

Analyse fréquentielle des précipitations maximales et Régionalisation des intensités maximales du modèle de Montana en Algérie.

KERTALI Fouzia^{1a}

Résumé

Les événements de précipitations extrêmes peuvent générer de grandes quantités de pluie sur de courtes périodes. Ces pluies, ainsi que les inondations qui en résultent, peuvent submerger les systèmes de drainage, inonder les sous-sols, emporter des ponts et des routes, et provoquer des glissements de terrain.

Pour réduire les risques liés à ces événements, les ingénieurs, hydrologues, planificateurs et autres décideurs s'appuient sur des données précises concernant les précipitations extrêmes. Les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) constituent une source essentielle de ces données.

L'objectif de cet article est de générer des courbes IDF pour les stations météorologiques réparties à travers l'Algérie. Notre étude, basée sur l'analyse des données pluviométriques et des enregistrements des pluviographes, vise à déterminer les intensités de précipitations pour différentes durées et fréquences rares, et à synthétiser ces résultats à travers les courbes IDF. L'approche repose sur la modélisation des courbes IDF, qui permet de caractériser le régime pluviométrique d'une station et offre un outil adapté pour anticiper les précipitations rares et extrêmes sur des intervalles de retour allant de 2 à 50 ans.

Mots clés : Précipitations extrêmes, Inondations, Courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence), Intervalles de retour, Fréquences rares, Gestion des risques.

^aOffice National de la Météorologie
Correspondance : fouzia.khadidja@yahoo.com.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Données et méthode	2
2.1	Données	2
	Traitement des données manquantes	
2.2	Méthode	2
	Modélisation statistiques des pluies journalières maximales annuelles • Hypothèse de l'analyse fréquentielle • choix et estimation des paramètres des modèles statistiques • Calcul des fréquences empiriques • Caractérisation des périodes de retour • Construction des courbes IDF par le modèle de MONTANA	
3	Résultat et discussion	4
3.1	Vérification des tests d'hypothèses et ajustements des pluies extrêmes à la loi statistique	4
4	Régionalisation des stations météorologiques en fonction de leur niveau d'intensité pluviométrique	7
4.1	Méthode de zonage climatique	7
4.2	RÉSULTATS	7
	Résultats de l'analyse en composantes principales (ACP) appliquée sur les intensités maximales pour T=10 ans : • Résultats de classification K-means appliquée sur les intensités maximales pour T=10 ans	

5	Conclusion	8
	Références	9

1. Introduction

En raison de sa position géographique, l'Algérie est soumise à l'influence de deux climats, Méditerranéen au Nord et saharien au Sud, qui sont à l'origine d'une variabilité spatiotemporelle importante de la pluie. Particulièrement ces dernières années, des pluies brusques et intenses, qui ont eu lieu dans la région étant le facteur déclenchant des phénomènes d'inondation, qui ont provoqué des catastrophes destructrices occasionnant des pertes considérables en vies humaines, d'importants dégâts matériels et de dommages importants à l'économie et de l'environnement. Pour une protection efficace des populations, de leurs biens et des infrastructures hydrauliques des régions les plus exposées de l'Algérie, il est nécessaire d'examiner et de mettre à jour les caractéristiques des précipitations IDF, puisque ces dernières sont souvent utilisées pour concevoir des structures d'eau. La connaissance des courbes IDF est nécessaire pour la mise en œuvre des projets dans le domaine d'estimation des risques d'inondation particulièrement en milieu urbain.

La méthodologie d'établissement des courbes IDF en Algérie est basée généralement sur l'utilisation du modèle statistique de Gumbel (GUMBEL, 1958; BERNARD MOHYMONT GASTON R. DEMARÉE (2006)) Pour décrire les séries du maxima annuel disponibles et du modèle empirique de type Montana.

L'objectif de cette étude est de souligner l'importance cruciale des courbes IDF en Algérie face aux changements climatiques anticipés et à l'accroissement des précipitations intenses récemment observées. Ces courbes jouent un rôle essentiel dans la caractérisation des régimes de pluie, contribuant ainsi à la gestion des ressources hydriques, à la prévision des risques hydrologiques et à la conception d'infrastructures hydrauliques adaptées aux événements extrêmes. En anticipant les variations spatiales des précipitations et en évaluant les fréquences et intensités des événements exceptionnels, les courbes IDF deviennent des outils indispensables pour la gestion des risques d'inondation et l'aménagement urbain face à des pluies plus soutenues et fréquentes. Leur élaboration à partir d'analyses statistiques des données pluviométriques permet une meilleure appréhension des impacts potentiels des changements climatiques sur les précipitations en Algérie. Ainsi, les courbes IDF offrent une base scientifique solide pour anticiper et s'adapter aux conditions météorologiques futures dans le pays. De plus, cette étude nous renseigne sur les régions présentant les précipitations les plus intenses mais de courte durée.

2. Données et méthode

2.1 Données

Les données climatiques utilisées au cours de notre étude sont les données des précipitations de l'office national de la météorologie (ONM). Il s'agit des données de pluviométrie journalière des 50 postes distribuées sur le territoire national. Seules les observations journalières des précipitations sont disponibles pour cette étude et ne permettent pas par conséquent le calcul de durées de retour des cumuls de précipitations maximales sur des pas de temps plus fins.

