



Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique

Université d'Oran 2

Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers

Département de Géographie et d'Aménagement du Territoire

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en géographie et aménagement du territoire

Option : Hydrologie, Climatologie et territoire

Thème :

**Le comportement saisonnier des extrêmes pluviométriques
(Application sur l'Ouest Algérien)**

Présenté Par : BELGHOUL MERIEM

Encadrante :

Mme AIT MENGUELLAT.Z

Co-Encadrante :

Mme ABANE.F (I.H.F.R)

Devant le jury :

Présidente : Mme GOURINE Farida MAA Univ ORAN 2

Examinatrice : Mme SENHADJI Hafida MCA Univ ORAN 2

Année Universitaire : 2020 - 2021

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier **ALLAH** le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour mener à terme mon Master et pourvoir réaliser ce modeste travail.

Ce mémoire n'aurait sûrement pas été possible sans l'intervention de personnes qui, tant par leurs compétences scientifiques que par leur soutien moral, ont m'apporter une aide précieuse pour mener à bien cette étude.

- ✚ Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à **Mme Z. AIT MENGUELLAT**. Je la remercie de m'avoir encadrée, orientée, conseillée et surtout de m'avoir laissée une grande liberté de manœuvre lors de mes travaux, son sens élevé du devoir, le fait d'être toujours montrée à l'écoute ainsi que sa rigueur scientifique impose l'estime et le respect.
- ✚ Je voudrais adresser toute ma gratitude à mon co-encadrante **Mme ABANE .F** pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils. J'ai beaucoup appris en travaillant avec vous, tant au niveau de la modélisation météorologique qu'au niveau des statistiques des valeurs extrêmes. Merci pour votre soutien et votre attention au moral de votre étudiante.
- ✚ Je tiens à remercier les membres du jury, d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ce travail, et pour leur lecture attentive.
- ✚ Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à **Mr ABANE HAKIM**, toujours là pour aider, généreusement et dans la bonne humeur. j'ai eu l'honneur et la chance de bénéficier de ses connaissances, compétences et de ses précieux conseils. UN très grand Merci aussi à **Mr HOUARIMAHMOUD** venu enrichir notre équipe.
- ✚ Je tiens aussi à remercier fortement **Mr TAREK MOUSSAI** pour toute laide qu'il m'a apportée, je le remercie pour ses conseils, ses orientations et sa disponibilité malgré ses multiples occupations.
- ✚ Un grand merci à **Mr HOUSSAM AHMED ABDELMALEK** pour son aide toujours à disposition pour répondre aux questions de manière très cordiale.
- ✚ Je désire aussi remercier les professeurs et toute l'équipe pédagogique de l'université.

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail en signe de respect, reconnaissance et de remerciement :

✚ A *mes chers parents*, qui m'ont accompagné par leur soutien et leur affection au long de mes études pour leur patience, encouragement, qui m'ont permis de surmonter les obstacles dans les situations les plus difficiles.

Incha'Allah, vous accorder santé, le bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

✚ A la mémoire de mon *oncle Dadouche Ismail*, Aucune dédicace ne saurait exprimer, mon estime, et ma gratitude pour tous tes conseils et encouragements.

Allah yarahmak incha Allah

✚ A *ma sœur Fatiha*, mes neveux adorés *Youcef, Abdel illah, Yasser Abdelmoumen*

je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde inchaAllah.

✚ A Mon amie *Djedaini Amina*, qui ma apporté le soutien moral et intellectuel tout au long ma démarche, que dieu vous guide vers la réussite et le bonheur incha Allah.

✚ A mes amies *Amel et Malek*, Puisse Dieu vous donne santé, bonheur et surtout réussite .

✚ A toute la promo « Master 2 HCT », et spécialement le group des ingénieurs Météo.

Résumé

Différentes approches de la théorie des valeurs extrêmes ont été mises en œuvre pour analyser les pluies extrêmes, à partir de séries pluviométriques mises à notre disposition.

Le point de vue adopté dans l'étude est local : les pluies sont analysées en un site donné, et nous laissons les points de vue régional et spatial en perspectives.

Ce travail s'attache à améliorer nos connaissances sur le régime des pluies extrêmes sur l'ouest du pays sous-documenté à l'heure actuelle dans les sciences du climat et de l'hydrologie opérationnelle.

Le travail s'articule autour de deux objectifs : (i) fournir une introduction à une vision régionale intégrée de l'organisation spatiale des extrêmes, (ii) caractériser les extrêmes pluviométriques en produisant des cartes climatologiques des extrêmes.

Dans une première partie, nous rappelons différents aspects de la théorie probabiliste des valeurs extrêmes et nous présentons des méthodes statistiques d'estimation des quantiles de modèles probabilistes appliqués en littérature.

Dans nos analyses, les valeurs extrêmes de pluies ont été étudiées via une extraction des maxima saisonniers, ou via les dépassements de seuil.

Les maxima saisonniers sont souvent modélisés par une loi Gumbel. Cependant, la littérature montre depuis peu un certain scepticisme vis-à-vis de la modélisation des maxima saisonniers par une loi Gumbel. Il ne paraît en effet pas justifié d'utiliser la loi Gumbel, au lieu d'une loi GEV, plus générale.

Notre approche multi-variée a montré que les distributions des extrêmes sont mieux modélisées par une distribution GEV à queue lourde ; bornée inférieurement et de paramètre de forme non nul, que par la loi Gumbel.

En revanche, le comportement temporel des valeurs de pluies successives a été ignoré. D'un point de vue mathématique, nous avons utilisé la théorie des valeurs extrêmes de séries stationnaires pour la variable étudiée.

La loi des valeurs extrêmes se montre fortement sensible à l'échantillonnage, essentiellement du fait de son paramètre de forme, et les intervalles de crédibilité obtenus peuvent être très larges, voire irréalistes pour des mesures de pluie.

Table des figures

Figure 1 : la Carte de La situation géographique de la zone d'étude (L'ouest algérien).....	5
Figure 2 : carte de positionnement des stations de la zone d'étude	6
Figure 3 : La carte géologique de la zone d'étude.....	8
Figure 4 : Présentation du relief de la région d'étude (Anonyme 4 s, d).....	9
Figure 5 : la carte d'altitude de la zone d'étude	10
Figure 6 : la carte du bassin versant de la zone d'étude.....	11
Figure 7 : la carte hydrographique de la zone d'étude	12
Figure 8 : la care hydrographique de la zone d'étude.....	13
Figure 9 : Classification Köppen-Geiger des climats européens (Peel et al, 2007).....	15
Figure 10 : Topographie et bathymétrie du bassin méditerranéen, modèle numérique de terrain, NASA ETOPO1 d'après Amante et Eakins (2009). Image produite par P.Grothe	16
Figure 11 : Échantillonnage selon l'approche BMA : la valeur maximale à l'intérieur de chaque bloc de n valeurs est retenue	21
Figure 12 : Echantillonnage selon l'approche POT: toutes les valeurs dépassant 7 sont retenues.	22
Figure 13 : Influence des paramètres μ (en haut), σ (au milieu), ξ (en bas) sur la distribution GEV. de gauche à droite : densité de probabilité(PDF), fonction de répartition(CDF) et graphique de niveaux de retour (RLP).....	24
Figure 14 : Positions des stations météorologiques du jeu de données avec un code couleur indiquant l'altitude par stations.....	32
Figure 15 : Répartition des percentiles et de leur probabilité d'occurrence (Sillman, 2005) ..	38
Figure 16 : représentation de trois nuages de points différents.....	41
Figure 17 : Séries des maximums saisonniers pour la saison d'hiver pour quelques stations étudiées.....	48
Figure 18 : Tracé du diagnostic d'ajustement de précipitations extrêmes à Elkheiter au cours de la saison d'hiver, à une distribution GEV pour la MLE. Du haut à gauche, en bas à droite il s'agit de lacourbe des quantiles (QQ-plot), des quantiles (QQ2-plot), de densité et des niveaux de retour.	49

Figure 19 :Tracé du diagnostic d’ajustement de précipitations extrêmes à Mostaghanem au cours de la saison d’hiver, à une distribution GEV pour la MLE. Du haut à gauche, en bas à droite il s’agit de la courbe des quantiles (QQ-plot), des quantiles (QQ2-plot), de densité et des niveaux de retour ..	49
Figure 20 : Tracé du diagnostic d’ajustement de précipitations extrêmes à Benisaf au cours de la saison d’automne, à une distribution GEV par les L-moments. Du haut à gauche, en bas à droite il s’agit de la courbe des quantiles (QQ-plot), des quantiles (QQ2-plot) de densité et des niveaux de retour.....	50
Figure 21 : Tracé du diagnostic d’ajustement de précipitations extrêmes à Elbayadh au cours de la saison d’automne, à une distribution GEV par les L-moments. Du haut à gauche, en bas à droite il s’agit de la courbe des quantiles (QQ-plot), des quantiles (QQ2-plot), de densité et des niveaux de retour.....	50
Figure 22 : La densité de la distribution de la loi GEV. Les courbes en trait discontinu (grands pointillés), trait continu et trait (petits pointillés) en rouge correspondent respectivement aux densités de la loi des valeurs extrêmes d’indices $\kappa = -0.5$, $\kappa = 0$ et $\kappa = 0.5$	52
Figure 23 : Représentation spatiale des trois paramètres de la loi GEV ajustée sur les maxima hivernaux de précipitations journalières en procédant station par station et à base de la MLE.....	53
Figure 24 : Représentation spatiale des trois paramètres de la loi GEV ajustée sur les maxima printaniers de précipitations journalières en procédant station par station et à base de la MLE....	53
Figure 25 : Représentation spatiale des trois paramètres de la loi GEV ajustée sur les maxima estivaux de précipitations journalières en procédant station par station et à base de la MLE.....	53
Figure 26 : Représentation spatiale des trois paramètres de la loi GEV ajustée sur les maxima automnaux de précipitations journalières en procédant station par station et à base de la MLE.....	54
Figure 27 : Représentation spatiale des trois paramètres de la loi GEV ajustée sur les maxima hivernaux de précipitations journalières en procédant station par station et à base des L-moments.....	65
Figure 28 : Représentation spatiale des trois paramètres de la loi GEV ajustée sur les maxima printanières de précipitations journalières en procédant station par station et à base des L-moments.....	66
Figure 29 : Représentation spatiale des trois paramètres de la loi GEV ajustée sur les maxima estivaux de précipitations journalières en procédant station par station et à base des L-moments.....	66
Figure 30 : Représentation spatiale des trois paramètres de la loi GEV ajustée sur les maxima automnaux de précipitations journalières en procédant station par station et à base des L-moments.....	66
Figure 31 : Valeurs de retour de 30 ans (en haut a MLE et b L-moments) et moyennes (en milieu	
c) et l’écart entre les extrêmes de durée de retour 30 ans et la moyenne hivernale (en bas d et e) de précipitation journalière pour la période 1982-2019. Unité mm/jour.....	69
Figure 32 : Valeurs de retour de 30 ans (en haut a MLE et b L-moments) et moyennes (en milieu)et	

l'écart à la moyenne printanières (en bas d et e) de précipitation journalière pour la période 1982-2019. Unité mm/jour.....	70
Figure 33 : Valeurs de retour de 30 ans (en haut a MLE et b L-moments) et moyennes (en milieu)et l'écart à la moyenne automnales(en bas d et e) de précipitation journalière pour la période 1982-2019. Unité mm/jour.....	72
Figure 34 : Valeurs de retour de 30 ans (en haut a MLE et b L-moments) et moyennes (en milieu)et l'écart à la moyenne estivale(en bas d et e) de précipitation journalière pour la période 1982-2019. Unité mm/jour.....	73
Figure 35 : les résultats de la régression linéaire entre les extrêmes pluviométriques de durée de retour de 30 ans et la normale de chaque saison pour l'ensemble des stations de l'Ouest du pays...	75
Figure 36 : Parcours de la vie résiduelle moyenne empirique de la série de données du fichier hivernal pour les stations : (a) Ghazaouet, (b) Benisaf, (c) Mostaganem en utilisant la MLE....	77
Figure 37 : Parcours de la vie résiduelle moyenne empirique de la série de données du fichier hivernal pour les stations : (a)Ghazaouet, (b) Benisaf, (c) Mostaganem en utilisant les L-moment.....	78
Figure 38 : Parcours de la vie résiduelle moyenne empirique de la série de données du fichier printanière pour les stations : (a)Mascara, (b) Saida, (c) Tiaret en utilisant laMLE.....	78
Figure39 : Parcours de la vie résiduelle moyenne empirique de la série de données du fichier printanière pour les stations : (a)Mascara, (b) Saida, (c) Tiaret en utilisant les L-moment.....	78
Figure 40 : Parcours de la vie résiduelle moyenne empirique de la série de données du fichier estival pour les stations : (a)Ainsefra, (b) Elbayadh, (c) Mechria en utilisant la MLE	79
Figure 41 : Parcours de la vie résiduelle moyenne empirique de la série de données du fichierestival pour les stations : (a)Ainsefra, (b) Elbayadh, (c) Mechria en utilisant les L-moment.....	79
Figure 42 : Parcours de la vie résiduelle moyenne empirique de la série de données du fichier automnal pour les stations : (a)Tlemcen, (b)Oran, (c) Sidi-Bel-Abbès en utilisant laMLE	79
Figure 43 : Parcours de la vie résiduelle moyenne empirique de la série de données du fichier automnal pour les stations : (a)Tlemcen, (b)Oran, (c) Sidi-Bel-Abbès en utilisant lesL-moment.....	80
Figure 44 : Parcours de la vie résiduelle moyenne empirique de la série de données du fichier automnal pour les stations : (a)Tlemcen, (b) Oran, (c) Sidi-Bel-Abbès en utilisant les L-moment.....	80
Figure 45 : Tracé du diagnostic d'ajustement de précipitations extrêmes à Elkheiter au cours de la saison d'hiver, à une distribution GPD pour la MLE. Du haut à gauche, en bas à droite il s'agit de la courbe des quantiles (QQ-plot), des quantiles (QQ2-plot), de densité et des niveaux de retour	84
Figure 46 : Tracé du diagnostic d'ajustement de précipitations extrêmes à Elkheiter au cours de la saison du printemps, à une distribution GPD pour la L-moment. Du haut à gauche, en bas à droite il	

s'agit de la courbe des quantiles (QQ-plot), des quantiles (QQ2-plot), de densité et des niveaux de retour.....	85
Figure 47 : Représentation spatiale des deux paramètres de la loi GP (a et c : échelle ; b et d :forme) ajustée par la MLE (en haut) et L-moments (en bas) sur précipitations journalières dépassant un seuil de la saison d'hiver.....	90
Figure 48 : Représentation spatiale des deux paramètres de la loi GP (a et c : échelle ; b et d :forme) ajustée par la MLE(en haut) et L-moments (en bas) sur précipitations journalières dépassant un seuil de la saison de printemps.....	91
Figure 49 : Représentation spatiale des deux paramètres de la loi GP (a et c : échelle ; b et d :forme) ajustée par la MLE(en haut) et L-moments (en bas) sur précipitations journalières dépassant un seuil de la saison estivale.....	92
Figure 50 : Représentation spatiale des deux paramètres de la loi GP (a et c : échelle ; b et d :forme) ajustée par la MLE(en haut) et L-moments (en bas) sur précipitations journalières dépassant un seuil de la saison d'automne.....	93
Figure 51 : Valeurs de retour de 30 ans (en haut a MLE et b L-moments) et moyennes (en milieu c) et l'écart entre les extrêmes de durée de retour 30 ans et la moyenne hivernale (en bas d et e) de précipitation journalière pour la période 1982-2019. Unité mm/jour.....	94
Figure 52 : Valeurs de retour de 30 ans (en haut « a » MLE et « b » L-moments) et moyennes printanières (en milieu c) et l'écart entre les extrêmes de durée de retour 30 ans et la moyenne printanière (en bas d et e) de précipitation journalière pour la période 1982-2019. Unité mm/jour.....	96
Figure 53 : Valeurs de retour de 30 ans (en haut « a » MLE et « b » L-moments) et moyennes estivales (en milieu c) et l'écart entre les extrêmes de durée de retour 30 ans et la moyenne estivale(en bas d et e) de précipitation journalière pour la période 1982-2019. Unité mm/jour..	97
Figure 54 : Valeurs de retour de 30 ans (en haut a MLE et b L-moments) et moyennes automnales (en milieu c) et l'écart entre les extrêmes de durée de retour 30 ans et la moyenne automnale (en bas d et e) de précipitation journalière pour la période 1982-2019. Unité mm/jour.....	99
Figure 55 : Relation entre les valeurs moyennes et les valeurs de retour de 30 ans de Précipitation journalière pour la saison hivernal.....	100
Figure 56 :Relation entre les valeurs moyennes et les valeurs de retour de 30 ans de Précipitation journalière pour la saison de printemps.....	101
Figure 57 : Relation entre les valeurs moyennes et les valeurs de retour de 30 ans de Précipitation journalière pour la saison estivale.....	101
Figure 58 : Relation entre les valeurs moyennes et les valeurs de retour de 30 ans de Précipitation journalière pour la saison automnale.....	102

Liste des tableaux

<u>Tableau N°1</u> : Coordonnées géographiques des stations étudiées	32
<u>Tableau N°2</u> : les caractéristiques climatologiques annuelles	34
<u>Tableau N°3</u> : les caractéristiques climatologiques saisonnières.....	35
<u>Tableau N°4</u> : Résultats du test de Mann-Kendall avec un risque $\alpha=0.05$	44
<u>Tableau N°5</u> : Les estimations des paramètres de localisation, échelle et forme par la méthode de maximum de vraisemblances	51
<u>Tableau N°6</u> : Quantiles ayant une durée de retour de 10 ans issus de l'estimation des pluies journalières en utilisant la MLE.....	55
<u>Tableau N°7</u> : Quantiles ayant une durée de retour de 20 ans issus de l'estimation des pluies journalières en utilisant laMLE.....	56
<u>Tableau N°8</u> : Quantiles ayant une durée de retour de 30 ans issus de l'estimation des pluies journalières en utilisant laMLE.....	57
<u>Tableau N°9</u> : Quantiles ayant une durée de retour de 50 ans issus de l'estimation des pluies journalières en utilisant laMLE.....	58
<u>Tableau N°10</u> : Estimation du paramètre de forme par la méthode des L-moments.....	60
<u>Tableau N°11</u> : Quantiles ayant une durée de retour de 10 ans issus de l'estimation des pluies journalières en utilisant les L-moment	61
<u>Tableau N°12</u> : Quantiles ayant une durée de retour de 20 ans issus de l'estimation des pluies journalières en utilisant les L-moment.....	62
<u>Tableau N°13</u> : Quantiles ayant une durée de retour de 30 ans issus de l'estimation des pluies journalières en utilisant lesL-moment	63
<u>Tableau N°14</u> : Quantiles ayant une durée de retour de 50 ans issus de l'estimation des pluies journalières en utilisant les L-moment.....	64
<u>Tableau N°15</u> : les percentiles calculés à base des journées pluvieuses ($RR \geq 1\text{mm}$).....	81
<u>Tableau N°16</u> : Seuil d'estimation noté SR et nombre de dépassements des pluies journalières extrêmes noté NER de 15 stations pluviométriques de l'Ouest du pays.....	82

Tableau N°17 : La distribution des estimations traitées à la base de la MLE du paramètre de forme ξ de la loi de PARETO généralisée (GPD).....86

Tableau N°18 : La distribution des estimations traitées à la base des les L-moments du paramètre de forme ξ de la loi de PARETO généralisée (GPD).....87

Tableau N°19 : Quantiles de diverses périodes de retour issus de l'estimation des pluies journalières supérieures à un seuil en utilisant la MLE relatif à la saison d'automne 88

Tableau N°20 : Quantiles de diverses périodes de retour issus de l'estimation des pluies journalières supérieures à un seuil en utilisant les L-moment relatif à la saison d'automne 89

Liste des acronymes

+ **EVT** : Extreme Value Theory en anglais et La Théorie des Valeurs Extrêmes en français

+ **BMA** : Block Maxima Analysis

+ **POT** : Peak Over Threshold

+ **GEV**: Generalized Extreme Value

+ **GPD**: Generalized Pareto Distribution

+ **RLP**: Return Level Plot

+ **QVS** : Quantile Verification Score

+ **ECMWF** : l'Européen Center for Medium Weather Forecast

+ **Définitions des jours Pluvieux/Secs et périodes**

Pluvieuses/Sèches :

Elles définissent le cumul en millimètres (non inclusive) au-dessus duquel un jour est considérée comme un jour de pluie (par opposition à sec), et le nombre minimum (inclusive) de jours consécutifs pluvieux (sec) pour définir une période pluvieuse (sèche).

+ **intensité de précipitation**: la moyenne journalière de précipitation sur la saison en ne considérant que les jours de pluie seulement.

Sommaire

Résumé.....	iv
Table des figures.....	v
Liste des tableaux.....	ix
Liste des acronymes.....	xi
Introduction.....	1
Chapitre 1 : le cadre physique.....	4
1.1. - Présentation de la région d'étude : « L'Ouest algérien ».....	4
1.2 – la Géologie de la zone d'étude :	7
Orographie	9
Relief :.....	9
1.3 - Réseau hydrographique.....	10
Chapitre 2 :Evénements extrêmes en région Méditerranéenne	
2.1 Le climat méditerranéen.....	14
2.2 Définition d'un événement précipitant extrême.....	16
2.2.1 Définition d'un seuil d'intensité.....	17
2.2.1.1 Par sélection d'une intensité arbitraire	17
2.2.1.2 Par quantiles	17
2.2.1.3 Par lois de probabilité s'appliquant aux précipitations extrêmes :.....	18
Chapitre 3 : Cadre statistique général pour l'étude des pluies extrêmes.....	20
3.1 Description du processus complet pour l'étude des extrêmes.....	20
3.2 Théorie des Valeurs Extrêmes	21
3.2.1 Méthodes d'échantillonnage des valeurs extrêmes.....	21
3.2.1.1 Block Maxima Analysis (BMA).....	21
3.2.1.2 Peak Over Threshold (POT).....	22
3.2.2 Distributions théoriques des valeurs extrêmes.....	22
3.2.2.1 Modèle théorique pour la distribution de la valeur maximale d'une séquence de variables aléatoires (BMA).....	22
3.2.2.2 Modèles théoriques pour la distribution d'une variable aléatoire seuillée (POT) .	24
3.3 Ajustement sur des observations	25

3.3.1	Inférence des paramètres	25
3.3.2	Qualité de l'ajustement	26
3.3.3	Calcul d'un niveau de retour	26
3.3.4	Analyse des incertitudes	28
3.3.4.1	L'intervalle de confiance	28
Chapitre 4	Présentation des outils, données et méthodes	29
4.1	Introduction	29
4.1.1	Problématiques liées à l'échantillonnage de la mesure : Données disponibles, régions et périodes d'étude.....	29
4.1.2	Caractérisation d'une source de donnée : à la recherche de la donnée idéale	30
4.2	Description générale des données de précipitations	30
4.2.1	Jeux de données.....	31
	- Données GZOD.....	31
	- Les réanalyses :	33
4.3	Méthode et outils	36
4.3.1	Le test de Mann-Kendall	36
4.3.2	Test sur la corrélation: Wald-Wolfowitz	37
4.3.3	Les percentiles pour diagnostiquer de valeurs extrêmes :.....	37
4.4	PRESENTATION DU LOGICIEL UTILISE : LE LANGAGE R	39
4.5	Régression linéaire	40
4.5.1	Introduction	40
4.5.2	Représentation graphique	40
Chapitre 5	Estimation des pluies journalières extrêmes par deux méthodes :	
	I : maximum en bloc	
	II : supérieures à un seuil	
	Cas : de l'Ouest du pays	42
5. I	Estimation des pluies journalières extrêmes par maximum en bloc : cas de l'Ouest du pays.	43
5. I.1	Introduction	43
5. I.2	Tendance sur les valeurs extrêmes	44
5. I.3	Block Maxima Analysis (BMA).....	45
5. I.3.1	Estimation des paramètres	46
5. I.3.1.1	Méthode du Maximum de Vraisemblance	46

5. I.3.1.2 Estimation des paramètres pour GEV par la méthode des L-moments	59
5. I. 4.4 Analyse du climat actuel : Approche statistique.....	67
5. I.4.4.1 Introduction	67
5. I 4.4.2 La climatologie des événements extrêmes.....	68
5. I .4.3 Relation entre les valeurs moyennes et les valeurs de retour de 30 ans de précipitations journalières.....	74
5. II : Estimation des pluies journalières extrêmes supérieures à un seuil cas : l'Ouest du pays.	76
5. II.1 Détermination du seuil d'estimation des quantiles extrêmes	76
5. II .2 Tendence sur les valeurs extrêmes	83
5. II.2.1 Contrôle des séries de dépassements.....	83
5. II.3 Analyse des résultats.....	86
5. II.3.1 Estimation des paramètres des lois statistiques.....	86
5. II. 3.2 Estimation des quantiles extrêmes	87
5. II.4 Analyse spatiale des précipitations extrêmes	90
5. II.5La climatologie des extrêmes pluviométriques	93
5. II.6 Relation entre les valeurs moyennes et les valeurs de retour de 30 ans de précipitation journalière :	100
Conclusion général	103
Perspective	106
Bibliographie.....	107

Introduction

Les catastrophes naturelles causent chaque année à travers le monde la perte de vies humaines ainsi que de nombreux dégâts en infrastructures. La plupart de ces événements sont liés à des phénomènes naturels *extrêmes*, c'est-à-dire d'intensité inhabituellement forte voire inédite. C'est par exemple le cas des canicules, des inondations, des tempêtes, des tsunamis ou même des pics de pollution. Du fait du réchauffement climatique, ces catastrophes naturelles sont susceptibles de devenir de plus en plus fréquentes et/ou de plus en plus violentes.

Dans un monde où la population est de plus en plus exposée aux phénomènes climatiques violents, l'étude des aléas climatiques est un sujet sociétal majeur. Crues, sécheresses, vagues de chaleur, vents violents ... tous ces extrêmes climatiques ont de très forts impacts socio-économiques. S'ils ont toujours existé et qu'il y en aura d'autres dans le futur, deux phénomènes peuvent amplifier les dégâts occasionnés par les caprices de la météo : la vulnérabilité croissante des populations face aux aléas du climat : la vulnérabilité est modulée par les évolutions des sociétés ainsi que par les mesures d'atténuation pouvant être mises en place ; une hausse de l'aléa qui pourrait être produite par le changement climatique.

Les différentes mesures de prévention et de protection nécessitent de bien connaître l'aléa car elles sont spécifiques à celui-ci: on ne se protège pas des sécheresses avec les mêmes mesures que celles employées contre les crues.

La population est très sensible aux aléas climatiques, et ne dispose que rarement d'un cadre de gestion opérationnel permettant de mitiger les risques associés.

Le climat méditerranéen est fréquemment soumis à des événements de précipitation violente, particulièrement en automne, en raison des conditions atmosphériques de grande échelle qui se réunissent à cette période et de la morphologie unique du bassin méditerranéen.

Ces événements peuvent dépasser quelques centaines de mm en 24 h (Nuissier et al, 2008), avec des résultats parfois catastrophiques pour les populations locales.

Ce travail s'inscrit dans cette démarche de caractérisation des extrêmes pluviométriques sur la région Ouest du pays dans le passé récent car ils constituent un indicateur de l'évolution climatique et notamment de potentiels effets d'intensification du cycle hydrologique.

Cette étude cherche à mieux comprendre la climatologie de ces événements. En particulier, nous cherchons à comprendre un climat en cours d'évolution pour pouvoir prévoir les impacts des changements éventuels sur la précipitation extrême.

L'objet de cette étude est donc de considérer la distribution de probabilité des pluies extrêmes, à partir d'observations sur des postes de mesures. La définition même de pluie extrême est délicate.

De manière classique, une pluie extrême peut être définie par une pluie dépassant un seuil élevé donné, ou par la pluie maximale observée en une année ou saison données. Les compétences de trois disciplines sont conjuguées dans ce travail : les probabilités avec en particulier la théorie des valeurs extrêmes, les statistiques, et plus particulièrement l'étude fréquentielle des pluies.

Le comportement des valeurs extrêmes de pluie est décrit dans l'étude sous différents angles. Nous analysons les valeurs extrêmes de pluie via :

(a) les maxima saisonniers de pluie ; (b) les valeurs dépassant un seuil élevé ; (d) enfin l'analyse climatologique d'un processus pluvieux comportant des événements extrêmes.

Des chroniques de mesures de pluie ont été recueillies lors de notre recherche d'une base de données idéale. Nous étudions plus particulièrement des chroniques, de 38 ans de mesures quotidiennes. Enfin, nous étudions le processus pluvieux par une chronique d'événements fortement pluvieux décrits en termes de pluies ayant une durée de retour de 30ans.

Des méthodes d'estimations par maximum de vraisemblance et les L-moments sont mises en œuvre pour estimer les quantiles et les incertitudes associées, correspondant aux modèles proposés. On se concentrera en particulier sur leur comportement à l'intérieur de cette région.

PROBLEMATIQUE

La documentation des extrêmes pluviométriques revêt une importance toute particulière.

Dans cette région où la population est déjà très vulnérable aux aléas climatiques, une accentuation potentielle du cycle hydrologique pourrait avoir des conséquences sociétales et économiques désastreuses.

Une analyse scientifique des extrêmes pluviométriques et de leur évolution dans la région est un élément essentiel pour la mise en place de politiques de gestion opérationnelle et de mitigation du risque inondation actuellement peu développées dans la région.

Par ailleurs, la connaissance limitée des extrêmes pluviométriques est un argument supplémentaire pour se focaliser sur la région, grande absente des études soit disant " d'évolution du cycle hydrologique et de sa composante pluviométrique.

Le présent travail est donc motivé par des enjeux sociétaux forts et des questions opérationnelles et scientifiques cruciales.

Dans ce travail, les extrêmes pluviométriques seront considérés des marqueurs de la modification du régime hydro-climatique, potentiellement en lien avec les changements climatiques globaux : on se concentrera alors sur une description climatologique des précipitations extrêmes ; Les objectifs de l'étude est de mieux caractériser l'aléa pluviométrique dans la région Ouest du pays.

Pour cela, on développe des méthodes statistiques permettant d'estimer la distribution des extrêmes en prenant en compte la variabilité régionale des précipitations.

Cette première démarche permettra de disposer d'indicateurs statistiques utiles pour des applications en climatologie qui vont servir à caractériser la sévérité des épisodes pluvieux historiques et de mettre en évidence la variabilité spatiale des extrêmes pluviométriques de pluies journalières ainsi que leurs propriétés et comportements.

De même, évaluer les différences d'événements extrêmes d'un point de vue spatial en étudiant les différences observées, entre plusieurs stations, sur les estimations des paramètres de la loi GEV ou de la GPD associée aux maxima saisonniers sinon les valeurs dépassant les seuils retenus, dont le but est de discuter ensuite le choix d'une région homogène qui servira à comparer dans le futur des modèles spatiaux.

Pour atteindre ces objectifs, le manuscrit est articulé autour de cinq chapitres intégrés au sein de trois parties :

- La Partie I dans laquelle on présente le contexte physique de la zone d'étude plus une analyse bibliographique dans laquelle nous revenons sur les fondements de bases à l'origine de définition des extrêmes pluviométriques. Un chapitre sera consacré à un rappel des théories probabilistes des valeurs extrêmes, et une présentation des méthodes statistiques d'estimation des incertitudes des quantiles de modèles probabilistes
- La Partie II présentera les données utilisées et les méthodologies employées.
- Les différents résultats obtenus et leurs interprétations feront l'objet de la Partie III dans laquelle nous analyseront plus particulièrement la distribution asymptotique des pluies extrêmes à travers une démarche statistique « GEV » basée sur les maxima saisonniers dans un premier temps et le dépassement de seuil « GPD » dans un second temps.

Enfin nous terminerons ce travail avec une conclusion générale.

Chapitre 1 :

Le cadre physique

1.1 - Présentation de la région d'étude :

« L'Ouest Algérien »

L'expression l'**Ouest algérien** ou **Algérie occidentale** peut recouvrir deux significations : dans un sens d'usage traditionnel, faisant implicitement référence à l'**Algérie tellienne**, c'est un territoire géographique recouvrant le nord-ouest de l'Algérie, que l'on assimile souvent à l'**Oranie**.. L'Oranie (en arabe : القطاع الوهراني) est une région socioculturelle de l'Ouest algérien comprenant tout le nord-ouest de l'Algérie et correspond approximativement aux wilayas suivantes : **Oran, AïnTémouchent, Mascara, Mostaganem, Relizane, Saïda, Sidi Bel Abbès, Tlemcen, Tiaret**. La capitale de la région est la ville d'Oran.

Cette région d'Algérie est limitée à l'est par la moyenne vallée du Chelif, à l'ouest par la région de l'Oriental marocain, au nord par la Mer Méditerranée et au sud par les hauts-plateaux occidentaux, elle se caractérise aussi par la proximité des côtes espagnoles, la distance entre la wilaya d'Aïn Témouchent et Almería est de 94 km à 180 km³.

L'Oranie correspond au Tell occidental, cependant certains lui ajoutent les wilayas du sud jusqu'à la wilaya de Béchar, comme le journal Le Quotidien d'Oran, mais cette région est aussi appelée « le Sud Oranais » ; ces deux régions représentaient la Wilaya V pendant la guerre d'Algérie. dans un sens strictement géographique, l'ouest algérien est constitué dans le Sahara par la Wilaya de Tindouf et partie de celles de Béchar et d'Adrar .

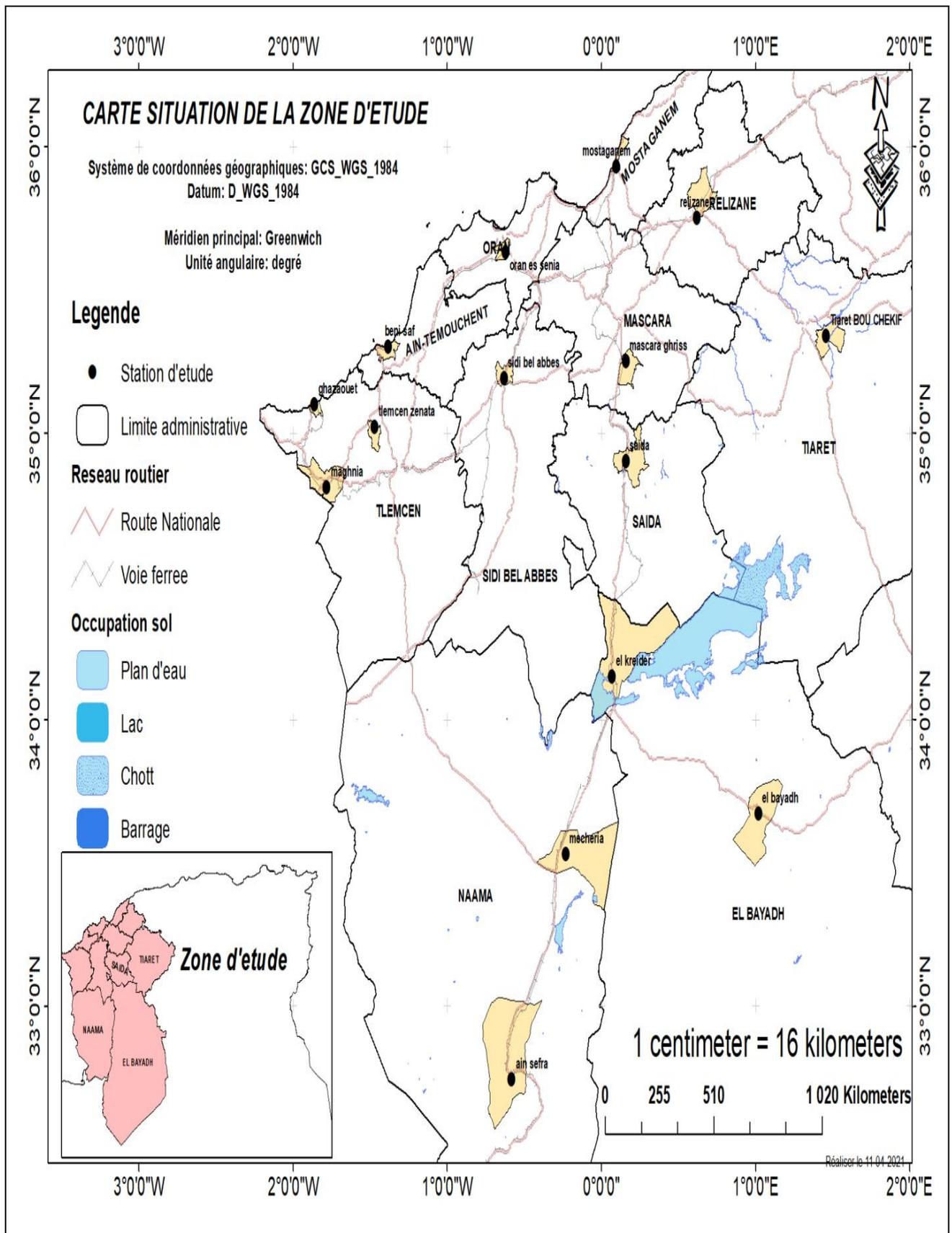


Figure N°1 : la Carte de La situation géographique de la zone d'étude (L'ouest algérien)

Carte de positionnement des stations de la zone d'étude

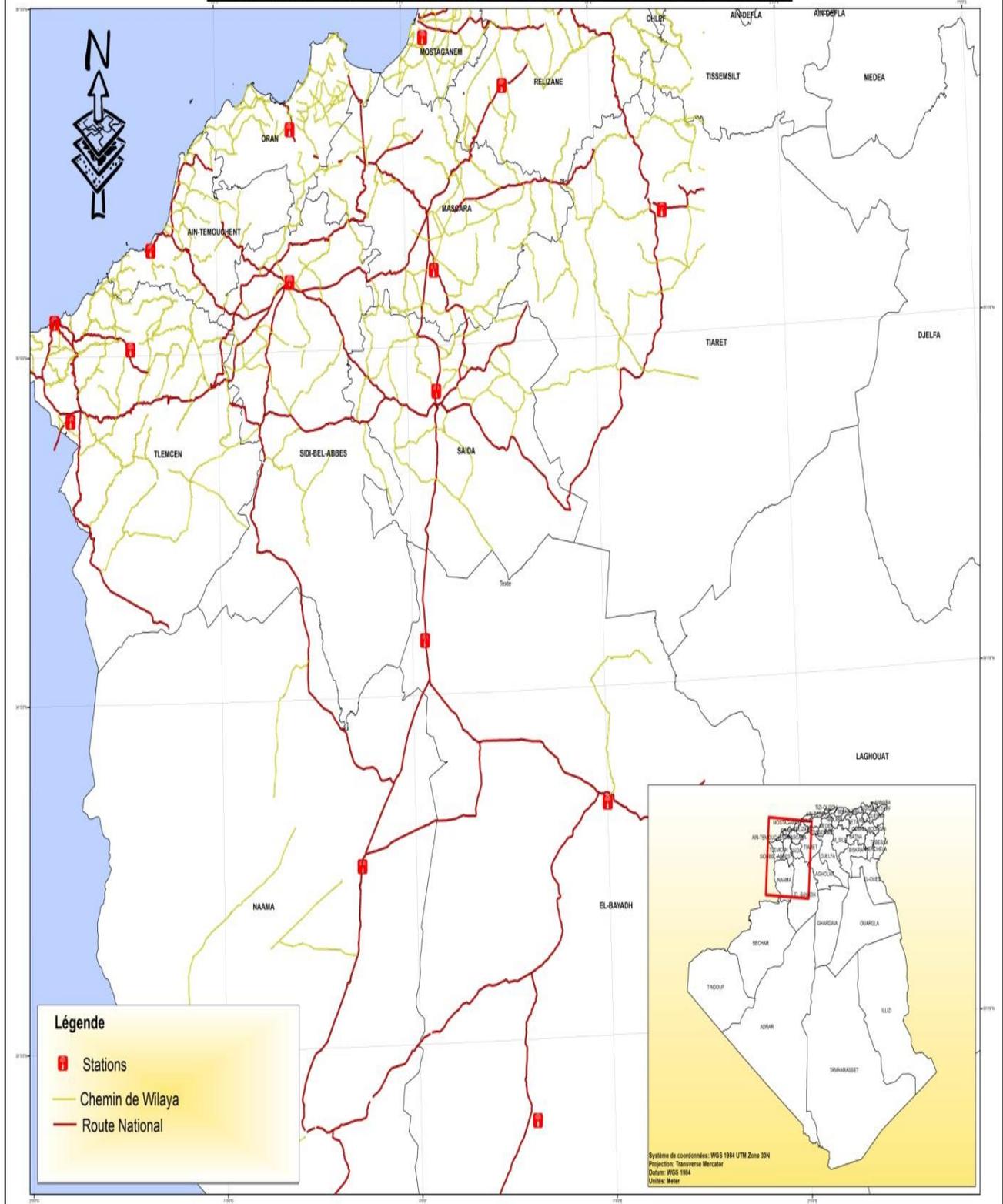


Figure N°2 : carte de positionnement des stations de la zone d'étude

1.2 – la Géologie de la zone d'étude :

La région appartient à l'unité tectonique maghrébine. Cette unité comporte un ensemble de zones mobiles toujours actives et caractérisées par une tectonique souple.

On trouve successivement du nord au sud (Khaldi 2005; MRE 2006 a,b,c,d; Adnane 2007):
-une chaîne alpine (Tell Occidental), -une zone tabulaire (Haute plaine oranaise), -une chaîne tertiaire (Atlas saharien) limitée au sud par l'accident atlasique qui la sépare du bouclier saharien.

La structure géologique de la région est liée aux mouvements de l'orogénèse alpine qui ont contribué dès l'éocène, lors des phases de plissement successives, à configurer et individualiser des domaines géologiquement homogènes.

Le territoire de la région hydrographique couvre plusieurs domaines distincts sur deux zones tectoniques.

Le Tell occidental, constitué globalement par un empilement de nappes de charriage, dont les plus méridionales surmontent les sédiments des Hautes plaines à structures tabulaires. Ces nappes se répartissent en deux catégories, les plaines telliennes à matériel marnocalcaire du Crétacé inférieur et les nappes de flysch constituées par des formations argilo gréseuses d'âge Crétacé à Miocène.

Les Hautes plaines oranaises, sont formées principalement par les affleurements des monts de Tlemcen à l'ouest et les monts de Saida à l'est. Elles sont constituées pour l'essentiel de formations secondaires transgressives sur un socle primaire avec des sédiments carbonatés rigides, qui leur confèrent une nature très karstique (calcaire et dolomie).

De manière générale, la géologie de la région se caractérise par une grande variabilité lithologique et structurale. Elle est dominée par des formations quaternaires, généralement alluvionnaires, des différentes plaines, alors que les massifs montagneux sont caractérisés par une lithologie qui diffère d'une région à une autre.

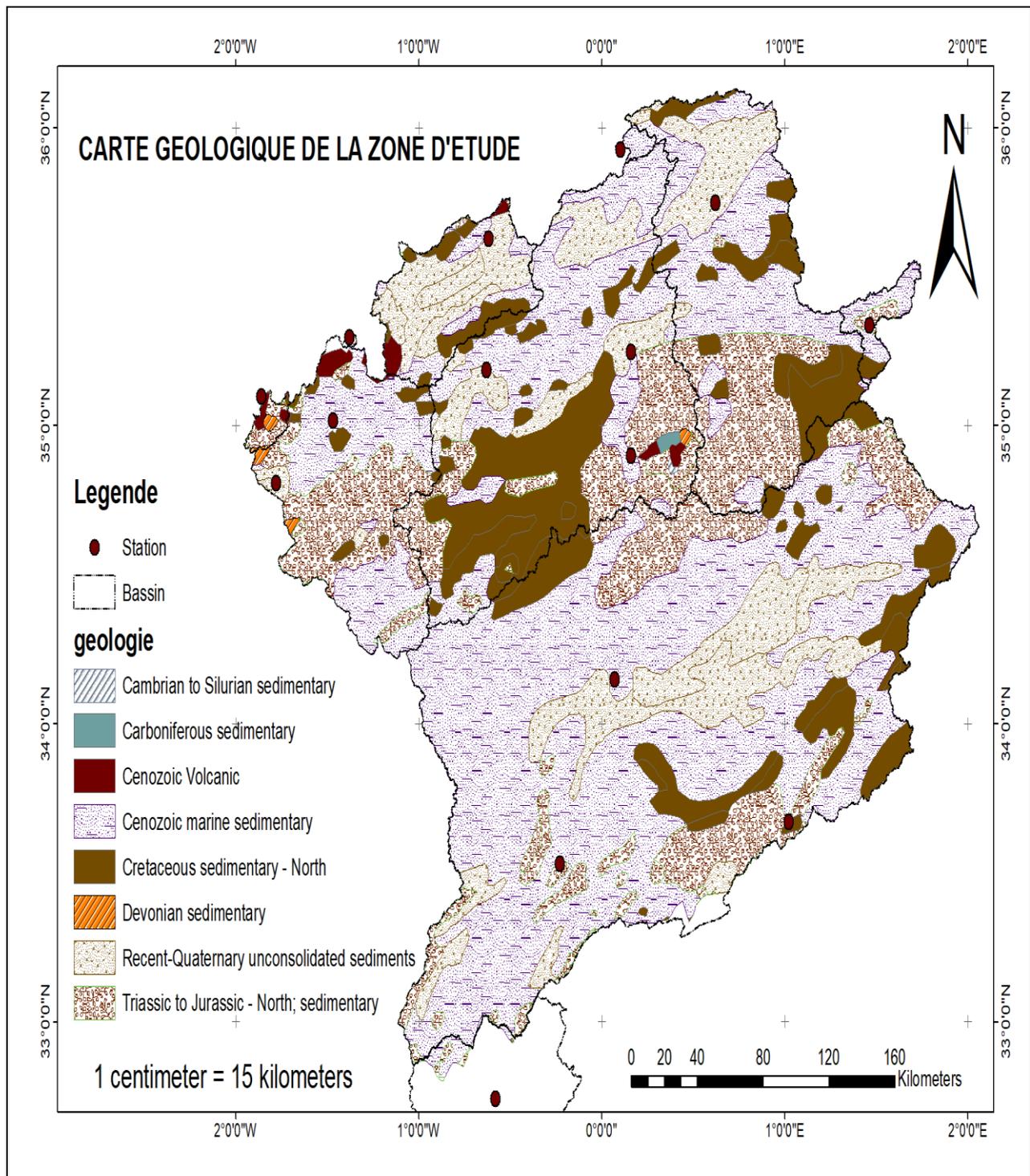


Figure N°3 : La carte géologique de la zone d'étude.

Au point de vue structural, la zone occidentale de la région est marquée par une succession de horsts et de grabens orientés globalement ENE-WSW, depuis les monts de Tlemcen jusqu'au massif des Traras. Les compartiments sont limités par de grandes failles normales dont le rejet vertical peut dépasser 500 m. Cette tectonique qui a compartimenté les formations calcaires a eu pour effet d'isoler, plus ou moins, les aquifères karstiques les uns des autres.

Orographie :

Pour l'analyse des variables d'altimétrie, de pentes, d'orientations et de réseau de drainage, on s'est basé sur l'obtention d'un Modèle digital d'Oriente qui permet de quantifier toutes ces variables et de les intégrer dans des calculs futurs.

Relief :

Pour pouvoir travailler dans un territoire si étendu comme celui de l'étude, la visualisation directe des différentes variables du relief (orographie, pentes, etc.) permet d'obtenir une impression générale qui nous aidera à comprendre la complexité de son réseau de drainage et des différentes conditions qui s'imposent pour le fonctionnement du bassin.

