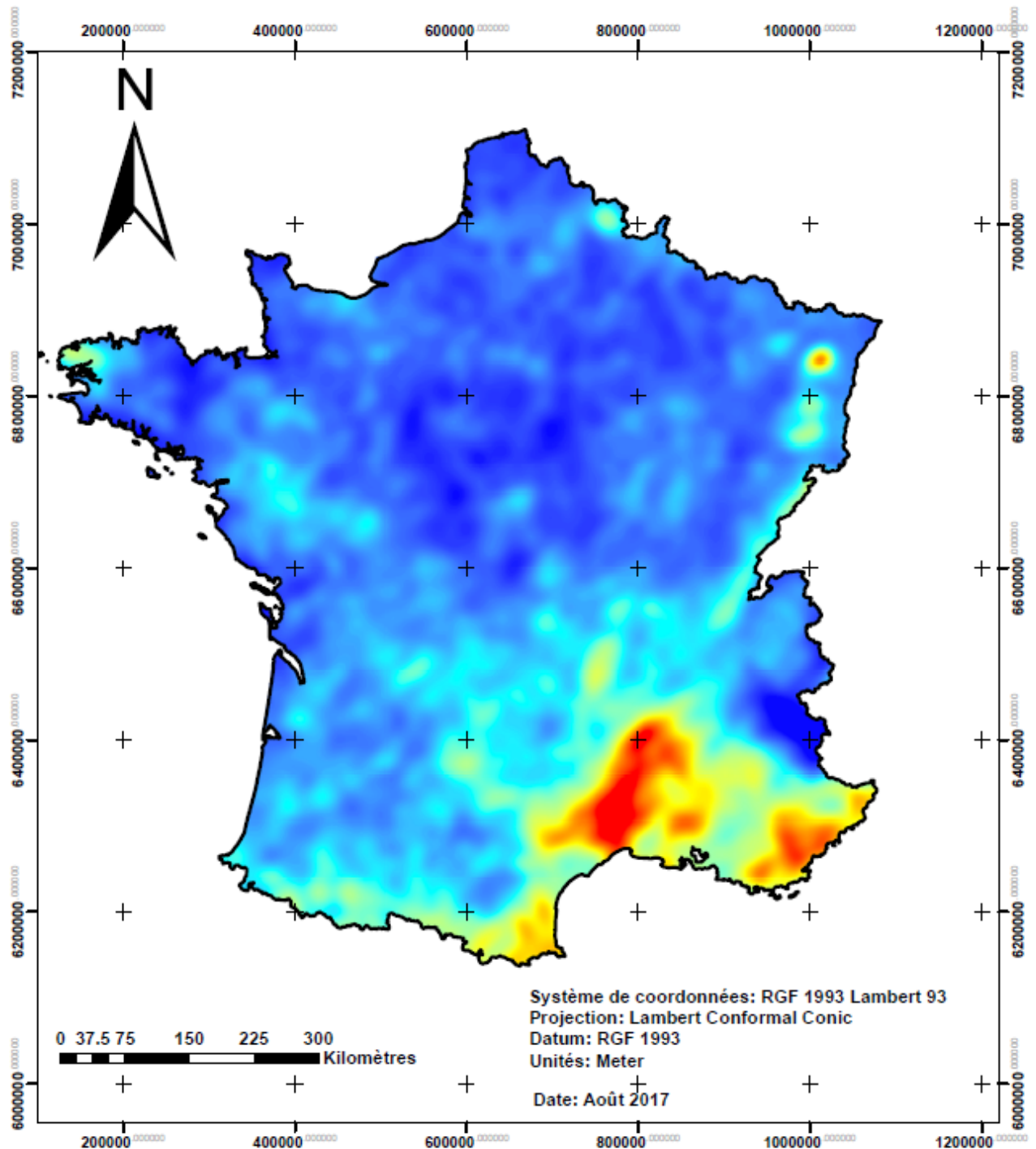


Cumul des pluies 30 minutes T=10 ans S=1 km²

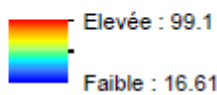


France métropolitaine

Annexe 5 : Répartition géographique des quantiles décennaux sur des zones de 1km² en 3 heures