Les données des précipitations maximales annuelles en 24h, 48h, 72h, 96h et 120h sont calculées à partir des données journalières durant la période 1993 à 2022.

Le choix des stations a été effectué en fonction de la disponibilité des données. Nous avons sélectionné les stations bénéficiant d'une période commune s'étendant de 1993 à 2022 et ne présentant pas plus de 5 pourcent de données manquantes

2.1.1 Traitement des données manquantes

Certaines séries peuvent comporter de nombreuses données manquantes. Il est recommandé de ne pas intégrer une année avec un taux élevé de données manquantes dans la

série temporelle des MA, afin d'éviter l'introduction d'une estimation sous-évaluée. Si, par exemple, le pourcentage de données manquantes pour une année complète est minime, il serait judicieux d'envisager des méthodes d'imputation pour estimer ces valeurs. En revanche, si le taux de données manquantes est significatif, dépassant notamment de 30 pourcent à 50 pourcent dans certains cas, il pourrait être envisagé de procéder à l'exclusion de ladite année.

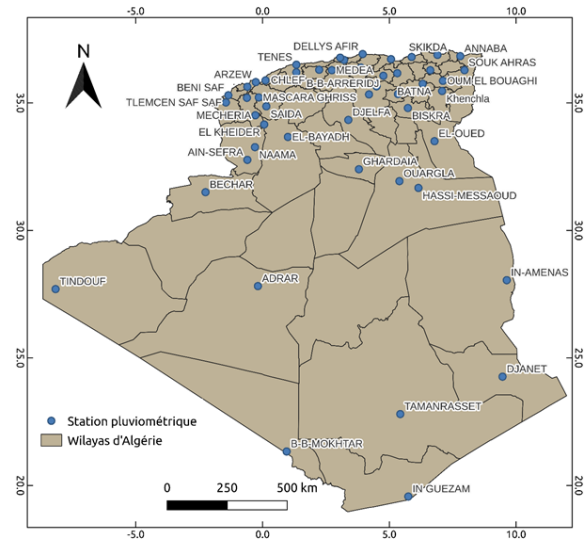


FIGURE 1. Distribution spatiale des 50 stations pluviométriques

2.2 Méthode

2.2.1 Modélisation statistiques des pluies journalières maximales annuelles

L'approche méthodologique a consisté d'abord à vérifier un certain nombre d'hypothèses statistiques dans le contexte de l'application de l'analyse fréquentielle, telles que l'indépendance, l'homogénéité et la stationnarité des données. Ensuite, les différentes lois de distribution choisies ont été ajustées aux données de pluies journalières maximales annuelles. Enfin, une évaluation de la validité des modèles adoptés a été réalisée.

2.2.2 Hypothèse de l'analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle passe en premier lieu par l'appréciation de la qualité des séries à posséder une fonction de distribution en utilisant les tests de stationnarité de Kendall (YUE ET PILON, 2004), d'indépendance d'autocorrélation de KENDALL (Kendall M. (1955)) et d'homogénéité de PETTITT (Pettitt, 1979; Servat et al., 1997). Ces tests fonctionnent tous sur le même principe qui consiste à énoncer une hypothèse sur la population mère et à vérifier sur les observations constatées si celles-ci sont vraisemblables dans le cadre de cette hypothèse.

— Le test d'homogénéité de **PETTITT** : le test de PETTITT est un test non paramétrique utilisé pour détecter une rupture dans une série chronologique à un

instant inconnu. Il permet de tester l'hypothèse nulle H_0 de non rupture contre l'hypothèse alternative H_1 d'une rupture dans la série :

- H_0 : les données sont homogènes;
- H_1 : il y a une date à partir de laquelle il y a un changement dans les données.
- Le test de stationnarité de **Kendall** : c'est un test de corrélation sur le rang, qui sert à détecter les tendances dans les séries. Les hypothèses sont les suivantes :
 - H_0 : il n'y a aucune tendance dans les observations;
 - H_1 : il y a une tendance dans les observations.
- Le test d'indépendance : ce test permet d'examiner l'indépendance en calculant la fonction d'autocorrélation pour chaque station. Nous avons employé le test statistique de **Kendall** (Kendall, 1955), une méthode statistique non paramétrique utilisée pour évaluer la dépendance entre deux variables aléatoires. Il est basé sur le taux de Kendall, une mesure de corrélation des rangs qui quantifie l'association entre deux variables :
 - Pour des données continues, le taux de Kendall varie entre -1 et 1 :
 - -1 indique une dépendance négative parfaite;
 - 0 indique une indépendance;
 - 1 indique une dépendance positive parfaite.
- Le test consiste à confronter les hypothèses suivantes :
 - H_0 : les variables sont indépendantes;
 - H_1 : les variables sont dépendantes.
- Sous H_0 , la statistique de test suit asymptotiquement une loi normale centrée réduite. On rejette H_0 au seuil α si la valeur observée du taux de Kendall est trop élevée en valeur absolue.
- En résumé, le test d'indépendance de **Kendall** est un outil robuste pour évaluer la présence de dépendance entre variables, avec des applications dans de nombreux domaines.