Traditionnellement, la majeure partie de l'information altimétrique (en insistant plus particulièrement sur la variable altitude) qui est incorporée aux Systèmes d'Information géographique (SIG) a pour origine les courbes de niveau des bases topographiques. En outre, il existe d'autres sources d'information altimétrique, telles que les cotes, les sommets géodésiques, les lignes de crête et de thalweg, les routes 3D, etc., qui serviront à ajuster le modèle dans les zones singulières (étendues presque plates, maxima et minima locaux), à enrichir des profils déterminés, à vérifier la qualité et la cohérence du modèle, etc. ; mais si les courbes sont fiables, précises et détaillées, elles doivent jouer un rôle fondamental dans la génération du Modèle numérique de terrain (MNT) correspondant et l'on ne doit pas leur réserver un simple rôle de fourniture massive de points avec information altimétrique. De plus, il est important que le processus d'interpolation tienne compte non seulement des éléments géométriques, mais également des caractéristiques topologiques, souvent oubliées, des objets qui interviennent

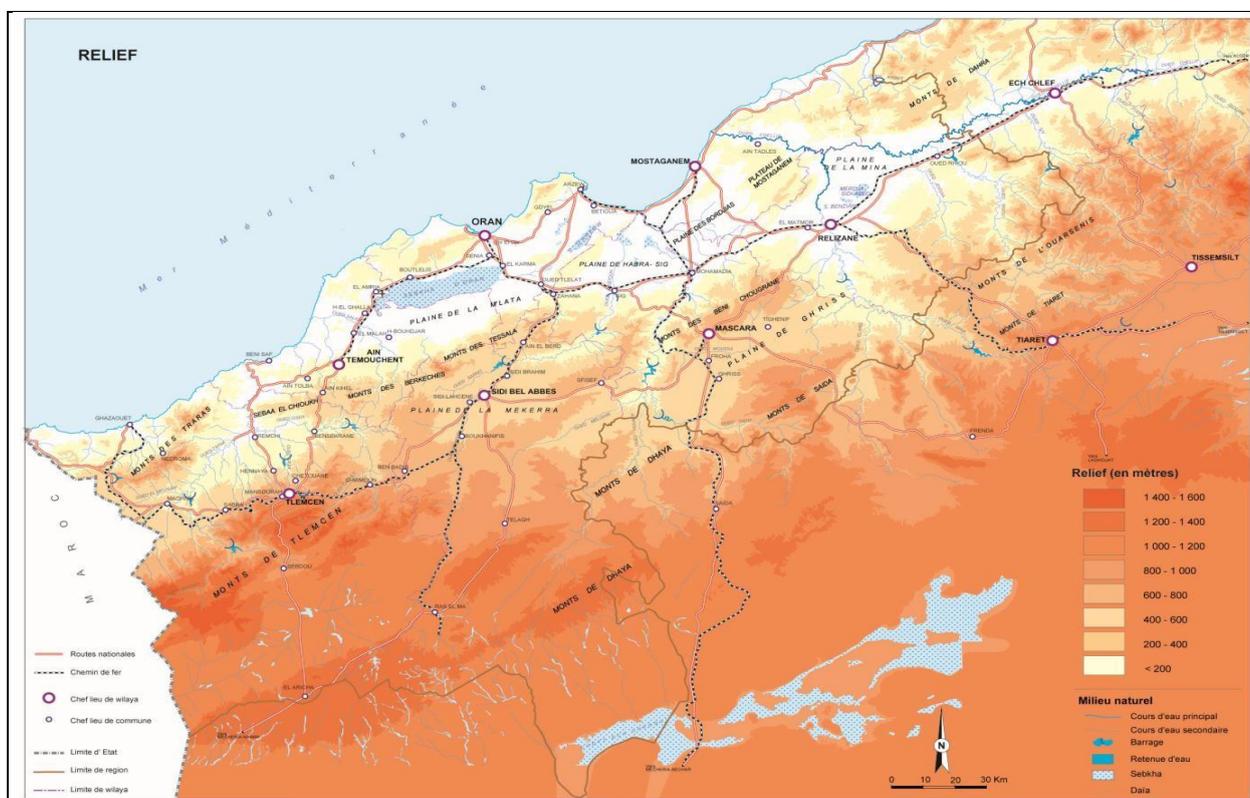


Figure N°4 : Présentation du relief de la région d'étude (Anonyme 4 s,d)

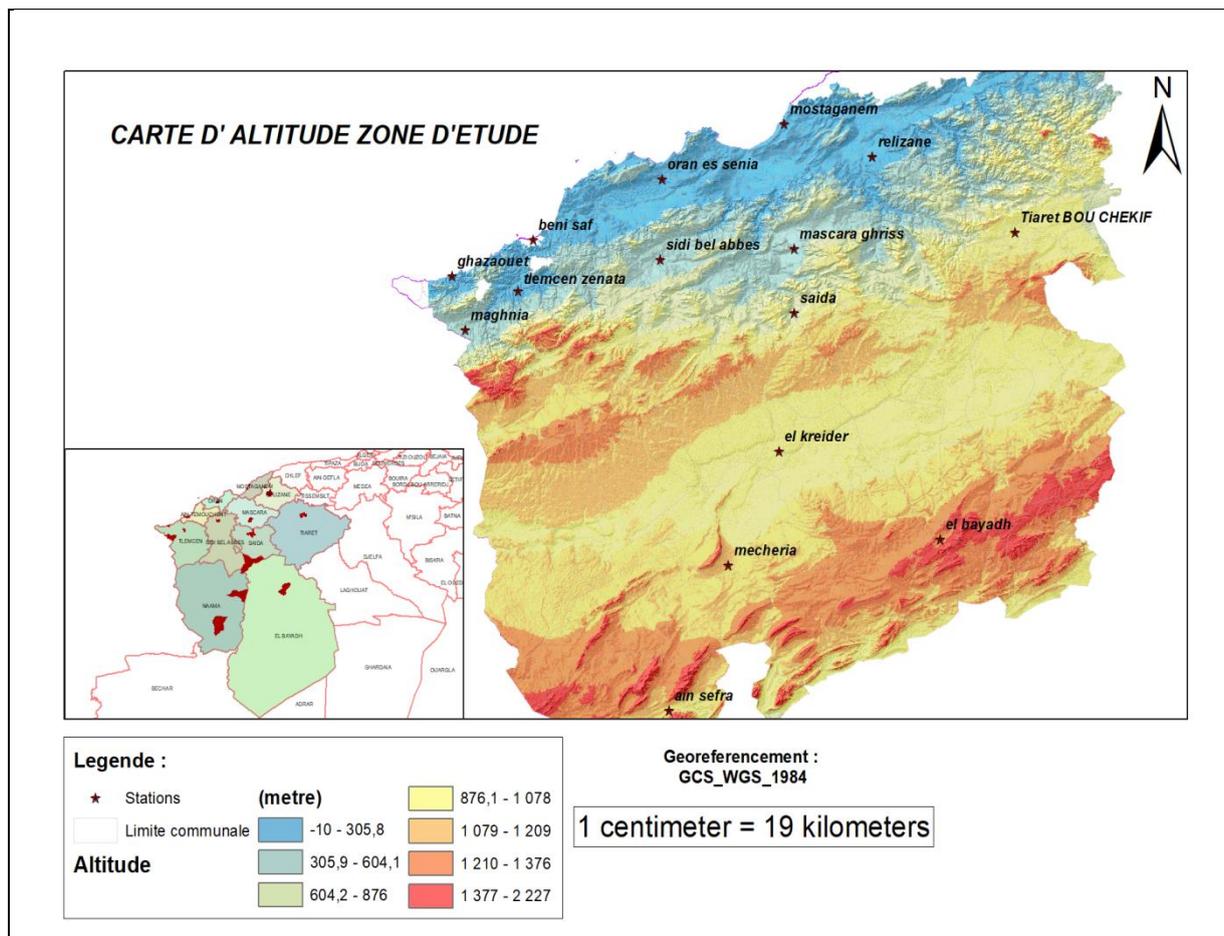


Figure N°5 : la carte d'altitude de la zone d'étude

1.3 - Réseau hydrographique

La formation du réseau hydrographique est fortement conditionnée par les facteurs caractéristiques des terrains traversés par les différents oueds. Ainsi la lithologie intervient sur le degré de ramification des oueds. C'est le cas de l'oued Tafna qui traverse les calcaires des Monts de Tlemcen et suit la direction Sud-Ouest, Nord-Est du relief dominant représenté par la chaîne montagneuse des Traras et les Monts de Tlemcen.

Le bassin de la Tafna présente un chevelu hydrographique atrophié caractéristique des zones semi-arides (MRE 2006a). Le bassin de la Tafna est constitué principalement par deux artères fluviales: L'oued Tafna à l'Ouest et l'oued Isser à l'Est, et l'Ouest du bassin est drainé par trois principaux affluents dont les sous- bassins, le Mouilah (1982 Km²) situé dans le territoire marocain, le Mehaguène (665 Km²) et la haute Tafna (1294 Km²). La partie orientale est drainée, par le sous- bassin : l'IsserCedra (1118 Km²) dont les cours d'eau sont généralement pérennes.

La partie avale représente la Tafna maritime (388 Km²) dont le cours d'eau principal est à sec

en été, il est situé à la mise en eau des ouvrages hydrauliques situés en amont (Khaldi2005). Le Bassin de la Macta présente un chevelu hydrographique caractéristique des zones semi-arides, constitué d'oueds dont les débits en période d'étiage sont nuls et totalisant un réseau de 8115 km. L'apport moyen est de 256 Hm³/an (MRE 2006b). Les affluents du bassin de la Macta (Melrir, Sefioune, Sahouat) prennent naissance au niveau des massifs calcaires des monts des Dayas et de Saida, confluent en amont du barrage de Bouhanifia. Ils forment ensuite l'oued El Hammam qui traverse les basses plaines de Habra-Sig avant de déverser dans la mer (MRE 2006b). Le chevelu hydrographique de l'Oued Mekerra est peu développé, son tracé est influencé par le relief en place. Il suit la direction Sud-Ouest, Nord –Est des monts du Tessala. (MRE 2006b).

Le chevelu hydrographique dans le bassin de Chott Chergui y est très peu développé. Le plus grand nombre de ces oueds localisés au Nord prennent naissance dans les crêtes de l'Atlas Tellien et se déversent au Sud dans le Chott Chergui. Les autres oueds localisés au Sud, de moindre importance sont caractérisés par un écoulement temporaire. Ils prennent naissance au niveau du Flanc Nord de l'Atlas Saharien situé au Sud et s'écoulent en direction du Nord. Aucune donnée précise n'est disponible sur leurs apports (Habibi et al. 2013). Le régime des cours d'eau est très irrégulier et le débit d'étiage est nul ou insignifiant durant toute la période sèche. (MRE 2006 a, b, c,d)

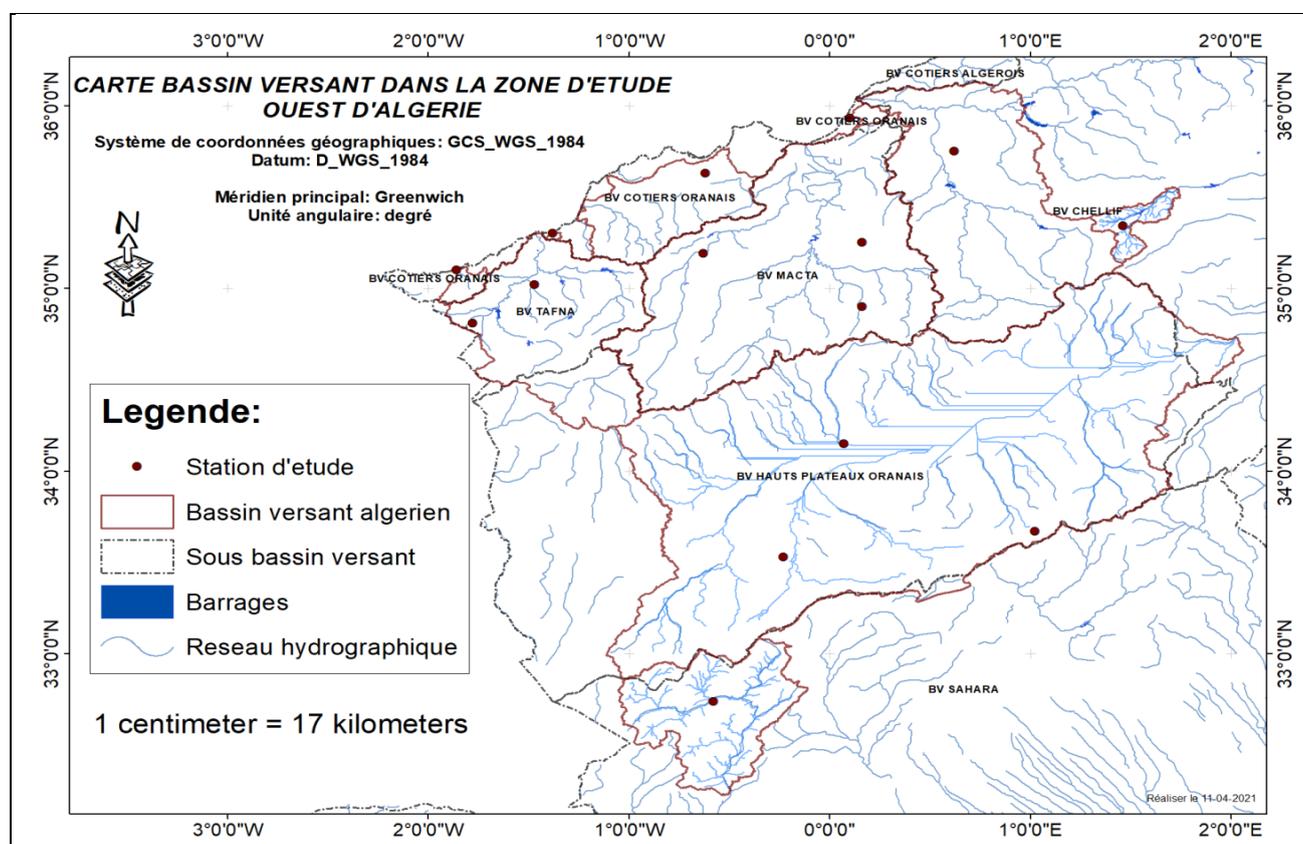


Figure N°6 : la carte du bassin versant de la zone d'étude

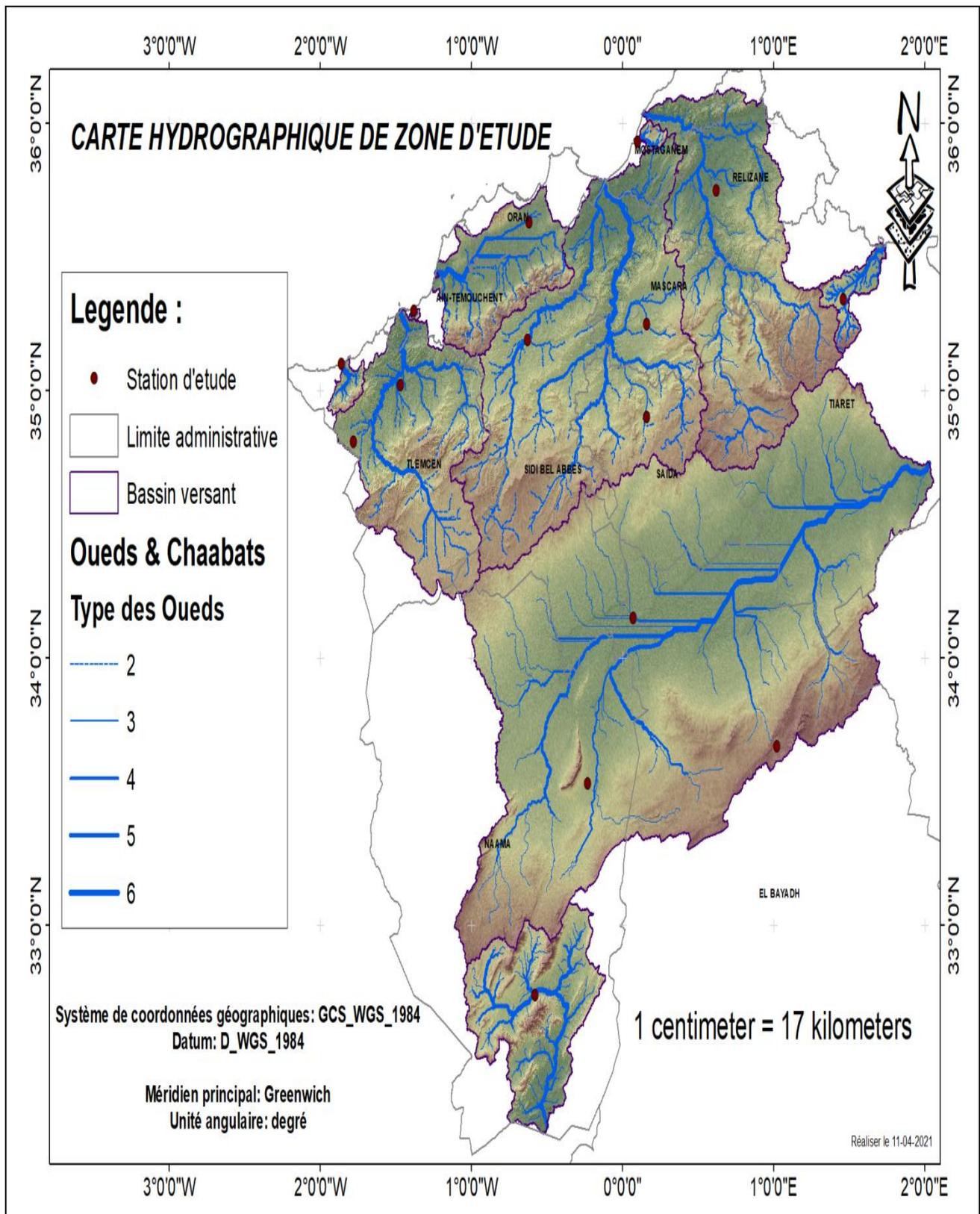


Figure N°7 : la carte hydrographique de la zone d'étude

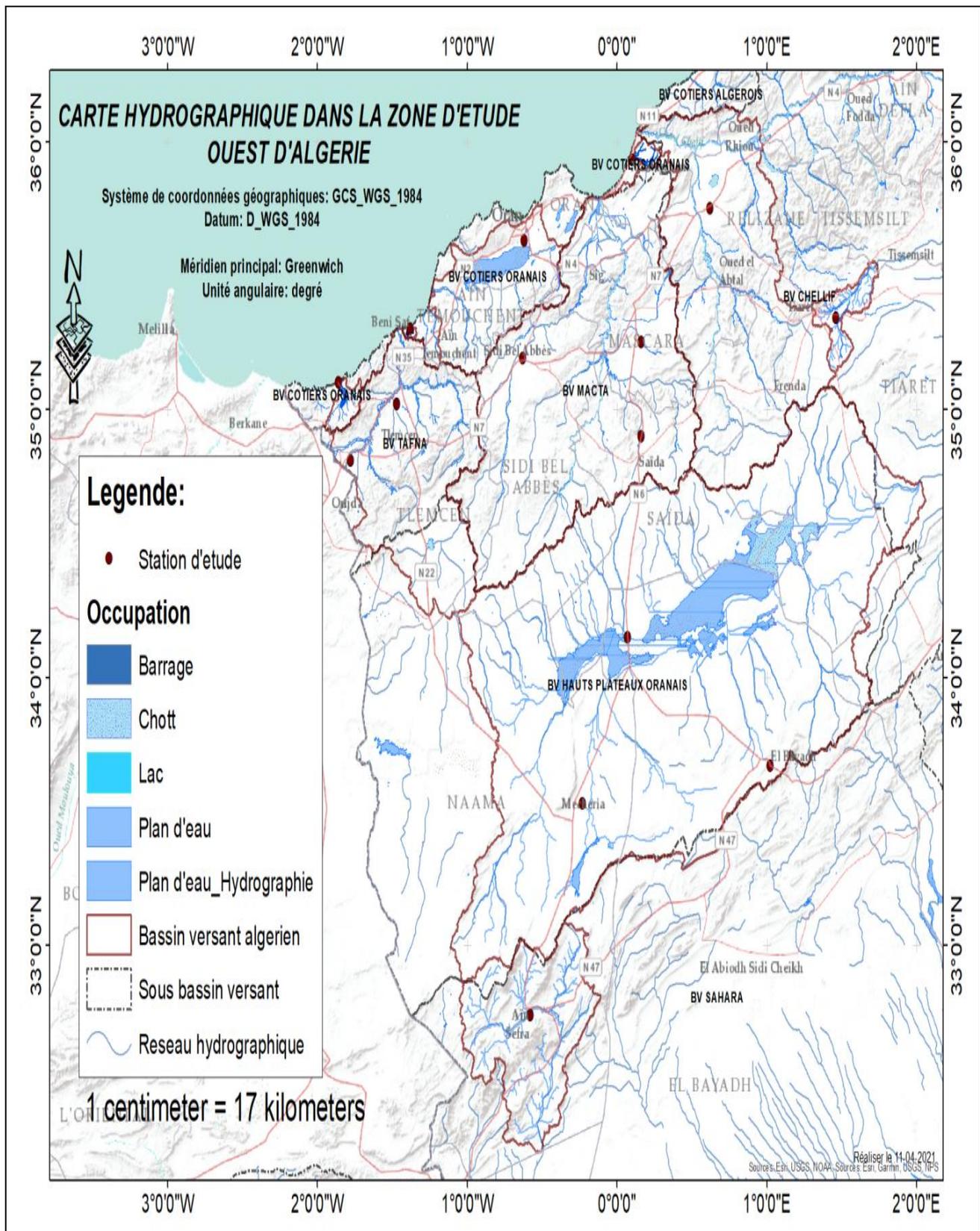


Figure N°8 : la care hydrographique de la zone d'étude.

Chapitre 2 :

Événements extrêmes en région

Méditerranéenne

Le climat méditerranéen est fréquemment soumis à des événements de précipitation violente, particulièrement en automne, en raison des conditions atmosphériques de grande échelle qui se réunissent à cette période et de la morphologie unique du bassin méditerranéen. Ces événements peuvent dépasser quelques centaines de mm en 24 h (Nuissier et al, 2008), avec des résultats parfois catastrophiques pour les populations locales. Pour cette raison, cette étude cherche à mieux comprendre la climatologie de ces événements. En particulier, nous cherchons à comprendre un climat en cours d'évolution et prévoir les impacts des changements éventuels sur la précipitation extrême.

2.1 Le climat méditerranéen

Les climats méditerranéens sont localisés entre 30 ° et 45 ° Nord ou Sud sur la région côtière à l'ouest des masses continentales (Bolle et al, 2006).

Ce climat, caractéristique des régions bordant la mer Méditerranée, se retrouvent au sud-ouest des Etats-Unis, au Mexique, au Chili, en Afrique du Sud et en Australie. Au sens large, ces régions partagent :

i) une concentration des précipitations (au moins 65%) de Novembre à Avril dans l'hémisphère nord et de Mai à Octobre dans l'hémisphère sud.

ii) une période sèche en été durant au moins un mois (di Castri et Mooney, 1973).

Selon la classification Köppen-Geiger, le climat méditerranéen est du type Csa ou Csb (tempéré avec un été sec et chaud ou tempéré) (Peel et al., 2007). En revanche, cette définition exclut certains pays nord-africains du pourtour méditerranéen, qui ont un climat sous influence subtropicale et donc sec (Figure N°9).

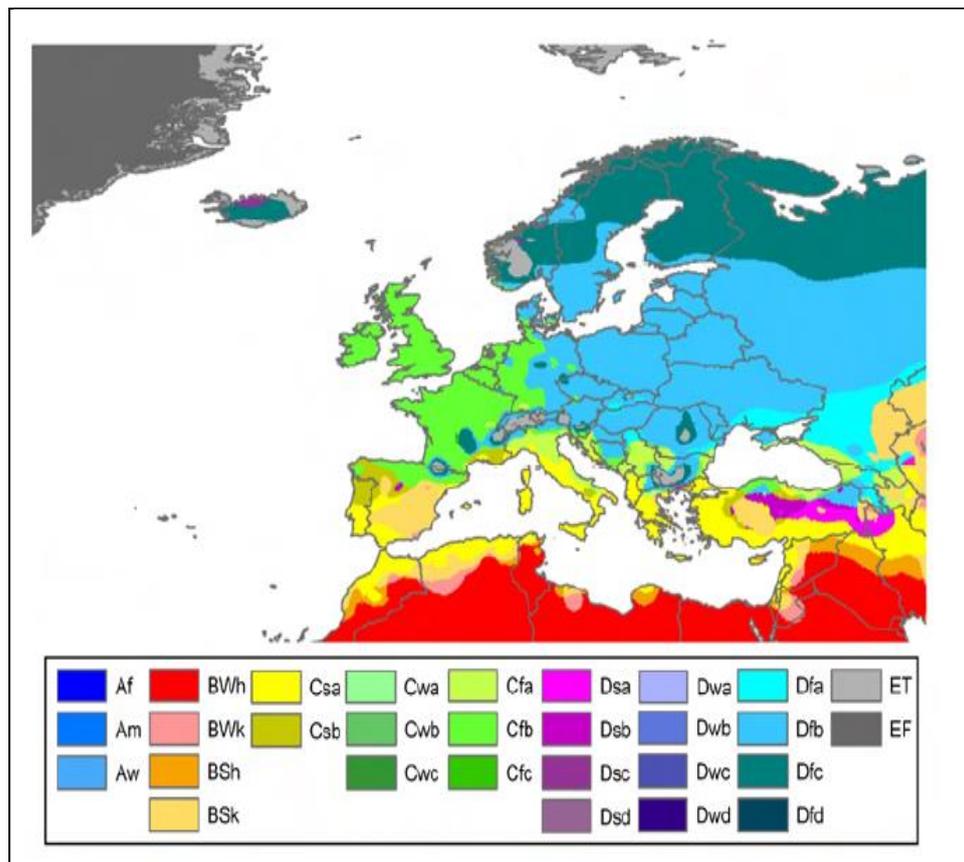


Figure N°9– Classification Köppen-Geiger des climats européens (Peel et al., 2007).

A ces critères climatiques, s'ajoute un type de végétation caractéristique : le chaparral (maquis californien), la garrigue ou le maquis (di Castri et Mooney, 1973). Ces types de végétation sont adaptés aux conditions climatiques et aux reliefs accidentés des régions méditerranéennes. Plus exceptionnellement, on peut trouver des forêts littorales en Californie ou des régions désertiques au Chili et au nord de l'Afrique.

Le pourtour méditerranéen se distingue des autres climats méditerranéens par sa mer presque fermée d'une profondeur et d'une taille inhabituelle pour un bassin de ce type (Lionello et al, 2006). La mer constitue une source importante de chaleur latente qui contribue à la formation des phénomènes atmosphériques rares à ces latitudes tels que les lignes de grain et les ouragans méditerranéens (medicanes).

Ces systèmes peuvent se développer grâce à une combinaison de la température de mer relativement élevée et des facteurs baroclines présents aux moyennes latitudes (Moscatello et al. 2008a, b; Romero et al, in press).

Le relief accidenté qui entoure la quasi-totalité du bassin méditerranéen (Figure N°10) sert à son tour à intensifier les phénomènes météorologiques de la région. Ces reliefs, combinés à certaines conditions météorologiques, sont à l'origine des vents catabatiques, tels que le Mistral ou le Bora. Ces vents sont le résultat d'une masse d'air frais et lourd qui descend en plaine (Bolle et al, 2006). Ils soufflent dans la direction inverse des brises de mer, aussi présentes en région méditerranéenne. Le relief peut aussi jouer un rôle dans les événements précipitants soit par le soulèvement de l'air instable, soit par la cyclogenèse orographique.

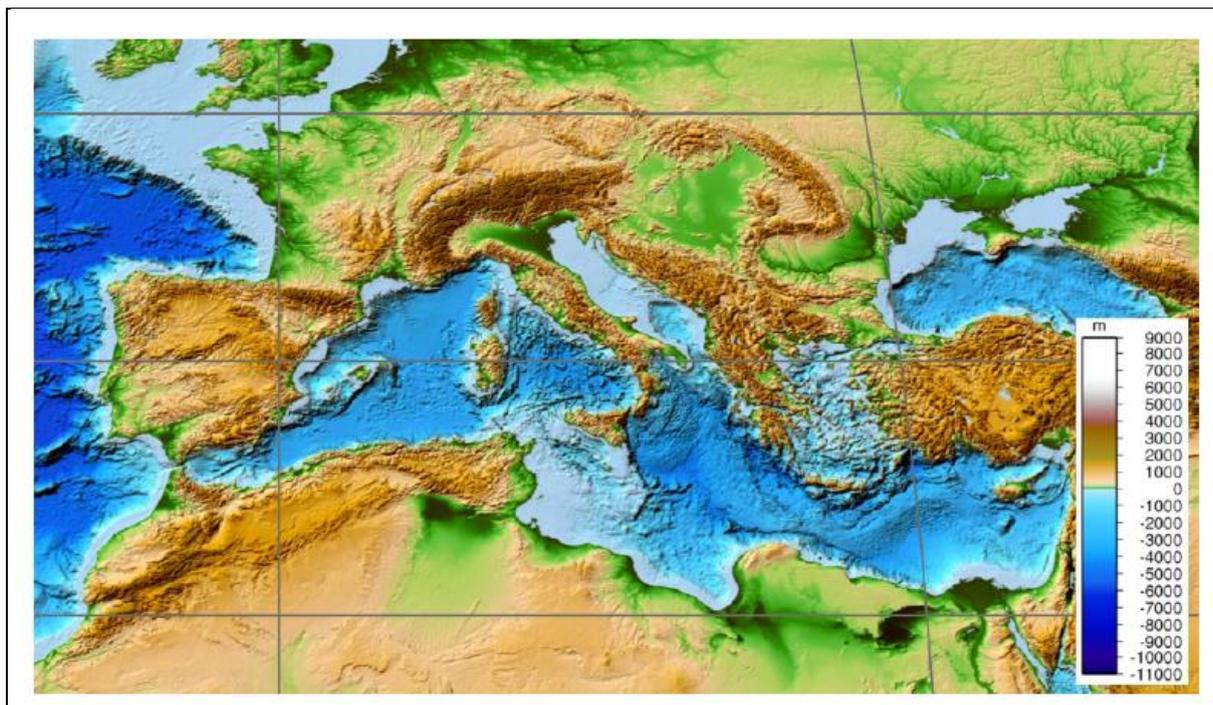


Figure N°10 - Topographie et bathymétrie du bassin méditerranéen, modèle numérique de terrain, NASA ETOPO1 d'après Amante et Eakins (2009). Image produite par P.Grothe.

Le climat méditerranéen est caractérisé par ses étés chauds et secs, ses hivers doux, et des précipitations irrégulières concentrées au printemps et en automne, fréquemment de type orageux (Météo-France, 2014).

Ce climat se distingue des autres principaux climats (océanique, océanique altéré, semi-continentale, de montagne) par son fort ensoleillement et ses événements de précipitation et vent intenses (mistral et tramontane). Sur cette région, la variabilité des précipitations est associée à des périodes de sécheresse estivale et des problèmes de gestion de la ressource en eau suivis de périodes de pluies intenses à l'origine de crues parfois dévastatrices. Ce sont ces événements de pluies intenses que nous allons étudier dans la suite de ce travail.

2.2 Définition d'un événement précipitant extrême

L'étude des événements extrêmes passe avant tout par la définition objective de leur intensité et de leur étendue spatiale qui a pour but d'identifier des événements rares (extrêmes), ayant un impact important sur les populations, les infrastructures ou l'écologie (voir Easterling et al. (2000) pour une discussion de l'impact des extrêmes climatiques sur la société et l'écologie).

Un événement extrême peut être aussi identifié par les dégâts qu'il engendre. Le point faible de ce type de définition est qu'elle combine l'impact de l'aléa météorologique et le risque (l'exposition des populations). Il existe de nombreuses études qui se focalisent sur un ou quelques épisodes de précipitation catastrophiques (voir Miglietta et al. (2011); Trapero et al. (2013) pour deux exemples), notables en raison des dégâts qu'ils provoquent. Pour notre étude, cette définition est peu satisfaisante car nous souhaitons regarder l'évolution de ces événements d'un point de vue climatologique et non seulement quelques événements exceptionnels.

Le dépassement d'un seuil de précipitation permet de définir l'intensité des événements que l'on cherche à étudier. Cette valeur seuil peut correspondre à une intensité de précipitation donnée, à un quantile précis ou à une période de retour. Les deux derniers types de seuils sont aussi associés à une intensité de précipitation, calculée à partir d'une distribution probabiliste et variable dans l'espace. Une fois le seuil d'intensité fixé, nous pouvons aussi poser des conditions d'étendue spatiale, à déterminer à partir des données distribuées sur une grille régulière ou d'un réseau d'observations. L'application d'un seuil spatial permet d'écarter les événements qui sont trop localisés pour avoir un impact notable.

2.2.1 Définition d'un seuil d'intensité

2.2.1.1 Par sélection d'une intensité arbitraire

Un événement peut être qualifié d'extrême si son cumul journalier ou horaire dépasse une valeur seuil donnée, choisie de façon arbitraire.

Ce type de définition est utilisé dans la caractérisation des événements de pluie intense par Boudevillain et al. (2009) où des événements sont d'abord définis par un seuil de 200 mm journaliers puis par 10 mm horaires pour des durées allant de 5 à 60 minutes.

L'inconvénient est que la subjectivité et la variabilité d'un seuil choisi rend la comparaison des résultats entre différentes études difficile. Ce type de définition est aussi peu adapté aux variations régionales du climat comme on peut l'observer dans le livre de Lionello et al. (2006) où le seuil des événements extrêmes est différent entre l'Algérie et les autres régions méditerranéennes. En raison de ces difficultés, certains préfèrent une définition statistique des événements précipitants fondée sur les quantiles de précipitation observés ou modélisés et donc variables dans l'espace.

2.2.1.2 Par quantiles

Nous pouvons également définir un seuil à partir d'un quantile donné, dont l'intensité est calculée à partir de la distribution empirique de la précipitation à un point (ou une maille). L'utilisation des quantiles empiriques est particulièrement intéressante pour l'étude des précipitations car la valeur du quantile ne dépend pas de la forme de la distribution des données.

Que l'échantillon de données suive une distribution normale, log-normale ou uniforme, le calcul des quantiles empiriques reste le même et ne fait donc aucune hypothèse sur la distribution d'origine. Pour déterminer la valeur d'un quantile donné lorsqu'on dispose d'une série de N données d'une variable x , la première étape consiste à trier ces données par ordre croissant. Une fois les données triées, la deuxième étape consiste à déterminer le rang du k ème quantile d'ordre n dans la série ordonnée des N données de l'échantillon.

On sait que la fonction de répartition $F(x)$ du k ème quantile d'ordre n est donnée

Par :

$$F(x) = \frac{k}{n} \quad (2.1)$$

Cette fonction donne la proportion de données égales ou inférieures au k ème quantile.

On s'aperçoit qu'elle est indépendante du nombre N de données présentes dans l'échantillon.

Par exemple, le premier quintile (quantile d'ordre 5) aura une fonction de répartition de 15 (soit 0, 2) quelque soit le nombre de données dans la distribution.

La fonction de répartition de ce quantile peut aussi se calculer à partir de l'ensemble des N données de la série ordonnée grâce à la formule de Hazen, très utilisée par les hydrologues :

$$F(x) = \frac{(i - 0.5)}{N}, \quad (2.2)$$

Où i est le rang du k ième quantile d'ordre n , et N est le nombre de données de l'échantillon.

A partir des équations (2.1) et (2.2), on en déduit ainsi le rang i du quantile qui nous intéresse.

$$i = \frac{(nK)}{N} + 0.5 \quad (2.3)$$

Plusieurs études choisissent ainsi de définir un événement extrême à partir de la valeur d'un quantile donné. C'est le cas par exemple de Boudevillain et al. (2009); Colin (2010); Nuissier et al. (2011) qui proposent dans leurs travaux de distinguer 2 types d'événements extrêmes. Il s'agit des événements de précipitations intenses (heavyprecipitationevents ou HPE) et des événements de fortes précipitations (significantrainfallevents ou SRE). Les SRE et HPE sont des événements qui dépassent respectivement les 97ième et 99.9ième centiles de précipitation journalière observée. Pour renforcer la robustesse des quantiles, nous pouvons également regrouper les données de plusieurs stations (dans le cas d'un réseau de données ponctuelles) ou de plusieurs mailles (dans le cas de données maillées) dans une seule et même distribution. Ce processus appelé *pooling*(regroupement), permet de réduire la variabilité associée à une seule maille ou station.

2.2.1.3 Par lois de probabilité s'appliquant aux précipitations extrêmes :

On peut aussi définir un événement extrême en fonction de sa fréquence. Il existe en effet un lien étroit entre l'intensité d'un événement et sa fréquence. De façon générale, plus un événement est rare et plus son intensité est importante. Ce type de définition est très utilisé par les ingénieurs et les décideurs appelés à déterminer les risques acceptables pour un ouvrage public. C'est le cas par exemple pour la construction des barrages. On calcule alors ce qu'on appelle une *période de retour*. Les barrages sont alors dimensionnés pour résister à un événement de période de retour centennale à décennale, la valeur de cette période variant selon la taille du barrage (Degoutte, 1997). La période de retour désigne la période de temps, r , au cours de laquelle un événement extrême est susceptible de se produire. Ainsi, un orage centenaire se produit en moyenne une fois tous les 100 ans pour une probabilité de retour annuelle de $1/r$ soit 1%. Nous remarquons ici que nous pouvons considérer la fonction de répartition des quantiles empiriques aussi comme une fréquence de dépassement. Néanmoins, cette distribution empirique est moins adaptée à l'étude des événements très peu fréquents car il est limité par la durée de la chronique observée. En effet, le calcul d'une période de retour est seulement valable dans le cas où la chronique des observations est longue par rapport à r .

Comment déterminer l'intensité d'un orage centennal ou millénial à partir d'une série d'observations, parfois incomplète ou d'une durée insuffisante ? Pour estimer l'intensité d'un événement de faible probabilité qui n'a jamais été observé, il faut nécessairement faire des hypothèses permettant d'extrapoler les données.

On suppose alors que la variable étudiée obéit à une certaine loi statistique, dont on ajuste les paramètres, pour représenter aux mieux les données disponibles et on admet que cette loi reste valable pour les événements encore jamais observés. La sélection d'une loi de distribution statistique est donc critique pour la détermination de la fréquence d'un événement car elle détermine les hypothèses que nous faisons sur nos données. Par exemple, la description des précipitations par une loi normale peut s'avérer désastreuse, sous-estimant largement les valeurs extrêmes. Pour les extrêmes, il est préférable d'utiliser d'autres lois telles que la loi, la loi log-normale ou la loi Généralisée des Valeurs Extrêmes (ou GEV pour Generalized Extreme Values en anglais). Cette dernière loi regroupe trois familles de distributions exponentielles qui sont appropriées à la description des précipitations (Kysel' y et al, 2012; Trambly et al, 2012). Elle est décrite dans l'équation. 2.4

$$F(x) = \begin{cases} \exp\left\{-\left[1 - \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-\frac{1}{\xi}}\right\} \\ \exp\left[-\exp\left\{-\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right\}\right] \text{ Lorsque } z \rightarrow 0. \end{cases} \quad (2.4)$$

Où x est le maximum de la variable aléatoire mesurée sur une période donnée (maximum par bloc), ξ est un paramètre de forme, σ est un paramètre d'échelle et μ est un paramètre de position par rapport à l'origine. L'ajustement de cette distributions'effectue à l'aide d'estimateurs tels que l'estimateur de probabilité maximale(MLE).

Ces estimateurs optimisent les paramètres décrits ci-dessus pour une variable donnée. Une fois la loi ajustée, celle-ci est utilisée pour estimer l'intensité d'un événement possédant une période de retour donnée ou pour estimer la période de retour d'un événement catastrophique jamais survenue. Ceci peut servir à estimer les périodes de retour des événements extrêmes issus de projections climatiques et à les comparer aux périodes de retour des événements passé

Chapitre 3 :

Cadre statistique général pour l'étude des pluies extrêmes

Ce chapitre présente le cadre théorique permettant de décrire le comportement statistique des valeurs extrêmes d'une variable aléatoire X . Les notations utilisées pour ce chapitre sont définies dans les lignes suivantes.

On considère que la probabilité de non-dépassement de X est $Pr(X \leq x) = F(x)$. On cherche à connaître le comportement de F pour des quantiles x très élevés (extrêmes), ou en d'autres termes, le comportement asymptotique de F lorsque $F(x) \rightarrow 1$.

La loi de distribution F est inconnue et on cherche à estimer son comportement asymptotique à partir de k réalisations x_i (x_1, \dots, x_k) de la variable aléatoire X . Pour cela, deux choix sont possibles :

- (i) étudier et caractériser le processus complet pour en déduire les fréquences d'apparition des valeurs extrêmes.
- (ii) étudier un échantillon de valeurs extrêmes et se placer dans la théorie des valeurs extrêmes.

Ces deux possibilités sont présentées dans ce chapitre.

3.1 Description du processus complet pour l'étude des extrêmes

Imaginons que l'on modélise la distribution complète $F(x)$ de la variable aléatoire X par un modèle théorique simple. Si l'on souhaite en déduire la valeur d'un quantile pour une période de retour élevée, trois cas peuvent se présenter :

- i. le modèle théorique décrit parfaitement $F(x)$, à la fois sa partie centrale mais aussi son comportement lorsque $F(x) \rightarrow 1$;
- ii. La distribution complète est globalement bien ajustée par un modèle théorique mais il y a une divergence au niveau des plus forts quantiles;
- iii. il n'y a pas de modèle théorique simple qui soit capable d'ajuster la distribution complète dans son ensemble.

Cet exemple illustre les deux principales raisons qui justifient l'adoption de la théorie des valeurs extrêmes.

- i. la plupart des observations ne sont pas des extrêmes et n'apportent donc pas ou peu d'information sur le comportement asymptotique de F ;
- ii. Il peut exister plusieurs modèles théoriques qui s'ajustent bien à $F(x)$ qui ont un comportement asymptotique différent.

3.2 Théorie des Valeurs Extrêmes

Les sections précédentes nous ont montré qu'il est difficile de connaître précisément $F(x)$ surtout lorsque $F(x)$ tend vers 1 à partir de réalisations x_i . La théorie des valeurs extrêmes [EVT: Extreme Value Theory, voir CoLES, 2001; NAVEAU et al, 2005] pour des ouvrages de référence accessibles est un formalisme statistique rigoureux pour décrire le comportement asymptotique de F à partir d'une extraction des valeurs extrêmes. Elle propose deux méthodes d'échantillonnage des valeurs extrêmes (BMA: Block Maxima Analysis et POT : Peak Over Threshold) qui feront l'objet de la SECTION 3.2.1.1 auxquelles correspondent deux modèles de distribution théoriques (GEV: Generalized Extreme Value et GPD: Generalized Pareto Distribution) décrits dans la Section 3.2.1.2.

3.2.1 Méthodes d'échantillonnage des valeurs extrêmes

3.2.1.1 Block Maxima Analysis (BMA)

L'approche BMA consiste à définir des blocs de n réalisations de la variable aléatoire X et prendre le maxima à l'intérieur de chaque bloc. Le vecteur de maxima z contient $l = \frac{k}{n}$ réalisations de la variable aléatoire Z :

$$\mathbf{z} = \{z_1, \dots, z_l\} = \{\max(x_1, \dots, x_n), \max(x_{n+1}, \dots, x_{2n}), \dots, \max(x_{k-n+1}, \dots, x_k)\} \quad (3.1)$$

Ce type d'échantillonnage est représenté à la Figure (N°11).

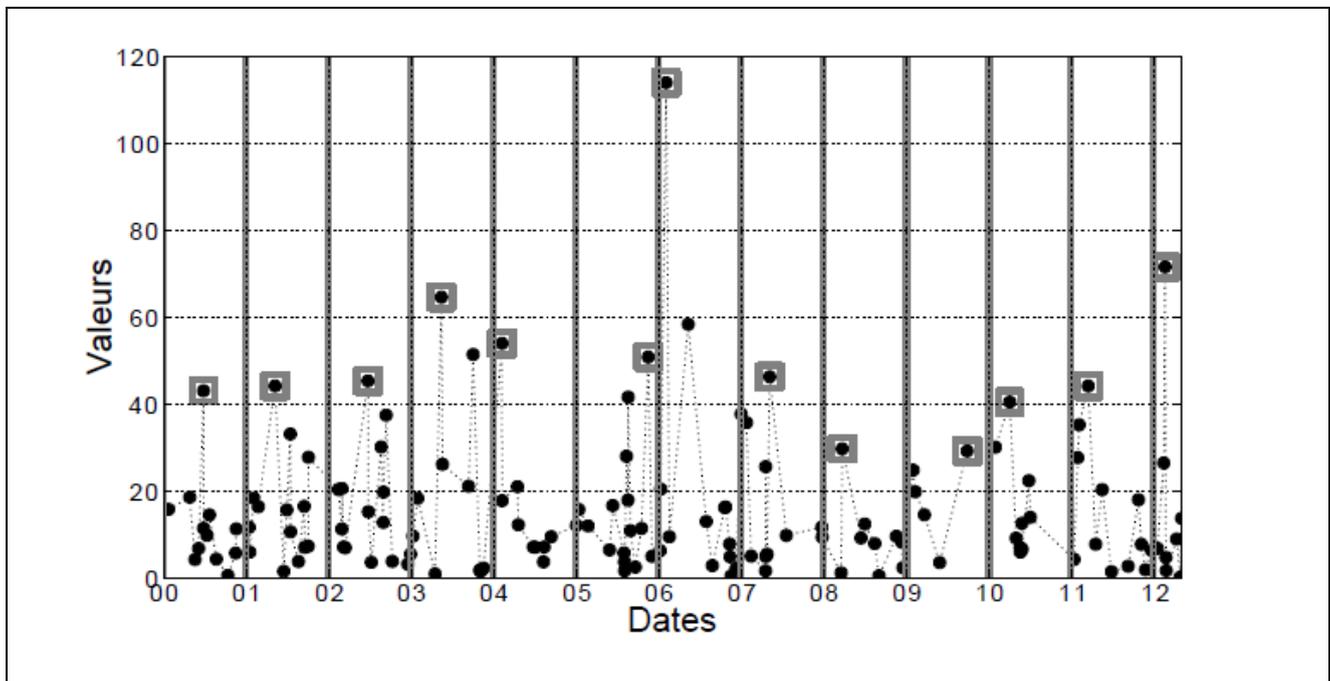


Figure N°11 - Échantillonnage selon l'approche BMA : la valeur maximale à l'intérieur de chaque bloc de n valeurs est retenue.

