

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef-UHBC

Faculté de Génie Civil et d'Architecture

Département Hydraulique



THÈSE

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Hydraulique et Aménagement

THEME

***MISE EN PLACE D'UN SYSTEME D'ALERTE PRECOCE
A LA SECHERESSE (CAS DU NORD-OUEST ALGERIEN)***

Présentée et soutenue par

M. RAHMOUNI Abdelwahab

Soutenue le 26/02/2023, devant le jury d'évaluation composé de :

EZZIANE K.	Professeur	UHB-Chlef	Président
Mohamed M.	Professeur	ENSH-Blida	Directeur de Thèse
SAAD H.A.	Professeur	UHB-Chlef	Co-Directeur de Thèse
ELMEDDAHI Y.	MCA	UHB-Chlef	Examinatrice
LEFKIR A.	Professeur	ENSTP	Examinateur
HALLOUZ F.	MCA	U. Khemis Miliana	Examinatrice

Année universitaire 2022-2023

REMERCIEMENTS :

L'élaboration de cette thèse de doctorat est le fruit de plus de huit ans de recherches, alternés avec mon activité dans le secteur agricole. Son achèvement n'aurait pu voir la lumière sans la collaboration de nombreuses personnes qu'il m'est agréable de les remercier.

Avant tous, dieu merci et je dois remercier ma petite et grande famille pour son encouragement, son soutien et sa patience ainsi que pour avoir eu confiance en moi à travers ce projet d'étude. Je dédie ce mémoire à tous les membres de cette agréable famille que je tiens à cœur pour leur encouragement et leur support continu à travers cette aventure.

Je tiens dans un premier temps à remercier le *Pr Meddi Mohamed*, qui a accepté de diriger ce travail et a veillé au bon déroulement de ces années de recherche, et j'apprécie énormément le temps, toutes les connaissances qu'il m'a apporté en plus des contacts et des portes qu'il m'a ouvert durant les différentes étapes de ce projet.

Toute ma reconnaissance et gratitude va également au *Pr Saad Hammoudi Abdelamir*, pour son encadrement et son appui étroit et continu avant, pendant et lors de finalisation de ma thèse. J'aimerais aussi le remercier énormément.

J'ai l'agréable d'adresser ma grande reconnaissance aux différents services techniques auprès desquels j'ai bénéficié d'un aimable appui, notamment ceux qui m'ont facilité l'accès aux données de mesures et à la documentation.

Enfin, Je témoigne mon amitié à tous mes amis et collègues de *la Direction des Services Agricoles de la Wilaya Ain Defla* pour leur soutien ainsi que les bons moments passés ensemble.

RESUME :

Loin d'être exclusif à une région donnée, tout le monde s'accorde à dire que sous l'effet du changement climatique actuel, de nombreuses sociétés du monde, sont de plus en plus exposées et vulnérables par les sécheresses et bien d'autres phénomènes. La sécheresse figure davantage dans les préoccupations de nombreux pays qui ont mis en place des systèmes d'alerte précoce pour pouvoir suivre et faire face à cette menace. Un système de prévision hydrologique à l'échelle saisonnière peut potentiellement soutenir un système d'alerte précoce, car il peut fournir des prévisions mises à jour en tenant compte des conditions de sécheresse et des informations sur la disponibilité des ressources hydriques. L'Algérie, notamment dans sa partie occidentale est caractérisé par une variabilité climatique remarquable traduite par plusieurs grandes sécheresses pluriannuelles jusqu'à nos jours dont les déficits de longue durée signalés ont causé de graves problèmes socio-économiques, mais la gestion de ce phénomène demeure réactive basée sur la gestion de crise.

Dans cette thèse, l'indice de ruissellement normalisé (SRI) a été calculé à différentes échelles du temps à partir des enregistrements du débit (de 1968-2009) émanant de 16 stations hydrométriques pour caractériser et prévoir les événements de la sécheresse hydrologique au niveau des quatre bassins hydrologiques.

Les valeurs SRI continuellement négatives pour toutes les stations étudiées ont montré un changement du régime hydrologique sur l'ensemble de la zone d'étude à partir de la décennie 1970-1980. Cette tendance est représentée clairement par le nombre de mois secs important et prononcé en allant vers l'Ouest.

La réponse de la sécheresse hydrologique aux conditions météorologiques (exprimées par l'indice de précipitation standardisé (SPI) et l'indice de détection de la sécheresse (RDI) a été variable d'un bassin à l'autre. Les résultats de l'indice de débit de base (BFI) ont indiqué une variabilité considérable d'un bassin à l'autre et selon l'échelle de temps considérée et que les processus de cette réponse est également influencé par les caractéristiques des bassins hydrologiques considérés.

Cette étude a visé aussi de tester la performance de la prévision des occurrences hydrologiques sèches. Deux modèles sont donc retenus à savoir les chaînes de Markov et la régression robuste qui ont été utilisées en divisant notre base de données en deux ensembles. Les résultats ont montré de meilleures performances avec un délai de 1 mois et une supériorité pour les conditions de sécheresse à long terme. Les valeurs de R^2 sont élevées pour les bassins étudiés, ce qui montre que la tendance à la sécheresse est persistante. La différence entre les résultats obtenus des stations considérées est liée au temps de réponse hydrologique par rapport aux conditions météorologiques enregistrées, qui sont très variables d'un bassin à l'autre.

Mots-clés : Nord-Ouest Algérien, indices de sécheresse, alerte précoce, processus de propagation, prévision.

ABSTRACT:

Far from being exclusive to a given region, everyone agrees that under the effect of climate change, many societies worldwide are increasingly exposed and vulnerable to droughts and many other phenomena. Drought is more on the minds of many countries that have put in place early warning systems to be able to monitor and deal with this threat. A seasonal-scale hydrological forecasting system can potentially support an early warning system, as it can provide up-to-date consumers taking into account drought conditions and water resource availability information. Algeria, especially in its western part is characterized by a remarkable climatic variability translated by several major multi-annual droughts until today whose long-term deficits reported have been reported as serious socio-economic problems, but the management of this phenomenon remains reactive based on crisis management.

In this thesis, the Standardized Runoff Index (SRI) index was calculated at different time scales from flow records (from 1968-2009) emanating from 16 hydrometric stations to characterize and predict hydrological drought events at the four hydrological basins. The continuously negative SRI values for all the stations studied showed a change in the hydrological regime over the study area from 1970-1980 decade. This trend is clearly represented by the number of important and pronounced dry months going from towards the West.

The response of hydrological drought to meteorological conditions expressed by the Standardized Precipitation Index (SPI) and the reconnaissance drought index (RDI index) was variable from one basin to another. The results of the base flow index (BFI) index indicated a considerable variability from one basin to another and according to the time scale considered and that the processes of this response are also influenced by the characteristics of the hydrological basins considered. This study also aimed at the performance of the forecast of dry hydrological occurrences.

Therefore, two models are retained, namely the Markov chains and the robust regression used by dividing our hydrometric database into two sets. Results showed better performance with a 1-month delay and superiority for long-term drought conditions. The R^2 values are high for the basins studied, showing the persistent drought trend. The difference between the results obtained from the stations considered is linked to the hydrological response time in relation to the meteorological conditions recorded, which vary greatly from one basin to another.

Keywords: Algerian Northwest, Drought indices, early warning, response process, forecast.

ملخص:

بعيداً عن كونه مقصوراً على منطقة معينة ، يتفق الجميع على أنه في ظل تأثير تغير المناخ الحالي ، فإن العديد من المجتمعات في العالم معرضة بشكل متزايد للخطر بسبب الجفاف والعديد من الظواهر الأخرى. يعتبر الجفاف هاجس العديد من البلدان التي أنشأت أنظمة إنذار مبكر لتكون قادرة على مراقبة هذا التهديد والتعامل معه. تتميز الجزائر، وخاصة في الجزء الغربي منها، بتقلب مناخي ملحوظ مما أدى إلى العديد من موجات الجفاف الرئيسية حتى اليوم. في هذه الأطروحة، تم حساب مؤشر SRI على نطاقات زمنية مختلفة من سجلات التدفق (من 1968-2009) المنبثقة من 16 محطة هيدرومترية لتوصيف الجفاف الهيدرولوجي على مستوى الأحواض الهيدرولوجية الأربعة. أظهرت قيم SRI السلبية المستمرة لجميع المحطات التي تمت دراستها تغييراً في النظام الهيدرولوجي في منطقة الدراسة خلال العقد 1970-1980. يتم تمثيل هذا الاتجاه بشكل واضح من خلال العدد المتزايد لأشهر الجفاف المهمة مع امتداد فترة التراكم بشكل أكثر وضوحاً من الغرب إلى الشرق. من ناحية أخرى عندما تزداد فترة التراكم ، تنخفض القيمة الدنيا لمؤشر SRI في جميع المحطات الهيدرومترية المدروسة . عرفت مدة الجفاف أقصى حد لها في معظم الحالات المسجلة المقدره خلال الفترة 1981-1987. تفاوتت استجابة الجفاف الهيدرولوجي لظروف الأرصاد الجوية التي يعبر عنها مؤشر SPI ومؤشر RDI من حوض إلى آخر. أشارت نتائج مؤشر BFI إلى تباين كبير من حوض إلى آخر ووفقاً للمقياس الزمني المدروس وأن هذه الظاهرة تتأثر أيضاً بخصائص الأحواض الهيدرولوجية التي تم النظر فيها. يهدف الجزء الثاني إلى توقع الأحداث الهيدرولوجية الجافة. تم الاحتفاظ بنموذجين هما سلاسل ماركوف واستخدم الانحدار القوي للتنبؤ بالظواهر الهيدرولوجية الجافة من خلال تقسيم قاعدة بياناتنا إلى مجموعتين. أظهرت النتائج المتوقعة أداء أفضل مع مهلة شهر واحد مع التفوق في ظروف الجفاف طويلة الأجل. قيم R^2 عالية للأحواض التي تمت دراستها، مما يدل على أن اتجاه الجفاف مستمر. يرتبط الاختلاف بين النتائج التي تم الحصول عليها من المحطات المدروسة بوقت الاستجابة الهيدرولوجية فيما يتعلق بظروف الأرصاد الجوية المسجلة والتي تختلف اختلافاً كبيراً من حوض إلى آخر

الكلمات المفتاحية: الشمال الغربي الجزائري ، مؤشرات الجفاف، الإنذار المبكر، اليات الاستجابة ، التنبؤ بالجفاف



Taux de remplissage des barrages de l'Ouest avec 20% (situation Novembre 2021), source : <https://www.jeune-independent.net/pr-chelghoum-80-des-barrages-en-algerie-sont-totalement-envases/>



Barrage Ouled Mellouk (Wilaya Ain Defla): situation Février 2022 (source : <http://lecourrier-dalgerie.com/baisse-du-niveau-du-barrage-douled-mellouk-ain-defla-16-forages-mis-en-service-pour-assurer-laep/>)

TABLE DES MATIERES

Introduction générale :	1
--------------------------------------	---

PARTIE I :

CHAPITRE I : Cadre théorique de l'étude, définition et méthodes de suivi des sécheresses

I.1. Introduction : Contexte.....	4
I.2. Revue de littérature :	4
I.2.1. Définition de la sécheresse :.....	4
I.2.2. Des sécheresses différentes mais interdépendantes :.....	6
I.2.3. Propagation de la sécheresse :	7
I.2.4. Caractérisation de la sécheresse et de son intensité :.....	10
I.2.5. Suivi des épisodes de la sécheresses aujourd'hui : Etat de l'art.....	11
I.2.6. Les indicateurs de la sécheresse et les indices :	14
I.3. Conclusion :.....	16

CHAPITRE II : La sécheresse dans le contexte du changement climatique

II.1. La sécheresse et le changement climatique :.....	17
II.2. A Quoi s'attendre en suivant la courbe de réchauffement ?.....	19
II.3. Les indices de sécheresse dans un climat changeant:.....	22
II.4. Défis et opportunités pour mieux agir:	23

CHAPITRE III : Principes d'un système d'alerte précoce à la sécheresse

III.1. Introduction :.....	24
III.1.1- Qu'est-ce qu'un système d'alerte précoce à la sécheresse (SAPS)?.....	24
III.2. Caractéristiques du Système d'alerte précoce à la sécheresse :.....	24
III.3. Le fonctionnement des systèmes d'alerte précoce :.....	25
III.3.1 Connaissance et évaluation du risque :.....	25
III.3.2. Suivi, prévision et alerte :.....	26
III.3.3. Communication de l'alerte:.....	26
III.3.4. La capacité de réponse :.....	27
III.4. contraintes à l'efficacité des SAPS ou Facteurs de vulnérabilité :.....	28
III.5. Suivi de la sécheresse et le Système d'Alerte Précoce à la Sécheresse :.....	29
III.6. Conclusion :.....	32

CHAPITRE IV : Contexte hydrologique de la sécheresse

IV.1. Introduction:.....	33
IV.2. Contexte de la sécheresse hydrologique:.....	33
IV.3. Les données hydrologiques et quantification de la sécheresse :.....	37
IV.3.1. Evaluation du risque de la sécheresse hydrologique:.....	38
IV.3.2. Caractérisation de la sécheresse hydrologique:.....	39
IV.3.2. Modélisation de la sécheresse hydrologique :.....	40

IV.3.4. Prévisions de sécheresse hydrologique :.....	41
IV.4. Indices hydrologiques de sécheresse :.....	44
IV.4.1. Indice de ruissellement normalisé (SRI) :.....	45
IV.4.2. Indice de sécheresse fondé sur l'écoulement fluvial (SDI):.....	45
IV.4.3. Indice de sécheresse agrégé (ADI) :.....	46
IV.4.4. Indice d'apport d'eau de surface (SWSI) :.....	46
IV.4.5. Indice normalisé de la fonte des neiges et de la pluie (SMRI) :.....	46
IV.5. Les services hydrologiques nationaux:.....	47
IV.6. Conclusion :	48

CHAPITRE V : Vue d'ensemble de la sécheresse en Algérie

V.1. Introduction :.....	49
V.2. La sécheresse en Algérie :.....	49
V.2.1. Evènements historiques :.....	49
V.2.2. Projections futures des sécheresses en Algérie :.....	50
V.3. Impact de la sécheresse en Algérie :.....	52
V.3.1. Impact sur les ressources en eau :.....	52
V.3.1.1. Impacts sur l'écoulement de surface :.....	52
V.3.1.2. Impacts sur les eaux souterraines :.....	52
V.3.2. Impacts sur l'agriculture :.....	52
V.4. Aperçu de la stratégie de gestion de la sécheresse en Algérie :.....	53
V.5. Les structures nationales travaillant dans la problématique de la sécheresse :.....	55
V.5.1. Catégorie des structures fortement impliquées :.....	55
V.5. 2. Catégorie des structures utilisatrices de l'information sur la sécheresse :.....	55
V.6. Conclusion :.....	56

PARTIE II

CHAPITRE VI : Présentation de la région d'étude

VI.I. Introduction :.....	57
VI.2. Caractérisation de la région d'étude :.....	57
VI.2.1. Contexte géographique :.....	57
VI.2.2. Climatologie :.....	58
VI.2.2.1. Pluviométrie :	59
VI.2.2.2. Températures :.....	61
VI.2.2.3. Evapotranspiration Potentielle (ETP):.....	62
VI.2.2.4. Insolation (gisement solaire):.....	64
VI.2.3. Bioclimatologie :.....	65
VI.2.4. Contexte géologique:.....	65
VI.2.5. Caractéristiques physiques :.....	66
VI.2.5.1. Relief :.....	66
VI.2.5.2. Couvert végétal:.....	68
VI.2.6. Réseau hydrographique :.....	69
VI.2.6.1. Bassin versant de la Tafna :.....	70

VI.2.6.2. Bassin des Côtier Oranais :...	71
V.3.2. Bassin versant de la Macta :.....	72
V.3.4. Bassin versant du Cheliff :.....	73
VI.2.7. Ressources en eau :.....	74
VI.2.7.1. Ressources en eaux superficielles :.....	74
VI.2.7.2. Ressources en eaux souterraines :.....	77
VI.3. Conclusion :.....	79

CHAPITRE VII : Méthodologie de caractérisation et prévision de la sécheresse hydrologique

VII.1. Introduction :.....	80
VII.2. Caractérisation de la sécheresse:.....	80
VII.2.1. Indice de ruissellement normalisé (SRI) :.....	81
VII.2.2. Indice de précipitation standardisé (SPI):.....	81
VII.2.3. Indice de reconnaissance de sécheresse (RDI):.....	82
VII.2.4. Calcul des indices de sécheresse :.....	83
VII.2.5. Analyse statistique du jeu de données :.....	84
VII.2.5.1. Les données hydrométriques :.....	85
VII.2.5.2. Données climatiques :.....	86
VII.2.6. Réponse de la sécheresse hydrologique à la sécheresse météorologique :.....	88
VII.2.6.1. Analyse de corrélation entre les sécheresses météorologique et hydrologique :.....	88
VII.2.6.2. Analyse de la courbe (ROC).....	89
VII.2.7. Réponse de la sécheresse hydrologique aux caractéristiques des bassins versants :...	90
VII.2.7.1. Analyse de l'indice de débit de base (BFI) :.....	90
VII.3. Prévision des évènements de la sécheresse hydrologique :.....	92
VII.3.1. Modèle à commutation de Markov (MSM) :.....	92
VII.3.2. Modèle de régression robuste (RRM) :.....	93
VII.3.3. Mesures de performance :.....	94
VII.3.4. Changements d'erreur des prévisions basés sur le temps écoulé :.....	95
VII.4. Conclusion :.....	95

CHAPITRE VIII : Résultats et Discussions

VIII.1. Introduction :.....	96
VIII.2. Résultats de la caractérisation de la sécheresse hydrologique :.....	96
VIII.2.1. Evolution de la sécheresse hydrologique durant la période 1968-2009 :.....	96
VIII.2.2. Résultats des paramètres d'analyse des périodes hydrologiques sèches :.....	97
VIII.2.3. Répartition des valeurs de SRI selon les classes de conditions de sécheresse :.....	98
VIII.2.4. Résultats d'analyse de la durée de sécheresse hydrologique :.....	100
VIII.2.5. Répartition des évènements de sécheresse hydrologique par mois humides :.....	100
VIII.3. Résultats de la réponse hydrologique à la sécheresse météorologique :.....	102
VIII.3.1. Résultats de la corrélation entre les deux types de sécheresse :.....	102
VIII.3.2. Analyse de la courbe (ROC) :	107
VIII.4. Réponse de la sécheresse hydrologique aux caractéristiques de la région d'étude...	108
VIII.4.1. Résultats de l'indice BFI.....	108

VIII.5. Résultats de performance de la prévision de la sécheresse hydrologique :.....	111
VIII.5.1. Résultats de la matrice des probabilités de transition entre les états (MSM):.....	111
VIII.5.2. Résultats de performance des modèles de prévision :.....	112
VIII.5.3. Résultats de changements d'erreur des prévisions basés sur le temps écoulé :.....	121
VIII.6. Conclusion :.....	123
Conclusion générale et perspectives.....	124
Bibliographie :.....	127
Annexe :.....	161

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE IV :

Tableau IV.1 : Impacts majeurs de la sécheresse en relation avec les types de la sécheresse.....	35
Tableau IV.2 : Processus de propagation par type et sous-type de sécheresse hydrologique.....	37
Tableau IV.3 : récapitulatif des indices de la sécheresse hydrologiques décrits.....	47

CHAPITRE V :

Tableau V.1 : Matrice des responsabilités pour un SAPS en Algérie.....	56
--	----

CHAPITRE VI :

Tableau VI.1 : Moyennes mensuelles et annuelles des évapotranspirations en mm en quelques stations de l'Ouest Algérien.....	63
Tableau VI.2 : caractéristiques des barrages de la région.....	74
Tableau VI.3 : Exploitation de quelques nappes dans la région (MRE, 2010).....	78

CHAPITRE VII :

Tableau VII.1 : données d'entrée de chaque indice.....	83
Tableau VII.2. Caractéristiques des stations hydrométriques étudiées.....	86
Tableau VII. 3 : Récapitulatif des résultats des tests d'hypothèses.....	88
Tableau VII.4 : Tableau de contingence 2*2 pour le calcul du ROC.....	90

CHAPITRE VIII :

Tableau VIII.1. Paramètres de la sécheresse hydrologique pour chaque station.....	98
Tableau VIII.2. Pourcentage de distribution des classes de sécheresse selon l'indice SRI.....	99
Tableau VIII.3 : Coefficient de corrélation de Pearson des stations étudiées.....	103
Tableau VIII.4 : Aire sous les courbes (ROC).....	107
Tableau VIII.5 : BFI moyen comparable aux valeurs de r pour les stations étudiées.....	109
Tableau VIII.6 : Matrice de probabilité de transition pour chaîne de Markov à deux états.....	111
Tableau VIII.7 : Résultats de performance de SRI-3 pour MSM et RRM.....	113
Tableau VIII.8 : Résultats de performances de SRI-6 pour MSM et RRM.....	115
Tableau VIII.9 : Résultats de performances de SRI-12 pour MSM et RRM.....	117
Tableau VIII.10 : E_{\min} et F_{\min} de la période de prévision.....	121

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I :

- Figure. I.1. les différents types de sécheresse et sa propagation dans le cycle hydrologique.....9
- Figure I.2. les conditions mondiales de sécheresse en 2017 sur la base de l'indice PDSI.....16

CHAPITRE II :

- Figure II.1 : Influence de la variabilité climatique sur la relation entre les variables du cycle hydrologique et les différents types de sécheresse.....18
- Figure II.2 : cartes de projection de changement de quelques variables selon des simulations sous un scénario de fort réchauffement («RCP8.5»).....21

CHAPITRE III :

- Figure III.1 : Schéma conceptuel du système d'alerte précoce opérationnel. Adapté par Foster (1980), Zillman (2003), et Villagran de León et al. (2006).....27
- Figure III.2 : Étendue spatiale et intensité des conditions de sécheresse aux États-Unis d'Amérique en Juin 2021, selon le Système américain de suivi de la sécheresse.....29
- Figure III.3 : carte de produits de suivi de la sécheresse en chine (Avril 2019).....30
- Figure III.4 : Carte de Situation de l'indicateur combiné de sécheresse en Europe - 3^{ème} décennie de Mai 2022.....31

CHAPITRE IV :

- Figure IV.1: Différentes composantes de prévision de la sécheresse.....43

CHAPITRE V :

- Figure V.1 : Carte des déficits pluviométriques dans le Nord Algérien.....50
- Figure V.2 : projection du nombre des jours secs consécutifs en Algérie de 1990-2100.....51

CHAPITRE VI :

- Figure VI.1 : Carte de localisation de la région d'étude par rapport aux bassins versants.....58
- Figure VI.2 : régionalisation des pluies dans la région d'étude.....60
- Figure VI.3 : Evolution du régime pluviométrique annuel à la station Bouhanifia (1964-2014).....61
- Figure VI.4 : températures moyennes annuelles en Algérie entre 1979 et 2013.....62
- Figure VI.5 : Evolution des températures moyennes annuelles à la station Bouhanifia (1964-2014)....62
- Figure VI.6 : Carte des évapotranspirations potentielles moyennes annuelles sur l'Algérie Nord.....64
- Figure VI.7: Carte des étages bioclimatiques de la région d'étude.....65
- Figure VI.8 : Présentation du relief de la région d'étude.....68

Figure VI.9 : Carte synthèse de sensibilité à la désertification en Algérie du Nord (2000-2005).....	69
Figure VI.10. Photo d'oued Tafna.....	71
Figure VI.11. Photo d'oued Mouilleh.....	71
Figure VI.12. Photo d'oued Mekerra.....	72
Figure VI.13 : Carte du réseau hydrographique de la région d'étude.....	73
Figure VI.14 : évolution des apports annuels des barrages Beni Bahdel et Bouhanifia.....	77
Figure VI.15 : Ressources en eau souterraines dans le Nord du pays.....	78

CHAPITRE VII :

Figure. VII.1 : L'interface graphique de DrinC.....	84
Figure VII.2. Localisation des stations de mesure.....	85
Figure VII.3 : données d'entrée.....	91
Figure VII.4 : sélection de la saison.....	91
Figure VII.5 : Interface graphique Eviews sous windows (version 9.0).....	95

CHAPITRE VIII :

Figure VIII.1 : graphique des résultats du calcul de l'indice SRI-12 en 1968-2009.....	96
Figure VIII.2 : Répartition des valeurs des paramètres de la sécheresse hydrologique dans les différentes régions hydrologiques.....	97
Figure VIII.3 : Boite à moustache de la durée de sécheresse hydrologique.....	100
Figure VIII.4 : Répartition des stations hydrométriques selon les mois de déclenchement de la sécheresse hydrologique durant la saison humide: (a) indice SRI-3 ; (b) Indice SRI-12.....	101
Figure VIII.5. Variations temporelles de SRI-12 et RDI-12 aux stations étudiées.....	116
Figure VIII.6 : Variation AUC des courbes ROC pour (a) Beni Bahdel (b) Ghazaouet El Bor (c) Haçaiba (d) Ammi Moussa.....	108
Figure VIII.7 : variation des séries de BFI-3, BFI-6 et BFI-12 pour la station Ammi Moussa (1968-2009).....	109
Figure VIII.8 : variation des valeurs SRI observées et prévues durant la période de prévision (station Haçaiba).....	119
Figure VIII.9 : résultats de l'intervalle de prévision pour (a) Beni Bahdel (b) Haçaiba au niveau de confiance 95%.....	120
Figure VIII.10 : résultats de l'intervalle de prévision pour (c) Ghazaouet (d) Ammi Moussa au niveau de confiance 95%.....	120
Figure VIII .11 : Variations de l'indice F (a) Beni Bahdel (b) Haçaiba (c) Ghazaouet El Bor (d) Ammi Moussa.....	122

LISTE DES ABREVIATIONS

ADI : Indice de sécheresse agrégé
APNDT : projet national sur la neutralité dans la dégradation des terres
AUC : aire sous la courbe
BFI : Base Flow Index
CCP : coefficient de corrélation de Pearson
CDER : Centre de Développement des Energies Renouvelables
CNERIB : Centre National des Etudes et Recherches Intégrées du Bâtiment
CNES : Conseil National Economique et Social
CORDEX: Coordinated Regional climate Downscaling Experiment
CPDN : Contributions Prévues Déterminées au niveau National
CTCN: Climate Technology Centre and Network
DNRM : Délégation Nationale sur les Risques Majeurs
DrinC: Drought indices calculator
ETCCDI: Expert Team on Climate Change Detection and Indices
ETDI : l'indice de sécheresse par évapotranspiration
ESSMI : l'indice d'humidité du sol normalisé empirique
GIEC : Groupe International des Experts sur l'Evolution du Climat
GIZ : Agence de coopération allemande
GRACE : l'indice de sécheresse basé sur la récupération par gravité et expérience climatique
LT : Lag Time
MEER : Ministère de l'Environnement et Energies Renouvelables
MRC : modèles climatiques régionaux
MSM : Modèle à commutation de Markov
OSS : Observatoire du Sahara et du Sahel
PNC : Plan National Climat
PNE : Plan National de l'Eau
PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement
RMSE : erreur quadratique moyenne
ROC : Receiver Operating Characteristic
RRM : Modèle de régression robuste
SAPS : Système d'Alerte Précoce à la Sécheresse
SDI : Indice de sécheresse fondé sur l'écoulement fluvial
SH : Service Hydrologique
SMRI : Indice normalisé de la fonte des neiges et de la pluie
SRI : Indice de ruissellement normalisé
SPI: Standardized Precipitation Index
SWSI : Indice d'apport d'eau de surface
UNISDR: United Nations International Strategy for Disaster Reduction

Introduction Générale

Tout le monde est d'accord pour dire que sous l'effet du changement climatique actuel, de nombreuses sociétés, sont de plus en plus vulnérables. Cet état de fait préoccupe depuis des années les scientifiques ainsi que les décideurs politiques en raison de leurs conséquences immédiates et durables sur l'environnement, ce qui est traduit par des aléas climatiques extrêmes, principalement les sécheresses et les inondations et bien d'autres phénomènes qui diffèrent d'une région à une autre. De tels phénomènes météorologiques sont de plus en plus importants et de plus en plus fréquents (Spinoni et al, 2018).

Loin d'être exclusif à une région donnée, on sait que les sécheresses ont déclenché dans plusieurs pays, des situations de conflits armés, des famines et des déplacements de populations pour avoir accès à l'eau potable en affectant la croissance économique et la santé des écosystèmes (Lesk et al, 2016 ; Pritchard, 2017 ; Naulleau et al, 2021).

L'influence de la sécheresse sur de nombreux secteurs est particulièrement visible dans les régions semi-arides et arides, où l'eau est rare (Achite et al, 2017 ; FMI, 2019).

Dans le cas du bassin méditerranéen, dont une grande partie est semi-aride à aride, les précipitations extrêmement variables à travers les échelles temporelles et spatiales sont influencées par la position géographique de la région entre deux masses d'eau contrastées : l'océan Atlantique et la mer Méditerranée (Lionello et al, 2006 ; Buttafuoco et al, 2011). Une caractéristique supplémentaire déterminant la forte variabilité des précipitations dans cette région est la présence de diverses chaînes de montagnes réparties le long des zones côtières d'Est en Ouest (Buttafuoco et al, 2011).

Devant les effets de ce phénomène qui sont de plus en plus visibles à cause d'une vulnérabilité sociétale accrue, plusieurs pays ont misé sur des systèmes d'alerte précoce pour pouvoir déclencher des actions d'une manière efficace permettant de faire face à cette menace et d'éviter donc les efforts de secours coûteux à la suite d'un tel événement (Tadross, 2016).

L'Algérie, le plus grands pays de la méditerranée, en tant que pays semi-aride et aride, est plus vulnérable aux effets des changements climatiques et souffre d'une instabilité dans les apports pluviométriques causés par des sécheresses récurrentes de longues périodes (GIZ & MEER, 2017). La question de l'eau qui se pose aujourd'hui surtout en termes de disponibilité constitue une contrainte majeure à l'échelle nationale pour couvrir les besoins accrus des différents secteurs.

L'Ouest du pays caractérisé par une variabilité climatique et une croissance socio-économique, a connu plusieurs grandes sécheresses comme c'est le cas durant les années 40 et 80 jusqu'à nos jours (Khaldi, 2005 ; Meddi H & Meddi M, 2009 ; Zerouali et al, 2017 ; Achour et al, 2020). Les événements récents de la sécheresse sont caractérisés par un déficit remarquable des précipitations associée à une augmentation des températures et ils ont influencé par leur ampleur spatiale, intensité sur la diminution des ressources en eau (Meddi & Hubert, 2003 ; Habi & Morsli, 2011 ; Taibi et al, 2013 ; Habibi et al, 2018 ; Bensaoula et al, 2019).

Face à cette situation, le suivi de la sécheresse en Algérie est assuré au premier lieu par certaines institutions et agences publiques qui appartiennent à plusieurs secteurs d'activité. Mais, la sécheresse nécessite d'être anticipée pour en gérer les impacts. Il est donc nécessaire de miser sur un outil approprié au niveau national en utilisant toutes les nouvelles technologies sur lequel sont basées ses stratégies.

Et puisque le suivi de la disponibilité des eaux constitue une composante essentielle pour un système d'alerte efficace à la sécheresse, l'étude des sécheresses hydrologiques est importante en raison des influences directes de ce type de sécheresse sur les systèmes d'approvisionnement en eau (Van Loon, 2015 ; Mishra et al, 2019). Le Nord Algérien notamment, dans sa partie occidentale, a été focalisé par diverses études de sécheresses météorologiques. Cependant, les sécheresses hydrologiques sont moins abordées dans cette région tout en signalant que la ressource en eau devient de plus en plus limitée. Parmi ces études on cite celles de Meddi et al, (2009) ; Meddi & Talia, (2013); Elmeddahi (2016) qui ont montré une diminution significative des écoulements superficiels dans les bassins versants de la Macta et du Chellif avec une influence négative sur les niveaux des ressources en eau. Yahiaoui et al (2009) ont étudié le régime d'écoulement du bassin versant de l'oued Mina et la fréquence du flux de sécheresse en basant sur l'analyse du volume du déficit et de la durée correspondante. Djellouli et al, (2016) ont utilisé la corrélation entre plusieurs indices comme le SPI, EDI et SRI pour décrire les conditions de l'évolution de la sécheresse de type météorologique et hydrologique au niveau du bassin de Wadi El Hammam dont les meilleurs résultats sont obtenus pour un pas de temps de 9 mois.