2.2.3 choix et estimation des paramètres des modèles statistiques

Les trois distributions de valeurs extrêmes les plus connues sont les lois : de Gumbel (MULLER, 2006), de Fréchet (MULLER, 2006) et de Weibull (MULLER, 2006); la loi généralisée des valeurs extrêmes (GEV) (MULLER, 2006) combine ces trois lois sous une seule formulation qui se caractérise par un paramètre de forme. Les données auxquelles on adapte notre modèle de distribution de valeurs extrêmes sont des valeurs maximales annuelles observées pendant une longue période, Une période de retour correspond à la fréquence moyenne

à laquelle on s'attend à ce qu'une valeur soit égalisée ou dépassée (une fois tous les vingt ans par exemple).

Les durées de retour de précipitations sont estimées à la Direction de la Climatologie au moyen de la méthode GEV (loi généralisée des extrêmes) et de son cas particulier : la distribution de Gumbel, qui permet d'obtenir des ajustements de niveaux de retour à partir des maximas annuels.

Pour rappel, La fonction de répartition de la loi GEV est donnée par l'expression suivante :

$$DF(x) = \begin{cases} \exp\left(-\left[1 + \eta \frac{x-\mu}{\sigma}\right]^{-\frac{1}{\eta}}\right), & \eta \neq 0 \\ \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right), & \eta = 0 \end{cases}$$

Les paramètres μ , σ , η désignent respectivement les paramètres de position, d'échelle et de forme des différentes lois. Le paramètre de position μ caractérise l'ordre de grandeur de la série des pluies extrêmes. Le paramètre de forme η indique le comportement des extrêmes ou la forme de la distribution. Suivant le signe de ce paramètre de forme, on définit trois types de lois GEV :

- $\eta = 0$, loi à queue légère (ou distribution de Gumbel).
- $\eta < 0$, loi à queue lourde (ou distribution de Fréchet).
- $\eta > 0$, loi à queue bornée (ou distribution de Weibull).

2.2.4 Calcul des fréquences empiriques

En pratique, il s'agit essentiellement d'estimer la probabilité de non dépassement $F(x_i)$ qu'il convient d'attribuer à chaque valeur x_i . Il existe de nombreuses formules d'estimation de la fonction de répartition à l'aide de la fréquence empirique. Elles reposent toutes sur un tri de la série par valeurs croissantes permettant d'associer à chaque valeur son rang r . Des simulations ont montré que pour la loi de Gumbel, il faut utiliser la fréquence empirique de Hazen (BENKHALED, 2007; SORO, 2011) :

$$f(x_i) = r - \frac{0.5}{n}$$

Où r est le rang dans la série de données classée par valeurs croissantes, n est la taille de l'échantillon, $x[i]$ la valeur de rang r .

2.2.5 Caractérisation des périodes de retour

La loi identifiée comme ajustant le mieux les pluies extrêmes a été appliquée aux pluies maximales annuelles pour caractériser les périodes de retour des événements pluvieux extrêmes. Le but étant de vérifier si les épisodes pluvieux à la source d'inondations recensées peuvent être qualifiés d'événements extrêmes ou non, la période de retour (ou temps de retour) caractérise le temps statistique entre deux occurrences d'un événement naturel d'une intensité donnée. Ce terme est très utilisé pour caractériser les risques naturels. Le calcul des fréquences d'apparition des pluies extrêmes fournit des indications intéressantes pour les gestionnaires de l'aménagement. La période de retour d'un événement

est définie comme étant l'inverse de la probabilité annuelle de dépassement de cet événement

$$T = 1 - \frac{1}{F}$$

Où T : période de retour (année); F : fréquence de non-dépassement.

2.2.6 Construction des courbes IDF par le modèle de MONTANA

- **Définition** : Les courbes IDF (Intensité–Durée–Fréquence) sont des outils utilisés dans l'hydrologie pour représenter l'évolution de l'intensité de la pluie en fonction de la durée et de la fréquence d'occurrence. Ces courbes sont construites à partir d'analyses statistiques des intensités de pluie extrêmes issues de séries de mesures historiques, qui doivent être de bonne qualité et suffisamment longues pour inclure des événements rares. Les IDF servent à déterminer la probabilité que certaines intensités de pluie seront observées pendant des durées spécifiques, ce qui est essentiel pour le dimensionnement d'infrastructures hydrauliques telles que digues et systèmes de drainage.
- Trois principaux éléments sont indiqués dans les courbes IDF :
 - **Durée** : La période de temps d'intérêt. Les courbes IDF comprennent généralement des durées de précipitations extrêmes allant de 5 minutes à 24 heures.
 - **Intensité** : L'intensité moyenne des pluies sur la période spécifique d'intérêt, en unités telles que mm/h.
 - **Fréquence** : Pour prévoir des événements extrêmes d'une durée et d'une intensité donnée, il est important de savoir à quelle fréquence ces événements se produisent.
- **Intensité de la pluie – Formule de MONTANA** : La formule de MONTANA (BERNARD MOHYMONT GASTON R. DEMARÉE (2006)) décrit la relation existant entre l'intensité, la durée et la fréquence des pluies.

