



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
المدرسة الوطنية العليا للري



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE
Abdellah Arbaoui

Résumé étendu de thèse de doctorat en Hydraulique

Intitulée :

**Caractérisation, variabilité et prévision de la
sécheresse dans le Nord-est Algérien.**

Thésard: Merabti Abdelaaziz

Directeur de thèse: Pr. Meddi Mohamed

Co-directeur de thèse: Pr. Pereira Luis Santos.

Date de première inscription : Décembre 2012.

Soutenu le 26/04/2018

Résumé

La sécheresse est un phénomène naturel avec des effets néfastes sur l'agriculture et les ressources en eau. L'objectif de cette thèse est l'analyse et la prévision de la sécheresse en se basant sur les données de précipitations de 123 stations pluviométriques du Nord-Est Algérien couvrant la période 1960 - 2013 et les données de températures interpolées de la période allant de 1979 à 2013. Sept indices de sécheresse qui prennent uniquement les précipitations comme données de base ont été comparés, il s'avère que l'indice SPI est le plus performant pour tous types de climat et pour les différentes échelles de temps. Le modèle de prévision Markovien d'ordre I et II a été utilisé pour estimer les différentes probabilités d'apparition de la sécheresse au niveau des sept plaines étudiées à l'échelle annuelle et saisonnière en se basant sur les résultats des SPI-12 et SPI-3. Les plaines du sud ont une probabilité plus élevée d'avoir deux événements secs successifs, particulièrement celle de Batna qui atteint 68 % contrairement à la plaine d'Annaba, située dans une région subhumide, où la probabilité est beaucoup moins importante (48 %) ainsi qu'à Sétif avec 43 %. Les résultats obtenus pour le processus d'ordre II sont plus ou moins similaires à l'ordre I. L'utilisation des indices de sécheresse qui prennent en compte d'autres paramètres en plus des précipitations, s'avère nécessaire afin de mieux analyser le comportement de la sécheresse. L'indice RDI, basé sur le rapport de précipitation et d'évapotranspiration potentielle a été employé en parallèle avec le SPI à l'échelle de temps de 3, 6 et 12 mois. Les séries de variables de ces indices ont été soumises à une Analyse en composantes principales en S-Mode avec rotation, deux composantes principales ont été retenues pour l'ensemble des indices. La première composante représente la zone nord caractérisée par un climat humide à subhumide et explique plus de 40 % et 43 % pour les indices SPI et RDI respectivement, tandis que la deuxième composante avec plus de 27 % et 28 %, représente la zone qui se trouve plus au sud avec un climat semi-aride à aride. Le test de Man-Kendall modifié a été employé sur les scores des CP des deux indices SPI et RDI pour les trois échelles de temps afin d'étudier la tendance de la sécheresse à travers le temps. Les résultats montrent des tendances généralement non-significatives pour la diminution de l'occurrence et de la sévérité de sécheresse dans les deux zones identifiées.

1. Introduction

Les sécheresses parmi d'autres phénomènes liés de près aux changements climatiques, touchent de plus en plus les quatre coins du globe. Elle peut être définie comme un déséquilibre naturel temporaire de la disponibilité de l'eau et consiste donc à des précipitations persistantes inférieures à la normale, difficile à prévoir, entraînant une diminution de la disponibilité des ressources en eau (Pereira et al. 2009). C'est l'une des catastrophes naturelles les plus coûteuses au monde, qui affecte plus de personnes que d'autres formes de catastrophes (Keyantash et Dracup, 2002). Nombreuses études se sont concentrées sur les sécheresses en méditerranée. Basé sur une étude à l'échelle mondiale, Spinoni et al. (2014) ont signalé une augmentation significative de la fréquence, de la durée et de la sévérité de la sécheresse dans cette région. Une étude de Giorgi et Lionello (2008) sur les impacts du changement climatique dans le bassin méditerranéen a révélé une diminution évidente des

précipitations associée à un réchauffement évident, principalement pendant la saison estivale. En outre, [Giorgi et Lionello \(2008\)](#) ont suggéré que la Méditerranée pourrait être une région très vulnérable aux changements globaux. Par conséquent, il est probable que les sécheresses affecteront beaucoup plus cette région.