Etant donné l'importance de l'étude du contexte hydrologique de la sécheresse pour la conception et la mise en place d'un système national ou régional d'alerte précoce à cet aléa, le présent travail ambitionne d'analyser selon une méthodologie harmonisée basée sur

des indices de la sécheresse et l'application des modèles stochastiques de prévision, les caractéristiques et la performance de prévoir les conditions hydrologiques de la sécheresse dans quatre bassins versants de l'Ouest Algérien tout en basant sur une importante base de données hydrométéorologiques.

Dans cette vision, cette thèse est structurée en deux parties :

-Une première partie est dédiée à l'étude de la vulnérabilité face aux sécheresses, composée de cinq chapitres en présentant le contexte général de la thèse. Le premier chapitre introductif expose le concept de la sécheresse. Il présente également les caractéristiques de cet aléa et d'appui à l'alerte précoce. Le second chapitre analyse la sécheresse dans un contexte de changement climatique entre les événements historiques et les projections futures. Le troisième chapitre présente les principes de fonctionnement d'un système d'alerte précoce à la sécheresse. Il décrit aussi les efforts axés par plusieurs pays du monde sur les alertes précoces à ce phénomène. Le quatrième chapitre s'attache à l'étude de la sécheresse dans un contexte hydrologique, évaluation des conditions de la sécheresse hydrologique et sa réponse aux conditions météorologiques et caractéristiques des bassins. Il parcourt par la suite les indicateurs et leur rôle dans la caractérisation et la prévision de ce type d'événements. Le cinquième chapitre est dédié à l'étude de la sécheresse en Algérie, ses impacts sur les différents secteurs ainsi que les stratégies de gestion des risques liés à ce phénomène climatique.

-La seconde partie «Caractérisation et prévision des événements de la sécheresse hydrologique dans le Nord-Ouest Algérien» se décompose en trois chapitres traitant chacun des points particuliers de la méthodologie abordée dans cette thèse. Le premier chapitre aborde les caractéristiques géographiques, géomorphologiques et hydro-climatologiques de la région d'étude. Il décrit également les risques liés à la persistance de ce phénomène. Le deuxième chapitre présente les démarches appliquées pour la caractérisation et la prévision des occurrences hydrologiques sèches au niveau de la région d'étude. Il illustre le contrôle du jeu de données et le choix des indices des deux types de la sécheresse. Ce chapitre permet d'étudier la réponse hydrologique de la sécheresse à la propagation de la sécheresse météorologique et les caractéristiques des bassins versants. Le troisième chapitre est consacré à la présentation et discussion des résultats obtenus relatifs au suivi et la prévision des conditions de la sécheresse hydrologique dans la région d'étude par la comparaison de deux modèles avec trois approches différentes.

I.1. Introduction : Contexte

La sécheresse est un évènement climatique complexe de caractère insidieux, caractérisé par un déficit des précipitations par rapport aux valeurs normales ou prévues ; lorsque ce manque persiste durant une saison ou plus, il menace de répondre convenablement aux besoins des activités humaines et de l'environnement (Rajsekhar et al, 2015). Les processus physiques impliqués en sécheresse sont fortement non linéaires et impliquent des rétroactions, et son impact se propage à plusieurs niveaux de manière qui souvent ne peuvent pas être quantifiés objectivement (Lloyd-Hughes, 2014). Les dirigeants ainsi que le grand public l'associent aux zones arides, semi-arides, alors qu'elle touche évidemment la plupart des régions du monde, arides et même dans les régions subhumides et humides (OMM, 2006 ; Van Dijk et al, 2013 ; Garreaud et al, 2020).

I.2. Revue de littérature

Cette étude scientifique est de nature multidisciplinaire et fait appel à plusieurs concepts en hydrologie. Ces domaines de recherche sont introduits par une brève revue de la littérature scientifique en rapport avec le thème de recherche du présent mémoire.

I.2.1. Définition de la sécheresse

Selon Tate & Gustard (2000) et Cai et al (2017), il y a une absence d'une définition universelle précise et incontestée de la sécheresse. Cependant, les définitions peuvent être classées en grandes catégories comme conceptuelle ou opérationnelle (Wilhite & Glantz, 1985). La définition conceptuelle décrit les concepts de base de la sécheresse avec une description générale des processus physiques impliqués, tels que le manque de précipitations, le manque d'humidité du sol, la pénurie d'eau dans les lacs et les cours d'eau et la pénurie d'eau à l'usage domestique (Wilhite & Chapter, 2000) .

D'autre part, la définition opérationnelle se concentre sur l'identification du début, la durée et la fin des épisodes de la sécheresse, y compris leur gravité (Mishra & Singh, 2010). Les définitions opérationnelles visent à fournir des informations précises sur la sécheresse à l'aide d'un système d'alerte précoce efficace (Wilhite & Chapter, 2000). La cohérence entre ces définitions est une clé pour lever toute ambiguïté dans l'élaboration des politiques de lutte contre la sécheresse (Mukherjee et al, 2018).

Classiquement définie, la sécheresse est un évènement récurrent du climat due essentiellement à un déficit hydrique marqué temporairement dans une ou plusieurs composante(s) du cycle hydrologique (Hong et al, 2016). Ce manque d'eau est généralement causé par des faibles précipitations sur une période donnée qui peut être ponctuelle ou cyclique et ce, par rapport à la moyenne provoquant un sérieux déséquilibre hydrologique et donc de graves dommages en vies humaines et des pertes économiques (Chang & Cleopa, 1991; Wilhite, 2000, Svoboda et al, 2002 ; Sheffield & Wood, 2012; Trenberth et al, 2013 ;Yihdego, 2016).

Selon l'OMM (2006), cet aléa climatique peut être défini comme étant une période prolongée pendant laquelle les précipitations sont insuffisantes (une ou plusieurs saisons, voire des années) qui engendrent un déficit d'eau dans certaines activités ou secteurs d'un pays. Elle diffère des autres fluctuations climatiques par le fait qu'elle s'installe lentement et peut se développer durant une période de plusieurs mois ou années. La sécheresse peut se produire dans toutes les zones climatiques en affectant des espaces assez larges. Cependant, ses caractéristiques sont souvent difficiles à prévoir et varient d'une saison à l'autre et d'une région à une autre (OSS, 2013).

A ne pas confondre

La sécheresse ne doit pas être confondue avec un faible débit, l'aridité, la pénurie d'eau ou la désertification, ou avec des risques connexes tels que les vagues de chaleur et les incendies de forêt. «Faible débit» est un terme fréquemment utilisé, indiquant un faible débit du cours d'eau souvent caractérisé par des séries annuelles minimales qui ne reflètent pas toutes les années une sécheresse fluviale (Laaha et al. 2013). L'aridité est la caractéristique générale d'un climat aride et représente une condition (relativement) permanente, tandis que la sécheresse est temporaire (Mishra & Singh, 2010). Dans un climat aride, la sécheresse peut encore se produire lorsque les conditions locales sont encore plus sèches que normal (Stahl & Hisdal, 2004 ; Sheffield & Wood, 2012). La pénurie d'eau et la sécheresse sont généralement difficiles à distinguer car elles sont étroitement liées et se produisent souvent simultanément (Van Loon & Van Lanen, 2013). Le terme pénurie d'eau est utilisé pour désigner une pénurie d'approvisionnement en eau ou une situation dans laquelle l'influence anthropique sur le système hydrique joue un rôle important dans le développement d'une disponibilité d'eau inférieure à la normale (Seneviratne et al, 2012) et reflète un déséquilibre à long terme entre les ressources en eau disponibles et la demande (Tallaksen & Van Lanen, 2004; Ault, 2020).

I.2.2. Des types de sécheresses différentes mais interdépendantes

La définition d'une sécheresse est complexe et dépend fortement du domaine considéré. Cependant, le système de classification de la sécheresse en quatre types est basé sur la nature du déficit en eau (Vasiliades et al, 2017). Les sécheresses météorologiques, hydrologiques et agricoles sont considérées comme des sécheresses environnementales selon cette classification (Botai et al, 2017). Le quatrième type est la sécheresse socio-économique, qui est associée au fait que les systèmes de ressources en eau ne répondent pas à la demande en eau (Khan et al, 2018). Il existe également une autre définition de la sécheresse basée sur le déficit écologique en eau dans l'environnement en tant que sécheresse écologique (Yihdego et al, 2019). L'interconnexion entre les différents types de sécheresse qui se produisent simultanément ou séquentiellement rend difficile la distinction entre un type de sécheresse de l'autre (Mo, 2008).

La sécheresse météorologique : ce type de sécheresse survient lorsque il s'agit d'une période prolongée caractérisée par un déficit des précipitations qui est inférieur à la normale (Palmer, 1965 ; Boken, 2005). La sécheresse météorologique est souvent déclenchée par des anomalies persistantes à grande échelle liées au réchauffement périodique de surface de la mer (Ting & Wang, 1997 ; Trenberth & Shea, 2005).

La sécheresse agricole : Elle résulte d'une humidité du sol inférieure à sa valeur moyenne, donc insuffisante pour assurer des bonnes conditions de végétations (Palmer, 1965 ; Wilhelmi & Wilhite, 2002 ; Eslamian, 2014). Ce type de sécheresse est généralement provoqué par un cumul des précipitations anormalement inférieur à la normale (Narasimhan & Srinivasan, 2005), ou par une distribution temporelle du régime pluviométrique plus irrégulière, ou encore peuvent être engendrées par un taux d'évapotranspiration plus élevé (Vicente-Serrano et al, 2010). Les sécheresses agricoles ont souvent de conséquences lourdes sur la production agricole (Panu & Sharma, 2002).

La sécheresse hydrologique. elle se caractérise généralement par une perte d'eau au fil du temps provenant à la fois des approvisionnements souterrains et de surface (Tallaksen & Van Lanen, 2004 ; Van Loon, 2015). Il affecte généralement le niveau d'eau moyen à faible, ce qui le rend insuffisant pour répondre aux besoins humains et écosystémiques (Wanders et al, 2015), c'est le type de sécheresse le plus alarmant.

Ces trois types de sécheresse soulignent l'importance de la précipitation, de l'évapotranspiration et du ruissellement et leurs interactions dans la sécheresse causée par des facteurs climatiques (Sun et al, 2019).

La sécheresse socio-économique : elle survient habituellement lorsque la pénurie d'eau commence à affecter les personnes, individuellement et collectivement. Elle diffère aux autres types de sécheresse, car son apparition dépend des processus spatio-temporels de l'offre et de la demande en eau (Wilhite & Glantz, 1985).

I.2.3. Propagation de la sécheresse

Les conditions de sécheresse, déclenchées par les processus de circulation océanique/atmosphérique, se propagent du sous-système météorologique, qui se manifeste par un déficit de précipitations, aux sous-systèmes hydrologiques et agricoles (Wang et al., 2016), et sont donc appelées des phénomènes multi-scalaires (McKee et al, 1995).

Le processus de développement est appelé propagation. Le terme «propagation de la sécheresse» a été introduit comme cadre théorique par Changnon (1987), néanmoins créé comme terme par Eltahir et Yeh (1999). Selon Van Loon (2013), les caractéristiques de la propagation de la sécheresse comprennent le retard, l'allongement, l'atténuation et la mise en commun. Ce processus de propagation est non linéaire dans la nature (Cai et al, 2017 ; Konapala & Mishra, 2017).

Les différents types de sécheresse interagissent entre eux selon le diagramme présenté par la figure I.1. Cette représentation reste théorique et pour un espace donné, la situation observée de la sécheresse peut être différente. Les sécheresses agricoles, hydrologiques ou socioéconomique sont décalées dans un deuxième temps comparativement aux celles météorologiques avec ses effets connexes, car les conséquences produits dans ces secteurs sont attachées à l'approvisionnement en eau (surface ou souterraine) (Thierry, 2020).

Lorsqu'il y a un manque pluviométrique, la sécheresse agricole est la première à être sentie, alors qu'il faudrait souvent quelques semaines avant que ce manque se traduise par une faible humidité du sol qui impacte les cultures et les parcours (Son et al, 2012). Ceux-ci peuvent en outre se traduire par des déficits économiques dus à la réduction des rendements des cultures, et par la suite par une détresse et une famine sociétales, ce qui peut entraîner une instabilité politique (Sternberg, 2012).

La sécheresse de type météorologique peut devenir dans certaines conditions climatiques en réponse hydrologique (Thierry, 2020), alors que toute sécheresse météorologique ne se transforme pas d'une manière directe hydrologique. Par contre, une sécheresse majeure de type hydrologique se présente en réponse à une série de événements météorologiques mineures (Van Loon & Van Lanen, 2012).

Les paramètres importants qui influencent la propagation de la sécheresse sont les conditions hydrogéologiques, le type de sol, l'occupation des terres, les lacs et les cours d'eau (Van Lanen et al, 2004; Van Loon & Van Lanen, 2012). La différence entre les réserves hydrologiques est considérée le principal facteur contrôlant l'apparition et la propagation de telle sécheresse (Tallaksen et al, 2009; Van Lanen et al, 2013). En premier lieu, c'est le débit des cours d'eau, le niveau des réservoirs et des lacs, voire celui des nappes d'eau souterraines éventuellement qui est touché, donc c'est la sécheresse hydrologique (Jehanzaib et al, 2020).

Et si cet aléa climatique se maintient encore, les différents types de se conjuguent et les effets socio-économiques de la sécheresse se font alors sentir. Les impacts de la sécheresse socio-économique peuvent se développer immédiatement une fois que la sécheresse touche une région et peuvent persister avec le temps dans la mesure où ce phénomène provoque aussi l'augmentation de la demande en eau, dont l'offre est justement contrainte par ce même phénomène (Mehran et al, 2015).

Cependant, il y a encore beaucoup plus de mécanismes derrière la propagation de la sécheresse qui doivent être étudiés, tels que l'interaction entre les ressources en eaux de surface et souterraines pendant le processus de développement de la sécheresse, l'évapotranspiration de différentes communautés végétales en réponse aux sécheresses et l'action de l'homme (anticipation et réponse). D'un autre côté, la recherche dans le domaine des connaissances sur les mécanismes de la sécheresse a certainement progressé. En savoir plus sur les mécanismes quantitativement fournira une base plus solide pour la surveillance et la prévision des sécheresses hydrologiques et agricoles (Wang et al, 2016).

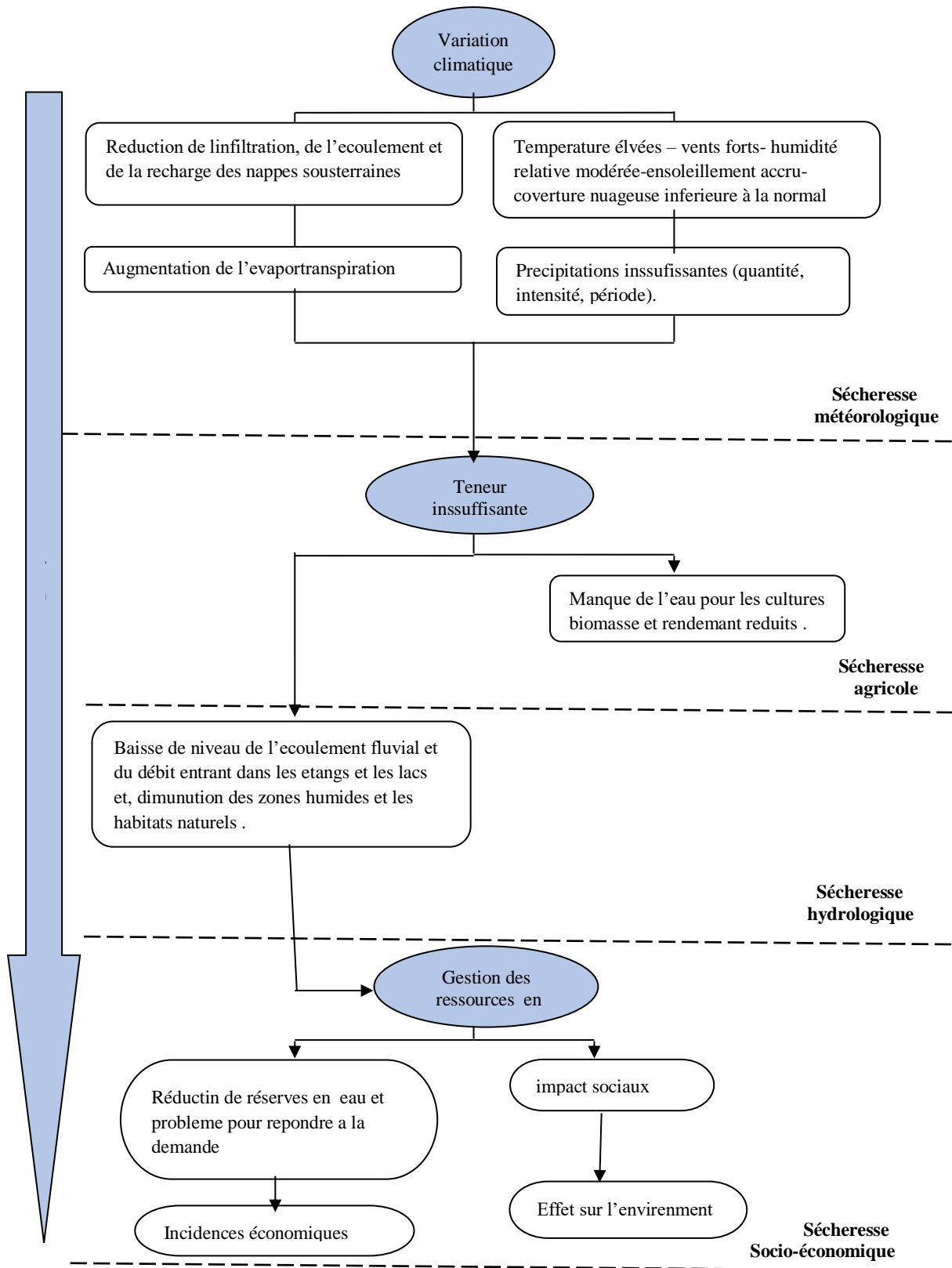


Figure. I.1. les différents types de sécheresse et processus de propagation dans le cycle hydrologique Source: modifiée du Journal of Hydrology (2015) et Villalobos (2007).

I.2.4. Caractérisation de la sécheresse

Les épisodes de la sécheresse ont plusieurs caractéristiques interdépendantes et chacun de ces caractéristiques peuvent avoir une influence considérable sur les impacts de ce phénomène (Salvadori & De Michele, 2004 ; Mishra et al, 2009). Par conséquent, le suivi de la sécheresse nécessite une évaluation conjointe de ses caractéristiques ainsi que l'identification de l'événement de sécheresse correspond à l'impact étudié (Cai et al, 2017).

L'ampleur de la sécheresse est généralement classée en trois dimensions : intensité, durée temporelle et étendue spatiale. Le moment étant un aspect important (Wilhite & Glantz, 1985 ; Sheffield & Wood, 2012). L'ampleur des impacts de la sécheresse est fortement liée au moment où débute le déficit pluviométrique, à son intensité et à sa durée (Spinoni et al, 2010).

L'intensité signifie l'écart entre un indice et sa valeur normale. Un seuil de l'intensité peut être donné pour analyser quand une sécheresse a débuté, quand elle s'est achevée et la région affectée (Dupigny-Giroux, 2001). Les seuils de sécheresse sont variables en fonction des endroits. Selon l'OMM (2018), on se base sur la variabilité naturelle du phénomène dans une région donnée et on analyse les anomalies par rapport à ce référentiel.

La durée est le second paramètre important de la sécheresse: en effet, si un événement de sécheresse commence rapidement sous certains climats, il lui faut une durée d'au moins deux à trois mois pour s'installer; elle peut persister durant plusieurs mois ou des années.

A cet effet, les sécheresses sont généralement considérées comme des aléas à évolution lente, de durée moyenne à longue et associées à des climats plus chauds, mais certaines sécheresses remettent en question ces hypothèses.

Les sécheresses soudaines surviennent rapidement et se terminent souvent en quelques jours ou quelques semaines (Mo & Lettenmaier, 2016). Des études récentes sur ce type de sécheresse ont tendance à définir ces événements par leur intensification rapide, plutôt que par leur courte durée (Otkin et al., 2018). Elles sont généralement provoquées par des déficits de précipitations, des températures extrêmement élevées et une augmentation rapide de la demande d'évaporation (Wang & Yuan, 2018). Ils sont considérés comme des événements estivaux (Otkin et al., 2018). La complexité des sécheresses soudaines et leur caractère saisonnier et sous-saisonnier rendent leur prévision difficile (Pendergrass et al., 2020), mais la capacité de les prévoir est d'une grande importance dans les systèmes d'alerte précoce (Mo & Lettenmaier, 2020).

Par ailleurs, les méga-sécheresses sont définies comme des événements multidécennaux (Dai, 2011), faisant référence à des périodes longues et anormalement sèches, plus sévères que les sécheresses pluriannuelles enregistrées depuis les années 1880 avec le début de mesures météorologiques régulières (Williams et al, 2020).

Les méga-sécheresses historiques ont modifié la structure d'écosystèmes entiers (Hanson et al, 2009) voire ont conduit à leur destruction (Cohen et al, 2007). De tels événements peuvent être forcés par des facteurs multiples, voire simultanés : surface terrestre ou poussière d'aérosol (Cook et al, 2013), changements d'aridité à long terme et rétroactions (Cook et al, 2004), défaillances de la mousson (Meehl & Hu, 2006), forçage océanique et radiatif (Steiger et al, 2019) ou anomalies climatiques à long terme dues à l'ENSO (Cobb et al, 2003 ; Stahle, 2020).

La sécheresse des années 2010 dans le sud-ouest des États-Unis d'Amérique, signalé comme similaire à la méga-sécheresse dévastatrice dans cette région (Stahle, 2020). La gravité de cette récente sécheresse peut en partie être attribuée au changement climatique induit par l'homme (Diffenbaugh et al, 2015 ; Williams et al, 2020). Cela est également vrai pour de nombreux autres épisodes de sécheresse dans le passé récent (AghaKouchak et al, 2015 ; Boisier et al, 2016 ; Samaniego et al, 2018)

Les sécheresses se distinguent aussi par leurs aspects spatiales. Les zones affectées par une sécheresse sévère augmentent progressivement et les surfaces d'intensité maximale (les épices) se décalent d'une saison à une autre ou bien d'une année à une autre (WMO, 2011).

Cependant, le choix d'une caractéristique de sécheresse appropriée pour une recherche particulière sur la sécheresse dépend de l'hydro-climatologie dans la région sélectionnée, du type de sécheresse considéré, de la vulnérabilité de la nature dans cette région, but de l'étude et des informations accessibles pour l'évaluation de la sécheresse (Fleig et al. 2006).

I.2.5. Suivi, évaluation de la sécheresse et appui à l'alerte précoce: Etat de l'Art

Le suivi de la sécheresse est un élément essentiel des plans de préparation et d'atténuation de la sécheresse (Wilhite & Glantz, 1985). Cependant, l'une des difficultés d'évaluation de la sécheresse est liée aux méthodes de caractérisation et de quantification de la sécheresse, compte tenu des limites de la longueur des données historiques et de la couverture spatiale (Ault, 2020).

Les outils d'aide à la décision correspondants s'appuient sur des indicateurs et des indices pour quantifier les caractéristiques physiques de la sécheresse (intensité, durée et gravité) (Svoboda et al, 2002 ; Botterill & Hayes, 2012 ; Guo et al, 2019).

La communauté scientifique a analysé un certain nombre d'indices de sécheresse au cours des cinquante dernières années pour suivre et anticiper les épisodes sèches à différentes échelles de temps et spatiales et sa probabilité dans diverses régions du globe (Hayes et al, 2012). Lloyd-Hughes (2014) a dénombré plus de 100 indicateurs de sécheresse qui ont été développés pour différents types de sécheresse.

Même si les précipitations sont la pierre angulaire de nombreux indicateurs de sécheresse, la présence d'autres indicateurs est importante pour évaluer la gravité de la sécheresse. Idéalement, il faudrait essayer de surveiller les rivières et les cours d'eau, le stockage de l'eau, l'humidité du sol, l'évaporation, la production agricole et d'autres indicateurs qui pourraient être vitaux pour comprendre la disponibilité et l'utilisation de l'eau dans la zone d'étude (Yihdego et al, 2019). Pour de nombreuses régions, il peut ne pas être possible d'examiner chaque indicateur individuellement pour déterminer si une zone est confrontée à une sécheresse, principalement en raison de la qualité ainsi que la quantité des informations disponibles (Yihdego et al, 2019).

Cependant, il est plus acceptable d'examiner plusieurs indicateurs pour vérifier l'existence et la gravité de la sécheresse en traitant les enregistrements les plus longs, sans lacunes et fiables (Gocic & Trajkovic, 2014).

Le choix de tel indice ou indicateur et sa mise en application sont importants, car ils peuvent aboutir à des conclusions différentes, en particulier à la lumière des tendances et du changement climatique (Sheffield et al, 2012).

A mesure que les efforts visant à développer des indices de sécheresse se poursuivent, la connaissance des indices qui sont les meilleurs et les plus applicables dans une région devient essentielle pour établir un système d'alerte précoce à la sécheresse fonctionnel (WMO, 2011).

Puisque il n'existe pas d'une définition universelle de la sécheresse, donc il n'y a pas un seul indicateur ou d'indice qui correspond et convient aux différents types de sécheresse simultanément, tous les régimes climatiques et aux différents secteurs influencés et donc aucun indicateur de sécheresse ne peut servir, à lui seul, à déterminer les actions nécessaires face à

toutes les formes de ce phénomène, compte tenu de la diversité des secteurs affectés (Azmi et al, 2016). Il est possible de choisir des différents seuils pour analyser des valeurs d'entrée divers. Le plus adéquat est de définir, lors d'une analyse, quels indices ou indicateurs sont le plus adéquats au moment, à la région et au régime climatique et au type de sécheresse en cause (Steinemann et al, 2015).

Il existe principalement trois approches de suivre une sécheresse et de faire l'évaluation et l'alerte précoce (WMO & GWP, 2016): 1. un seul indice ou indicateur; 2. plusieurs indices ou indicateurs; 3. des indicateurs hybrides ou composites.

Auparavant, les scientifiques ont analysé un seul indice ou indicateur en absence d'autres éléments de mesure ou à cause de manque de temps pour l'obtention des series de données et le calcul des indices, mais de nombreuses études ont indiqué qu'aucun indice unique ne peut fonctionner correctement dans toutes les circonstances, et que la plupart des indices individuelles ne peuvent pas évaluer de manière exhaustive les conditions de la sécheresse d'un seul écosystème terrestre (WMO, 2012).

Il est observé, depuis une vingtaine d'années, un intérêt croissant vers d'indices de sécheresse dérivés à partir des indicateurs qui conviennent mieux pour diverses applications et échelles d'étude plus fiables et plus précises (Gocic & Trajkovic, 2014; AghaKouchak et al, 2015; Azmi et al, 2016). L'arrivée des systèmes d'information géographique (SIG) combinés à la cartographie ainsi que l'augmentation de la qualité d'affichage et la précision de calcul et des outils informatiques facilite l'analyse de plusieurs indicateurs à la fois (Darkwah et al, 2021).

Récemment, un nouveau type d'indicateurs dits composites (ou hybrides) donne la possibilité de regrouper plusieurs indices ou indicateurs, en utilisant ou non une pondération ou la modélisation (Svoboda, 2009). Le principe est de fusionner les avantages de différentes valeurs d'entrée tout en gardant une information simple et unique pour les usagers. Notant que l'analyse de l'intensité d'une sécheresse est plus fiable lorsqu'elle est basée sur multiples indicateurs du volume d'eau dans un espace donné, la méthode hybride permet d'impliquer plusieurs éléments dans le processus (Murthy et al, 2015).

Les informations spatio-temporelles détaillées sur la sécheresse sont limitées par la résolution spatiale relativement grossière pour représenter l'hétérogénéité spatiale. De plus, la précision des indices dépend fortement de la densité des réseaux de stations météorologiques (Beck et al,

2017), alors que les observations au sol sont peu réparties sur les régions tropicales et subtropicales en particulier (Harris et al, 2014). D'un autre côté, les produits de données pour les indices sont mis à jour avec une longue latence et fournissent souvent des séries chronologiques mensuelles avec, généralement, un décalage d'un an; ils ne peuvent donc pas remplir les délais requis pour l'évaluation mondiale de la sécheresse (Harris et al, 2014).

À l'échelle mondiale, la télédétection par satellite observe en permanence les processus de l'environnement de surface et les changements dans l'espace et le temps, fournissant diverses variables liées à la sécheresse, et devient un outil unique pour surveiller la disponibilité de l'eau en haute résolution spatio-temporelle avec une réponse instantanée (AghaKouchak et al, 2015), malgré qu'elle est parfois limitée par les conditions atmosphériques défavorables dues à la forte couverture nuageuse et à la concentration d'aérosols dans les régions tropicales et subtropicales (Reddington et al, 2017).

Selon Tsakiris et al (2007), l'utilisation d'indices de sécheresse est répandue alors qu'il existe de nombreuses méthodologies pour la caractérisation de la sécheresse. Notant que les caractéristiques de la sécheresse peuvent également être dérivées de séries chronologiques de variables hydrométéorologiques observées ou simulées en utilisant un niveau de seuil prédéfini (Van Loon, 2015). Lorsque la variable est inférieure à ce niveau, le site est en sécheresse. La durée, l'intensité et la fréquence de la sécheresse peuvent être facilement calculées. Cette approche est appelée « méthode du niveau de seuil » (Hisdal et al, 2004 ; Fleig et al, 2006).

I.2.6. Les indicateurs et les indices de la sécheresse

Les indicateurs sont des paramètres ou des variables météorologique, agricole, hydrologique ou socio-économique qui servent à fournir une indication sur les conditions de sécheresse (Hao & Singh, 2015). Les indices de la sécheresse sont souvent des représentations numériques de l'intensité d'un événement sec, que l'on estime à partir de données hydrométéorologiques, dont les indicateurs sous cités qui évaluent l'état qualitatif d'un événement sec une région et pour une période de temps déterminée. Ce sont eux aussi des indicateurs (Svoboda et al, 2016).

Les indices de sécheresse sont généralement calculés, soit en appliquant manuellement les équations et procédures correspondantes, ou à l'aide d'outils conçus à cet effet. De tels outils peuvent fonctionner dans le cadre d'autres logiciels (par ex. MATLAB, R-project, ArcGIS, etc.), ou en tant que logiciel autonome, incluant un ou plusieurs indices (par ex. Drinc).

Les déficits hydriques peuvent être évalués à travers les anomalies du bilan hydrique, et plusieurs indices standardisés ont été développés pour caractériser l'ampleur de la sécheresse (Ault, 2020). Par exemple, la sécheresse météorologique peut être quantifiée à l'aide de l'indice de précipitation standardisé (SPI) (McKee et al, 1993), largement utilisé sur une gamme d'échelles de temps (McKee et al, 1995). Le SPI a été développé par McKee et al. (1993), et décrit en détail par Edwards & McKee (1997). Le SPI est recommandé par l'OMM pour être utilisé par tous les services météorologiques ou hydrologiques nationaux (SMHN) du monde entier pour caractériser la sécheresse (WMO, 2012).

Plusieurs indices de sécheresse standardisés proviennent de l'indice de l'indice (SPI) comme l'indice standardisé d'évapotranspiration des précipitations (SPEI) et l'indice de reconnaissance de la sécheresse (RDI) (Vicente-Serrano et al, 2010 ; Guenang & Kamga, 2014).

Palmer (1965) a développé l'indice de la sévérité de la sécheresse de Palmer (PDSI); il a tenté d'incorporer le bilan hydrique dans une perspective régionale afin d'identifier les épisodes de sécheresses météorologiques et agricoles. Depuis lors, d'autres indices ont été développés sur la base du concept de prise de conscience plus récente des sécheresses.

D'un point de vue hydrologique, les indices peuvent inclure le ruissellement (indice de ruissellement standardisé, SRI) (Shukla & Wood, 2008), le débit dans les canaux (indice de débit standardisé, SSI) (Vicente-Serrano et al, 2012), les niveaux des eaux souterraines, ou volumes de stockage dans les réservoirs (Nalbantis & Tsakiris, 2009). De même, la sécheresse a été surveillée dans les systèmes agricoles/écologiques en étudiant les impacts sur la végétation à l'aide de l'indice de végétation standardisé (SVI) (Peters et al, 2002), qui utilise l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) comme indicateur de la santé de la végétation, ou par l'indice standardisé d'humidité du sol (SSMI) (Sohrabi et al., 2015).

Plus récemment, en collaboration avec le Partenariat mondial pour l'eau (GWP), l'OMM a publié le manuel des indices de la sécheresse en mettant l'accent sur la définition et la méthodologie des indices de sécheresse appliqués à l'échelle mondiale aux analyses météorologiques, agricoles et hydrologiques qui visent à soutenir les régions et les pays des pays en développement (OMM & GWP, 2016). (annexe I).

