



Centre d'Etudes Doctorales: Langues, Patrimoine et Aménagement du Territoire

Option: Ressources, Aménagement de l'espace et Développement local

Axe: Etudes Géographiques

Laboratoire: Laboratoire d'Analyses Géo-Environnementales, d'Aménagement et Développement Durable

Résumé :

**Thèse présentée en vue de l'obtention du Doctorat en
Lettres et Sciences Humaines**

Sous le thème :

**Caractéristiques et causes des sécheresses
hydroclimatiques aux bassins versants
méditerranéens du Rif occidental**

Préparée par :
Ismail EL-KHANTOURY

Sous la direction de :
Dr. Khalid OBDA

Date de la soutenance : 8 avril 2021

Présentée et soutenue devant le jury composé des professeurs :

Abdelouahab NEJJARI	FLSH - Meknès	Président
Ali TAOUS	FLSH, Saïs - Fès	Membre
M'hamed AMYAY	FLSH, Saïs - Fès	Membre
Mohamed HANCHANE	FLSH, DM - Fès	Membre
Khalid OBDA	FLSH, Saïs - Fès	Directeur de thèse

Année universitaire : 2020-2021

Contexte de l'étude

Les sécheresses sont très fréquentes dans les pays méditerranéens avec de graves conséquences économiques et sociales (Iglesias et *al.*, 2007). Que se soit en Méditerranée occidentale ou orientale, autant d'exemples montrent que les événements secs sont un trait essentiel du climat méditerranéen.

Au Maroc, en raison de sa localisation en marge des perturbations océaniques des latitudes moyennes d'une part, et son voisinage avec un centre d'action anticyclonique de grande envergure d'autre part, le climat marocain est caractérisé par la forte variabilité pluviométrique et la récurrence des sécheresses (El-Khantoury et *al.*, 2020). Des fois, c'est le sud du pays qui souffre le plus, d'autres fois la région centrale est la plus touchée, et le plus souvent c'est l'ensemble du pays qui est gravement affecté (Chbouki, 1994). Ainsi, au Maroc la sécheresse ne devrait pas être considérée comme un risque aléatoire, mais comme un événement historique, structurel et de plus en plus récurrent. Il convient de noter à ce propos que le terme *structurel* ne veut pas dire « permanent » ou « continu » (Banque Mondiale, 2003), mais plutôt à forte récurrence.

Tout au long de son histoire, le Maroc a toujours vécu des événements secs qui ont marqué la mémoire collective de sa population. Sur la base des écrits historiques, Obda (1998) a dénombré 86 années sèches entre le XVII^e et le XIX^e siècle à raison de 28 années au XVII^e siècle, 29 années au VIII^e siècle et 29 années au XIX^e siècle. Parmi les sécheresses les plus graves qui ont secoué le pays en déclenchant la flambée des prix et la survenue des famines, on trouve celles des années 1721-1724, 1779-82, 1825-26, 1847, 1850, 1878 et 1882 (El Bezzaz, 1992).

Depuis le début du XX^e siècle, douze principales périodes sèches généralisées et d'intensité modérée à forte ont été enregistrées à l'échelle du pays, à savoir les années 1904-05; 1917-1920; 1930-1935; 1944-45; 1948-1950; 1960-1961; 1974-1975; 1981-1984; 1986-1987; 1991-1993; 1994-1995 et 1999-2003. En plus, d'autres moins généralisées mais assez fortement ressenties comme celles de 1906-07; 1910-1914; 1924-1927; 1952-1953 ; 1965-67 et 1972-73 (MEAE, 1997).

Pire encore avec le changement climatique le futur ne semble pas si pluvieux. Les projections climatiques prévoient que le climat marocain connaîtrait une aridification croissante d'ici 2100. En effet, les précipitations annuelles devraient diminuer de 10 à 40%,

dont une baisse de 10 à 30% pendant la saison des pluies, d'octobre à avril, et une baisse de 10 à 40 % pendant la saison sèche, de mai à septembre (Verner et *al.*, 2018). De même les températures moyennes annuelles devraient connaître une hausse de l'ordre de 1 à 1,5 °C aux horizons temporels 2050 et 2080, et ce pour l'ensemble du pays (MDCE, 2016). Aussi, Born et *al.* (2008) concluent qu'une transition vers des climats plus arides serait observée pour 2030-2050 comparativement avec 1986-2000.