L'Algérie du nord a été focalisée par diverses études de pluviométrie et/ou de sécheresses, cependant la plupart des études sont consacrées sur les régions du nord-ouest contrairement aux régions nord-est où ce phénomène est moins abordé. Parmi ces études citons celles de ([Hamlaoui-Moulai et al. 2013](#) ; [Meddi et al. 2010](#); [Taibi et al. 2017](#); [Zeroual et al. 2017](#)) qui ont montré une diminution des totaux de précipitations dans le nord-ouest de l'Algérie. [Zeroual et al. \(2017\)](#) ont également signalé un réchauffement amplifié. [Zeroual et al. \(2013\)](#) ont indiqué aussi une diminution remarquable des débits moyens mensuels au nord de l'Algérie, ce qui est une conséquence directe de la baisse des précipitations. L'analyse spatiale utilisant la technique d'ACP, a montré que la longitude, la distance de la Méditerranée et la topographie sont des facteurs importants influençant la variabilité des précipitations ([Meddi et al. 2013](#)) tout comme (NAO) ainsi que l'oscillation méditerranéenne ([Tramblay et al. 2013](#)). Rajoutant aussi l'étude de [Taibi et al. \(2013\)](#) qui a identifié six régions dans le nord de l'Algérie, dont deux se trouvent dans l'Est Algérien, où la diminution de précipitations n'a pas été détectée. En général, il existe vraiment une connaissance suffisante de la variation de précipitations et de sécheresses dans le nord-ouest de l'Algérie, contrairement à la partie nord-est qui est moins étudiée, ce qui justifie le choix de cette région du pays.

Plusieurs indices et méthodes ont été développés et utilisés pour mieux identifier et analyser les caractéristiques de la sécheresse, à savoir l'indice de précipitations standardisé connu par SPI : [McKee et al. \(1993\)](#), citons en outre l'indice des déciles ([Gibbs et Maher 1967](#)), l'indice de pourcentage à la normale (PNI) ([Willeke et al. 1994](#)), l'indice de China-Z index (CZI) et l'indice modifié de China-Z (MCZI) ([Wu et al. 2001](#); [Morid et al. 2006](#)), l'indice Z-score ([Hayes, 2000](#)) et l'indice efficace de sécheresse (EDI) [Byun et Wilhite \(1999\)](#). Néanmoins, l'utilisation de ces indices s'avère limitée et incomplète puisqu'ils prennent en compte uniquement les précipitations comme données de base, pour y remédier et tenter d'apporter plus de rigueur à l'analyse et la connaissance relative à la sécheresse, l'indice de reconnaissance de sécheresse (RDI) ([Tsakiris et al. 2007](#)) est ajouté à la série d'indices utilisés dans la présente thèse. L'indice RDI parmi d'autres prend en compte l'effet de la température, plus exactement l'évapotranspiration potentielle. Il est considéré plus adéquat pour les études de sévérité de sécheresse sous l'effet des changements climatiques ([Thomas et al. 2016](#)) et il représente mieux le déficit du bilan hydrique par rapport à un indice basé seulement sur la précipitation ([Tsakiris et Vangelis. 2005](#)).

La prévision de la sécheresse est essentielle pour la mise en œuvre des stratégies appropriées afin de diminuer de son intensité et gérer ses impacts, ainsi que dans l'alerte précoce et la préparation à des éventuelles sécheresses. Divers modèles de prédiction de sécheresse ont été développés par différents chercheurs ; les modèles autorégressifs de moyennes mobiles ([Mishra et Desai, 2005](#)), les

chaînes de Markov (Paulo et Pereira 2007) les réseaux de neurones artificiels (ANN) (Mishra et al. 2007). Mishra et al. (2007) ont développé un modèle de prévision de sécheresse hybride combinant un modèle autorégressif de moyennes mobiles et un modèle de réseaux de neurones artificiels. Rezaeianzadeh et al. (2016) ont combiné l'utilisation des ANN et les Chaînes de Markov. Dans la présente étude, le processus des chaînes de Markov (Cinlar, 1975) d'ordre I et II à l'échelle saisonnière et annuelle a été employé au niveau de sept plaines afin d'estimer les différentes probabilités de sécheresse qui peuvent affecter la zone. En parallèle, l'étude de la variabilité spatio-temporelle de la sécheresse, s'avère importante dans le but de bien analyser et régionaliser ce phénomène dans une région caractérisée par différents climats, cela en faisant appel à la technique de l'analyse en composantes principales (ACP) qui est un outil performant très connu appliqué sur les indices de sécheresse dans différentes études (Martins et al. 2012; Hamlaoui-Moulai et al. 2013; Raziei et al. 2015). Le test de Mann-Kendall modifié (Hamed et Rao 1998) a été utilisé pour déterminer l'importance d'une tendance dans une série temporelle, combiné avec l'estimateur de la pente de Sen afin d'évaluer l'ampleur de la tendance des scores des composantes principales obtenues.