Ces dernières années, de nombreux indices de sécheresse basés sur des données satellitaires ont été proposés en utilisant des variables / indicateurs individuels ou multiples, tels que l'indice

de sécheresse multibande normalisé (NMDI) (Wang & Qu, 2007), l'indice de sécheresse d'intégration des micro-ondes (MIDI) (Zhang & Jia, 2013), l'indice d'optimisation de la sécheresse météorologique (OMDI) (Hao et al, 2015). Ces indices de sécheresse basés sur de multiples variables sont plus robustes, avec des informations intégrées provenant de différents aspects liés à la sécheresse tels que les précipitations, la température de surface du sol, l'humidité du sol, l'évapotranspiration et la productivité de la végétation (Zhang et al, 2017).

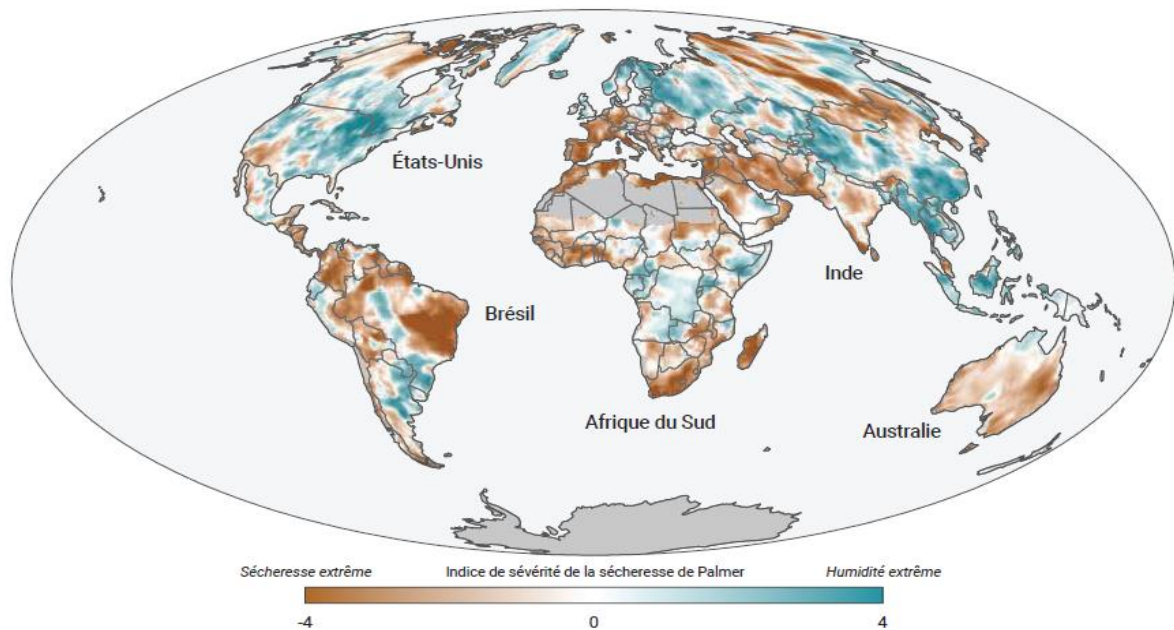


Figure I.2. conditions mondiales de sécheresse en 2017 en basant sur l'indice PDSI
Source : Scott et Lindsey (2018) , basée sur Blunden et al. (2018, fig. 2.32, p. S37).

Note : Les conditions d'humidité apparaissent en nuances de bleu vert ; Les conditions de sécheresse apparaissent en nuances de marron, et. Plus la couleur devient sombre, plus les conditions (humidité ou sécheresse) sont intenses, alors les conditions relativement normales s'approchent du blanc.

I.3. Conclusion

La sécheresse affecte plus de population par rapport à n'importe quelle autre événement naturel violent et coûte cher sur le plan socio-economique et environnemental. Compte tenu de la fréquence de ce phénomène et de l'ampleur de ses effets dans plusieurs régions du globe et que la vulnérabilité des sociétés s'est accrue, les décideurs devraient attacher plus d'importance à la gestion de la sécheresse par des mesures anticipatifs plutôt que réactifs basées sur l'évaluation des risques. La modernisation des systèmes de suivi de ce phénomène est parmi les éléments clés de ces stratégies ainsi que l'optimisation des politiques nationales en la matière. La mise en place des systèmes d'alerte efficaces peuvent fournir aux dirigeants en temps utile des informations efficaces pour procéder à des actions d'atténuation appropriées face à cet aléa.

II.1. La sécheresse et le changement climatique

La sécheresse peut survenir en raison de plusieurs facteurs atmosphériques différents. Les cycles de circulation atmosphérique/océanique impactent fortement le développement des conditions sèches/humides, conduisant à une variabilité climatique interannuelle /interdécennale (Vicente-Serrano et al, 2011). Quelques exemples de ceci sont El Niño - oscillation australe (ENSO), l'oscillation décennale du Pacifique (ODP) ou le dipôle de l'océan Indien (DOI), qui provoquent tous une oscillation des températures de surface de l'océan (Mantua & Hare, 2002 ; Xiao et al, 2015). D'autres processus, comme la dorsale subtropicale (STR) ou l'oscillation nord-atlantique (NAO), sont principalement régis par les conditions atmosphériques qui affectent la pression atmosphérique au niveau de la mer (Hurrell et al, 2003 ; Grose et al, 2015). Tous ces cycles ont un impact important sur les conditions météorologiques à différentes échelles de temps.

Dans le contexte du changement climatique, la sécheresse est l'évènement le plus silencieux et le moins impressionnant dont l'enjeu sociétal est énorme. Donc, la sécheresse peut ne pas être considérée comme purement «des risques naturels» car l'homme a modifié les caractéristiques de la sécheresse (Van Loon et al, 2016 ; Tang et al, 2020).

Les gaz à effet de serre sont à l'origine des conditions de réchauffement et d'assèchement de la région, entraînant une augmentation des méga-sécheresses dans le monde (Leng et al, 2015 ; Ault et al, 2016). Selon un rapport du groupe de la Banque Mondiale (2019), ces sécheresses en répétition ont des conséquences extrêmement importantes souvent invisibles et engendrent une « misère au ralenti », avec des effets plus durables et plus profonds qu'on ne le pensait auparavant (Damania et al, 2017).

Blenkinsop et Fowler (2007) ont évalué les effets du changement climatique sur les caractéristiques de la sécheresse et ils ont signalé que les sécheresses estivales à court terme devraient augmenter tandis que les sécheresses à long terme deviendront moins sévères. Des études approfondies (Salas et al, 2005; Santos et al, 2011 ; Jehanzaib et al, 2019 ; Mortuza et al, 2019 ; Jehanzaib et al, 2020) se sont concentrées sur des analyses pour l'évaluation des risques de sécheresse due au changement climatique.

Cependant, la multitude de facteurs contribuant à une sécheresse signifie qu'il est difficile d'identifier le signal parfois subtil du changement climatique. Pour cela, le cinquième rapport d'évaluation élaboré par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

CHAPITRE II : La sécheresse dans le contexte du changement climatique

(GIEC) en 2013 (IPCC, 2013) a montré qu'il y avait peu de certitude que toute tendance à la sécheresse pouvait être liée au réchauffement climatique. Depuis lors, la science de l'attribution et de la détection soignée d'identifier les modifications du climat et leurs causes a fortement progressé.

Actuellement, il y a certaines zones qui ont des risques plus importants de sécheresse en termes de fréquence et d'intensité que l'on remarque déjà. C'est le cas par exemple dans tout le bassin méditerranéen, l'Asie de l'Ouest, de nombreuses parties de l'Amérique du Sud, une grande part de l'Afrique, et l'Asie du Nord-Est (Cook et al, 2016 ; Gudmundsson et al, 2017 ; IPCC, 2018). Dans ces régions, le réchauffement climatique a engendré des épisodes de sécheresses plus importantes et plus fréquentes qu'auparavant.

D'autres études ont observé dans de nombreuses régions, une évolution des occurrences de la sécheresse hydrologique, essentiellement pour les eaux de surface et souterraines (Hirabayashi et al, 2008 ; Feyen & Dankers, 2009 ; Schewe et al, 2014 ; Parry et al, 2016 ; Apurv et al, 2017).

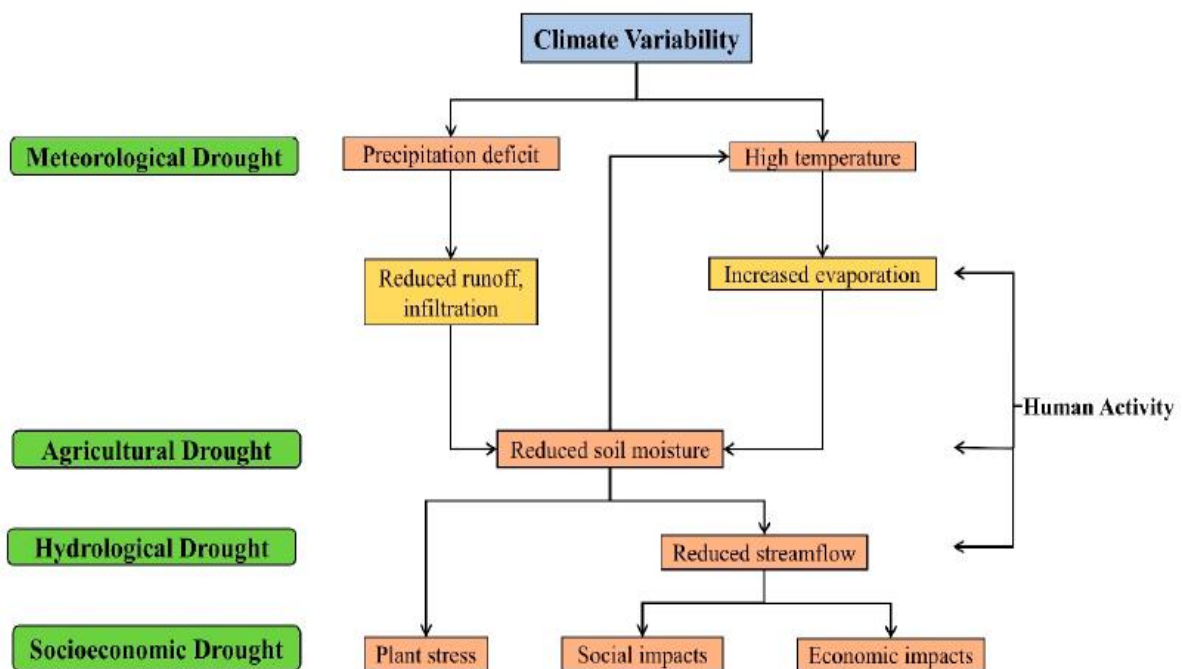


Figure II.1 : Influence de la variabilité climatique sur la relation entre les variables du cycle hydrologique et les différents types de sécheresse ; source : (Kim & Jehanzaib, 2020)

Le rapport spécial sur le changement climatique et la terre (IPCC, 2019), résume les faits concernant la sécheresse dont on cite :

- À l'échelle mondiale, les régions touchées par la sécheresse augmentent d'une année à l'autre et les occurrences de sécheresse s'aggravent et deviennent plus fréquentes.

- Le bassin méditerranéen est en proie à une possible aggravation de la sécheresse.
- Les sécheresses clairement associées au dérèglement climatique sont celles survenant en Afrique australe, dans l'ouest de l'Amazonie, dans le sud de l'Europe et en Méditerranée (y compris en Afrique du Nord), ainsi que dans certaines régions d'Amérique du Nord, de l'Inde, de la Russie et de l'Australie.

Des études récentes ont confirmé cette différence régionale dans le signal de changement climatique pour les sécheresses météorologiques et les incertitudes associées (par exemple, Ficklin et al, 2016 ; Berg & Sheffield, 2018 ; Cook et al, 2018). À l'échelle mondiale ou continentale, des températures plus élevées et les augmentations connexes de l'évapotranspiration sont le principal moteur des changements dans les sécheresses météorologiques et d'humidité du sol (Manning et al, 2019). La réduction connexe de l'accumulation de neige est un facteur supplémentaire de sécheresse hydrologique (Hayhoe et al, 2007 ; Livneh & Badger, 2020).

II.2. A Quoi s'attendre en suivant la courbe de réchauffement ?

Le changement climatique peut entraîner une augmentation de la température, une modification des régimes de précipitations, une augmentation du volume d'évaporation et des variations temporelles et spatiales du ruissellement, qui peuvent modifier le cycle de l'eau ainsi que les processus hydrologiques à l'avenir (Dai, 2011 ; UNFCCC, 2015).

Le risque de futures sécheresses devrait connaître une augmentation mondiale plus forte au XXI^e siècle que dans le passé récent (Cook et al, 2014 ; Zhao & Dai, 2015). À mesure que le monde se réchauffera continuellement, le rôle de la température deviendra essentiel pour les projections de sécheresse (Ahmadalipour et al, 2017), en particulier dans les régions où les tendances futures à la sécheresse sont variables dans l'espace, par exemple en Europe (Spinoni et al, 2018) et aux États-Unis d'Amérique (Jeong et al, 2014).

Récemment, l'intérêt pour la modification du cycle de l'eau en réponse à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES) a été basé sur le concept le plus réaliste de réchauffement climatique dérivé de l'Accord de Paris de 2015 (par exemple, des objectifs de réchauffement climatique de 1,5 et 2,0 °C). La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) signée par 162 gouvernements est parvenue à un accord sur l'objectif de réchauffement climatique, qui est la limitation pour éviter des conséquences désastreuses (UNFCCC, 2015).

Cet accord vise à maintenir une augmentation de la température moyenne mondiale en dessous de 2,0 °C au-dessus des niveaux préindustriels (PI) et à tenter de maintenir l'augmentation à 1,5 °C au-dessus des niveaux PI. Par conséquent, les études actuelles ont tenté d'examiner les avantages d'une élévation supplémentaire de la température moyenne de 0,5 °C sur la base des schémas de changement simulés sous des augmentations de température globale de 1,5 et 2,0 °C (IPCC, 2018).

De nombreuses études montrent des impacts significatifs d'un réchauffement de 0,5 °C sur la sécheresse (Naumann et al, 2018 ; Su et al, 2018 ; Chen & Sun, 2019). Les résultats indiquent la nécessité de comprendre les impacts du réchauffement climatique sur la sécheresse et la nécessité de trouver des contre-mesures pour réduire les dommages potentiels qui peuvent être induits sous 1,5 et 2,0 °C de réchauffement climatique. La recherche actuelle sur la sécheresse se concentre principalement sur les schémas de changement de la sécheresse dans le cadre du réchauffement climatique. À ce jour, les caractéristiques climatiques intrinsèques de chaque sous-région (par exemple, les zones climatiques) ont relativement peu d'attention dans les futures analyses de la sécheresse (Kim et al, 2020).

Des études ont montré qu'en la région Méditerranéenne et en Afrique du Sud les conséquences ne seraient pas les mêmes entre 1,5 et 2°C (Hoegh-Guldberg et al, 2018). En Méditerranée, une température de 0,5°C de plus pourrait induire des impacts majeurs, en particulier sur la végétation (Guiot & Cramer, 2015).

Carrão et al. (2018) ont cartographié les effets du changement climatique sur les modèles mondiaux de risque de sécheresse pour la première moitié du siècle (2021-2050) et la fin du siècle (2071-2099) selon trois trajectoires de changement climatique, appelées voies de concentration représentatives (RCP)1 (RCP2.6 , RCP4.5 et RCP8.5). Bien que les résultats du modèle ne montrent pas de changements robustes ou significatifs à court terme, le risque de sécheresse augmente dans les trois RCP vers la fin du XXIe siècle, notamment pour le RCP à fort forçage radiatif (RCP8.5).

Spinoni et al. (2020) ont analysé les changements prévus de la gravité et de la fréquence de la sécheresse jusqu'en 2100 à l'aide de l'indice SPI et de SPEI, sur la base d'une combinaison de différents modèles de circulation. Ils ont montré qu'au XXIe siècle, et par rapport à la période de référence 1981-2010, le risque global de sécheresse est susceptible d'augmenter en confirmant les tendances identifiées par Carrão et al. (2018).

CHAPITRE II : La sécheresse dans le contexte du changement climatique

Les pays méditerranéens d'Afrique et d'Europe, du sud-ouest des États-Unis, de l'Amérique centrale, et des régions subtropicales de l'hémisphère sud sont les plus susceptibles d'être touchés. Notons que ces projections sont entachées d'incertitudes importantes qui tiennent à la fois aux choix socio-économiques qui seront faits dans les années à venir et aux caractéristiques des systèmes naturels, qui ne sont pas entièrement prévisibles (Le Treut, 2003).

Les cartes ci-dessous offrent des exemples de simulation d'évolution du changement climatique sous un scénario de fort réchauffement («RCP8.5») appliquant 17 modèles climatiques. Ils indiquent la variation en pourcentage projetée entre 1976-2005 et 2070-99 des précipitations annuelles (en haut à gauche), des précipitations estivales (en haut à droite), du ruissellement, de l'humidité totale du sol de la colonne d'été (en bas à droite) et de l'humidité du sol en été pour une profondeur de 10 cm supérieurs (en bas à gauche). La couleur de l'ombrage signifie si une région est susceptible de devenir plus humide ou plus sèche.

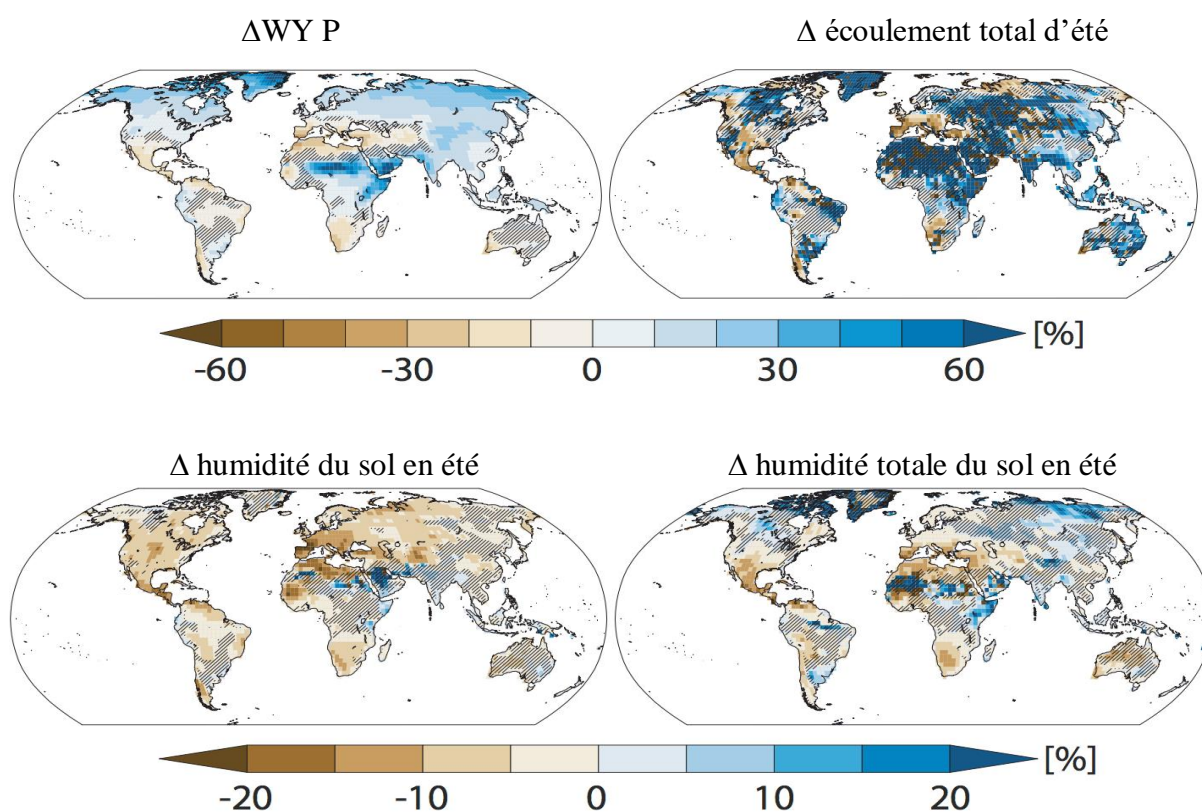


Figure II.2 : cartes de projection de changement de quelques variables selon des simulations sous un scénario de fort réchauffement («RCP8.5») modifiées de Cook et al. (2018). à partir du coin supérieur gauche, déplacement dans le sens des aiguilles d'une montre : précipitations annuelles (WY; septembre-octobre dans l'hémisphère nord et juin-juillet l'hémisphère sud) (P), été (juin-juillet-août pour l'hémisphère nord; décembre-janvier- Février pour la partie sud) ruissellement total, humidité du sol en pleine colonne d'été et humidité près de la surface (0,1 m)

II.3. Les indices de sécheresse dans un climat changeant

Dans le cadre de l'augmentation des températures et de l'incertitude quant à la quantité et à la distribution des précipitations, les changements d'intensité, de durée et de fréquence des sécheresses sont susceptibles d'augmenter dans de nombreux endroits (Easterling et al, 2000; Meehl et al, 2007; Fuchs et al, 2014; Escalante-Sanboval & Nunez-Garcia, 2016). Avec ces connaissances en main, il est important de reconnaître la valeur des indices de sécheresse qui incluent une composante de température, car le bilan hydrique d'une zone ne dépendrait pas uniquement des précipitations. L'utilisation d'approches telles que la méthodologie suggérée par le système Américain de la surveillance de la sécheresse en considérant tous les indicateurs disponibles permet également la flexibilité de mettre en œuvre davantage d'indicateurs basés sur la température.

Au fil du temps, il y a eu de nombreuses approches pour identifier, classer et suivre les sécheresses. Une étude récente de Vazifekhah & Kahya (2018) a utilisé l'oscillation nord-atlantique (NAO) et l'oscillation arctique (AO) ainsi que l'indice de flux standardisé (SSFI) sur la Turquie et le nord de l'Iran et a conclu que l'effet de chaque phase extrême permanente et négative de NAO et AO pourraient affecter une sécheresse hydrologique plus forte mais dans une période plus courte par rapport à une période plus longue affectée par la phase positive de NAO et AO. Par conséquent, à mesure que les conditions climatiques du monde changent, certaines de ces approches peuvent ne pas fonctionner sous de nouveaux régimes climatiques et la communauté scientifique doit continuer à examiner de nouvelles approches pour saisir les changements observés. Cependant, les indicateurs et les indices resteront une composante vitale de tout système d'alerte précoce à la sécheresse.

L'indice de sécheresse basé sur la fusion de données (DFDI) a été développé et sa performance a été analysée pour trois endroits différents en Australie (Azmi et al, 2016). Le DFDI considère globalement tous les types de sécheresse à travers une sélection d'indices associés à chaque type de sécheresse. Cet indice a été utilisé pour surveiller les conditions de stress hydrique des écosystèmes terrestres en liant objectivement la disponibilité de l'eau et les conditions de la végétation. La méthodologie combinée utilise des méthodes statistiques avancées et les caractéristiques éco-météorologiques d'une zone pour déterminer les conditions de stress hydrique ultimes à chaque pas de temps. La validité de la nouvelle approche DFDI pour généraliser une gamme d'indices de sécheresse a été testée pour trois zones d'étude, chacune avec différentes combinaisons d'utilisation des terres et de régimes climatiques (Azmi et al,

2016). Des études supplémentaires sur la manière de combiner et d'agrèger des différents indices sont nécessaires pour une meilleure prise de décision dans la gestion des ressources en eau, en particulier dans les scénarios de changement climatique.

II.4. Défis et opportunités pour mieux agir

L'interaction entre le cycle hydrologique et le changement climatique est difficile à mesurer à cause de l'impact des activités humaines et des ressources d'eau (mers/océan et nappes souterraines) qui mentionne les effets futurs attendus du changement climatique à long terme. Pour éviter que notre système climatique ne s'emballe pas avec des conséquences dramatiques pour l'humanité, selon un rapport du GIEC publiée le 8 octobre 2018, le réchauffement planétaire devrait être limité à un seuil de +1,5 °C au maximum (d'ici 2100 par rapport à 1850).

Les projections climatiques peuvent offrir des informations importantes sur l'évolution du climat d'une région, ce qui permet qu'il devient possible de prévenir les effets négatifs potentiels du changement climatique tout en renforçant un développement résilient au climat et en réduisant les émissions à effet de serres. Il existe plusieurs méthodes qui peuvent produire des scénarios admissibles. Certaines d'entre eux donnent des résultats à faible résolution (ou grossiers), alors que d'autres présentent des résultats à haute résolution (p. ex. les méthodes de réduction d'échelle).

Si l'avenir soit fortement sec alors que pour des cas présents se pose des défis majeurs pour la gestion intégrée des ressources hydriques d'une région donnée, il y a de l'autre côté, des opportunités substantielles à saisir pour diminuer les pires conséquences. Celles-ci incluent des stratégies pour optimiser l'usage de l'eau par la coopération des parties prenantes, l'exploitation rationnelle du surplus durant les périodes humides (qui s'enregistrent encore, même en cas des scénarios les plus secs) et les effets positifs évidents de la diminution des émissions à effet de serre pour réduire l'impact du réchauffement climatique et limiter les risques de cet aléa dans de vastes surfaces.

Quoique que les travaux sur la complexité du système physique climatique ne puissent pas produire de suggestions pour une telle politique ou une autre, elles mettent en exergue les défis à gérer dans un monde qui sera plus chaud et plus sec dans de nombreuses régions, que tout ce que l'humanité a vécu dans les 200 dernières années.

En somme, il va falloir susciter des mesures durables pour réduire les pressions exercée sur nos ressources en eau.

III.1. Introduction

Il est crucial de comprendre que les sécheresses récurrentes s'aggravent dans un climat changeant. Des interventions politiques adaptatives doivent être promues pour prévenir les sécheresses, se préparer et répondre aux sécheresses lorsqu'elles se produisent (UNESCAP, 2020). Il devient nécessaire donc de développer des systèmes d'alerte précoce qui utilisent efficacement à la fois les prévisions climatiques et les observations de la Terre (Mo et al, 2012 ; Mariotti et al, 2013; Shukla et al, 2013 ; Funk & Hoell, 2017 ; Funk & Shukla, 2020).

Les conditions météorologiques imprévisibles résultant du changement climatique, telles que la survenue de sécheresses de plus en plus graves, rendent cette technologie importante pour les efforts d'adaptation aux changements climatiques dans de nombreux pays (CTCN, 2017).

Les progrès technologiques de la télédétection renforcent le succès de ces systèmes d'aide à la décision et les sécheresses peuvent être surveillées à l'échelle régionale et continentale.

III.2. Qu'est-ce qu'un système d'alerte précoce à la sécheresse (SAPS)?

C'est un outil perfectionné de collecte, d'analyse et de synthèse de différentes informations sur les indicateurs appropriés de la sécheresse dans le but de fournir un avertissement, en temps opportun, sur un risque d'un événement de sécheresse pour stimuler les réponses appropriées afin d'améliorer la préparation et de réduire les risques associés aux pertes liées à cet aléa climatique (Wilhite, 1993).

Il est créé de manière à pouvoir surveiller l'évolution du régime climatique et de l'approvisionnement en eau et, donc, à pouvoir détecter le début et la fin de la sécheresse, son moment d'occurrence et son extension spatiale (OMM, 2006). Il doit donc, fournir une surveillance efficace de la sécheresse afin de déclencher des actions systématiques et efficaces permettant de faire face à la crise à mesure que la sécheresse s'intensifie (OSS, 2013).

III.3. Caractéristiques du Système d'alerte précoce à la sécheresse

les sécheresses sont particulièrement bien adaptées aux systèmes d'alerte précoce car ces phénomènes se déclenchent lentement en donnant suffisamment de temps aux décideurs pour atténuer les menaces de sécheresse. Un tel système d'alerte devrait idéalement baser sur les aspects suivants (OSS, 2013) :

- . L'information météorologique ;
- . La disponibilité des ressources en eau ;
- . L'information agronomique ;

- . Les estimations des rendements ;
- . L'évolution des prix des produits alimentaires ;
- . La vulnérabilité.

Les aspects physiques de ce système devraient pouvoir offrir des informations sur : l'étendue spatiale de cet aléa, sa durée, la sévérité de la sécheresse, le temps mis en relation avec les actions agricoles et les mesures de prévention et d'atténuation des impacts de la sécheresse (UNISDR, 2015 ; Windhoek Declaration, 2016).

III.4. Le fonctionnement des systèmes d'alerte précoce

Ces types de systèmes ne sont pas simplement une alerte par l'émission d'un message transmis sur un phénomène en propagation au moment opportun (WMO, 2006), mais un outil complexe doté d'échanges d'informations en permanent et d'interactions dynamiques (Arnold & Wade, 2015). Selon Cools et al (2016), La conception d'un système d'alerte précoce repose sur quatre éléments 1) connaissance (identification) du risque ; 2) suivi, prévision et alerte d'avertissement ; 3) communication et diffusion et 4) capacité de réponse.

III.4.1. La connaissance du risque

La sécheresse reste un risque caché difficile à calculer de la même manière que les risques associés à d'autres aléas, vu qu'il porte sur des secteurs divers, telles que l'eau, l'agriculture, où il se développe constamment en fonction du temps et d'un espace à l'autre (UNISDR, 2011).

Cependant, il peut être défini comme la probabilité d'impact négatif causé par les interactions de la vulnérabilité (probabilité de la population affectés par les sécheresses dans une région) (V) et du Hasard (H) (probabilité que des sécheresses futures se produisent en fonction du passé, et des projections de conditions de sécheresse).

Le risque de sécheresse peut être calculé comme suit (CTCN, 2017) :

$$\text{Risque} = \text{Vulnérabilité (V)} * \text{Hasard (H)}$$

La connaissance du risque de ce phénomène naturel regroupe donc 1) la collecte de données climatiques et de danger et 2) l'analyse des facteurs de vulnérabilité/résilience à l'aide de différents indicateurs.

Cette mission est achevée par des établissements spécifiques afin de fournir aux gouvernements, au large public et à la communauté internationale, les informations nécessaires (Neussner, 2015).

III.4.2. Suivi, prévision et alerte

Le deuxième élément clé est basé sur le suivi du phénomène, sa prévision ainsi que le service d'avertissement. Il s'agit donc de caractériser un événement de la sécheresse dans une région donnée, de définir les outils de son suivi et de prévision ainsi que les informations qui seront communiqués à travers le ce système d'alerte.

Le terme « suivi » est légitime une fois que le processus d'obtention et validation des connaissances du risque de la sécheresse et les critères d'alerte sont choisis (Intrieri et al, 2013), dont l'outil de surveillance passe de la recherche à l'état opérationnel.

La multiplicité des indices de sécheresse montre que son suivi est une opération transversale ne concerne pas nécessairement ou seulement le service hydrométéologique, mais liée aussi aux autres services (FAO, 2016). En conséquence, les organismes publics et/ou privés, sont appelés pour prendre par à la collecte des informations relatives à la sécheresse.

Par ailleurs, la prévision de la sécheresse est cruciale pour la mise en œuvre des politiques appropriées visant de diminuer son intensité et gérer ses impacts par l'alerte précoce et la préparation à des éventuelles sécheresses. La complexité du climat de la terre rend les prévisions de sécheresse très difficiles (Wood et al, 2015).

Selon l'OMM (2007), les informations et les prévisions climatiques peuvent couvrir des différentes échelles du temps : à court terme (quelques jours), à moyen terme (d'une semaine à un mois) ou à long terme (plus d'un mois). Ces renseignements climatiques incluent également des projections et des scénarios (décennie et plus).

Un service d'avertissement permet de suivre en continu son évolution, d'alerter les usagers. Des outils technologiques sont utilisés pour rendre ces alertes publiables et acheminées à l'ensemble des composantes du système, lors de la diffusion, certains chemins spécifiques doivent être sélectionnés pour transmettre une alerte homogène (Baudoin et al, 2014).

III.4.3. Communication et diffusion de l'alerte

Une fois détectée, une alerte sur la sécheresse va être communiquée et diffusée aux usagers, soit les personnes à risque et les professionnels en charge des décisions (Neussner, 2015 ; Andersson et al, 2019). Le réseau de communication de l'alerte touche tous les paliers communautaire, régionale, nationale et internationale de gouvernance, alors que le message diffusé doit atteindre rapidement tous les concernés (Taylor et al, 2018).