Elle s'exprime de la manière suivante :

$$i_T(d) = \frac{a}{d^b}$$

It = Intensité durant le temps t en mm/min (ou mm/heure)
d = durée de la pluie équivalente au temps de concentration (en minutes ou en heures).

a et b = coefficients de MONTANA

Cette formule est utilisée pour déterminer la hauteur de pluie maximale sur 24h pour des périodes de retour allant de 5 à 100 ans. Les coefficients a et b sont tabulés pour différentes régions et permettent d'interpoler l'intensité de pluie entre les pas de temps de 6 min à 192h. Connaissant l'intensité de pluie maximale sur 24h pour une période de retour donnée, il est alors possible de calculer le volume d'eau à stocker pour limiter le débit de fuite d'un projet d'aménagement. La formule de Montana est donc un outil essentiel pour le dimensionnement des ouvrages de gestion des eaux pluviales.

Dans cet article, nous présenterons les résultats des cas d'étude des quatre stations sélectionnées des régions de l'Algérie, ces stations ont été choisi au hasard : du centre, est, ouest et du sud à savoir : Alger Dar El Beida, Constantine, Oran et Adrar pour la période 1993-2022

3. Résultat et discussion

3.1 Vérification des tests d'hypothèses et ajustements des pluies extrêmes à la loi statistique

Divers tests d'hypothèses ont été réalisés sur les précipitations maximales annuelles RR24h, RR48h, RR72h, RR96h et RR120h, tels que les tests d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité. Les résultats de l'application de ces divers tests d'hypothèses indiquent que les tests d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité demeurent valides pour les cinq séries de pluies extrêmes, pour toutes les stations pluviométriques étudiées, à un niveau de significativité de 5 %. Ces résultats démontrent que la série des valeurs maximales annuelles de précipitations considérée est composée de valeurs indépendantes, homogènes et stationnaires.

TABLE 1. Vérification des tests d'hypothèses et ajustements des pluies extrêmes à la loi statistique

Station	Tests d'hypothèses	P	Résultats
Alger Dar El Beida	Test de PETTITT	0.917	$p > 0.05$, on accepte H_0 : les données sont homogènes.
	Test de KENDALL	0.916	$p > 0.05$, on accepte H_0 : les données sont stationnaires.
	Test d'autocorrélation de KENDALL	$R^2 = 0.000$	$r = 0.00$, pas de corrélation, données indépendantes.
Constantine	Test de PETTITT	0.332	$p > 0.05$, on accepte H_0 : les données sont homogènes.
	Test de KENDALL	0.272	$p > 0.05$, on accepte H_0 : les données sont stationnaires.
	Test d'autocorrélation de KENDALL	$R^2 = 0.053$	$r = 0.23$, corrélation très faible, données indépendantes.
Oran Es Senia	Test de PETTITT	0.279	$p > 0.05$, on accepte H_0 : les données sont homogènes.
	Test de KENDALL	0.671	$p > 0.05$, on accepte H_0 : les données sont stationnaires.
	Test d'autocorrélation de KENDALL	$R^2 = 0.007$	$r = 0.083$, corrélation très faible, données indépendantes.
Adrar	Test de PETTITT	0.985	$p > 0.05$, on accepte H_0 : les données sont homogènes.
	Test de KENDALL	0.762	$p > 0.05$, on accepte H_0 : les données sont stationnaires.
	Test d'autocorrélation de KENDALL	$R^2 = 0.03$	$r = 0.17$, corrélation très faible, données indépendantes.