3.2.1.2 Peak Over Threshold (POT)

L'approche POT consiste à définir un seuil r et de sélectionner toutes les réalisations de X pour lesquelles r a été dépassé. On retient les valeurs de dépassement y , réalisations de la variable aléatoire Y :

$$y = x - T \text{ lorsque } x > T \quad (3.2)$$

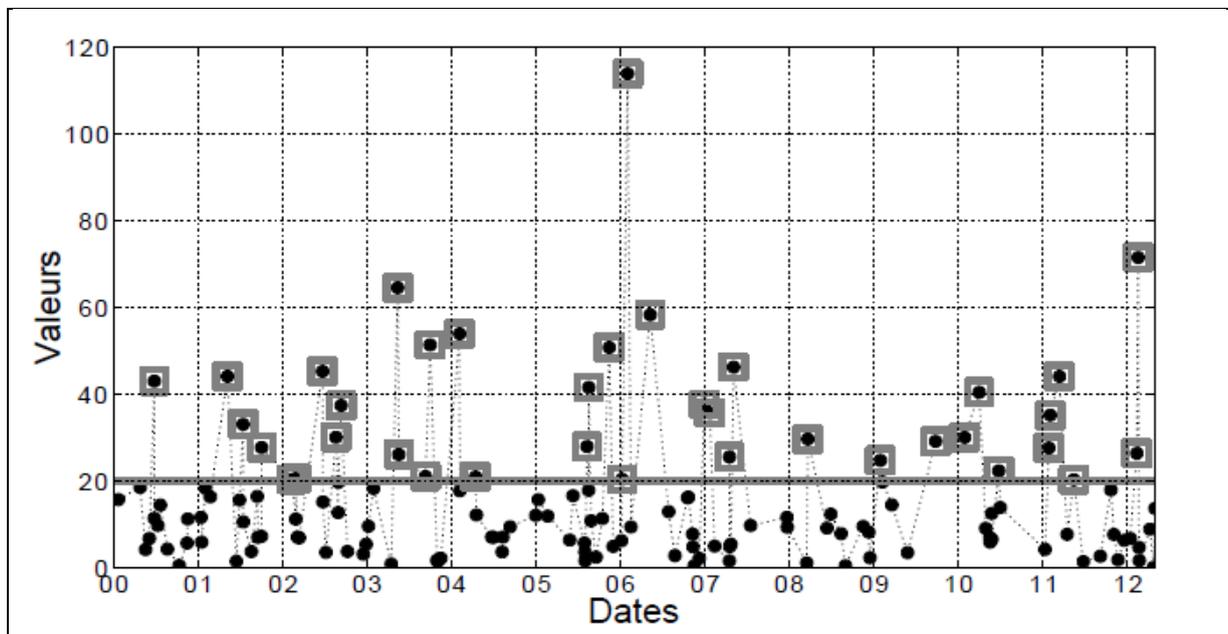


Figure N°12 - Echantillonnage selon l'approche POT: toutes les valeurs dépassant r sont retenues.

3.2.2 Distributions théoriques des valeurs extrêmes

3.2.2.1 Modèle théorique pour la distribution de la valeur maximale d'une séquence de variables aléatoires (BMA)

Pour décrire le comportement asymptotique de F lorsque $F \rightarrow 1$, la théorie des valeurs extrêmes s'est d'abord intéressée à la distribution de la valeur maximale de n variables aléatoires et indépendantes. A l'instar du théorème central limite qui montre que la somme S_n , de n variables aléatoires X tend vers la loi normale $\mathcal{N}(\mu X, \frac{\sigma X}{\sqrt{n}})$, le théorème de Fisher-Tippett [FISHER & TIPPETT, 1928] montre qu'il existe trois types de lois possibles pour décrire le comportement asymptotique de la valeur maximale Z_n de n variables aléatoires et indépendantes X :

$$Z_n = \max(X_1, \dots, X_n) \quad (3.3)$$

La distribution de Z_n est donnée par

$$\Pr(Z_n \leq z) = \Pr[\max(X_1, \dots, X_n) \leq z]$$

$$= \prod_{t=1}^n \Pr(X_t \leq z) \quad (3.4)$$

$$= F(x)^n$$

Le théorème de Fisher-Tippett [FISHER & TIPPETT, 1928; GNEDENKO, 1943] est le suivant: s'il existe une séquence de constantes $a_n > 0$ et b_n permettant de renormaliser Z_n en $Z_n^* = \frac{Z_n - b_n}{a_n}$ et G une fonction non dégénérée tel que:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \Pr(Z_n^* \leq z) = \lim_{n \rightarrow \infty} \{F(a_n \times z + b_n)\}^n \rightarrow G(z) \quad (3.5)$$

Alors G appartient à l'une des trois familles de lois extrêmes (Fréchet, Gumbel ou Weibull). Ces trois lois peuvent être regroupées en une seule para métrisation, celle de la loi GEV [Generalized Extreme Value, Von MISES, 1954; JENKINSON, 1955]:

$$F_{\text{GEV}}(z; \mu, \sigma, \xi) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{z - \mu}{\sigma} \right) \right]^{\frac{-1}{\xi}} \right\} \quad (3.6)$$

L'influence de chacun des trois paramètres sur la forme de la distribution GEV est illustrée à la Figure (N°13). Les paramètres de localisation (μ) et d'échelle ($\sigma > 0$) décrivent respectivement la position et la dispersion de la loi. Le troisième paramètre (paramètre de forme ξ) décrit le comportement asymptotique de la loi et son domaine d'attraction:

- un paramètre de forme positif correspond à une loi à queue lourde et au domaine d'attraction de Fréchet, la loi est alors définie sur l'intervalle $\left] \mu - \frac{\sigma}{\xi}, +\infty \right[$;
- le domaine d'attraction de Weibull correspond à des paramètres de forme négatifs (queues bornées), la loi est alors définie sur $\left] -\infty, \mu - \frac{\sigma}{\xi} \right[$;

dans le cas où $\xi = 0$, la loi GEV tend vers la loi de Gumbel (équation (3.7)), dont la queue est légère et qui n'est pas bornée ($-\infty < z < \infty$).

$$\lim_{\xi \rightarrow 0} F_{\text{GEV}}(z; \mu, \sigma, \xi) \rightarrow F_{\text{Gumbel}}(z; \mu, \sigma) = \exp \left\{ - \exp \left[- \left(\frac{z - \mu}{\sigma} \right) \right] \right\} \quad (3.7)$$

S'il existe un nombre très important de modèles théoriques permettant de décrire la distribution complète de X , il n'y a que trois domaines d'attraction:

- Gumbel : domaine d'attraction par exemple des lois Normale, Exponentielle, Gamma, Log normale;
- Fréchet : domaine d'attraction par exemple des lois Pareto, Cauchy;
- Weibull: domaine d'attraction par exemple des lois Béta, Uniforme.

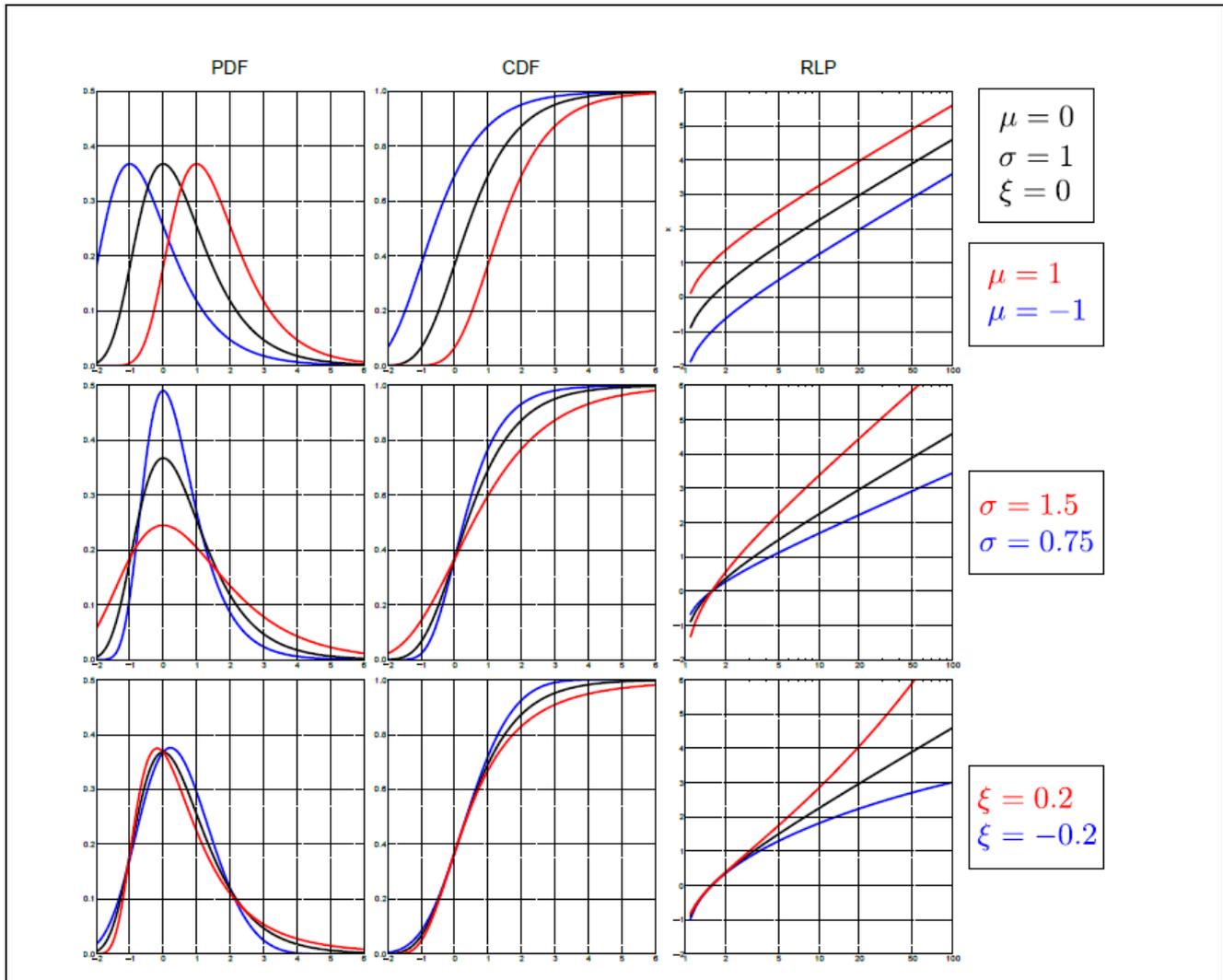


Figure N°13 - Influence des paramètres μ (en haut), σ (au milieu), ξ (en bas) sur la distribution GEV. de gauche à droite : densité de probabilité(PDF), fonction de répartition(CDF) et graphique de niveaux de retour (RLP)

3.2.2.2 Modèles théoriques pour la distribution d'une variable aléatoire seuillée (POT)

Une deuxième approche pour étudier le comportement asymptotique d'une distribution est d'étudier la probabilité conditionnelle du taux de dépassement $Y = X - \tau$ lorsque la variable X dépasse un seuil τ suffisamment haut.

La distribution de Y (distribution des dépassements de τ), $\Pr(Y \leq y)$, est directement reliée à F :

$$\begin{aligned}
 F(\tau + y) &= \Pr(X \leq \tau + y) \\
 &= \Pr\{[(X \leq \tau + y) \cap (X > \tau)] \cup (X \leq \tau)\} \\
 &= \Pr\{[(Y \leq y) \cap (X > \tau)] \cup (X \leq \tau)\}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

$$= \Pr(Y \leq y) \times \Pr(X > \tau) + \Pr(X \leq \tau)$$

$$= \Pr(Y \leq y) \times [1 - F(\tau)] + F(\tau)$$

Soit :

$$\Pr(Y \leq y) = \frac{F(\tau + y) - F(\tau)}{1 - F(\tau)} \Leftrightarrow \Pr(Y > y) = \frac{1 - F(\tau + y)}{1 - F(\tau)} \quad (3.9)$$

L'étude de PICKANDS [1975] montre que si l'équation (3.5) est vérifiée pour F alors la distribution de Y est une distribution GPD (Generalized Pareto Distribution) :

$$F_{\text{GPD}}(y; \alpha, \xi) = 1 - \left(1 + \frac{\xi \times y}{\alpha}\right)^{-\frac{1}{\xi}} \quad (3.10)$$

Notons ici que le paramètre ξ est le même que celui de la loi GEV et qu'il décrit aussi le comportement asymptotique de F . lorsque ξ tend vers 0 alors la loi GPD tend vers une loi exponentielle :

$$\lim_{\xi \rightarrow 0} F_{\text{GPD}}(y; \alpha, \xi) \rightarrow F_{\text{EXP}}(y, \alpha) = 1 - \exp\left(-\frac{y}{\alpha}\right) \quad (3.11)$$

3.3 Ajustement sur des observations

Les deux résultats asymptotiques précédents motivent le choix de modéliser des échantillons de valeurs maximales par une loi GEV et les échantillons de valeurs dépassant un seuil par une loi GPD.

La modélisation de la distribution Z par une loi GEV est souhaitable sous les hypothèses suivantes:

- que l'échantillon \mathbf{z} soit suffisamment grand;
- que n soit suffisamment grand;
- que les variables aléatoires X_1, \dots, X_k soient indépendantes, ou qu'elles aient une faible dépendance temporelle [Leadbetters's D-condition. LEADBETTER, 1974].

Tout comme pour l'approche BMA, la modélisation de la distribution de Y par une loi GPD est motivée par un résultat théorique. Pour cette approche, les hypothèses suivantes doivent être vérifiées:

- τ doit être suffisamment grand, la principale difficulté lors de l'utilisation de cette approche est la définition de ce seuil [BEGUERIA, 2005] ;
- l'indépendance de la variable aléatoire Y doit être vérifiée. Ce point est rarement vérifié, ce qui nécessite de faire appel à des méthodes de dé-chustering.

3.3.1 Inférence des paramètres

Les méthodes d'inférence des paramètres des modèles GEV et GPD se font par les ajustements classiques :

- ajustement par la méthode des moments et des L-moments [cf. HOSKING & WALLIS,] : ces méthodes consistent à faire correspondre les moments de la loi statistique à ceux de l'échantillon;

- ajustement par maximum de vraisemblance [COLES, 2001]: les paramètres sont estimés en maximisant la vraisemblance du modèle;

- ajustement par une procédure bayésienne [CASELLA, 2001; LEE, 2012].

Le problème de l'estimation des quantiles d'une distribution des extrêmes repose sur l'estimation de ses paramètres sur la base de l'échantillon disponible. Deux principales techniques pour estimer les paramètres des lois GEV et GPD sont le maximum de vraisemblance (Davison, 1984 ; Smith, 1984; Hosking and Wallis, 1987 ; Davison and Smith, 1990 ; Wilks, 1995) et la méthode des moments pondérés (Hosking and Wallis, 1987 ; Abild et al, 1992 ; Stedinger et al, 1993).

L'idée fondamentale de l'estimation par maximum de vraisemblance est de trouver un ensemble d'estimations de paramètres, telles que la probabilité d'obtenir les valeurs observées soit maximisée. La méthode de moments, quant à elle, est basée sur la possibilité d'évaluer n'importe quel moment statistique d'une distribution par ses moments empiriques correspondants, et d'exprimer ensuite les paramètres en fonction des moments.

Le maximum de vraisemblance, dont la justification primordiale survient de ses propriétés asymptotiques (c'est-à-dire l'estimation est efficace pour les échantillons de grande taille), est instable et peut produire des estimation irréalistes de paramètre de forme pour les échantillons de petite taille (par exemple, Hosking and Wallis, 1997 ; Coles and Dixon, 1999 ; Martins and Stedinger, 2000 et 2001). La méthode des moments pondérés, en comparant avec l'estimateur de maximum de vraisemblance, est au contraire inefficace asymptotiquement, mais donne de meilleurs résultats pour des tailles d'échantillon inférieures (< 100 pour la loi GEV et < 500 pour la loi GPD, pour un paramètre de forme $k > 0$, voir, par exemple Hosking et al, 1985 ; Hosking and Wallis, 1997).

3.3.2 Qualité de l'ajustement

La qualité de l'ajustement entre les observations et le modèle théorique obtenu peut être évaluée à l'aide :

- **de procédures visuelles** : on peut citer ici par exemple les quantile-quantile plot (QQ-Plot) ou les graphiques en période de retour (RLP: Return Level Plot);

- **de tests d'ajustement** : les plus classiques étant les tests du Chi-deux, de Kolmogorov-Smirnov ou d'Anderson-Darling;

- **de scores divers** : ils peuvent être basés sur l'écart entre la distribution empirique et la loi ajustée (scores quantile-quantile par exemple) ou se focaliser sur l'estimation d'un quantile particulier (QVS :Quantile Verification Score).

3.3.3 Calcul d'un niveau de retour

On appelle *niveau de retour* αT années pour une variable aléatoire X le quantile qui est dépassé en moyenne une fois toutes les T années. Avec $M_n = \max(X_1, \dots, X_n)$, le niveau de retour à T années noté Z_T est donc défini par :

$$\Pr(M_n > z_T) = \frac{1}{T} \quad (3.12)$$

Le niveau de retour à T années est une mesure de risque courante dans les applications de la théorie des valeurs extrêmes. Cette valeur sert en particulier à définir les dimensions d'une structure en fonction du risque encouru. Plus la gravité associée à une rupture de la construction est importante, plus la période de retour fixée T associée au phénomène naturel est grande. Par exemple, $T = 1000$ pour une digue et $T = 10000$ pour une centrale nucléaire.

Les trois approches de la théorie des valeurs extrêmes décrites dans la section précédente permettent d'estimer le niveau de retour à T années associé à une variable aléatoire X dans le cas où l'on dispose d'observations iid de cette variable aléatoire. Si les observations sont corrélées, des conditions supplémentaires sont nécessaires.

- **Niveau de retour calculé à partir des maxima par blocs**

En utilisant la définition (3.12) du niveau de retour et la forme explicite de la loi GEV associée aux maxima annuels, un estimateur du niveau de retour peut être directement construit par cette méthode :

$$\widehat{z}_T^{(1)} = \widehat{\mu} + \frac{\widehat{\sigma}}{\widehat{\xi}} \left(\left[-\log\left\{1 - \frac{1}{T}\right\} \right]^{-\widehat{\xi}} - 1 \right), \quad T > 1, \quad (3.13)$$

où $\widehat{\mu}$, $\widehat{\sigma}$ et $\widehat{\xi}$ sont les estimations respectives des paramètres μ , σ et ξ de la loi GEV, obtenus par maximum de vraisemblance ou par la méthode des moments (cf. de Haan et Ferreira, 2006, page 139).

- **Niveau de retour calculé à partir des excès de seuil**

Si on définit z_m tel que $\Pr(X > z_m) = \frac{1}{m}$, on obtient le niveau de retour à m -observations d'après la notation (3.12). En notant n_y le nombre d'observations par années (en pratique on a $n_y = 365$ jours en supprimant les 29 février), le niveau de retour à m -observations devient équivalent au niveau de retour à $\frac{m}{n_y}$ -années. En choisissant un seuil $u > z_m$ assez élevé, on a :

$$\Pr(X > z_m) = \zeta_u \Pr(X > z_m | X > u) = \frac{1}{m},$$

Où $\zeta_u = \Pr(X > u)$ peut être estimé empiriquement par $\frac{nu}{n}$, où nu est le nombre d'observations parmi les réalisations (X_1, \dots, X_n) qui dépassent le seuil u .

L'approximation de $\Pr(X > z_m) | X > u$ par une loi GP de paramètres τ et ξ permet donc d'obtenir un second estimateur du niveau de retour à T -années

$$\widehat{z}_T^{(2)} = u + \frac{\widehat{\tau}}{\widehat{\xi}} \left(\left(\frac{n_u T n_y}{n} \right)^{\widehat{\xi}} - 1 \right) \quad (3.14)$$

Où $\widehat{\tau}$ et $\widehat{\xi}$ sont les estimations des paramètres τ et ξ de la loi GP.

3.3.4 Analyse des incertitudes

A ce stade de l'analyse nous disposons d'un modèle fréquentielle $F(x)$ après plusieurs étapes. On est donc en droit de se poser la question de sa fiabilité ou du degré de confiance que l'on peut y accorder.

3.3.4.1 L'intervalle de confiance

L'incertitude liée au phénomène de la fluctuation d'échantillonnage peut être évaluée par la procédure classique de l'intervalle. La construction d'un telle intervalle peut être effectuée par la méthode l'erreur-type. Dans ce cas, la construction de l'intervalle de confiance nécessite la connaissance de trois grandeurs :

1. L'estimation du quantile
2. L'erreur-type
3. La forme de la distribution d'échantillonnage, considérée dans la plupart des cas comme "normale". Pour plus de détails, se référer à (Meylan et Musy1999). A partir d'un échantillon de précipitations, il s'agit donc d'estimer la **valeur extrême** susceptible d'être dépassée en moyenne toutes les N années (avec N=5,10, ... ou 100 ans = **durée de retour**)

Ces niveaux de retour sont associés à un **intervalle de confiance** :

- La valeur du niveau de retour est entachée d'une **incertitude** due à l'échantillon utilisé : ce n'est qu'une **estimation** de la vraie valeur.
- On utilise un **intervalle de confiance à xx%** = intervalle ayant xx% de chances de contenir la vraie valeur de la durée de retour.
- En production standard, seuil=70%, mais autres seuils sont également utilisés. Les bornes supérieures et inférieures de l'intervalle sont les valeurs les plus éloignées du résultat qui ne lui sont pas statistiquement différentes.

Chapitre 4 :

Présentation des outils, données et méthodes

4.1 Introduction

4.1.1 Problématiques liées à l'échantillonnage de la mesure : Données disponibles, régions et périodes d'étude

Le processus même de la pluie rend sa mesure incertaine et soumise à de nombreux effets d'échantillonnage. La principale raison de l'incertitude de la mesure de pluie est que la pluie est un flux, et physiquement il est généralement plus facile de mesurer les quantités scalaires que les quantités vectorielles.

En météorologie et en hydrologie, il est par exemple plus facile de mesurer une température, une pression ou une hauteur d'eau que de mesurer un flux (flux de chaleur, vents, ...).

Les effets d'échantillonnage s'expliquent par :

- (i) le caractère «erratique » de la pluie (forte variabilités intermittence).
- (ii) les échelles de mesure des capteurs qui ne sont pas toujours adaptées à cette variabilité, du moins à l'échelle où les objectifs de caractérisation ou de dimensionnement le nécessitent parfois. Certains capteurs vont mesurer une accumulation sur une petite surface tandis que d'autres mesurent une intensité instantanée sur de grandes surfaces.
- (iii) La mesure sera donc toujours associée à une incertitude d'échantillonnage. Le fait d'étudier les extra pluviométriques, et donc les événements rares va amplifier ces effets d'échantillonnage.

Ce chapitre présente les données disponibles pour réaliser l'étude et celles utilisées dans la suite de ce manuscrit. Le choix des données revêt une importance capitale pour la suite de l'étude et doit se faire en sélectionnant un capteur ayant une faible incertitude de mesure et permettant de réduire au maximum les effets d'échantillonnage.

L'objectif est de considérer avant tout l'évolution temporelle des valeurs extrêmes et de déterminer une région d'étude homogène afin de proposer par la suite des modèles spatiaux

4.1.2 Caractérisation d'une source de donnée :à la recherche de la donnée idéale

Cette section a pour but d'indiquer quelle serait la donnée idéale pour réaliser notre étude.

Les deux caractéristiques qui sont en lien avec les objectifs de l'étude concernent l'incertitude de mesure et les effets d'échantillonnage. Cette étude requiert des mesures ayant de faibles incertitudes concernant l'estimation de fortes pluies. Les effets d'échantillonnage peuvent se décliner de plusieurs façons.

- La source de données retenue devra avoir une faible incertitude de mesure (en particulier des fortes pluies). C'est la caractéristique absolument nécessaire pour mener à bien cette étude. Tout biais ou erreur de mesure systématique impacterait directement les statistiques calculées pour décrire les séries pluviométriques ou inférer les distributions. Des séries de mesures non-homogènes risqueraient de fausser les analyses climatologiques.
- La deuxième qualité essentielle pour l'étude des extrêmes est la longueur des séries. Que ce soit pour estimer de fortes périodes de retour, pour analyser l'évolution des extrêmes pluviométriques ou pour caractériser l'abatement spatio-temporel, de longues séries sont nécessaires pour obtenir un échantillon d'événements extrêmes suffisamment grand pour une description statistique robuste.

La liste qui suit dresse l'importance de chacune des autres caractéristiques d'une source de données en fonction des objectifs de l'étude :

- La zone et la période d'étude ont une importance capitale pour le volet climatologique de cette étude en particulier celui de la documentation de l'évolution des extrêmes et de son éventuelle disparité régionale. C'est aussi un point important pour la répartition spatiale de l'aléa.
- Une grande couverture spatiale est importante pour caractériser l'évolution des pluies extrêmes et leur répartition spatiale afin de donner un sens régional aux résultats.
- Une bonne fréquence d'échantillonnage spatial va être primordiale pour l'étude de l'abatement spatial et de la répartition spatiale de l'aléa.

4.2 Description générale des données de précipitations

Les données de précipitations correspondent à des cumuls enregistrés (en millimètres) sur un pas de temps donné. Si les données utilisées dans cette étude utilisent des cumuls journaliers,

Il est possible de regarder des précipitations sur un pas de temps plus petit (horaire par exemple).

Ces données sont enregistrées par des pluviomètres contrôlés quotidiennement : la précision de la mesure est donc généralement assez bonne, bien qu'un biais puisse apparaître en présence de vent ou de neige.

Les précipitations sont caractérisées par une proportion importante de jours *secs* avec un cumul enregistré de 0, qui correspondent aux jours non pluvieux. Il est usuel de distinguer en réalité plusieurs types d'enregistrements :

1. les jours **secs**, pour un cumul observé de 0mm,
2. les jours **humides**, pour un cumul positif inférieur à 1mm,
3. les jours **pluvieux**, pour un cumul supérieur (strictement) à 1mm.

Deux types de précipitations peuvent être distingués : les pluies **frontales** et les pluies **convectives**.

Les premières apparaissent généralement en hiver et montrent un champ spatial très étendu, de l'ordre de plusieurs dizaines de kilomètres. Les secondes apparaissent souvent en été lorsqu'un trou se forme entre la basse atmosphère où la masse d'air est chaude, et la haute atmosphère où l'air est plus froid. Ces dernières correspondent aux phénomènes orageux observables en été et en automne. En pratique, différencier les deux types de précipitations à partir des données est très compliqué, surtout si les cumuls de précipitations sont observés à un pas de temps journalier et sur un réseau de stations relativement espacé. Pour identifier le phénomène convectif, il est souvent nécessaire d'associer les données de précipitations avec un autre type de données, comme l'intensité des éclairs frappant le sol (Soriano *et al*, 2001; Tapia *et al.*, 1998) ou les courants aériens (Maraun*et al.*, 2011).

4.2.1 Jeux de données

Ces données proviennent de différentes sources : trois sources de données de précipitations au pas de temps journalier ont été utilisées au cours de l'étude. La première est enregistrée sur un petit nombre de stations réparties de façon espacée sur l'Ouest du pays mais contient plusieurs séries de longueurs moyennes mais ces mesures sont interrompues sur certaines années autrement dit cette information est discontinue dans le temps.

- Données GZOD

Le premier jeu de données de précipitations considéré est issu de la base de données publique de gzod disponible à l'adresse : eca.knmi.nl/.

Cette base de données contient des séries de précipitations, mais un traitement de ces séries a mis en évidence des enregistrements sur une période trop courte (environ 10 ans) pour certaines stations

pour que l'extrapolation de valeurs extrêmes soit raisonnable.

Les coordonnées géographiques des stations retenues dans notre étude sont représentées sur le tableau N°1

Nom	Latitude	lat	longitude	lon	Zs
Ain sefra	32 ° 46 N	32,74	00 ° 36 W	-0,58	1058
Benisaf	35 ° 18 N	35,3	01 ° 21 W	-1,38	68
El bayadh	33 ° 40 N	33,67	01 ° 00 E	1,02	1341
El kreider	34 ° 09 N	34,15	00 ° 04 E	0,07	1000
Ghazaouet	35 ° 06 N	35,1	01 ° 52 W	-1,86	4
Maghnia	34 ° 49 N	34,81	01 ° 47 W	-1,78	427
Mascara	35 ° 13 N	35,25	00 ° 09 E	0,16	511
Mecheria	33 ° 31 N	33,53	00 ° 17 W	-0,23	1149
Mostaganem	35 ° 53 N	35,93	00 ° 07 E	0,1	137
Oran senia	35 ° 38 N	35,63	00 ° 36 W	-0,62	90
Relizane	35 ° 44 N	35,75	00 ° 32 E	0,62	95
Saida	34 ° 52 N	34,9	00 ° 09 E	0,16	750
Sidi bel abbés	35 ° 12 N	35,19	00 ° 37 W	-0,63	475
Tlemcen	35 ° 01 N	35,02	01 ° 28 W	-1,47	246
Tiaret	35°21N	35,34	01°22E	1,46	983

Tableau N°1 - coordonnées géographiques des stations étudiées

La table N°1 recense les 15 stations choisies en indiquant son nom et :

- La latitude
- La longitude,
- L'altitude

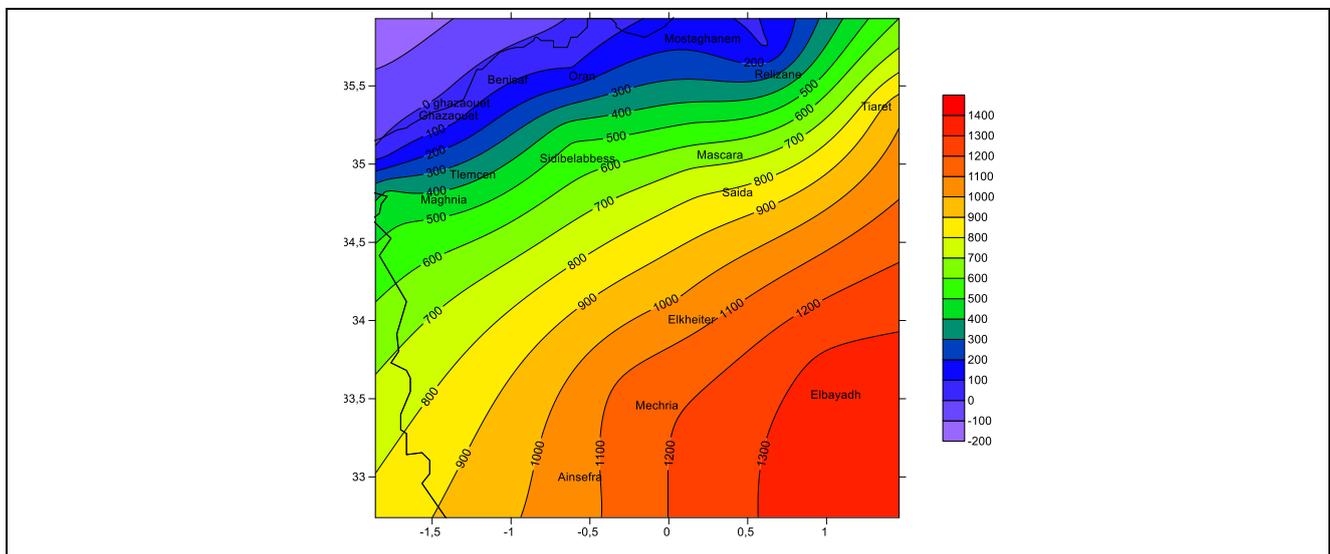


Figure N°14 - Positions des stations météorologiques du jeu de données avec un code couleur indiquant l'altitude par stations.

La figure N°14 affiche les altitudes des stations météorologiques choisies pour effectuer notre travail.

Les séries de précipitations de cette base de données présentent des dissimilarités.

Ainsi les données manquantes détectées sur les séries de précipitations de cette base de données ont été recherchées sur les données de précipitations affichées dans d'autres bases de données dont les sites sont les suivants :

<https://www.tutempo.net/clima/argelia.html>

<https://gis.ncdc.noaa.gov/maps/ncei>

La longueur des données varie fortement d'une station à une autre, mais certaines séries contiennent des trous de plusieurs années. Ces données n'ont pas suffisamment d'années disponibles et leur mesure de la pluie est trop incertaine pour atteindre notre objectif.

Ceci a nécessité de faire appel à d'autres sources de données afin de combler le vide observé sur cette première base de données.

C'est pourquoi d'autres jeux de données ont été utilisés.

- Les réanalyses :

Afin d'arriver à combler le vide existant dans l'information issue de la première base de données; nous avons utilisé les produits des réanalyses atmosphériques.

On rappelle qu'une réanalyse, ou analyse *a posteriori*, croise des données issues de l'observation directe ou indirecte et des données issues de la modélisation par interpolation. Cette combinaison permet d'obtenir une couverture spatiale et temporelle continue à l'échelle du globe (Poccard, 2000). Afin de mener les analyses, le champ de précipitations a été mesuré pour deux échéances afin d'arriver à une précipitation journalière à travers *les réanalyses ERA-intérim qui* sont fournies par l'Européen Center for Medium WeatherForecast (ECMWF; Uppalaet al. 2005). Disponibles pour notre cas de 1982 à 2015 leur résolution spatiale est de $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ et couvrent la fenêtre spatiale comprise entre 32 et 36° N de latitude et -2 et 1° de longitude pour limiter géographiquement notre zone d'intérêt constitué par l'Ouest du pays. Les climatologies en points de grille – autrement appelées «gridees» – construites à partir des données de stations et fournissant des valeurs réparties de façon uniforme dans l'espace.

Dans l'analyse des performances des modèles de climat, les climatologies en points de grille sont généralement préférées, car leur format est plus comparable aux sorties de modèles et que les observations sous-jacentes ont fait l'objet d'un traitement d'homogénéisation dans le temps, essentiel à leur utilisation en climat. Mais rares sont les climatologies qui fournissent des données quotidiennes sur de longues périodes de temps.

On note que les précipitations réanalysées ont été utilisées dans notre cas pour rechercher l'information perdue dans la première base de données en rapprochant la station au point de grille le plus proche.

- Données du NAZAPOWER

Une autre information importante concerne la longueur des séries. En effet, il est important d'avoir des séries longues pour l'étude des extrêmes.

Pour cela nous avons procédé à rechercher un troisième jeu de données qui se compose du total des postes pluviométriques retenus au pas de temps journalier.

Il s'agit d'une information issue d'un modèle doté de procédure de descente d'échelle de telle façon que la donnée interpolée soit délivrée au niveau de la station recherchée.

Ces données concernent la période 2015-2019 et ont été en particulier utilisées pour étendre la période d'étude au maximum dont un objectif de ne rater aucun phénomène extrême.

On souligne que cette information puisse être tirée des réanalyses mais nous avons évité de traiter les choses de cette façon pour une simple raison ; tester la capacité d'une base de données synthétique constituée par plusieurs jeux de données de reproduire avec fidélité le comportement des extrêmes pluviométriques tout en réservant une station de référence qui va servir comme base de critique des résultats obtenus, dans notre cas la station d'Oran a été la référence choisie car elle a été étudiée auparavant à base de données purement observées.

Le jeu de données contient des stations aussi bien en basse altitude qu'en montagne, avec un maximum de 1341m à Elbayadh car les orages sont connus pour être plus violents en haute altitude qu'en plaine Il est attendu donc que les valeurs extrêmes soient affectées par cette différence d'altitude. La combinaison des trois sources de données nous a amené à considérer les stations représentées sur les tableaux suivants, les caractéristiques climatologiques générales annuelles et saisonnières sont ainsi discutées.

	Jours secs	Jours humide	Jours pluvieux
Ainsefra	11410	1313	1156
Benisaf	10887	1231	1760
Elbayadh	10322	1673	1884 12-2019
Elkheiter	7712	3886	2281
Ghazaouet	7894	3570	2415
Maghnia	10821	1302	1756
Mascara	10097	1617	2165
Mechria	10726	1558	1595
Mostaganem	9946	1868	2065
Oran	10601	1445	1834
Relizane	6534	4622	2723
Saida	10025	1624	2230
Sidi-Bel-Abbès	10127	1747	2005
Tiaret	9887	1442	2550
Tlemcen	10695	1318	1866

Tableau N°2 -les caractéristiques climatologiques annuelles

	DJF			MAM			JJA			SON		
	JS	JH	JP	JS	JH	JP	JS	JH	JP	JS	JH	JP
Ainsefra	2790	345	294	2877	313	306	2997	314	185	2753	335	370
Benisaf	2384	353	692	2654	351	491	3189	227	80	2649	307	502
Elbayadh	2372	482	574	2617	386	793	2841	373	282	2547	434	477
Elkheiter	1742	1008	679	1912	933	516	2258	939	299	1786	1018	654
Ghazaouet	1729	849	851	1895	924	677	2447	875	191	1812	930	716
Maghnia	2485	327	617	2593	367	538	3108	275	113	2649	319	490
Mascara	2218	416	795	2465	422	609	2991	389	116	2434	380	644
Mechria	2501	452	476	2632	411	453	2972	295	229	2605	416	437
Mostaganem	2501	452	476	2400	517	579	2960	413	123	2402	464	592
Oran	2327	404	698	2564	423	509	3137	276	83	2581	333	544
Relizane	1284	1135	1010	1568	1130	798	2145	1288	155	1570	1109	779
Saida	2209	444		2403	422		2977			2446		
Sidi-Bel-Abbès	2185	503	741	2419	475	602	3041	324	130	2472	451	535
Tiaret	2530	307	592	2294	411	791	2519	356	621	2537	370	551
Tlemcen	2397	333	699	2546	388	562	3137	262	97	2622	388	488

Tableau N°3 -les caractéristiques climatologiques saisonnières.

Un examen des caractéristiques climatiques de notre région d'intérêt à l'échelle annuelle montre que le climat varie d'une position à l'autre, avec 19.62% de jours pluvieux à Relizane contre seulement 8.33% à Ainsefra. La saison hivernale constitue la saison la plus pluvieuse de l'année pour la majorité des stations. On note que les valeurs maximales sont enregistrées au cours de la saison automnale pour neufs stations et lors du printemps pour les cinq stations restantes ; aucun maximum n'a été détecté pendant l'hiver ce qui peut rejoindre l'idée que les précipitations les plus fortes sont plutôt automnales voire printanières ; ceci n'exclut en rien la présence des précipitations à caractère orageux lors de l'été pour lequel certains cumuls de précipitations importants ont été observés comme c'est le cas de la station d'Elkheiter avec un maximum de 135.9mm.

La station ayant enregistré le plus petit maximum est celle d'Oran au cours de l'été avec un cumul journalier de 18mm.

La valeur maximale de cumul de précipitations journalières de toutes les séries confondues est de 202.9mm, correspondant à la station météorologique de Tiaret, située dans l'extrême Est de notre domaine.

Au regard de ce résumé des données, il apparaît que les précipitations ont un caractère très hétérogène.

Par conséquent, il peut être prudent de regrouper les stations météorologiques par groupes homogènes en choisissant une région plus petite au climat semblable. Cependant, ce jeu de données est trop clairsemé spatialement pour réaliser un tel regroupement.

4.3 Méthode et outils

4.3.1 Le test de Mann-Kendall

Le test non-paramétrique de Mann-Kendall (Mann, [1945](#)) porte sur la présence d'une tendance monotone dans une série temporelle. Ce test est souvent utilisé pour l'analyse de données environnementales (Hipel et McLeod, [1994](#); Renard, [2006](#)). Le test de Mann-Kendall permet de choisir entre :

(Ho) : « La série ne présente pas de tendance » et (H) : « La série a une tendance monotone »

Il est construit de la façon suivante sur l'échantillon $X = \{X_1, \dots, X_n\}$:

1- La statistique de test de Mann-Kendall est:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (1_{\{X_j > X_i\}} - 1_{\{X_j < X_i\}})$$

2- Sous l'hypothèse nulle (Ho) :

$$\mathbb{E}[S] = 0 \text{ et } \text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18},$$

3 - On calcule :

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S > 0, \\ 0 & \text{si } S = 0, \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S < 0, \end{cases}$$

4. Sous l'hypothèse nulle (Ho). Z est asymptotiquement distribué selon la loi $\mathcal{N}(0,1)$.

Ce test est disponible sous plusieurs formes dans R:

la fonction Mann Kendall du package Kendall (Macleod, [2015](#)) ou la fonction [mk.test](#) du package trend (Pohlert, [2016](#)) en sont deux exemples. La première méthode sera préférée car elle permet de prendre en compte une série temporelle avec des valeurs manquantes.

Ce test suppose que les données (X_1, \dots, X_n) sont indépendantes. Pour vérifier cette assertion lors de son application, on utilise au préalable le test de Wald-Wolfowitz, comme indiqué par Sneyers ([1984](#)).

4.3.2 Test sur la corrélation: Wald-Wolfowitz

Le test non paramétrique de Wald et Wolfowitz ([1943](#)) porte sur la présence ou non de corrélation dans une série et est construit avec les hypothèses :

(Ho): La série ne présente pas de corrélation >> et

(H1): La série présente une corrélation temporelle >>

1. On recentre la série par $\tilde{X} := (\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_n)$, avec $\tilde{X}_i = X_i - \bar{X}$ ou $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ est la moyenne empirique
2. On pose $\tilde{X}_{n+1} = \tilde{X}_1$.
3. La statistique de test est :

$$R := \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{X}_i \tilde{X}_{i+1}}{\sum_{i=1}^n \tilde{X}_i^2} .$$

4. Sous l'hypothèse (Ho). R est asymptotiquement distribué selon la loi normale :

$$\mathcal{N} \left(-\frac{1}{n-1}, \frac{1}{n-1} \right)$$

La fonction `ww.test` du package R `trend` (Pohlert, [2016](#)) Permet de fournir une p-valeur associée au test de Wald-Wolfowitz.

4.3.3 Les percentiles pour diagnostiquer de valeurs extrêmes :

Par définition les percentiles sont les valeurs de la variable qui divisent la variable continue en [100](#) groupes égaux en nombre.

Dans notre cas, les percentiles représentent les valeurs qui divisent en 100 groupes la densité de probabilité des précipitations journalières traitées par saison qui est en faite une gaussienne. Les extrêmes étant définis comme des dépassements d'un seuil fixe, se regroupent dans les queues de la distribution avec respectivement des extrêmes froides à gauche et des extrêmes chaudes à droite à titre d'exemple mais le même traitement est appliqué pour le cas des précipitations (figure N°15).

Une multitude de diagnostics peuvent être envisagés pour étudier les extrêmes de précipitations quotidiennes. Une liste d'indices a été proposée :

- $pq90$: quantile d'ordre 90% de pluie (seuls les jours pluvieux – c'est-à-dire ceux où la Précipitation excède 1 mm/jour – sont pris en compte dans le calcul de cet indice),
- $pfl90$: pourcentage de la précipitation totale correspondant à des pluies quotidiennes excédant l'indice $pq90$,
- $pnl90$: nombre d'événements pour lesquels la précipitation quotidienne excède l'indice $pq90$.

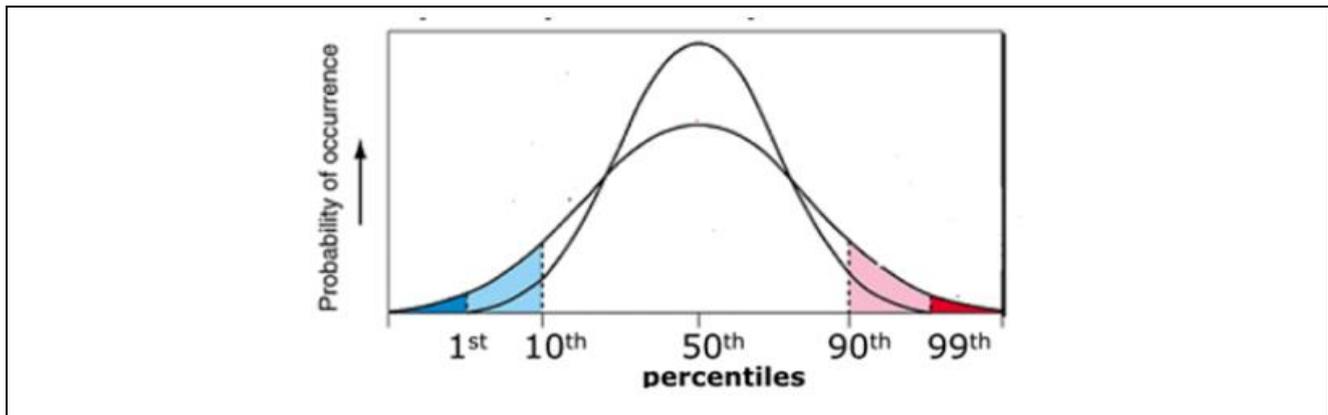


Figure N°15 - Répartition des percentiles et de leur probabilité d'occurrence (Sillman, 2005).

Ainsi les percentiles peuvent être utilisés pour caractériser et définir les événements extrêmes. En effet Stephenson (2008) a considéré les événements extrêmes détectés entre le 90ème et le 99ème percentile. Ceci est en accord avec Sillman (2005) qui considérait déjà le 99^e percentile comme un seuil permettant une sélection plus étroite.

La probabilité d'occurrence est plus faible pour ce dernier percentile que pour le 90ème.

L'avantage des percentiles est de prendre en compte les particularités du climat local.

Classiquement, les précipitations quotidiennes y sont alors analysées au travers des diagnostics suivants :

- quantiles d'ordre très élevés (Christensen and Christensen, 2004; Deque and Somot, 2008; Boberg et al., 2008, 2010; Lenderink, 2010),
- queue de distribution de la fonction de densité de probabilité (PDF) (Boberg et al., 2008, 2010),
- maxima annuels et/ou saisonniers (Raisanen and Joelsson, 2001; Beniston et al, 2007),
- événements de durée de retour typique de 5, 10, 20 et/ou 30 ans (Huntingford et al, 2003; Semmler and Jacob, 2004; Frei et al, 2006; Goubanova and Li, 2006; Beniston et al, 2007),
- nombre de jours où la précipitation excède un seuil absolu en mm/jour et contribution de ces cumuls à la précipitation moyenne totale.

4.4 PRESENTATION DU LOGICIEL UTILISE : LE LANGAGE R

R est un langage de programmation utilisé pour traiter et organiser des jeux de données afin de pouvoir y appliquer des tests statistiques plus ou moins complexes et présenter ces données graphiquement à l'aide d'une grande variété de graphiques disponibles.

Développé initialement au début des années 1990 par **ROSS IHAKA** et **ROBERT GENTLEMAN**, ce langage basé sur un autre langage statistique appelé **S** (oui, les informaticiens ont beaucoup d'imagination), est désormais maintenu et mis à jour par une équipe de développeurs au sein du [R Project](#). Cette structure garantit des mises à jour fréquentes et une communauté importante d'utilisateurs apporte son aide pour notamment développer de nouvelles fonctionnalités. Le langage R est en effet très implanté dans la communauté scientifique et universitaire et ses nombreux utilisateurs organisent même des conférences pour discuter des nouveautés disponibles sous R. Malgré quelques critiques généralement portées, ce langage est très utilisé pour diverses raisons:

- Il permet d'organiser et traiter des volumes importants de données de manière rapide et flexible. Comme il s'agit d'un langage de programmation, vous pouvez (à peu près) en faire tout ce que vous voulez.
- Il permet assez facilement de créer des graphiques paramétrables afin de pouvoir mieux visualiser le résultat de vos analyses.
- Il est entièrement gratuit et sous licence GPL, ce qui signifie que vous pouvez en télécharger les sources et les modifier. C'est notamment grâce à cela qu'une active communauté peut améliorer le langage en permanence.
- Il est multiplateforme ; vous pourrez en effet l'utiliser sous Windows, Mac OS ou Linux.

Dans le traitement des données nous allons utiliser dans un premier temps ce que l'on appelle package.

Les packages ou paquets (français) sont des collections de fonctions *R*, de données et de code compilé dans un format bien défini. Le répertoire où les paquets sont stockés s'appelle la bibliothèque (Library, en anglais). Rest livré avec un ensemble standard de paquets. D'autres sont disponibles pour téléchargement et installation. Une fois installé, ils doivent être chargés dans la session pour être utilisés. Ainsi pour une type d'analyse quelconque, il est recommandé de chercher le package approprié et de l'installer. Cela revient donc à avoir une parfaite maîtrise de l'analyse traitée sinon trouver le package devient une chose impossible. . L'installation des packages appropriés étant faite l'on peut donc passer au traitement proprement dit.