CHAPITRE III : Principes d'un Système d'Alerte Précoce à la sécheresse

Les progrès réalisés en matière de télécommunication permettent de diffuser une alerte entendue depuis n'importe quel site. Cependant, des alertes intelligibles en temps opportun doivent parvenir aux personnes en danger. Pour que les concernés puissent comprendre les messages d'alertes, ceux-ci doivent contenir des renseignements claires qui portent des réponses appropriées (García, 2012).

III.3.4. La capacité de réponse

Elle assure que l'alerte soit bien reçue et qu'une réponse appropriée doit être placée. La réponse face à une telle alerte précoce à une sécheresse peut impliquer le savoir local (Alessa et al, 2015) à travers des stratégies adéquates qui rendent la population résiliente (Baudoin et al, 2014; Quenault, 2015).

La connaissance, et le respect des différences sociales et de genre peuvent perfectionner la réponse. Une telle réponse appropriée doit se baser sur la diffusion des connaissances sur le risque, notant que la formation, ainsi que la promotion des femmes en tant qu'agents clés du changement est une mesure indispensable (OMM, 2018). La figure (III.1) présente un schéma conceptuel du système d'alerte précoce opérationnel.

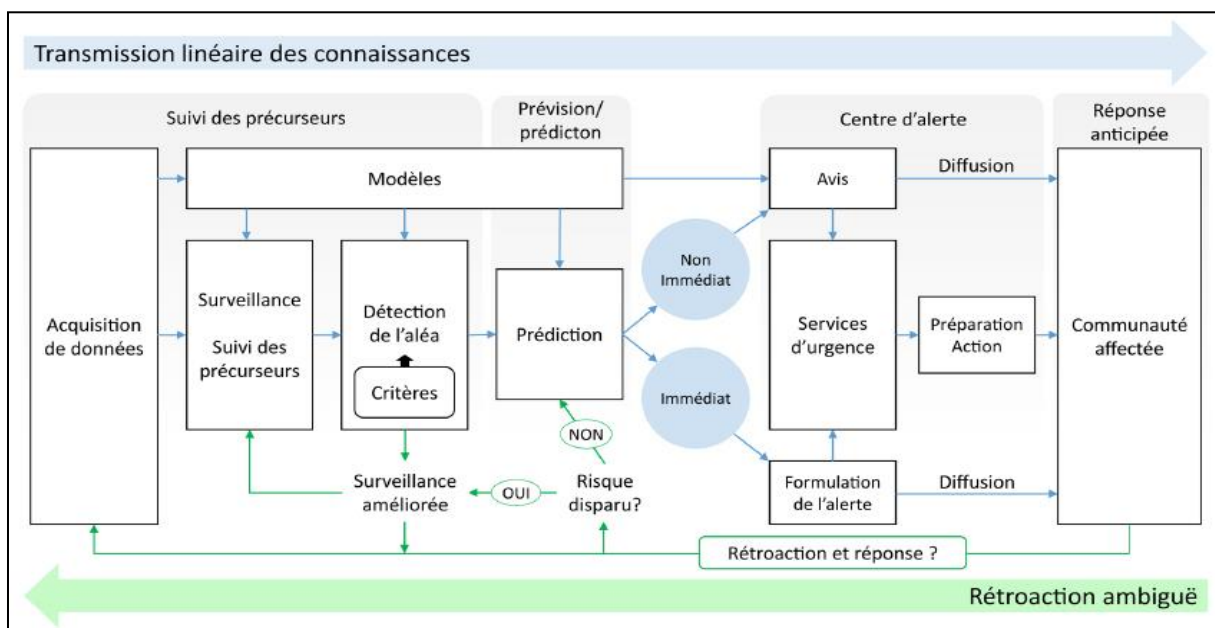


Figure III.1 : Schéma conceptuel du système opérationnel d'alerte précoce. Adapté par Foster (1980), Zillman (2003), et Villagran de León et al. (2006)

III.5. contraintes à l'efficacité des SAPS ou Facteurs de vulnérabilité

Il existe plusieurs facteurs qui limitent les capacités actuelles des SAPS et l'application des données dans la préparation et la réponse à la sécheresse à l'échelle mondiale (GWP, 2018). Celles-ci comprennent selon (Roger et al, 2014) :

- des caractéristiques particulières de ce phénomène et l'incertitude sur les changements climatiques à l'échelle locale ce qui accentue la complexité des processus décisionnels et la diversité des réponses entre les régions ;
- une densité et une qualité inadéquate des données météorologiques et hydrologiques (manque des données ou une courte durée des relevés) et le manque de réseaux de collecte sur tous les principaux paramètres climatiques et d'approvisionnement en eau ;
- le partage inadéquat de données entre les institutions de recherche et les organismes publics, et le coût cher d'acquisition des données rendre leur application limitée dans le suivi de la sécheresse et les mesures d'intervention pour l'atténuation de ses effets ;
- Les indices ou indicateurs de sécheresse ne donnent pas l'occasion chaque fois de trouver le début et la fin des occurrences de sécheresse, bien que l'indice de précipitation normalisé (SPI) a été cité comme un outil de suivi important.
- Les renseignements diffusés par l'intermédiaire des SAPS sont souvent techniquement trop détaillées alors que les usagers ne sont pas formés à l'application de ces informations pour la prise de décision (Pulwarty, 2007).
- Il n'existe pas de méthodes normalisées d'analyse des événements secs ; un élément primordial des systèmes de suivi et d'alerte précoce à la sécheresse, en rendant les prévisions souvent peu fiables à l'échelle saisonnière et manquant de spécificité, et restreint une mise en place des actions d'intervention adéquats à chaque région ;
- Les outils de diffusion des informations aux usagers (en temps voulu) ne sont pas toujours au point, ce qui réduit leur efficacité. Alors que la science, les ressources et les techniques sont assez bien développées pour soutenir ces systèmes, il faut faire plus pour développer ces capacités dans les pays en développement (Tadesse, 2016)

III.5. Suivi de la sécheresse et le Système d'Alerte Précoce à la Sécheresse

De nombreux pays ont mis au point des SAPS capables d'intégrer des informations provenant de diverses sources et de fournir des alertes sur le début imminent de la sécheresse dans une région ou pays (Pulwarty & Sivakumar, 2014 ; WMO & GWP, 2014). Les efforts axés sur les alertes précoces de sécheresse se poursuivent dans des pays comme les Etats Unis, l'Europe, la Chine, l'Inde, le Brésil et l'Afrique du Sud (Roger et al, 2014).

Les trois exemples qui suivent illustrent certains efforts déployés et les démarches adoptées dans les pays pour gérer la sécheresse.

a) Etats-Unis:

Opérationnel depuis 1999, cet outil Américain de surveillance de la sécheresse (United States Drought Monitor – USDM) est une cartographie hebdomadaire des conditions de sécheresse aux États-Unis. L'USDM produit et diffuse une synthèse des renseignements émanant de multiple paramètres (indices et indicateurs climatiques, hydrologiques et agronomiques) pour analyser la gravité de la sécheresse et son étendue spatiale aux États-Unis ainsi que l'échelle de temps des impacts associés.

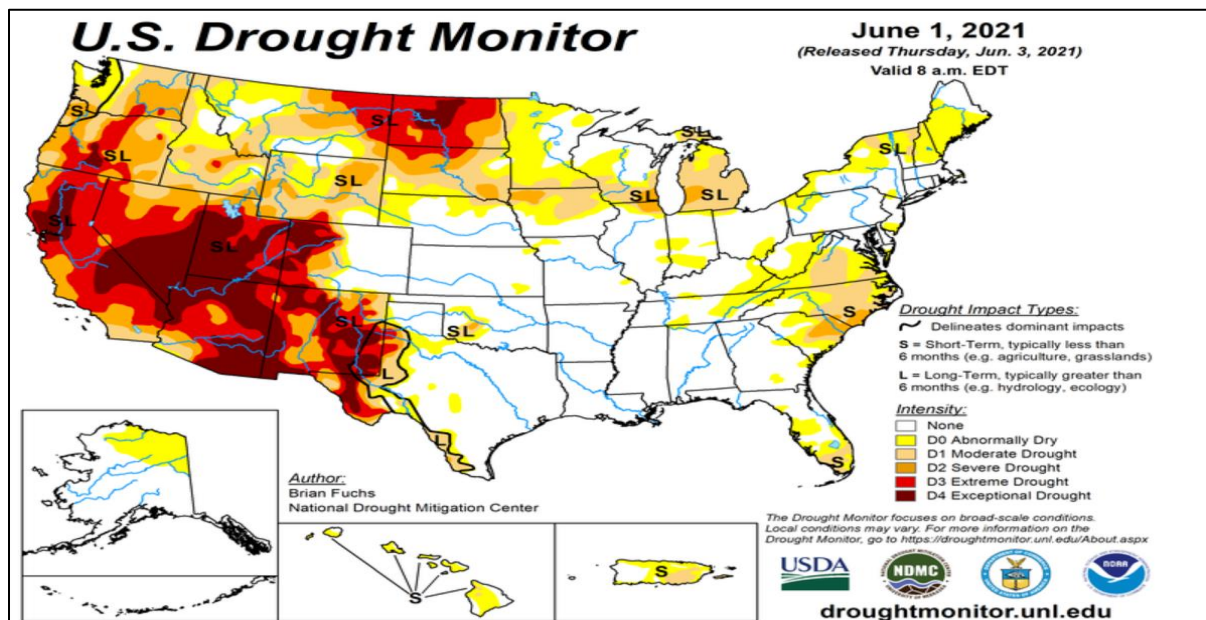


Figure III.2 : Espace touché et intensité des conditions de sécheresse en Amérique en Juin 2021, selon USDM. (Source: <http://www.drought.unl.edu/dm>)

Cet outil clair, simple et précis est largement utilisé aux Etats-Unis par les gestionnaires des ressources naturelles, agences d'assurance, agriculteurs,...Il est hébergé sur le site Web du

CHAPITRE III : Principes d'un Système d'Alerte Précoce à la sécheresse

NDMC (<http://www.droughtmonitor.unl.edu>), qui est désormais un portail Web pour la surveillance de la sécheresse et de l'approvisionnement en eau.

b) Chine :

La Chine a mis au point un système de suivi et de gestion du risque de sécheresse correspondant aux conditions nationales. Ce système intègre trois éléments centraux : 1) la réponse d'urgence ; 2) la garantie d'urgence et 3) l'assistance en urgence, et c'est le Centre climatologique de Beijing qui est responsable d'analyse et de suivre l'évolution de la sécheresse (Rapport sur la diminution du risque de sécheresse en Chine, Commission de rédaction, 2009). De 1995 à 1999, ce centre s'est basé sur l'indice SPI pour suivre le début et l'évolution de cet aléa en Chine à un intervalle de dix jours, puis mis en exploitation sur une base journalière en 1999: il donne donc aux structures publiques ainsi qu'au large public des informations fiables sur ce risque qui aident à procéder aux actions cherchant à en atténuer les conséquences;

Les renseignements sur la gravité de la sécheresse dans différentes régions du pays figurent dans des bulletins publiés à intervalles variables et qui sont diffusés auprès des services gouvernementaux (Yuan et al, 2016).

Des cartes quotidiennes et des communiqués hebdomadaires de suivi de la sécheresse sont présentés depuis février 2003 sur le site Web (<http://bcc.cma.gov.cn/en>).

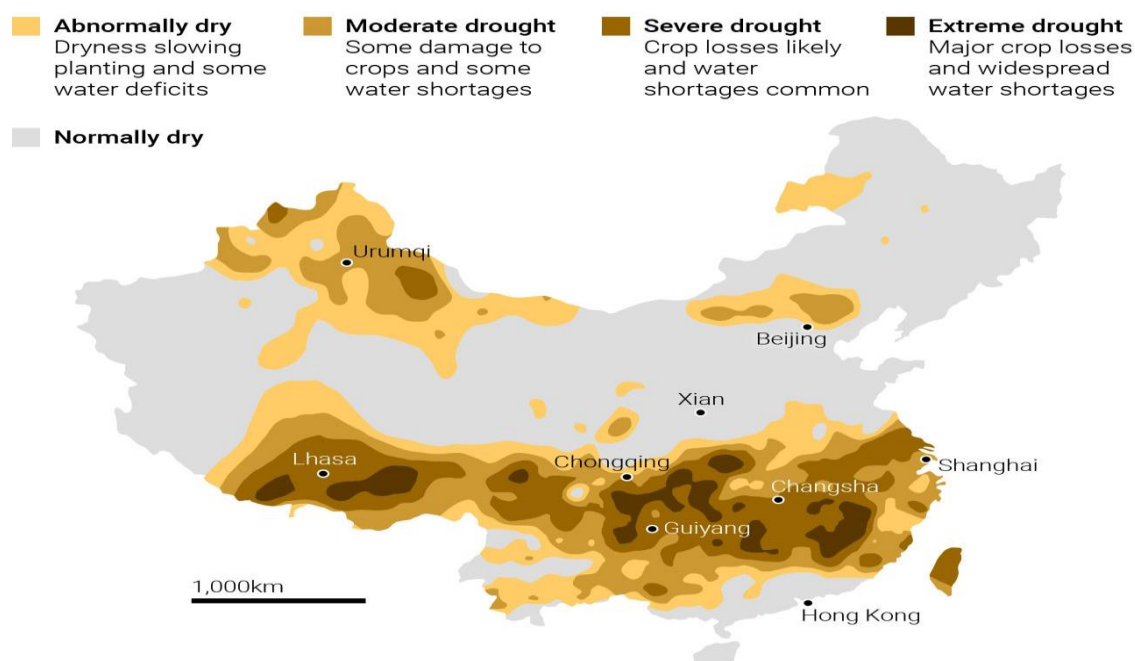


Figure III.3 : carte de produits de suivi de la sécheresse en chine (Août, 2022) (source : <http://bcc.cma.gov.cn/en>)

C) Europe :

L'observatoire européen de la sécheresse (EDO) est un outil d'alerte précoce, de suivi et de prévision des épisodes de la sécheresse et de leurs impacts au niveau de l'Europe basé sur des séries de données hydrologiques et météorologiques et des données satellitaires, , ainsi que de l'observation in situ. Accessible en ligne (<http://edo.jrc.ec.europa.eu>), il fournit des indicateurs, des cartes, des rapports de l'incidence, de l'ampleur, de la gravité et de la durée des épisodes de sécheresse, y compris un accès direct à des informations diffusées par des services locaux nationaux ou régionaux, etc.

La représentation cartographique réalisée repose sur plusieurs indices :

- Indice de précipitations standardisé (SPI) : analyse locale des anomalies de précipitations à différentes échelles (1, 3, 6, 12 et 48 mois) ;
- Indice de faible débit (LFI) : données modélisées de comparaison des déficits d'eau avec des données historiques ;
- Anomalies de sécheresse du sol (SMA) : utilisé pour analyser l'occurrence et la durée des sécheresses agricoles ;
- Fraction de radiations photosynthétiques actives absorbées (FAPAR) : données satellitaires permettant d'évaluer l'activité photosynthétique de la végétation ;
- Indice de sécheresse combiné (CDI) : il combine les indices cités précédemment.

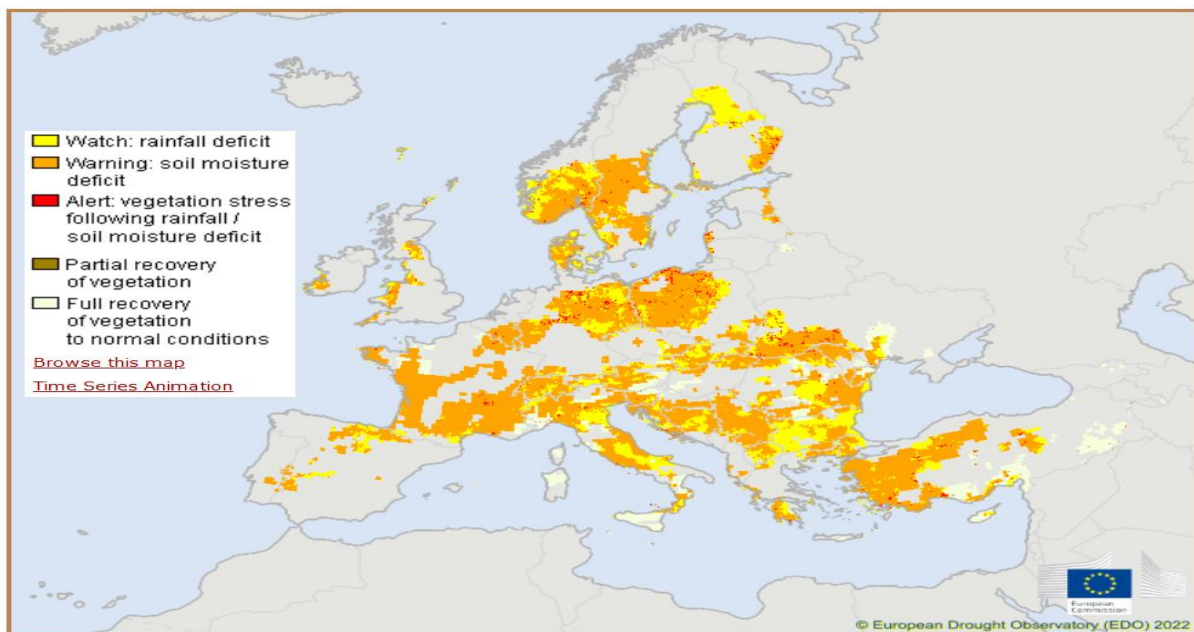


Figure III.4 : Carte de Situation de l'indicateur combiné de sécheresse en Europe 3^{ème} décade Mai 2022 (source : <https://edo.jrc.ec.europa.eu>)

III.6. Conclusion

Plusieurs pays ont mis en place des systèmes d'alerte précoce à la sécheresse basés sur leur capacité à surveiller et à prévoir les épisodes de sécheresse ce qui constitue une stratégie clé à l'appui de la préparation à la sécheresse, mais une mise en œuvre efficace ne peut être atteinte qu'en adoptant un protocole qui comprend à la fois la science nécessaire à l'élaboration des politiques et responsabilités institutionnelles, notamment dans les pays en développement.

Redoubler les efforts pour faciliter la coopération entre les pays pour le partage des données et des technologies revêt également une grande importance. Cependant, les progrès technologiques rapides dans la transmission de l'information et de la communication (TIC) doivent être pleinement utilisés pour améliorer la production des bulletins d'alertes précoces à la sécheresse.

IV.1. Introduction

En termes d'hydrologie, la sécheresse peut entraîner une réduction du débit dans les cours d'eau, une baisse du niveau des eaux souterraines et une réduction du stockage dans les réservoirs (Maity et al, 2013). Par conséquent, il est essentiel d'examiner les facteurs qui contrôlent l'occurrence des sécheresses hydrologiques pour gérer efficacement les catastrophes liées à la sécheresse (Peters et al, 2006 ; Vidal et al, 2010). Ainsi, comprendre la propagation de la sécheresse météorologique à la sécheresse hydrologique est crucial pour le suivi et la prévision des occurrences hydrologiques sèches (Wang et al, 2021)

Un système de prévision hydrologique à l'échelle saisonnière peut potentiellement soutenir un système d'alerte précoce, car il peut fournir des prévisions hydrologiques mises à jour sur une base mensuelle en tenant compte des conditions de sécheresse à la date de publication des prévisions et des perspectives climatiques sur la période de prévision (Yuan et al, 2013 ; Sheffield et al, 2014 ; Shukla et al, 2013).

Par conséquent, en termes de conditions normales, les données sur l'écoulement sont généralement utilisées pour l'analyse hydrologique de la sécheresse (Huntjens et al, 2010 ; Bao et al, 2011 ; Nicholson, 2017).

Ce chapitre met l'accent sur le rôle de la variable débit dans la caractérisation et la prévision de la sécheresse hydrologique puisqu'il s'agit de la variable la plus cruciale de la quantité d'eau qui exprime les ressources en eau de surface (Nalbantis & Tsakiris, 2009 ; Fang et al, 2018).

IV.2. Contexte de la sécheresse hydrologique

La sécheresse hydrologique fait référence à un manque d'eau dans le système hydrologique, se manifestant par un débit anormalement bas dans les cours d'eau et des niveaux anormalement bas dans les réservoirs et les eaux souterraines (Tallaksen & Van Lanen, 2004 ; Eslamian, 2014), et peut entraîner une baisse de la productivité agricole et, dans le pire des cas, des famines (Van Loon, 2015; Mishra et al, 2019). Elle est donc influencée par les propriétés du cycle hydrologique (Vidal et al, 2010). Cela fait partie du plus grand phénomène de sécheresse.

Un des développements scientifiques importants dans les projets de recherches sur le phénomène de la sécheresse est l'opinion croissante selon laquelle les sécheresses ne peuvent pas être simplement caractérisées par un manque de précipitations et de nombreux articles récents montrent la complexité accrue de la sécheresse, y compris les processus hydrologiques

(Haslinger et al, 2014; Stoelzle et al, 2015 ; Wang et al, 2016 ; Hasan et al, 2019, Muhammad et al, 2020). Cependant, il existe encore de nombreuses incertitudes et lacunes dans nos connaissances sur la sécheresse hydrologique. Mishra & Singh (2010), Cloke & Hannah (2011) et Pozzi et al (2013) soutiennent que la sécheresse hydrologique mérite plus d'attention en raison de son lien crucial avec les effets de la sécheresse. Aussi, le rapport du GIEC (2012) sur les extrêmes souligne la nécessité de porter plus d'attention sur l'évolution spatio-temporelle de la sécheresse hydrologique (Seneviratne et al, 2012).

Avec la sensibilisation au changement climatique, un certain nombre d'études au niveau mondial ont évalué les effets potentiels du réchauffement climatique sur la sécheresse hydrologique ces dernières années (par exemple : Cheng et al, 2010 ; Du & Shi, 2012 ; Huang & Fan, 2013 ; Guo et al, 2014 ; Cervi et al, 2017; Hellwig & Stahl, 2018; Van Tiel et al, 2018 ; Brunner et al, 2019 ; Jiang et al, 2019 ; Rudd et al, 2019; Jehanzaib et al, 2020; Kang et al, 2020 ; Petrovič, 2021). Ces études ont présenté des informations détaillées sur les processus locaux, mais l'étendue limitée de leur domaine spatial et le manque d'homogénéité des indicateurs de sécheresse adoptés, du cadre de modélisation et des scénarios climatiques ont compliqué la compréhension des schémas de changement à grande échelle.

L'urbanisation, la variation de l'utilisation des sols / de la couverture terrestre et l'industrialisation peuvent influencer les processus hydrologiques et avoir des impacts environnementaux, avec des implications substantielles sur les ressources en eau et, en fin de compte, sur la sécheresse hydrologique (Sheffield et al, 2012). De nombreuses études ont quantifié l'influence de l'activité humaine et du changement climatique sur l'écoulement fluvial, mais les études sur la façon dont ils affectent la sécheresse hydrologique sont très rares (Zhang et al, 2018 ; Jiang et al, 2019 ; Jehanzaib et al, 2020).

Les raisons de la survenue d'une sécheresse hydrologique sont complexes, car elles dépendent non seulement de l'atmosphère, mais aussi des processus hydrologiques qui alimentent l'atmosphère en humidité et provoquent le stockage de l'eau et le ruissellement des cours d'eau (Mishra & Singh, 2010). La plupart des techniques d'évaluation hydrologique de la sécheresse sont basées sur l'analyse des paramètres hydrologiques de la série temporelle réelle de l'écoulement (Zou et al, 2018).

Les sécheresses hydrologiques peuvent cependant couvrir de vastes zones et persiste des mois, voire des années, avec des effets dévastateurs sur le système écologique et de nombreux

CHAPITRE IV : Hydrologie et système d’alerte précoce à la sécheresse

secteurs économiques en comparaison avec les autres types de sécheresses (Tallaksen & Van Lanen, 2004; Sheffield & Wood, 2012) (voir Tableau IV.1).

Tableau IV.1 : Impacts majeurs de la sécheresse en relation avec les types de la sécheresse

Catégorie d’impact	Type de sécheresse			
		Sécheresse météorologique	Sécheresse agricole	Sécheresse hydrologique
Agriculture	Pluviale	X	X	
	Irriguée		X	X
Ecosystemes	Terrestriel	X	X	
	Aquatique			X
Energie et industrie	Hydro-électrie			X
	Eau de refroidissement			X
Navigation				X
Eau potable				X
Loisirs				X

La propagation de la sécheresse fait référence au processus par lequel une anomalie des précipitations se propage à travers la partie terrestre du cycle hydrologique d'une sécheresse météorologique à l'épuisement de l'humidité du sol et finalement à une sécheresse hydrologique (Van Loon, 2015 ; Wang et al, 2016).

Les processus de propagation de la sécheresse sont influencés par le climat (Van Loon & Laaha , 2014 ; Barker et al, 2016 ; Huang et al, 2017 ; Bhardwaj et al, 2020 ; Valiya Veetil & Mishra, 2020), les propriétés du bassin versant (Barker et al, 2016 ; Huang et al, 2017 ; Konapala et Mishra, 2020) et les activités humaines (Wang et al, 2016 ; Ma et al, 2018 ; Xu et al, 2019). L'effet climatique indiqué par le modèle de précipitations (saisonnalité et aridité), l'évapotranspiration, la fonte des neiges et le processus atmosphérique à grande échelle sur la propagation est étudié par un ensemble d'études.

Les facteurs déterminants pour caractériser la sécheresse hydrologique sont fortement dépendant de l'échelle (Wang et al, 2021). À l'échelle mondiale, la sécheresse hydrologique pourrait être davantage liée au climat qu'aux variables du bassin versant, alors qu'à l'échelle régionale/du bassin versant, les propriétés du bassin versant peuvent avoir plus d'influence sur

la sécheresse hydrologique. Outre les facteurs naturels, l'activité humaine telle que les activités d'irrigation influencent également la propagation de la sécheresse.

Le temps de propagation de la sécheresse météorologique à la sécheresse hydrologique reste un défi pour comprendre les interactions entre les différentes composantes du cycle hydrologique, en particulier dans les zones de drainage avec une lithologie de réservoir, des caractéristiques physiques diverses (Tijdeman et al, 2018) et des pratiques de gestion de l'eau (Bachmair et al, 2016 ; Wu et al, 2017). Par exemple, dans les régions karstiques, la sécheresse météorologique peut affecter directement la recharge des aquifères karstiques et accélérer la sécheresse hydrologique ; c'est-à-dire que le débit des sources alimente considérablement les cours d'eau pendant la période humide et, par conséquent, contribue à réduire ou à retarder la sécheresse hydrologique. Cependant, lors d'une sécheresse météorologique, cet apport printanier est réduit et, par conséquent, la sécheresse hydrologique se déclenche plus tôt.

Barker et al. (2016) ont montré que les propriétés du bassin versant telque le type de sol, la topographie, la géologie, la morphologie du réseau de cours d'eau et l'indice de débit de base (BFI) influencent également le processus et le temps de la propagation de la sécheresse et parfois plus que le régime pluviométrique.

Par ailleurs, Van Loon & Van Lanen (2012) et Van Loon et al (2014) ont classé les sécheresses hydrologiques en fonction de leurs facteurs responsables et de leurs processus de propagation en sécheresse de déficit pluviométrique classique, sécheresse de la pluie à la saison des neiges, sécheresse de la saison humide à la saison sèche, sécheresse de la saison froides avec des neiges, sécheresse de la saison chaudes avec des neiges, sécheresse de la fonte des neiges, sécheresse de fonte des glaciers et sécheresse composite. Le tableau IV.2 résume les processus sous-jacents pour chaque type de sécheresse hydrologique, liés aux précipitations, à la température ou à une combinaison des deux.

CHAPITRE IV : Hydrologie et système d'alerte précoce à la sécheresse

Tableau IV.2 : Processus de propagation de la sécheresse par type et sous-type de sécheresse hydrologique (basé sur Van Loon & Van Lanen (2012) et Van Loon et al (2014))

Type de sécheresse hydrologique	Processus directeur	Développement	Manque de
Sécheresse du déficit pluviométrique classique	déficit pluviométrique (dans toutes les saisons)	control <i>P</i>	control <i>P</i>
Sécheresse de la saison pluvieuse à neigeée	déficit pluviométrique en saison pluvieuse, la sécheresse continue durant la saison de neige	control <i>P</i>	control <i>T</i>
Sécheresse de saison humide à sèche	déficit pluviométrique en saison humide, la sécheresse continue durant la saison sèche	control <i>P</i>	control <i>P</i> et control <i>T</i>
Sécheresse de saison froide de neige	Basse température en saison de neige conduit à :		
Subtype A	Début trop tôt de saison des neiges	control <i>T</i>	control <i>T</i>
Subtype B	Fonte des neiges tardive	control <i>T</i>	control <i>T</i>
Subtype C	Pas de recharge	control <i>T</i>	control <i>T</i>
Sécheresse de saison chaude avec de la neige	haute température en saison de neige conduit à :		
Subtype A	Fonte précoce des neiges	control <i>T</i>	control <i>P</i>
Subtype B	En combinaison avec un déficit pluviométrique, pas de recharge	control <i>P</i> et control <i>T</i>	control <i>P</i>
Sécheresse de fonte des neiges	Manque de fonte des neiges en printemps due à faible <i>P</i> ou haute <i>T</i> durant l'hiver	control <i>P</i> et control <i>T</i>	control <i>P</i>
Sécheresse de fonte des glaciers	Manque de fonte des glaciers en été due à faible <i>T</i> durant l'été	control <i>T</i>	control <i>P</i> ou control <i>T</i>
Sécheresse composée	Combinaison de nombreux événements de sécheresse durant différentes saisons	control <i>P</i> et/ou control <i>T</i>	control <i>T</i>

P : précipitation, *T* : température

IV.3. Les données hydrologiques et la quantification de la sécheresse

Le but ultime de la collecte de données en hydrologie est d'apporter un ensemble de données de bonne qualité suffisantes qui peuvent être utilisées dans la prise de décision sous tous les aspects de la gestion des ressources hydriques, dans le large éventail d'applications opérationnelles ainsi que dans la recherche. Ce sont les données collectées qui constituent la base des informations hydrologiques et des décisions sur tous les aspects de la gestion des ressources en eau.

Puisque le débit des cours d'eau étant une source majeure d'approvisionnement en eau pour l'environnement et les besoins humains, la plupart de la littérature s'est concentrée sur l'analyse des données de débit historiques et générées pour la sécheresse hydrologique, y compris l'estimation de la densité de probabilité des caractéristiques de la sécheresse (Fundel et al, 2013 ; Jörg-Hess et al, 2015). Par conséquent, le réchauffement climatique est susceptible d'avoir un impact significatif sur les régimes hydrologiques, mais les impacts spécifiques varient en fonction des caractéristiques hydrologiques des bassins (Fang et al, 2018).

En effet, la donnée hydrologique mesurées ou bien simulées ont permis de produire les informations hydrologiques et les renseignements nécessaires à l'alerte précoce ainsi que la gestion adéquate de la menace par la quantification de la sécheresse hydrologique.

Une meilleure compréhension des sécheresses hydrologiques avec une focalisation sur l'alerte précoce et l'atténuation des impacts nécessite des méthodes de quantification fiables à l'avance. Cela comprend l'identification, la modélisation et la prévision des événements secs.

Dans cette section, on s'intéresse essentiellement à l'évaluation du risque la reconstruction, son suivi et prévision à partir des données du débit.

IV.3.1. Evaluation du risque de la sécheresse hydrologique

L'évaluation correcte du risque de la sécheresse hydrologique dans un bassin est crucial pour la gestion et la planification efficaces des ressources en eaux. La définition classique du risque, selon l'hydrologie statistique, fait référence à la probabilité qu'une variable x dépasse un seuil donné x_0 au moins une fois en n ans :

Risque = $P[\text{au moins 1 an en } n \text{ années où } x > x_0 \text{ en } n \text{ années}] = 1 - P[x \leq x_0 \text{ en } n \text{ années}]$

Cependant, le calcul de la fréquence des occurrences de la sécheresse hydrologique avec une seule variable ne peut généralement pas estimer avec précision la compréhension de ce type de sécheresse (Zhang, 2005). La sélection d'un indice de sécheresse hydrologique est un processus qui nécessite une question plus approfondie car le choix d'un indice de sécheresse approprié est un paramètre important inhérent à l'analyse du risque de sécheresse. L'analyse indépendante des facteurs de sécheresse ne peut pas déterminer les corrélations entre ces facteurs (Jiao & Yuan, 2019). En conséquence, une analyse paramétrique univariée des événements secs peut entraîner un dépassement ou une sous-estimation des risques liés à la sécheresse pour la gestion des ressources en eau (Mercado et al, 2016 ; Valiya Veetil & Mishra, 2020).