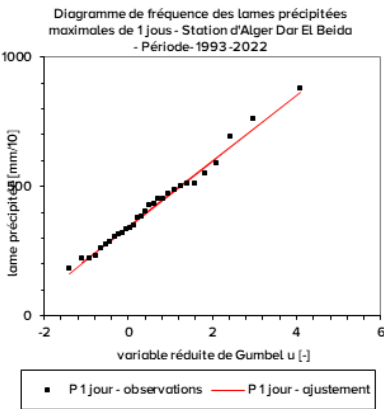


FIGURE 2. RR24 Alger Dar El Beida

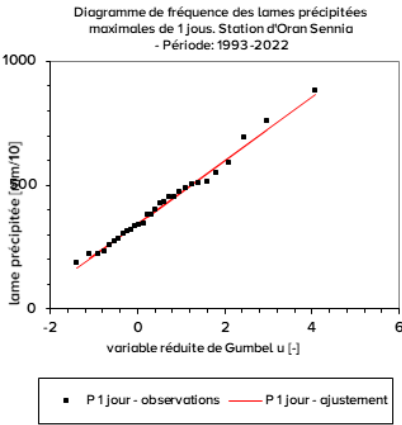


FIGURE 4. RR24 Oran Es Senia

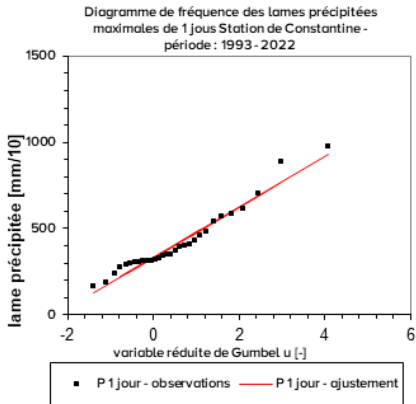


FIGURE 3. RR24 Constantine

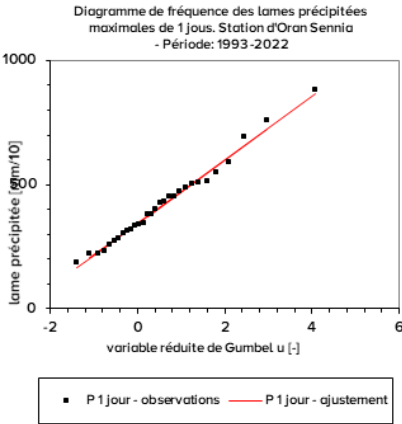


FIGURE 5. RR24 Oran Es Senia

Paramètre	DEB	Constantine	Es-Senia	Adrar
Mu	40.9	33.3	34.4	8.0
Sigma	13.1	14.6	12.7	5.4
Eta	0	0	0	0

TABLE 2. Exemple de résultats des tests d’hypothèses pour l’analyse fréquentielle.

L’analyse des données présentées dans le Tableau N°2 montre que les cumuls maximaux annuels RR24 s’alignent étroitement avec les principes de la théorie de Gumbel. Dans l’ensemble, l’ajustement est satisfaisant, comme en témoigne la corrélation entre les points expérimentaux et la droite d’ajustement. La loi de Gumbel constitue ainsi une méthode prometteuse pour évaluer les probabilités d’occurrence des cumuls et leurs périodes de retour. En se basant sur cette droite d’ajustement, les quantiles des cumuls maximaux ont été déterminés pour différentes périodes de retour. En conclusion, il a été établi que la loi statistique de Gumbel était pertinente dans tous les cas étudiés

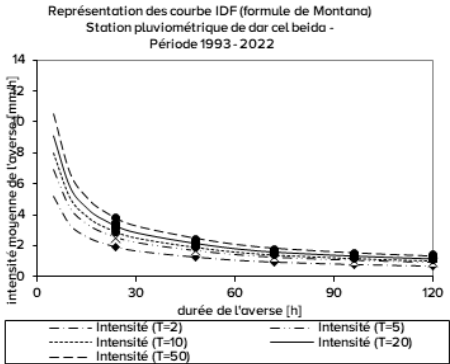


FIGURE 6. représentation IDF de Montana Station Dar El Beida

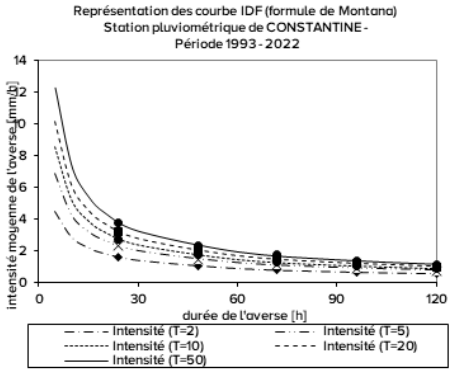


FIGURE 7. représentation IDF de Montana Station Constantine.

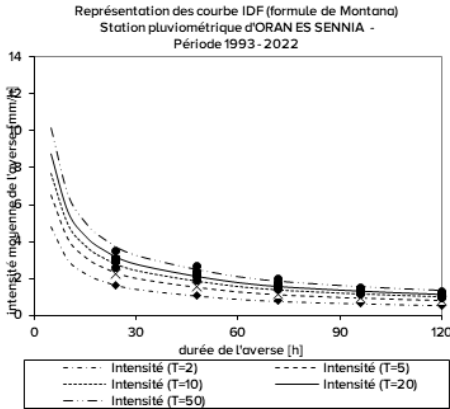


FIGURE 8. représentation IDF de Montana Station Oran Es Senia

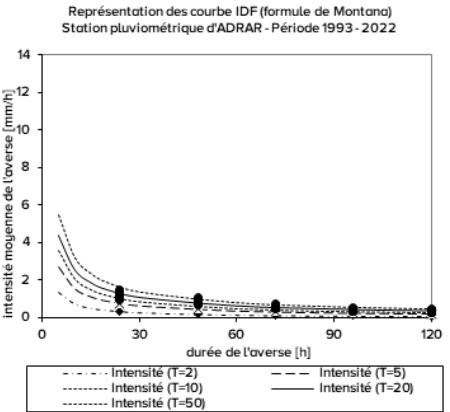


FIGURE 9. Représentation IDF de Montana Station Adrar.

La courbe IDF présente une série de courbes parallèles lorsqu’elle est représentée dans un système d’axes logarithmiques doubles. De manière générale, l’intensité des précipitations diminue avec l’augmentation de la durée d’agrégation et augmente avec la période de retour, ce qui implique que les intensités sont proportionnellement plus faibles à mesure que la durée s’allonge. Il est donc impératif que la fonction i soit décroissante. Les coefficients de Montana

varient selon les régions et les périodes de retour correspondantes.