Il existe plusieurs package qui traite les phénomènes extrêmes c'est alors qu'on peut citer entre autre le package : *ExtRemes, POT, evd, evid*

4.5 Régression linéaire

4.5.1 Introduction

Le but de la régression simple (resp. multiple) est d'expliquer une variable Y à l'aide d'une variable X (resp. plusieurs variables (X_1, \dots, X_q)). La variable Y est appelée variable dépendante, ou variable à expliquer et les variables X_j ($j = 1, \dots, q$) sont appelées variables indépendantes, ou variables explicatives.

Remarque: La régression diffère de l'analyse de la corrélation où toutes les variables jouent un rôle symétrique (pas de variable dépendante versus indépendante). Toutefois, tout comme dans le contexte de l'analyse de la corrélation, il faut être prudent lorsqu'on formule des relations de causalité! L'existence d'une relation entre X et Y n'implique pas nécessairement une relation de causalité entre elles.

4.5.2 Représentation graphique

Avant toute analyse, il est intéressant de représenter les données. Le but de la régression simple est de chercher une fonction f telle que :

$$y_i \approx f(x_i)$$

Pour définir \approx , il faut se donner un critère quantifiant la qualité de l'ajustement de la fonction f aux données.

Ainsi une étude de régression simple débute toujours par un tracé des observations $(x_i, y_i), i = 1, \dots, n$. Cette première représentation permet de savoir si le modèle linéaire est pertinent. Le graphique suivant représente trois nuages de points différents

Graphique 1:

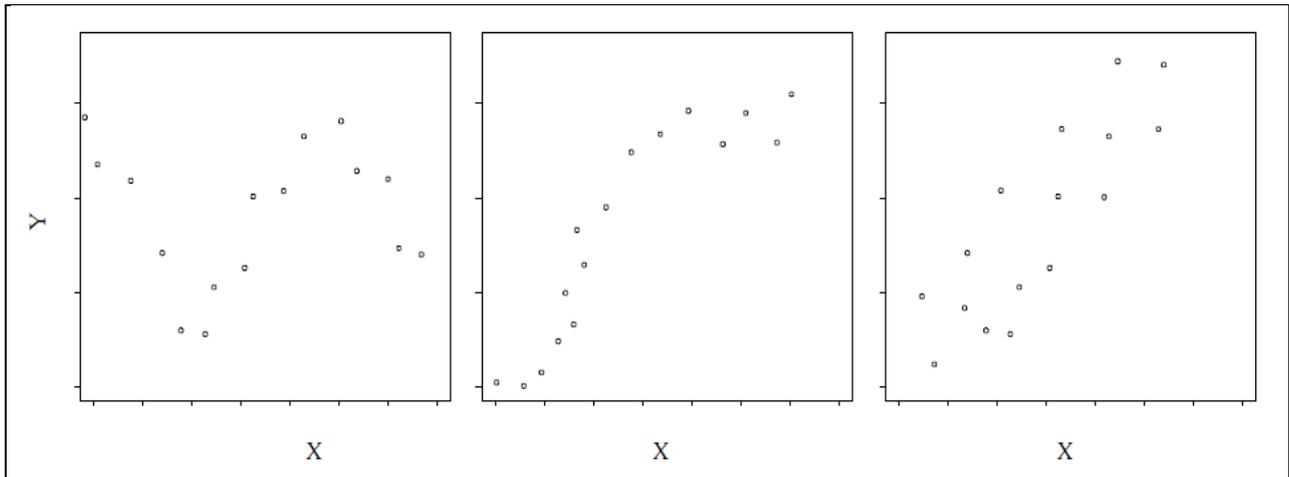


Figure N°16 – représentation de trois nuage de points différents

Au vue du graphique, il semble inadéquat de proposer une régression linéaire pour les 2 premiers graphiques, le tracé présentant une forme sinusoidale ou sigmoïdale. Par contre, la modélisation par une droite de la relation entre X et Y pour le dernier graphique semble correspondre à une bonne approximation de la liaison.

Chapitre5:

Estimation des pluies journalières extrêmes par deux méthodes :

I : maximum en bloc

II : supérieures à un seuil

Cas : de l'Ouest du pays

5. I : Estimation des pluies journalières extrêmes par maximum en bloc : cas de l'Ouest du pays

5. I.1 Introduction

La statistique classique s'intéresse essentiellement à la caractérisation de grandeurs « centrales » de la distribution d'une variable considérée. Le théorème de la limite centrale en est une illustration typique (Bacro, 2006) : lorsque le nombre d'échantillons de variables aléatoires (v.a.) indépendants et identiquement distribués (i.i.d.) 1, est suffisamment grand, la loi de l'estimateur de la moyenne arithmétique sur l'échantillon peut être approchée par une loi normale, ceci indépendamment de la loi des v.a. considérées.

Lorsque l'on s'intéresse à des caractéristiques « non-centrales », les grandeurs d'intérêt concernent les queues de distribution et la loi normale n'est plus adaptée. Un autre cadre théorique est donc nécessaire pour décrire les queues d'une distribution, c'est-à-dire ses extrêmes.

La Théorie des Valeurs Extrêmes (EVT, en anglais) traite du comportement stochastique la queue supérieure ou inférieure de la distribution initiale des (v.a.) (i.i.d.) Elle permet ainsi d'établir les propriétés de distribution des extrêmes (maxima ou minima), des statistiques d'ordre extrême ou intermédiaire, et des excès au-dessus (au-dessous) d'un seuil élevé(bas).

L'utilisation des lois de probabilité décrivant les séries complètes est bien souvent inadaptée pour décrire les valeurs extrêmes d'un échantillon. Ce travail se base sur la théorie des valeurs extrêmes qui offre un cadre statistique rigoureux pour sélectionner et modéliser spécifiquement les valeurs extrêmes. Cette théorie propose deux méthodes d'échantillonnages (BMA et POT) et les distributions théoriques associées (GEV et GPD).

Au cours de ce mémoire, l'approche BMA sera utilisée pour décrire le comportement asymptotique des pluies extrêmes sur l'Ouest du pays tandis que l'approche POT sera employée en complément de l'approche BMA pour documenter le changement de comportement théorique des extrêmes pluviométriques.

Dans les deux cas, nous adopterons une approche régionale qui vise à réduire les effets d'échantillonnage liés aux faibles nombres de valeurs sélectionnées en pratique dans nos séries de pluies.

Ce chapitre a pour but d'estimer le plus robustement possible la distribution des extrêmes pluviométriques dans la région ouest. Il concerne donc l'objectif de ce travail : la caractérisation de l'aléa pluviométrique dans la région et plus précisément sa répartition spatiale.

5.1.2 Tendance sur les valeurs extrêmes

Cette section s'intéresse à la stationnarité des extrêmes sur les données de précipitations issues des bases de données présentées dans la section précédente.

Dans un contexte de changement climatique, il est attendu que le phénomène de précipitations évolue au cours du temps. Plus précisément, il semblerait (Alexander *et al*, 2006) que les changements observés sur les précipitations aient lieu dans les événements extrêmes, que ce soit dans leur intensité ou leur fréquence, plutôt que dans les cumuls moyens.

Plusieurs études tentent d'évaluer ce changement dans les extrêmes, en regardant par exemple la présence de tendance dans les précipitations extrêmes (Klein Tank et K'onnen, 2003; Van den Besselaere *et al*, 2013; de Haan *et al*, 2014). Sur des données de précipitations européennes, Van den Besselaere *et al*. (2013) constatent par exemple une augmentation en fréquence des événements extrêmes et une diminution (en médiane) de la période de retour évaluée variant entre 2% et 58%. Cependant, les résultats montrent une importante variabilité spatiale qui puisse remettre en question la significativité des tests appliqués.

Pour évaluer l'impact du changement climatique dans les extrêmes, plusieurs tests sont disponibles en fonction du type de données dont on dispose. Renard (2006) liste plusieurs tests appliqués à des données hydrologiques (pour plus de détails voir chapitre précédent).

Cette section se concentre sur les tests non-paramétriques de Mann-Kendall pour tester la tendance et test de Wald-Wolfowitz pour tester la corrélation, qui sont appliqués aux valeurs extrêmes des quatre saisons de l'ensemble des stations étudiées.

Afin de tester l'évolution des valeurs extrêmes des précipitations, on utilise ces tests sur la série des maxima saisonniers de données journalières.

Les p-valeurs des tests pour la saison automnale sont données à titre indicatif dans la table(N°4) pour les séries de cumuls de précipitations enregistrées à certaines stations examinées de l'Ouest du pays.

Stations / Tests	Wald-Wolfowitz	Mann-Kendall
Ainsefra	0.4631	0,1262
Benisaf	0.656	0,0732
Elbayadh	0.839	0,0862
Maghnia	0.9752	0,3552
Mascara	0.0878	0,5114
Mechria	0.6532	0,2111
Oran	0.5182	0,0944
Saida	0.9316	0,1406
Tlemcen	0.0598	0,0538

Table N°4: Résultats du test de Mann-Kendall avec un risque α de 0.05.

On voit que le test de Wald-Wolfowitz indique une présence de corrélation dans certaines séries de maxima saisonniers ce qui dans ces cas empêche de conclure vis-à-vis du test de Mann-Kendall. Cependant, on voit aussi que les données ne permettent pas, avec un risque $\alpha = 0.05$, de rejeter l'hypothèse nulle (H_0) du test de Mann-Kendall.

Cela signifie que pour ces séries testées, les précipitations journalières ne semblent ni connaître de valeurs extrêmes plus fréquentes, ni voir leurs séries de maxima par blocs (saisonniers) affectées par une tendance.

Les deux tests sont appliqués à l'ensemble des stations provenant de la base de données synthétique en se concentrant sur les maxima saisonniers, qui semblent parfois présenter une corrélation d'après le test de Wald-Wolfowitz. Si en général les tests semblent confirmer que ces observations saisonnières ne sont ni corrélées ni affectées par une tendance, il subsiste néanmoins des stations sur lesquelles le test n'est pas concluant.

Cependant l'éventuelle absence d'homogénéité dans certaines séries n'est pas un facteur très invalidant dans ce travail car l'estimation de la tendance et des changements climatiques récents ne fait pas l'objet de notre étude.

Cependant dans la plupart des situations, l'incompatibilité avec la distribution théorique était due à des problèmes d'échantillonnage ou à d'autres raisons liées au comportement particulier des données réelles, que nous ne pouvons pas corriger et qui sont considérées comme des données de qualité car elles proviennent des réanalyses déjà traitées statistiquement.

Dans ce cas, il convient d'agir avec précaution lors de l'ajustement des modèles spatiaux.

Les maxima saisonniers de ces postes sont modélisés par une loi GEV (stationnaire), et analysés dans un cadre du maximum de vraisemblance puis Les l-Moments.

5. I.3 Block Maxima Analysis (BMA)

Le cadre statistique de cette partie est l'approche BMA (Block Maxima Analysis).

Les pluies maximales saisonnières obtenues à partir du réseau de l'ouest du pays pour la période 1982-2019 sont modélisées par un modèle GEV. Avant de procéder à une modélisation, il est primordial de disposer des données adéquates.

Dans le cas de la modélisation des extrêmes pluviométriques par le modèle GEV, les données adéquates sont les données des maximums par blocs obtenues en divisant les observations en des blocs (de même taille) et à choisir les maximums à l'intérieur de ces blocs. Pour cela, les données de chaque station synoptique ont été divisées en des blocs de longueur une saison. Nous avons donc obtenu un total de **148** blocs pour chaque station.

Vue que la procédure de calcul des paramètres de la GEV change en fonction de la méthode

d'estimation retenue pouvant influencer la distribution de la lois comme précisé plus haut, nous avons opté à décrire le comportement des extrêmes pluviométrique en appliquant la théorie des valeurs extrêmes GEV en adoptant en premier lieu la méthode du maximum de vraisemblance et en second temps la méthode des L-moment afin de cerner la différences entre les deux comportement et proposer une seule méthode jugée plus réaliste à la base des résultats trouvés.

5. I.3.1 Estimation des paramètres

Le problème de l'estimation des quantiles d'une distribution des extrêmes repose sur l'estimation de ses paramètres sur la base de l'échantillon disponible. Deux principales techniques pour estimer les paramètres des lois GEV et GPD sont le maximum de vraisemblance (Davison, 1984 ; Smith, 1984 ; Hosking and Wallis, 1987 ; Davison and Smith, 1990 ; Wilks, 1995) et la méthode des moments pondérés (Hosking and Wallis, 1987 ; Abild et al, 1992 ; Stedinger et al., 1993).

L'idée fondamentale de l'estimation par maximum de vraisemblance est de trouver un ensemble d'estimations de paramètres, telles que la probabilité d'obtenir les valeurs observées soit maximisée. La méthode de moments, quant à elle, est basée sur la possibilité d'évaluer n'importe quel moment statistique d'une distribution par ses moments empiriques correspondants, et d'exprimer ensuite les paramètres en fonction des moments.

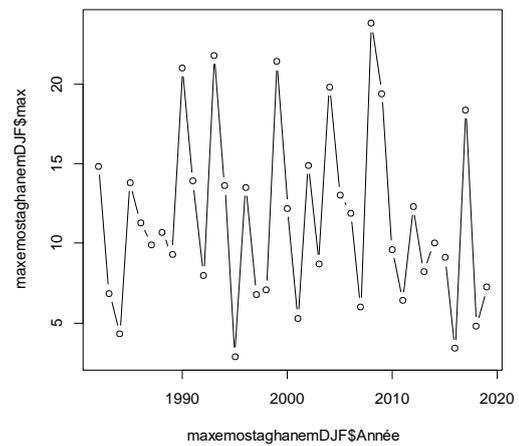
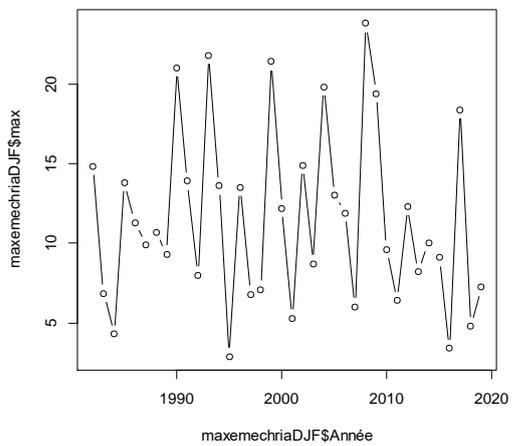
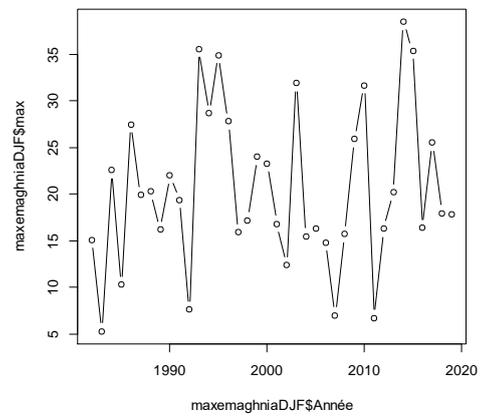
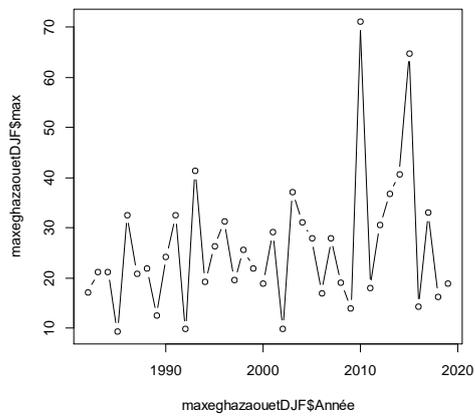
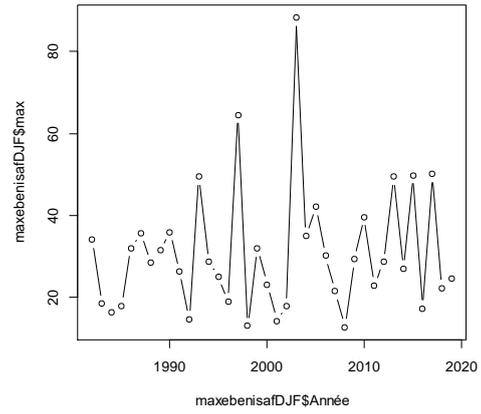
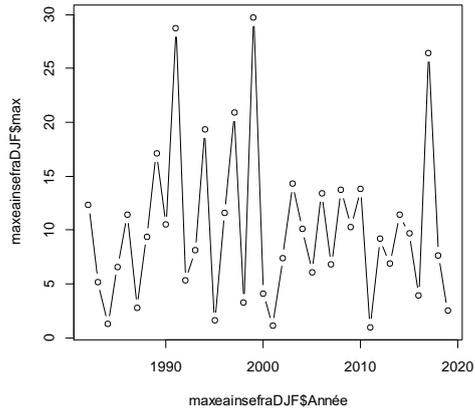
5. I.3.1.1 Méthode du Maximum de Vraisemblance

Le modèle dont on dispose possède trois paramètres. Ces paramètres peuvent être estimés par maximum de vraisemblance, si un modèle de vraisemblance est donné. Des méthodes asymptotiques typiquement associées aux estimateurs de vraisemblance permettent d'estimer un intervalle de confiance des estimateurs des paramètres et des quantiles. Les distributions étudiées vérifient un certain nombre de propriétés physiques, qu'il est intéressant de prendre en compte dans la procédure d'estimation. On représente ci-après les résultats de l'application de la théorie(BMA)Pour ces raisons, il parait intéressant d'utiliser une autre méthode comme celle les L-moment pour estimer les paramètres et leur distribution conjointe.

On rappelle que nous disposons d'une série sur l'ouest du pays avec 38 années de mesures journalières (1982-2019) pour 15 stations.

- Constitution et contrôle des séries :

Dans cette première étape, nous avons procédé à la construction des données saisonnières« bloc » qui vont servir par la suite comme base de l'application de la GEV.



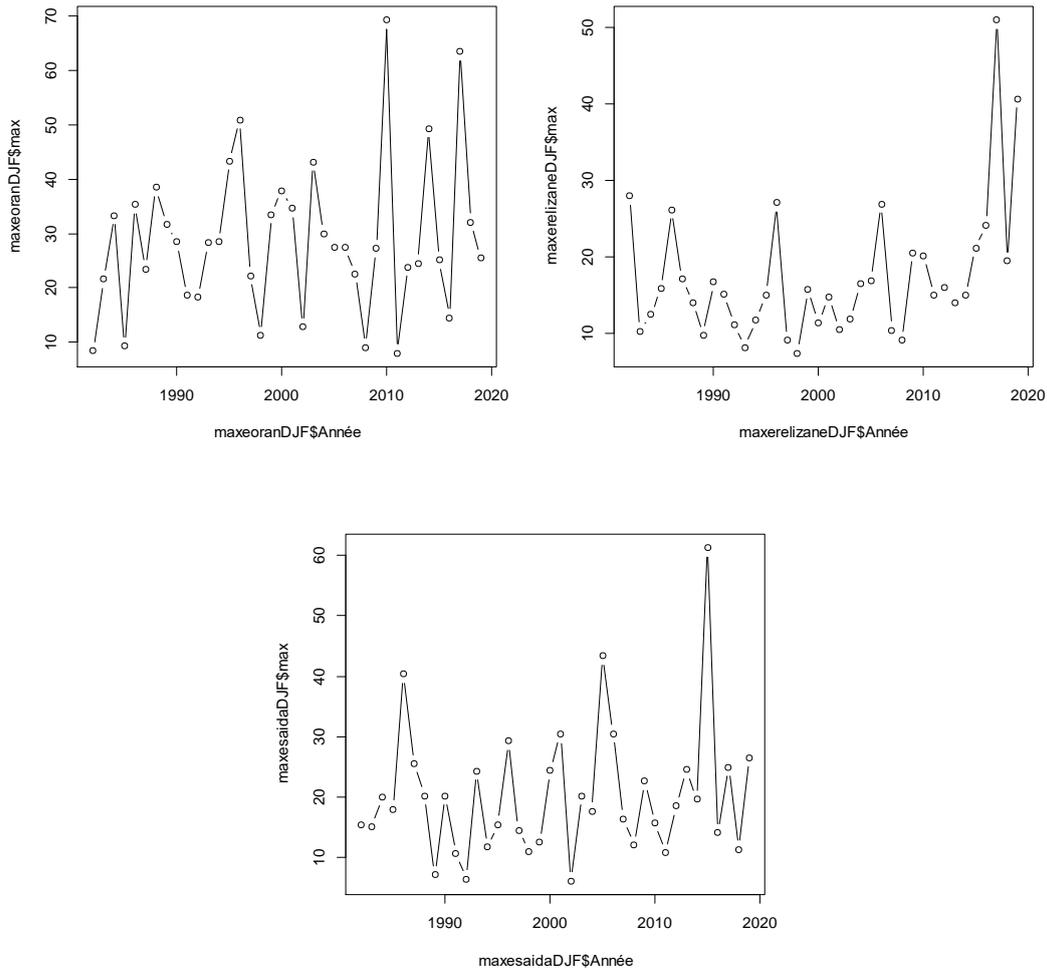


Figure N°17- Séries des maximums saisonniers pour la saison d’hiver pour quelques stations étudiées.

- Contrôle des séries de maximum en bloc :

Avant d’exposer les résultats de la théorie des valeurs extrêmes, un premier aperçu du comportement des extrêmes est donné par une analyse graphique des données. Un QQ-plot représente les quantiles empiriques en fonction des quantiles d’une distribution G choisie. Une correspondance linéaire entre quantiles observés et théoriques indique une bonne adéquation des observations à la loi G.

On représente dans ce qui suit certaines représentations graphiques pour certaines stations et relatives à certaines saisons pour discuter du comportement du modèle à base d’analyse graphique comme indiqué plus haut ; nous avons appliqué cette procédure pour l’ensemble des séries étudiées, nous avons jugé que le comportement du modèle théorique soit de qualité vu que l’ensemble des observations suit l’allure du modèle théorique et sont pleinement positionnées à l’intérieur de l’intervalle de confiance.

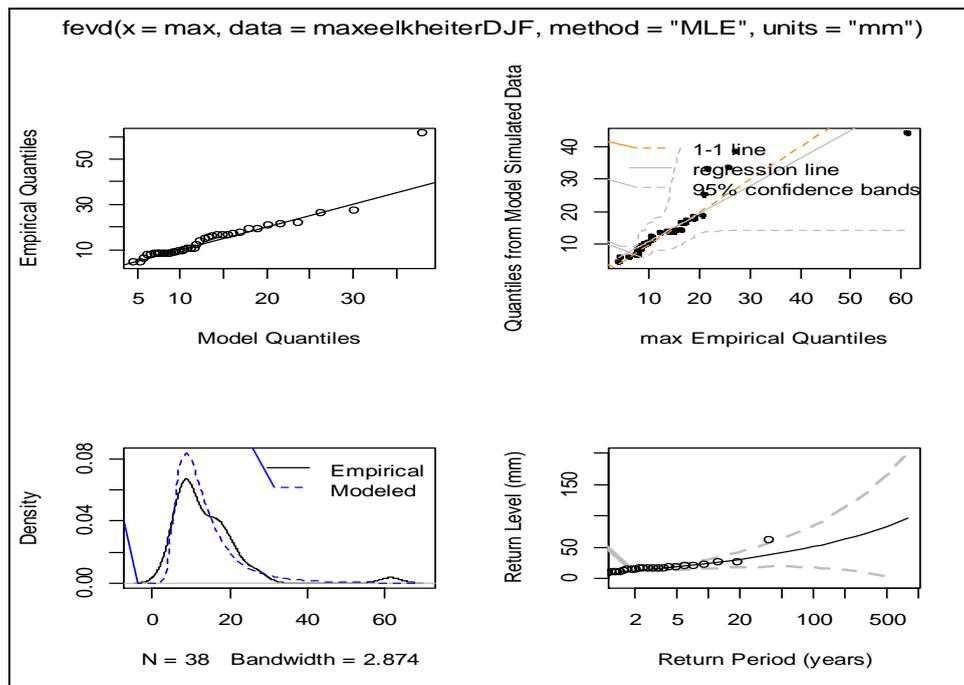


Figure N°18- Tracé du diagnostic d'ajustement de précipitations extrêmes à Elkheiter au cours de la saison d'hiver, à une distribution GEV pour la MLE. Du haut à gauche, en bas à droite il s'agit de la courbe des quantiles (QQ-plot), des quantiles (QQ2-plot), de densité et des niveaux de retour.

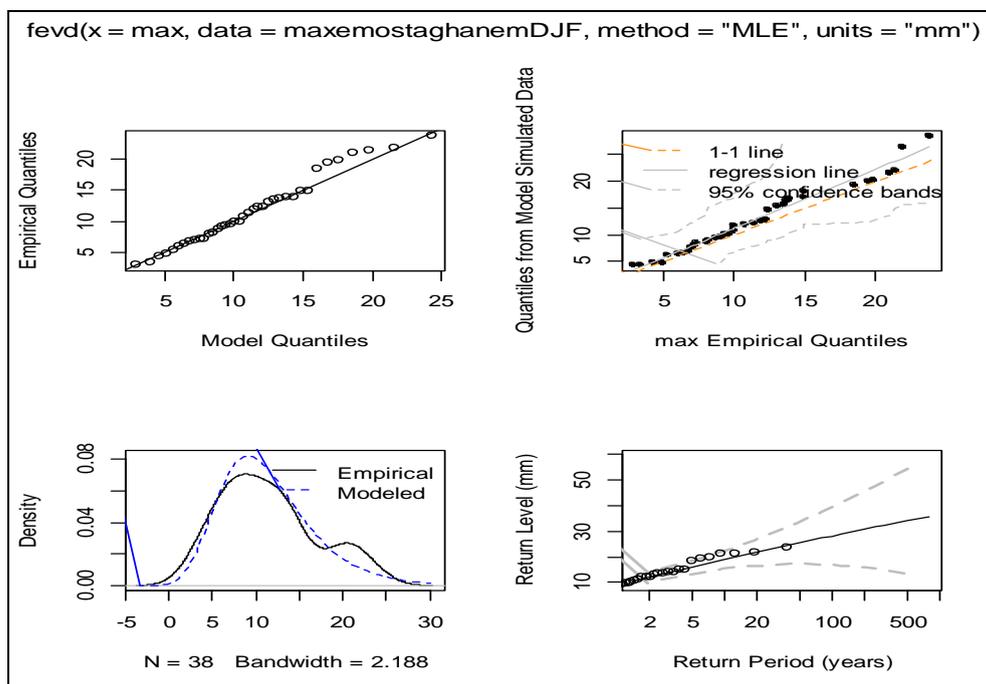


Figure N°19 - Tracé du diagnostic d'ajustement de précipitations extrêmes à Mostaghanem au cours de la saison d'hiver, à une distribution GEV pour la MLE. Du haut à gauche, en bas à droite il s'agit de la courbe des quantiles (QQ-plot), des quantiles (QQ2-plot), de densité et des niveaux de retour

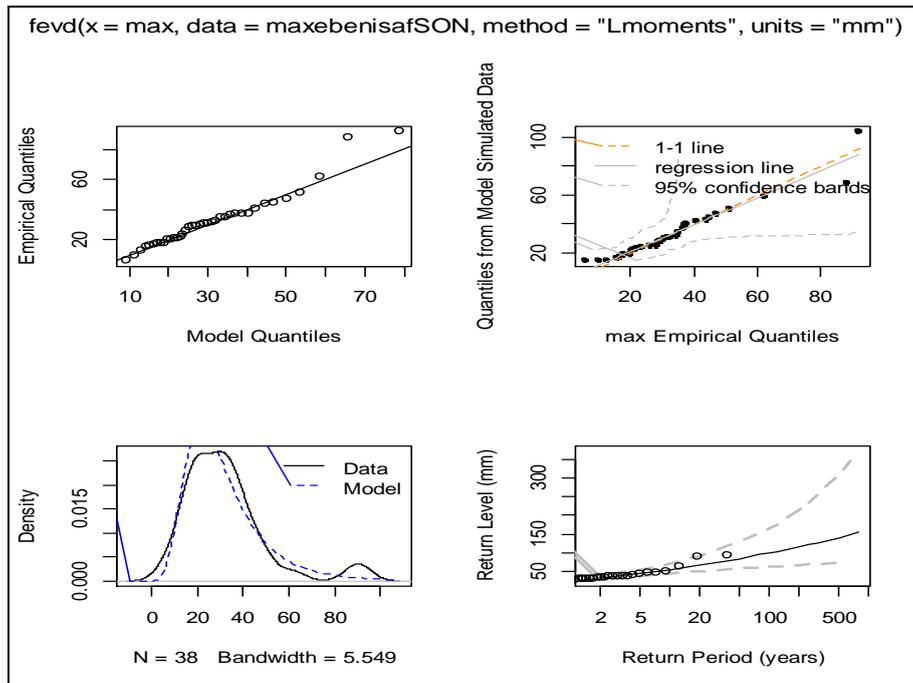


Figure N°20- Tracé du diagnostic d'ajustement de précipitations extrêmes à Benisaf au cours de la saison d'automne, à une distribution GEV par les L-moments. Du haut à gauche, en bas à droite il s'agit de la courbe des quantiles (QQ-plot), des quantiles (QQ2-plot) de densité et des niveaux de retour.

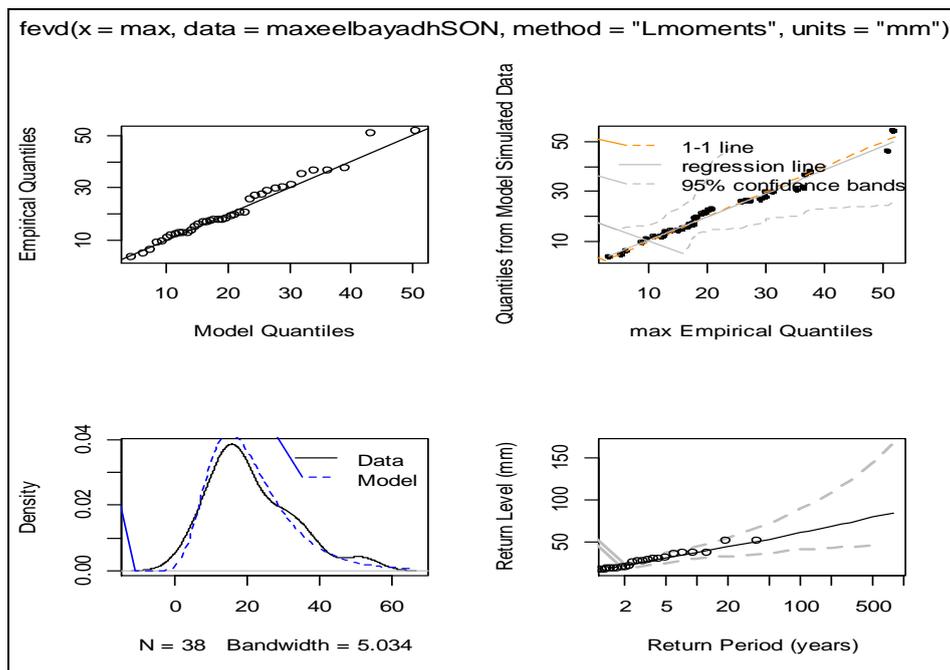


Figure N°21- Tracé du diagnostic d'ajustement de précipitations extrêmes à Elbayadh au cours de la saison d'automne, à une distribution GEV par les L-moments. Du haut à gauche, en bas à droite il s'agit de la courbe des quantiles (QQ-plot), des quantiles (QQ2-plot), de densité et des niveaux de retour.

- Estimation des paramètres pour GEV :

La maximisation numérique en utilisant le logiciel R conduit aux estimations du paramètre de forme présentées dans le tableau N°5.

Stations	Saison	DJF	MAM	JJA	SON
Ainsefra		Fréchet	Fréchet	Fréchet	Fréchet
Benisaf		Fréchet	Fréchet	Fréchet	Fréchet
Elbayadh		Fréchet	Fréchet	Fréchet	Fréchet
Elkheiter		Fréchet	Fréchet	Fréchet	Fréchet
Ghazaouet		Fréchet	Fréchet	Fréchet	Fréchet
Maghnia		Weibull	Fréchet	Fréchet	Fréchet
Mascara		Fréchet	Fréchet	Fréchet	Fréchet
Mechria		Weibull	Fréchet	Fréchet	Fréchet
Mostaganem		Weibull	Fréchet	Fréchet	Fréchet
Oran		Weibull	Fréchet	Fréchet	Fréchet
Relizane		Fréchet	Fréchet	Fréchet	Fréchet
Saida		Fréchet	Fréchet	Fréchet	Fréchet
Sidi-Bel-Abbès		Fréchet	Fréchet	Fréchet	Fréchet
Tiaret		Fréchet	Fréchet	Fréchet	Fréchet
Tlemcen		Fréchet	Fréchet	Fréchet	Fréchet

Tableau N°5 : Les estimations des paramètres de localisation, échelle et forme par la méthode de maximum de vraisemblances

On peut aussi noter que les estimations du paramètre de forme ζ varient de façon relativement importante. Cela indique notamment que la loi des précipitations journalières, selon la position, peut varier entre une loi :

- bornée à droite lorsque $\zeta < 0$ (domaine d'attraction de la loi Weibull inverse),
- à queue de distribution légère quand $\zeta = 0$ (domaine d'attraction de la loi Gumbel),
- à queue lourde, dans le cas où $\zeta > 0$ (domaine d'attraction de la loi Fréchet).

Le tableau ci-dessus indique cependant que les estimations du paramètre ζ sont contrôlées par une loi à queue lourde.

On constate que pour l'ensemble des saisons et pour toutes les stations la distribution GEV y est de type Fréchet exception faite pour les stations de Maghnia, Mechria, Oran et Mostaganem pour lesquelles la distribution GEV appliquée pour les maxima hivernaux est du type Weibull.

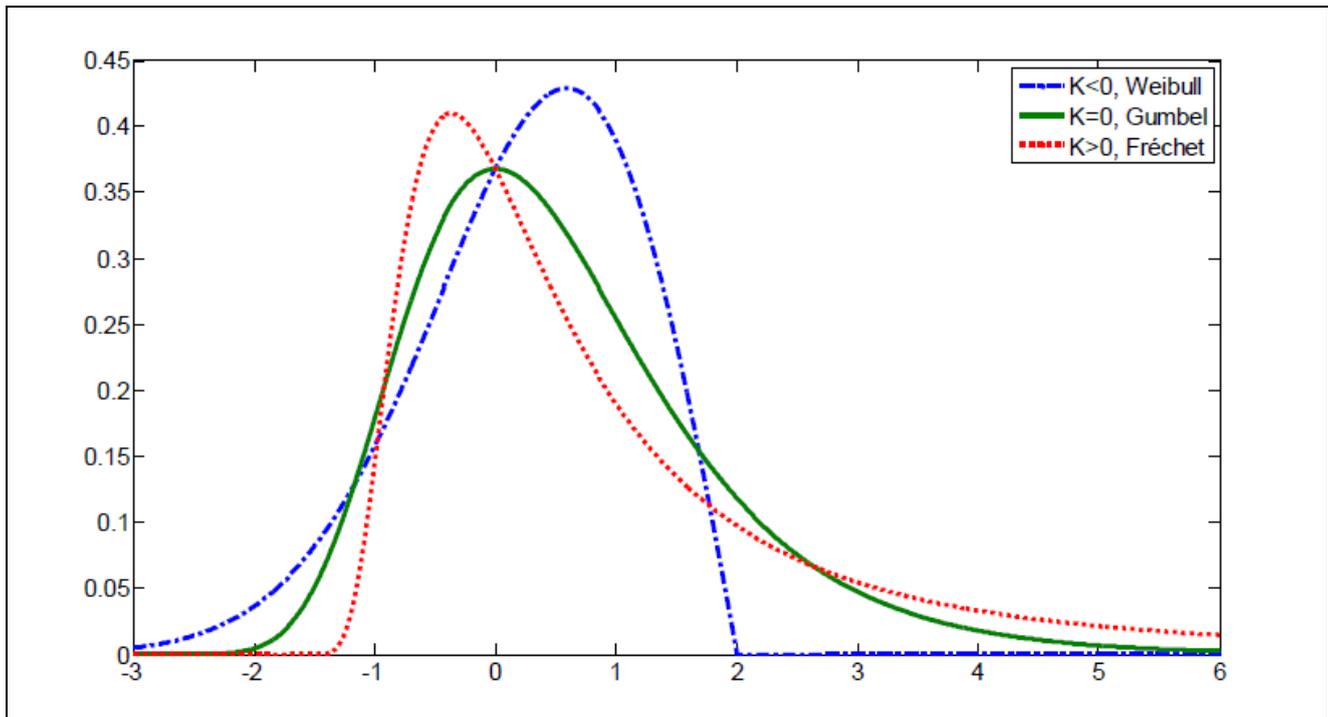


Figure N°22 - : La densité de la distribution de la loi GEV. Les courbes en trait discontinu (grands pointillés), trait continu et trait (petits pointillés) en rouge correspondent respectivement aux densités de la loi des valeurs extrêmes d'indices $\kappa = -0.5$, $\kappa = 0$ et $\kappa = 0.5$

On peut donc conclure que les maxima saisonniers relatifs à la région Ouest du pays et étudiés sur la période de 1982 à 2019 présentent majoritairement la forme de la courbe en rouge sur la figure ci-dessus.

- **Distribution statistiques des pluies journalières :**

Cette section évalue les différences d'événements extrêmes d'un point de vue spatial en étudiant les différences observées, entre plusieurs stations, sur les estimations paramètres de la loi GEV associée aux maxima saisonniers. Le cadre statistique de cette partie étant l'approche BMA (Block Maxima Analysis). Les pluies maximales saisonnières obtenues à partir du réseau de l'ouest du pays pour la période 1982-2019 sont modélisées par un modèle GEV.

On discute ensuite le choix d'une région homogène qui servira à comparer les modèles spatiaux et affiner l'étude du comportement spatial des extrêmes pluviométriques dans l'avenir.

• **Paramètres GEV site par site pour chaque saison :**

On considère les maxima saisonniers des séries de précipitations journalières de la base de données. Les trois paramètres de la loi GEV sont estimés de façon ponctuelle, c'est-à-dire en procédant indépendamment station par station, et sont affichés sur les figures (N°23), (N°24), (N°25) et (N°26).

L'ajustement ponctuel de la loi GEV par maximum de vraisemblance à chacune des séries du réseau montre que :

- le paramètre de localisation de la loi GEV a une organisation latitudinale claire, allant de 6 - 13 mm au Sud de la zone d'étude perdant cette particularité en direction du Nord où il mesure de 14 à 24 mm au Nord, au cours de l'hiver. L'organisation de ce paramètre lors des autres saisons présente plutôt des distributions géographiques contrôlées par aussi bien les latitudes que les longitudes et mesure des valeurs moins importantes au printemps et en été et assez proches des estimations hivernales pendant l'automne.
- le paramètre d'échelle de la loi GEV présente une organisation assez comparable à celle du paramètre de localisation ;
- le paramètre de forme de la loi GEV a une organisation spatiale erratique plus bruitée.

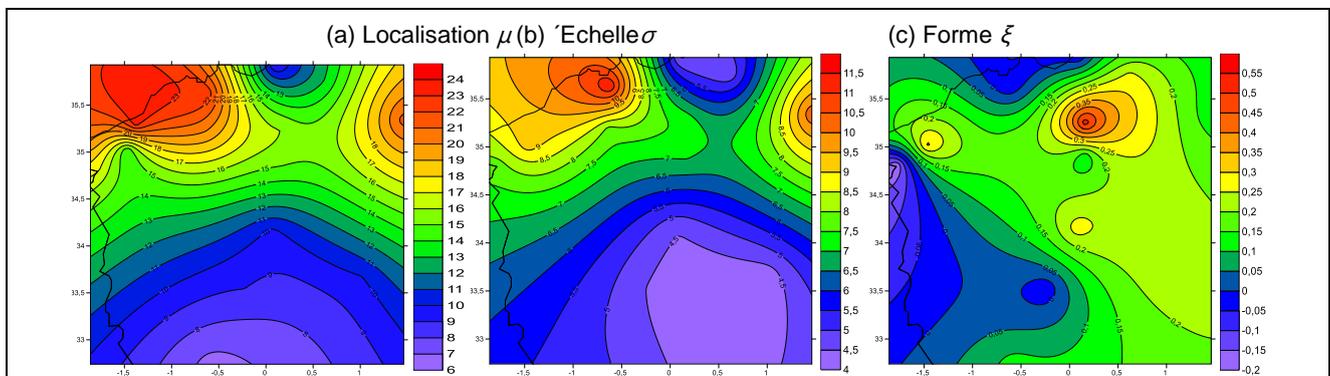


Figure N°23 - Représentation spatiale des trois paramètres de la loi GEV ajustée sur les maxima hivernaux de précipitations journalières en procédant station par station et à base de la MLE.

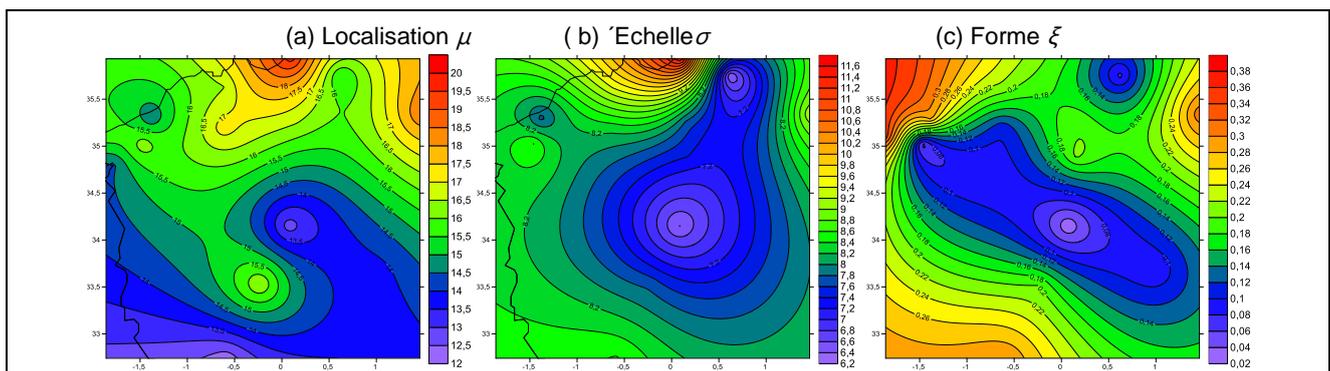


Figure N°24 - Représentation spatiale des trois paramètres de la loi GEV ajustée sur les maxima printaniers de précipitations journalières en procédant station par station et à base de la MLE.

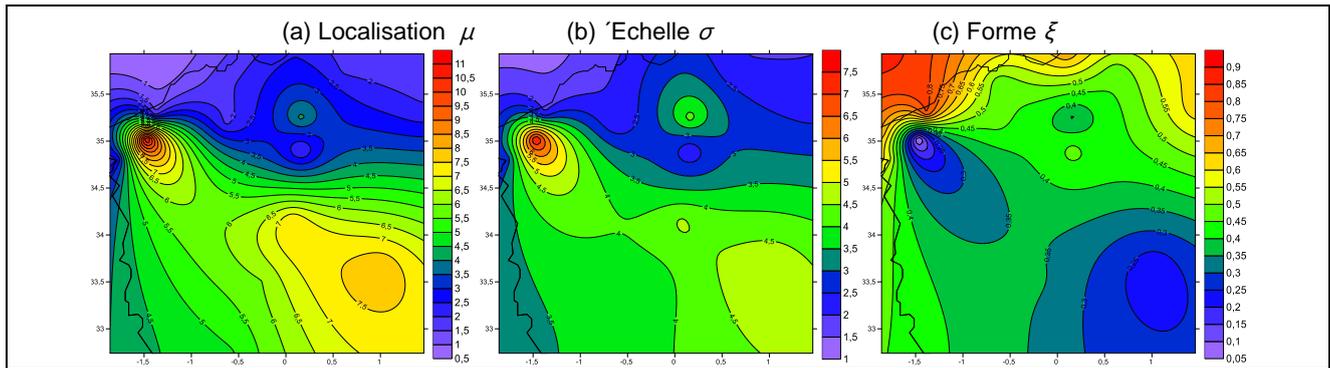


Figure N°24– Représentation spatiale des trois paramètres de la loi GEV ajustée sur les maxima estivaux de précipitations journalières en procédant station par station et à base de la MLE.

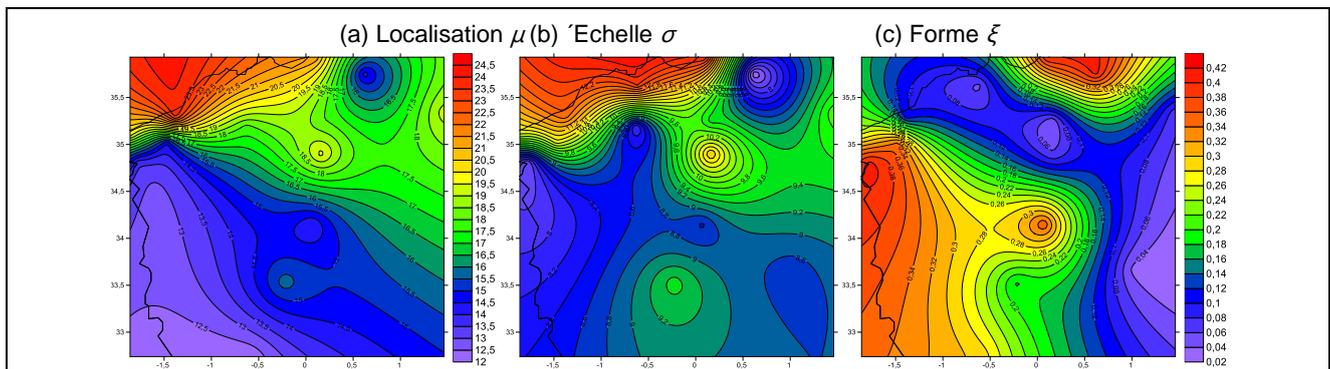


Figure N°26– Représentation spatiale des trois paramètres de la loi GEV ajustée sur les maxima automnaux de précipitations journalières en procédant station par station et à base de la MLE.

Les cartes montrent un motif spatial très clair pour les estimations ponctuelles des paramètres μ et σ , et a contrario une absence de forme claire pour le paramètre d'échelle ξ . Les régions du sud du domaine étudié sont très marquées par rapport au reste de la région regardée, avec une valeur nettement moins élevée pour les paramètres de localisation et d'échelle. Ces dernières deviennent plus importantes en direction du Nord pour être maximales sur l'extrême Nord-ouest ; ceci est particulièrement vrai pour la saison hivernale. Des distributions fortement différentes sont détectées sur les autres saisons aussi bien en termes de valeurs comme en termes de gradients mais les valeurs les plus basses réserveront leur positionnement vers le sud. Le paramètre de forme acquit une certaine organisation par rapport à celle observée pour la saison hivernale. La saison estivale affiche un comportement particulier des trois paramètres de la loi GEV, des valeurs moyennes sont détectées vers le Sud-est du domaine et s'adventent vers le Nord-ouest où elles mesurent les estimations les plus élevées. Ces constatations peuvent permettre de proposer des modèles GEV spatiaux pouvant représenter ces variations spatiales.

- Estimation des quantiles extrêmes :

On rappelle que la durée de retour d'un événement extrême soit l'intervalle de temps moyen séparant 2 réalisations de cet événement.

C'est un concept similaire à celui de la fréquence, à ceci près que dans le cas d'une fréquence, on traite l'échantillon global des valeurs observées pour un paramètre donné alors que dans le cas des durées de retour ce sont les seules valeurs extrêmes observées pour ce paramètre qui nous intéressent.