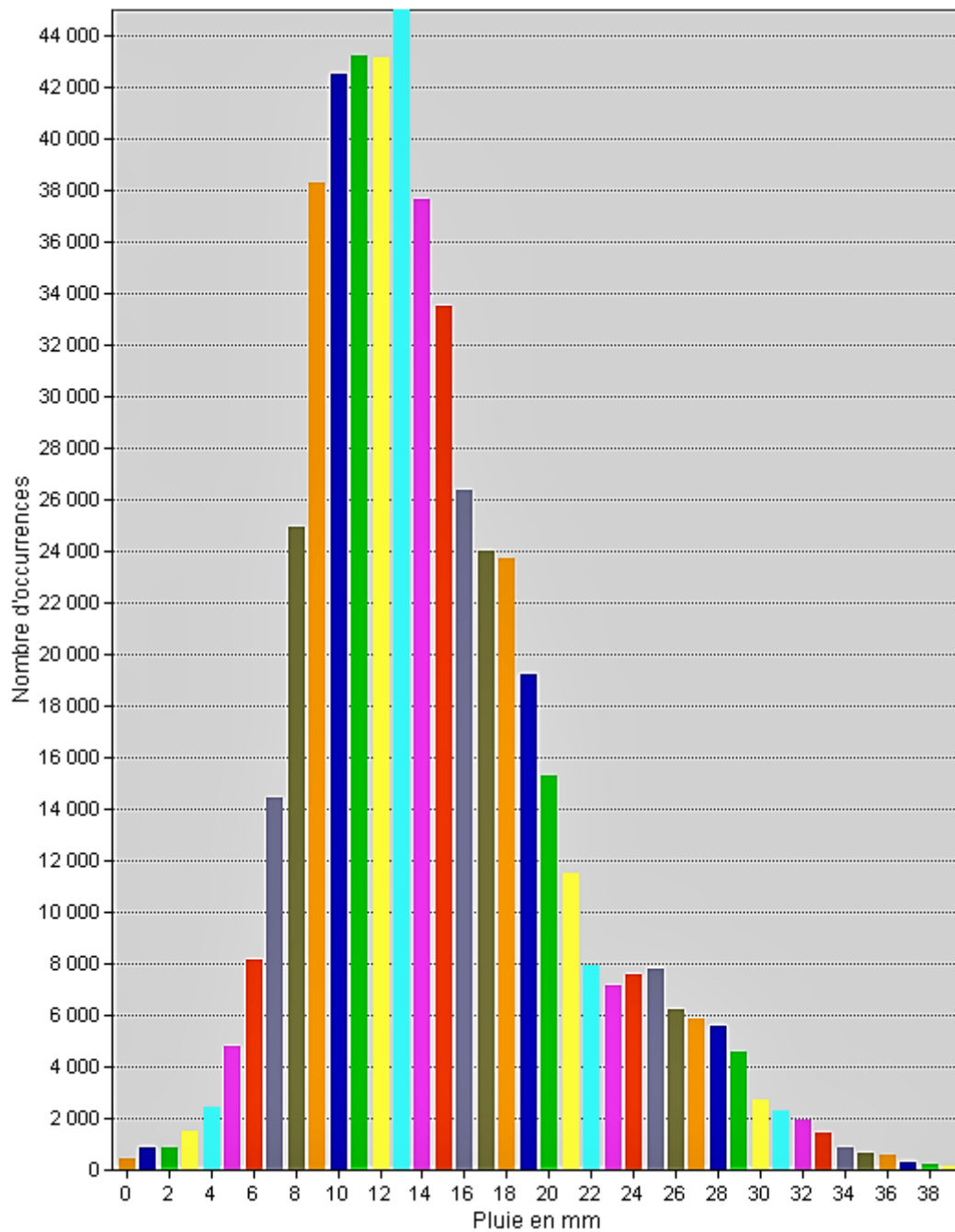


Cumul des pluies 3 heures T=10 ans S=1 km²