4. Régionalisation des stations météorologiques en fonction de leur niveau d'intensité pluviométrique

4.1 Méthode de zonage climatique

Une combinaison de méthodes basées sur l'analyse multivariée a été employée pour étudier la régionalisation climatique en Algérie. Les principaux outils utilisés sont l'Analyse en Composantes Principales (ACP) (Cattell, R. B., 1966; Medjerab et al., 2005) et la classification K-means (Arabie, P., Hubert, L.J., De Soete, G., 1996; Forgey, E., 1965).

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une technique statistique utilisée pour réduire la dimensionnalité d'un ensemble de données tout en préservant le maximum de variance. Elle transforme les variables d'origine en un nouvel ensemble de variables orthogonales appelées composantes principales, qui sont des combinaisons linéaires des variables initiales. L'ACP permet ainsi de simplifier l'analyse en mettant en évidence les directions principales de variabilité dans les données. La classification K-means, quant à elle, est l'un des algorithmes de regroupement les plus couramment utilisés. Il repose sur une mesure de distance explicite pour diviser un ensemble de données en clusters. L'idée clé de l'algorithme K-means est de représenter chaque cluster par un vecteur de valeurs moyennes pour les attributs numériques, et par un vecteur de valeurs modales (les plus fréquentes) pour les attributs nominaux.

La combinaison de l'ACP et de la classification K-means, une stratégie fréquemment adoptée en analyse de données, permet une approche puissante et complémentaire. L'ACP réduit la dimensionnalité des données tout en mettant en évidence les principales sources de variabilité entre les individus et les variables. D'autre part, K-means regroupe les individus en fonction de leurs similitudes. Ensemble, ces deux méthodes offrent un outil puissant pour explorer la structure des données, identifier des clusters pertinents, et simplifier l'interprétation des résultats complexes

4.2 RÉSULTATS

Dans cette article nous avons effectué l'analyse en composante principale et la classification de K-means sur les intensités maximales pluviométrique : 1 heure, 3 heures, 6 heures, 9 heures, 18 heures et 24 heures (variables colonnes) estimé à partir de la formule de Montana aux 50 stations pluviométrique étudiées (individus ou observations lignes) pour un temps de retours T=10 ans.

4.2.1 Résultats de l'analyse en composantes principales (ACP) appliquée sur les intensités maximales pour T=10 ans :

Valeurs propres et variances

Le tableau numéro 4 présente les valeurs propres et les variances des facteurs issus de l'analyse en composantes

principales. Seules les composantes dont les valeurs propres sont supérieures ou égales à 1, et qui expliquent au moins 70 % de la variance cumulée, sont considérées comme significatives. Dans ce cas, seule la première composante répond à ces critères, expliquant 92,66 % de la variance. Cette composante regroupe l'essentiel des informations des matrices de données et corrèle de manière significative avec 42 stations, classées de la plus faible à la plus forte intensité. La deuxième composante, quant à elle, montre une corrélation avec 8 stations, dont Batna, Béchar, Bouira, Chlef et Tindouf, tandis que Bordj Bou Arreridj, El Oued et Oran Es Senia sont modérément corrélées.

	F1	F2
Valeur propre	5,560	0,403
Variabilité (%)	92,667	6,716
% cumulé	92,667	99,383

TABLE 3. Tableau des valeurs propres, variabilité et pourcentage cumulé pour F1 et F2

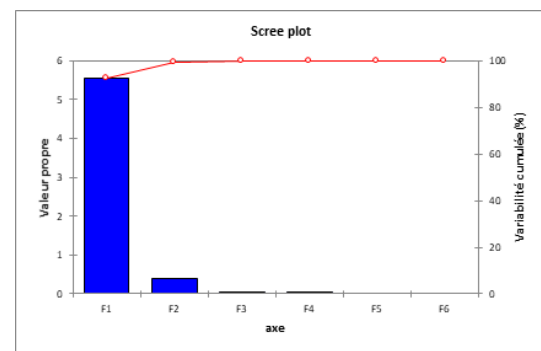


FIGURE 10. diagramme des valeurs propres

Analyse du cercle des variables et individus

Le graphique de la Figure 9 montre que seuls les plans factoriels F1-F2 ont été présentés, car ils reflètent de manière satisfaisante les structures des données. L'analyse dans l'espace des variables du plan factoriel F1-F2 révèle que ce plan explique 99,38 % de la variance totale, avec le facteur F1 dominant, contribuant à 92,67 % de la variance expliquée.

Le graphique met également en évidence une corrélation significative des variables avec l'axe F1, en particulier la forte corrélation de la variable 6h avec cet axe (voir Tableau N°5). Les individus sont dispersés de part et d'autre de cet axe, positif et négatif : les stations à faible intensité se situent du côté négatif de l'axe F1, tandis que les stations à forte intensité se trouvent du côté positif. Les stations positionnées du côté positif des deux axes présentent une forte intensité de 1h à 6h, comme en témoigne, par exemple, la station de M'sila.