La rareté des données traitées, combinée au fait que les séries de mesures ne sont pas toujours très longues, fait que les échantillons sont généralement ténus. Cela nous oblige à mettre en œuvre des lois statistiques adaptées à la modélisation de tels événements de façon à extrapoler au mieux leur comportement dans le temps.

Parmi les échantillons traités, il arrive que l'on rencontre des événements exceptionnels très éloignés des autres événements déjà observés, dont il est difficile d'apprécier finement la durée de retour compte tenu des incertitudes des méthodes statistiques.

On présente sur les tableaux suivants les durées de retour des précipitations extrêmes pour chaque station et chaque saison estimées par un modèle empirique classique modélisant les pluies journalières basé sur un ajustement des paramètres des lois par la méthode du **maximum de vraisemblance**.

Stations/ Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
Ainsefra	20 (24.91 ; 25.14)	40 (26.61 ; 53.13)	18 (10.64 ; 25.10)	41 (26.44 ; 54.98)
Benisaf	50 (37.75 ; 61.56)	39.03 (26.98 ; 51.09)	15 (3.13 ; 25.86)	54 (41.94 ; 65.93)
Elbayadh	23 (16.77 ; 28.36)	33 (25.23 ; 40.35)	22.03 (15.53 ; 28.53)	36.03 (28.46 ; 43.60)
Elkheiter	24 (17.04 ; 30.71)	27.47 (22.16 ; 32.78)	23.41 (15.19 ; 31.63)	44 (28.08 ; 59.14)
Ghazaouet	42 (32.81 ; 50.74)	44.35 (29.54 ; 59.15)	18.06 (6.93 ; 29.19)	52.09 (36.30 ; 67.87)
Maghnia	31.36 (27.37 ; 35.36)	38.46 (27.43 ; 49.49)	15 (6.57 ; 22.67)	42 (26.07 ; 57.13)
Mascara	48.03 (25.98 ; 70.08)	38.46 (28.60 ; 48.32)	18.39 (10.74 ; 26.04)	41 (32.17 ; 49.04)
Mechria	19 (15.27 ; 22.08)	38.46 (28.60 ; 48.32)	19 (12.01 ; 25.56)	42.04 (30.57 ; 53.51)
Mostaganem	19 (15.27 ; 22.08)	52 (37.31 ; 66.18)	17.49 (5.81 ; 29.16)	67.42 (42.01 ; 92.82)
Oran	47.1 (38.98 ; 55.22)	44 (31.21 ; 56.22)	10.21 (4.82 ; 15.60)	51 (39.67 ; 62.31)
Relizane	27.36 (20.44 ; 34.28)	31.07 (24.98 ; 37.16)	10.21 (4.82 ; 15.60)	41 (25.49 ; 56.05)
Saida	33.37 (26.08 ; 40.67)	37 (26.14 ; 47.02)	10.21 (4.82 ; 15.60)	47 (36.16 ; 57.47)
Sidi-Bel-Abbès	41 (31.52 ; 49.70)	38.22 (29.37 ; 47.07)	10.21 (4.82 ; 15.60)	38.12 (29.97 ; 46.27)
Tiaret	44.33 (28.95 ; 59.71)	37 (28.91 ; 44.95)	29.25 (22.49 ; 36)	51 (32.55 ; 69.18)
Tlemcen	48.17 (36.89 ; 59.45)	48.41 (32.62 ; 64.20)	13.37 (5.30 ; 21.44)	43.4 (34.25 ; 52.54)

Tableau N°6 - Quantiles ayant une durée de retour de 10 ans issus de l'estimation des pluies journalières en utilisant la MLE et leurs intervalles de confiance.

Stations/ Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
Ainsefra	24.44 (33.10 ; 15.78)	53.46 (30.87 ; 76.06)	25 (11.23 ; 38.52)	55 (29.82 ; 79.42)
Benisaf	61 (40.98 ; 80.59)	51 (29.53 ; 72.15)	27 (0 ; 55.61)	65.22 (47.18 ; 83.26)
Elbayadh	28.2 (18.60 ; 37.83)	40 (27.97 ; 51.37)	28.1 (17.41 ; 38.96)	43 (31.62 ; 54.08)
Elkheiter	31 (19.00 ; 42.12)	32.3 (24.73 ; 39.98)	32 (17.41 ; 46.35)	59.3 (31.91 ; 86.72)
Ghazaouet	50.1 (36.34 ; 64.02)	59.42 (33.30 ; 85.53)	30.25 (4.99 ; 55.51)	67.17 (39.95 ; 94.40)
Maghnia	35 (29.57 ; 39.96)	49 (30.73 ; 67.13)	23.15 (6.44 ; 39.86)	57.35 (28.80 ; 85.90)
Mascara	69.39 (21.60 ; 117.18)	48 (31.63 ; 64.00)	26 (11.73 ; 39.87)	48.31 (35.85 ; 60.77)
Mechria	22 (16.59 ; 26.67)	48 (31.63 ; 64.00)	26 (13.51 ; 37.68)	53 (34.72 ; 71.09)
Mostaganem	22 (16.59 ; 26.67)	65 (40.91 ; 89.09)	30 (2.45 ; 57.08)	93.31 (46.89 ; 139.72)
Oran	54.41 (43.22 ; 65.59)	56 (34.93 ; 76.23)	15.33 (4.03 ; 26.64)	61.3 (44.45 ; 78.21)
Relizane	34 (22.21 ; 45.83)	37 (27.45 ; 45.84)	15.33 (4.03 ; 26.64)	56 (26.44 ; 85.09)
Saida	40.21 (29.07 ; 51.35)	46 (26.65 ; 64.77)	15.33 (4.03 ; 26.64)	56.33 (39.85 ; 72.81)
Sidi-Bel-Abbès	49 (33.93 ; 63.78)	46.03 (31.42 ; 60.63)	15.33 (4.03 ; 26.64)	46 (33.22 ; 58.14)
Tiaret	59.34 (32.26 ; 86.43)	44.07 (31.65 ; 56.48)	35.4 (25.42 ; 45.38)	90 (41.01 ; 124.85)
Tlemcen	58.32 (40.17 ; 76.48)	63.43 (34.75 ; 92.10)	22 (4.22 ; 39.67)	52 (38.45 ; 65.36)

Tableau N°7 - Quantiles ayant une durée de retour de 20 ans issus de l'estimation des pluies journalières en utilisant la MLE.

Stations/ Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
Ainsefra	27.48 (16.25 , 38.72)	63 (32.44 , 93.00)	30 (10.57 , 49.09)	64 (30.48 , 97.61)
Benisaf	68 (41.72 , 94.13)	59 (29.75 , 87.90)	38 (0, 85.64)	72.11 (49.45 , 94.77)
Elbayadh	32 (19.22 , 44.62)	44 (28.88 , 58.76)	32.18 (17.96 , 46.40)	47 (32.82 , 60.88)
Elkheiter	35.04 (19.62 , 50.47)	35.2 (25.82 , 44.58)	38 (18.11 , 57.58)	70.36 (32.95 , 107.76)
Ghazaouet	55.36 (37.73 , 73.00)	70 (34.35 , 105.63)	41 (1.06 , 80.10)	77.23 (40.53 , 113.94)
Maghnia	37 (30.38 , 42.66)	56 (31.74 , 79.69)	30 (5.01 , 54.82)	69 (28.88 , 108.56)
Mascara	86 (13.60 , 158.22)	54 (32.55 , 75.11)	31 (11.37 , 50.58)	53 (37.31 , 68.40)
Mechria	23.3 (16.98 , 29.61)	54 (32.55 , 75.11)	30.4 (13.82 , 46.98)	60 (36.37 , 83.27)
Mostaghanem	23.3 (16.98 , 29.61)	73.43 (41.52 , 105.34)	40.15 (0 , 83.44)	112 (47.40 , 176.52)
Oran	58.5 (45.01 , 71.99)	63.28 (36.06 , 90.50)	19.16 (2.37 , 35.95)	67.47 (46.32 , 88.61)
Relizane	38.45 (22.61, 54.29)	40 (28.40 , 51.57)	19.16641 (2.37, 35.95)	67 (24.81, 108.37)
Saida	44.4 (30.29 , 58.51)	52 (25.33 , 77.87)	19.16 (2.37 , 35.95)	62 (40.97 , 83.04)
Sidi-Bel-Abbès	54.01 (34.4 , 73.62)	51 (31.57 , 70.00)	19.16 (2.37 , 35.95)	50.3 (34.52 , 66.08)
Tiaret	70 (32.72 , 106.55)	48.3 (32.44 , 64.15)	39.03 (26.57 , 51.49)	102.27 (42.74 , 161.80)
Tlemcen	65 (40.95 , 88.18)	74 (34.07 , 113.40)	29 (1.72 , 56.17)	57 (40.27 , 73.71)

Tableau N°8- Quantiles ayant une durée de retour de 30 ans issus de l'estimation des pluies journalières en utilisant la MLE.

Stations/Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
Ainsefra	32 (16.25,46.78)	76.03 (33.11 , 118.94)	37.2 (8.29 , 66.12)	64.05 (30.48, 97.61)
Benisaf	77.69 (41.24 , 114.14)	70.25 (28.30 , 112.19)	57.4 (0 , 145.53)	72.11 (49.45 , 94.77)
Elbayadh	37.1 (19.44, 54.76)	49.21 (29.29, 69.14)	38 (17.94 , 57.45)	47 (32.82 , 60.88)
Elkheiter	41.41 (19.66 , 63.17)	39 (26.78 , 50.82)	47 (18.07 , 75.27)	70.36 (32.95 , 107.76)
Ghazaouet	62.23 (38.72 , 85.75)	86 (33.91 , 137.20)	58.45 (0 , 126.08)	77.23 (40.53 , 113.94)
Maghnia	39 (31.01 , 46.04)	65.09 (31.87 , 98.30)	41 (0.81 , 81.14)	69 (28.88, 108.56)
Mascara	112.3 (0 , 230.09)	62.08 (32.66 , 91.51)	39 (9.56 , 67.55)	53 (37.31 , 68.40)
Mechria	25.35 (17.13 , 33.57)	62.08 (32.66 , 91.51)	38 (13.33 , 61.69)	60 (36.37 , 83.27)
Mostaganem	25.35 (17.13 , 33.57)	85 (40.51 , 129.24)	58.1 (0 , 133.06)	112 (47.40 , 176.52)
Oran	64 (46.61 , 80.42)	74 (36.18 , 111.65)	25.12 (0 , 51.81)	67.47 (46.32 , 88.61)
Relizane	45 (22.30 , 67.13)	44.31 (29.08 , 59.54)	25.12 (0 ,51.81)	66 (24.81 , 108.37)
Saida	50 (31.23 , 68.61)	60 (21.74 , 97.69)	25 (0 , 51.81)	62 (40.97 , 83.04)
Sidi-Bel-Abbès	61 (33.92 , 87.88)	57.04 (30.63 , 83.45)	25.12 (0 , 51.81)	50.3 (34.52 , 66.08)
Tiaret	85 (31.21 , 137.80)	54 (32.61 , 74.82)	44 (27.45 , 59.87)	102.27 (42.74 , 161.80)
Tlemcen	73 (40.67 , 104.93)	89 (30.56 , 146.76)	41 (0 , 86.14)	57 (40.27 , 73.71)

Tableau N°9 - Quantiles ayant une durée de retour de 50 ans issus de l'estimation des pluies journalières en utilisant la MLE.

L'examen de la distribution géographique des cumuls pluviométriques ayant des durées de retours allant de 10 ans à 50 ans à travers une première lecture des tableaux ci-dessus, nous a amené à dégager les constatations suivantes :

- Un comportement pouvant différer d'une saison à une autre.

- Les cumuls pluviométriques observées sont plutôt contrôlés par les positions des sites et se trouvent donc influencés par des facteurs géographiques.
- Au cours de l'hiver les faibles cumuls sont observés sur les hauts plateaux devenant plus importants en direction du Nord pour atteindre les valeurs les plus importantes vers le littoral.
- Au cours de l'automne, des cumuls assez voisins sont détectés mais sont plus forts vers les régions littorales.
- La saison estivale donne un signal véhiculant une information divergente des points retenus pour les autres saisons, les cumuls les plus importants ayant différentes durées de retour sont mesurés sur les hauts plateaux confirment le caractère convectif connu des précipitations observées sur la région.
- La saison automnale affiche les cumuls les plus forts pour l'ensemble des durées de retour calculées mais respecte la règle de la diminution des cumuls observés en direction des latitudes Sud.

Ces résultats resteront plutôt descriptifs à la base d'analyse visuelle, nous recommandons de procéder à l'avenir à une méthode statistique permettant de confirmer sinon corriger les conclusions constatées et délivrer par le même biais des informations sur les caractéristiques statistiques particulières à chaque région.

5. I.3.1.2 Estimation des paramètres pour GEV par la méthode des L-moments

Nous avons considéré la stationnarité (la variation des extrêmes pluviométriques restes constants sur la période (1982-2019) précédemment observée et nous avons modélisé les séries de maximums

saisonniers avec un modèle GEV stationnaire et nous avons estimé ses paramètres μ, σ, ξ par la méthode des L-moment.

La maximisation de la fonction en utilisant le logiciel R conduit aux estimations du paramètre de forme ξ présentées dans le tableau (N°10).

Le paramètre étant la seule grandeur gouvernant le comportement des queues de la distribution, il permet de connaître laquelle des trois distributions (Gumbel, Weibull et Fréchet) décrit de façon optimale les maximums saisonniers de nos stations.

Saison Stations	DJF	MAM	JJA	SON
Ainsefra	GumbelFréchet	Fréchet	Fréchet	Fréchet
Benisaf	Fréchet	Fréchet	Fréchet	Fréchet
Elbayadh	Fréchet	Fréchet Gumbel	Fréchet	Fréchet Gumbel
Elkheiter	Fréchet	WeibullGumbel	Fréchet	Fréchet
Ghazaouet	Fréchet	Fréchet	Fréchet	Fréchet
Maghnia	Weibull	Fréchet	Fréchet	Fréchet
Mascara	Fréchet	Fréchet	Fréchet	Fréchet Gumbel
Mechria	WeibullGumbel	Fréchet	Fréchet	Fréchet
Mostaganem	WeibullGumbel	Fréchet	Fréchet	Fréchet
Oran	WeibullGumbel	Fréchet	Fréchet	Fréchet Gumbel
Relizane	Fréchet	Fréchet Gumbel	Fréchet	Fréchet
Saida	Fréchet	Fréchet Gumbel	Fréchet	Fréchet Gumbel
Sidi-Bel-Abbès	Fréchet Gumbel	Fréchet Gumbel	Fréchet	Fréchet
Tiaret	Fréchet	Fréchet Gumbel	Fréchet Gumbel	Fréchet
Tlemcen	Fréchet Gumbel	Fréchet	Fréchet	Fréchet

Table N°10- Estimation du paramètre de forme par la méthode des L-moments.

Nous avons ainsi constaté que :

- La distribution GEV à base des L-moment est rigoureusement de type Fréchet sans que la distribution de Gumbel n'y soit candidate pour la plupart des stations et au cours des différentes saisons.
- La distribution GEV est du type Fréchet mais que la distribution de Gumbel y est candidate également pour certaines stations au cours de certaines saisons.
- La distribution GEV est du type Weibull, mais que la distribution de Gumbel est candidate pour l'ajustement des maxima saisonniers des stations de Mechria, Mostaghanem et Oran et que la distribution GEV soit du type Weibull sans que la distribution de Gumbel n'y soit candidate pour la station de Maghnia.
- **Estimation des quantiles extrêmes**

Nous avons appliqué le même traitement que celui de la section précédente mais nous avons uniquement changé la méthode d'estimation des paramètres de la GEV qui cette fois-ci sont estimés à la base de la méthode des L-moments. Les résultats de ce traitement sont exposés dans les tableaux qui suivent :

Stations/Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
Ainsefra	20 (15.42 , 24.16)	40 (26.72 , 52.71)	17.43 (12.74 , 24.18)	41 (28.91 , 55.71)
Benisaf	50 (40.25 , 61.27)	39 (28.72 , 50.15)	12 (7.07 , 17.51)	54.22 (42.68 , 67.25)
Elbayadh	23 (17.90 , 28.28)	33.1 (26.14 , 41.53)	22.02 (16.82 , 28.32)	36.47 (29.45 , 45.10)
Elkheiter	24 (17.91 , 32.24)	28 (22.73 , 32.91)	24 (15.56 , 36.12)	43 (29.19 , 59.23)
Ghazaouet	42 (33.65 , 52.45)	44 (32.04 , 60.28)	16.09 (9.88 , 23.80)	52 (38.09 , 67.80)
Maghnia	32 (27.64 , 36.72)	38.42 (29.17 , 48.35)	13.45 (8.80 , 19.65)	41 (30.08 , 52.41)
Mascara	44 (33.36 , 55.24)	41.29 (31.66 , 52.99)	18 (11.99 , 25.87)	41 (33.39 , 49.14)
Mechria	19.04 15.73 , 22.25	39 (29.61 , 47.74)	18.44 (12.93 , 24.54)	42.1 (31.47 , 54.89)
Mostaganem	19.04 (15.66 , 22.75)	52 (40.02 , 64.90)	15 (9.49 , 21.49)	66.21 (45.54 , 92.55)
Oran	47.37 (39.48 , 56.21)	44 (33.42 , 57.56)	9.38 (6.37 , 12.88)	42 (51.52 , 63.82)
Relizane	27.26 (21.57 , 34.43)	31.32 (25.76 , 37.52)	9.38 (6.73 , 12.86)	40 (29.08 , 53.91)
Saida	34 (26.94 , 40.72)	36.08 (29.24 , 43.51)	9.38 (6.57 , 12.74)	47.44 (38.98 , 57.61)
Sidi-Bel-Abbès	41 (32.36 , 49.75)	38.43 (31.59 , 46.58)	9.38 (6.65 , 12.40)	38.28 (31.13 , 47.23)
Tiaret	44 (32.12 , 57.85)	37.44 (30.09 , 44.76)	30 (23.58 , 36.76)	50.08 (30.93 , 72.24)
Tlemcen	48.49 (39.04 , 61.24)	47.37 (35.57 , 60.09)	12.19 (7.45 , 17.68)	44 (34.53 , 54.38)

Tableau N°11- Quantiles ayant une durée de retour de 10 ans issus de l'estimation des pluies journalières en utilisant les L-moment

Stations/ Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
Ainsefra	24.36 (18.33, 31.53)	55.4 (32.95, 80.49)	23.13 (15.65, 35.06)	54.36 (35.48, 79.75)
Benisaf	60.19 (45.71, 77.90)	49 (34.42, 67.09)	17.4 (9.33, 27.74)	66.39 (49.01, 88.19)
Elbayadh	28.25 (20.96, 38.36)	40 (30.19, 52.13)	28 (19.82, 38.35)	44 (33.45, 56.57)
Elkheiter	31 (21.27, 45.66)	32.28 (26.22, 39.61)	35.39 (19.61, 57.23)	59.25 (35.69, 89.58)
Ghazaouet	50.62 (38, 66.66)	59 (38.26, 87.14)	24 (13, 37.60)	65.79 (44.88, 89.26)
Maghnia	36.04 (30.60, 42.26)	49 (34.76, 65.26)	19.13 (11.15, 29.87)	54 (36.36, 74.48)
Mascara	39 (55.21, 74.68)	52 (36.96, 70.81)	25 (14.70, 37.96)	49 (37.59, 60.33)
Mechria	22 (17.67, 26.69)	48 (34.37, 62.85)	25.13 (15.71, 36.46)	58 (37.28, 75.40)
Mostaganem	22 (17.57, 26.83)	64 (46.80, 86.26)	21 (12.05, 32.05)	91.34 (55.13, 139)
Oran	55 (43.67, 66.95)	55.41 (38.99, 82.18)	12.46 (7.89, 18.68)	62.18 (48.12, 80.42)
Relizane	34 (24.76, 46.28)	37.34 (29.64, 47.16)	12.46 (8.30, 18.10)	52 (34.03, 78.95)
Saida	41 (30.55, 52.02)	43 (33.54, 54.10)	12.46 (8.43, 18.31)	57 (44.51, 73.00)
Sidi-Bel-Abbès	48.37 (36.52, 62.47)	46 (35.58, 57.96)	12.46 (8.17, 17.37)	47 (35.21, 59.98)
Tiaret	58.24 (38.48, 82.07)	45 (34.70, 55.50)	36 (27.51, 46.29)	75 (40.09, 116.59)
Tlemcen	58.1 (44.39, 78.00)	59.07 (41.45, 79.76)	18.13 (9.89, 28.81)	52.33 (40.20, 67.83)

Tableau N°12 - Quantiles ayant une durée de retour de 20 ans issus de l'estimation des pluies journalières en utilisant les L-moment.

Stations/ Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
Ainsefra	27.22 (19.87 , 36.43)	66.4 (36.81 , 102.56)	27 (17.18 , 44.30)	64 (39.20, 99.45)
Benisaf	67 (48.85 , 90.71)	56 (37.45 , 79.62)	22 (10.43 , 36.26)	74 (52.27 , 104.01)
Elbayadh	32.02 (22.59 , 45.70)	44 (32.06 , 59.43)	32 (21.47 , 45.90)	48 (35.09 , 64.10)
Elkheiter	35.42 (22.88 , 55.89)	35 (27.50 , 44.24)	45 (21.82 , 75.30)	71.17 (39.51 , 114.99)
Ghazaouet	56 (40.34 , 77.26)	69 (41.84 , 110.05)	29 (14.26 , 49.74)	75 (48.94 , 106.09)
Maghnia	38.2 (31.99 , 45.66)	45 (37.87 , 77.08)	23.11 (12.67 , 37.51)	63 (39.95, 94.59)
Mascara	62 (42.31 , 88.33)	59 (39.98 , 84.52)	29.29 (16.23 , 47.50)	53 (39.73 , 67.37)
Mechria	24 (18.7 , 29.4)	53.42 (36.56 , 74.12)	30 (17.40 , 45.13)	61.03 (39.90 , 90.88)
Mostaganem	24 (18.36 , 29.80)	71.23 (50.22 , 101.32)	25 (13.54 , 40.38)	109.38 (61.11 , 184.21)
Oran	59 (45.58 , 73.48)	63 (42.10 , 100.20)	14.45 (8.75 , 22.62)	69 (51.61 , 91.38)
Relizane	38.02 (26.70 , 55.80)	41 (31.31 , 53.69)	14.45 (9.22 , 22.42)	60.13 (37.55 , 96.84)
Saida	45.14 (32.55 , 60.96)	47 (35.16 , 61.45)	14.45 (9.37 , 22.21)	63 (47.06 , 83.40)
Sidi-Bel-Abbès	53 (38.59 , 72.07)	50 (37.65 , 66.28)	14.45 (9.11 , 20.99)	52 (37.81 , 70.66)
Tiaret	68 (42.20 , 102.27)	49 (36.76 , 61.92)	40 (29.34 , 52.73)	94 (45.02 , 154.52)
Tlemcen	64 (47.30 , 89.64)	66.49 (44.58 , 94.67)	23 (11.16 , 38.22)	58 (42.44 , 77.53)

Tableau N°13 - Quantiles ayant une durée de retour de 30 ans issus de l'estimation des pluies journalières en utilisant les L-moment.

Stations/Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
Ainsefra	30.93 (21.57 , 43.85)	83 (41.39 , 138.86)	32.25 (19.18 , 57.60)	77 (44.30, 129.05)
Benisaf	76 (51.92 , 108.73)	65 (40.65 , 99.27)	28 (11.98 , 50.86)	84 (55.9 , 125.40)
Elbayadh	37.28 (24.31 , 58.31)	49 (34.00 , 69.33)	37 (23.34 , 59.04)	53.29 (37.63, 74.85)
Elkheiter	42.07 (25.18 , 72.72)	38.28 (29.36 ,50.92)	59.46 (25.52 , 107.56)	89.19 (44.92 , 158.23)
Ghazaouet	63.11 (43.66 , 93.49)	84 (45.7 , 143.80)	37.43 (16.43 , 71.48)	87.49 (53.84, 134.60)
Maghnia	41 (33.14 , 50.21)	65 (41.61 , 97.08)	29 (14.55 , 53.37)	75 (43.85 , 124.36)
Mascara	72 (45.53 , 112.54)	68.24 (43.85 , 108.08)	36 (18.08 , 65.14)	59 (42.26 , 78.80)
Mechria	26 (19.70 , 32.89)	61.14 (39.03 , 90.94)	37 (19.66 , 62.24)	71.27 (43.55 , 112.95)
Mostaganem	26 (19.34 , 33.58)	81 (53.95 , 124.97)	31 (15.50 , 53.99)	136.49 (68.99 , 250.12)
Oran	64.1 (47.50 , 83.15)	73.39 (45.98 , 130.01)	17.17 (9.67 , 29.57)	77 (55.48, 108.53)
Relizane	44 (29.05 , 69.22)	46 (33.23 , 64.30)	17.17 (10.24 , 29.28)	72 (41.76 , 128.72)
Saida	51 (35.30 , 72.93)	52 (37.51 , 70.65)	17.17 (10.39 , 28.05)	69 (50.38 , 98.49)
Sidi-Bel-Abbès	59 (40.77 , 85.74)	55 (39.99 , 76.10)	17.17 (10.04 , 26.74)	59 (40.12 , 84.76)
Tiaret	82 (46.10 , 131.68)	54 (39.36 , 72.04)	44.21 (31.58 , 61.42)	124.02 (51.84 , 222.34)
Tlemcen	71.3 (50.39 , 104.92)	77 (48.03 , 118.57)	29.27 (12.75 , 54.92)	64.49 (45.28 , 92.29)

Tableau N°14- Quantiles ayant une durée de retour de 50 ans issus de l'estimation des pluies journalières en utilisant les L-moment

Nous avons remarqué que les résultats issus de l'application de la GEV en utilisant la méthode des L-moments comme outils d'estimations de paramètres de la GEV délivrent des conclusions et constatations peu différentes dans certains cas et fortement différentes voire divergentes dans d'autres cas que celles issues de la GEV à base du maximum de vraisemblance :

En termes de type de la distribution GEV ; même si les valeurs calculées des paramètres de la loi GEV : position, échelle et forme sont numériquement différentes, il n'ya presque pas de différences

importantes à signaler, les deux méthodes d'estimations se comportent d'une façon similaire dans la majorité des cas où la distribution était majoritairement de type Fréchet.

En termes de cumulés calculés pour les différentes saisons et pour des durées de retour allant de 10 ans à 50 ans, nous avons remarqué que l'estimation des paramètres par la méthode des L-moments donne de bons résultats surtout en termes des bornes de l'intervalle de confiance car dans certains cas l'estimation par la méthode du maximum de vraisemblance propose un intervalle de confiance trop large qui puisse regrouper plusieurs quantiles à la fois dont l'une des bornes est affichée 0 mm dans certains cas.

Dans ce contexte, l'amélioration de l'estimation des quantiles dépend surtout de l'estimateur du paramètre de forme même s'il ne change pas de signe.

Les résultats de la loi GEV à base des L-moments montrent une amélioration des estimateurs du paramètre de forme et du quantile.

Distribution statistiques des pluies journalières:

Une méthode d'estimations à base des L-moment est mise en œuvre et appliquée pour estimer les quantiles ainsi que les paramètres de la GEV.

On présente dans cette section les résultats graphiques de cette application pour les quatre saisons étudiées.

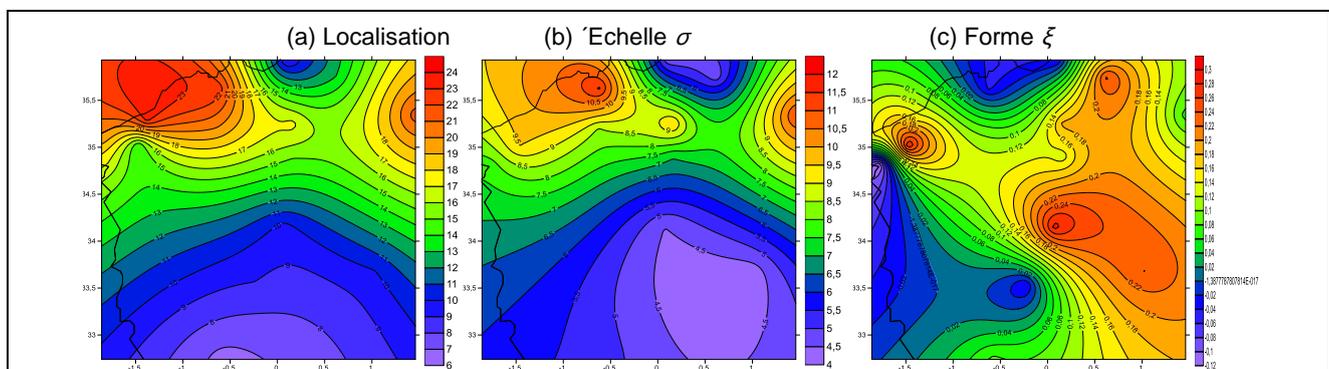


Figure N°27- Représentation spatiale des trois paramètres de la loi GEV ajustée sur les maxima hivernaux de précipitations journalières en procédant station par station et à base des L-moments.

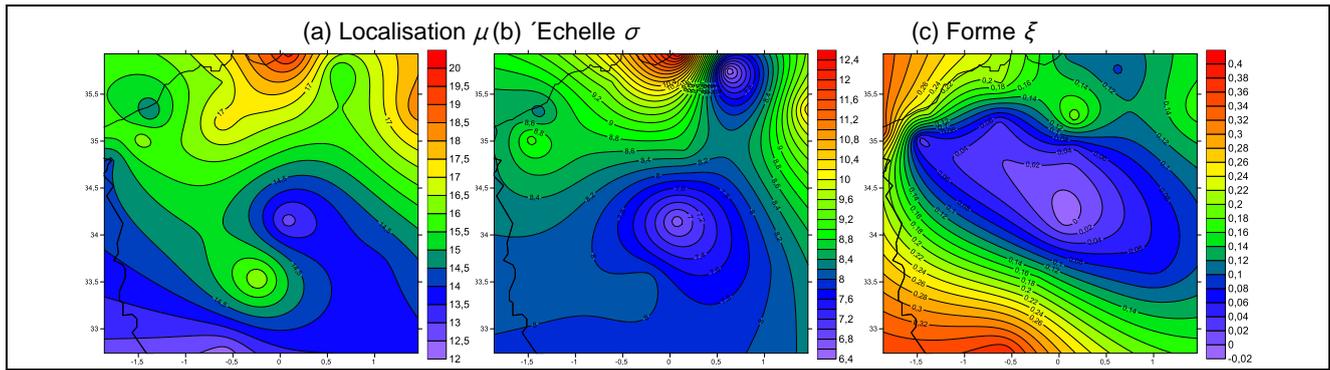


Figure N°28– Représentation spatiale des trois paramètres de la loi GEV ajustée sur les maxima printaniers de précipitations journalières en procédant station par station et à bases des L-moments

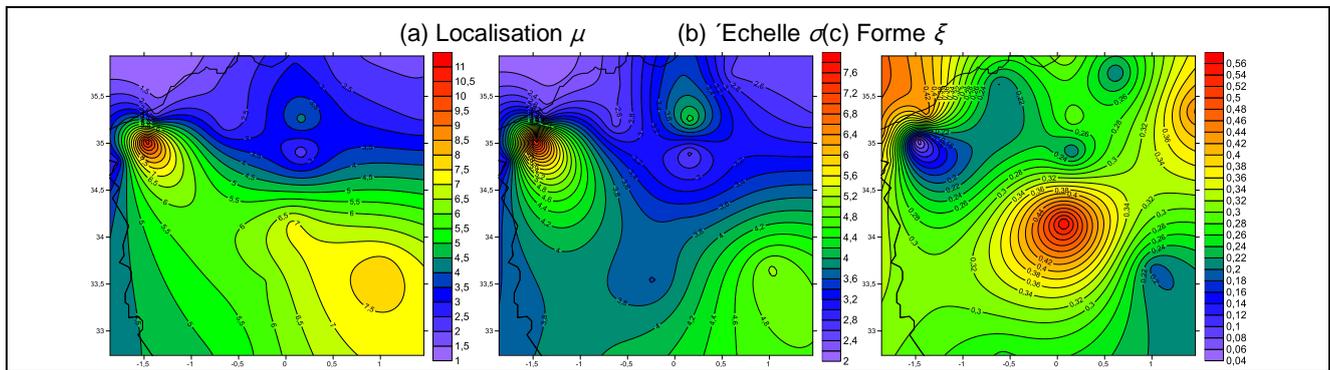


Figure N°29- Représentation spatiale des trois paramètres de la loi GEV ajustée sur les maxima estivaux de précipitations journalières en procédant station par station et à bases des L-moments.

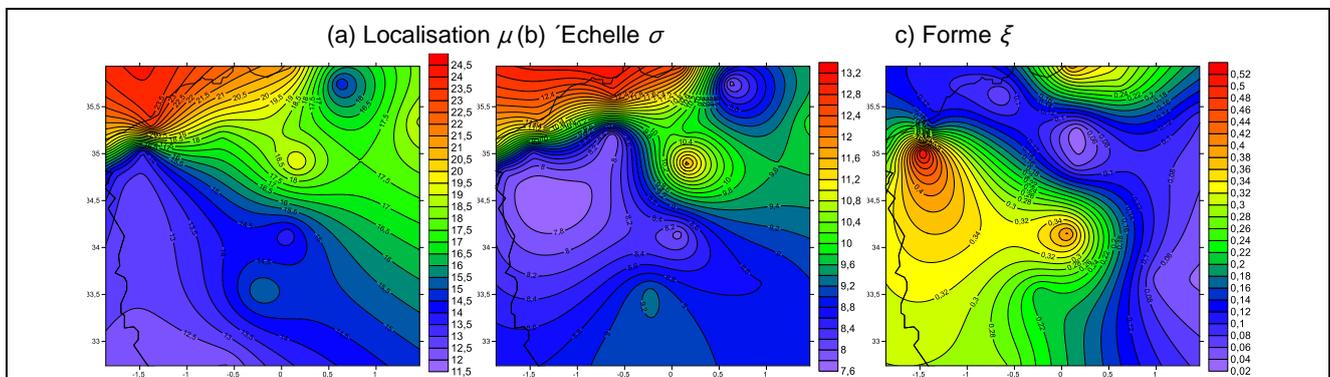


Figure N°30- Représentation spatiale des trois paramètres de la loi GEV ajustée sur les maxima automnaux de précipitations journalières en procédant station par station et à base des L-moments.

Lors de l'application de la méthode d'estimation des paramètres de la GEV sur les maxima saisonniers ; on a constaté que les distributions des trois paramètres de localisation, échelle et forme changent d'une saison à une autre.

Les deux premiers paramètres conservent leur organisation latitudinale montrant une augmentation des valeurs de ces paramètres en direction du Nord pour atteindre les estimations les plus fortes sur

l'extrême Ouest au cours de la saison hivernale alors que le troisième présente une configuration différente dont les valeurs les plus importantes se situent vers le Sud-est et s'étendent jusqu'au Nord-est.

La saison printanière met en évidence une représentation fortement différente de ces paramètres et qui se distingue par une organisation plus claire du paramètre de forme qui montre un gradient assez serré sur le Sud-ouest où les valeurs observées sont les plus fortes et qui perdent de leur ampleur vers le centre du domaine en s'organisant en noyaux. Les paramètres de localisation et échelle changent de comportement mais réservent leurs faibles estimations vers le sud, ceci est également vrai pour la saison automnale mais avec des différences importantes en paramètre de forme.

Le comportement estival de la distribution géographique des paramètres de la loi GEV se distingue largement des autres saisons ; les mesures les plus faibles sont détectées vers le Nord et deviennent plus importantes au sud avec une organisation inclinée vers le Sud-est.

5. I.4.4 Analyse du climat actuel : Approche statistique

5. I.4.4.1 Introduction

Le régime climatique d'un lieu donné a ses propres caractéristiques assez bien définies et souvent stables dans le temps à l'échelle de quelques décennies (Sauquet et al,2006). Cela conforte l'approche probabiliste basée sur la EVT. L'étude des événements extrêmes de précipitations consiste donc à analyser, en tenant compte des variations saisonnières du climat, les séries historiques avec des lois de distribution de valeurs extrêmes.

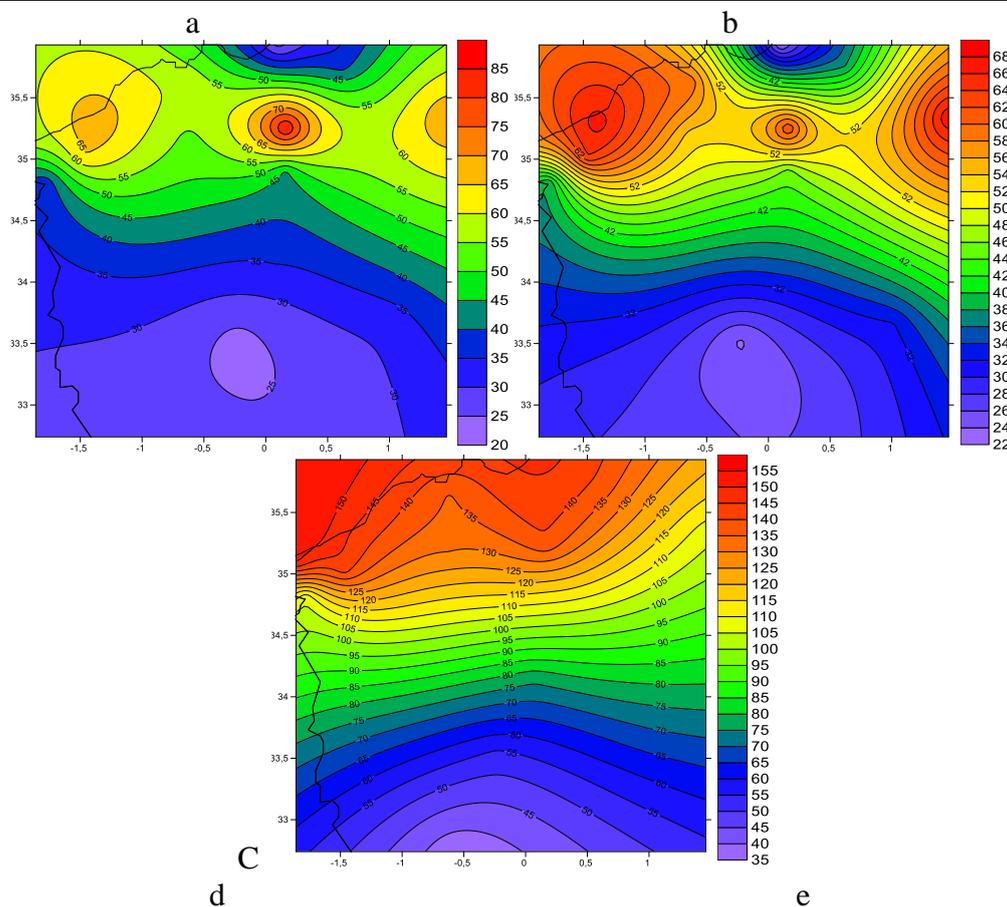
Dans ce chapitre nous allons diagnostiquer les caractéristiques des événements extrêmes en précipitations pour la période allant de 1982 à 2019 à partir des distributions GEV des maximas saisonniers. Nous allons tout d'abord examiner la compatibilité des données (les observations des stations météorologiques) avec la théorie statistique des valeurs extrêmes. Les climatologies moyennes et extrêmes de précipitations observées seront ensuite présentées. Nous évaluerons un lien éventuel entre les valeurs de retour de 30 ans et les valeurs moyennes.

Nous avons choisi d'exprimer les extrêmes en termes de niveau de retour de 30 ans estimé à partir de la distribution correspondante des maximas. En effet la sélection de durée de retour doit offrir un compromis entre la rareté d'événement climatique et les incertitudes liées à son estimation. Le choix de durée de 30 nous paraît équilibré lorsque l'on étudie le climat sur la période de 30 ans. Les valeurs des extrêmes climatiques attendues, statistiquement parlant, une fois tous les 30 ans représentent un écart important par rapport au climat moyen.

Pour avoir une idée de l'ordre de grandeur de cet écart nous avons calculé les valeurs moyennes saisonnières des précipitations sur la période de temps considérée. Les moyennes de précipitations ont été estimées à partir des mêmes séries que les extrêmes.

5.1 4.4.2 La climatologie des événements extrêmes

Compte tenu de la répartition inégale des stations d'observations et de la variation spatiale importante des valeurs extrêmes, nous présentons ici les cartes de la climatologie des précipitations ayant une durée de retour de 30 ans. La climatologie des précipitations pour quatre saisons est présentée sur les Figures ci-après avec les précipitations extrêmes (valeurs de retour de 30 ans) en haut et les précipitations moyennes en bas pour les méthodes d'estimation des paramètres de l'ajustement.



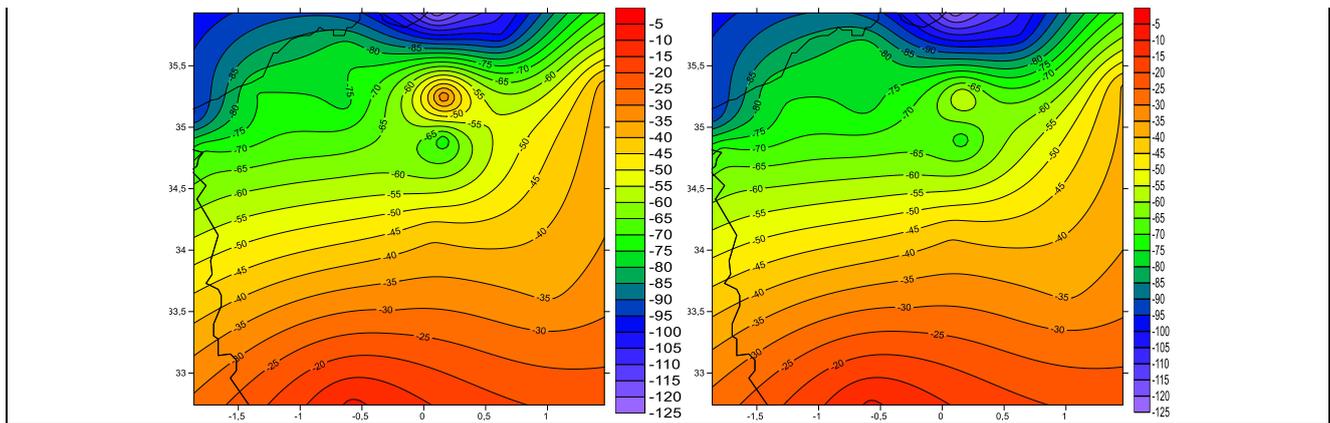


Figure N°31- Valeurs de retour de 30 ans (en haut a MLE et b L-moments) et moyennes (en milieu c) et l'écart entre les extrêmes de durée de retour 30 ans et la moyenne hivernale (en bas d et e) de précipitation journalière pour la période 1982-2019. Unité mm/jour

Une première observation de ces cartes révèle une forte variation géographique des précipitations extrêmes ainsi que ses moyennes.

La méthode de l'ajustement utilisée s'avère également importante pour la discussion géographique des extrêmes pluviométriques. Les précipitations ayant une durée de retour de 30ans présentent les cumuls les plus importants sur les régions comprises entre 35 et 35.5° de latitudes et voisines de la longitude 0° où le cumul dépasse les 70 mm. Pour les régions de l'ouest du pays se trouvant à des latitudes plus basses ; les précipitations ayant une durée de retour de 30 ans jugées extrêmes enregistrent des cumuls plus faibles pouvant être à moins de 25mm comme c'est le cas de la station de Mechria.

Les précipitations extrêmes délivrées par la méthode du maximum en bloc en utilisant les L-moment comme outil d'ajustement des paramètres de la loi GEV montrent une distribution un peu différente des extrêmes pluviométriques aussi bien en termes de position géographique que dans le cumul enregistré. Les régions comprises entre 35 et 35.5 ° de latitudes continuent a mesurer les cumuls les plus importants mais avec une extension longitudinale plus large.

Les extrêmes pluviométriques présentent une distribution latitudinale ; plus en se dirige vers le sud du domaine d'intérêt moins les cumuls attribués aux extrêmes pluviométriques sont importants. Entre les deux méthodes d'ajustement une différence pouvant être de 20 mm dans l'estimation des précipitations ayant une durée de retour de 30 ans. Les moyennes hivernales varient entre 35 et 150 mm ; les moyennes les plus faibles sont observées vers les régions sud du domaine d'intérêt connaissant donc une distribution analogue à celle des extrêmes pluviométriques.

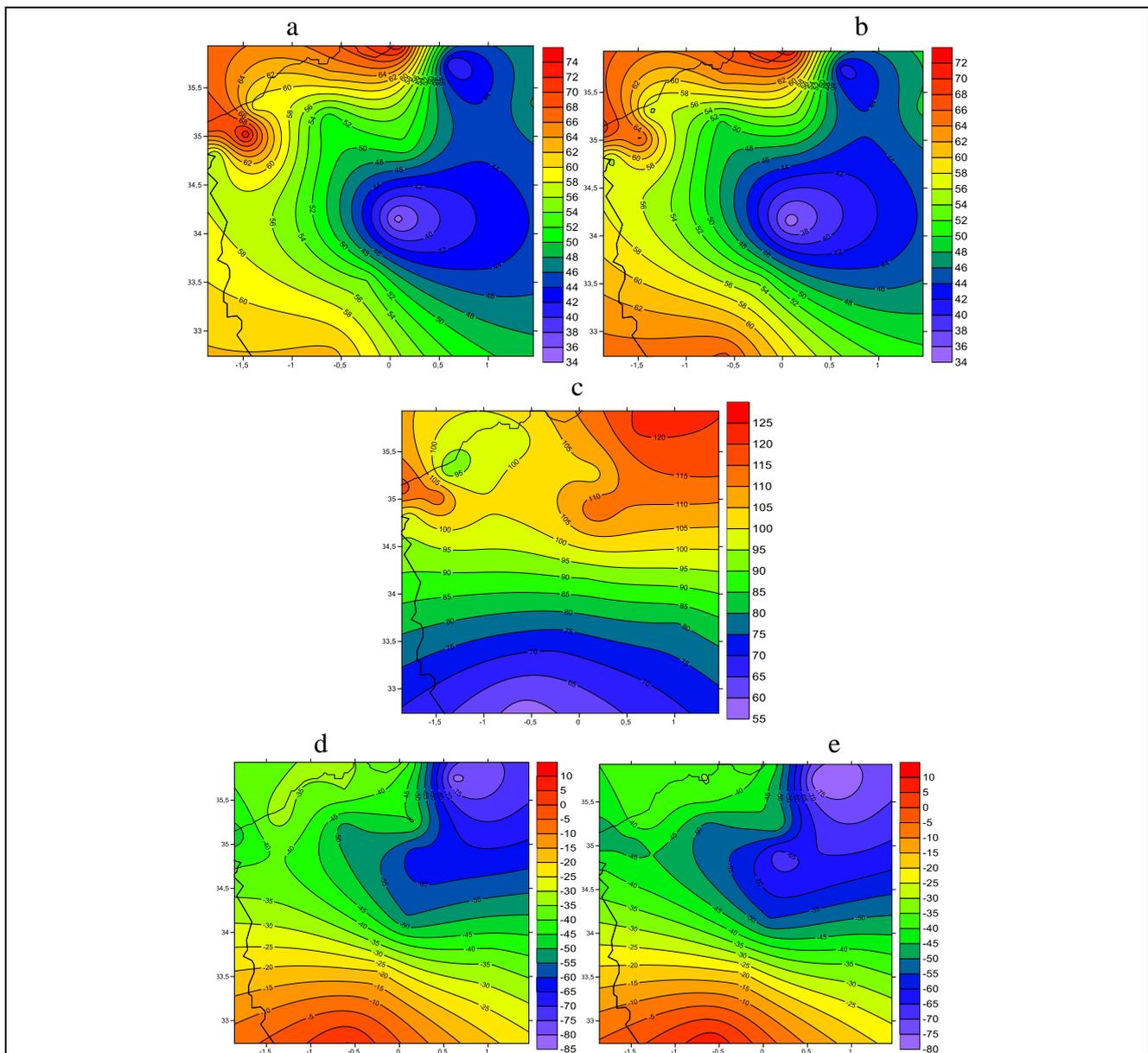


Figure N°32 - Valeurs de retour de 30 ans (en haut a MLE et b L-moments) et moyennes (en milieu) et l'écart à la moyenne printanières (en bas d et e) de précipitation journalière pour la période 1982-2019. Unité mm/jour

Les extrêmes pluviométriques relatifs à la saison printanière modélisés par les maxima en bloc dont l'estimation des quantiles de la distribution des extrêmes repose les deux principales techniques pour estimer les paramètres de la loi GEV sont le maximum de vraisemblance et la méthode des L-moments, expriment une répartition des extrêmes définis à la base d'une durée de retour de 30 ans fortement différente de celle observée au cours de la saison hivernale.