IV.3.2. Caractérisation et suivi de la sécheresse hydrologique

Afin de comprendre les processus et les impacts hydrologiques de la sécheresse, les caractéristiques de la sécheresse telles que le moment de déclenchement, la durée, la sévérité et l'étendue spatiale d'un épisode de sécheresse doivent être identifiées (Tallaksen & Van Lanen, 2004 ; Mishra & Singh, 2010 ; Seneviratne et al, 2012).

Des différentes méthodes ont été établies pour analyser ces caractéristiques, en relation avec les définitions variables de ce qui est précisément qualifié de sécheresse. Fleig et al (2006) affirment que le choix des caractéristiques de sécheresse appropriées pour une étude spécifique dépend de l'hydroclimatologie des régions.

Dans les estimations de sécheresse des eaux de surface, on considère que l'écoulement présente une plus grande variation spatiale et constitue donc, le principal indicateur de la sécheresse. Par conséquent, les régions semi-arides nécessitent des enquêtes approfondies sur les caractéristiques des ruisseaux (Saadat et al, 2013). L'avantage de l'utilisation de ces flux est que les comparaisons d'un bassin à l'autre peuvent être facilement effectuées en termes d'occurrence et de gravité de la sécheresse (Hasan et al, 2019).

Plusieurs indicateurs/indices ont été proposés pour caractériser et suivre les sécheresses hydrologiques. Ces indices ont des objectifs différents et des exigences de données différentes en utilisant des valeurs seuils pour distinguer les différentes catégories de sécheresse ; aussi, si ces seuils sont définis de manière empirique ou probabiliste, ils tentent de représenter les impacts attendus correspondant à chaque niveau de gravité (Xiang et al, 2020).

pour une échelle du temps mensuelle, les événements de sécheresse hydrologique peuvent être définis comme des mois avec des valeurs de l'indice choisi consécutivement négatives avec au moins un mois dans la série négative atteignant un seuil de -1,5 (ce qui équivaut à une sécheresse sévère (Barker et al, 2016).

Plusieurs publications qui ont étudié la sévérité de la sécheresse sont basés largement sur des analyses de faibles débits et des indices qui constituent une méthode appropriée au niveau de la planification du développement et de la gestion optimale des ressources en eau (Van Huijgevoort et al, 2014). Les indices quantifient la cohérence spatiale de la sécheresse dans une zone, en tant que mesure de la gravité de sécheresse (Hannaford et al, 2011).

Comprendre l'occurrence, la durée et la gravité de la sécheresse historique est essentiel pour l'évaluation et la gestion du risque de sécheresse en tout lieu, en donnant une base de référence par rapport à laquelle les changements futurs peuvent être évalués. D'une manière générale, une réponse efficace à la sécheresse dépend de la perception précoce des sécheresses à travers un système de surveillance précis des variables hydrométéorologiques ainsi que de la disponibilité des ressources hydriques.

IV.3.3. Modélisation de la sécheresse hydrologique

La modélisation est une pratique courante en hydrologie, à la fois en science et en gestion opérationnelle de l'eau pour étendre les séries de données, combler les lacunes, et naturaliser les séries chronologiques perturbées (Sheffield & Wood, 2012 ; Dai, 2011) et ils sont largement utilisés pour détecter les changements du régime hydrologique dus à l'activité humaine ou / et au réchauffement climatique, à la surveillance de la sécheresse (Laiolo et al, 2016 ; Patil & Ramsankaran, 2017 ; Khan et al, 2018).

En conséquence, la performance de la modélisation hydrologique est importante pour la représentation précise des cycles hydrologiques (Manjula & Dhanya, 2017). Cependant, un certain nombre de facteurs, telles que les observations au sol limitées et leur faible représentativité temporelle et spatiale, les structures de modèle et les paramètres du modèle empirique imparfaites peuvent entraîner un degré d'incertitude dans les simulations des modèles (Massari et al, 2015 ; Liu et Mishra, 2017).

Les modèles vont de simples modèles statistiques avec quelques paramètres à des modèles conceptuels ou physiques complexes. Pour la gestion de la sécheresse, qui se fait principalement à l'échelle du bassin versant, les modèles conceptuels pluie-ruissellement sont le principal outil.

Il existe une large gamme de modèles hydrologiques disponibles, chacun avec une structure différente, qui pourraient influencer la manière dont les sécheresses hydrologiques sont simulées. Cependant, des observations représentatives des états et des flux qui contrôlent la sécheresse hydrologique, comme le volume d'eau stockée et la libération d'eau du stockage, sont à peine disponibles (Henn et al, 2018). Par conséquent, la sélection et le développement des modèles pour la simulation de la sécheresse ne sont pas simples.

D'autre part, les modèles hydrologiques sont généralement conçus pour simuler des débits moyens et élevés et se sont avérés donner de bons résultats dans les bassins versants du monde entier (Tegegne et al, 2017). Malheureusement, les faibles débits ne sont souvent pas capturés

de manière satisfaisante par les modèles (Nicolle et al, 2014) malgré que diverses tentatives ont été faites récemment pour améliorer la modélisation des faibles débits à l'aide de modèles existants (par exemple Stoelzle et al, 2015 ; Vasiliades et al, 2017 ; Parra et al, 2019).

Par ailleurs, Les processus de base de propagation de la sécheresse météorologique, à la sécheresse hydrologique, ainsi que les différences entre les bassins versants avec des caractéristiques climatiques et des bassins versants contrastés, sont généralement reproduit par différents types de modèles, tels que des modèles conceptuels à l'échelle d'un bassin versant (Vidal et al, 2010 ; Van Loon and Van Lanen, 2012) un ensemble de modèles physiques à grande échelle (Van Loon et al, 2012) et un modèle synthétique.

Un autre point à signaler est que des incertitudes sont inévitables dans l'évaluation hydrologique de la sécheresse en raison de la multitude de sources d'incertitude provenant de l'incertitude des données d'étalonnage, de l'incertitude des données d'entrée et de l'incertitude du modèle (Ajami et al, 2007 ; Samaniego et al, 2013 ; Singh & Najafi, 2020) et, la quantification de la sécheresse hydrologique pourrait être considérée comme beaucoup plus incertaine que la quantification de la sécheresse météorologique, il est donc souhaitable de traiter à la fois les incertitudes structurelles et de paramètres du modèle afin d'améliorer la fiabilité et la robustesse de l'évaluation hydrologique de la sécheresse (Samaniego et al, 2013).

IV.3.5. Prévisions de la sécheresse hydrologique

Tous systèmes de surveillance et de prévision hydrologiques offrent une occasion unique de soutenir les efforts d'alerte précoce (Shukla et al, 2020). En effet, la prévision effective de la sécheresse est considérée comme un élément clé de la gestion des risques liés aux ressources en eau, donc, après la quantification, le problème le plus crucial dans la prévision de la sécheresse est le choix d'un modèle approprié (Zhang et al, 2019). Elle est généralement basée sur la théorie des probabilités et des principes statistiques, tels que l'analyse en composantes principales, la méthode de régression, les modèles de séries chronologiques, les processus de Markov, les réseaux de neurones artificiels (Paulo et al, 2005; Mishra & Desai 2006 ; Sharma & Panu, 2012; Stagge et al, 2015; Sohn et Tam, 2015 ; Karthika et al, 2017 ; Zhang et al, 2017).

Toutes les techniques de prévision ont des limites et des avantages, comme l'ont examiné Mishra & Singh (2011) et Fung et al. (2019). Puisque l'occurrence, la gravité, le début et la fin des sécheresses sont tous des phénomènes probabilistes, les méthodes utilisées pour saisir les caractéristiques de la sécheresse ont un caractère statistique et probabiliste (Dracup et al, 1980).

Au cours des dernières années, les changements continus du système climatique et des activités humaines ont remis en question l'hypothèse de stationnarité des processus hydrologiques (Hejazi & Markus 2009; Zhang et al, 2012; Chang et al, 2015; Deb et al, 2019). Parmi les recherches sur la prévision de la sécheresse hydrologiques, seules quelques études ont examiné le comportement non stationnaire de la sécheresse dans la structure du modèle pour améliorer la prévision de la sécheresse (comme par exemple Min et al, 2019).

En termes de prévisions hydrologiques saisonnières de sécheresse, seules quelques études ont évalué la compétence des prévisions et les ont comparées aux prévisions météorologiques de sécheresse (Yuan et al, 2013 ; Shukla et al, 2014 ; Trambauer et al, 2015 ; Yuan et al, 2017).

L'amélioration de la prévision saisonnière de la sécheresse hydrologique est une condition préalable à une gestion opérationnelle adéquate de l'eau (par exemple, l'exploitation des réservoirs, les prélèvements d'irrigation), mais la prévision des variables hydrologiques de la sécheresse est encore limitée par rapport à la sécheresse météorologique (Pozzi et al, 2013).

Une autre approche consiste à prédire la «sécheresse due à la sécheresse», c'est-à-dire la prévision de la sécheresse hydrologique par la sécheresse météorologique (Hannaford et al, 2011). puisque ces types de sécheresses sont étroitement liées (Tokarczyk & Szalinska, 2014), la dépendance de la sécheresse hydrologique à celle météorologique ainsi que les facteurs et les caractéristiques de la propagation ont été étudiée, entre autres, par plusieurs chercheurs (comme par exemple : Van Lanen et al, 2013 ; Haslinger et al, 2014 ; Niu et al, 2015 ; Van Loon & Laaha, 2015 ; Zhao et al, 2016 ; Huang et al, 2017 ; Yu et al, 2020 ; Salimi et al, 2021).

De la littérature passée ainsi que de la compréhension physique des sécheresses, il est déduit que la sécheresse météorologique peut être un prédicteur décisif dans la prévision hydrologique des sécheresses. Cependant, se sont le système climatique et les activités humaines qui affectent de manière significative la sécheresse hydrologique (Min Li et al, 2019).

Veillez garder à l'esprit que la génération de séries chronologiques hydrologiques ne peut pas être classée comme des prévisions de sécheresse au sens strict (Sutanto et al, 2020). Celles-ci sont connues sous le nom de prévisions hydrométéorologiques. Les prévisions hydrologiques de sécheresse nécessitent, à l'instar des prévisions hydrométéorologiques comme point de départ de la chaîne, un modèle hydrologique à grande échelle de pointe alimenté par une prévision probabiliste ou déterministe (Yuan et al, 2015). Une étape supplémentaire de la chaîne, qui consiste à appliquer une méthode d'identification utilisant la série chronologique

prévue des variables hydrométéorologiques, doit être réalisée (Sutanto et al, 2020). La compétence de la prévision de la sécheresse est donc fortement dépendante de la fiabilité de la prévision météorologique, du modèle hydrologique pour simuler de manière réaliste le cycle de l'eau sur une région à grande échelle (Hao et al, 2018), et de la méthode d'identification de la sécheresse (Sutanto et al, 2019).

D'autres études explorent l'utilisation de la corrélation entre les indices et les modes océan-atmosphère à grande échelle (comme ENSO, NAO) pour la prévision de la sécheresse hydrologique (par exemple : Ryu et al, 2010 ; Kingston et al, 2013 ; Trambauer et al, 2014 ; Bonaccorso et al, 2015 ; Min et al, 2019), mais beaucoup concluent que le lien n'est «pas suffisamment fort pour prédire de manière cohérente et précise l'écoulement fluvial».

Des recherches sur cette question sont nécessaires avant que la prévision puisse être appliquée avec succès à la gestion opérationnelle de l'eau. Une attention particulière est nécessaire sur la sécheresse hydrologique pendant un événement en cours. La figure VI.1 présente les différentes composantes de la prévision de la sécheresse selon Mishra & Singh (2011)

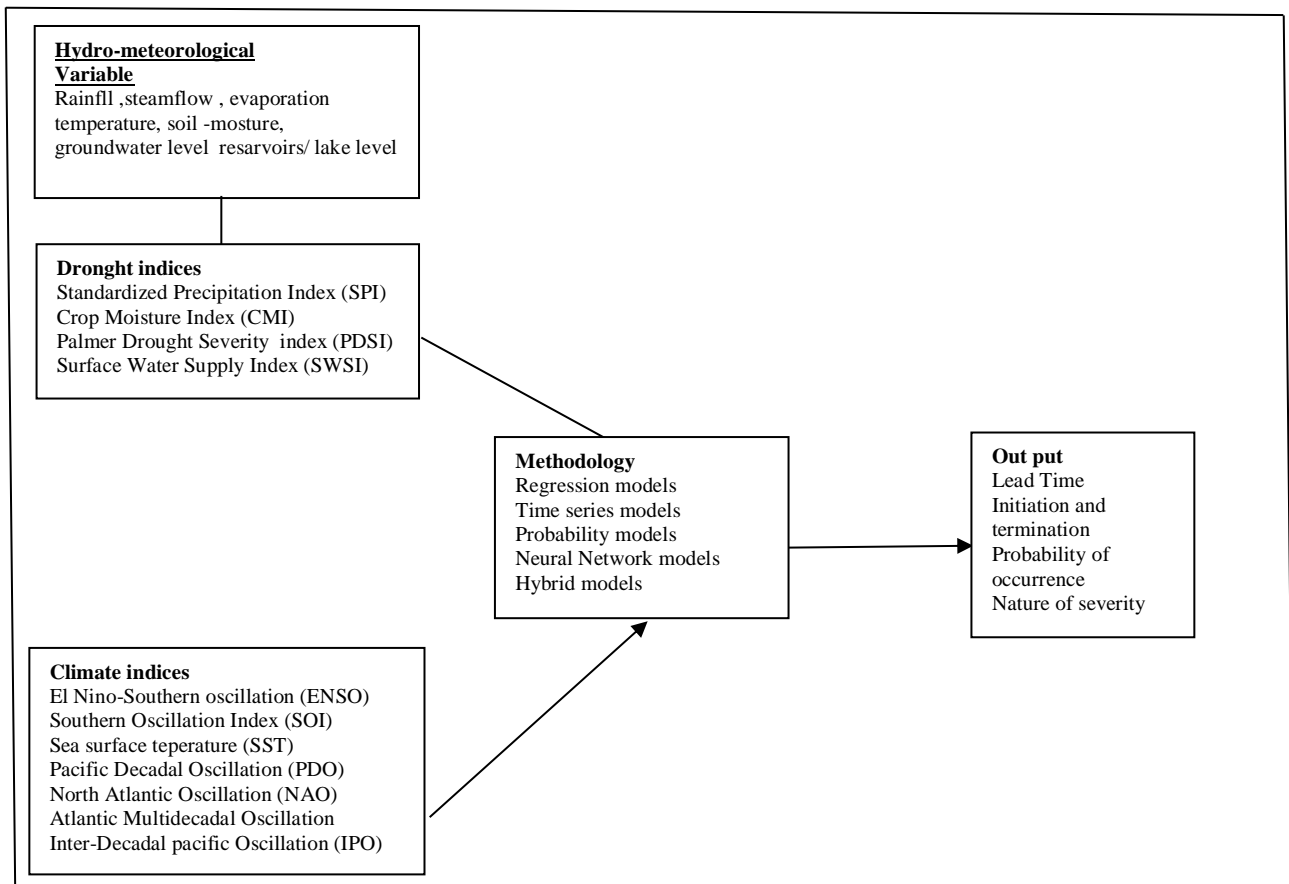


Figure IV.1: Différentes composantes de prévision de la sécheresse (Mishra & Singh, 2011).

IV.4. Indices hydrologiques de la sécheresse

Aux fins de l'utilisation de l'eau pour les différents usages, les indices de sécheresse hydrologique donnent généralement de meilleurs résultats que les indices de sécheresse météorologique, car ces indices sont directement liés aux flux hydrologiques (comme le ruissellement) ou bien les stockages hydrologiques (par exemple, l'humidité du sol, les réservoirs, les eaux souterraines) ou une combinaison des deux (Yihdego et al, 2019).

Un certain nombre d'indices de sécheresse basés sur divers termes hydrologiques ont été développés en se basant soit sur le débit, le ruissellement, l'approvisionnement en eau de surface et des ressources en eau souterraine. Des revues complètes de ces indices, ainsi que de ceux des indices de sécheresse météorologiques et agricoles peuvent être trouvées dans Heim Jr. (2002), Dai (2011), Sheffield et Wood (2012) et OMM (2016). Cependant, les applications de ces indices hydrologiques ont souvent été limitées par la disponibilité des données d'observation et / ou par les incertitudes du modèle (Van Loon, 2015; Chen et al, 2019).

Un autre problème avec ceux-ci est qu'une période de référence doit être choisie, ce qui peut entraîner des difficultés sous la variabilité climatique multi décennale, comme c'est le cas des résultats trouvés pour le SSI par Núñez et al (2014).

Nouveaux indices de sécheresse utilisant des observations satellitaires tels que l'indice normalisé empirique d'humidité du sol (ESSMI; Carrão et al, 2016), l'indice de sécheresse par évapotranspiration (ETDI; Mu et al, 2013) et l'indice de sécheresse basé sur la récupération par gravité et expérience climatique (GRACE; Thomas et al, 2014) ont été utilisées pour évaluer la gravité, la durée et l'étendue spatiale des sécheresses hydrologiques. Bien que les réservoirs jouent un rôle essentiel dans l'approvisionnement en eau et l'atténuation des effets de la sécheresse (Huang & Chou, 2005; Lehner et al, 2011; Zhao & Gao, 2019), il n'y a pas eu d'indices basés sur l'état des réservoirs télédéteints pour la surveillance de la sécheresse.

Cependant, il semble y avoir un consensus scientifique sur le fait qu'il n'y a pas de « meilleur » indice de sécheresse hydrologique et que la recherche du meilleur indice est inutile (Hayes et al, 2011 ; Van Loon, 2015 ; Xu et al, 2019). Chaque type d'indices, se concentrent sur une partie spécifique du cycle hydrologique ou utilisent une méthodologie pour une application spécifique et donc, plusieurs indices normalisés ou bien composites devraient être utilisés pour quantifier la diversité des impacts de la sécheresse. Mais, le plus courant est que l'accent doit être mise

sur l'écoulement des cours d'eau, car il est le plus mesuré, le plus facile à simuler et le plus intéressant pour la gestion des ressources hydriques (Nicholson, 2017).

Puisque, on ne peut pas discuter de toutes les sources de données qui sont ou peut être utilisé dans la recherche hydrologique sur la sécheresse et cela dépasse le cadre de cette thèse, les indices et les indicateurs présentés ci-dessous décrivent les caractéristiques hydrologiques des sécheresses à partir de l'évaluation des débits.

IV.4. 1. Indice de ruissellement normalisé (SRI)

Le SRI développé par Shukla & Wood (2008) est basé sur les données de débit observées ou simulées par un modèle hydrologique en appliquant un concept similaire pour le calcul SPI sur une durée spécifique afin de caractériser la sécheresse hydrologique selon l'écoulement. Il permet d'analyser les événements humides et les événements secs, en calculant son intensité à différentes échelles de temps: généralement 3, 6 et 12 mois (Wu et al, 2018). Plus de détails sur SRI sont discutés dans la deuxième partie de cette thèse.

IV.4. 2. Indice de sécheresse fondé sur l'écoulement fluvial (SDI)

Cet indice développé par Nalbantis & Tsakiris (2009) applique une procédure légèrement différente que celle utilisée pour le SRI. Il est basé sur les volumes mensuels des écoulements fluviaux observés à différentes échelles pour évaluer la sévérité de la sécheresse. On suppose que les séries chronologiques des valeurs de débit Q_{ij} sont accumulées en fonction des mois consécutifs pour la période k . Le volume d'écoulement cumulé (V_{ik}) pour la i -ème année hydrologique et le j -ème mois pour une durée k est obtenu dans l'équation (VI.1) respecté la numérotation depuis le début:

$$V_{ik} = \sum_{j=1}^k Q_{ij} \quad (1)$$

$$i=1,2,\dots \quad j=1,2,\dots,12 \quad k=1, 2, 3, 4, 5, 6$$

À partir des valeurs de débit cumulées V_{ik} pour la période k , le SDI est obtenu pour la i -ième année hydrologique comme suit:

$$SDI_{ik} = \frac{V_{ik} - \bar{V}_k}{S_k} \quad (2)$$

\bar{V}_k et S_k sont respectivement la valeur moyenne à long terme et l'écart type du volume d'écoulement cumulé sur une période de temps k .

IV.4. 3. Indice de sécheresse agrégé (ADI)

C'est un indice régional de sécheresse multivarié qui examine toutes les impacts sur les ressources en eau sur plusieurs échelles de temps et proposé par Keyantash & Dracup (2004). Il peut être utilisé dans des climats uniformes dont les paramètres d'entrée sont les précipitations, le débit, l'évapotranspiration, le stockage du réservoir, l'humidité du sol et dans la neige. L'entrée de données mesurées est préférée aux résultats de simulation, ce qui n'est cependant pas toujours possible, notamment dans le cas de l'humidité du sol. La dérivation de cet indice comprend une analyse des composantes principales pour extraire le signal le plus fort de la corrélation des variables d'entrée qui indique la plus grande fraction de la variance.

IV.4. 4. Indice d'apport d'eau de surface (SWSI)

Un indice composite de la sécheresse hydrologique développé par Shafer & Dezman (1982), le SWSI est un indicateur prédictif de l'eau de surface disponible dans un bassin versant par rapport à l'approvisionnement historique en complétant certaines des limitations identifiées dans l'indice PDSI par l'addition des informations supplémentaires, y compris des données d'approvisionnement en eau (précipitations, accumulation de neige, fonte et ruissellement de la neige, débit et données sur les réservoirs) pour évaluer l'approvisionnement total en eau de surface disponible pour la saison, il est donc calculée au niveau du bassin.

Le SWSI est exprimé par:

$$SWSI = \frac{aP_{neige} + bP_{prec} + cP_{strm} + dP_{res} - 50}{12} \quad (3)$$

IV.4. 5. Indice normalisé de la fonte des neiges et de la pluie (SMRI)

Introduit par Staudinger et al (2014), le SMRI est développé pour tenir compte des précipitations gelées et de la façon dont elles contribuent au ruissellement dans les cours d'eau lors de la fonte des neiges. Avec des méthodes similaires à SPI, SMRI prend en compte à la fois, les déficits de précipitation et l'impact associé sur l'écoulement fluvial, y compris les neiges. Il implique comme paramètres d'entrée : les données du débit, les précipitations quotidiennes et les données de température quotidiennes pour prendre en compte les processus de la fonte des neiges dans le calcul.

Le tableau IV.3 présente un récapitulatif des indices hydrologiques de la sécheresse basant sur le débit des cours d'eau ou plusieurs paramètres décrits dans cette section.

Tableau IV.3 : récapitulatif des indices de la sécheresse hydrologiques décrits

Indice	Type de sécheresse	Paramètres d’entrée	Informations additionnelles
<i>SRI</i>	Hydrologique	Débit	Méthode de calcul similaire à celle de l’indice SPI
<i>SDI</i>	Hydrologique	débit	Méthode de calcul légèrement différente à celle de l’indice SPI
<i>SWSI</i>	Hydrologique	Précipitation, réservoir, débit et accumulation des neiges	De nombreuses méthodologies et produits dérivés sont disponibles, mais les comparaisons entre bassins sont soumises à la méthode choisie
<i>ADI</i>	Hydrologique	précipitations, évapotranspiration, débit, réservoir, teneur en eau disponible, accumulation des neiges	Pas de code, mais les mathématiques sont expliquées dans la littérature
<i>SMRI</i>	Hydrologique	précipitations, température, débit, modélisés	Peut être utilisé avec ou sans informations sur l’accumulation des neiges

IV.5. Les services hydrologiques nationaux

Les services hydrologiques (SH) sont des institutions dont l'activité principale est de fournir d'informations sur le cycle hydrologique et des tendances des ressources hydriques d'un pays. Ce service se focalise sur l'évaluation des ressources en eau, y compris la surveillance de la sécheresse et les perspectives et les prévisions et les avertissements d'inondation. Dans la plupart des pays, les fonctions de service hydrologique sont dispersées parmi les agences d'eau connexes (OMM, 2006). Ses activités incluent systématique l’enregistrement de données de ressources en eau, la collecte, le traitement, le stockage, l’archivage et le sauvetage; la production et la diffusion des données et des informations relatives aux ressources hydriques; et la prévision hydrologique (Adams & Pagano, 2016).

Le rôle principal des SH est d’apporter aux décideurs des informations sur l’état et les tendances des ressources en eau. L'importance des services hydrologiques (SH) en tant que source d'information hydrologique nationale, d'alerte précoce et de services de données connexes ne peut être sous-estimée et la communauté mondiale souligne la nécessité d'investir dans des actions d'alerte précoce et d'anticipation basées sur les prévisions pour la réduction des risques des catastrophes telque les sécheresses (UNISDR, 2017).

IV.6. Conclusion

Pour pouvoir prédire la sécheresse, il est indispensable de connaître ses caractéristiques dans les systèmes hydrologiques. Cela nécessite d'identifier les principales sources de prévisibilité hydrologique (débit fluvial et eaux souterraines) et leur influence relative sur la prévisibilité hydrologique saisonnière et annuelle. Le développement de déclencheurs pour le système d'alerte précoce utiliserait une combinaison d'indices pour lancer des actions spécifiques et opportunes. Le développement d'un tel système repose sur la réalisation d'une modélisation intégrée qui analyse certaines des complexités impliquées dans l'identification et la prévision de la sécheresse et utilise l'indice de sécheresse hydrologique qui joue un rôle essentiel dans la gestion des eaux.

V.1. Introduction

L'Algérie est connue par ses évènements de sécheresse pluriannuelles dont les déficits pluviométriques de longue durée signalés ont causé de graves problèmes socio-économiques et il est prévu que les déficits futurs provoqueront une pression croissante sur les rares ressources hydriques algériennes, entre autres pour l'approvisionnement en eau soit potable ou pour l'irrigation (Khaldi, 2005 ; PNUD, 2009 ; Habibi et al, 2018).

Face à ce phénomène, la gestion demeure réactive en Algérie en basant sur la gestion de crise (Safar-Zitouni, 2019), bien qu'un ensemble d'initiatives soit engagé ces dernières années pour se préparer et faire face aux risques de cet aléa.

V.2. La sécheresse en Algérie

V.2.1. Evènements historiques

Au cours du 20^{ème} siècle, le pays a été marqué par plusieurs occurrences sèches traduites par des déficits pluviométriques remarquables dont les plus marqués ont été enregistrés en 1910, 1940 et de façon plus persistante durant la période 1975-80 ainsi qu'au début du XXI^e siècle (Medejerab & Henia, 2011 ; Safar-Zitoun, 2019). En outre, la durée des évènements de sécheresse, devenus de plus en plus longs, en accentuant la désertification (CPDN, 2015).

La dernière occurrence de sécheresse vécue déjà depuis deux décennies, a été sévère notamment dans la partie occidentale. Cette tendance est déjà analysée et démontrée par plusieurs études scientifique (Yebdri et al, 2007 ; Meddi et al, 2009 ; Nekkache-Ghenim et al, 2010 ; Ghenim & Megnounif, 2011 ; Habibi et al, 2018 ; Bouabdelli et al, 2020 ; Hallouz et al, 2020).

Toutes les séries de données pluviométriques sur le nord-ouest et le centre-nord de l'Algérie ont enregistré un point de rupture situé dans les années 70 lié à une diminution des précipitations (diminution de 20 % des précipitations annuelles depuis 1970) (Meddi et al, 2010 ; Zeroual et al, 2017). Ce point de rupture est causé par le changement climatique et a également été détecté dans plusieurs régions du bassin méditerranéen (Brunetti et al, 2006 ; Ramadan et al, 2013 ; Scorzini & Leopardi, 2019 ; El Kenawy et al, 2019 ; Achour et al, 2020 ; Tsiros et al, 2020).

Une analyse de l'évolution du régime pluviométrique dans le Nord de l'Algérie établie par (Taibi et al, 2013) sur une période de sept décennies (1936–2009) a montré qu'à partir de la moitié des années 70, une baisse significative des précipitations a été enregistrée,

CHAPITRE V : Vue d'ensemble de la sécheresse en Algérie

principalement dans la région occidentale (déficit pluviométrique entre 16% et 43%). Le calcul de l'indice SPI a démontré que les décennies 80 et 90 étaient les plus déficitaires.

Par ailleurs, une expertise commandée par l'ANRH en 2017 a montré l'existence d'une rupture dans le régime pluviométrique à partir de 1976, en engendrant un déplacement des isohyètes de l'Ouest vers l'Est et du Sud vers le Nord. La carte établie par l'ANRH indique, que la partie Nord-Ouest présente le déficit le plus remarquable et significatif. (Figure V.1)

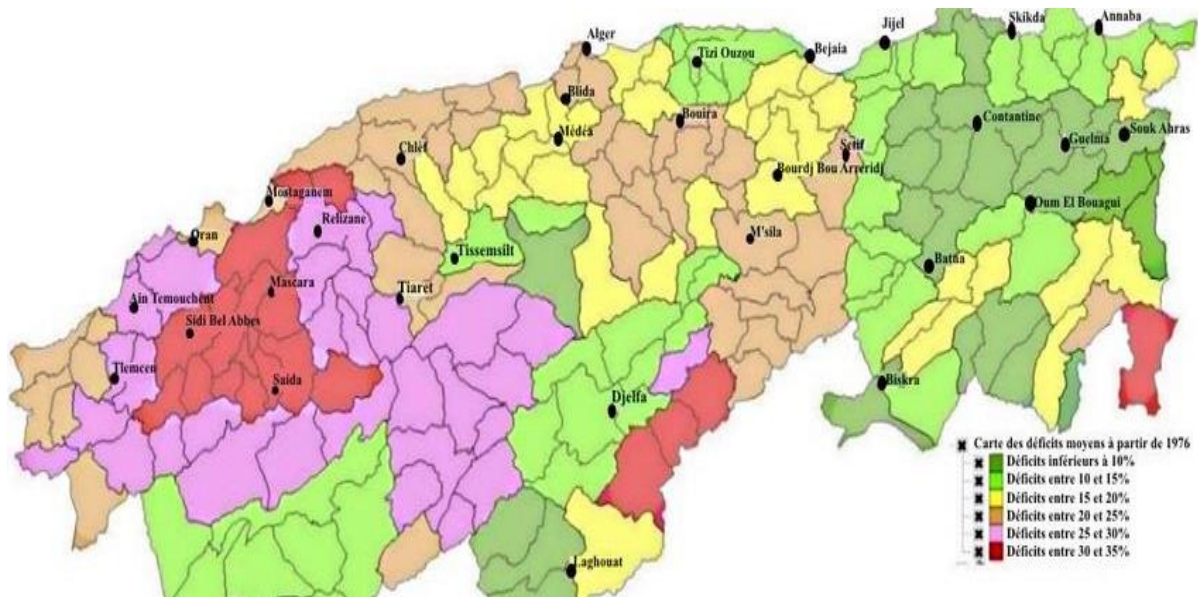


Figure V.1 : Carte des déficits pluviométriques dans le Nord Algérien (ANRH, 2017 en Safar-Zitoun 2019)

Sur les 40 dernières années les températures moyennes annuelles ont subi une élévation de 0.5°C et les événements secs de la même période devenus plus remarquables compte tenu du déficit important enregistré notamment à l'Ouest. Le réchauffement climatique en Algérie se présente donc sous forme d'une sécheresse (Abderrahmani, 2015).

V.2.2. Projections futures des sécheresses en Algérie

La sécheresse au monde va probablement s'intensifier à l'avenir, où il existe un consensus dans les projections sur l'évolution du climat concernant les futures diminutions des précipitations réalisées par le Groupe d'experts intergouvernemental (GIEC) (Christensen et al, 2007).

L'analyse menée par GIZ & MEER (2017) sur la vulnérabilité au changement climatique et son risque et en Algérie, explique que les changements climatiques causeront :

- Un grand déficit des précipitations totales et une importante hétérogénéité de la répartition des précipitations au cours de l'année,
- Une hausse des températures,

- Une dégradation des sols et du couvert végétal traduite par une forte érosion et une accentuation de phénomène de la désertification.

Hamiche et al (2016) ont constaté que les ressources en eau ont une grande variabilité et les projections indiquent que les précipitations pourraient diminuer de plus de 20 % d'ici 2050, ce qui entraînerait une aggravation considérable des pénuries d'eau dans différents bassins.

Zeroual et al. (2019) l'ont également confirmé pour la partie nord-ouest du pays en utilisant les résultats de 15 modèles climatiques régionaux (MRC), appliqués dans le cadre du programme CORDEX-Afrique (Coordinated Regional climate Downscaling Experiment). Le climat de cette partie était humide en 1951, semi-aride depuis 1973 et devrait être aride en 2100.