Si la sécheresse constitue un défi de taille tant pour les décideurs que pour les citoyens c'est qu'elle conditionne la vie socio-économique de tout le pays, comme en témoignent les sécheresses survenues au Maroc depuis les années 80 (El-Khantoury et *al.*, 2019). Ceci est à mettre en relation avec l'impact négatif qu'exerce la sécheresse sur un secteur clé de l'économie nationale, à savoir l'agriculture. Ce secteur économique contribue à hauteur de 15% du produit national brut (PNB) et 23% des exportations du Maroc, et est aussi le plus grand employeur au pays, fournissant des emplois à près de 40 % de la main-d'œuvre nationale et 75 % à l'échelle du monde rural (World Bank, 2013).

Bien que les bassins versants méditerranéens du Rif occidental soient parmi les régions les plus humides du Maroc, ils n'échappent pas au contexte climatique général du pays. La variabilité pluviométrique y est aussi forte et les périodes de déficit pluviométrique ne se font pas rares. Dans un passé récent, la zone d'étude a souffert des sécheresses qui ont secoué le pays. Celles des années 1980-85, 1994-95 et 2015-16 ont été accompagnées par des problèmes d'approvisionnement en eau potable, surtout à Tétouan et la zone côtière.

Présentation de la zone d'étude

Les bassins versants méditerranéens du Rif occidental faisant objet de ce travail s'étendent entre Sebta et Oued El Had sur 3350 km². Ils s'insèrent entre les deux latitudes 35,01° et 35,92°, et les deux longitudes -4,87° et -5,65°. De point de vue hydrographique, cette région est limitée par le Tangérois à l'ouest et le nord-ouest, le bassin versant du Loukkos au sud-ouest, le bassin versant de l'Ouergha au sud et le bassin versant de l'oued Amter à l'est. Administrativement, la zone d'étude chevauche complètement ou partiellement les provinces de Chefchaouen, de Tétouan, de Fahs-Anjra et de Larache ; la préfecture de M'diq-Fnideq et la ville de Sebta.

Les bassins versants méditerranéens du Rif occidental se distinguent par rapport aux bassins versants limitrophes par l'importance des quantités de précipitations en plus d'une

richesse en termes de ressources en eau tant superficielles que souterraines. Cette zone est aussi marquée par son caractère montagneux avec la présence des plus hauts sommets du Rif occidental. Enfin, elle se caractérise par l'extension des roches carbonatées calcaire-dolomitiques qui constituent un véritable réservoir hydrogéologique.

Objectifs

Partant du fait qu'aucune étude académique n'a été menée pour l'étude de la sécheresse et sa relation avec les indices de circulation atmosphérique au niveau des bassins versants méditerranéens du Rif occidental, le présent travail vise à combler ce vide, à travers, premièrement, l'identification et la caractérisation des sécheresses enregistrées entre 1942-43 et 2014-15 au niveau de cette région, et deuxièmement la mise en évidence de la relation de causalité entre la variabilité temporelle de certains indices de téléconnexion et l'occurrence de la sécheresse dans la zone étudiée.

Questions de recherche / Hypothèses

S'inscrivant dans un contexte de relation entre sécheresses hydroclimatiques enregistrées et variabilité des oscillations atmosphériques, la problématique de ce travail peut être approchée à travers quatre grandes questions de recherche :

1. Quelles sont les caractéristiques spatiales et temporelles des sécheresses enregistrées en tant qu'extrêmes climatiques ?
2. Les sécheresses enregistrées présentent-elles des liens avec les indices des oscillations atmosphériques (NAO et WeMO) ?
3. Si oui, est-ce que toute la zone d'étude réagit de la même manière à ce forçage climatique ?
4. Quels sont les facteurs circulatoires susceptibles de provoquer un climat sec ?

En partant des éléments ci-dessus, les hypothèses de travail peuvent se formuler ainsi :

- L'ensemble de la zone d'étude présente des caractéristiques homogènes du phénomène *sécheresse* tant sur le niveau temporel que spatial.
- Les indices des oscillations atmosphériques (NAO et WeMO) sont le facteur déterminant de l'occurrence des sécheresses hydro-climatiques.
- Les sécheresses vécues ont été accompagnées par une circulation atmosphérique favorable au climat sec.