On constate d'après la représentation graphique que les extrêmes pluviométriques de la saison de printemps cadrée par les mois de Mars, avril et Mai montrent des forts cumuls sur la partie extrême ouest du domaine étudié ainsi que sur une partie du centre du domaine, en se dirigeant vers le sud

ces cumuls deviennent moins importants pour augmenter légèrement vers l'extrême sud.

On remarque également que les deux méthodes d'estimation des paramètres d'ajustement délivrent une information assez comparable de telle façon que les faibles quantités de pluie sont enregistrées vers l'intérieur centre et Est du domaine.

La comparaison entre les extrêmes pluviométriques et les moyennes pluviométriques de cette saison présente clairement un gradient en fonction de la latitude et ne correspond pas à la répartition de pluies moyennes en printemps autrement dit les régions mesurant les moyennes les plus importantes n'observent pas les extrêmes les plus forts.

La distribution spatiale des valeurs de retour de 30 ans des extrêmes pluviométriques de la saison d'automne présente clairement assez de similitudes en termes de position géographique comme en termes de cumuls observés. Les extrêmes mesurent des cumuls oscillant entre 75mm sur le nord du domaine et 45 mm vers l'extrême Sud-Est.

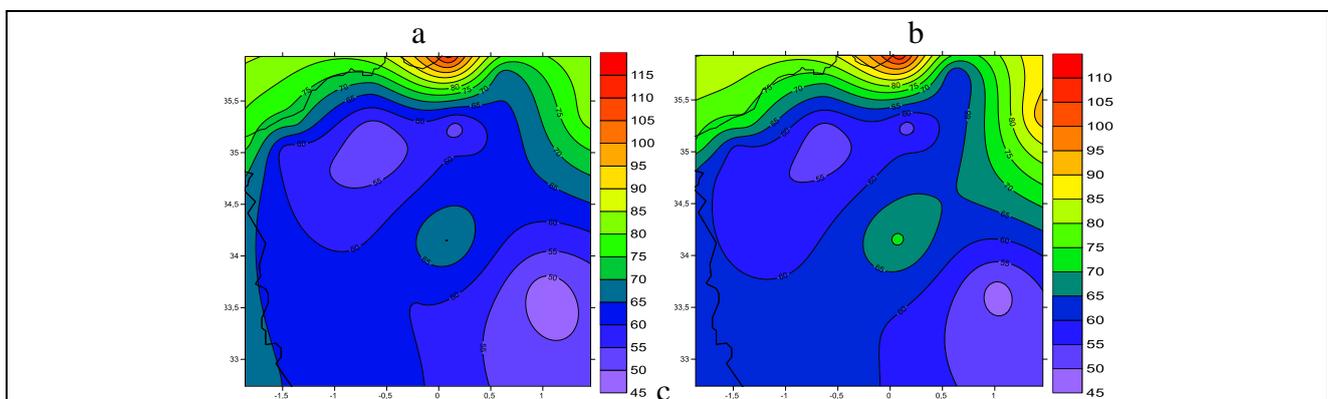
Les valeurs maximales étant enregistrées sur la partie littorale à savoir Mostaghanem, ghazaouet et benisaf et un peu vers l'intérieur au voisinage de el kheiter et tiaret.

La comparaison quantitative des cartes révèle une particularité intéressante : la différence entre les valeurs extrêmes et les moyennes est quasiment apparente pour tous les points considérés.

Les moyennes saisonnières possèdent une distribution latitudinale plus claire dont les valeurs les plus importantes sont observées sur le Nord du domaine ; les moyennes saisonnières deviennent de plus en plus faibles en direction du sud.

On note que l'ensemble des stations appartenant à notre région d'intérêt mesure des moyennes saisonnières au delà de 70 mm et dépassant les 100 mm pour la majorité des stations.

La station de Mostaghanem l'emporte avec 126.29 mm. Il apparaît donc que les régions mesurant des moyennes saisonnières importantes n'observent pas nécessairement des extrêmes pluviométriques avec des cumuls importants.



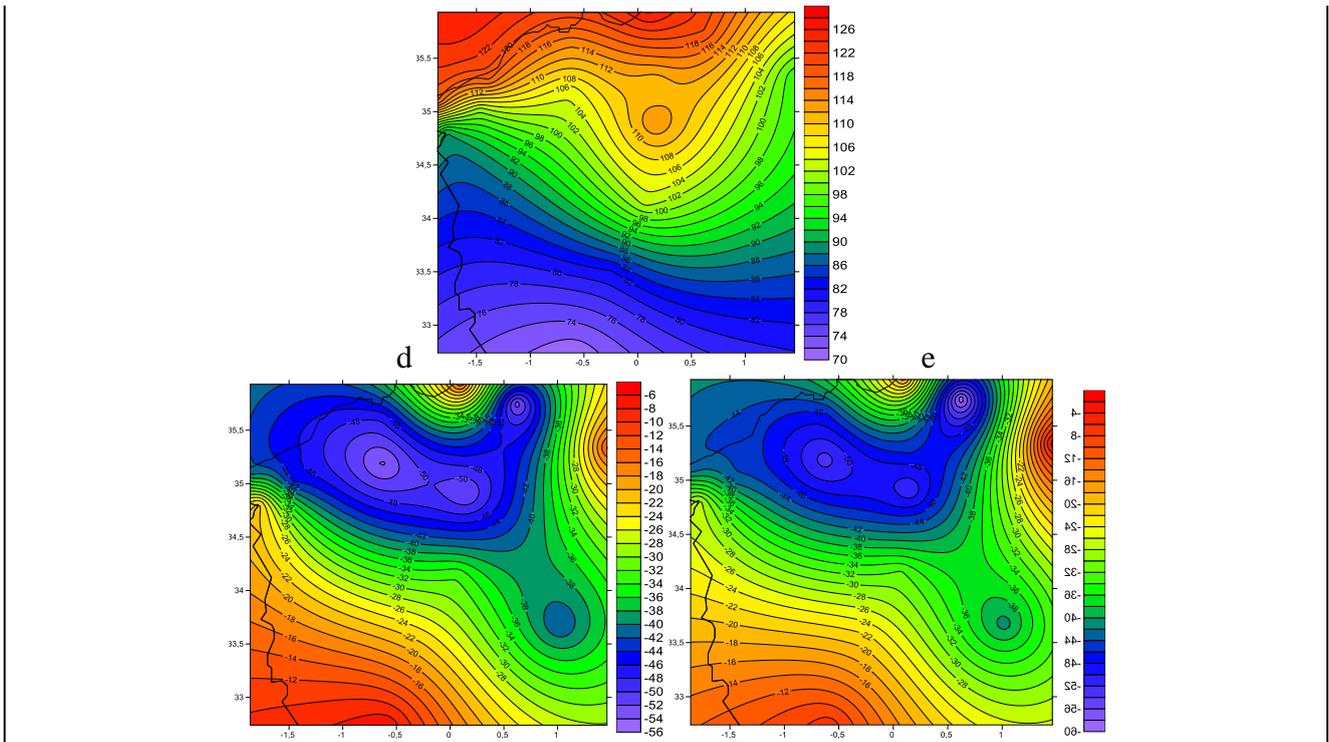
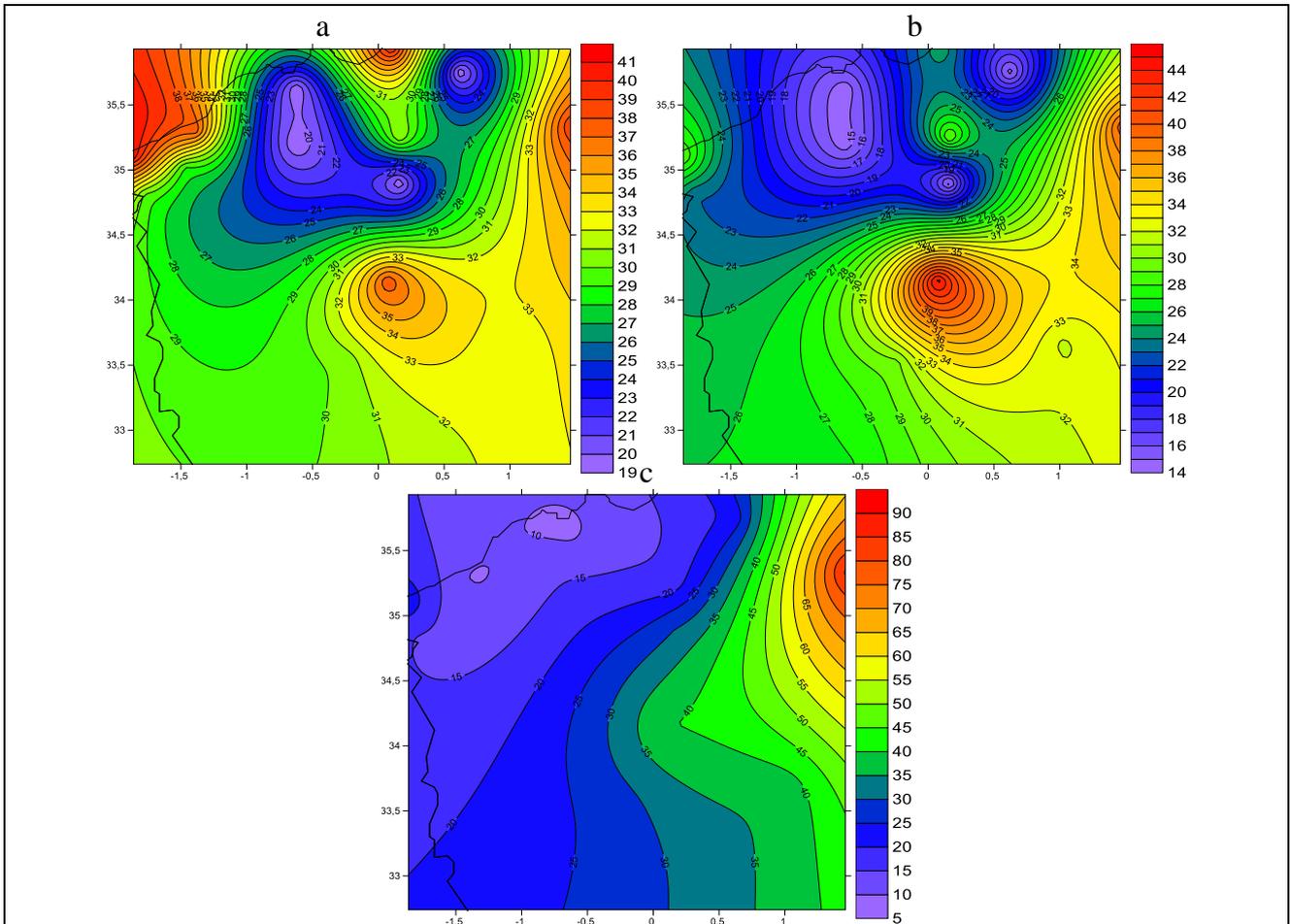


Figure N°33 - Valeurs de retour de 30 ans (en haut a MLE et b L-moments) et moyennes (en milieu) et l'écart à la moyenne automnales(en bas d et e) de précipitation journalière pour la période 1982-2019. Unité mm/jour



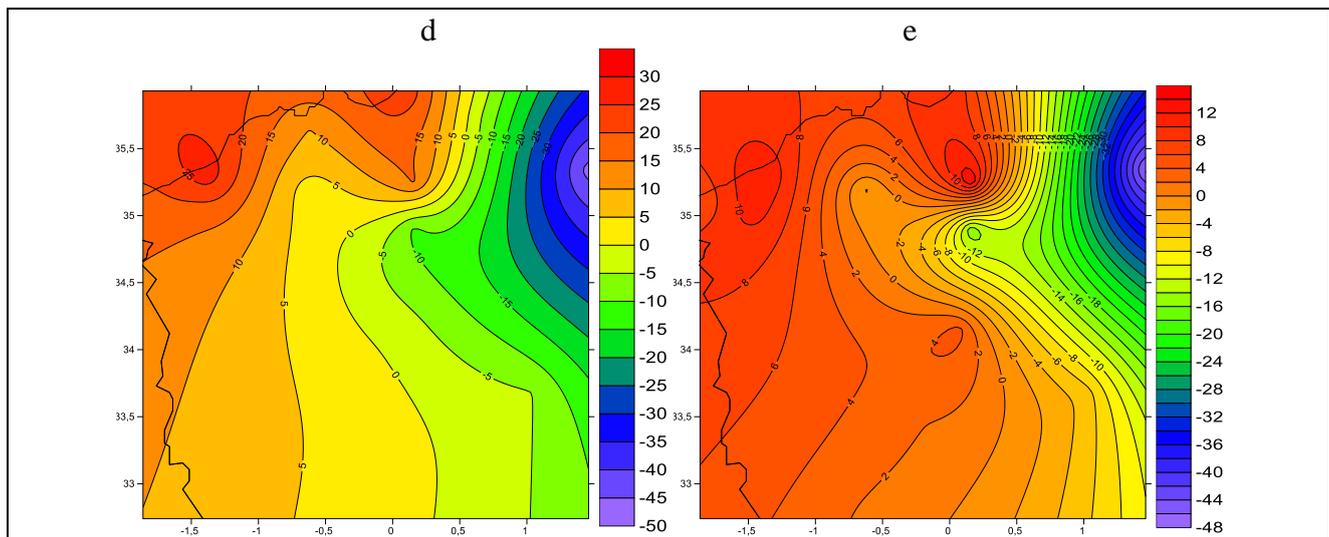


Figure N°34 - Valeurs de retour de 30 ans (en haut a MLE et b L-moments) et moyennes (en milieu) et l'écart à la moyenne estivale(en bas d et e) de précipitation journalière pour la période 1982-2019. Unité mm/jour

La climatologie des précipitations pour cette saison d'été est présentée sur la Figure (N°34). Avec les précipitations extrêmes (valeurs de retour de 30 ans) en haut et les précipitations moyennes en bas.

Les extrêmes pluviométriques ayant une durée de retour de 30 ans varient entre 14 et 44 mm et sont considérés comme les plus faibles par rapport aux autres saisons.

Une première observation de ces cartes révèle une forte variation géographique des précipitations extrêmes où la distribution est chaotique.

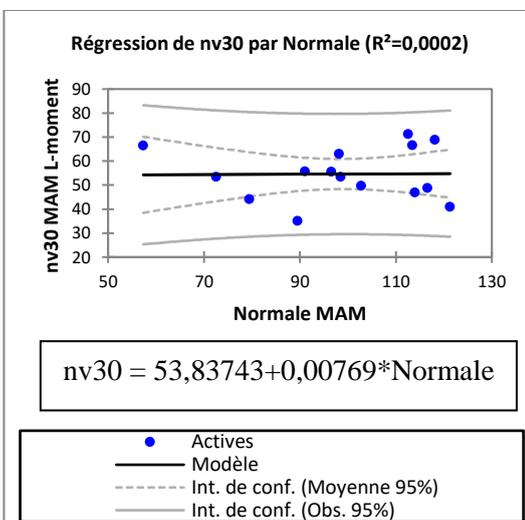
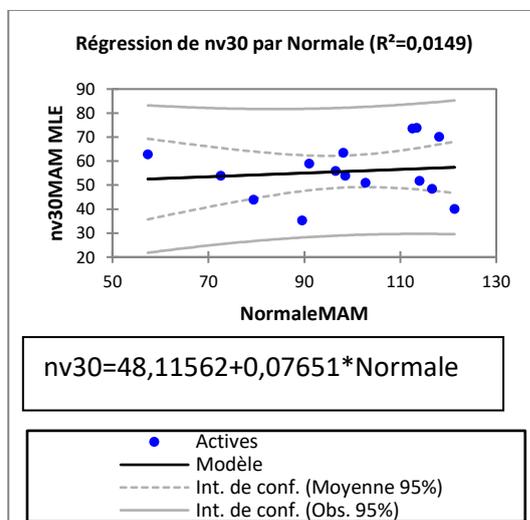
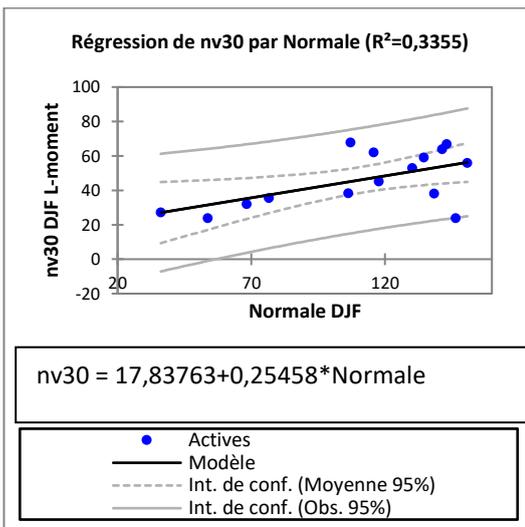
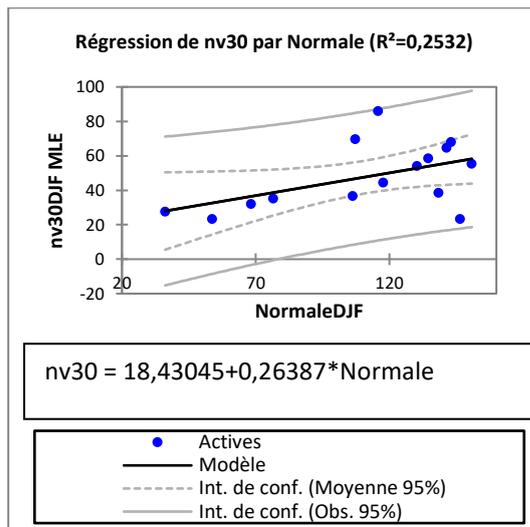
Les deux méthodes d'ajustement le maximum de vraisemblance et des L-moment convergent vers des résultats assez comparables les extrêmes ayant les cumuls les plus fort sont observés sur le sud-est du domaine, ces derniers deviennent moins importants en se dirigeant vers le nord ou l'ouest du domaine. Les cumuls les plus faibles étant observés sur les régions de l'intérieur à savoir saida, Sidi-Bel-Abbès et relizane avec des valeurs trop proches les une des autres et avoisinant les 19 mm. Le cumul le plus important étant observé à la station de Ghazaouet à travers l'estimation à base de la méthode du maximum de vraisemblance un peu sous-estimé par la méthode des L-moment.

La différence entre la distribution géographique des extrêmes et les moyennes estivales est assez nette ; les moyennes saisonnières les plus fortes sont situées sur l'extrême Est du domaine dont le maximum s'observe sur la région de Tiaret ; ces cumuls commencent à perdre de leurs valeurs en empruntant un chemin en direction de l'extrême Nord-ouest du domaine ; la valeur minimale est mesurée à Benisaf. Des cumuls plus forts sont repérés au sud de cette région.

On souligne que les zones de l'extrêmes Est sont les plus pluvieuses et observent également les extrêmes avec des cumuls les plus forts.

5. I.4.3 Relation entre les valeurs moyennes et les valeurs de retour de 30 ans de précipitations journalières

Pour répondre à la problématique de la liaison pouvant exister entre les extrêmes pluviométriques définis dans notre cas par une durée de retour de 30 ans et notés nv sur les graphiques ; nous examinant dans cette partie les résultats de la régression linéaire entre les extrêmes pluviométriques de durée de retour de 30 ans et la normale de chaque saison pour l'ensemble des stations de l'Ouest du pays.



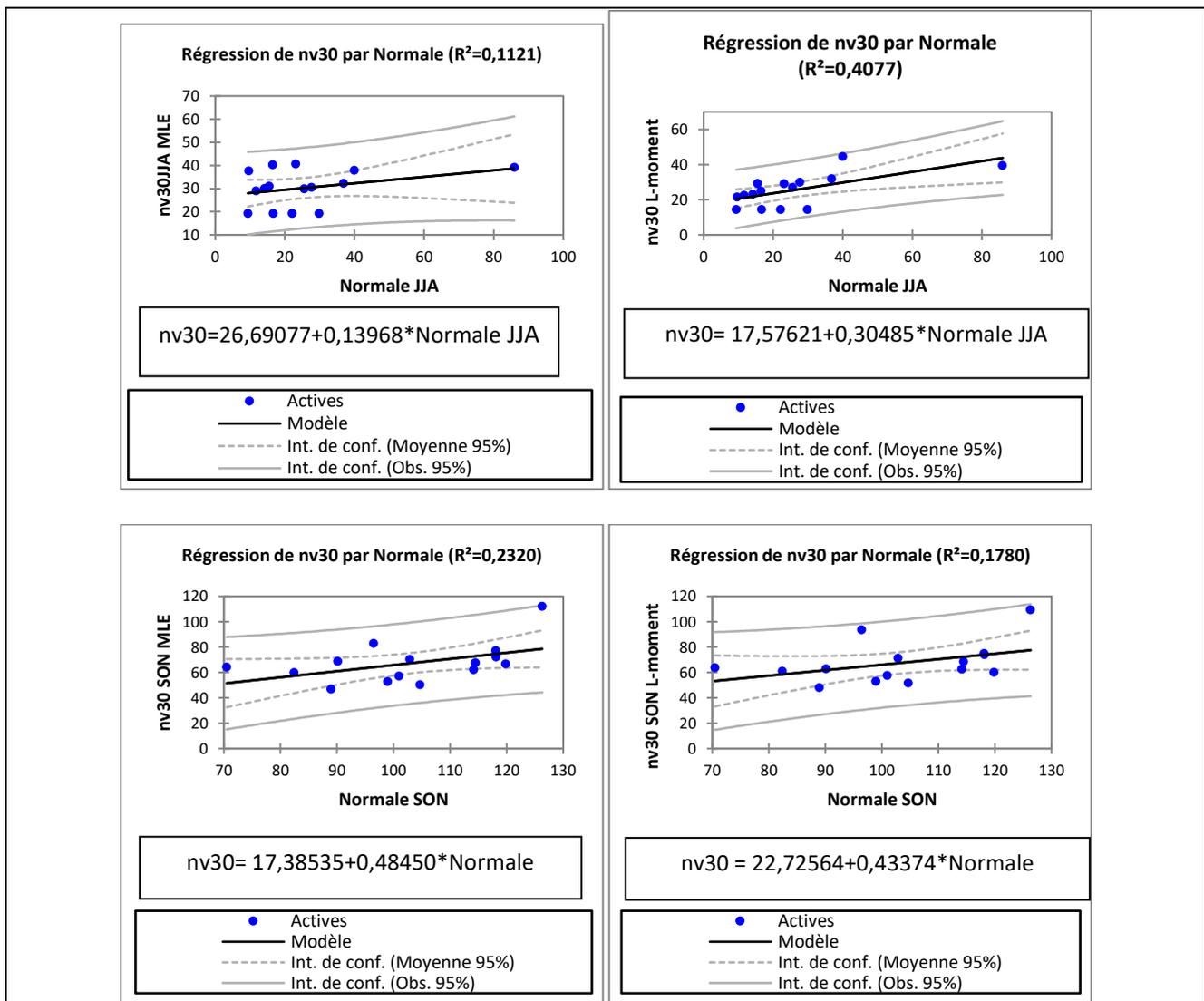


Figure N°35- les résultats de la régression linéaire entre les extrêmes pluviométriques de durée de retour de 30 ans et la normale de chaque saison pour l'ensemble des stations de l'Ouest du pays.

Des liens assez faibles caractérisent la relation entre les extrêmes pluviométriques et les normales de chaque saison.

La liaison la plus importante qui reste toujours statistiquement faible est celle liant les précipitations extrêmes et la normale estivale traitée par la méthode des L-moments.

Il s'est avéré que la méthode utilisée pour estimer les paramètres de la GEV maximums de vraisemblance ou celle des L-moments puisse influencer l'ampleur de la relation entre les extrêmes pluviométriques et les normales saisonnières comme c'est le cas pour la saison estivale pour laquelle on mesure une relation estimée à $R^2=0,4077$ à base de la méthode des L-moments alors qu'elle n'est que de $R^2=0,1121$ à base de la méthode des maximums de vraisemblance.

5. II : Estimation des pluies journalières extrêmes supérieures à un seuil cas : l'Ouest du pays.

Ce chapitre présente les résultats obtenus de l'étude des extrêmes pluviométriques à l'échelle saisonnière à travers l'approche d'Analyse par les dépassements d'un seuil (GPD) des données de pluie journalière dans la zone d'étude. Dans la première partie on a étudié le comportement des extrêmes pluviométriques traités par la méthode des maximums de vraisemblance

La deuxième partie concerne le même traitement mais à base de la méthode des L-moments comme outils statistique d'estimation des paramètres de la GPD.

Entre autre, on a retracé les distributions géographiques des paramètres de chaque modèle ainsi que la climatologie des extrêmes pluviométrique sur l'ensemble du domaine.

5. I.1 Détermination du seuil d'estimation des quantiles extrêmes

Pour l'analyse fréquentielle des extrêmes pluviométriques dans le climat passé sur l'ouest du pays, nous avons adopté dans cette section la méthode d'analyse fréquentielle de dépassement du seuil ajustée grâce au maximum de vraisemblance et L-moment. Le choix d'ajuster les séries avec les deux méthodes d'estimation des paramètres de la GPD est dicté par le besoin d'arriver à retenir une seule méthode jugée adéquate pour représenter la réalité du comportement des extrêmes pluviométrique sur notre région d'intérêt.

Si la difficulté de l'ajustement des maximas étant désormais surmontée grâce au logiciel R, il reste celle liée à la fixation du seuil pour les séries tronquées. Car contrairement aux séries maximas en blocs (années ou saisons ou mois) ajustables par une GEV, et les séries gonflées, les séries tronquées ajustables par une GPD nécessitent au préalable la détermination du seuil.

On rappelle que ce dernier est défini comme étant la valeur à partir de laquelle les quantités de précipitation constituent des maximums probables. Le choix du seuil au-dessus duquel les pluies journalières peuvent être modélisées par une distribution de PARETO est souvent le résultat d'un compromis entre le biais et la variance. En effet, le seuil doit être suffisamment élevé pour satisfaire le caractère asymptotique du modèle statistique, mais pas trop élevé pour garder un nombre suffisant de dépassements pour estimer les paramètres du modèle.

La problématique du choix du seuil à partir duquel un cumul pluviométrique est considéré comme un cumul accompagnant une précipitation extrême s'est fortement imposée dans notre étude

Vue la diversité des méthodes proposées par la communauté scientifique pour cerner cette problématique ; nous avons décidé d'adopter une méthodologie faisant appel à plusieurs notions à la base du choix du seuil retenu pour l'alimentation de l'ajustement par GPD.

Pour cette étude, deux approches ont été utilisées pour déterminer le seuil d'estimation des pluies journalières : la fonction moyenne des excès et l'approche proposé en termes de percentiles. La fonction moyenne des excès utilise l'approximation asymptotique selon laquelle le nombre annuel moyen de dépassements croît linéairement en fonction du seuil.

Cette approche de sélection est utilisée dans cette étude pour définir l'intervalle dans lequel se trouve le seuil adéquat

L'approche basée sur les percentiles a été appliquée pour affiner la lecture déjà issue de la fonction moyenne des excès

Notre approche est réalisée en deux étapes :

Dans un premier temps ; nous avons procédé au choix des seuils relatifs à chaque station et à chaque saison à base d'une méthode graphique ; il s'agit de fonctions qui donnent comme résultat des graphes à partir desquelles on doit déterminer la valeur seuil correspondante au critère de la définition.

Elles nous donnent un graphique tel que sur l'axe des abscisses on retrouve les valeurs seuils, et sur l'axe des ordonnées les valeurs moyennes des excès. A titre illustratif, nous présentons les graphiques issus de ces fonctions pour quelques stations et saisons étudiées :

Elles nous donnent un graphique tel que sur l'axe des abscisses on retrouve les valeurs seuils, et sur l'axe des ordonnées les valeurs moyennes des excès. A titre illustratif, nous présentons les graphiques issus de ces fonctions pour quelques stations et saisons étudiées

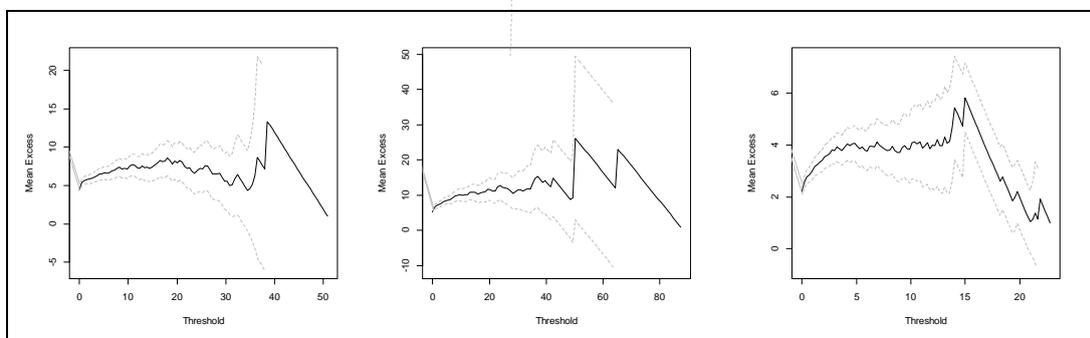


Figure N°36- Parcours de la vie résiduelle moyenne empirique de la série de données du fichier hivernal pour les stations:(a)Ghazaouet,(b)Benisaf,(c)Mostaganem en utilisant laMLE.

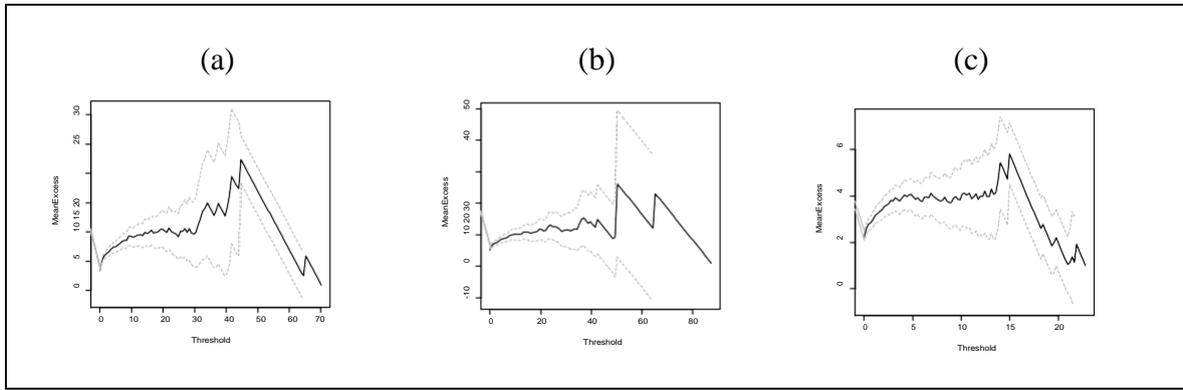


Figure N°37- Parcours de la vie résiduelle moyenne empirique de la série de données du fichier hivernal pour les stations : (a)Ghazaouet, (b) Benisaf, (c) Mostaganem en utilisant les L-moments.

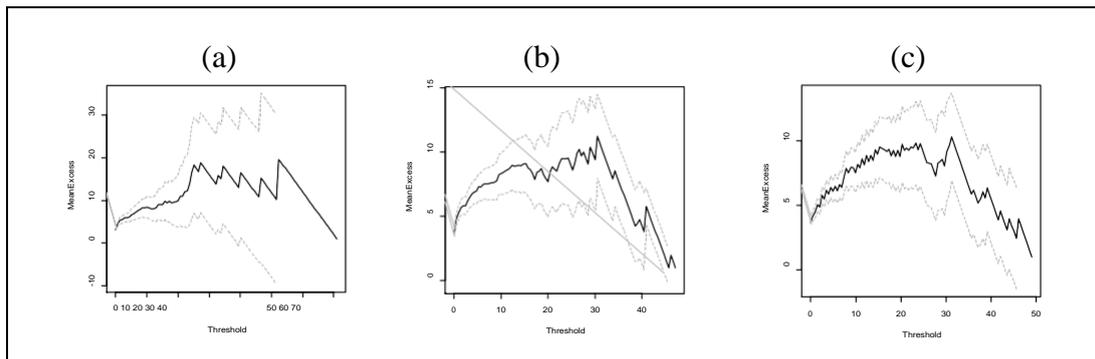


Figure N°38- Parcours de la vie résiduelle moyenne empirique de la série de données du fichier printanière pour les stations : (a)Mascara, (b) Saida, (c) Tiaret en utilisant la MLE.

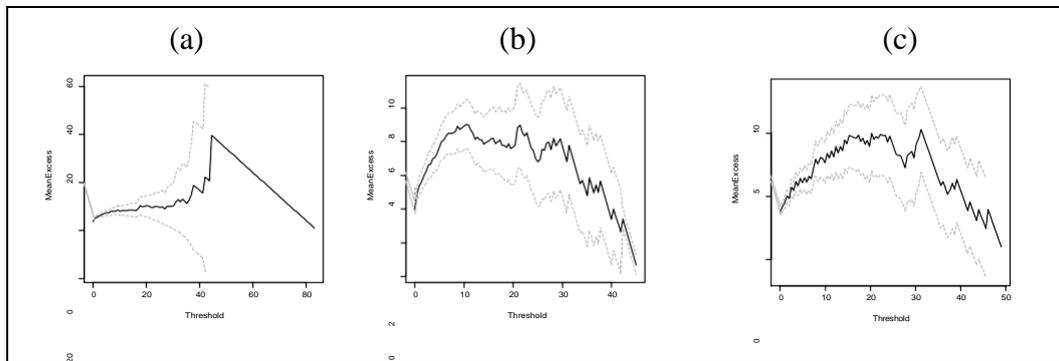


Figure N°39- Parcours de la vie résiduelle moyenne empirique de la série de données du fichier printanière pour les stations : (a)Mascara, (b) Saida, (c) Tiaret en utilisant les L-moments.

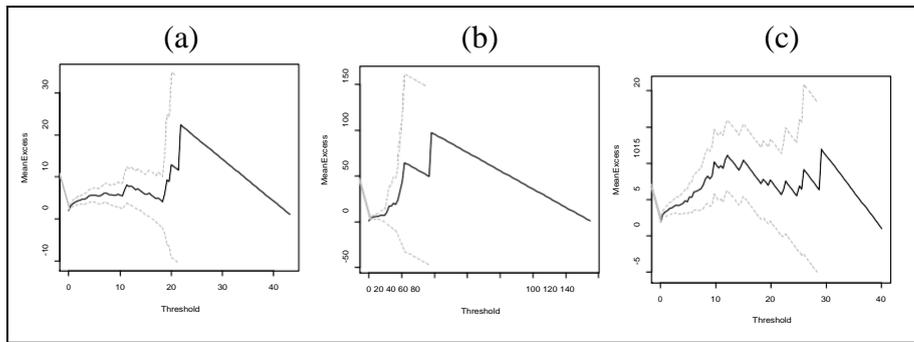


Figure N°40- Parcours de la vie résiduelle moyenne empirique de la série de données du fichier estival pour les stations : (a)Ainsfra, (b) Elbayadh, (c) Mechria en utilisant la MLE.

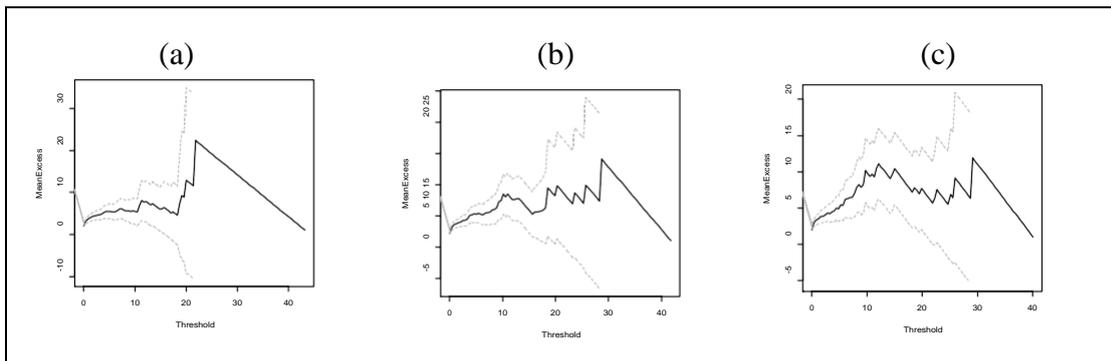


Figure N°41- Parcours de la vie résiduelle moyenne empirique de la série de données du fichier estival pour les stations : (a)Ainsfra, (b) Elbayadh, (c) Mechria en utilisant les L-moment.

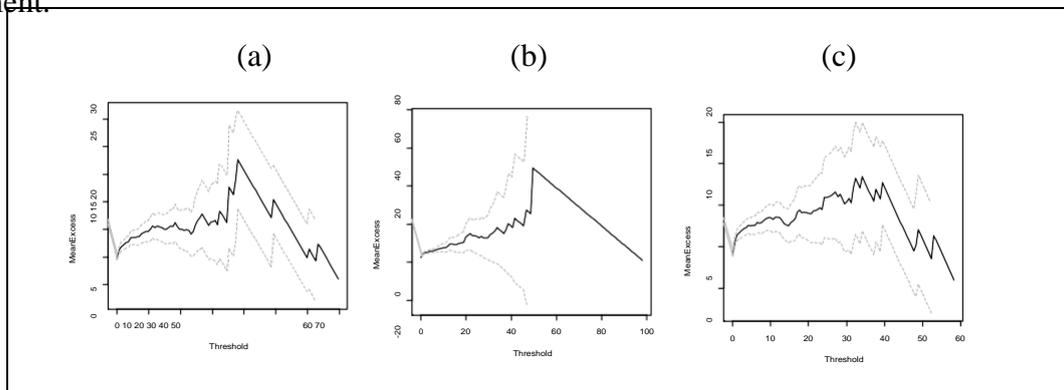


Figure N°42- Parcours de la vie résiduelle moyenne empirique de la série de données du fichier automnal pour les stations : (a)Tlemcen, (b)Oran, (c) Sidi-Bel-Abbès en utilisant la MLE.

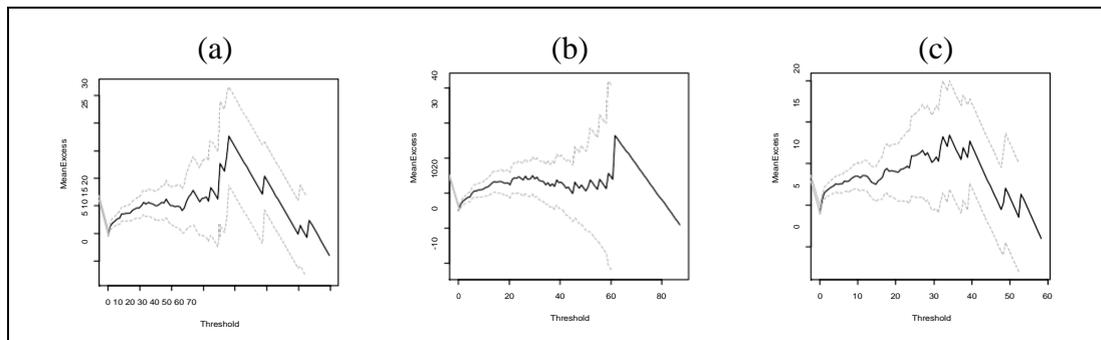


Figure N°43- Parcours de la vie résiduelle moyenne empirique de la série de données du fichier automnal pour les stations : (a)Tlemcen, (b) Oran, (c) Sidi-Bel-Abbès en utilisant les L-moments.

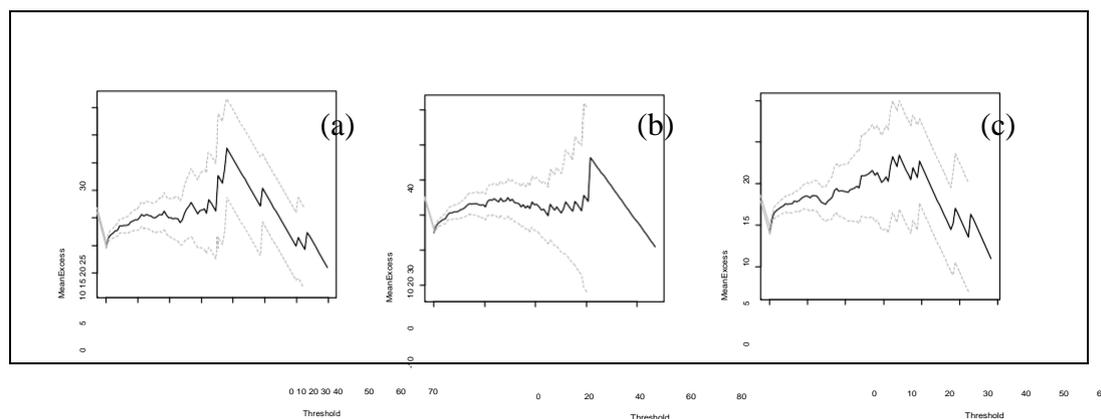


Figure N°44- Parcours de la vie résiduelle moyenne empirique de la série de données du fichier automnal pour les stations : (a)Tlemcen, (b) Oran, (c) Sidi-Bel-Abbès en utilisant les L-moment.

L'objectif de ce type de graphique est de trouver le seuil le plus bas de sorte que le graphique soit linéaire avec des seuils croissants, dans l'incertitude.

Dans un second temps, nous avons calculé les percentiles des données saisonnières pour chaque saison et chaque station examinées, nous avons procédé ainsi car la communauté scientifique propose les percentiles comme définition de base des extrêmes pluviométriques, il s'agit simplement de seuils à partir desquels une précipitation peut être jugée extrême.

Dans cette approche, nous privilégions la définition des événements extrêmes en introduisant les quantiles afin d'éviter les hypothèses et la paramétrisation associées aux lois de distribution analytiques adaptées aux variables aléatoires. Néanmoins, cette approche reste très répandue dans les études scientifiques de précipitation et permet de produire une information exploitable.

Dans notre cas nous avons calculé les 90^{ème} et 95^{ème} percentiles notés respectivement P90 et P95 ; le tableau suivant résume les résultats trouvés.

Stations	DJF		MAM		JJA		SON	
	P90	P95	P90	P95	P90	P95	P90	P95
Ainsefra	9.42	11.92	16.46	22.08	10.8	15.29	16.25	24.4
Benisaf	18.09	24.54	15.06	20.16	6.99	11.9	21.7	29.32
Elbayadh	8.61	11.58	13.3	18.85	9.03	15.9	16.18	23.92
Elkheiter	7.9	10.73	10.89	15.98	10.23	11.26	12.02	17.16
Ghazaouet	15	21.52	14	18.88	9.21	11.78	16	23.01
Maghnia	14.5	19.37	14.1	19.66	9.45	12.65	14.35	19.8
Mascara	13	18.4	14.55	19.81	10.1	15.47	13.6	20.72
Mechria	8.87	11.27	13.04	18.97	8	11.72	15.51	22.63
Mostaganem	8.86	11.27	16.62	23.93	10.96	15.63	17.1	24.42
Oran	16.57	23.92	15.72	22.14	7.18	9.2	19.21	27.42
Relizane	9.98	13	12.16	16.58	9.18	14.32	11.68	16.71
Saida	12.37	16.11	15.5	20.83	14	20.04	15.77	23.43
Sidi-Bel-Abbès	14.38	20.43	14.16	20.72	9.23	11.58	16.66	22.01
Tiaret	15.29	19.58	11.9	17	11.9	15.74	15	18
Tlemcen	16.96	23.58	16.81	24.24	7.7	10.1	17.6	24.44

Tableau N°15 : les percentiles calculés à base des journées pluvieuses ($RR \geq 1mm$)

On remarque en examinant le tableau ci-dessus que les percentiles varient logiquement d'une saison à une autre et d'une station à une autre puisque les cumuls observés sont différents.

Pour la saison hivernale le P90 varie entre 7.9 mm à Elkheiter et 18.09 mm à benisaf.

Les régions appartenant aux hauts plateaux ouest mesurent les p90 les plus faibles au cours de la saison d'hiver contre des valeurs plus importantes sur le littoral ouest.

Les P95 quand à eux oscillent entre une valeur minimale de 10.73mm à Elkheiter et 24.54 mm à Benisaf avec les mêmes constatations dégagées pour les P90.

Pour la saison printanière ; Elkheiter continue à mesurer les P90 et P95 les plus faibles contre Tlemcen qui observe les valeurs maximales.

La saison estivale quand à elle mesure les records les plus faibles, au même temps que la saison d'automne enregistre les cumuls relatifs aux P90 et P95 les plus forts.

En étape finale, nous avons combiné les valeurs lues à partir des représentations graphiques réservées pour la recherche automatique et subjective des seuils appliqués pour la GPD et les valeurs ainsi délivrées par le calcul des percentiles P90 et P95, on retient le seuil lu graphiquement à condition qu'il soit compris entre le P90 et le P95 pour limiter le fait que la lecture subjective puisse laisser un intervalle large entre deux lectures effectuées par deux personnes. Le tableau 5.2 présente, pour chaque poste pluviométrique retenu, le seuil au delà duquel les dépassements peuvent être modélisés par une distribution de PARETO et le nombre de dépassements qui découle de ce seuil.

Stations/Saisons	DJF		MAM		JJA		SON	
	SR	NER	SR	NER	SR	NER	SR	NER
Ainsefra	11	21	20	21	11	14	20	21
Benisaf	24	35	20	25	8	7	29	26
El bayadh	11	30	18	27	12	18	20	29
El kheiter	10	41	12	52	10	32	17	33
Ghazaouet	20	49	18	37	9	19	23	36
Maghnia	19	32	19	31	10	11	19	29
Mascara	18	41	19	33	15	6	20	35
Mechria	10	32	18	24	10	14	20	27
Mostaganem	10	32	20	37	10	14	24	30
Oran	20	53	22	26	8	6	25	32
Relizane	13	50	16	44	12	11	16	42
Saida	16	39	15	72	14	18	20	38
Sidi-Bel-Abbès	18	47	14	61	10	10	16	58
Tiaret	19	32	17	39	15	32	18	27
Tlemcen	20	47	24	29	10	5	24	29

Tableau N°16 - Seuil d'estimation noté SR et nombre de dépassements des pluies journalières extrêmes noté NER de 15 stations pluviométriques de l'Ouest du pays.

Les valeurs les plus élevées du seuil d'estimation des pluies journalières sont observées au cours de la saison d'automne qui présente une fourchette allant de 16 mm (Relizane et Sidi-Bel-Abbès) à 29 mm (Benisaf). Les valeurs signalées au cours du printemps sont plus faibles fluctuant autour de 20 mm, le maximum étant atteint à Tlemcen (24 mm). Les seuils d'estimation les plus bas sont affichés lors de l'été avec un minimum de 8 mm à 2 stations. Dans l'ensemble, le nombre total de dépassements de seuil varie fortement d'une saison à l'autre de 5 (Tlemcen) au cours de l'été à 72 (Saida) pendant la saison de printemps.