Ce projet de recherche va non seulement permettre d'étudier le phénomène de sécheresse dans cette région, faiblement explorée, mais aussi d'avoir une connaissance approfondie sur sa variabilité spatio-temporelle sous l'effet du changement climatique. Cette thèse permettra aussi d'une part à obtenir une estimation sur les éventuels événements de sécheresse afin de mieux gérer les terres agricoles et contribuera d'autres part, à formuler des plans d'intervention par les services concernés notamment dans la gestion des ressources en eau dans le but de réduire la vulnérabilité face à cette catastrophe naturelle.

2. Matériels et méthodes

2.1.Région d'étude et données

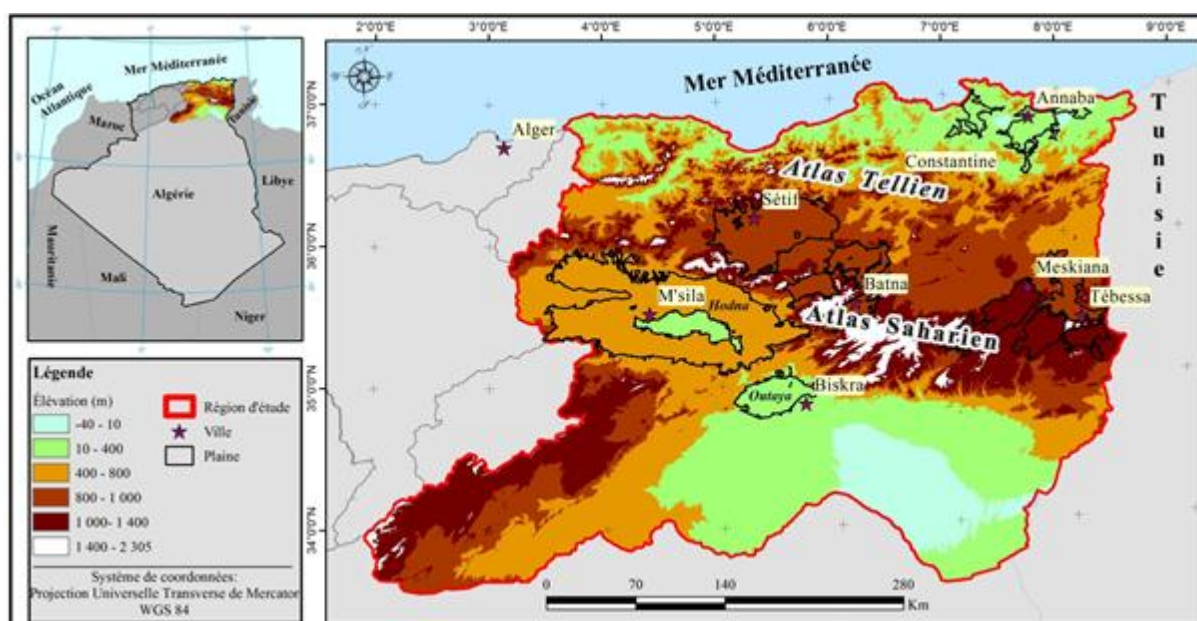


Fig.1 Localisation de la région d'étude

Le Nord-est Algérien est une zone géographique très vaste elle, couvre plus de 150 109 km² comprenant plusieurs plaines fertiles et étendues. Une première partie de cette étude a pris en considération toute la superficie susmentionnée (Fig.1). Tandis qu'après avoir découpé la partie extrême sud à cause au manque de données et pour plus de précision, notre étude s'est focalisé uniquement sur une superficie d'environ 109 000 km² s'étalant entre les longitudes 8°40'10"E et 3°15'6"E et les latitudes 37°5'00"N et 34°32'30"N (Merabti et al. 2017a). La zone d'étude est limitée au nord par la mer Méditerranéenne, cette région côtière reçoit le maximum de précipitation de tout le pays où le climat est humide à subhumide, vers l'intérieur des terres, on observe une diminution de précipitations (Merabti et al. 2017b) jusqu'à ce qu'elle atteigne le minimum, particulièrement dans les plaines de sud caractérisées par un climat aride. La région est en effet connue par une diversité climatique très marquée, de ce fait pour mieux analyser le phénomène de sécheresse, nous avons pris en compte des données mensuelles de précipitations de 123 stations pluviométriques de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) pour la période qui s'étale de l'année hydrologique 1960-61 à 2013-14 et les données de température de ré-analyse CFSR (Worqlul et al. 2017) interpolées sur les 123 sites et cela pour la période de 1979-80 à 2013-14.