Méthodologie

Dans le but de répondre aux objectifs assignés à ce travail, la méthodologie de travail est basée sur deux axes. Premièrement, l'utilisation d'une panoplie de méthodes et de techniques statistiques innovantes visant l'identification du phénomène, la détection des ruptures, des tendances et des périodicités dans les séries hydro-climatiques ; ainsi que la définition des cohérences temporelles entre séries chronologiques par le biais de l'analyse en ondelettes continues. Aussi, l'approche cartographique a été adoptée dans la perspective de spatialiser les phénomènes étudiés et de mettre en relief leur variabilité à l'échelle spatiale et leurs interactions.

Structure du document

Ce manuscrit s'articule en six chapitres :

Dans le premier, la présentation détaillée de la zone d'étude était faite. L'axe premier de ce chapitre se focalise sur les différentes composantes du milieu physique (géologie, topographie, hydrographie), alors que le second met en relief les caractéristiques du contexte socio-économique régional.

Le deuxième chapitre a été consacré à une analyse détaillée du cadre climatique et hydrologique de la zone d'étude. Cette analyse a porté sur l'identification et la caractérisation des aspects de la variabilité hydro-climatique d'une part, et l'étude des ressources en eau disponibles d'autre part.

Le troisième chapitre a été destiné au cadre théorique et conceptuel : concepts, caractéristiques et typologie de la sécheresse, ainsi qu'une revue de littérature des méthodes utilisées dans l'étude de ce phénomène.

Dans le quatrième chapitre nous avons présenté en détail la base de données (pluviométrie, débit, indices des oscillations atmosphériques et pression atmosphérique) ainsi que les différentes méthodes utilisées dans ce travail (identification de la sécheresse ; détection des ruptures, des tendances, et des périodicités dans les séries hydro-climatiques ; ainsi que les cohérences temporelles bivariées ou multivariées).

Le cinquième chapitre concerne la présentation, l'analyse et la discussion des résultats obtenus en matière de l'identification et la caractérisation spatio-temporelle des sécheresses survenues entre 1942-43 et 2014-15.

Enfin, *le sixième chapitre* a été dédié à la détermination des causes à l'origine des sécheresses hydro-climatiques. Ce dernier chapitre est axé sur deux volets principaux. Le premier volet repose sur l'analyse de la relation de causalité entre les indices des oscillations atmosphériques et l'occurrence de sécheresse pour la période 1978-79/2014-15. Tandis que, le second volet essaie d'explorer la relation entre les types de temps et les extrêmes pluviométriques enregistrés à l'échelle de la zone d'étude.

Principaux résultats

L'analyse du cadre hydro-climatique permet de tirer les conclusions suivantes :

- Le climat de la région est de type méditerranéen sous influence océanique. Néanmoins, comme c'est le cas à l'échelle de l'ensemble du pays, la grande variabilité pluviométrique interannuelle et intra-annuelle est une caractéristique clé du climat de la zone d'étude. En effet, les années de déficit pluviométrique ne se font pas rares. Cette situation s'explique par la localisation de la zone d'étude en marge des trajectoires des vents humides.
- Les quantités de précipitations reflètent une variabilité spatiale importante due aux facteurs de l'altitude, l'exposition, la continentalité et l'effet de *foehn*. Ce dernier facteur explique la différence observée, en termes de quantités d'eau précipitées, entre les stations d'altitude et celles de la plaine.
- Sur le plan hydrologique, le régime hydrologique des cours d'eau de la zone d'étude est essentiellement pluvial mais devient légèrement perturbé par endroit à cause de l'importance du réservoir hydrologique. C'est un régime à abondance hivernale (décembre - mars) où les basses eaux sont centrées autour de mai - septembre.
- Les variations pluviométriques associées à une alimentation essentiellement pluviale font que les régimes des oueds de la zone d'étude se caractérisent par une forte irrégularité de leurs modules annuels. La concentration des débits en quelques mois seulement est aussi attestée par l'utilisation des coefficients mensuels de débits.
- Aussi, l'utilisation des courbes des débits classés journaliers montre une concavité plus ou moins prononcée faisant ressortir l'immodération du régime hydrologique des oueds de la zone d'étude. En effet, ces oueds sont connus par des écoulements violents et concentrés dans temps sous forme de crues rapides.