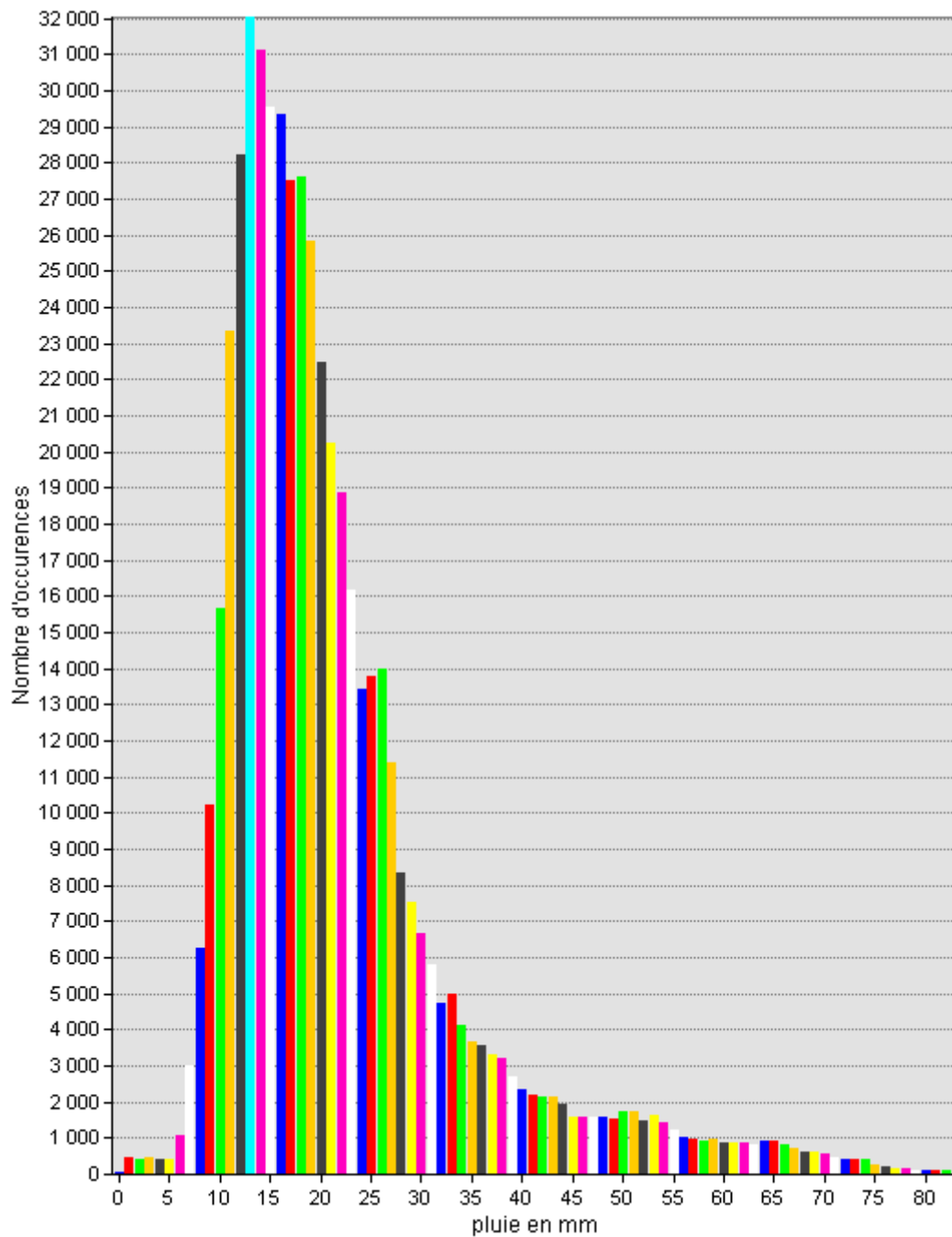


France métropolitaine

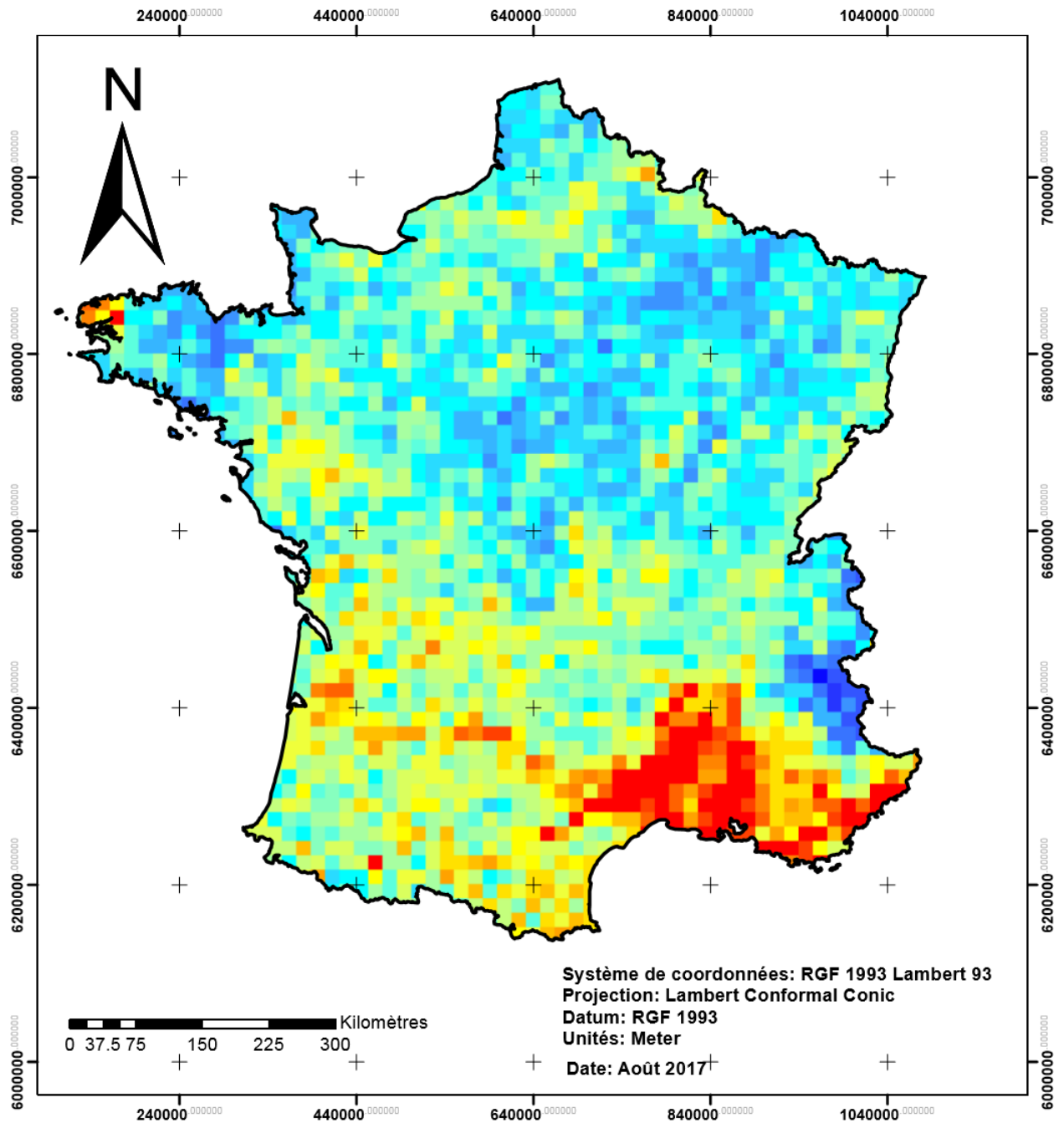
Annexe 6 : Distribution statistique des pluies décennales sur des surfaces de 1km² en 30 minutes