5. I.2 Tendances sur les valeurs extrêmes

La série journalière étant de 38 années, on vérifie certains aspects de stationnarité avec la même méthode qu'à la section précédente, la série est stationnaire au sens où un modèle GEV à tendance linéaire dans les paramètres de position et d'échelle n'est pas significativement meilleur qu'un modèle GEV stationnaire.

Le test non paramétrique de Mann-Kendall (Mann, 1945), (Kendall, 1975) est utilisé pour détecter des tendances monotones dans des séries de données indépendantes. Nous avons d'abord vérifié l'hypothèse d'indépendance préalable pour appliquer le test de Mann-Kendall.

La dépendance sérielle est analysée via le test non paramétrique de Wald-Wolfowitz (Wald et Wolfowitz, 1943). Aucune dépendance sérielle significative n'est détectée au niveau 25%.

Aucune tendance significative n'est détectée par le test de Mann-Kendall, sur la variable.

5. I.2.1 Contrôle des séries de dépassements

Ce contrôle constitue une étape primordiale permettant de vérifier l'adéquation de l'ajustement choisi à la série de valeurs étudiée. Plusieurs procédures ont été développées pour assurer le contrôle de l'ajustement, on cite à titre indicatif : les procédures visuelles : on peut citer par exemple : les quantiles-quantiles plot (QQ-Plot) ou les graphiques en périodes de retour (RLP pour Return Level plot) ; les tests d'ajustement les plus classiques étant les tests du Chi-deux, de Kolmogorov-Smirnov ou d'Anderson-Darling ; de scores divers : ils peuvent être basés sur l'écart entre la distribution empirique et la loi ajustée (QVS : Quantile Vérification Score par exemple) ou se focaliser sur l'estimation d'un quantile particulier.

L'examen visuel du graphique représentatif de l'ajustement réalisé, même s'il peut paraître rudimentaire reste un bon moyen pour juger de la qualité d'un ajustement et devrait constituer un préambule à tout test statistique. Il s'avère très utile lorsque nous désirons réaliser un choix entre plusieurs lois de probabilité ou entre plusieurs méthodes d'ajustement.

Dans notre cas, nous allons utiliser pour le contrôle de l'ajustement un examen visuel. Ici, l'examen visuel portera sur les QQ-plot (diagramme Quantile-Quantile) qui est un outil statistique permettant de visualiser graphiquement la qualité de l'ajustement d'une loi donnée, à un échantillon de données (BEILANT, 1996). Dans ce graphique QQ-plot- se situant sur la droite en haut sur les figures suivantes- les données sont représentées par des points de couleur noire (.) tandis que la loi sous-jacente testée (ici, la loi GPD) est représentée par une courbe continue (ici, une droite grise). Dans les QQ2-plot on associe aux QQ-plot des intervalles de confiance qui sont également représentés (en trait semi-continus).

On présente sur les figures suivantes un exemple de graphique permettant de contrôler l'ajustement relatif à la station d'Elkheiter pour les deux méthodes la MLE et L-moment

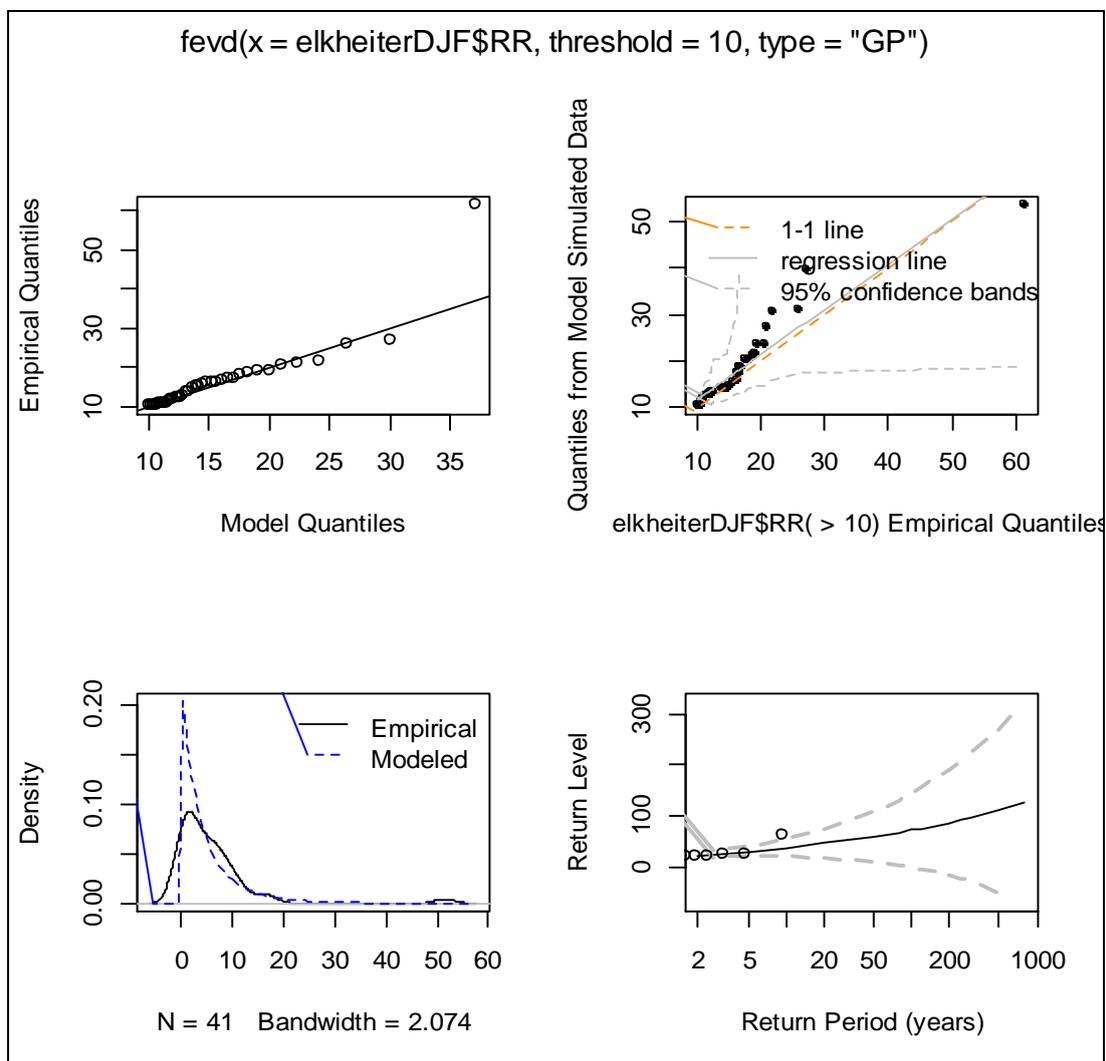


Figure N°45 - Tracé du diagnostic d'ajustement de précipitations extrêmes à Elkheiter au cours de la saison d'hiver, à une distribution GPD pour la MLE. Du haut à gauche, en bas à droite il s'agit de la courbe des quantiles (QQ-plot), des quantiles (QQ2-plot), de densité et des niveaux de retour.

En somme, l'examen visuel porté sur les courbes de quantile et de densité, montre que les ajustements obtenus sont acceptables, puisque les nuages de point suivent la courbe théorique (Figures (N°45); (N°46)) et les quantiles empiriques (points) sont tous compris dans l'intervalle de confiance, ce qui confirme le caractère raisonnable du choix de notre modèle même si certaines différences d'ordre statistique sont visibles entre les deux modèles MLE et L-moments. Cette procédure a été généralisée pour l'ensemble des stations et pour les quatre saisons tout en rappelant que les deux méthodes d'estimation des paramètres de la GPD soient appliquées MLE et L-moment.

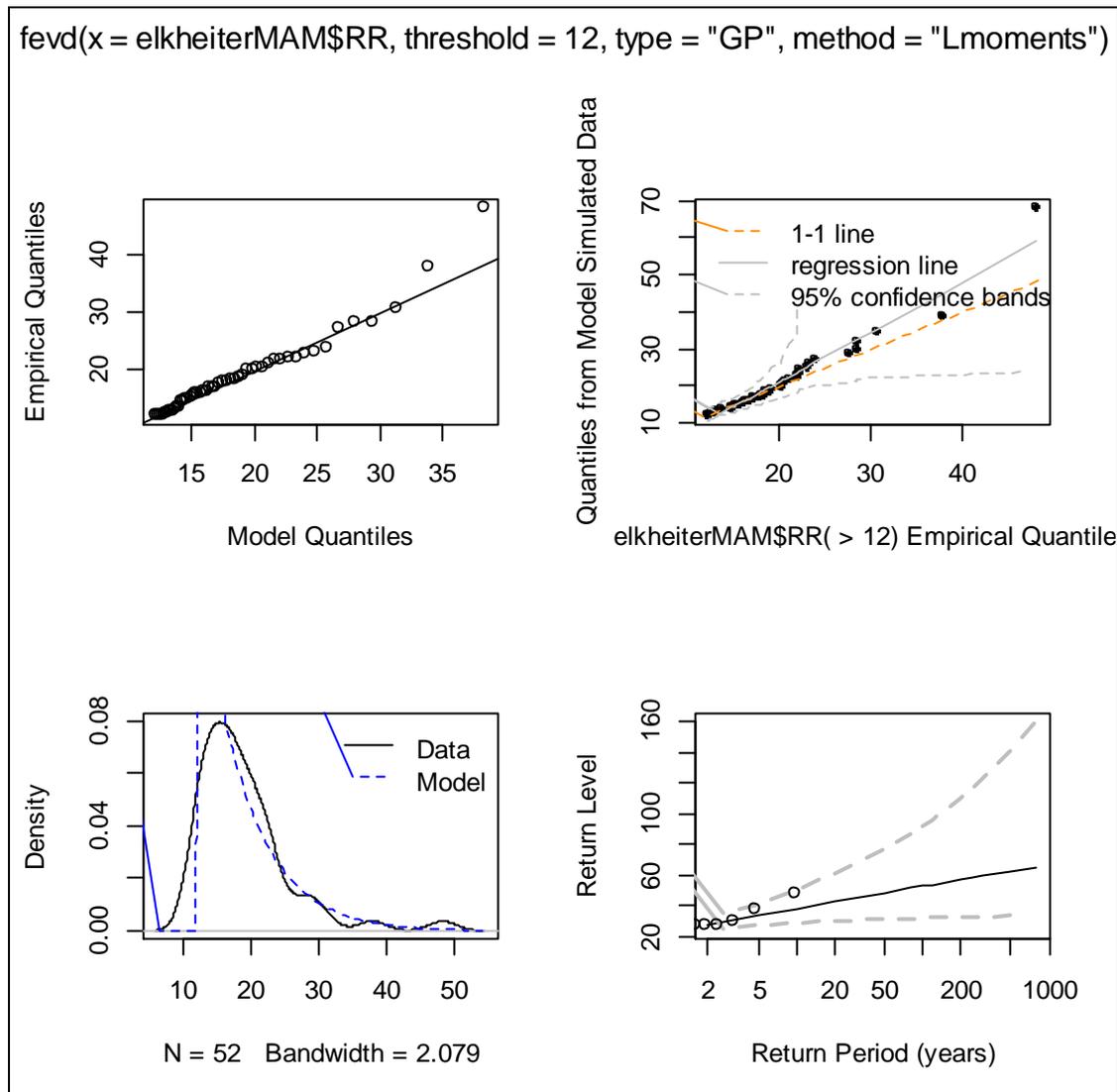


Figure N°46 - Tracé du diagnostic d'ajustement de précipitations extrêmes à Elkheiter au cours de la saison du printemps, à une distribution GPD pour la L-moment. Du haut à gauche, en bas à droite il s'agit de la courbe des quantiles (QQ-plot), des quantiles (QQ2-plot), de densité et des niveaux de retour.

5. I.3 Analyse des résultats

5. I.3.1 Estimation des paramètres des lois statistiques

Tout comme la loi GEV, la loi de Pareto Généralisé comprend aussi trois distributions en fonction de la valeur et du signe du paramètre de forme (Gilleland et Katz 2016b ; Coles 2001) :

- Si $\xi < 0$ → Distribution Beta : queue légère, bornée supérieurement ;
- Si $\xi = 0$ → Distribution exponentielle : normale, non bornée ;
- Si $\xi > 0$ → Distribution de Pareto : queue lourde, bornée inférieurement.

Les tableaux suivants montrent la distribution des estimations du paramètre de forme de la loi PARETO généralisée ajustées aux séries pluviométriques extrêmes retenues.

Ils présentent quelques résultats d'ajustement de séries pluviométriques journalières avec les lois de PARETO généralisée. Les paramètres de ces lois ont été déterminés à l'aide des estimateurs du maximum de vraisemblance (Tab N°17) en premier lieu et à l'aide des estimateurs par la méthode des L-moments (Tab N°18) en second lieu.

Stations/Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
Ainsefra	Pareto	Pareto	Pareto	Pareto
Benisaf	Pareto	Pareto	Pareto	Pareto
Elbayadh	Pareto	Beta	Pareto	Beta
Elkheiter	Pareto	Pareto	Pareto	Pareto
Ghazaouet	Pareto	Pareto	Pareto	Pareto
Maghnia	Beta	Pareto	Pareto	Pareto
Mascara	Pareto	Pareto	Beta	Pareto
Mechria	Beta	Pareto	Beta	Pareto
Mostaganem	Beta	Pareto	Beta	Pareto
Oran	Pareto	Pareto	Beta	Beta
Relizane	Pareto	Pareto	Pareto	Pareto
Saida	Pareto	Beta	Beta	Beta
Sidi-Bel-Abbès	Pareto	Beta	Pareto	Pareto
Tiaret	Pareto	Beta	Pareto	Pareto
Tlemcen	Beta	Pareto	Pareto	Pareto

Tableau N°17 : La distribution des estimations traitées à la base de la MLE du paramètre de forme ξ de la loi de PARETO généralisée (GPD).

Le paramètre de forme (ξ) de la loi de PARETO généralisée présente une très forte variabilité. Ce paramètre adimensionnel traduit le poids des valeurs extrêmes de pluie dans la distribution initiale. Le paramètre d'échelle de cette loi pluviométrique donne le taux d'accroissement des pluies journalières extrêmes en fonction de la période de récurrence.

Stations/Saisons	DJF	MAM	JJA	SON
Ainsefra	Pareto	Pareto	Pareto	Pareto
Benisaf	Pareto	Pareto	Pareto	Pareto
Elbayadh	Beta	Pareto	Beta	Beta
Elkheiter	Pareto	Beta	Pareto	Pareto
Ghazaouet	Pareto	Pareto	Pareto	Pareto
Maghnia	Pareto	Pareto	Pareto	Pareto
Mascara	Beta	Pareto	Beta	Pareto
Mechria	Pareto	Pareto	Beta	Pareto
Mostaganem	Pareto	Pareto	Beta	Pareto
Oran	Pareto	Pareto	Pareto	Beta
Relizane	Pareto	Pareto	Pareto	Pareto
Saida	Pareto	Beta	Beta	Beta
Sidi-Bel-Abbès	Pareto	Beta	Pareto	Pareto
Tiaret	Pareto	Beta	Pareto	Pareto
Tlemcen	Pareto	Pareto	Pareto	Pareto

Tableau N°18 : La distribution des estimations traitées à la base des les L-moments du paramètre de forme ξ de la loi de PARETO généralisée (GPD).

On constate que dans la majorité des cas, le paramètre de forme ξ des dépassements de seuil est significativement positif. Cela montre bien que toutes les pluies journalières extrêmes traitées par un aspect saisonnier de l'Ouest du pays n'appartiennent pas au domaine d'attraction de la loi de GUMBEL, comme déjà souligné par plusieurs auteurs. En effet, la valeur positive du paramètre de forme indique que les pluies qui génèrent ces séries de dépassements ont une queue de distribution qui appartient au domaine d'attraction de la loi de FRÉCHET. Ces résultats rejoignent ceux trouvés dans la section précédente à travers de l'application de la GEV.

Par ailleurs, on constate que la majorité des séries pluviométriques (60) est régie par la distribution généralisée de PARETO. Ces résultats confirment le scepticisme de certains auteurs quant à la prédominance du modèle exponentiel au niveau de l'estimation des pluies journalières maximales annuelles autrement dit le comportement annuelle peut différer du comportement saisonniers. En effet, sur 60 séries de données analysées, seulement de 14 (traitées par MLE) à 16 (traitées par les L-moments) séries sont régies par une loi BETA.

Nous avons ainsi noté l'influence trop limitée de la méthode d'estimation des paramètres de la GPD sur le type d'ajustement et la distribution des séries pluviométriques journalières supérieures à un seuil.

5. I. 3.2 Estimation des quantiles extrêmes

L'exploitation du modèle fréquentiel consiste d'une part à utiliser la relation donnant la valeur d'un quantile x_q en fonction d'une fréquence cumulée $q = F(x_q)$ ou, inversement, à calculer la fréquence cumulée (et donc le temps de retour) correspondant à une valeur x donnée.

Cette procédure a pour objet le calcul à la fois des quantiles pour les périodes de retour quelconque allant de 2ans à plus de 100ans ainsi que l'intervalle de confiance associé. Mais pour notre cas nous ne calculons que les niveaux de retour pour les périodes de retour suivantes : 10, 20, 30, 50.

Après avoir tranché dans le modèle fréquentiel qui ajuste les séries de chaque station et de chaque saison ; nous avons estimé les durées de retour des précipitations extrêmes pour chacune d'elles, on note que l'exploitation du modèle fréquentiel à été appliquée aussi bien pour la MLE que pour les L-moment.

Les tableaux suivants donnent en quelque sorte le résumé de tout le travail précédemment effectué pour les niveaux de retour fixes, nous présentons à titre illustratif les résultats relatifs à la saison d'automne. Pour les tableaux des autres saisons ; des niveaux de retour associés aux intervalles de confiance sont signalés en annexe.

Les quantiles de diverses périodes de retour calculés à l'aide de modèle GPD sont donc présentés dans les tableaux (N°19) et (N°20). L'évolution des quantiles de pluie est proportionnelle à celles des durées de retour.

Stations	T10	T20	T30	T50	T100
Ainsefra	78 (39.97, 115.6)	95.48 (34.62,156.33)	107 (27.87,185.81)	122.33 (14.92,229.74)	146 (0, 303.22)
Benisaf	80 (42.38,116.99)	97.28 (34.03,160.53)	109.2 (24.98,193.41)	126.18 (8.02, 244.33)	153.27 (0, 334.11)
Elbayadh	48.28 (33.56, 63.00)	51.31 (33.22, 69.39)	53 (32.41, 73.21)	54.47 (30.79, 78.16)	56.37 (27.54, 85.19)
Elkheiter	89 (27.88,149.49)	116.36 (8.42,224.29)	136 (0, 283.09)	165 (0, 377.43)	214 (0, 551.81)
Ghazaouet	77.47 (44.63,110.31)	94 (41.83,145.28)	104.13 (37.85,170.40)	119 (29.82,207.81)	141.49 (12.37,270.60)
Maghnia	72.25 (30.22,114.27)	90 (16.88,162.16)	101.05 (3.95,198.15)	117.29 (0, 253.54)	143 (0, 350.24)
Mascara	59 (40.37,77.12)	66.19 (39.77,92.60)	71 (38.37,102.70)	76.02 (35.53,116.51)	83.46 (29.91,137.01)
Mechria	64.41 (39.18,89.63)	74 (32.39,114.80)	79 (31.99,125.95)	86 (24.25,147.24)	95 (10.19,179.67)
Mostaganem	126.14 (48.56,203.71)	163.27 (30.29,296.25)	189 (10.78,367.16)	226.27 (0, 478.53)	287.27 (0, 678.74)
Oran	72.31 (53.50, 91.13)	80.1 (55.38,104.81)	84.44 (55.59,113.30)	90 (54.99,124.44)	97 (52.79,140.23)
Relizane	68 (28.30,106.92)	87 (19.53,153.91)	100.21 (10.21,190.20)	120.12 (0, 247.61)	153.42 (0, 352.41)
Saida	60.38 (44.96, 75.80)	66 (45.87,85.47)	69 (45.75,91.27)	72 (45.01,98.66)	76 (43.15,108.73)
Sidi-Bel-Abbès	58 (33.42, 82.30)	69 (30.82,106.46)	76 (27.79,123.46)	85.2 (22.07,148.34)	100 (10.32,189.19)
Tiaret	111 (24.08,197.01)	157.11 (0, 319.90)	193 (0, 423.41)	249 (0, 600.03)	352 (0, 954.69)
Tlemcen	70 (24.66,115.30)	91 (4.98,176.26)	106 (0, 226.62)	129.2 (0, 310.87)	170.31 (0, 475.21)

Tableau N°19 : Quantiles de diverses périodes de retour issus de l'estimation des pluies journalières supérieures à un seuil en utilisant la MLE relatif à la saison d'automne.

Stations	T10	T20	T30	T50	T100
Ainsefra	78 (50.52,119.97)	96.782 (53.68,167.97)	108.874 (52.88,205.23)	125.536 (55.70,257.54)	150.973 (53.85,383.17)
Benisaf	80 (51.46,120.59)	99 (57.30,166.98)	112 (56.52,206.68)	131 (59.48,274.74)	162 (60.32,428.99)
Elbayadh	47 (39.29,55.26)	49 (40.10,61.29)	50.2 (39.87,64.51)	51.4 (40.11,73.25)	53 (40.54,78.02)
Elkheiter	86 (49.49,153.59)	113 (53.6775,220.48)	132 (57.64,263.08)	160 (61.0134,420.69)	207.49 (64.64,612.62)
Ghazaouet	78 (51.62,119.31)	94 (55.79,159.56)	104.17 (58.73,188.89)	119 (60.29, 219.69)	141.583 (61.12,360.42)
Maghnia	73 (43.31,112.23)	92 (48.84,168.86)	105.3 (52.34,185.37)	124.4 (54.44,267.52)	156 (56.91,395.65)
Mascara	60 (43.27,80.87)	69 (45.68,102.52)	74 (46.60,119.17)	80.4 (48.49,133.11)	90 (49.67,175.69)
Mechria	68 (47.66,95.29)	79.17 (48.27,125.85)	86 (50.71,141.14)	95 (53.76,179.03)	107 (51.81,228.97)
Mostaganem	126 (68.04,202.73)	165 (79.16,314.79)	193 (80.94,420.60)	234 (93.83,503.64)	302 (97.42,757.94)
Oran	74 (56.46,95.24)	82.4 (57.61,116.77)	87.4 (57.49,130.16)	94 (61.67,156.42)	102 (59.23,195.29)
Relizane	67 (40.51,103.28)	86.3 (45.54,157.58)	100 (45.15,207.21)	120.4 (50.69,293.58)	155 (50.48,413.50)
Saida	64 (47, 82)	71.07 (49.63,101.22)	75 (50.30,112.45)	80 (50.13,125.76)	87 (50.73,149.81)
Sidi-Bel-Abbès	59.3 (40.14,85.88)	72 (44.38,110.37)	80 (45.34,53.34)	91 (47.23,173.54)	108.2 (51.70,247.69)
Tiaret	109 (51.22,194.37)	156 (59.64,279.33)	192 (63.68,420.2)	250.4 (67.76, 600.3)	358.23 (79.03,1076.56)
Tlemcen	66 (41.88,97.06)	83 (44.80,148.84)	96 (48,186.23)	115 (51.30,253.98)	147 (54.04410.34)

Tableau N°20 : Quantiles de diverses périodes de retour issus de l'estimation des pluies journalières supérieures à un seuil en utilisant les L-moment relatif à la saison d'automne.

La modélisation statistique des séries de pluies journalières extrêmes de 15 stations de l'ouest du pays sur la période de 1982-2019 a été réalisée à l'aide d'une famille de lois paramétriques dites lois de PARETO. Au cours de cette étude, il a été montré que cette loi appliquée avec la MLE comme outil d'estimation des paramètres de la loi est peu susceptible de s'appliquer aux dépassements de seuil des pluies journalières et que la loi de PARETO généralisée en utilisant les L-moment était un choix cohérent.

La répartition spatiale des quantiles révèle que les plus fortes valeurs de pluie sont localisées au sud, à l'extrême ouest et au centre-ouest. Nous avons ainsi emprunté le même chemin statistique du chapitre précédent constitué par l'examen des cumuls pluviométriques ayant une durée de retour de 10 à 50 appliqué pour les maximas en bloc. Les constatations tirées illustrent un certain aspect régional de la distribution des cumuls pluviométriques de durées de retour différentes mais comme l'examen était d'ordre visuel, nous revenons sur la recommandation précédente qui dicte la nécessité de rechercher un moyen statistique permettant de s'assurer de la bonne répartition géographique des cumuls et quantiles calculés

5. I.4 Analyse spatiale des précipitations extrêmes

Nous avons également étudié le problème des valeurs des paramètres d'échelle et de forme sur les 15 postes considérés ainsi que leur distribution géographique conjointe.

L'ajustement ponctuel de la loi GP par maximum de vraisemblance à chacune des séries du réseau montre que :

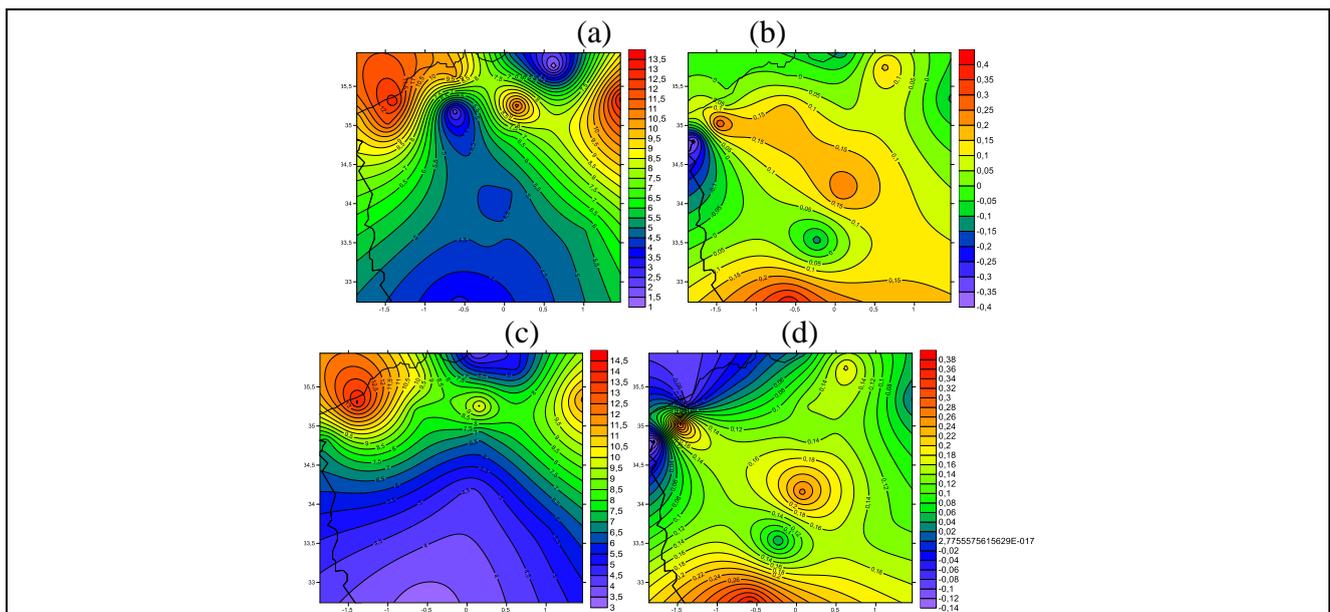


Figure N°47 - Représentation spatiale des deux paramètres de la loi GP (a et c : échelle ; b et d : forme) ajustée par la MLE(en haut) et L-moments (en bas) sur précipitations journalières dépassant un seuil de la saison d'hiver.

La distribution géographique du paramètre d'échelle présente des changements radicaux d'une saison à une autre, les faibles valeurs se situant sur les régions sud et gagnant des latitudes plus au Nord tout en traçant un gradient serré au cours de se trajet,ont constitué la caractéristique principale de la saison hivernale ; des estimations plus fortes dépassant les 10 mm sont repérées vers l'extrême

Est et Ouest du domaine. Une configuration différente a marqué la saison printanière pour laquelle les faibles mesures gardent leur emplacement géographique vers le Sud mais présentant cette fois-ci une inclinaison claire vers les région Est contre des estimations plus importantes sur ces même régions au cours de la saison d'automne qui mesure des valeurs autour de 13 mm ; ces dernières commencent à devenir plus faibles vers le Nord pour détacher deux noyaux de mesures minimales le premier vers l'Est et le second vers l'Ouest. Le paramètre de forme estimé par maximum de vraisemblance et relatif à la saison estivale se distingue clairement par une configuration très particulière par rapport aux autres saisons ; l'ensemble du domaine affiche des valeurs faibles en dessous de 11mm exception faite pour la région Nord-centre du domaine qui est couverte par un noyau de fortes estimations dont le max mesure 29 mm.

Si le paramètre d'échelle présente des différences dans certains cas et des points communs dans d'autres cas entre les saisons ; le paramètre de forme ne présentent aucune similitude entre les saisons ; des configurations fortement différentes ont marqué la distribution saisonnière de ce paramètre.

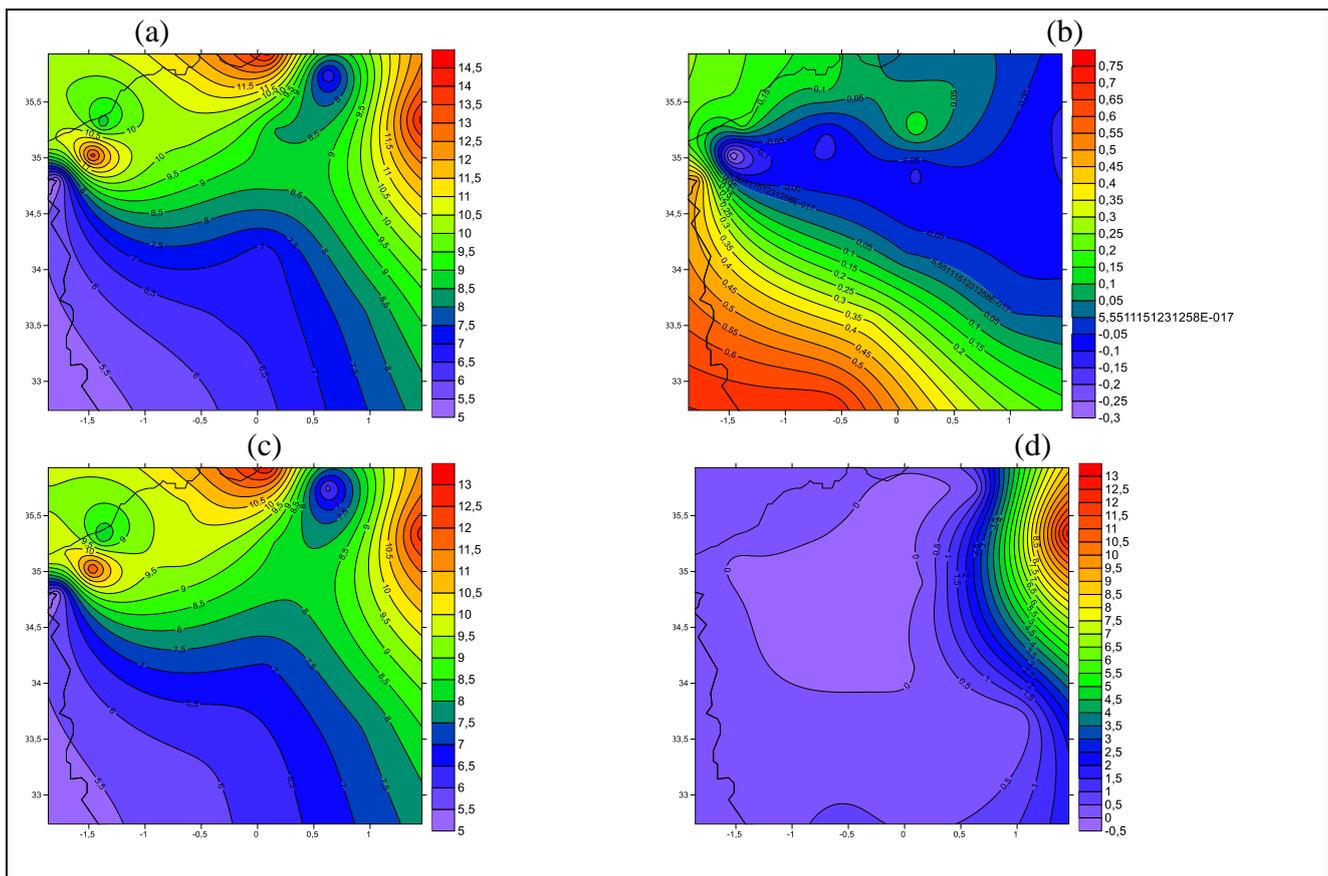


Figure N°48 - Représentation spatiale des deux paramètres de la loi GP (a et c : échelle ; b et d : forme) ajustée par la MLE(en haut) et L-moments (en bas) sur précipitations journalières dépassant un seuil de la saison de printemps.

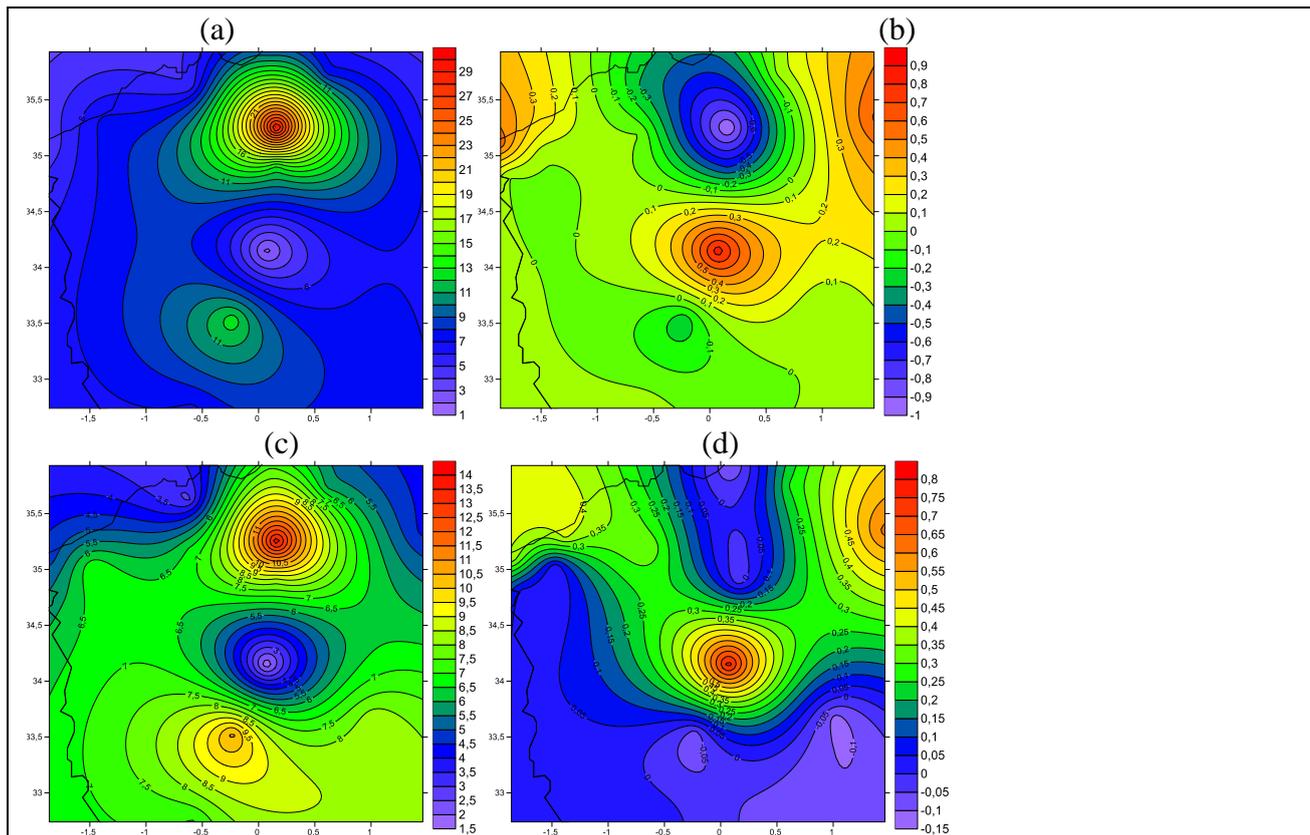


Figure N°49 - Représentation spatiale des deux paramètres de la loi GP (a et c : échelle ; b et d : forme) ajustée par la MLE(en haut) et L-moments (en bas) sur précipitations journalières dépassant un seuil de la saison estivale.

Les paramètres σ et ζ de la loi GP estimés par la méthode des L-moment sont indiqués avec un code couleur sur les figures ci-dessus.

Les conclusions sur ces estimations faites station par station de manière indépendante sont similaires à ce qui a été dit en regardant l'ensemble de la base de données de la section précédente.

Les variations d'estimation entre le paramètre d'échelle relatives à la saison hivernale et la saison printanière sont plus faibles que les deux autres saisons restantes mais on discerne encore un motif spatial avec une augmentation des valeurs pour ce paramètre dans les directions Nord-Ouest et Nord-Est.

Une distribution assez éloignée de la configuration spatiale du paramètre d'échelle est détectée lors de la saison automnale par rapport aux autres saisons, les estimations les plus fortes se localisent sur le Sud-Est et diminuent en direction du Nord pour détacher deux régions de valeurs minimales, une à l'extrême Est et l'autre vers l'ouest.

On note que la saison estivale continue à s'individualiser en présentant un comportement particulier ayant comme caractéristiques la présence de trois noyaux essentiels distribués en fonction des latitudes ; une zone de valeurs moyennes au Sud surmontée latitudinalement par une région de valeurs trop basses qui sont à leurs tours limitées par un noyau de valeurs moyennes augmentant vers le centre. Etant donné que le paramètre de forme décrit le comportement asymptotique de distribution ; il a toujours véhiculé un comportement fortement différent entre les saisons ; une distribution tantôt chaotique tantôt peu organisée

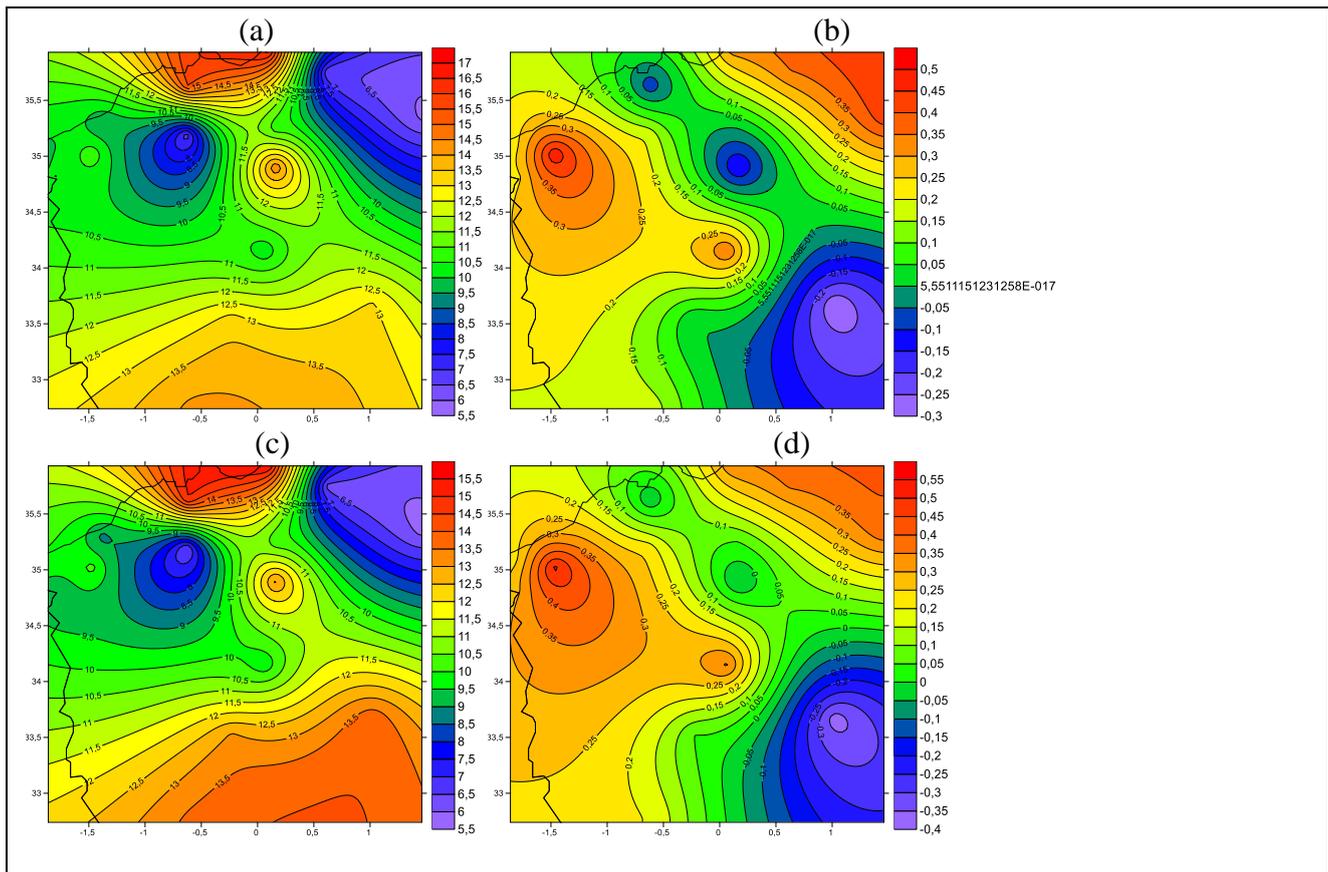


Figure N°50 - Représentation spatiale des deux paramètres de la loi GP (a et c : échelle ; b et d : forme) ajustée par la MLE(en haut) et L-moments (en bas) sur précipitations journalières dépassant un seuil de la saison d'automne.

5. I.5 La climatologie des extrêmes pluviométriques

Les cartes des pluies journalières ayant une durée de retour de 30 ans mettent en évidence des distributions géographiques de ces dernières pouvant être contrôlées par un certains nombre de Facteurs.

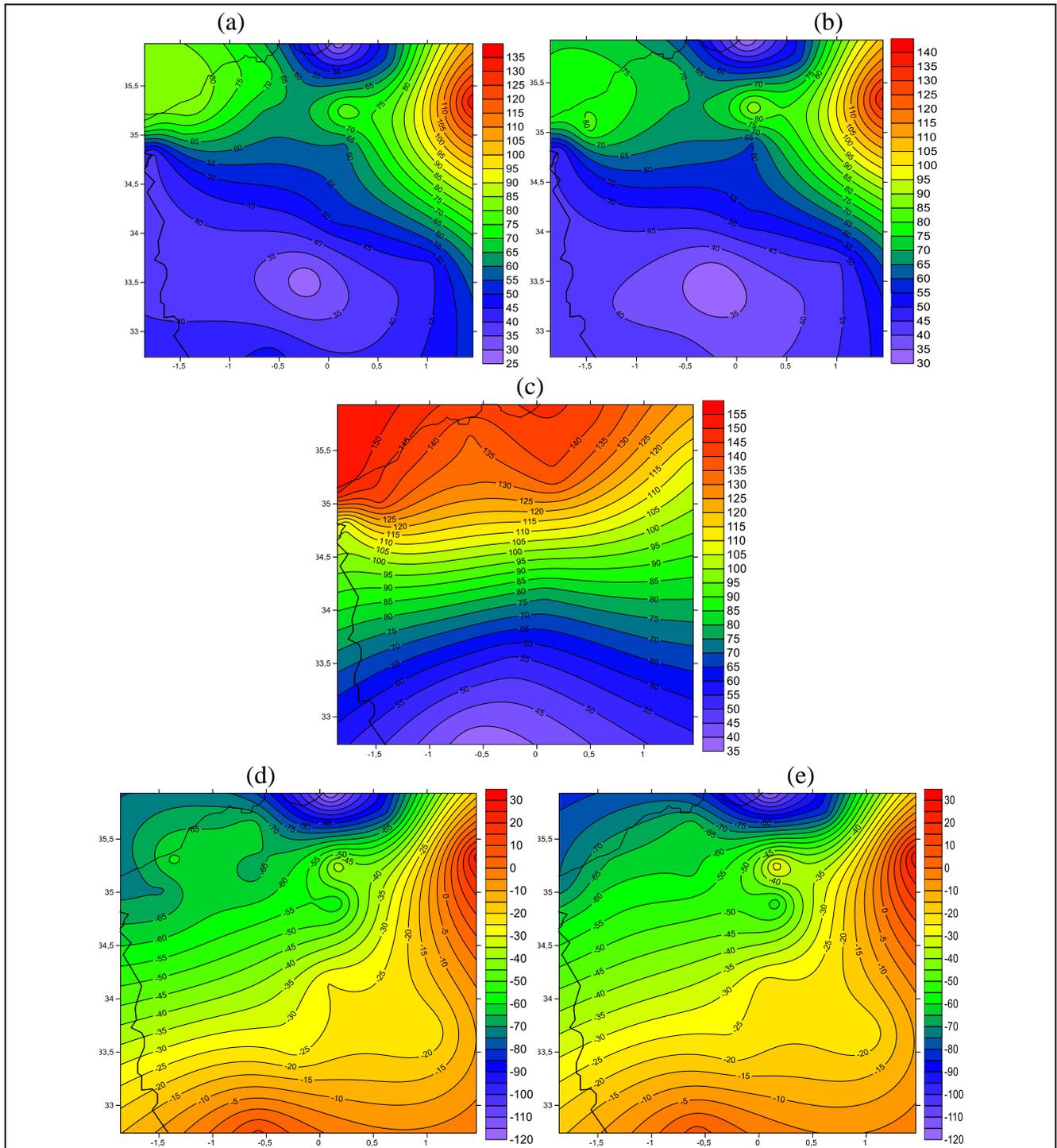


Figure N°51 - Valeurs de retour de 30 ans (en haut a MLE et b L-moments) et moyennes (en milieu c) et l'écart entre les extrêmes de durée de retour 30 ans et la moyenne hivernale (en bas d et e) de précipitation journalière pour la période 1982-2019. Unité mm/jour

La représentation graphique des extrêmes pluviométriques montre une distribution des extrêmes pluviométriques caractérisée une plage de valeurs variant entre 30 à 140 mm dont les fortes valeurs de l'ordre de 130 mm sont repérées sur l'extrêmes Est du domaine d'intérêt(Relizane et Tiaret),

Les valeurs de retour de 30 ans (montrées sur la Figure N°51) diminuent dans toutes les autres directions pour atteindre 75 mm sur l'ouest et une valeur minimale de 35 mm sur le sud de la région étudiée vers les régions de Ainsefra et Mechria.