- Malgré la richesse en ressources hydriques, l'augmentation du nombre de population locale associée à un taux élevé d'urbanisation traduisent une demande accrue de ressources en eau.

Les réponses aux questions de recherche se présentent comme suit :

Quelles sont les caractéristiques spatio-temporelles des sécheresses enregistrées ?

L'identification et la caractérisation spatio-temporelles des sécheresses climatiques enregistrées durant la période 1942-43 / 2014-15 au niveau des bassins versants du Rif occidental permettent de dégager les conclusions suivantes :

- une nette concordance entre les différentes stations quant à l'évolution des indices SPIs annuels est bien évidente. L'application de l'analyse en composantes principales a confirmé ce résultat mettant ainsi en exergue l'homogénéité des conditions climatiques à l'échelle régionale.
- l'évolution des indices SPIs annuels est marquée par une dichotomie qui est parfois frappante puisque le passage entre année sèche et autre humide ou vice-versa est souvent enregistré, comme ce fut le cas, en particulier, en 1994-95 (SPI=-2,03) et 1995-96 (SPI=1,85).
- Des augmentations en termes du nombre d'années sèches et de déficit pluviométrique associé entre les deux sous-périodes 1942-43/1979-80 et 1980-81/2014-15—ont été enregistrées, passant respectivement de 4 et -29% à 7 et -36%. De plus, la sévérité des années sèches est passée d'un SPI égale à -0,87 en moyenne à -1,11 ; alors que le SPI moyenne toutes les années confondues a de son côté évolué de +0,10 à -0,11. Parallèlement, des baisses ont été observées concernant la durée inter-événements secs, évoluant en moyenne de 10 ans entre 1942-43 et 1979-80 à 4 ans seulement depuis 1980-81.
- L'étude de la persistance de sécheresse par les chaînes de Markov à différentes échelles temporelles a permis de constater que le phénomène "sécheresse" reste occasionnel et moins persistant que l'on croyait. En effet, l'indice de prédisposition à la sécheresse n'est que de 0,326 à 0,425 à l'échelle mensuelle, et 0,334 à 0,534 à l'échelle annuelle.

- L'analyse de points de ruptures potentielles dans les séries des SPIs montre qu'en général, il n'y avait pas de changements majeurs dans la moyenne sauf à B. Taza et Sebta.
- À-propos des tendances observées, seule la station de Sebta a connu une tendance significative et vers la hausse. Les autres stations ont enregistré des tendances moins importantes pour être considérées comme étant statistiquement significatives.
- L'analyse en ondelettes continues a permis l'identification d'un cycle annuel fort et bien individualisé mais qui reste entaché de quelques ruptures dans le spectre des ondelettes, en particulier depuis les années 80 ce qui coïncide avec les années sèches qu'a connu le Maroc. D'autre part, l'utilisation des données annuelles révèlent que le cycle pluriannuel 4-8 ans est le plus présent. Ce mode de variabilité concentre la grande partie de l'énergie du spectre locale des ondelettes, avec des pics significatifs de puissance qui s'étalent essentiellement entre 1960 et 1970, et entre 1995 et 2010. Le spectre global des ondelettes confirme cette observation, puisque seulement la bande 4-8 se situe au-dessus de la ligne de signification statistique au niveau $\alpha = 0,05$.
- D'autre part, la décomposition des séries temporelles du SPI par la transformée en ondelettes discrètes a permis de déterminer les éléments qui gouvernent l'évolution interannuelle de l'indice de sécheresse à l'échelle de chaque station. Ainsi, dans l'ensemble, la combinaison formée par la tendance à long terme (A4) et le mode de fluctuations D2 est la plus déterminante quant à l'évolution interannuelle de l'indice SPI. Or, il convient de signaler à ce propos que la fluctuation du SPI à la station de Oued Laou est bien représentée par la combinaison (A4+D1).

Les sécheresses enregistrées présentent-elles des liens avec les oscillations de l'atlantique nord (NAO) et de la Méditerranée occidentale (WeMO) ? Si oui, est-ce que toutes les stations de la zone d'étude réagissent de la même manière à ce forçage climatique ?