Variable	F1	F2
1h	0,875	0,482
3h	0,983	0,182
6h	0,999	0,005
12h	0,988	-0,145
18h	0,973	-0,219
24h	0,952	-0,262

TABLE 4. Tableau des variables avec leurs valeurs associées pour F1 et F2

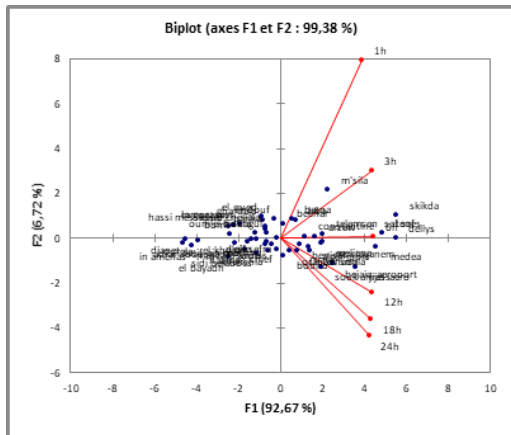


FIGURE 11. représentation graphique des variables-individus

Analyse dans l'espace des individus

La Figure N°10 révèle que le premier axe est un axe d'échelle classant les stations de la plus faible à la plus forte intensité. Nous avons utilisé la dispersion des stations le long de l'axe F1 pour délimiter des zones de pluviométrie distinctes. L'axe F1 divise les stations en deux groupes : un groupe du côté positif et un autre du côté négatif de l'axe. Le plan principal défini par les deux premiers axes nous a permis de procéder à une pré-régionalisation des stations en 4 régions (voir Figure 10), dont les limites ont été établies de manière empirique sur le plan (1-2). Cette classification empirique sera optimisée et validée par une classification ultérieure. Les régions définies par l'Analyse en Composantes Principales serviront de point de départ pour une optimisation maximale de la régionalisation..

4.2.2 Résultats de classification K-means appliquée sur les intensités maximales pour T=10 ans

Les résultats de la classification K-means pour la période 1993-2022 permettent de distinguer quatre grandes catégories homogènes de stations pluviométriques en Algérie :

- **Catégorie C1** : Regroupe les stations situées principalement dans le sud du pays, telles qu'Adrar, Djanet, El Bayadh, Ouargla et In Amenas. Ces stations sont caractérisées par de faibles intensités de précipitations, variant entre 10,4 et 12,7 mm/h sur une heure, et entre 2,3 et 4,2 mm/h sur une période de 6 heures, avec un temps de retour T=10.

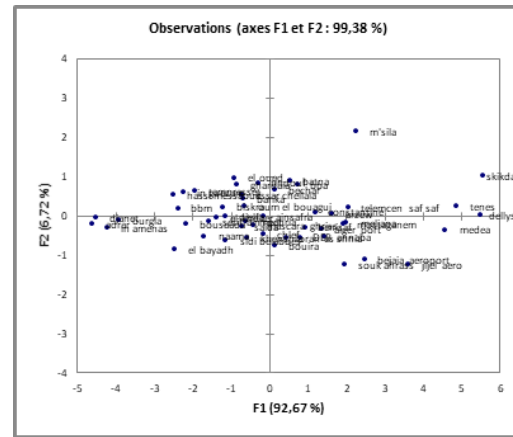


FIGURE 12. Espace des individus.

- **Catégorie C2** : Comprend des stations réparties dans diverses régions du pays, principalement à caractère continental, telles que Ain Sefra, Biskra, Bordj Badji Mokhtar, Boussaâda, Bouira, Chlef, Djelfa, El Kheiter, Khanchla, Mascara Ghriss, Mecheria, Oran Es Senia, Saïda, Sétif, Sidi Bel Abbès, Tamanrasset, Oum El Bouaghi, Hassi Messaoud, In Guezzam et Naama. Les intensités y varient entre 16 et 23 mm/h pour une heure, et entre 4 et 6,5 mm/h pour une période de 6 heures, soit l'équivalent de 24 à 39 mm/6h.
- **Catégorie C3** : Englobe les stations principalement situées sur le littoral ainsi qu'à l'ouest, au sud-ouest, à l'est et au sud-est, incluant Benisaf, Alger Port, Arzew, Barika, Batna, Bordj Bou Arreridj, Béchar, Béjaïa Aéroport, Constantine, Dar El Beïda, El Oued, Jijel Aéroport, Miliana, Mostaganem, Souk-Ahras, Tlemcen Saf Saf, Tindouf, Ghardaïa, Ksar Chellala et Annaba. Les intensités varient de 23 à 27 mm/h pour une heure, et entre 5,5 et 10 mm/h, soit 33 à 60 mm sur une période de 6 heures.
- **Catégorie C4** : Regroupe les stations aux intensités les plus élevées, avec des précipitations variant de 34 à 43,5 mm/h pour une heure, et une moyenne de 8,5 à 11,5 mm/h sur une période de 6 heures. Cette catégorie comprend les stations de M'sila, Dellys, Médéa, Skikda et Ténès.

5. Conclusion

Le principal intérêt de cette étude réside dans la recherche d'un modèle fréquentiel capable de décrire le régime des pluies journalières maximales annuelles en Algérie. Les modèles de distribution couramment utilisés, tels que les distributions GEV et Gumbel, ont globalement fourni des résultats satisfaisants. Les principaux résultats ont permis de vérifier les différentes hypothèses liées à l'analyse fréquentielle. Ainsi, les séries de valeurs maximales annuelles des précipitations journalières considérées sont composées de valeurs indépendantes, homogènes et stationnaires, ce

qui garantit la fiabilité des résultats.