2.2. Les indices de sécheresse

Afin de caractériser et analyser la sécheresse dans la région, différents indices ont été utilisés à savoir ; SPI, CZI, MCZI, PNI, l'indice des déciles, EDI, le Z-score et RDI. En premier lieu une étude comparative entre les indices qui prennent en compte uniquement les données de précipitation a été lancée à différentes échelles de temps de 1, 3, 6, 9, et 12 mois, tous les indices précités ont la même classification des événements de sécheresse / humidité à l'exception de l'indice des déciles et le pourcentage à la normale (PNI) où les intervalles sont respectivement comme suit en allant de légère, modéré, sévère à extrême: de 0 à -0.99/ 0 à 0.99, de -1 à -1.49/1 à 1.49, de -1.5 à -1.99/1.5 à 1.99 et $\leq -2/ \geq 2$ (McKee et al. 1993; Wu et al. 2001; Morid et al. 2006). En se basant sur la méthode classique des polygones de Thiessen sur les 123 stations nous avons pu déterminer une moyenne représentative pour chaque plaine. En effet la comparaison entre les sept indices était faite sur les données de sept stations chacune représente une plaine. Quant à l'indice RDI, il se calcule de la même manière que SPI en remplaçant par contre les précipitations par le rapport précipitations, évapotranspirations potentielles (ETP), ce dernier est estimé avec l'équation de (Thornthwaite 1948). L'indice d'aridité (IA) a permis de déceler les différents types de climat existant dans la région. En deuxième lieu une comparaison entre les indices SPI et RDI à l'échelle locale a été faite afin de voir l'influence de climat sur le comportement de ces indices.

2.3. Le Processus Markovien

Une chaîne de Markov est un processus stochastique X_t utilisé dans plusieurs domaines pour modéliser les séries chronologiques qui sont des variables aléatoires tels que les indices de sécheresse (Seyed et Davar 2013). Ce processus a la particularité que la valeur X_{t+1} dans un temps $t+1$ est conditionnellement indépendante de $X_0, X_1, X_2, \dots, X_{t-1}$ et dépend seulement de la valeur X_t de temps

t pour le premier ordre. Dans la présente étude, le modèle des chaînes de Markov a été appliqué sur l'indice SPI pour tenter de déterminer la probabilité d'avoir une année avec des conditions sèches après une année sèche ou humide. Ce processus exprime des probabilités conditionnelles de passage de l'état d'une année précédente à l'état de l'année en cours. En effet, l'état de l'année k ne dépend que de l'état de l'année $k-1$ pour un processus de Markov de premier ordre et il dépend des états $k-1$ ainsi que $k-2$ pour le processus de Markov de deuxième ordre.

L'indice SPI -12 mois caractérise l'échelle annuelle et celui de 3 mois l'échelle saisonnière. De ce fait, l'état du SPI dans un temps t peut être déterminé par l'un des deux cas: sec ou humide (non sec). Les chaînes de Markov d'ordre (I) et (II) sont appliquées à l'échelle annuelle et saisonnière au niveau des sept plaines. Quatre situations sont possibles dans le processus d'ordre (I) à savoir ; S-S (deux événements secs successifs), S-NS (un événement sec suivi d'un humide c'est-à-dire non sec), NS-S (un événement non sec suivi d'un autre sec), NS-NS (deux événements non secs successifs). En ce qui concerne le processus de Markov d'ordre (II), on s'intéresse aux cas où les événements secs se produisent successivement, par conséquent nous avons les situations suivantes ; S-S-S (trois événements secs successifs), S-S-NS (deux événements secs successifs avant un autre humide), NS-S-S (deux événements secs successifs après un événement humide), et au finale on rajoute le cas NS-S-NS (un événement sec isolé).

2.4.L'Analyse en composantes principales

L'étude de la variabilité spatio-temporelle de la sécheresse a été élaborée en employant l'analyse en composantes principales (ACP), qui est une méthode descriptive multidimensionnelle très connue. Les données sur lesquelles l'analyse a été appliquée sont les séries de variables des deux indices SPI et RDI calculés à trois échelles de temps de 3, 6 et 12 mois. L'ACP est obtenue en calculant la matrice de covariance des données du SPI et du RDI avec les valeurs propres et les vecteurs propres correspondants (Rencher, 1998). L'ACP en mode S a été appliqué séparément sur 123 séries du SPI et du RDI aux échelles de temps citées précédemment, en considérant le degré de confiance de 95%. La rotation Varimax est une méthode orthogonale utilisée pour maximiser la variance entre les poids de chaque composante principale. Elle est appliquée afin d'obtenir des répartitions spatiales beaucoup plus localisées avec une variabilité indépendante de la sécheresse (Raziei et al. 2009). Les résultats de chaque indice et chaque composante retenue ont été cartographiés pour montrer la variabilité spatiale de la sécheresse à travers la région.