La recherche de liens potentiels entre la variabilité pluvio-hydrométrique et l'indice de l'oscillation de l'atlantique nord et celle de la Méditerranée occidentale a été faite par trois méthodes :

- ***Corrélation entre la NAO et la pluviométrie / débits***

La corrélation entre l'indice NAO et le SPI (pluviométrie) a relevé l'existence d'une relation variable dans le temps et dans l'espace entre les deux variables. Ainsi, sur l'échelle temporelle, cette relation est plus forte durant la période de ***décembre-mars*** que pendant celle de ***septembre-avril***. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'oscillation de l'atlantique nord (NAO) est plus active durant la première période que durant le reste de l'année comme cela a été démontré dans plusieurs recherches (Hurrell, 1995 ; Osborn et *al.*, 1999). En effet, pendant la période décembre-mars, l'indice NAO explique à lui seul environ 50% en moyenne de la variance totale de la pluviométrie au niveau de la zone d'étude, tandis que durant septembre-avril cette contribution tombe à 35% seulement. D'autre part, sur le plan spatial la relation indice NAO-SPI est forte sur les altitudes et les stations exposées aux vents humides de l'ouest ou du sud-ouest mais devient moins importante sur le littoral.

Concernant l'impact de l'indice NAO sur les débits, cet indice explique 58% et 59% de la variance totale des débits aux stations de K. Kouriren et Torreta pour la période ***décembre-mars***, contre 50% pour celle de ***septembre-avril***.

- ***Relation entre phases de la NAOI et la pluviométrie / débits***

L'analyse des résultats obtenus permet de faire la distinction entre une phase NAO positive engendrant des sécheresses, et une phase NAO négative associée aux fortes quantités pluviométriques et aux inondations.

A l'échelle mensuelle, des différences statistiquement significatives sont observées entre la phase négative et la phase positive de la NAO de novembre à avril, en particulier décembre, janvier, février et mars, des mois durant lesquels l'oscillation de l'atlantique est la plus active. De point de vue spatial, l'augmentation (baisse) de l'indice SPI associée à la phase négative (positive) de la NAO est enregistrée au niveau de l'ensemble des stations, suggérant une homogénéité du forçage exercé par l'oscillation de l'atlantique nord sur la pluviométrie à l'échelle de toute la zone d'étude.

Pour la période ***décembre-mars***, les différences entre phase négative et celle positive sont suffisamment importantes pour être statistiquement significatives, et ce pour les 16 stations étudiées. Les différences absolues les plus fortes sont observées à Amzal

(2,24), B. Karrich (2,17) et B. Taza (2,12). La comparaison phase négative/phase normale montre aussi des différences significatives mais de magnitude plus faibles que les précédentes (1,54 seulement à Amzal). Concernant la phase positive et celle normale, les différences ont été insuffisamment importantes pour être considérées comme étant statistiquement significatives.

Enfin, la comparaison entre les moyennes des valeurs de l'indice de sécheresse (SPI) de la phase négative et positive de la NAO pour la période *septembre-avril* montre que la différence de conditions de sécheresse/humidité entre les deux phases est observable au niveau de toutes les stations de la zone d'étude. A titre d'exemple, au niveau de la station d'Amzal la moyenne de l'indice SPI est de 1,44 contre -0,78 respectivement. Les différences observées sont statistiquement significatives entre la phase négative d'une part et celle positive/normale d'autre part. Ces différences varient en valeurs absolues 1,54 à B. Karrich CT et 2,22 à Amzal.

Des différences importantes et statistiquement significatives de débit sont aussi observées entre les différentes phases de la NAO. Elles atteignent 2,21 à K. Kouriren et au pont Torreta entre la phase négative et celle positive pendant *décembre-mars* ; et 2,58 aux mêmes stations durant *septembre-avril*.

- ***Cohérences en ondelettes continues entre les indices NAO-WeMO et la pluviométrie / débits***

Cohérence bi-variables NAOi - pluviométrie / débit

Les cohérences entre les valeurs des SPI hivernaux (*décembre-mars*) et l'indice d'oscillation de l'atlantique nord (NAO) montrent que l'ensemble des stations sont soumis à influence de cette oscillation. Elle reste toutefois variable aussi bien dans le temps que dans l'échelle. Pour toutes les échelles temporelles confondues, le NAO explique en moyenne 67%, 69%, 70%, 70% et 72% de la variance totale des indices de sécheresses au niveau des stations Timzouk, Béni Hassan, Bab Taza, Nakhla et Chibich respectivement.