Les résultats de l'analyse graphique visuelle montrent que les séries des pluies journalières maximales annuelles des stations suivent principalement la distribution de Gumbel. Il est donc recommandé d'utiliser la distribution de Gumbel, qui ne nécessite que deux paramètres et offre une expression mathématique plus simple, pour les études de dimensionnement des ouvrages hydrauliques en général et des systèmes d'évacuation des eaux pluviales en particulier.

L'application de l'analyse fréquentielle aux pluies extrêmes permet de déterminer des quantiles en fonction des périodes de retour, qui sont notamment utilisés pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques. Les courbes IDF ont été élaborées à partir des données recueillies sur 50 stations pluviométriques, et les coefficients de Montana ont été calculés pour estimer les intensités maximales.

Une fusion de l'analyse en composantes principales et de la classification K-means a été mise en œuvre à partir des données d'intensités maximales estimées. Cette approche a abouti à la segmentation de l'Algérie en quatre zones homogènes, allant de l'intensité la plus faible à la plus élevée.

Les courbes IDF sont cruciales pour évaluer les risques hydrologiques et hydrauliques associés aux inondations. En raison du changement climatique, les modèles météorologiques prédisent une augmentation de l'intensité des précipitations extrêmes, ce qui pourrait entraîner des événements plus fréquents et plus intenses. Il est donc impératif de réviser et d'ajuster les courbes IDF pour refléter ces nouvelles conditions hydro-climatiques. Cette démarche est essentielle pour une gestion efficace des risques naturels et une planification adéquate des infrastructures. Adapter ces courbes permet non seulement d'anticiper plus précisément les impacts du changement climatique sur les inondations, mais aussi de renforcer la résilience des zones exposées à ces phénomènes météorologiques extrêmes.

Références

- [1] Amani Michel Kouassi, Relwindé Abdoul-Karim Nassa, Koffi Blaise Yao, Koffi Fernand Kouame et Jean Biemi (2018). Modélisation statistique des pluies maximales annuelles dans le district d'Abidjan (sud de la Côte d'Ivoire). *Volume 31, numéro 2*, p. 147–160.
- [2] Pettitt A.N. (1979). A non-parametric approach to the change point problem. *Appl. Statist*, 28(2), 126-135.
- [3] Kendall M. (1955). Rank Correlation Methods, Second Edition. Charles Griffin and Company, London.
- [4] Servat, E., Paturel, J. E., Lubès, H., Kouamé, B., Ouedraogo, M. & Masson, J. M. (1997). Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part one : Detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *J. Hydrol.*, 191, 1-15.
- [5] Yue S. et Pilon P. (2004). A comparison of the power of the t-test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend-detection. *Hydrol. Sci. J.*, 49, 21-37.
- [6] Muller A. (2006). Comportement asymptotique de la distribution des pluies extrêmes en France. Thèse de doctorat, Univ. Montpellier 2, France, 214 p.
- [7] Benkhaled A. (2007). Distributions statistiques des pluies maximales annuelles dans la région du Cheliff. Comparaison des techniques et des résultats. *Courrier du Savoir*, 8, 83-91.
- [8] Soro G. (2011). Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat, Univ. Nangui-Abrogoua, Côte d'Ivoire, 172 p.
- [9] Kouao J.M., Kouassi A.M., Dekoula S.C., Asseufi B.D. (2020). Analyse de la régionalisation climatique de la côte d'Ivoire dans un contexte de climat changeant. *LARHSS Journal*, 41, 233-259.
- [10] Medjerab A., Henia L. (2005). Régionalisation des pluies annuelles dans l'Algérie nord-occidentale. *Revue Géographique de l'Est*, vol. 45, 2.
- [11] Allam A., El Hassan J., Najem W., Bocquillon C., Moussa R. (2020). Classification climatique méditerranéenne pour l'hydrologie. *La Houille Blanche*, 1, 60–69.
- [12] Gumbel E.J. (1958). Statistics of extremes. Columbia University Press, NY, États-Unis, 375 p.
- [13] Mohymont, B., Demarée, G. R. & Faka, D. N. (2004). Establishment of IDF-curves for precipitation in the tropical area of Central Africa—comparison of techniques and results. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, 375–387.
- [14] Mohymont B., Demarée G. R. (2006). Courbes intensité—durée—fréquence des précipitations à Yangambi, Congo, au moyen de différents modèles de type Montana. *Hydrological Sciences Journal*, 51(2), 239-253.
- [15] Arabie P., Hubert L.J. & De Soete G. (1996). Clustering and Classification. Wold Scientific, Singapore.
- [16] Forgey E. (1965). Cluster analysis of multivariate data : efficiency versus interpretability of classification. *Biometrics*, 21, 768.
- [17] Cattell R.B. (1966). The scree test for the number of factors. *Multivariate Behavioral Research*, 1, 245-276.
- [18] Kasmi Mouloud (2012). Contribution méthodologique de la modélisation de l'intensité de pluie de courte durée. Projet de fin d'études (Ingénieur), université Abderrahmane MIRA, BEJAIA.