Bouabdelli et al. (2020) ont également constaté que le risque de sécheresse hydrologique déterminé avec une analyse de fréquence augmentera probablement, en particulier sous RCP8.5 avec des sévérités et des durées plus élevées.

Selon le rapport Profil Algérie Climat et Santé établie par l'OMS (2015), dans un scénario d'émissions élevées, la plus longue période de sécheresse pourrait augmenter d'environ 12 jours en moyenne, contre environ 85 jours en 1990, ce qui suggère une persistance légèrement supérieure des occurrences avec une grande variabilité d'une année à l'autre. Si les émissions diminuent rapidement, l'augmentation est limitée à environ 5 jours en moyenne. Cela suppose que les ressources en eau renouvelables de l'Algérie, qui la situent déjà parmi les pays en situation de pénurie, baisseront de plus en plus, hypothéquant ainsi les générations à venir.

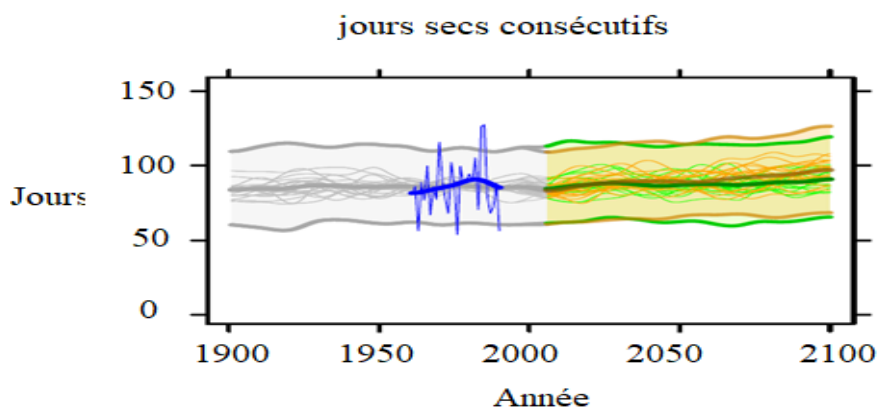


Figure V.2 : projection du nombre des jours secs consécutifs en Algérie de 1990-2100 présentant les risques climatiques dans le cadre d'un scénario d'émissions élevées, [RCP8.5] (en orange) et d'un scénario de faibles émissions, [RCP2.6] (en vert) et l'enregistrement observé annuel (en bleu). (Source : WHO & UNFCCC, 2015)

V.3. Impact de la sécheresse en Algérie

Les données historiques du climat en Algérie indiquent une persistance des évènements secs qui constitue un évènement récurrent et c'est sur les plans agricole et surtout hydrologique que ce phénomène est mieux appréhendé (Giz & Meer, 2017 ; Safar-Zitoun, 2019).

Cette vulnérabilité a augmenté avec la croissance démographique actuelle, de développement économique et de la surexploitation des ressources en entraînant une baisse importante des niveaux de stockage des barrages et de la production agricole, un rabattement des nappes phréatiques et l'assèchement de certaines sources karstiques (Meddi & Hubert 2003 ; Bensaoula et al,2019 ; Achour et al, 2020).

V.3.1. Impact sur les ressources en eau

V.3.1.1. Impacts sur l'écoulement de surface

La persistance des occurrences sèches depuis le début des années 70, a eu un effet négatif sur les écoulements des cours d'eau ce qui ne permet pas de remplir suffisamment les barrages existants en entraînant de graves conséquences pour toutes les activités socio-économiques du pays (PNUD, 2009 ; Touitou & Abul Quasem, 2018).

V.3.1.2. Impacts sur les eaux souterraines

La sécheresse observée en Algérie a engendré une baisse des réserves d'eau souterraine des principaux aquifères du nord. Au niveau de nombreuses plaines du pays, le niveau des eaux souterraines a baissé à un rythme alarmant (> 20 m.) (PNUD, 2009). L'aggravation de ce phénomène couplée à l'épuisement des eaux souterraines a provoqué dans les régions semi-arides l'augmentation des zones minéralisées non saturées des aquifères profonds telles que le plateau d'Oran et les hautes plaines occidentales. La moyenne d'utilisation des ressources en eau souterraines est de 79% dans le Nord ; il peut atteindre ou dépasse 90 % dans certaines régions (PNUD, 2009). Dans les zones côtières, la diminution des niveaux des nappes a déjà causé la pénétration de l'eau salée dans les réserves hydriques douces (cas des aquifères côtières de la Mitidja, Oran, Terga et Annaba) (PNUD, 2009).

V.3.2. Impacts sur l'agriculture

L'agriculture, consommatrice de 65% des ressources en eau mobilisées, est le secteur économique le plus sensible à la sécheresse en Algérie (Bessaoud et al, 2019). Il est clair que La production agricole nationale a été fortement affectée par déficit pluviométrique. A l'instar des campagnes agricoles 2001-2002, 2006-2007 et 2019-2020 ont été fortement influencées par

une pluviométrie insuffisante comparativement à une très bonne campagne 2002-2003 et celle de 2017-2018 grâce à une précipitation suffisante et bien répartie localement durant de la campagne agricole.

En 2007, sur les 150 000 ha irrigables, seulement 43000 ha de la superficie agricole ont été irrigués, à cause de la sécheresse et de transfert des quotas des eaux d'irrigation vers l'approvisionnement de la population en eau potable particulièrement à l'ouest (PNUD, 2009).

V.4. Aperçu de la stratégie de gestion de la sécheresse en Algérie

Un rapport établi par Safar-Zitoun (2019) sur l'opérationnalisation d'un plan national de la sécheresse, a évoqué les plans de gestion et mesures d'atténuation de la sécheresse en Algérie dont on peut citer les éléments suivants :

En ce qui concerne un système d'alerte à la sécheresse proprement dit, l'Algérie n'en dispose pas à ce jour, de plus, il n'existe pas de structure dédiée expressément à la sécheresse bien que de nombreuses institutions nationales s'intéressent à ce risque climatique. Les efforts importants en Algérie sont toujours portés sur l'atténuation des impacts en apportant des réponses d'urgence à une situation de sécheresse donnée (distribution d'eau, nourriture, etc.)

Par ailleurs, des dispositions organisationnelles et réglementaires existent mais concernent dans leur globalité les risques majeurs, avec une focalisation privilégiée sur les inondations et les séismes, alors que, la sécheresse reste le parent pauvre de la politique mise en place. Cependant, Les textes juridiques principaux évoquant la sécheresse concernent principalement les domaines des ressources en eau, de l'Intérieur et de l'Environnement et de l'Agriculture.

Le Plan National de l'Eau (PNE) » adopté en 2007 (en cours de révision) prolongé jusqu'à 2025, est un moyen évolutif de planification souple. Il a pour objectifs principaux :

- Créer une dynamique de rééquilibrage territorial,
- Garantir une durabilité de la ressource hydrique,
- Assurer une bonne gouvernance de l'eau.

Le plan national de lutte contre la désertification validé en 2003, qui s'intègre dans la stratégie de l'aménagement du territoire tient compte dans ses actions l'atténuation des impacts de la sécheresse par la constitution de réserves fourragères rapidement mobilisables, une meilleure organisation des parcours et une régénération continue de la flore pastorale.

CHAPITRE V : Vue d'ensemble de la sécheresse en Algérie

L'objectif majeur de la stratégie nationale forestière 2030 « la conservation et la gestion durable des ressources (sol, eau, flore, faune) du domaine forestier et de restaurer les écosystèmes touchés dans les zones arides et renforcer leur résilience au changement climatique et à la sécheresse » en donnant une importance primordiale à l'atténuation de ses conséquences en particulier par l'extension d'essences adaptées à ce risque climatique : l'acacia raddiana sur 764.000 et pistachier de l'Atlas sur 95.000 ha à l'horizon 2030.

L'Algérie s'est dotée depuis 2004 d'une délégation sur les Risques Majeurs (DNRM) relative à la prévention et à la gestion des catastrophes sous la tutelle du Ministère de l'Intérieur, des Collectivités locales et de l'Aménagement du Territoire, dans le cadre du développement durable dont ce phénomène est classé dans son article 26 parmi les phénomènes climatiques pouvant causer un grand risque. L'article 27 ébauche une stratégie générale de prévention des risques portant sur les points suivants :

- Cartographie des régions vulnérables
- Les modalités de veille pour le suivi du risque,
- Les conditions, seuils, modalités et procédures de déclenchement des préalertes et des alertes, et les démarches de suspension des alertes,
- Les actions de prévention à appliquer en cas de l'annonce des bulletins de préalerte ou d'alerte.

Cependant, La mise à exécution entière et pleine de cette loi est marquée par l'absence de plusieurs textes d'application. La loi n° 12-07 du 21 février 2012 relative à la wilaya, en son article 84 permet à toute wilaya d'initier au niveau local toutes mesures pour lutter contre les risques de sécheresse et d'inondations.

Le Plan National Climat (PNC) présenté en 2018 indique que la « sécheresse » est tenue en compte en plusieurs points.

- 1- Cet aléa climatique est classé parmi les risques majeurs dont une attention est demandée quant à la caractérisation et projection future de l'évolution de la sécheresse notamment sur l'Ouest Algérien à l'horizon 2050-2100.
- 2- Ce risque est inclus dans les missions du groupe « ressources en eau » où l'optimisation et la modernisation des technologies d'économie de l'eau d'irrigation, la réhabilitation des systèmes traditionnels sont recommandées pour lutter contre ce phénomène.

La gestion de la sécheresse au niveau sectoriel en tant qu'une gestion du risque n'est pas encore enclenchée alors que la gestion de crise (pénurie) semble être toujours la règle. Ceci, malgré le

fait que des institutions performantes existant dans les domaines de l'acquisition et traitement des données sur les ressources naturelles.

De plus, l'Algérie est signataire de plusieurs accords de coopération régionales et internationales dans le domaine de la prévention des risques majeurs, à l'instar de l'accord partiel avec le conseil de l'Europe en matière de prévention, de protection et d'organisation des secours contre les risques naturels et technologiques majeurs.

V.5. Les structures nationales travaillant dans la problématique de la sécheresse

En Algérie, il n'existe pas de structure particulière spécifiquement dédiée à la sécheresse alors que le mécanisme de surveillance de la sécheresse est assuré au premier plan par certaines institutions et agences publiques qui appartiennent à plusieurs secteurs d'activité (OSS, 2013 ; Safar-Zitoun, 2019).

Nous pouvons classer ces structures en deux catégories : la première concerne ceux fortement impliqués pouvant devenir des partenaires clés avec la double particularité d'être à la fois utilisateurs et fournisseurs de données. La deuxième catégorie concerne les structures qui sont appelées à être essentiellement des utilisateurs de l'information sur ce phénomène.

V.5.1. Catégorie des structures fortement impliquées : ce sont principalement :

- l'Office National de la Météorologie (ONM) ;
- l'Agence des bassins hydrographiques (ABH) ;
- l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) ;
- l'Agence Nationale des Barrages et transferts (ANBT) ;
- L'Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage (INSID) ;
- Le Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural (BNEDER) ;
- Agence Nationale sur les changements climatiques (ANCC) ;

V.5. 2. Catégorie des structures utilisatrices de l'information sur la sécheresse : ce sont nombreuses à l'instar de :

- Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie (INRAA) ;
- Laboratoires universitaires spécialisés ;
- Centre de développement des énergies renouvelables « CDER » ;
- Office National Des Statistiques « ONS » ;
- L'Agence Spatiale Algérienne (ASAL) ;
- Directions centrales et directions de wilaya de l'Agriculture et du développement rural ;

CHAPITRE V : Vue d'ensemble de la sécheresse en Algérie

- Institut National de la Recherche forestière (INRF) ;
- L'Algérienne Des Eaux (ADE) ;

Le tableau V.1 présente une enquête sur les responsabilités des structures nationales qui s'intéressent au phénomène de la sécheresse et qui mènent des actions dans les axes d'un SAPS.

Tableau V.1 : Matrice des responsabilités pour un SAPS en Algérie :

Institutions	Secteur	identification du risque	Suivi et alerte	Education et communication	Capacité de réponse
ONM	météorologique	X	X	X	
ANCC	météorologique	X	X		
ANRH	Ressources en eau	X	X		
ANBT	Ressources en eau		X		
ABH	Ressources en eau	X	X		
INSID	Agriculture	X	X		
BNEDER	Agriculture	X	X		
CRSTRA	Recherche scientifique	X			
Universités	Recherche scientifique	X	X		
INRAA	Recherche scientifique	X			
INRF	Recherche scientifique	X		X	
Ministère des ressources en eau	Institution politique			X	X
Ministère de l'agriculture et du développement rural	Institution politique			X	X

V.6. Conclusion

La gestion du risque de la sécheresse par un système d'alerte précoce en Algérie est indispensable et plusieurs arguments sont en faveur de sa création afin d'aider les structures du pays à suivre ce phénomènes qui est plus sensible au réchauffement climatique vécu en apportant des actions permettant d'atténuer ses effets par les systèmes de suivi et d'alerte existants et leur renforcement humain, matériel et financier.

VI.1. Introduction

Le nord-ouest Algérien, caractérisé par un climat varie du saharien au sud à sub-humide au nord, a vécu durant son histoire plusieurs périodes de sécheresses d'intensité variable. Certaines sont plus marquantes (1941-1943) avec des répercussions dramatiques sur le plan socio-économique (Medejerab & Henia, 2011), mais les occurrences les plus intenses et persistantes ont été enregistrées ces dernières décennies et marquées par un déficit pluviométrique important (Ghenim et al, 2010 ; Merniz et al, 2019). Devant l'hypothèse d'un réchauffement planétaire et une augmentation de la demande en eau et du stress hydrique, on s'interroge aujourd'hui sur l'éventualité d'une amplification des impacts d'une augmentation de la fréquence de ce risque.

Ce chapitre vise à contribuer à la connaissance du contexte géo-climatique, le milieu physique, les potentialités en ressources hydriques pour mieux comprendre le contexte de la sécheresse.

VI.2. Caractérisation de la région d'étude

VI.2. 1. Contexte géographique

S'étend entre les méridiens 2° Ouest et 4° Est et entre les latitudes 34°15' et 35°30' Nord avec une superficie de 63 785 km², zone d'étude couvre les bassins versants suivants (Figure VI.1) :

- Le Chélif (01) : ce bassin présente une superficie de 43750 km² ;
- Le côtier Oranais (04) : ce bassin s'étend sur une superficie de 5913 km² ;
- La Macta (11) : ce bassin s'étend sur une superficie de 14390 km² ;
- La Tafna (16) : situé à l'extrême nord-ouest, couvrant une superficie de 7245 Km² ;

Cette région est limitée au Nord par la mer Méditerranéenne, à l'Ouest par la frontière Algéro-Marocaine, au Sud par les hautes plaines et à l'Est par le prolongement du Massif de l'Ouarsenis.

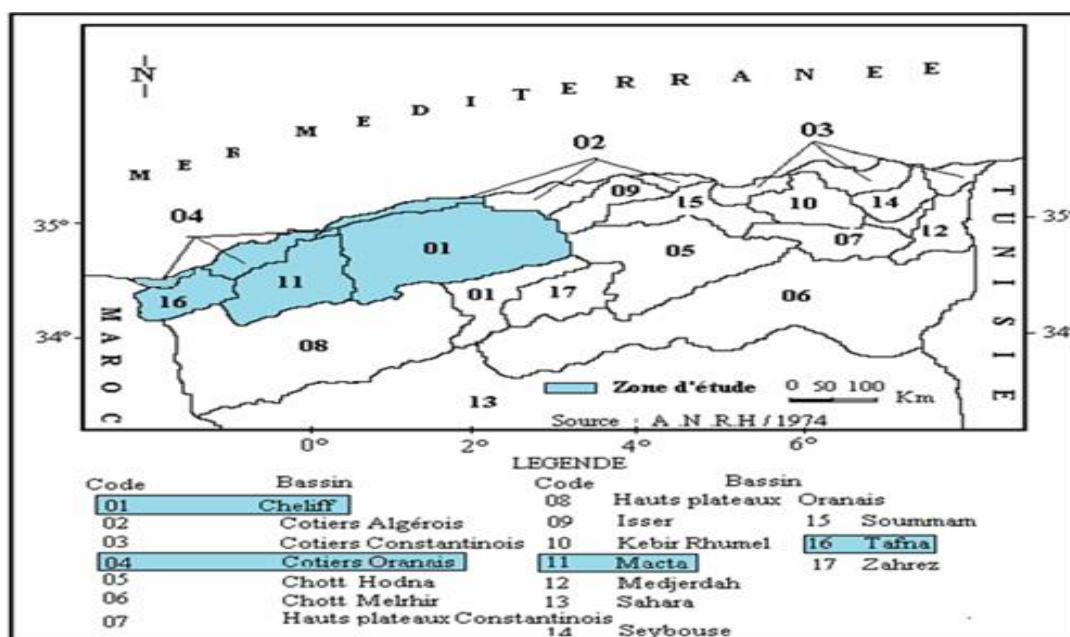


Figure VI.1 : localisation de la zone d'étude par rapport aux bassins versants (source ANRH, 1974)

VI.2.2. Climatologie

L'Algérie est caractérisée par une variabilité temporelle et spatiale de son climat. Plusieurs travaux ont été effectués pour classier les zones climatiques de l'Algérie, dont le plus utilisé est celui établi par le CNERIB (1993).

Le climat varie du semi-aride au Nord Est au saharien au sud, avec une continentalité marquée tenant compte de la latitude de la zone et de la disposition d'orientation Est-Ouest des reliefs ce qui limite le passage des perturbations d'origine Méditerranéennes et Atlantiques porteuses de pluie vers l'intérieur du pays. Cette variabilité se distingue généralement d'un bassin à l'autre et même au sein du bassin (Medejerab & Henia, 2011).

Le Bassin du Chelif : est soumis à l'influence conjuguée de l'altitude, la mer et du relief. Il est caractérisé par une longue période estivale sèche variant de 5 à 6 mois au niveau des Hautes Plaines et de 3 à 4 mois sur le littoral (Meddi et al, 2010).

Le Bassin de la Macta : Au nord, ce bassin est caractérisé par un climat méditerranéen. Une tendance continentale s'affirme en allant vers le Sud, qui se traduit par une aridité bien marquée, des hivers froids et des étés particulièrement chauds (Meddi et al, 2009).

Le Bassin de la Tafna et le celle des Côtiers oranais sont soumis à un régime climatique semi-aride frais dont deux saisons sont prédominantes : une saison humide avec des précipitations assez régulières et l'autre saison sèche (MRE, 2006a, b ; Hamlet, 2014).

VI.2.2.1. Pluviométrie

Cette région est marquée par une des précipitations faibles et irrégulières aussi bien au pas de temps saisonnier qu'annuel (Medjerab, 1998 ; Medjerab & Henia, 2011). Il arrive même qu'il ne pleut pas pendant plus d'un mois en dehors de l'hiver et ceci est de plus en plus fréquent.

Par contre, certaines années sont marquées par des précipitations importantes sur la zone, causant des inondations parfois catastrophiques (1935, 1974, 1996, 1999, 2001, 2010) (Medjerab & Henia, 2011).

En Algérie, le gradient pluviométrique est globalement croissant d'Ouest en Est et décroissant en allant vers le sud, confirmant ainsi les principaux gradients longitudinal, latitudinal et pluviométriques connus pour l'Algérie (Aissani et al, 1995 ; Meddi H & Meddi M, 2009 ; Bouaoune & Dahmani-Megrerouche, 2010 ; Taibi et al, 2013).

En ce qui concerne la variabilité interannuelle, la pluviométrie annuelle reçue s'avère du régime pluviométrique saharien (la station météorologique de Maghnia a enregistré 125 mm durant l'année hydrologique 1919-1920 ; la station Haçaiba a aussi enregistré un apport pluviométrique de 79 mm en (1975-1976), tandis que les minima pluviométriques dans la partie Est de l'Algérie demeurent supérieurs à 200 mm (Merniz et al, 2019).

L'influence de l'altitude est variable sur la distribution géographique des pluies. On enregistre en fonction de l'altitude des précipitations importantes dans les stations exposées aux flux pluvieux dont la variation du gradient pluviométrique est de l'Ouest vers l'Est. Cependant, l'altitude n'est pas toujours le facteur déterminant de cette distribution. D'autres facteurs comme la distance de la station par rapport au sommet, la morphologie de l'orographie, la position du relief par rapport à la mer jouent aussi un rôle important (Medjerab & Henia, 2005). Une étude menée par Meddi et al. (2010) a souligné que la variabilité temporelle de la pluviométrie annuelle dans la partie occidentale de l'Algérie est aussi influencée par l'ENSO.

Selon une étude réalisée par Medjerab & Henia (2005) sur la régionalisation des pluies annuelles sur ce territoire, quatre régions sont déterminées (figure VI.2) :

CHAPITRE VI : Présentation de la région d'étude

- la première région pluviométrique au sud, est la moins humide du fait d'un effet d'abri et de l'influence modérée de la continentalité et de l'altitude. La distribution pluviométrique est très irrégulière au cours de la saison. Le régime est de type continental dont les maxima se placent pendant l'automne et le printemps ;
- la seconde est plus humide que la première, les moyennes pluviométriques annuelles sont partout supérieures à 400 mm, alors que le coefficient de variation est inférieure à 0,21, le régime pluviométrique se distingue parfois à l'échelle mensuelle par un double maximum : décembre et/ou janvier ;
- la troisième région se distingue par l'importance relative des totaux pluviométriques supérieurs à 500 mm, et par une certaine régularité des précipitations. Le coefficient de variation est de l'ordre 0,19, le régime pluviométrique se distingue par un maximum qui s'enregistre durant la saison froide ;
- la quatrième région est la plus humide. Elle exprime l'effet simultané de la circulation atmosphérique régionale et de l'orographie pendant toute l'année. La moyenne pluviométrique annuelle atteint 600 mm, dont le régime se distingue par un maximum pendant la saison froide, et par des précipitations relativement intenses.

Ces résultats se concordent avec ceux présentés sur la carte pluviométrique du Nord Algérien établie par Margot (2016) (moyenne sur la période 1986-2005).

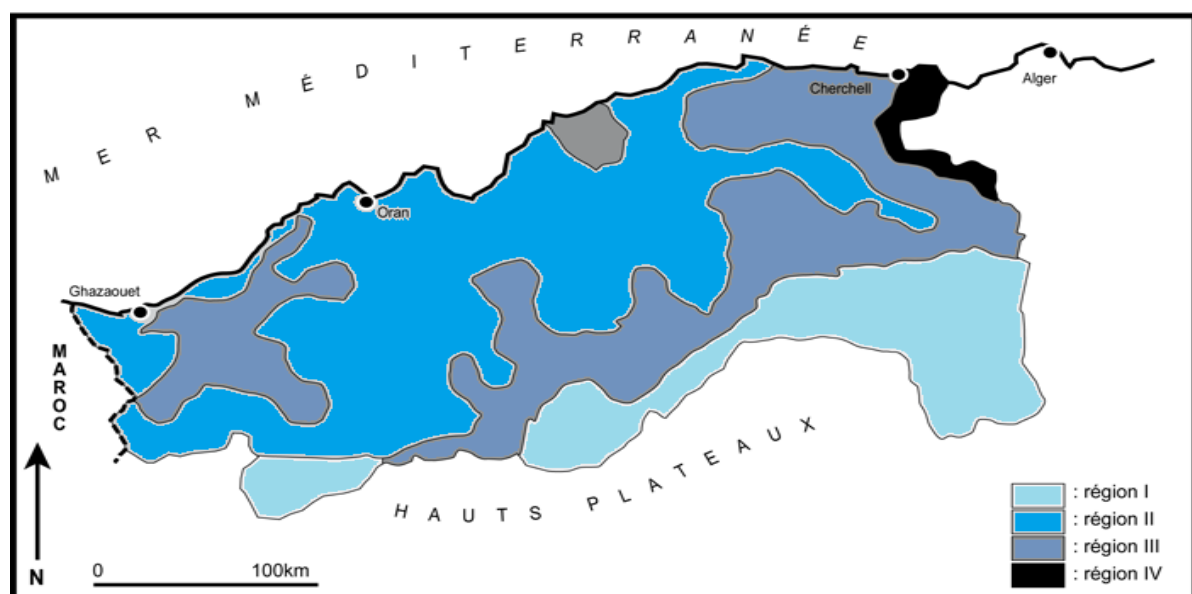


Figure VI.2 : régionalisation des pluies dans la région d'étude (Medjereb & Henia, 2005)

Par ailleurs, beaucoup de travaux ont mis en évidence une baisse significative des précipitations au Nord-Ouest de l'Algérie depuis la moitié des années 70 (Meddi & Hubert, 2003, Yebdri et al, 2007 ; Meddi H & Meddi M, 2009, Nekkache-Ghenim et al, 2010 ; Meddi et al, 2013; Nichane & Khelil, 2015 ; Otmame et al, 2018). Ce déficit est traduit par des sécheresses d'ampleur variable. Elles ont eu des conséquences négatives sur le régime d'écoulement des oueds et donc sur l'alimentation de la nappe phréatique et le niveau de stockage des barrages (Meddi et al, 2010). Les fluctuations du régime pluviométrique à la station Bouhanifia (1964-2014) confirment cette persistance à la sécheresse (figure VI.3).

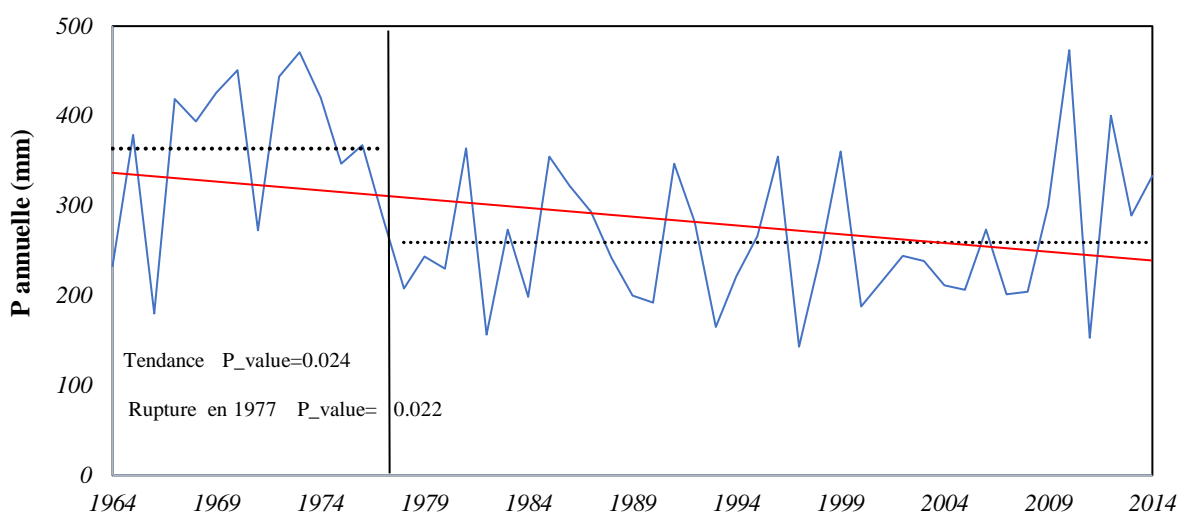


Figure VI.3 : Evolution du régime pluviométrique annuel à la station Bouhanifia (1964-2014)
La ligne rouge est la tendance linéaire ajustée sur les données. La ligne verticale est la date probable de rupture et les lignes noires sont les moyennes des données de part et d'autre de la date de rupture.

VI.2.2.2. Températures

L'analyse des températures de l'air comme les précipitations a suscité un intérêt croissant dans la communauté scientifique (Raziei, 2014). Le régime de température est aussi un facteur clé dans la distribution saisonnière des débits (Sicart et al, 2011).

Concernant la région d'étude, la mer méditerranéenne tend à adoucir les températures, ceci est plus ressenti sur la zone littorale. Les températures sont influencées aussi par l'effet du relief distingué par l'altitude. Le contraste saisonnier est nettement senti entre l'hiver et l'été et s'accroît fortement en allant vers l'intérieur (Touazi, 2001). La moyenne minimale des températures du mois le plus froid est comprise dans les régions littorales entre 3°C et 9 °C, alors que dans certains sommets, elle s'abaisse jusqu'à 3°C à 2°C. La moyenne maximale des températures du mois le plus chaud varie de 28 °C à 31 °C sur le littoral et de 33 °C à 38 °C dans les Hautes Plaines steppiques (MRE, 2009).

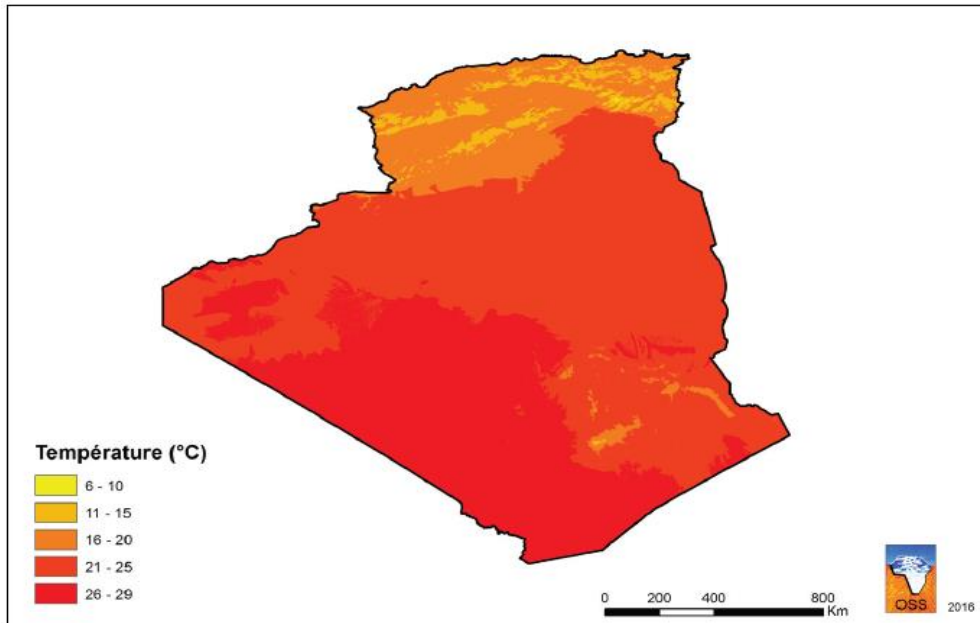


Figure VI. 4 : Températures moyennes annuelles en Algérie entre 1979 et 2013 (OSS, 2016)

Contrairement à la baisse remarquable de la pluviométrie durant les dernières décennies, les températures enregistrées sont globalement caractérisées par une tendance à la hausse quoique lente depuis la décennie 1970. La variation des températures annuelles moyennes enregistrées à Bouhanifia pendant la période 1964-2014 montre clairement cette tendance (figure VI.5)

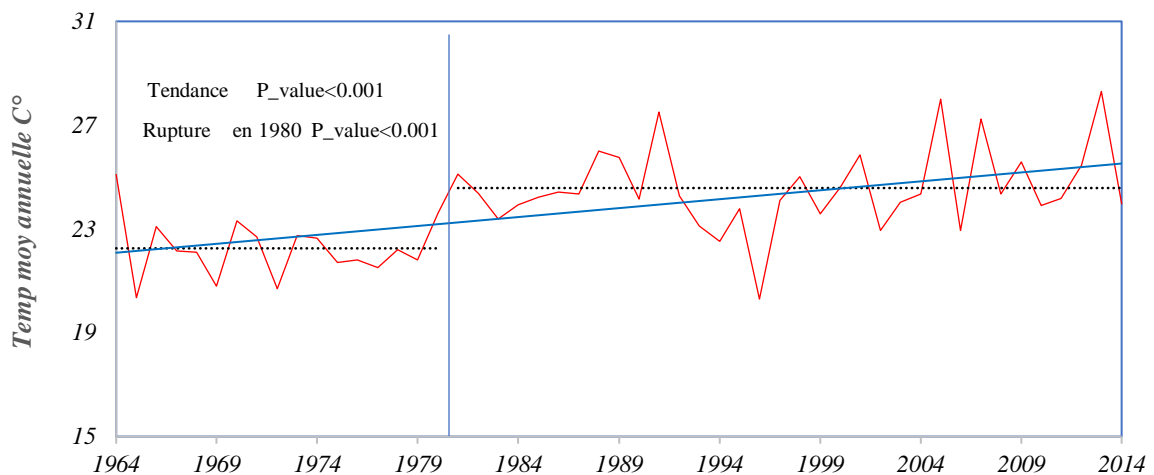


Figure VI.5 : Evolution des températures moyennes annuelles à la station Bouhanifia (1964-2014)
La ligne bleue est la tendance linéaire ajustée sur les données. La ligne verticale est la date probable de rupture et les lignes noires sont les moyennes des données de part et d'autre de la date de rupture.