Pour ce qui concerne la cohérence moyenne toutes les échelles temporelles confondues entre la *pluviométrie (septembre-avril)-NAO* elle varie entre 45% à Tétouan et 65% à A. Thlat et B. Taza. Cependant, cette relation n'est pas stationnaire dans le temps. Ainsi, selon les valeurs de cohérence enregistrées, la période 1978-2014

a été subdivisée en deux sous-périodes : antérieure et postérieure à 1993. Sur le plan de la distribution spatiale des valeurs de cohérence observées, on observe qu'il n'y a pas de configuration spatiale bien individualisée.

L'indice NAO contribue en moyenne à hauteur de 74%, 68% et 67% dans l'explication de la variance totale des débits (*septembre-avril*) au niveau des stations de K. Kouriren, B. Karrich et Torreta. L'évolution temporelle de la cohérence entre l'indice NAO et les débits est caractérisée par deux traits essentiels. Premièrement, une baisse des valeurs de la cohérence était enregistrée entre 1978 et 1984 où la moyenne aux stations de Torreta, K. Kouriren et B. Karrich n'était que 51%, 54% et 56%. Deuxièmement, dès 1985 la relation entre les deux variables a connu une augmentation soutenue pour atteindre 71%, 72% et 70% en moyenne.

A noter que l'étude de la différence de phase montre que la relation entre les séries temporelles de la pluviométrie/débit et l'indice NAO est en anti-phase pour toutes les stations et quasiment sur toutes les échelles temporelles. Par conséquent, la pluviométrie/débit dans la zone d'étude tend à être plus faible (plus élevé) lorsque l'indice NAO est dans sa phase positive (négative). Ce résultat corrobore bien les résultats obtenus par la méthode de corrélation dont le signe a été négatif.

Cohérence multi-variables NAOi - WeMO - pluviométrie / débit

Pour la période *décembre-mars*, la cohérence en ondelettes multi-variables entre les séries temporelles *NAOi-WeMOi-Pluviométrie* a montré une cohérence forte et statistiquement significative sur la grande partie de l'espace temps-fréquence témoignant d'une grande influence de ces indices climatiques sur la variabilité pluviométrique au niveau de la zone d'étude. La cohérence multiple moyenne (*NAOi-WeMOi-Pluviométrie*) toutes les échelles confondues, varie entre 79% à B. Karrich CT et 89% à Amsa avec cependant des différences entre deux périodes caractéristiques. En effet, la cohérence moyenne a connu une nette augmentation passant de 60-80% durant 1978-1987 à 84%-93% pour la période 1988-2014.

La cohérence multiple des ondelettes a également été utilisée pour quantifier les liens entre les indices climatiques et les débits (*déc-mar*). Il est clair que la relation entre les deux variables est forte et statistiquement significative pour la plupart des échelles de

temps. En fait, la cohérence moyenne, toutes échelles confondues, est de 79% à K. Kouriren et 83% à Torreta et B. Karrich.

Pour ce qui concerne la période *septembre-avril* la variabilité de la NAO et de la WeMO exerce un forçage très important sur les précipitations dans la zone d'étude. En effet, la contribution (NAO-WeMO) est légèrement variable et se situe entre 68% à O. Laou et 77% à Malaliyine. De plus la contribution des indices climatiques sur les précipitations est presque identique pour la majorité des stations avec des valeurs oscillant entre 73% et 77%.

Concernant, la cohérence multiple NAOi-WeMOi-débit, il en découle que le facteur climatique explique en moyenne les $\frac{3}{4}$ de la variance totale des débits à la station de Torreta comme celles de K. Kouriren et B. Karrich.

Il ressort des résultats de l'analyse de cohérence en ondelettes que ce soit bi-variables ou multi-variables l'existence de corrélations significatives, avec des coefficients de détermination (R^2) entre les variables hydro-pluviométriques et les indices climatiques (NAO et WeMO) parfois très fortes, qui n'ont pas été révélées par les méthodes de corrélation classique.