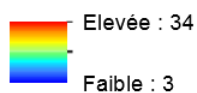
Annexe 7 : Distribution statistique des pluies décennales sur des surfaces de 1km² et 3 heures



Annexe 8 : Répartition spatiale des quantiles sur des zones de 256 km² en 30 minutes

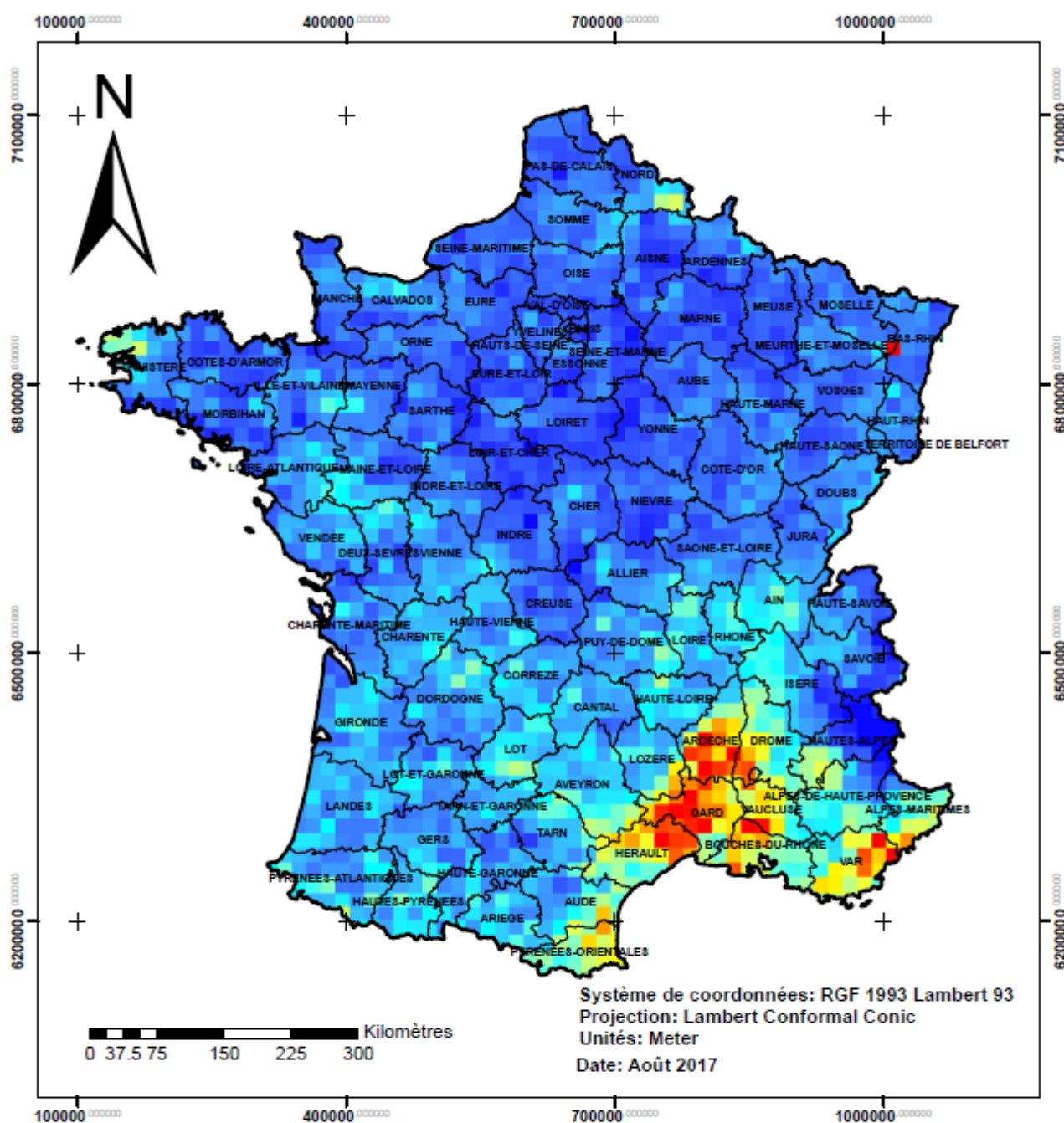


Pluie en 30 minutes T=10 ans S= 256 km²

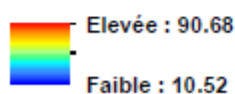


France métropolitaine

Annexe 9 : Répartition spatiale des quantiles sur des zones de 256 km² en 3 heures