2.5.Test de Man-Kendall modifié

Le Mann (1945) Kendall (1975) est un test non paramétrique qui vérifie l'hypothèse nulle qu'une série temporelle donnée n'a pas de tendance monotone. Dans la présente étude, considérant que les séries chronologiques sont auto-corrélées, le test de Mann-Kendall modifié (Hamed et Rao, 1998, Yue et Wang 2004) a été adopté à la place du MK original avec un degré de confiance de 95% sur les scores (résultats) des composantes principales retenues des indices SPI et RDI pour chaque échelle de temps considérées. En effet, le test a été appliqué à la série chronologique de la valeur moyenne

annuelle et à celle relative à chaque mois des scores CP du RDI et du SPI pour toutes les échelles de temps. Le MMK a été utilisé pour déterminer la signification d'une tendance dans une série temporelle, combiné avec l'estimateur de pente de Sen (Sen 1968) pour obtenir la magnitude de la tendance des scores des composantes principales obtenues pour chaque région.

3. Résultats et discussions

3.1. Évaluation de la sécheresse et comparaison des sept indices au niveau de sept plaines

L'application de l'indice SPI à l'échelle de 12 mois a permis de détecter plusieurs séquences de sécheresses qui ont touché la région. Les plus sèbres sont celles enregistrées aux années 1979, 1993, 1996 et la plus récente en 2001. Les différents indices utilisés ont tous pu repérer ces épisodes, cependant, l'étude comparative entre les sept indices prenant en considération uniquement les précipitations comme données sur les sept plaines nous a conduits à déceler les différences et les similitudes et même les limites de performances de chaque indice. Les résultats issus de la comparaison des occurrences de sécheresse de chaque indice à différentes échelles de temps, indiquent que l'indice des déciles détecte en permanence une grande fréquence des événements de sécheresse et d'humidité extrême tandis que le pourcentage à la normale (PNI) détecte une très grande fréquence de sécheresse extrême pour l'échelle de temps d'un mois. Cette grande fréquence diminue en augmentant l'échelle de temps jusqu'à ce que l'indice ne détecte aucune fréquence de sécheresse extrême à l'échelle de temps de 9 et de 12 mois. Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que ces deux indices, particulièrement le PNI, étaient élaborés pour l'évaluation de la sécheresse à l'échelle annuelle. Quant aux indices CZI, MCZI, Z-score et le SPI montrent des résultats plus ou moins similaires sur le pourcentage des événements secs/humides pour les différentes échelles de temps, par contre, l'utilisation de la régression linéaire a montré que l'indice EDI a une bonne corrélation avec les autres indices beaucoup plus avec le SPI à l'échelle de temps d'un mois. Cette corrélation prend une tendance à la diminution en allant vers les échelles de temps les plus grandes. Ce résultat peut être expliqué par le fait que cet indice était développé pour surveiller la sécheresse météorologique et encore plus performant à l'échelle quotidienne (Akhtari et al. 2001). Contrairement à l'indice EDI, on note aussi une bonne corrélation entre l'indice SPI et respectivement les indices Z-score, MCZI, et CZI. Cette corrélation augmente en allant vers les échelles de temps les plus grandes. Néanmoins, le CZI ainsi que le MCZI détectent plusieurs valeurs négatives dépassant la magnitude à titre d'exemple -4.5 au moment où l'indice SPI et le Z-score détectent une magnitude de -1.6, cela se reproduit plus souvent aux échelles de temps les plus courtes et beaucoup plus avec l'indice CZI. Tandis que l'indice MCZI, qui est la version améliorée du premier, détecte moins de valeurs négatives. Ces résultats concordent exactement avec ceux trouvés par (Wu et al. 2001). Ensuite, la comparaison avec l'indice Z-score, qui est très souvent confondu avec l'indice SPI (Hayes 2000), détecte plus d'événements humides que secs par rapport aux SPI.

3.2. L'utilisation de modèle Markovien pour la prévision de la sécheresse

L'étude des probabilités de sécheresse aux sept plaines était faite en se basant sur les résultats de SPI-12 pour l'échelle annuelle et SPI-3 pour l'échelle saisonnière, à l'échelle annuelle l'utilisation des chaînes de Markov d'ordre (I) montre que la probabilité d'avoir deux évènements secs successifs est plus élevée aux plaines de sud situées dans un climat aride particulièrement à Batna avec 68 % et à Outaya (69 %), contrairement aux plaines de nord où cette probabilité ne dépasse pas les 44 % à Sétif et 48 % à Annaba. Dans le même cas, il est à noter que la plaine de Meskiana connaît aussi une probabilité importante de 67 %. Les résultats pour le processus d'ordre (II) amènent à des conclusions similaires où la probabilité d'avoir trois années sèches successives atteint les 72 % à Batna et 70 % à Meskiana, tandis que la probabilité est moins élevée pour les plaines du nord d'Annaba et de Sétif. Ces résultats sont expliqués par le fait que la sécheresse est beaucoup plus persistante dans les plaines du sud situées dans un climat semi-aride à aride particulièrement dans la région de Batna qui a connu par le passé un très long épisode de sécheresse.