Parallèlement, des simulations climatiques selon les scénarios d'émissions A1B pour le XXI^e siècle projettent une tendance vers la hausse statistiquement significative de la NAO à un rythme de 0,15 par décennie (Rodríguez-Puebla & Nieto, 2010), en relation avec une augmentation probable de la pression au niveau de la mer aux latitudes moyennes et une diminution aux latitudes élevées (Miller et al., 2006). Cette situation se traduirait par une augmentation des types de temps anticyclonique et une réduction des précipitations au niveau de la zone d'étude et par conséquent une augmentation des épisodes secs en fréquence et en sévérité.

Quelles sont les facteurs circulatoires susceptibles de provoquer un climat sec ?

Les résultats de l'étude simultanée des types de temps et des quantités de précipitations mettent en exergue :

- l'existence de liens étroits entre les deux variables. Ainsi, l'occurrence d'années extrêmement sèches est fortement liée à une fréquence faible des types de temps humide (C, O et S-O) d'une part, et une fréquence plus élevée des différentes configurations anticycloniques d'autre part. L'année extrêmement sèche de 1994-95

avait enregistré 50,2% de jours anticycloniques et 11,3% seulement pour les temps humides tandis que durant l'année fortement pluvieuse de 1995-96 ces valeurs étaient de 39,4% et 22% respectivement.

- l'occurrence des années sèches au niveau de la zone d'étude peut être partiellement attribuée à la faible activité (efficacité) des types de temps humide comme en témoigne les faibles valeurs de précipitations moyennes journalières par classe de types de temps. En effet, durant l'année humide 2009-10 la station de Bab Taza a enregistré des intensités de 40,9 mm/jour ; 20,2 mm/jour et 10 mm/jour pour les classes O-SO, cycloniques et N-NO respectivement. A l'opposée, ces valeurs n'étaient que 11,5 mm/jour pour la catégorie O-SO, 8,5 mm/jour pour la classe cyclonique et enfin 4,6 mm/jour pour les temps N-NO pendant l'année sèche de 1994-95.

Les limites de la recherche.

Malgré les résultats intéressants du présent travail, un certain nombre d'éléments n'étaient pas bien abordés à cause essentiellement de la longueur très restreinte des séries hydro-climatiques dont on possède d'une part, et la mauvaise répartition spatiale de l'existant d'autre part.

Les perspectives et approfondissements

Ce travail ne n'est qu'un début d'un processus de recherche qui devrait être approfondi à travers les axes suivants :

- La modélisation *pluie-débit* sur des échelles temporelles plus fines afin de bien caractériser la relation entre les deux variables, et de comprendre le rôle régulateur que joue le réservoir hydrogéologique.
- L'utilisation des réseaux de neurones artificielles de type perception multicouche et la régression linéaire multiple à base des indices des oscillations (NAO, WeMO, AMO) et les anomalies de la température de surface de l'Atlantique nord, dans la prédiction à courte et moyenne terme des événements secs futurs à différentes échelles temporelles.
- L'étude de l'impact de la sécheresse météorologique sur l'agriculture moyennant la télédétection en calculant les indices de l'état végétatif et de stress hydrique (NDVI ...).

- La reconstitution de la variabilité climatique par le biais de la dendroclimatologie, sachant que la zone d'étude dispose de deux espèces forestières connues par leur adaptabilité à ce type de recherches, que sont le cèdre de l'Atlas (*Cedrus Atlantica*) et le sapin marocain (*Abies Marocana*).
- L'utilisation de l'indice de précipitation-évapotranspiration standardisée (SPEI) afin d'explorer l'impact de l'intégration du variable *température* sur l'identification et la caractérisation de la sécheresse, et ce en comparaison avec l'indice de précipitation standardisée (SPI).
- L'étude des tendances pluviométriques et des types de temps à long terme pour en déduire la signification statistique des liens existants entre les deux variables.