VI.2.2.3. Evapotranspiration Potentielle

L'Evapotranspiration Potentielle (ETP) est généralement considérée comme une référence climatique traduisant l'incidence du climat sur le niveau de l'évapotranspiration des cultures.

CHAPITRE VI : Présentation de la région d'étude

En domaine hydrologique, elle sert de référence pour évaluer le bilan hydrologique d'un bassin versant donné et en agronomie, elle fournit des indications sur les besoins en eau d'une culture ou sur l'état hydrique auquel la végétation est soumise (Zhao et al, 2013).

Ce paramètre est étroitement lié à l'humidité de l'air et à la température, et son intensité est fortement augmentée par les vents notamment les vents chauds (Toutain, 1979). On récapitule dans le tableau VI.1 la variation mensuelle et annuelle de l'évapotranspiration au niveau de quelques stations dans la région d'étude pour la période (1992-2002)

Tableau VI.1 : Moyennes mensuelles et annuelles des évapotranspirations en mm en quelques stations de l'Ouest Algérien (1992-2002) (source : ANRH, 2007)

Station	Janvier	Fevrier	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Decembre	Annuelle
Arzew	112	110	108	143	138	136	134	170	136	114	111	109	1512
Béni Saf	67	54	62	74	83	83	90	99	80	66	76	77	912
Chlef	64	76	113	141	201	262	326	303	201	139	81	64	1972
El Ghazaouet	77	73	73	91	88	97	105	100	82	76	78	78	1019
Maghnia	117	110	132	163	193	241	294	297	196	156	120	112	2130
Mascara	99	98	137	156	209	268	306	296	199	159	100	82	2110
Oran Port	105	94	110	135	123	105	112	137	124	109	105	111	1371
Saïda	119	123	168	196	266	340	405	389	263	202	131	118	2718
Tlemcen Zenata	97	94	113	146	164	211	237	231	178	139	109	100	1817
Tiaret	97	105	149	179	208	337	406	412	257	196	119	91	2556

Ces données sont des résultats de campagnes de mesures obtenus par l'ANRH (1992-2002) en utilisant l'appareil de Piche qui fournit des valeurs proches aux valeurs réelles de l'évapotranspiration potentielle.

CHAPITRE VI : Présentation de la région d'étude

Selon la carte établie par l'ANRH (2007), les valeurs moyennes annuelles d'évapotranspiration varient généralement entre 1000 et 2000 mm/an au Nord (figure VI.6). Elles atteignent les valeurs maximales dans les régions du Sahara 2000-2500 mm/an.

L'évapotranspiration potentielle donc, est très variable spatialement, avec une dominance très claire des régions enregistrant d'un stress hydrique plus ou moins important. En revanche, le confort hydrique n'est représenté que sur une faible surface.

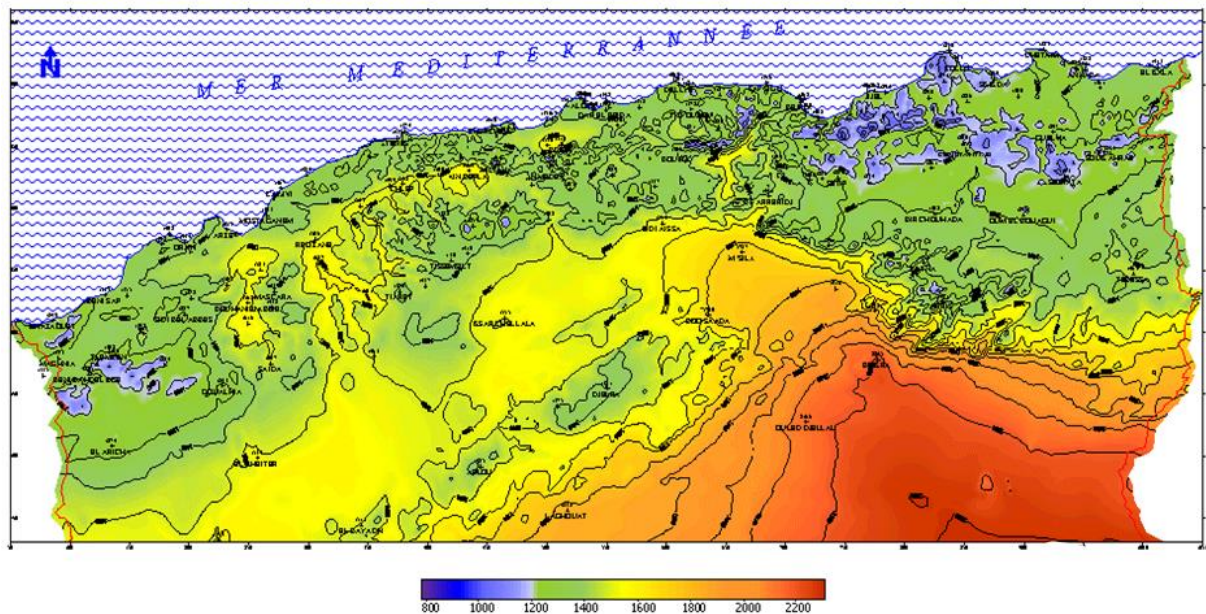


Figure VI.6 : Carte des évapotranspirations potentielles moyennes annuelles sur l'Algérie du Nord (ANRH, 2007)

VI.2.2.4. Insolation (gisement solaire)

L'insolation ou le gisement solaire est un ensemble de données présentant l'évolution du rayonnement solaire disponible durant une période donnée.

L'Algérie, terre de soleil par excellence, où les durées moyennes annuelles d'ensoleillement varient entre 2600h/an dans le Nord à 3500h/an dans le sud (Capderou, 1987). Son climat est donc, très favorable pour l'utilisation de l'énergie solaire.

Par ailleurs, la durée d'ensoleillement sur la région d'étude est variable selon des facteurs géographiques à savoir l'altitude, la latitude, la longitude et climatiques tels que la nébulosité ou les pluies. Cette variation est plus importante pour les mois estivaux (Mai, Juin, Juillet) par rapport aux mois hivernaux (Décembre, Janvier, Février).

VI.2.3. Bioclimatologie

L'étage bioclimatique selon Emberger (1955), correspond à chacun des paysages à végétation déterminée en fonction du climat qui en caractérise. La succession des étages de la végétation expriment aussi l'influence de l'altitude en relation avec les niveaux bioclimatiques (Ozenda, 1975, 2002). La limite de chaque étage bioclimatique varie, principalement, en fonction des facteurs climatiques, du sol et du relief.

L'analyse de la carte des étages bioclimatique (figure VI.9) qui illustrent les conditions fournies à la végétation révèle que la région s'individualise par une succession d'étages bioclimatiques, s'étirant en allant du Nord vers le Sud. Certes, ces étages bioclimatiques, allant de l'humide supérieur au nord vers l'étage aride passant par l'étage subhumide et l'étage semi-aride tout en soulignant la partie convenable à la partie humide et subhumide, alors que la partie semi-aride et aride couvre la quasi-totalité de la région.

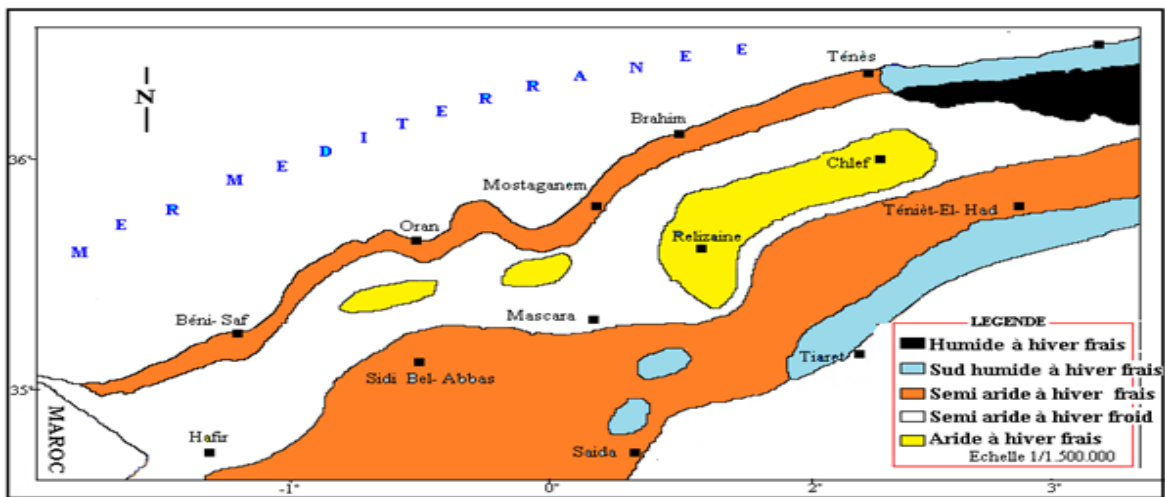


Figure VI.7: Carte des étages bioclimatiques de la région d'étude (Medjereb & Henia, 2005)

VI.2.4. Contexte géologique

Plusieurs travaux et études géologiques, hydrogéologiques et paléontologique ont été effectués dans le Nord Algérien, depuis le début du 19^{ème} siècle (par exemple : Renou, 1848 ; Welsch, 1890 ; Deleau (1935-1936) ; Savornin (1940-1948) ; Sadran (1952-1958) ; Auclair & Biehler en 1967 ; Guardia, 1975 ; Atrops et Benest, 1978 ; Megartsi, 1985 ; Hallouche, 1986). Vu l'étendu spatial et la variation lithologique d'une région à l'autre au sein du même âge géologique, il est très difficile de donner une description assez fidèle de la lithologie constituant les grands bassins sédimentaires. Cependant, les recherches ont montré que la structure actuelle du Nord de a été caractérisées par deux représentations tectoniques importantes, une Orogenèse

Alpine dominante et une Orogenèse Hercynienne, qui ont donné présence à trois ensembles structuraux grands de l'Algérie septentrionale, on y distingue du Nord au Sud (Safa, 2010).

1. Domaine Tellien Au nord, une région complexe, constituée de nappes mises en place au Miocène inférieur, de bassins intra montagneux d'âge néogènes tardifs (bassin du Chéelif), dont la série sédimentaire s'étend du Jurassique au Miocène (Neurdin-Trescartes, 1992). Ainsi, dans les zones occidentales du Tell, on observe des plis, d'âge Plio-Quaternaire, résultant d'une direction de raccourcissement NNW–SSE (Thomas, 1985). Cette région est caractérisée par des reliefs jeunes modelés au cours du Tertiaire par les mouvements alpins qui sont les témoins d'une tectonique cassante matérialisée par des accidents limitant des plaines d'effondrement, plus basses topographiquement que les reliefs qui la ceinturent. Ces plaines sont caractérisées par un substratum rocheux recouvert en surface d'alluvions (Hatzfeld, 1978).

2. Domaine de la Meseta sud-oranaise au centre (hauts plateaux), avant-pays alpin, à petite couverture sédimentaire où les processus locaux ont permis la formation de bassins intra montagneux comme le bassin de Telagh ou au Sud de Tabia (Gautier, 1909).

3. L'Atlas saharien constitue un édifice atlasique plissé constitué d'un grand alignement structural qui le subdivise en trois faisceaux de plis : les Monts des Ksour (Atlas saharien occidental), les Monts des Oulad Naïl (Atlas saharien oriental) et le Djebel Amour (Atlas saharien central). Les affleurements, principalement jurassiques, forment des structures anticlinales étroites et longues, séparés par de larges synclinaux dont les affleurements gréseux du Crétacé inférieur constituent les grands systèmes hydrogéologiques (Cornet, 1952). La partie occidentale de l'Atlas saharien forme une région montagneuse à chaînons allongés, de direction sud-ouest –nord-est, séparés par de larges dépressions (Mekahli, 1995) où les compartiments sont limités par de grandes failles normales. Cette tectonique qui a compartimenté les formations calcaires a eu pour conséquence d'isoler, plus ou moins, les aquifères karstiques les uns des autres (Hamlat, 2013).

VI.2.5. Caractéristiques physiques

VI.2.5.1. Relief

La région d'étude est caractérisée par une topographie régulièrement ordonnée et assez simple, s'organisant selon une ligne dorsale : les chaînons de l'Atlas Tellien au Nord, et les basses plaines qui constituent deux groupes topographiques : la Mléta à l'Ouest, et la Habra à l'Est.

CHAPITRE VI : Présentation de la région d'étude

Elles sont séparées de la mer par un bourrelet montagneux depuis Dahra à l'Est jusqu'à les Traras à l'Ouest (Medjerab & Henia, 2011).

Les principaux monts dans cette zone sont les monts du Dahra-Zaccar qui ont une altitude allant de 700 à 1 580 m, l'Ouarsenis avec près de 2 000 m d'altitude, les monts de Tessala (point culminant à 1061 m), les monts de Beni Chougrane (932 m), les monts de Saïda (1201 m au djebel Tiffrit), les monts de Dhaya (1455 m au djebel Mezioud) (Fenet, 1975).

L'Atlas Tellien ne forme pas une chaîne de montagne continue où il est découpé par une série de plaines (Plaines d'Oran) au voisinage de la mer, du Chélif et du Sig et ces plaines se dressent les petites hauteurs du Sahel Oranais qui tombent à pic dans la mer et forment une cote abrupte et rocheuse : les baies (Arzew, Oran) sont rares et peu abritées (Prigent, 1949).

Dans l'Oranais, le bourrelet tellien se morcelle en un grand nombre d'unités de relief peu étendues : La chaîne tellienne méridionale (monts des Beni Chougrans, des Tessalas, massif de l'Ouarsenis, domine au sud une suite de plaines intérieures (plaine de Tlemcen, de Mascara, de Sidi-bel-Abbès, du Sersou), situées en contrebas des hautes plaines oranaises. La chaîne tellienne côtière est constituée à l'ouest par les petits massifs de la région d'Oran (Murdjajo) et les massifs d'Arzew. Les plaines et les djebels de l'Oranais forment une zone sèche à l'intérieur du Tell algérien. La région se trouve relativement abritée des flux d'air atlantique par les hautes montagnes de l'Espagne méridionale et du Maroc.

Au sud de ces collines du Sahel, se présente des petits massifs montagneux, plus hauts : Monts du Tessala de Tlemcen, le massif de l'Ouarsenis, qui atteint près de 2000 mètres, est le plus important (Gsell, 1911). Les montagnes, surtout les plus hautes, reçoivent quelques pluies supplémentaires. Entre ces massifs s'étendent des plaines intérieures : plaines de Tlemcen, de Mascara, de Sidi Bel-Abbes.

Au Sud de l'Atlas Tellien, se forme une série de hautes plaines : la plaine de Ghriss limitée au Sud par un nouveau bourrelet montagneux (monts de Saïda et Daya) qui la sépare des hautes plaines steppiques, en constituant la limite méridionale du Tell Oranais (Figure VI.11). Ces reliefs, d'une altitude moyenne oscillant entre 400 (région de Sidi Bel Abbès) et 720 m (région de Sidi Ali Ben Youb), sont coincées entre les chaînes telliennes médianes et l'Atlas tabulaire formé par les Causses oranaises (Kazi- Tani, 2010)

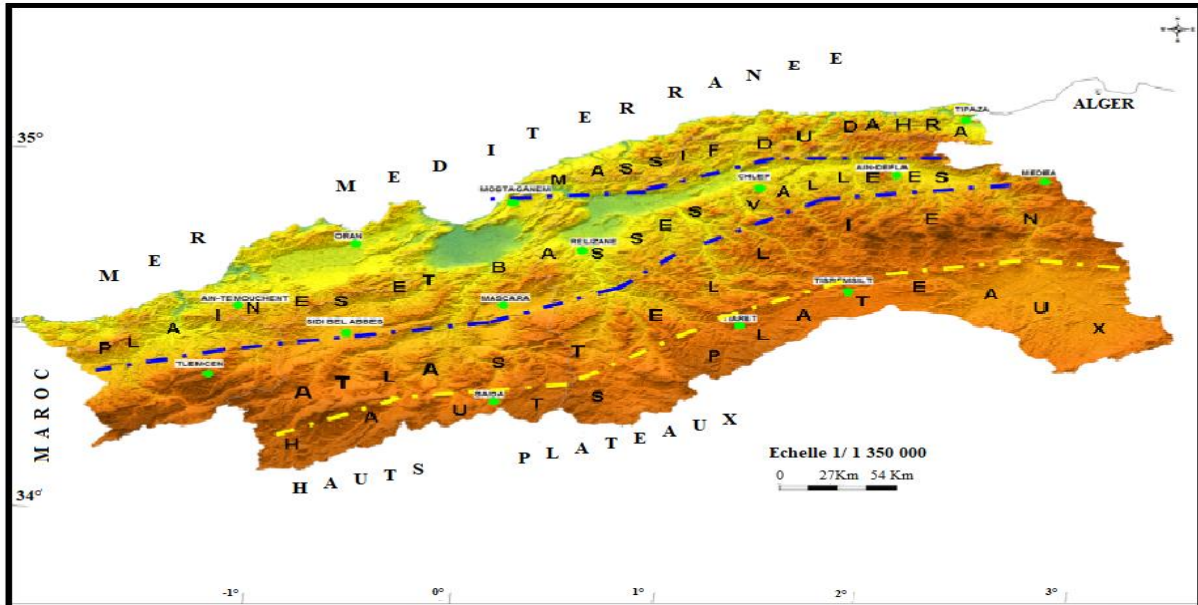


Figure VI.8 : Présentation du relief de la région d'étude (Medjerab, 2005)

VI.2.5.2. Couvert végétal

La présence de la végétation est profitable à l'équilibre du cycle hydrologique au niveau du bassin alors que sa discontinuité, ou son absence totale est un facteur favorable à l'irrégularité des débits et à la genèse de crues violentes, surtout sur les terrains en pentes fortes où les sols sont très sensibles au ruissellement direct (El Garouani, 2004). La couverture végétale et la nature du sol complètent les caractéristiques d'ordre physiographiques et celles du réseau hydrographique des bassins versants (Anctil et al., 2012).

La combinaison des facteurs purement naturels et anthropiques, conjuguée aux variations du régime pluviométrique, est à l'origine des formations naturelles occupant des sols où dominant des espèces bien adaptées aux conditions du milieu et à son mode d'exploitation (Si Tayeb & Benabdeli, 2008). En allant du nord vers le sud on traverse différents paysages :

-La zone tellienne qui est constituée par des plaines côtières et des plaines internes les forêts de chênes et de pins, des maquis et matorrals (thuya, olivier et lentisque) vers les steppes semi arides et arides (alfa, sparte et armoise) puis les écosystèmes désertiques (acacias et divers espèces graminées).

-La zone steppique qui représente la végétation habituelle des hautes plaines, composée de basses plantes qui sont adaptées à la sécheresse mais qui couvrent mal le sol et (armoise, Halfa, etc.). Certaines espèces végétales poussent rapidement après la pluie puis disparaissent presque

aussitôt. On y trouve quelques forêts de sapins, des forêts claires de chênes verts et de pins d'Alep, de genévriers, et même quelques cédraies sur certains sommets.

Pour la partie occidentale, le régime pluviométrique annuelle qui a connaît une régression importante depuis les années 70 agit directement sur l'occupation de la végétation et des espaces (Benabdeli & Mederbal, 2004). les zones sensibles à la dégradation se trouve tant dans la partie tellienne constituée de massifs montagneux érodés que dans les parcours steppiques, limités par les isohyètes 100 et 400 mm (Benslimane et al., 2009). Cette dégradation continue du patrimoine végétal qu'a connu la région est accentuée aussi par la surexploitation remarquable, l'extension anarchique des villes et surtout par les incendies, ce qui a engendré une accélération de l'érosion.

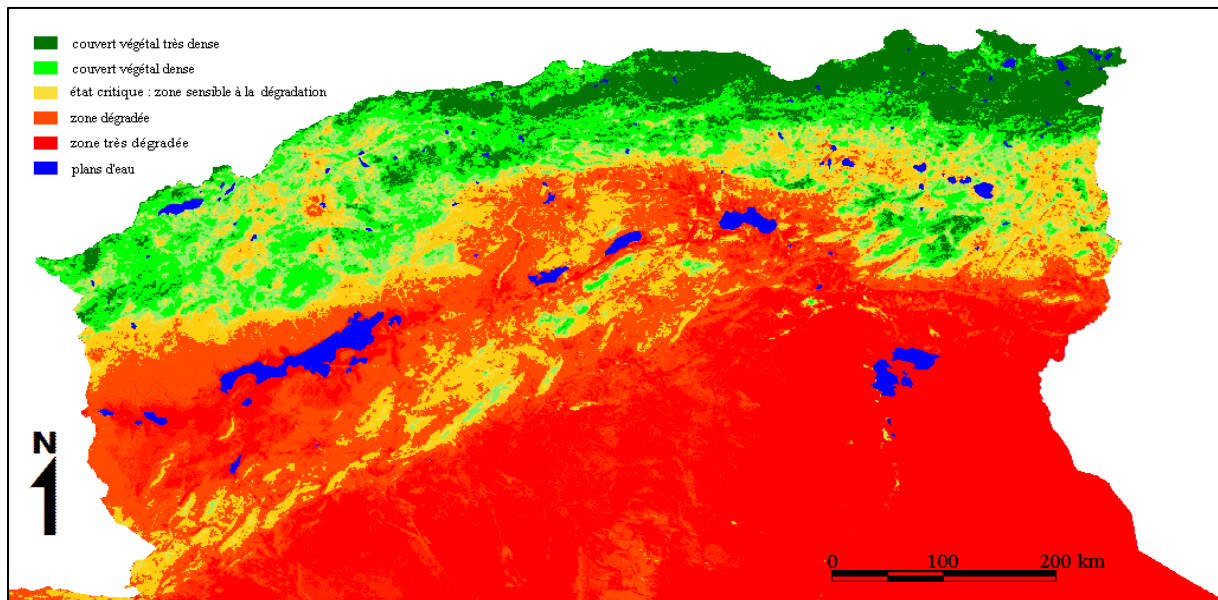


Figure VI.9 : Carte synthèse de sensibilité à la désertification en Algérie du Nord (2000-2005)
source : Benslimane et al., 2009

VI.2.6. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est principalement influencé par quatre facteurs, à savoir : la géologie, la pente du terrain, le climat et l'intervention humaine (Hallouche, 2017).

Du point de vue hydrographique, le pays se divise en deux versants et en un bassin intérieur soit donc ceux du Tell et de l'Atlas saharien alors que le bassin intérieur comprend les cours d'eau du plateau qui se déversent dans les chotts (ANRH, 1999).

La morphologie de l'Algérie faite de barrières montagneuses, organisant une structure hydrographique formée de cours d'eau courts qui se jettent dans les dépressions (dans la zone méridionale) ou dans la mer (dans la zone septentrionale).

D'une façon générale, le réseau hydrographique du pays est assez dense, conséquence d'une lithologie à forte fraction argileuse des terrains qui constituent les bassins (ANRH, 1993). Ce qui entraîne sur le plan hydrologique : (i) une extrême irrégularité saisonnière et interannuelle des écoulements accentuée par de longues périodes de sécheresse ; (ii) des crues fortes et rapides ; (iii) une érosion importante et des transports solides considérables (Kadi, 1997).

Le Cheliff est le géant cours d'eau parmi eux, avec 700 Km de long, tous les autres, ont moins de 300 Km de long, et plusieurs sont moins de 200 Km, alors qu'aucun des oueds algériens n'est navigable (Gautier, 1911). Ils prennent leur source à des altitudes oscillant autour de 1200 m ; leur pente moyenne est donc forte. Ils transportent des quantités d'eau médiocres et irrégulières (Gautier, 1911). C'est la conséquence, d'une part, de l'étroitesse de la bande tellienne et du caractère morcelé du relief d'autre part, qui ne dépasse jamais une largeur de 150 à 200 km. C'est pourquoi les cours d'eau sont brefs ; ils se nomment « oued » plutôt que rivière, le réseau est hiérarchisé, dont le débit croît régulièrement de la source vers l'embouchure.

Les bassins versants représentant notre région d'étude appartiennent aux deux différentes régions hydrographiques à savoir l'Oranie-Chott-Chergui qui couvre le bassin de la Macta, Tefna et côtiers oranais et la région Chelif Zahrez dont se trouve le bassin du chellif :

VI.2.6.1. Bassin versant de la Tafna

Il couvre la totalité de la Wilaya de Tlemcen (77% de sa superficie totale) et déborde sur le royaume du Maroc. L'Oued Tafna est le principal cours d'eau du bassin versant. Ce dernier prend sa source dans la grotte de Ghar Boumaâza dans les monts de Tlemcen avec une longueur qui atteint 150 kilomètres (Dahmani et al, 2003). Le cours de cet oued peut se subdiviser en trois parties : la haute Tafna, la moyenne Tafna et la basse Tafna.

Le bassin versant de la Tafna possède six affluents. Le sous bassin de Sebdou se situe dans la partie sud de la Tafna, son exutoire est localisé à l'entrée du barrage de Beni-bahdel, alors que le cours d'eau prend naissance à Ghar Boumaaza. Le sous bassin de Khémis possède une superficie de 378 km², se situe dans la partie Sud de la Tafna, son exutoire est localisé à l'entrée du barrage de Beni-bahdel. Le sous bassin de Chouly, localisé dans la partie Est de la Tafna a

CHAPITRE VI : Présentation de la région d'étude

une superficie de 326 km², son exutoire est localisé dans la commune d'Oued Lakhdar. Le sous bassin d'Isser, qui a une surface de 1140 km², il se situe dans l'Est de la Tafna. Son approvisionnement en eau a nettement diminué depuis la construction du barrage Sidi Abdelli qui conserve la plupart de l'eau pour l'irrigation (Taleb et al, 2008). Le sous bassin de Sikkak, qui couvre 463 km², se situe dans l'Est de la Tafna. Enfin le sous bassin de Mouilah qui s'étale sur une superficie de 2650 km², se situe dans l'Est de la Tafna, c'est le plus grand sous bassin. Sur la Tafna ont été édifiés cinq barrages, Béni Bahdel, Meffrouch, Hammam Boughrara, Sidi Abdelli, Sikkak dont les capacités varient entre 15 et 177 Mm³ (Zettam, 2018).



Figure VI.10. Photo d'oued Tafna
(Source: Hafied, 2021)



Figure VI.11. Photo d'oued Mouilleh

VI.2.6.2. Bassin des Côtier Oranais

Il regroupe trois bassins versants (Côtier Oranais Est, Côtier Oranais Centre et Côtier Oranais Ouest) (ABH- OCC, 2004). Le plus grand est celui du Côtier Oranais Centre avec une superficie d'environ 4621 km². Ce dernier abrite la sebkha d'Oran qui est une dépression salée de type endoréique et les salines d'Arzew (5.778 ha) (DGF, 2004). Il est composé de :

- Sous Bassin Côtier Occidental : est caractérisé par plusieurs affluents qui dévalent des monts des Traras et débouchent directement dans la mer. Parmi ses principaux oueds : Oued Marsa.
- Sous Bassin Côtier Central : occupant la plus grande partie de la superficie totale de l'ensemble du bassin des Côtiers Oranais avec un pourcentage de 80% ; il est caractérisé par la présence de dépressions sublittorales endoréiques ; Sebkhha d'Oran, saline d'Arzew et le lac Telamine (Boukhlija-Hassen, 2011).

L'Oued le plus important est celui d'El Maleh, qui prend son origine des hauteurs des monts des Tessala avec deux principaux affluents : Oued Meteguer et Oued Senane. Les principaux Oueds du Sous bassin Côtier Oriental sont : Oued Tine qui prend son origine de Sirat dans un terrain argileux jusqu'aux marais de la Macta et Oued Ain Sefra qui prend naissance dans la zone Est de la ville de Mostaganem.

La grande sebkha d'Oran, avec une superficie de 296 Km², occupe le 1/6 du territoire de la wilaya d'Oran et qui a la particularité d'avoir une ressource en eau superficielle riche en sel, dont l'Oued Tlelat est le principal oued alimentant la sebkha (Boukhlia-Hassen, 2011).

VI.2.6.3. Bassin versant de la Macta

Il est composé de 16 sous bassins versants. Le plus important est le celui de l'Oued Mekerra. L'Oued El Hammam à l'Est l'Oued Mekerra à l'Ouest qui sont les deux principaux cours d'eau, se rejoignent pas loin de la côte Méditerranéenne pour former la Macta.

Le régime hydrologique de la Macta est la résultante du climat semi-aride, marqué par l'irrégularité des précipitations, un relief différencié, dont la pente irrégulière et faible, avec la prédominance de terrains perméables (Cherif et al, 2009).

Tel qu'il se présente, ce bassin, situé dans le versant des hautes plaines oranaises, peut être classé parmi les régions semi-arides. La structure de réseau hydrographique du bassin est très dense à l'amont et allongé en aval, et le ruissellement torrentiel laisse apparaître dans quelques endroits la roche mère à nu (haute Mekerra) (Cherif et al, 2009).



Figure VI.12. Photo d'oued Mekerra

(source : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oued_sig.jpg?uselang=fr)

VI.2.6.4. Bassin versant du Cheliff

C'est un bassin exoréique représentant un intérêt hydrologique crucial, en raison de l'importance des flux transportés vers la mer, plus particulièrement en périodes humide, génératrices de crues. Il est caractérisé par une altitude minimale de 20 m. Ce bassin est drainé par l'Oued le plus remarquable et le plus important de toute l'Algérie du Nord par la longueur de son cours (700Km) et le volume de ses eaux. Il s'écoule parallèlement aux chaînes de l'Atlas. Il prend sa source sur le revers septentrional du Djebel-Amor jusqu'à la mer.

Il couvre quatre sous régions, le Chélif en amont de Boughezoul, le Haut et le moyen Cheliff, le Bas Cheliff, la Mina et le côtier. Il est limité au Nord par la Méditerranée, à l'Ouest par le bassin Oranais, au Sud par les hautes plaines et à l'Est par le bassin algérois. (ABH, 2004).

Le bassin Cheliff résulte de la jonction de deux cours d'eau importants :

l'Oued Touil et Nahr Ouassel, drainant respectivement une superficie de 16 338 km² et 3 651 km² dont la confluence donne naissance à l'Oued Cheliff.

De cet ensemble, il est possible de délimiter trois grandes parties du bassin :

- Le bassin Cheliff à l'amont du barrage Boughzoul : correspondant à l'Oued Touil et Nahr Ouassel.
- Le bassin Cheliff à l'aval du barrage Boughzoul : formé par l'Oued Cheliff et ses affluents jusqu'à son embouchure.

La vallée du Chélif, traversée par oued Chlef, se situe dans la partie nord du bassin versant du Chélif qui occupe 22 % de la superficie de l'Algérie du Nord. Elle est composée de trois plaines : la plaine du Haut-Chélif, la plaine du Moyen-Chélif et la plaine du Bas-Chélif

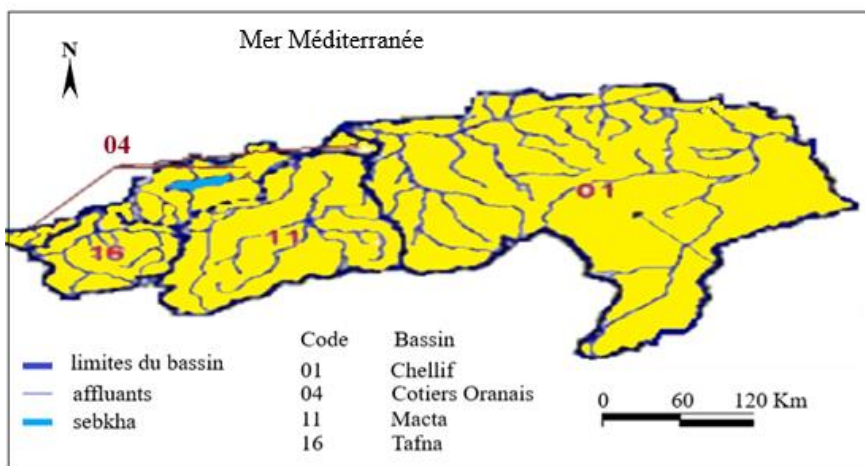


Figure VI.13 : réseau hydrographique de la région d'étude (source : ANRH, 1999)

CHAPITRE VI : Présentation de la région d'étude

Par ailleurs, les fluctuations saisonnières des débits des oueds sont tributaires de plusieurs de facteurs physiques et climatiques (les conditions climatiques, le régime pluviométrique, la lithologie des bassins, l'équipement en ouvrages hydrauliques, etc.).