Le processus de Markov d'ordre (II) à déceler plus de détails sur la distribution des précipitations dans l'année pour chaque région. À titre d'exemple, la probabilité d'avoir deux automnes secs successifs n'est pas loin entre les plaines de Batna et Annaba avec environ 45 % et un peu plus pour Batna, tandis que la saison d'hiver qui est évidemment plus pluvieuse connaît plus de 70 % de probabilité pour avoir deux hivers secs à Batna et seulement 42 % à Annaba. Ceci se traduit par des saisons d'hiver plus sèches et persistantes à Batna. Les résultats sont similaires pour les plaines du sud où on remarque aussi une vulnérabilité plus élevée à la sécheresse dans les régions avec un climat semi-aride.

3.3. Variabilité spatio-temporelle de la sécheresse

Tableau 1. Le pourcentage des variances expliquées des composantes principales retenues après rotation (Merabti et al. 2017b)

	CP-1	CP-2	Cumulative
SPI-3	40.8	29.3	70.1
SPI-6	42.9	27.8	70.7
SPI-12	44.3	28.5	72.8
RDI-3	43.2	31.7	74.9
RDI-6	45.4	28.9	74.3
RDI-12	45.5	30.1	75.6

L'application de l'analyse en composantes principales avec Varimax rotation en mode S sur les deux indices RDI et SPI pour les trois échelles de temps, nous a mené à retenir deux composantes principales (CP-1, CP-2). Le tableau.1 résume le pourcentage des variances de chaque composante et pour chaque échelle de temps. Les variances expliquées par rapport au RDI sont plus élevées comparées à l'indice SPI. La CP-1 explique plus de 40 % de la variance totale et elle représente la zone située au nord qui correspond aux régions humides et subhumides. Les résultats de la CP-1, pour les deux indices, particulièrement pour les échelles de temps de 3 et 6 mois sont assez similaires,

tandis que des différences surgies par rapport aux zones identifiées à l'échelle de 12 mois. Quant à la CP-2, elle explique plus de 27 % de la variance totale et représente la zone située au sud qui correspond aux régions avec un climat semi-aride à aride. Ces résultats concordent avec la régionalisation de la sécheresse au nord Algérien délimité par [Taibi et Souag \(2011\)](#).

3.4. Étude des tendances utilisant le test de Man-Kendall

Le test de Mann-Kendall modifié (MMK) été appliqué sur les résultats des composantes principales (scores CP-1, CP-2) des indices RDI et SPI pour les trois échelles de temps, 13 séries chronologiques ont été extraites. Les résultats du test MMK et celui de la pente de Sen, montrent généralement des tendances positives non significatives pour les deux indices et pour les trois échelles de temps. On peut noter des exceptions à l'échelle de temps six au mois de septembre pour les indices SPI et RDI dans la zone nord présenté par la CP-1, rajoutant la tendance notée avec le SPI-3 et celle avec SPI-12 dans la même région par rapport aux séries temporelles annuelles. Les résultats des deux composantes principales pour tous les indices sont généralement concordants. Néanmoins, aucune tendance significative n'a été détectée pour la deuxième composante principale ce qui indique que la partie sud (plus aride) identifiée par la CP-2 est particulièrement stable par rapport à la région nord identifiée par la CP-1 (plus humide). Afin de mieux analyser les différences entre les deux indices, les fréquences des classes des événements secs et humides des deux CP ont été comparées. Les résultats montrent que les deux indices SPI et RDI se comportent de manière similaire en matière de nombre d'événements secs et humides par classe de sévérité. Par rapport à la première composante CP-1, on peut noter que les événements de sécheresse extrêmes et sévères sont plus souvent identifiés avec l'indice SPI-3 tandis que les événements de sécheresse sévères et modérés sont plus fréquents avec l'échelle de temps de 12 mois. Ces résultats sont très importants pour le secteur agricole (l'échelle de trois mois) et la gestion des ressources en eau (l'échelle de 12 mois).

4. Conclusion

À travers cette thèse, la comparaison entre les indices prenant en compte uniquement les précipitations nous a mis en évidence l'instabilité des indices des déciles et le PNI aux différentes échelles de temps ainsi que la surestimation des sécheresses extrêmes ce qui nous contraint à les utiliser avec une grande précaution vue leurs performances très limitées.