Bibliographie

- Banque Mondiale. (2003). *Document d'évaluation de projet sur un prêt propose d'un montant de 25 millions d'euros (contre-valeur de 26,80 millions de \$US) au royaume du Maroc pour un projet de développement rural intègre de mise en valeur des zones « bour »*. Washington DC, USA: Groupe Banque Mondiale.
- Born K., Christoph M., Fink A.H., Knippertz P., Paeth H., & Steph P. (2008). Moroccan climate in present and future: combined view from observational data and regional climate scenarios. Dans F. Zeini, & H. Hotzl, (dir.), *Climatic Changes and Water Resources in the Middle East and North Africa* (pp. 29-45). Berlin, Heidelberg, DE: Springer. doi: [10.1007/978-3-540-85047-2_4](https://doi.org/10.1007/978-3-540-85047-2_4)
- Chbouki, N. (1994). Une synthèse dendroclimatique du Cèdre de l'Atlas. *Annales de la recherche forestière au Maroc*, 27, 33-59.
- El Bezzaz, M.A. (1992). *Histoire des épidémies et des famines au Maroc: XVIII et XIX siècle*. Casablanca, Maroc: Imprimerie Ennajah Jadida (en langue Arabe).
- El-Khantoury, I., Obda, K., & Achiban, H. (2020). Wavelet Analysis: A Links Between the North Atlantic Oscillation and Winter Drought in the Mediterranean Watersheds of the Western Rif (North Morocco). *European Scientific Journal, ESJ*, 16(15), 99-114. doi: [10.19044/esj.2020.v16n15p99](https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n15p99)
- El-Khantoury, I., Obda, K., Achiban, H., & Z, Qadem. (2019). *Application de l'indice standardisé des précipitations pour la quantification de l'impact de la sécheresse météorologique sur les ressources en eau: cas des bassins versants méditerranéens du Rif occidental*. Dans F. Rahmouni, M. Laouane & E. Chougrani (dir.), *Les ressources naturelles au Maroc : Diagnostic, Exploitation et Outils de Protection* (pp. 55-70). Oujda, MA: Edition Qurtuba.

- Hurrell, J.W. (1995). Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation. *Science*, 269 (5224), 676-679. doi: [10.1126/science.269.5224.676](https://doi.org/10.1126/science.269.5224.676)
- Iglesias, A., Garrote, L., Flores, F., & Moneo, M. (2007). Challenges to manage the risk of water scarcity and climate change in the Mediterranean. *Water Resources Management*, 21(5), 775-788. doi: [10.1007/s11269-006-9111-6](https://doi.org/10.1007/s11269-006-9111-6)
- MDCE (Ministère déléguée chargée de l'Environnement). (2016). *3^{ème} Communication Nationale du Maroc à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques*. Rabat, MA: Ministère déléguée chargée de l'Environnement.
- MEAE (Ministère de l'Équipement, de l'agriculture et de l'Environnement). (1997). Un siècle d'observations météorologiques : Sécheresse et gestion de l'eau au Maroc. Rabat, MA: publications du département de l'équipement.
- Miller, R.L., Schmidt, G.A., & Shindell, D.T. (2006). Forced annular variations in the 20th century Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report models. *Journal of Geophysical Research*, 111, D18101. doi: [10.1029/2005JD006323](https://doi.org/10.1029/2005JD006323)
- Obda, K. (1998). *L'homme et la sécheresse*. Communication présentée à la table ronde sur le Pays Jbala, 4-5 décembre 1998, organisée par le Groupe Pluridisciplinaire d'Étude sur les Jabala et la FLSH Saïs, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès.
- Osborn, T.J., Briffa, K.R., Tell, S.F.B., Jones, P.D., & Trigo, R.M. (1999). Evaluation of the North Atlantic Oscillation as simulated by a climate model. *Climate Dynamics*, 15(9), 685-702. doi: [10.1007/s003820050](https://doi.org/10.1007/s003820050)
- Rodriguez-Puebla, C., & Nieto, S. (2010). Trends of precipitation over the Iberian Peninsula and the North Atlantic Oscillation under climate change conditions. *International Journal of Climatology*, 30, 1807-1815. doi: [10.1002/joc.2035](https://doi.org/10.1002/joc.2035)
- Verner, D., Treguer, D.O., Redwood, J., Christensen, J.H., McDonnell, R., Elbert, C., Konishi, Y., & Belghazi, S. (2018). *Climate Variability, Drought, and Drought Management in Morocco's Agricultural Sector*. Washington, D.C, USA: World Bank Group.
- World Bank. (2013). *Building Morocco's Resilience: Inputs for an Integrated Risk Management Strategy*. Washington DC, USA: The World Bank Group.