Cumul des pluies 3 heures T=10 ans S=256



Départements

Résumé

A côté des formes du relief et des caractéristiques du sol, la survenue des pluies fortes est un facteur dominant la genèse et la dynamique du ruissellement ; l'appréciation quantifiée de ces pluies est donc indispensable à l'appréhension du phénomène de ruissellement, en vue de la mise en place d'une gestion préventive des espaces.

L'objectif de la présente étude est d'explorer une source de données récente, l'archive des lames d'eau radar PANTHERE[¶], dans une perspective d'analyse systématique à finalité hydrologique et à l'échelle de la France métropolitaine.

Plusieurs étapes ont été nécessaires. La première a consisté à développer une interface permettant la mise sous forme exploitable de ces données volumineuses, et facilitant leur exploration. La deuxième a été la mise en place d'un filtrage permettant d'écarter les valeurs manifestement erronées subsistant dans l'archive. Enfin, les méthodes classiques de descriptions des pluies fortes ont été déployées, permettant de caractériser leur distribution en tout point de la France métropolitaine, de 5 minutes à 36 heures et de 1 à 256 km². Les fluctuations statistiques très apparentes à courte distance, mais que l'on peut considérer comme attribuables au hasard des événements survenus dans la mesure où la durée de suivi n'est que de dix années, ont été lissées par une application innovante de la méthode de régionalisation de Hosking et Wallis, moyennant le choix d'un rayon de lissage qui reste subjectif.

Les premiers résultats indiquent une distribution géographique des pluies fortes conforme pour l'essentiel avec ce qui est connu, et ceci confirme la faisabilité d'une exploitation d'une telle archive de lames d'eau radar pour l'hydrologie probabiliste. Il conviendra désormais de croiser ces résultats avec les résultats plus usuels (sur pluviographes) afin de les conforter.

Mots clés : pluies fortes, radar météorologique, ruissellement, régionalisation, hydrologie.

Abstract

Landforms, soil properties and heavy rainfall are dominant factors to surface runoff formation in general. So a systematic appreciation of rainfall hazard is expected as a companion to a runoff hazard screening methodology. The long term motivation is that occurred rainfall events must be compared with the local climatology to correctly assess recorded runoff events.

This study investigates the 10 years dataset of PANTHERE radar-based estimation of rainfall (1km² x 5 min over France) towards a systematic analysis of rainfall hazard.

Several steps were undertaken. 1) a in-deep reformatting of the dataset, to make further investigation possible 2) a filtering of erroneous data 3) a systematic fitting of over-threshold samples to general Pareto distribution for a set of duration from 5 min to 36 hours and averaging from 1 km² pixel up to 256 km² basin-like areas . 4) an innovative low-pass filtering of L-moments was considered, based on the Hosking-Wallis methodology for regional assessment of hydro-meteorological hazard. This last step was found effective to attenuate the extreme raw local variability, that was assumed spurious given the erratic occurrence of historical events over the modest 10-year record-length.

Preliminary results demonstrate a geographic distribution of rainfall hazard that is consistent with the expected. Hence, such radar archives indeed can be the basis for hydro-climatological studies targeting hydrology. Some cross-checks are needed to confort this statement (with ground estimates). Novel explorations will then be an option.

Keywords : Heavy rainfall hazard, weather radar, surface runoff, hydrology.

¶. Projet Aramis Nouvelles Technologies en Hydrométéorologie Extension et REnouvellement