L'utilisation des chaînes de Markov a montré la grande vulnérabilité des plaines du sud aux sécheresses particulièrement celle de Batna, comparées aux plaines qui se trouvent dans les régions les plus humides (Annaba et Sétif). Ces résultats serviront comme outil d'aide à la décision qui peut être utilisé par les services gestionnaires des ressources en eau.

La région nord représentée par la première composante pour l'indice RDI est plus étendu que celle identifiée par l'indice SPI aux échelles de temps de 6 et de 12 mois. En ce qui concerne le RDI, cette zone s'élargit lorsque l'échelle de temps augmente tandis qu'avec l'indice SPI est beaucoup plus stable à travers les échelles de temps. Cette différence doit être explorée davantage en utilisant éventuellement d'autres indices de sécheresse. En comparant les résultats des indices pour la deuxième

composante, il semble y avoir beaucoup plus de stabilité par rapport à la première composante, néanmoins il existe un léger changement de surface de la zone affectée par la sécheresse d'une échelle de temps à une autre pour les deux indices RDI et SPI.

Bien qu'il existe une diminution des précipitations dans les pays du Maghreb avec une augmentation de la sévérité et des fréquences des sécheresses à l'exception de l'Est Algérien (Talia 2001), cependant, le cas de la présente étude n'indique pas une aggravation des événements de sécheresse dans la région de nord-est Algérien après avoir utilisé la série des données de la période 1960-61 à 2013-14 et celles de 1979-80 à 2013-14. Les résultats montrent que les fréquences des classes de sécheresse détectées sont plus équilibrées avec celles relatives aux événements humides avec l'indice RDI qu'avec celles identifiées avec l'indice SPI. On peut donc conclure que le RDI réagit plus uniformément que le SPI à l'évaluation des événements de sécheresse et d'humidité observés dans différentes conditions climatiques.

Références

- Akhtari R, Morid S, Mahdian MH, Smakhtin V (2009) Assessment of areal interpolation methods for spatial analysis of SPI and EDI drought indices. *Int J Climatol* 29:135–145
- Byun HR and Wilhite DR (1999) Objective Quantification of Drought Severity and Duration *J.of Climate* volume 12 2747- 2756
- Cinlar E (1975). *Introduction to stochastic processes*, Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- Gibbs WJ and Maher JV (1967). Rainfall deciles as drought indicators. *Bureau of Meteorology Bulletin* No. 48. Commonwealth of Australia, Melbourne.
- Giorgi F, Lionello P (2008) Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change* 63 90–104.
- Hamed KH, Rao AR (1998) A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *J Hydrol* 204:182–196
- Hoerling M, Eischeid J, Perlwitz J, Quan X, Zhang T, Pegion P (2012) On the increased frequency of Mediterranean drought. *J Clim* 25:2146–2161
- Hamlaoui-Moulai L, Mesbah M, Souag-Gamane D, Medjerab A (2013) Detecting hydro-climatic change using spatiotemporal analysis of rainfall time series in Western Algeria. *Nat Hazards* 65:1293–1311.
- Hayes MJ (2002) Revisiting the SPI: Clarifying the Process Drought Network News (1994-2001). Paper 18. Vol. 12, No. 1, Winter 1999–Spring 2000.
- Kendall MG (1975) *Rank Correlation Methods*. Griffin, London
- Keyantash J and Dracup J.A (2002) The quantification of drought: An evaluation of drought indices, *Bulletin of the American Meteorological Society* 83 (8), 1167-1180.
- Mann HB (1945) Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13:245–259.
- Martins DS, Raziei T, Paulo AA, Pereira LS (2012) Spatial and temporal variability of precipitation and drought in Portugal. *Nat Hazards Earth SystSci* 12:1493–1501.
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: 8th Conf. Applied Climatology, Am MeteorolSoc, Boston, 179-184.
- Meddi M M, Assani A A, Meddi H (2010) Temporal variability of annual rainfall in the Macta and Tafna catchments, northwestern Algeria, *Water Resour. Manage.*, 24, 3817–3833, 2010.
- Meddi M, Meddi H, Toumi S, Mehaignen M (2013) Regionalization of rainfall in North-Western Algeria. *Geographia Technica* 1:56–69
- Merabti A, Martins DS, Meddi M, Pereira LS (2017b) Spatial and time variability of drought based on SPI and RDI with various time scales. *Water Resour Manage.* <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1856-6>
- Merabti A, Meddi M, Martins DS, Pereira LS (2017a) Comparing SPI and RDI applied at local scale as influenced by climate. *Water Resour Manage.* <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1855-7>
- Mishra AK and Desai VR (2005) Drought forecasting using stochastic models, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 19 (5), 326-339.
- Mishra AK., Desai VR and Singh, VP (2007) Drought forecasting using a hybrid stochastic and neural network model, *American Society of Civil Engineering (ASCE) Journal of Hydrologic Engineering* 12 (6), 626-638.