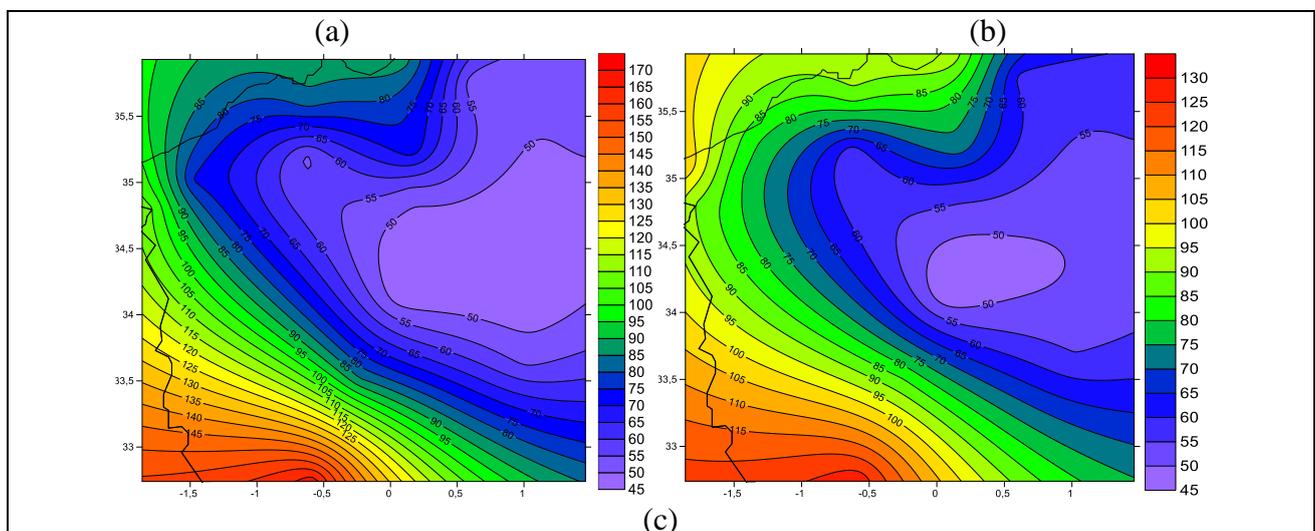
Un point important à noter est que presque pas de différences nettes entre les extrêmes délivrés en adoptant les maximums de vraisemblance comme base d'estimation des paramètres de la GEV ou la méthode des L-moment comme outil d'estimation de ces derniers.

Le recourt à la distribution moyenne pour cerner le comportement des extrêmes par rapport aux valeurs moyennes a mis en évidence une certaine similitude pour laquelle les plus basses valeurs sont situées vers le sud du domaine alors que les différences deviennent plus importantes vers le Nord où on repère un comportement totalement différent des régions recevant au moyenne des pluies fortes observent des cumuls extrêmes assez faibles, un gradient en fonction de la latitude est claire sur les moyennes et présente des écarts notables en termes de distribution comme en termes d'ordre de grandeur.

Afin de préciser l'ampleur de cette différence, l'examen des cartes des différences entre les valeurs extrêmes et les moyennes montre un écart négatif sur l'ensemble du domaine beaucoup plus accentué vers le Nord à l'exception d'une région restreinte du centre « Mostaghanem » qui affiche des écarts positifs trop faible, on conclue donc que les extrêmes pluviométriques présentent des valeurs moins importantes que les valeurs moyennes pour la saison hivernale.

La répartition des précipitations extrêmes de la saison printanière est très irrégulière.

Les régions Est du domaine d'intérêt observent des extrêmes pluviométriques avec les cumuls les plus faibles présentant une extension géographique importante vers les autres régions et dont la valeur minimale est voisine de 50 mm au niveau d'Elkheiter, ces cumuls deviennent plus forts lorsqu'on se dirige vers l'ouest et le sud de telle façon que la valeur maximale est repérée sur l'extrêmes sud-ouest avec une valeur de 120 mm à Ainsefra.



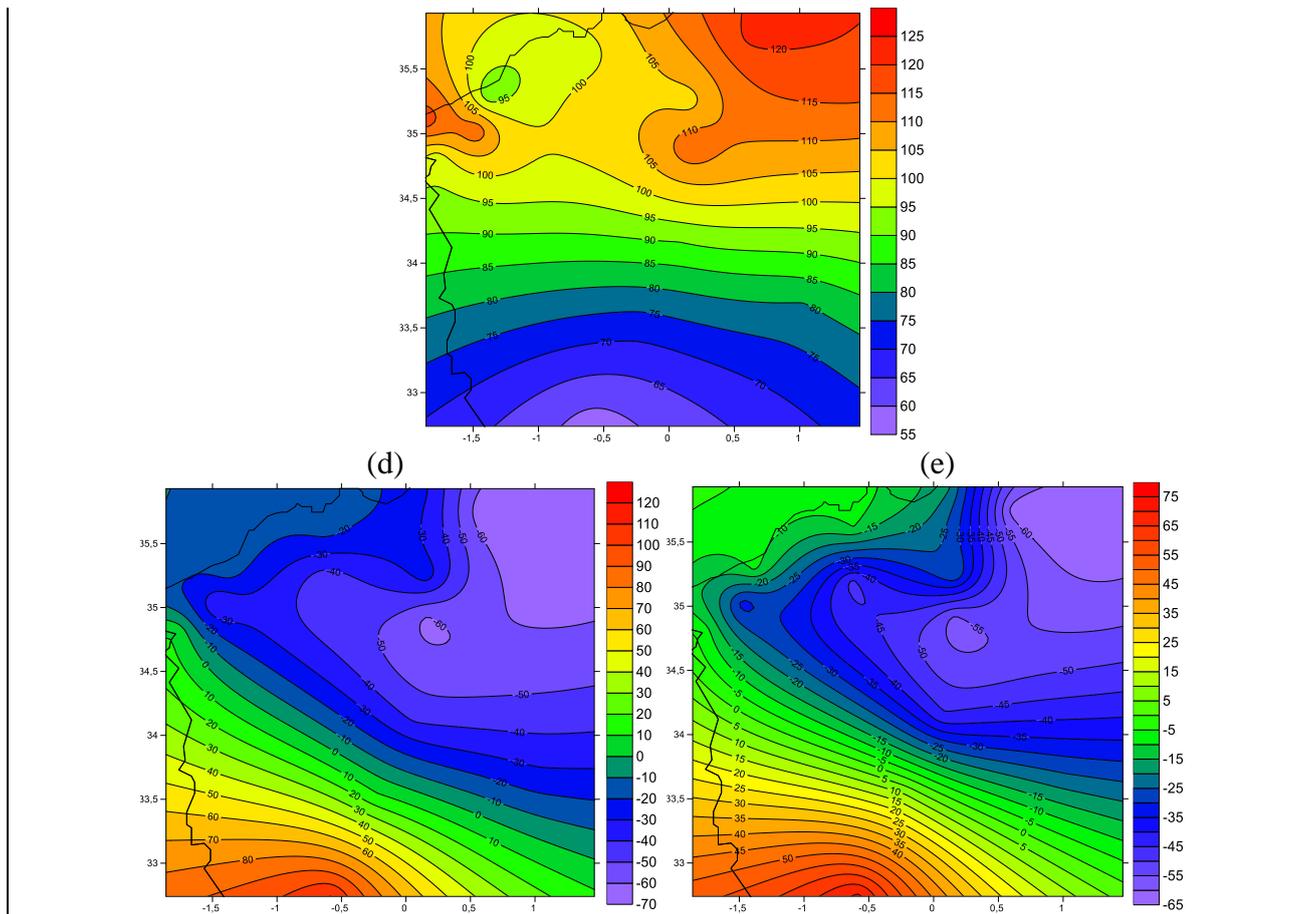
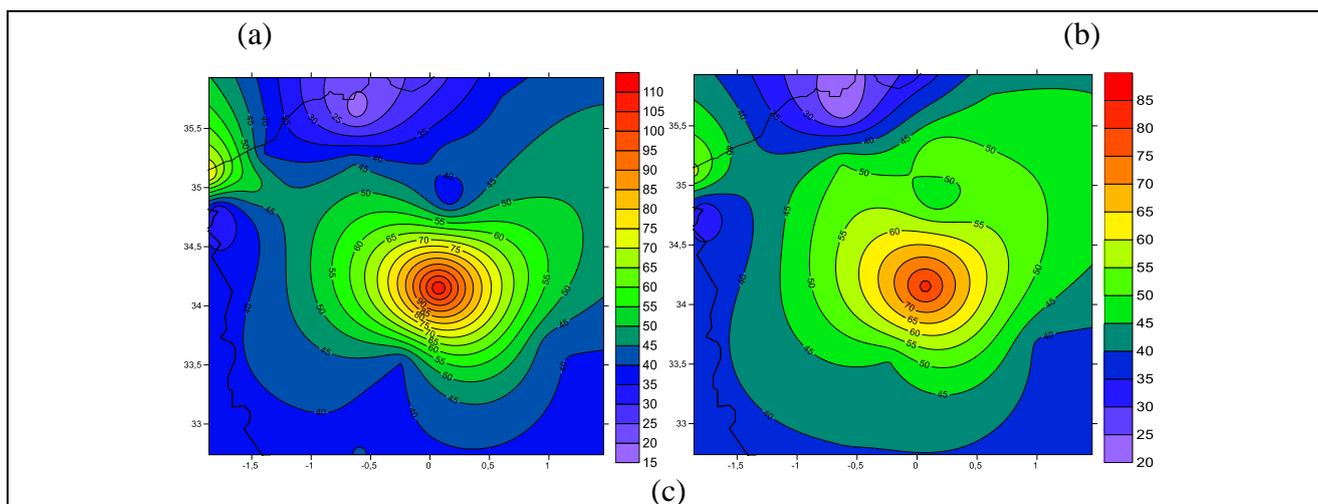


Figure N°52 - Valeurs de retour de 30 ans (en haut « a » MLE et « b » L-moments) et moyennes printanières (en milieu c) et l'écart entre les extrêmes de durée de retour 30 ans et la moyenne printanière (en bas d et e) de précipitation journalière pour la période 1982-2019. Unité mm/jour.

Cette distribution est bien valable pour les deux méthodes d'estimations des paramètres de la GEV mais une différence apparaît en termes d'extension géographique et de gradient.



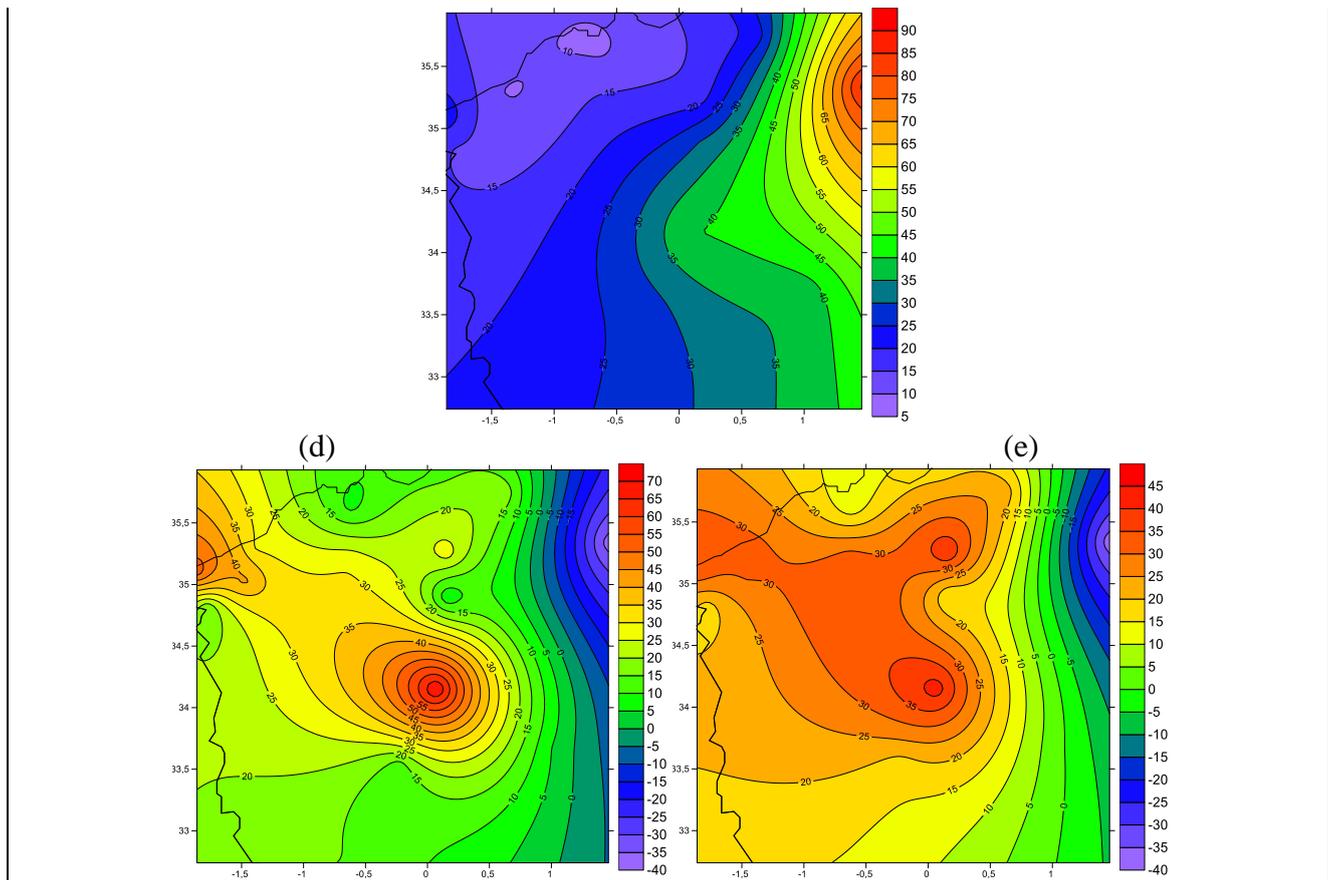


Figure N°53 - Valeurs de retour de 30 ans (en haut « a » MLE et « b » L-moments) et moyennes estivales (en milieu c) et l'écart entre les extrêmes de durée de retour 30 ans et la moyenne estivale (en bas d et e) de précipitation journalière pour la période 1982-2019. Unité mm/jour.

Les cumuls les plus faibles accompagnant les extrêmes de durée de retour de 30 ans gagnent plus d'espace géographique en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance que la méthode des L-moment et présentent un gradient plus important sur les régions observant les cumuls les plus fort où on observe une valeur dépassant celle délivrée par les L-moments et qui cette fois-ci avoisine les 155 mm.

Les moyennes des précipitations printanières connaissent leur maximum vers les régions Nord-Est avec 120 mm comme valeur maximale alors que ces dernières deviennent moins importantes sur les autres régions et tracent un gradient toujours fonctions de la latitude ; les latitudes les plus au sud observent les moyennes les plus faibles.

Contrairement aux extrêmes pluviométriques hivernaux qui présentaient uniquement des écarts négatifs ; les pluies extrêmes de la saison du printemps présentent des écarts à la moyenne aussi bien positive que négatifs.

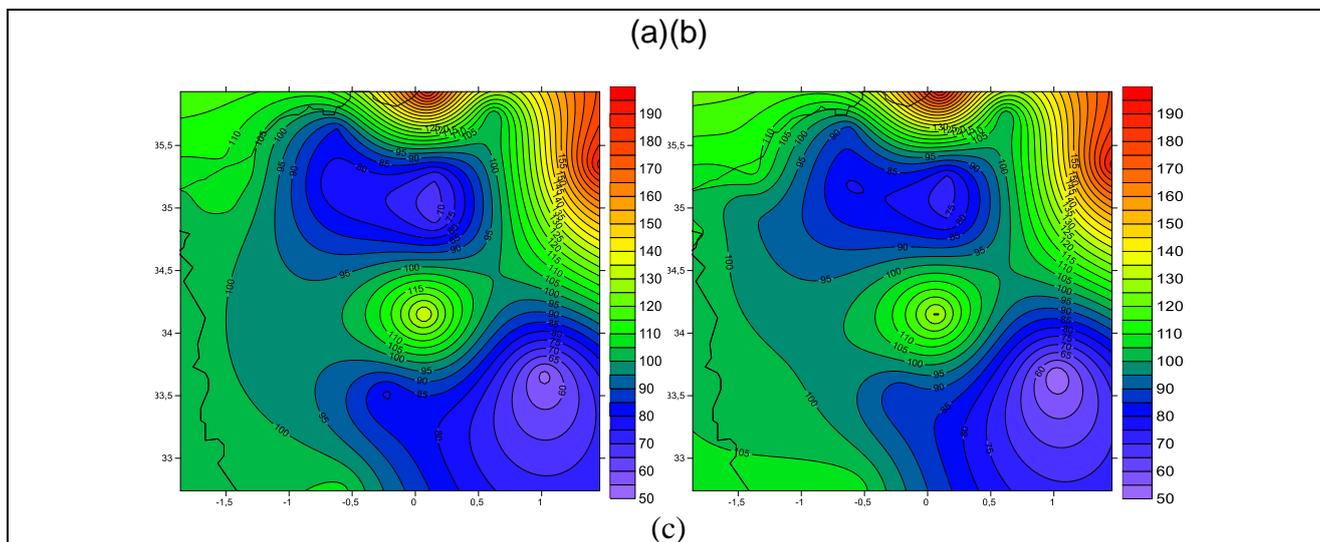
La distribution des différences entre les extrêmes et les moyennes est assez proche des extrêmes que les moyennes et affiche même une répartition géographique qui les ressemble avec des cumuls

moyens supérieures aux valeurs extrêmes sur une bonne partie du domaine et des valeurs positives sur le sud-ouest.

L'été se caractérise par un comportement des extrêmes plus complexe, des valeurs extrêmes oscillant entre 15 et 110 mm s'organisent de telle façon que les cumuls les plus importants sont observés sur les régions centres du domaine « Elkheiter » en forme de noyau. Une valeur maximale de 80 mm est délivrée par la technique d'estimation des paramètres de la loi GPD des L-moments contre 150mm estimée par la méthode du maximum de vraisemblance. On note également que la méthode des L-moment affiche un intervalle des valeurs extrêmes compris entre 20 et 85 mm, la méthode du maximum de vraisemblance quand à elle déclare un intervalle plus large avec des cumuls variant entre 15 et 110 mm.

A partir de ce noyau les cumuls commencent à perdre de leurs valeurs enregistrant une valeur minimale de 25 à 20 mm sur le Nord « Oran » et de 40 mm vers le Sud.

Les moyennes estivales représentées sur la figure N°53 illustrent un comportement fortement différent des extrêmes pluviométriques ; une organisation contrôlée par une distribution longitudinale des moyennes estivales caractérisée par un gradient plus serrée vers le Nord-Est dont la valeur maximale est de l'ordre de 85 mm « Tiaret » et un gradient relâché vers l'ouest affichant une valeur minimale de 10 mm sur le Nord-ouest. Les cumuls moyens pour cette saison varient entre 5 et 90 mm.



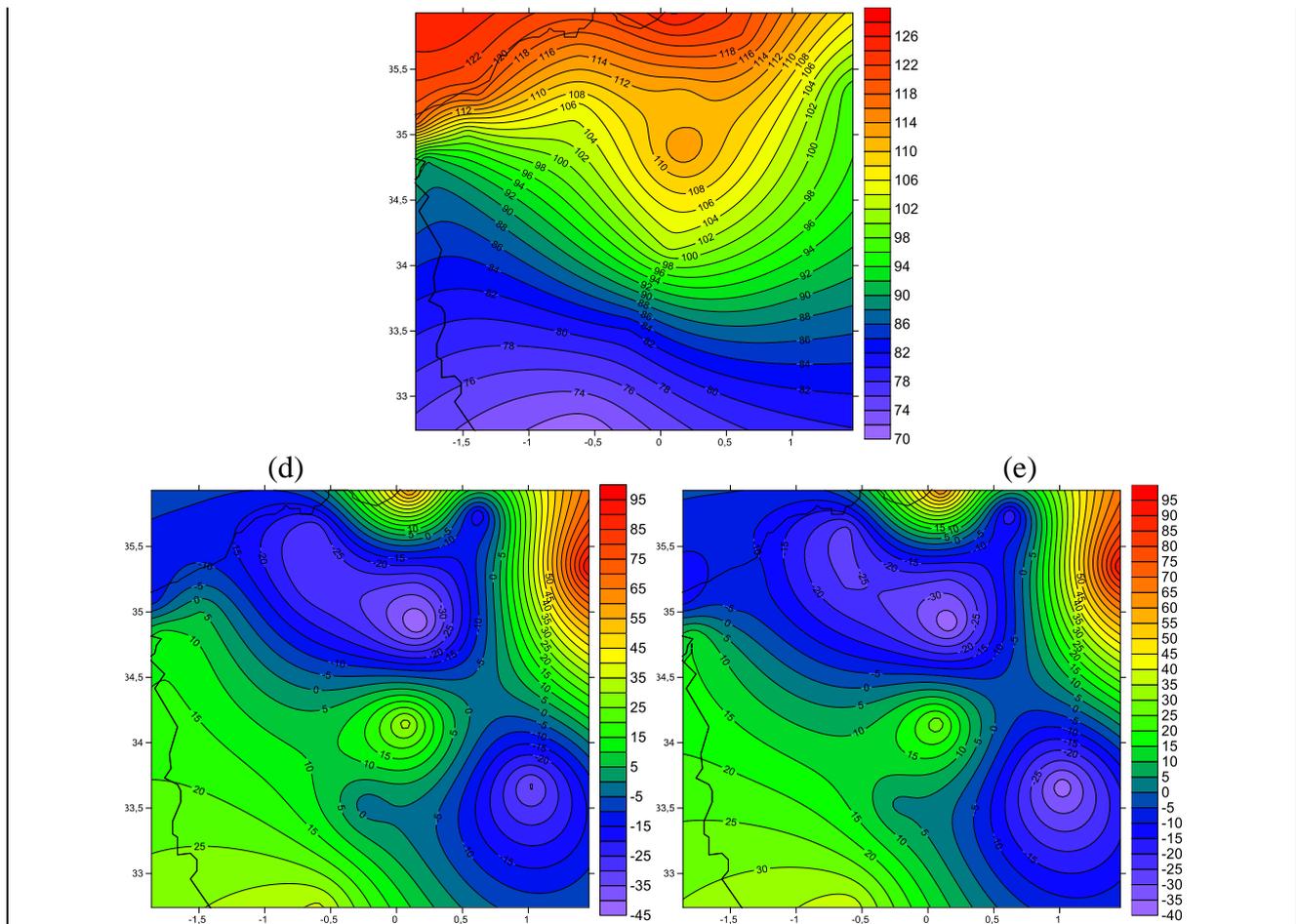


Figure N°54 - Valeurs de retour de 30 ans (en haut a MLE et b L-moments) et moyennes automnales (en milieu c) et l'écart entre les extrêmes de durée de retour 30 ans et la moyenne automnale (en bas d et e) de précipitation journalière pour la période 1982-2019. Unité mm/jour.

La comparaison quantitative des cartes dans les Figure N°52 et Figure N°53 révèle une particularité intéressante : la différence entre les valeurs extrêmes et les moyennes estivales déclarée par les deux méthodes d'estimation des paramètres de la loi GPD exprime des écarts positifs sur la majorité des régions du domaine d'intérêt mais avec une extension géographique un peu différente ce qui dénote des cumuls relatifs aux extrêmes plus importants que les moyennes estivales, les régions de l'extrêmes Est observent des écarts négatifs montrant un comportement différentiel entre les différentes régions. L'écart minimale détecté est de -40 mm pour les deux méthodes MLE et L-moments contre des écarts maximaux différents ; ils sont respectivement de 70 mm pour La MLE et de 45 mm pour la méthode des L-moments.

Une première vue des cartes (figure N°54) représentant la climatologie des précipitations extrêmes pour la saison automnale sur l'ouest du pays révèle une variation géographique similaire en terme de position comme en terme de cumuls affichés entre les deux méthodes d'estimation des paramètres de la GPD et est caractérisée par des valeurs moyennes au centre de l'ordre de 125 mm

encadrées par des valeurs plus basses en direction du Nord et du Sud ; alors que des cumuls extrêmes les plus importants sont situés sur le Nord-centre du domaine vers Mostaghanem et l'extrême Nord-Est vers Tiaret dont lesquelles le gradient est beaucoup plus serré.

Les précipitations moyennes automnales connaissent une distribution trop écartée des extrêmes pluviométrique de cette saison ; elles sont organisées sur un plan latitudinale dont les valeurs les plus faibles avec une valeur minimale de 70 mm sont situées vers le Sud et commencent à prendre de valeurs en se dirigeant vers le Nord et en s'accroissant en termes de gradient pour atteindre des maximales voisines de 120 mm sur le Nord du domaine.

Afin de revenir sur la réalité des différences de comportement entre les extrêmes pluviométriques de la saison d'automne et les moyennes de cette saison, on examine les cartes illustrant la différence entre les deux. Il apparaît à travers cet examen que la distribution des écarts soit plus proche des extrêmes que des moyennes et affiche des écarts négatif sur l'axe joignant le Sud-Est au Nord-Ouest, des différences positives sont repérées ailleurs avec un gradient très accentué sur le Nord-Est. Il est important de noter que les deux méthodes MLE et celle des L-moments convergent vers les mêmes résultats.

5. I.6 Relation entre les valeurs moyennes et les valeurs de retour de 30 ans de précipitation journalière :

Après avoir discuté deux points importants : la climatologie des extrêmes pluviométriques pour chaque saison en termes de lecture synoptique de leur distribution géographique ainsi que les cumuls accompagnants ces derniers et leurs différences aux conditions climatologiques moyennes ; on détaille dans ce qui suit la relation statistique entre les extrêmes de durée de retour de 30 ans et les normales saisonnières pour évaluer l'ampleur de cette liaison.

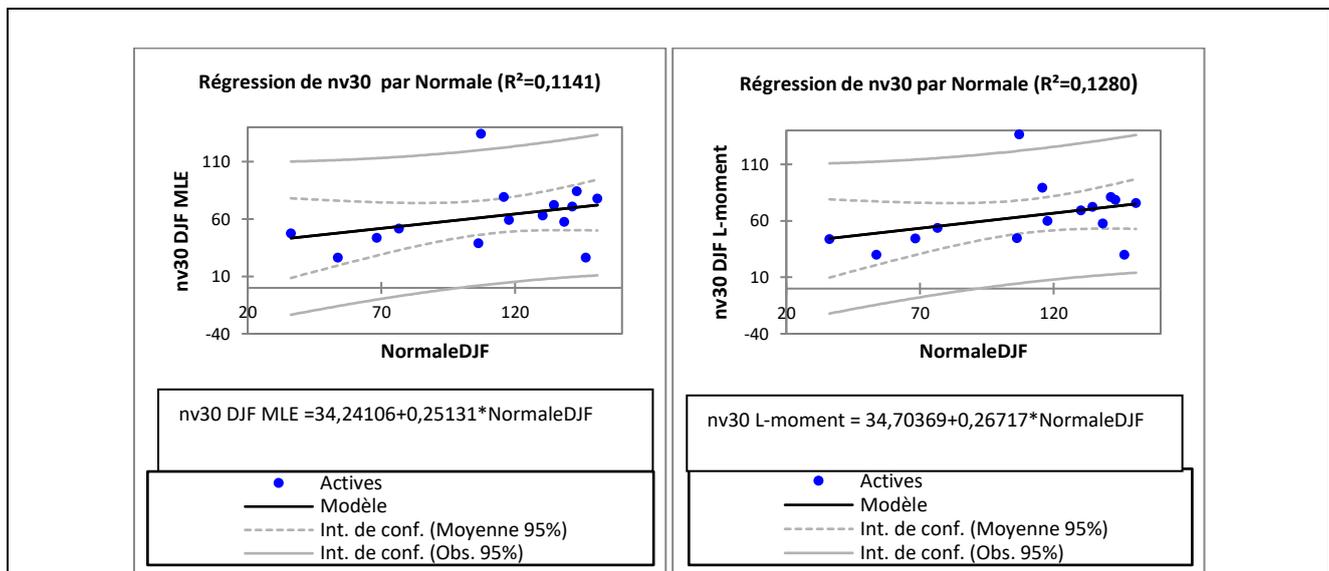


Figure N°55- Relation entre les valeurs moyennes et les valeurs de retour de 30 ans de Précipitation journalière pour la saison hivernal

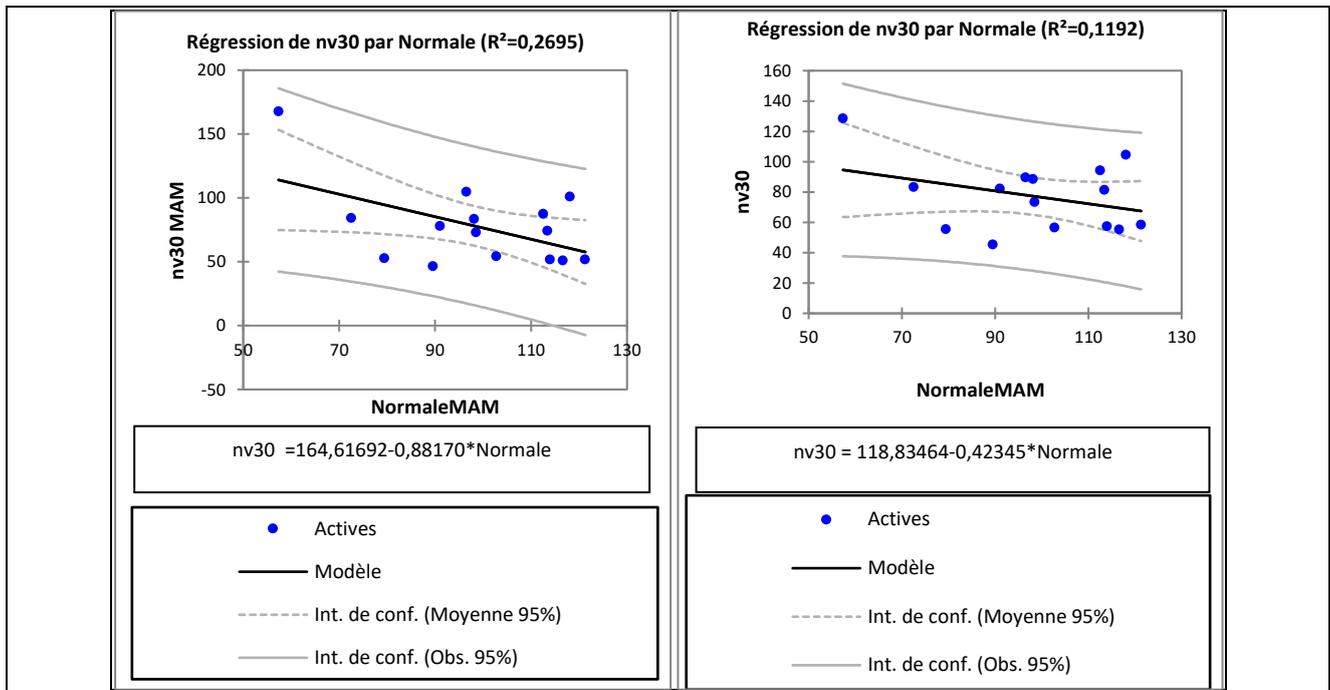


Figure N°56- Relation entre les valeurs moyennes et les valeurs de retour de 30 ans de Précipitation journalière pour la saison de printemps.

Les figures {(N°55), (N°56), (N°57) et (N°58)} donnent les diagrammes de dispersion des valeurs extrêmes en fonction des valeurs moyennes ainsi que l'équation qui contrôle cette relation.

En général on dégage les constatations suivantes :

- Une corrélation trop faible entre les pluies extrêmes et les pluies moyennes en automne s'améliorant pour les autres saisons tout en restant faible.
- La relation linéaire la plus forte est détectée entre les extrêmes pluviométriques et les pluies moyennes printanières estimée à $R^2=0,2695$. La pente est de -0.9 et l'ordonnée de $164,62$ mm illustrent le fait que l'écart entre les valeurs moyennes et les valeurs de retour de 30 ans diminue en suivant l'augmentation des précipitations moyennes.

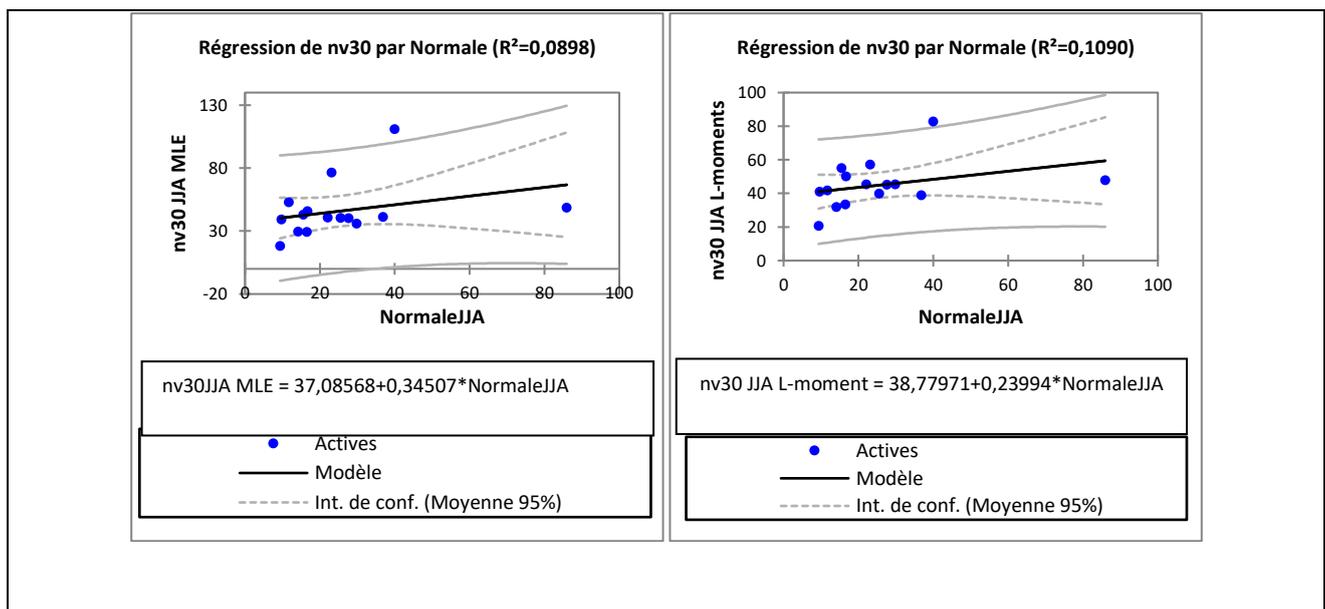


Figure N°57- Relation entre les valeurs moyennes et les valeurs de retour de 30 ans de Précipitation journalière pour la saison estivale

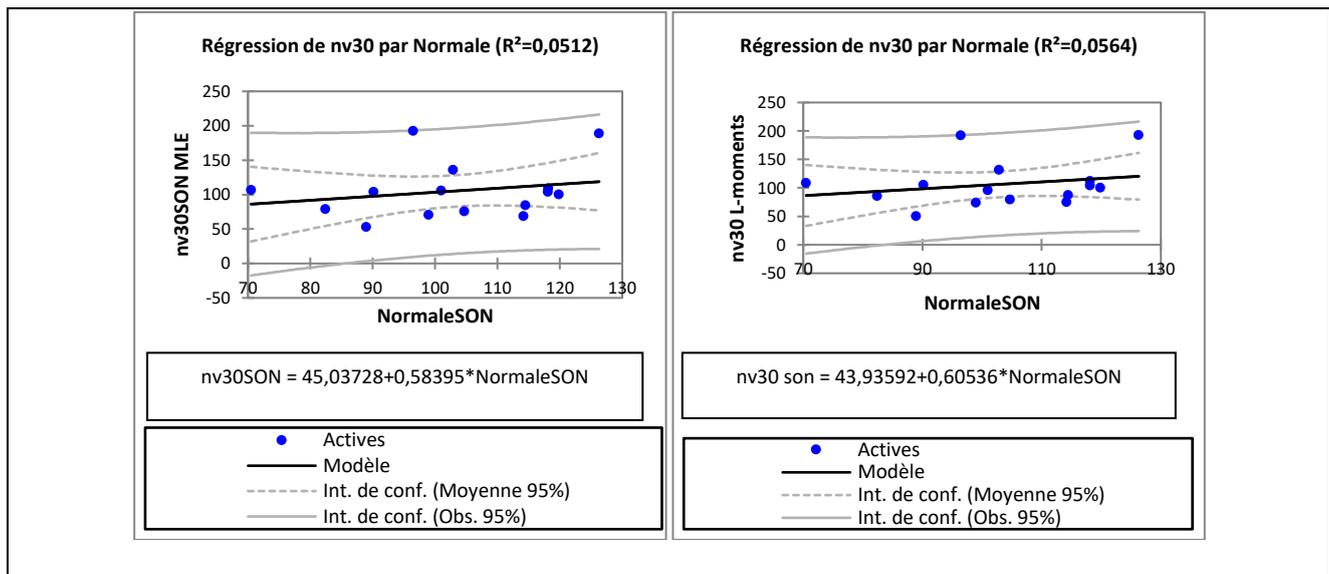


Figure N°58 - Relation entre les valeurs moyennes et les valeurs de retour de 30 ans de Précipitation journalière pour la saison automnale

- des relations assez proches sont délivrées par les deux méthodes d'ajustement du modèle fréquentielle la MLE et L-moments à la base des estimations des paramètres de la GPD.
- Les faibles liaisons statistiques dénotent un comportement des extrêmes pluviométriques complexe qui ne peut pas être expliqué par les seules valeurs moyennes.

Conclusion générale

Nous nous sommes intéressés dans cette étude au comportement de la distribution locale des pluies extrêmes dans l'Ouest Algérien. Les valeurs extrêmes ont été considérées au travers de diverses variables : les maxima saisonniers de pluies journalières, les valeurs de pluie journalière dépassant un seuil élevé. Les lois de ces variables et des processus ont essentiellement été étudiées avec des modèles issus de la théorie des valeurs extrêmes.

Nous avons tout d'abord analysé la distribution des maxima saisonniers de pluies journalières au travers du modèle général des valeurs extrêmes : la loi GEV. Une analyse préliminaire, avec des données a montré l'incertitude considérable de l'estimateur du paramètre de forme, incertitude qui se propage dans l'estimation des quantiles de valeurs extrêmes.

Nous avons emprunté le chemin recommandé par les auteurs ayant travaillé sur sujet qui ne préserve aucune condition sur le paramètre de forme; les publications récentes ont en général supprimé l'hypothèse simplificatrice de loi Gumbel, et utilisé une loi GEV sans imposer la nullité du paramètre de forme.

L'enjeu d'un tel débat entre la loi Gumbel et la loi GEV est considérable puisqu'il est directement lié à la sécurité des structures hydrauliques, à l'établissement des zones d'inondation et aux estimations des événements extrêmes. Cependant, il est difficile de donner une réponse tranchée à la question 'Que choisir entre une loi Gumbel et une loi GEV?'. En effet, la variabilité de l'estimateur du paramètre de forme de la loi GEV est telle que l'hypothèse d'une loi Gumbel contre une loi GEV bornée supérieurement et non Gumbel est souvent acceptée.

Ce résultat, donné par quelques publications récentes sur différents postes à l'échelle mondiale, a été vérifié dans cette étude par l'analyse des maxima saisonniers journaliers de 15 postes examinés de 38 ans de mesures. Pour ces 15 postes, l'hypothèse de la loi Gumbel est rejetée sur environ la majorité des postes. Ces résultats montrent que la loi Gumbel n'est pas adaptée pour modéliser les valeurs extrêmes tandis que la loi GEV bornée inférieurement, avec une queue lourde (polynomiale) l'est.

Nous avons également analysé les incertitudes associées aux quantiles estimés par le modèle et comparée avec une modélisation probabiliste issue de la théorie des valeurs extrêmes : la loi GPD ajustée aux dépassements d'un seuil élevé.

Les résultats ont montré que le modèle GPD est peu sensible à l'échantillonnage et respecte les valeurs extrêmes observées. Au niveau des quantiles de période de retour, les estimations issues de la GEV et de la GPD sont assez différentes dans certains cas.

Enfin, nous avons noté encore une fois la difficulté de donner un avis tranché entre une loi GPD et une loi exponentielle. L'analyse fréquentielle a montré que la loi GPD modélisant les dépassements de seuil élevé a un paramètre de forme significativement positif : la loi est donc non bornée supérieurement et non exponentielle mais plutôt à queue lourde, bornée inférieurement.

Les intervalles de confiance du paramètre de forme sont alors plus larges, ils contiennent la valeur 0, et l'on ne peut plus conclure au rejet de la loi exponentielle ; ces résultats sont donc, à prendre avec précaution.

Les variations d'estimation entre les positions sont pour les paramètres de localisation et d'échelle, mais on discerne encore un motif spatial avec une augmentation des valeurs pour ces deux paramètres dans la direction Nord-Ouest du domaine étudié vers les régions de Ghazaouet, Tlemcen, Maghnia et Benisaf.

Nous avons établi la climatologie des événements extrêmes, en particulier par rapport à la climatologie des moyennes, globalement sur l'Ouest du pays.

Afin de qualifier et quantifier les extrêmes climatiques nous avons utilisé l'outil statistique la théorie des valeurs extrêmes (EVT). Depuis quelques années la EVT a commencé à connaître un succès grandissant dans la communauté climatologique. Cependant les études utilisant la EVT analysent souvent uniquement les sorties des modèles climatiques ou des réanalyses (Nogaj et al, 2006 ; Kharin et al., 2007). Les travaux basés sur les données observées ne considèrent généralement pas un grand nombre de stations (Kysel_y, 2002a ; Parey et al, 2007). Dans ce travail nous avons analysé les données issues de plusieurs sources combinées. Notre étude a ainsi confirmé la possibilité et l'intérêt d'utiliser la EVT pour analyser les observations des extrêmes climatiques.

Nous avons pu détecter les caractéristiques statistiques des extrêmes pluviométriques.

La forte variabilité spatiale observée pour les extrêmes pluviométriques, souligne la nécessité de l'approche régionale pour cerner leurs caractéristiques et leurs propriétés pour pouvoir estimer leur évolution en réponse aux changements climatiques.

Les résultats trouvés montrent que l'utilisation de la méthode des L-moments pour estimer les paramètres de la loi des valeurs extrêmes s'avère plus réaliste que la méthode du maximum de vraisemblance et que la GPD prend plus d'évènements en compte que la GEV qui se limite aux valeurs maximales.

On rejoint donc l'idée existante dans la littérature, le maximum de vraisemblance, dont la justification primordiale survient de ses propriétés asymptotiques (c'est-à-dire l'estimation est efficace pour les échantillons de grande taille), est instable et peut produire des estimations irréalistes de paramètre de forme pour les échantillons de petite taille

(par exemple, Hosking and Wallis, 1997 ; Coles and Dixon,1999 ; Martins and Stedinger, 2000 et 2001). La méthode des moments, en comparant avec l'estimateur de maximum de vraisemblance, est au contraire inefficace asymptotiquement,mais donne de meilleurs résultats pour des tailles d'échantillon inférieures(< 100 pour la loi GEV et < 500 pour la loi GPD, pour un paramètre de forme $k > 0$,voir, par exemple Hosking et al. 1985 ; Hosking and Wallis, 1997).

En partant du fait que la taille des séries climatiques utilisées dans ce travail se limite généralement à 38 ans, c'est la méthode de moments que nous allons appliquer pour estimer les paramètres des distributions d'extrêmes.

Vue la complexité de la répartition spatiale des extrêmes pluviométriques sur la région Ouest du pays qui présente une variabilité importante entre les saisons, le choix d'une région homogène en vue de la modélisation spatiale s'avère un exercice difficile et nécessite un investissement statistique et climatologique important pour ce faire.

Par manque de temps nous n'avons pas détaillé cette étude, qui reste pour l'heure très générale. Elle doit être poursuivie afin de préciser et quantifier nos résultats préliminaires.

Perspective

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont permis d'évaluer différentes approches pour modéliser les valeurs extrêmes, que ce soit en regardant les valeurs maximales saisonnières ou les dépassements de seuil journaliers.

Les distributions des valeurs extrêmes ont été ajustées aux données sous l'hypothèse que les statistiques climatiques ne changent pas significativement à l'intérieur de la période donnée (en langage statistique, on dit que les maxima sont identiquement distribués). Cependant l'approche stationnaire ne permet pas d'étudier la tendance dans l'évolution du climat.

L'hypothèse de stationnarité des variables climatiques peut néanmoins s'avérer présenter quelques défauts dans ce cas. Il sera donc nécessaire d'étendre la EVT au cas non-stationnaire, c'est-à-dire que l'on devra considérer les distributions de valeurs extrêmes avec les paramètres variant dans le temps (Kharin and Zwiers, 2005 ; Nogaj et al, 2006 ; Parey et al, 2007). La EVT non-stationnaire offre, en plus, la possibilité d'estimer la tendance des paramètres des extrêmes non seulement en fonction du temps mais aussi en fonction d'autres indices.

Les conclusions tirées dans les chapitres précédents fournissent des réponses à chacun des objectifs fixés en introduction. Les modèles recommandés varient en fonction de la mesure de risque que l'on souhaite estimer.

Si les aléas naturels étudiés dans ce manuscrit sont les précipitations, on peut faire remarquer que les modèles présentés peuvent être appliqués à tout type de données spatiales comme par exemple la force du vent, les températures ou les débits de rivière. Il est toutefois recommandé de procéder avec prudence, car il a été souligné que la forme de la dépendance des extrêmes joue un rôle important sur la qualité d'estimation des méthodes considérées.

Ces travaux peuvent faire l'objet d'approfondissements à l'avenir, parmi lesquels :

- inclure d'autres approches de la littérature des extrêmes dans les études comparatives,
- étudier la sensibilité par rapport à la qualité du jeu de données de précipitations utilisé (par exemple le nombre d'années observées ou encore la répartition du réseau de stations).

Bibliographie

- **AURELIE MULLER** : Comportement asymptotique de la distribution des pluies extrêmes en France.
- **BERE RAKISWEND E THOMAS :(2018-2019)**
Analyse fréquentielle des extrêmes pluviométriques du climat passé et futur du Burkina Faso.
- **ELIZABETH HARADER** : L'impact du changement climatique sur les événements hydrologiques extrêmes des petits bassins versants méditerranéens: le cas du bassin versant du Lez .
- **FOUSSEYNOU BAH** :Data Science avec R.
- **GEREMY PANTHOU** : Analyse des extrêmes pluviométriques en Afrique de L'Ouest et de leur évolution au cours des 60 dernières années.
- **GOUBANOVA KATERINA** : Une étude des événements climatiques extrêmes sur l'Europe et le bassin Méditerranéen et de leur évolution future.
- **HAMLAT ABDELCADER (2014)** : LA CONTRIBUTION A LA GESTION DES RESSOURCES EN EAU DES BASSINS VERSANTS DE L'OUEST ALGERIEN.
- **HANEN GHANMI** : Estimation des courbes Intensité-Durée-Aire-Fréquence (IDAF) de la région de Tunis dans un contexte multifractal.
- **JEANNE COLIN** : Etude des évènements précipitants intenses en Méditerranée : approche par la modélisation climatique régionale.
- **NDJOMO AYISSI ANTOINE** : CONTRIBUTION A LA REALISATION DES COURBES IDF (Intensité, Durée, Fréquence)
- **PIERRE LAFAYE DE MICHAUX ; R'EMY DROUILHET ; BENOIT LIQUET** : Le logiciel R : Maîtriser le langage Ecrire des analyses (bio)statistiques
- **QUENTIN SEBILLE** : Modélisation spatiale de valeurs extrêmes : application à l'étude de précipitations en France.
- **SALAHEDDINE EL ADLOUNI ET TAHA B.M.J. OUARDA** : Comparaison des méthodes d'estimation des paramètres du modèle GEV non stationnaire.
- **UNIVERSITE PARIS OUEST NANTERRE LA DEFENSE UFR SPSE-MASTER 1** : PMP STA 21 Méthodes statistiques pour l'analyse des données en psychologie : Régression linéaire.
- **VINCENT RICHARD** :
S'initier à l'analyse des données avec logiciel R