- Morid S, Smakhtin, V, Moghaddasi, M (2006). Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *Int. J. Climatol.* (in press) DOI: 10.1002/joc.1264
- Paulo AA, Pereira LS (2007) Prediction of SPI drought class transitions using Markov chains. *Water Resour Manage* 21:1813-1827
- Pereira LS, Cordery I, Iacovides I (2009) *Coping with Water Scarcity. Addressing the Challenges.* Springer, Dordrecht, 382 pp.
- Raziei T, Martins DS, Bordi I, Santos JF, Portela MM, Pereira LS, Sutera A (2015) SPI modes of drought spatial and temporal variability in Portugal: Comparing observations, PT02 and GPCC gridded datasets. *Water Resour Manage* 29:487–504.
- Raziei T, Saghafian B, Paulo AA, Pereira LS, Bordi I (2009) Spatial patterns and temporal variability of drought in Western Iran. *Water Resour Manag* 23:439–455
- Rencher AC (1998) *Multivariate Statistical Inference and Applications.* John Wiley & Sons, Inc.
- Rezaeianzadeh M, Stein A, Cox JP (2016) Drought Forecasting using Markov Chain Model and Artificial Neural Networks *Water Resour Manage* (2016) 30:2245–2259
- Sen PK (1968) Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *J Am Stat Assoc* 63:1379–1389
- Seyed AB and Davar K 2013 Factors Influencing Markov Chains Predictability Characteristics, Utilizing SPI, RDI, EDI and SPEI Drought Indices in Different Climatic Zones
- Spinoni J, Naumann G, Carrao H, Barbosa P, Vogt J (2014) World drought frequency, duration, and severity for 1951–2010. *Int. J. Climatol.* 34: 2792–2804.
- Taibi S, Meddi M, Mahé G, Assani A (2017) Relationships between atmospheric circulation indices and rainfall in Northern Algeria and comparison of observed and RCM-generated rainfall. *Theor Appl Climatol* 127: 241–257.
- Taibi S, Meddi M, Souag D, Mahe G (2013) Évolution et régionalisation des précipitations au nord de l'Algérie (1936–2009). In: E Boegh, E Blyth, DM Hannah, H Hisdal, H Kunstmann, B Su, KK Yilmaz (Eds) *Climate and Land Surface Changes in Hydrology, IAHS Publ. 359*, pp. 191–197.
- Talia A (2001) Evolution des régimes pluviométrique et hydrologique du Nord de l'Algérie. Mémoire de Magister, Institut d'Hydraulique – Centre Universitaire de Mascara
- Thomas T, Jaiswal RK, Galkate RV, Nayak TR (2016) Reconnaissance drought index based evaluation of meteorological drought characteristics in Bundelkhand international Conference on Emerging Trends in Engineering, Science and Technology (ICETEST- 2015) doi: 10.1016/j.protcy.2016.05.005
- Thorntwaite CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geogr Rev* 38(55):94
- Tramblay Y, El Adlouni S, Servat E (2013) Trends and variability in extreme precipitation indices over Maghreb countries. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 13:3235–3248.
- Tsakiris G, Pangalou D, Vangelis H (2007) Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI) *Water Resour Manage* 21:821–833.
- Tsakiris G, Vangelis H (2005) Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water* 9/10: 3–11.
- Willeke G, Hosking, JRM, Wallis JR, Guttman NB (1994) *The national drought atlas, U.S. Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Report 94-NDS-4.* [Available from U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Casey Building, 7701 Telegraph Rd., Alexandria, VA 223153868.]
- Worqlul AW, Yen H, Collick AS, Tilahun SA, Langan S, Steenhuis TS (2017) Evaluation of CFSR, TMPA 3B42 and ground-based rainfall data as input for hydrological models, in data scarce regions: the upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Catena* 152:242251
- Wu H, Hayes MJ, Weiss A, Hu Q (2001) An Evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China-Z Index and the Statistical Z-Score. *Int. J. Climatol.* 21, 745–758.
- Zeroual A, Assani AA, Meddi M (2017) Combined analysis of temperature and rainfall variability as they relate to climate indices in Northern Algeria over the 1972–2013 period. *Hydrol Res* 48, 584-595.
- Zeroual A, Meddi M, Bensaad S (2013) The impact of climate change on river flow in arid and semi-arid rivers in Algeria. In: *Climate and Land-surface Changes in Hydrology, Proceedings of H01, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, IAHS Publ. 359*, pp. 105-110.