Le maximum des débits est marqué pendant la période hivernale et le début du printemps, et le minimum (période d'étiage) pendant la période estivale et le début de l'automne (s'étend sur quatre à cinq mois).

VI.2.7. Ressources en eau

VI.2.7.1 Ressources en eaux superficielles

Les ressources en eau superficielles dans le territoire national sont hétérogènes et sont assez variables dans l'espace et dans le temps (Benkhamallah, 2021). L'apport pluviométrique total reçu par le nord du pays est de l'ordre de 92%. Les bassins hydrographiques à l'Est et au centre captent 80% d'apport total. Les écoulements dans la région d'étude sont en fonction des facteurs climatiques et de la structure géologique des terrains et ce sont marquées d'un point de vue quantitatif et qualitatif par une grande variabilité spatiale et temporelle dont les eaux superficielles sont stockées dans 20 barrages en exploitation. Ces ouvrages répondent à deux enjeux majeurs : la mobilisation des ressources pour l'usage domestique et industriel (AEPI) et agricole. Ces barrages sont illustrés dans le tableau VI.2.

Tableau VI.2 : caractéristiques des barrages de la région (ANBT, 2021)

Barrage	Surface bassin versant Km ²	Wilaya	Année de mise en service	Capacité dernier levé (2004-Hm ³)	Volume régularisé	Volume utile Hm ³	Etat de barrage
Beni Bahdel	1016	Tlemcen	1945	51,90	48	51,71	En exploitation
H. Boughrara	4000	Tlemcen	1999	161	59	145	En exploitation
Meffrouch	90	Tlemcen	1963	14,33	14	14,50	En exploitation
S. Abdelli	1137	Tlemcen	1988	102,03	30	95,02	En exploitation
Sekkak	241	Tlemcen	2004	24,08	22	24,08	En exploitation
S/total bassin Tafna				353,34	173	330,31	

CHAPITRE VI : Présentation de la région d'étude

Sarno	264	SBA	1956	19,71	10	19,70	En exploitation
Ouizert	2100	Mascara	1986	84,30	32	100	En exploitation
Bouhanifia	5570	Mascara	1950	34,52	45	34,52	En exploitation
Fergoug	8430	Mascara	1970	1,03	2,93	1	Envasé
Cheurfas II	4192	Mascara	1992	60,03	45	58	En exploitation
S/total bassin Macta				199,59	134,93	213,22	
SM Benaouda	6100	Relizane	1978	125,31	100	120	En exploitation
Bakhada	1280	Tiaret	1936	37,26	44	37,26	En exploitation
Dahmouni	425	Tiaret	1987	35,32	13	35	En exploitation
Merdja S. Abed	440	Relizane	1983	47,97	45	47	En exploitation
Gargar	2900	Relizane	1988	283,5	120	283,49	En exploitation
Sidi Yakoub	916	Chlef	1986	224,06	98	215,02	En exploitation
Oued Fodda	423	Chlef	1932	96,79	69	93,79	Envasé
Ouled Mellouk	876	Ain Defla	2003	114,36	38	111,41	En exploitation
Harreza	142	Ain Defla	1985	74,61	23	87,2	En exploitation
Deurdeur	468	Ain Defla	1986	107,54	40	107,54	En exploitation
Ghrib	23300	Ain Defla	1939	169,35	119,12	116,02	En exploitation
SM Bentaiba	275	Ain Defla	2006	70,22	56	68	En exploitation
S/total bassin Chellif				1386,29	765,12	1321,73	

Il y a lieu de citer quelques particularités sur ces ouvrages existant dans l'Ouest de l'Algérie :
Le barrage de Souani qui devrait servir à l'irrigation de la plaine de Maghnia a été déclassé.

CHAPITRE VI : Présentation de la région d'étude

-Le barrage de Fergoug n'a pas été considéré comme un réservoir mais plutôt comme un ouvrage régulateur (répartiteur). Selon les dernières observations, n'a presque plus de capacité de stockage suite à un fort envasement.

-Le cratère de Dzioua peut être considéré comme un réservoir naturel qui stocke de l'eau venant de la prise de Tafna.

-Le site des Trois Rivières, situé en amont de Bouhanifia, susceptible de compenser les pertes de capacité de ce dernier, et contribuer à améliorer la régularisation globale du Système Triplex, s'est avéré non faisable.

-La région Oranaise n'offre plus de sites potentiels avantageux pour des grands ou moyens barrages.

Comme indiqué pour les autres caractères physiques, il y a une importante différence d'écoulement entre la partie Est et l'Ouest. La première est montagneuse où s'écoulent les principaux cours d'eau du pays : le Rhumel (1.038 millions de m³), la Soummam (636 millions de m³) et l'Isser (527 millions de m³), alors que la seconde est riche en plaines et bassins mais faiblement arrosée, seul le Cheliff présente un débit remarquable (1.360 millions de m³) (Perennes, 1993).

La sécheresse en Algérie est aussi hydrologique en termes de taux de remplissage, des volumes mobilisés des ouvrages hydrauliques et de renouvellement des nappes notamment à l'Ouest du pays où depuis quelques décennies, on assiste à une augmentation des températures et de l'évaporation par rapport à une baisse importante des pluies et des écoulements (Touazi et al, 2004 ; (Khaldi, 2005 ; Meddi et al, 2009 ; Nekkache Ghenim & Megnounif, 2013).

La mesure des apports annuels dans certains barrages (exemple de Beni Bahdel et Bouhanifia) pendant la période 2002-2021 montre une tendance à la baisse qui est une réponse hydrologique à la sécheresse s'est installée dans la région (figure VI.14).

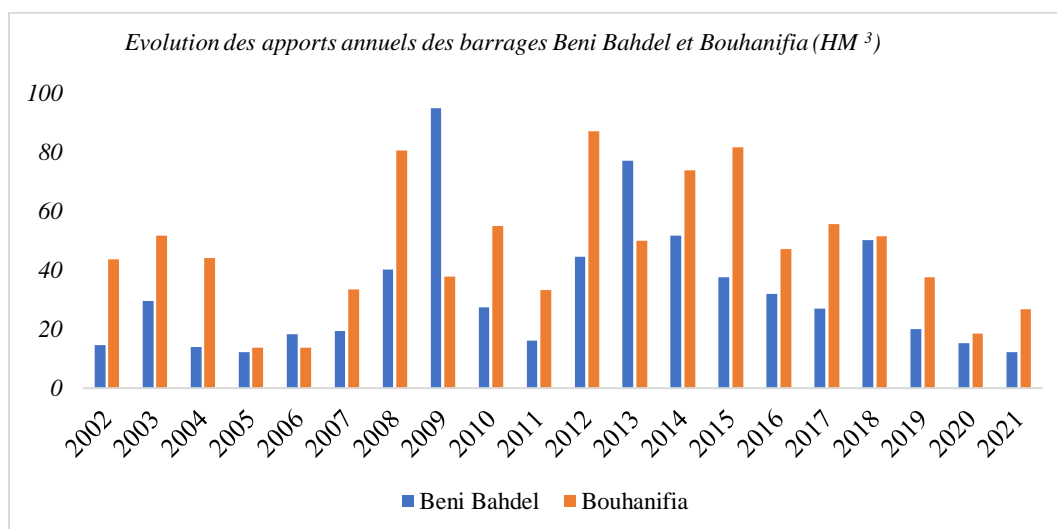


Figure VI.14 : évolution des apports annuels des barrages Beni Bahdel et Bouhanifia (2002-2021)

On note une variation assez importante des apports annuels alimentant les deux ouvrages. A Béni Bahdel, deux années à écoulement abondant ont été enregistrée (2009-2010 et 2013-2014) au cours de lesquelles le cours d'eau a véhiculé plus que la capacité du barrage. En revanche, les années les plus sèches en apports en eau, ont été observée en 2002-2003, les périodes 2004-2008, 2011-2012 et 2020-2021 dont le taux de remplissage ne dépasse pas 32% de sa capacité. A Bouhanifia, les années hydrologiques (2008-2009, 2012-2013 et 2015-2016) ont enregistré des apports en eau très importants dépassant la capacité de ce barrage. Ces années succèdent à des années très déficitaires à savoir les années 2005-2006, 2006-2007, 2011-2012 et 2020-2021.

En raison de la sécheresse ayant sévi en 2019-2020, le barrage d'Ouled Mellouk (bassin Chellif) a connu une baisse significative de ses stocks en eau, soit quelque 4 % de sa capacité de stockage ce qui a obliger les autorités locales, à mettre en service à la fin de l'année 2020, plusieurs forages en vue d'assurer l'eau potable aux neuf communes qui s'en approvisionnaient.

VI.2.7.2. Ressources en eaux souterraines

Cette ressource contenue dans le Nord ont été estimées concernant au total 126 nappes principales. La répartition par région hydrographique des eaux souterraines est caractérisée par des potentialités plus importantes à l'Est et au centre et moins importante sur la partie Ouest du territoire (figure VI.15). Cependant, la région la plus occidentale (la région hydrographique Oranie - Chott Chergui) a un potentiel estimé à 307 Hm³ /an, soit 77 Hm³ en plus comparativement aux estimations antérieures (MRE, 2010). Le bassin "Cheliff-Zahrez" dont le bassin Cheliff, le plus vaste bassin de l'Algérie du Nord a une potentialité en eau de l'ordre de 330 Hm³ /an (MRE, 2010). Ces nappes sont rechargées principalement par les précipitations qui demeurent irrégulière à la fois dans l'espace et dans le temps (CNES, 2000). En fait, les

CHAPITRE VI : Présentation de la région d'étude

niveaux des nappes semblent avoir sérieusement influencés par la sécheresse persistante qui affecte la région depuis des décennies, et il est certain qu'il faudrait plusieurs années pour que ces nappes retrouvent leur équilibre bien que l'usage agricole reste assez faible en comparaison au pompage destiné à l'AEP et l'industrie (Hamlat, 2013).

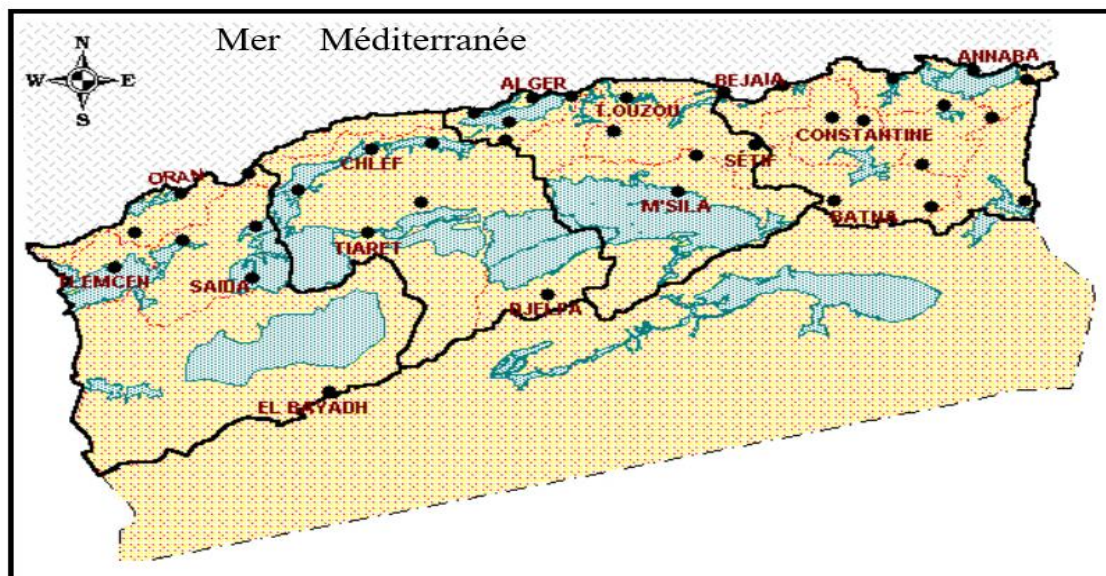


Figure VI.15 : Ressources en eau souterraines dans le Nord de l'Algérie. (Source : MRE, 2004)

Dans le contexte actuel, les réserves souterraines sont surexploitées. Le tableau VI.3 présente les volumes d'exploitation des nappes.

Tableau VI.3 : Exploitation de quelques nappes dans la région (MRE, 2010)

Nom d'unité hydrogéologique	Code BV	Superficie (Km ²)	Ressources renouvelables	
			Année moyenne	Année sèche
nappe karstique du Murdjajo	04	302	14	2
Plateau de Mostaganem	04	700	50	4
Plateau de Ain Temouchent	04	245	4	1
Monts de Traras	04	545	7	3
Plaine de Sidi Bel Abbés	11	1211	133	3
Synclinal d'El Bayad	08	584	10	1
plaine de Ghriss nappe de Mascara	11	834	42	3
Plateau de Saida	11	2736	46	7
Plaine de Habra -Sig	11	726	4	2
Vallée de l'Oued Barbour	11	541	3	1
Monts de Tlemcen	16	2839	35	13
Plaine de Maghnia	16	231	18	1

CHAPITRE VI : Présentation de la région d'étude

L'évaluation des ressources souterraines peut prendre plusieurs formes et reste donc soumise à des incertitudes : si les potentialités des nappes et ses localisations sont bien connues, les réserves exploités le sont moins, puisqu'ils se correspondent aux forages en service déclarés, selon la wilaya. Il y a lieu de noter que les estimations des quantités exploités sont par wilaya et non par aquifère.

VI.3. Conclusion

L'analyse des potentialités naturelles de la région considérée a permis de formuler des diagnostics thématiques et mettre en lumière les risques liés à la sécheresse de plus en plus intense et persistante.

VII.1.Introduction

La sècheresse constitue en rapport avec le changement climatique, la problématique la plus inquiétante en Algérie particulièrement dans sa partie occidentale. Notant que le suivi et la prévision hydrologiques des sécheresses offrent une occasion unique pour soutenir les efforts d'alerte précoce à cet aléa (Shukla et al, 2020). En effet, dans ce chapitre, l'accent est mis sur la démarche de la caractérisation et la prévision des conditions de la sécheresse hydrologique au niveau de notre région d'étude.

Cette partie d'étude consiste à présenter la démarche appliquée pour répondre aux objectifs de la thèse et la discussion des résultats obtenus, en suivant deux axes de recherches qui visent à :

1. Caractériser la sécheresse hydrologique et leur processus de réponse à travers l'analyse de l'évolution des indices hydrométéorologiques et caractéristiques des bassins hydrologiques ;
2. Vérifier la performance des prévisions des évènements hydrologique secs à l'aide des modèles stochastiques en utilisant des approches différentes.

Nous considérons ces deux axes comme des informations sur le danger lié à la sécheresse hydrologique dans le cadre du fonctionnement d'un système qui décrit les tâches à accomplir et définit les rôles des diverses parties prenantes à diverses étapes et facilitent le processus de décision à travers un mécanisme de retour d'information permettant une amélioration continue du système (voir la figure VII.1) pour alimenter une vision commune sur un dispositif d'alerte précoce à la sécheresse pour tout le pays.

VII.2. Caractérisation de la sécheresse

Les évènements de la sécheresse hydrologique ainsi que celle météorologique sont décrits par un nombre d'indices définies par l'ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices). Ces indices sont utilisés pour surveiller le changement climatique par le suivi de l'évolution des extrêmes climatiques (Christensen et al., 2002; Loredana, 2008).

L'indice de ruissellement normalisé (SRI) est appliqué pour apprécier la sècheresse hydrologique dans les quatre bassins étudiés, alors que l'indice de précipitation standardisé (SPI) et l'indice de détection de la sécheresse (RDI) sont retenus pour analyser la sécheresse météorologique ce qui nous permet d'avoir un rapide aperçu de la sécheresse hydrologique et leur concordance avec celle météorologique. Ils nous facilitent donc la comparaison des conditions à des périodes différentes et donc la mise en évidence des variations éventuelles.

VII.2.1. Indice de ruissellement normalisé (SRI)

L'indice SRI est développé par Shukla & Wood (2008) en se basant sur les données de débit et une méthode de normalisation similaire à celle utilisée pour le calcul de l'indice SPI sur une durée spécifique pour caractériser la sécheresse hydrologique. Par conséquent, la distribution gamma est utilisée ici pour ajuster les données de débit mensuel de chaque station de mesure pour estimer la probabilité cumulée qui est convertie en un écart normal standard avec une moyenne nulle et une variance unitaire ce qui donne le SRI pour un mois spécifique et à une échelle temporelle. Cet indice est calculé en divisant la différence des valeurs de ruissellement à la valeur moyenne pour une échelle de temps donnée par l'écart type de la série :

$$SRI = \frac{x_i - x_j}{\sigma} \quad (1)$$

Où x_i fait référence au ruissellement actuel de la période étudiée, x_j représente la moyenne de la série et σ fait référence à l'écart type de la série.

L'intervalle de la sécheresse hydrologique analysée par l'indice SRI, similaire à l'indice SPI, indiquant une sécheresse extrême ($SRI \leq -2$), une sécheresse sévère ($-2 \leq SRI \leq -1,5$), conditions de sécheresse modérée ($-1,5 \leq SRI \leq -1,0$) et la classe des conditions normales (non sèche) indiquées par $SRI \geq -1$.

VII.2.2. Indice de précipitation standardisé (SPI)

Le SPI est développé comme un moyen pour déterminer et suivre l'évolution de sécheresse (McKee et al, 1993). C'est l'un des indices les plus largement utilisés avec de multiples types d'application (Zeleňáková et al, 2017). En effet, la relative simplicité de calcul et la flexibilité de cet indice ont conduit à leur approbation par de nombreuses organisations comme indicateur de choix pour décrire les occurrences de sécheresse météorologique ainsi que les autres types de sécheresses (Hayes et al, 2011 ; Moreira et al, 2016).

Le SPI détermine les anomalies de précipitations en comparant les précipitations totales enregistrées sur la période d'accumulation (par exemple, 1, 6, 12 mois) avec les séries historiques à long terme des records de précipitations ajustés à une distribution de probabilité à l'aide de la fonction gamma (Standardized Precipitation Index, 2021). Les précipitations sont transformées en valeurs numériques normalisées. Le SPI est donc calculé comme suit :

$$SPI = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (2)$$

Où x_i est la précipitation de la période étudiée au cours de l'année i , \bar{x} est la moyenne à long terme des précipitations et σ fait référence à l'écart type de la série. Plus de détails sur le calcul de l'indice SPI peut être trouvé dans les travaux de McKee et al (1993).

Le SPI peut être donc calculé pour n'importe quel site et pour n'importe quelle durée en utilisant des enregistrements de précipitations à long terme qui sont ajustés à la distribution Gamma puis convertis en un écart normal standard (Stagge et al, 2015) :

$$G(x) = \int_0^x g(x)dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{(\alpha-1)} e^{(-x/\beta)} dx \quad \text{pour } x > 0 \quad (3)$$

Où x est la quantité de pluie, α et β sont les paramètres de forme et d'échelle estimés, à chaque échelle de temps et pour chaque mois de l'année et $\Gamma(\alpha)$ est la fonction Gamma.

VII.2.3. Indice de détection de la sécheresse (RDI)

Le RDI est introduit par Tsakiris & Vangelis (2005) comme un indice de sécheresse météorologique. Il utilise simultanément les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (ETP) pour l'évaluation des conditions de sécheresse météorologique entre les zones pour des périodes de référence spécifiées et sur différentes caractéristiques climatiques. Le RDI est cependant considéré comme adapté aux études de l'effet du changement climatique sur la sévérité de la sécheresse (Thomas et al, 2016). L'indice RDI comme le SPI sont recommandés par l'OMM comme indices de caractérisation de la sécheresse (Hayes et al, 2011).

Au cours de la dernière décennie, il a été largement utilisé dans plusieurs applications dans le monde (par exemple, Tigkas et al, 2012 ; Al-Faraj et al, 2015 ; Zarei et al, 2016 ; Merabti et al, 2018 ; Alwan et al, 2019 ; Abubakar et al, 2020 ; Kim & Jehanzaib 2020 ; Batool et al, 2021).

Le RDI peut être exprimé dans différentes formules. Le α_k initial est calculé pour une année i et une période de référence k mois comme mentionné dans l'équation (4) (Tsakiris et al, 2007):

$$\alpha_k = \frac{\sum_{j=1}^{j=k} p_{ij}}{\sum_{j=1}^{j=k} P_{ETij}} \quad (4)$$

Où P_{ij} et ETP_{ij} sont les précipitations et l'évapotranspiration potentielle du mois j de l'année i ETP est estimée ici à l'aide de l'équation de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948).

Le RDI normalisé (RDI_n) est calculé pour chaque année comme suit :

$$RDI_n(k) = \frac{\alpha_k}{\bar{\alpha}_k} \quad (5)$$

Où $\bar{\alpha}_k$ est la moyenne à long terme de α_k . En supposant que les valeurs de α_k suivent la distribution log-normale, la forme standardisée de RDI_{st} est donnée comme dans l'équation (6) (Tsakiris & Vangelis, 2005).

$$RDI_{st}(k) = \frac{y_k - \bar{y}_k}{\bar{\sigma}_k} \quad (6)$$

y_k est égal à α_k , \bar{y}_k est sa moyenne et $\bar{\sigma}_k$ est son écart type, respectivement.

VII.2.4. Calcul des indices de la sécheresse

Pour notre analyse, DrinC (Drought indices calculator) téléchargeable via le lien <http://drought-software.com/download/> est utilisé. Cet outil est développé par le Centre d'Evaluation des Risques Naturels et de Planification Proactive et le Laboratoire des Travaux de Réhabilitation et Gestion des Ressources en Eau de l'Université Technique Nationale d'Athènes et fourni un outil de calcul de ces indices choisis (Tigkas et al, 2015). DrinC calcule chaque indice pour toutes les stations par rapport à la période considérée via une plate-forme simple qui donne un résultat adapté à la caractérisation et le suivi de la sécheresse et même sa distribution spatiale. Ces dernières années, cet outil a été appliqué avec succès pour l'analyse de la sécheresse à travers le monde (par exemple : Abrha et al, 2019 (Ethiopie) ; Surendran et al, 2019 (Inde) ; Batool et al, 2021 (Pakistan) ; Kumar et Thendiyath, 2021 (Inde). Un manuel d'utilisation détaillé est proposé par Tigkas et al, 2015.

En tenant compte des principaux critères de sélection des indices qui étaient :

- Des besoins en données relativement faibles, permettant l'application du logiciel dans de nombreuses régions ;
- leurs résultats clairement interprétés pour une utilisation opérationnelle directe et efficace ;

Sur la base de ces critères, les trois indices de sécheresse inclus dans DrinC ont été analysés pour notre région d'étude. Cependant, le calcul de chaque indice nécessite des données d'entrée différentes à un pas du temps mensuel, comme on peut le voir dans le tableau VII.1.

Tableau VII.1 : données d'entrée de chaque indice

Indice	Données d'entrée
RDI	Précipitation, ETP (ou température)
SPI	Précipitation
SRI	Débit cours d'eau

La base de référence primaire tenue dans DrinC est l'année hydrologique (Septembre – Aout), et les indices SRI, SPI et RDI sont calculés pour des périodes de référence discrètes (3, 6 et 12 mois) avec de différents mois de démarrage (par exemple janvier) via la liste déroulante

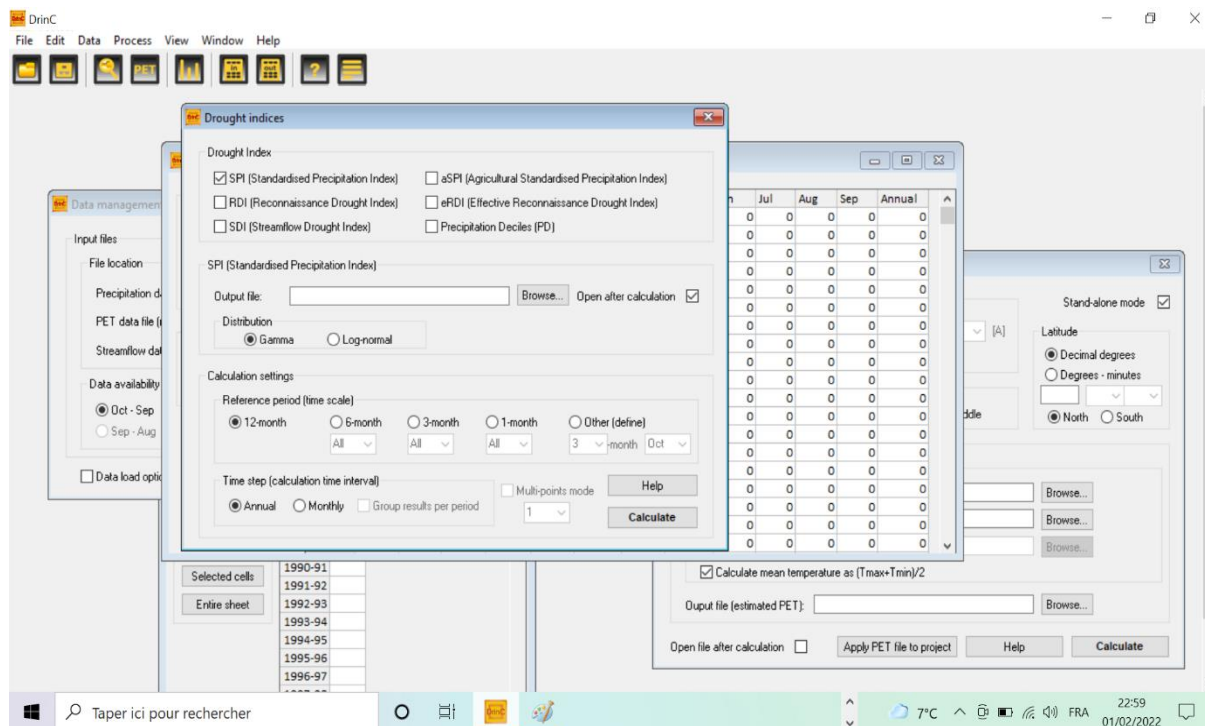


Figure. VII.1 : L'interface graphique de DrinC version Windows 1.7 (91)

VII.2.5. Analyse statistique du jeu de données

L'analyse statistique du jeu de données repose sur deux critères importants : la longueur de la base des données chroniques (couvrir la plus grande période possible) et, d'autre part, la qualité de ces enregistrements (le moins possible des données aberrantes ou manquantes). Ainsi, une base de données mensuelles et/ ou journalières de 40 stations a été critiquée et utilisée pour l'analyse (16 stations hydrométriques et 24 stations pluviométriques/météorologiques) afin d'analyser et de prévoir les variations des paramètres hydro-climatiques (Figure. VII.2).

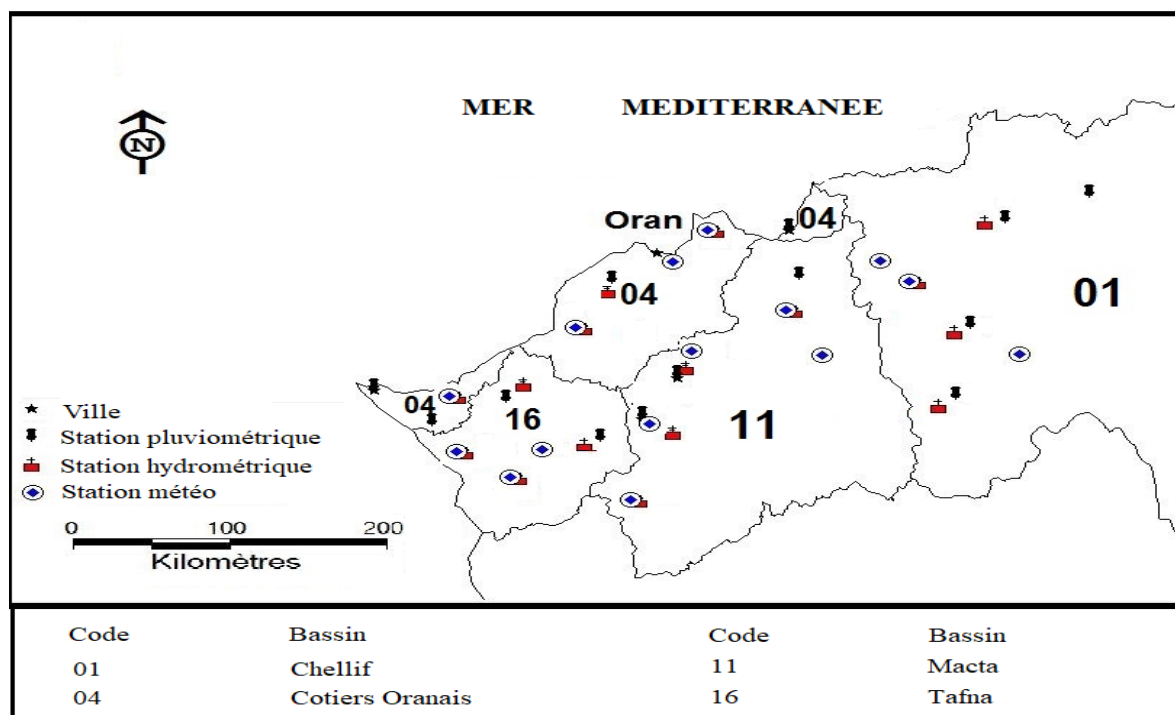


Figure VII.2. Localisation des stations de mesure

On vise à sélectionner des séries de données recueillies communes sur plus de 40 ans (1968 à 2009) en assurant une couverture acceptable de la région étudiée. On s'intéresse donc à analyser le comportement des quatre bassins.

Nous n'avons pas encore pu obtenir suffisamment de données récentes pour les trois paramètres (débit, pluviométrie et température) pour réaliser des traitements statistiques au-delà de 2009. Le nombre des stations impliquées dans cette étude paraît aussi petit vis-à-vis du nombre des stations que renferment les réseaux d'observations national (ANRH et ONM).

Cependant, la qualité et le type des observations collectées sont les critères principaux pour la sélection des stations retenues. En effet, les séries ayant une chronologie minimale à 30 ans ne sont pas retenues. En outre, la présence de certaines erreurs dans les données obtenues empêche leurs utilisations, principalement si aucune procédure de correction n'y est possible.

VII.2.5.1. Les données hydrométriques

Les données du débit moyen journalier provenant des seize (16) stations hydrométriques pour la période commune (1968-2009) ont été utilisées à raison de quatre stations par bassin comme le montre le tableau VII.2, et nous avons éliminé les stations dont les séries comportent trop de lacunes, paraissent douteuses ou trop influencées par des barrages. Les valeurs manquantes ont été reconstituées à partir des postes voisins. L'ensemble des données hydrométriques nous a été fourni par la Direction de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH).

Tableau VII.2. Caractéristiques des stations hydrométriques étudiées

Bassin versant	Station	Code	Oued	Surface (Km ²)	Longueur du talweg principal (km)	Latitude (Km)	Longitude (Km)
Tafna (16)	Beni Bahdel	160402	Tafna	603	80	118,80	163,4
	Chouly	160601	Chouly	170	45	157,35	199,50
	Pierre de chat	160801	Tafna	6900	8	118,80	163,4
	Maghnia	160504	Mouillah	320	70	131,7	201,7
Côtiers Oranais (04)	Ghazaouet	040101	Tlata	100	8	35,1	-1,87
	Turgot Nord	040220	El Malah	100	19	157,35	199,50
	CW18	040403	Besbes	108	80	35,12	0,09
	Arzew	0405	Mekkera	189	91,1	35,86	1,12
Macta (11)	Haçaiba	110101	Mekkera	439	114,5	35,86	1,12
	Bouhanifia		Oued El Hammam	197	118,80	163,4	118,80
	S.A.Benyoub	110201	Mekkera	189	91,1	34,97	-0,74
	Sidi Bel Abbes	110305	Taria	360	98	35,12	0,09
Cheliff (01)	Ammi Moussa	012601	R'hiou	1890	114,5	35,86	1,12
	Oued Abtal	013402	Mina	295	157,35	199,50	157,35
	S.M.Benaouda	013402	Mina	305	118,80	163,4	118,80
	Takhmart	013301	El Abed	1550	131,7	201,7	131,7

VII.2.5.2. Les données climatiques

Les données utilisées sont les pluies mensuelles et les températures minimales et maximales moyennes mensuelles, collectés auprès de l'Office National de la Météorologie (ONM) et l'Agence National des Ressources Hydriques (ANRH). Nous avons disposé des relevés mensuels de précipitation de 24 stations. En ce qui concerne les températures, nous n'avons pas pu obtenir une chronique sur une longue période d'observation pour plusieurs stations. Pour décrire l'évolution des températures, sur cette région d'étude, les relevés de 15 stations ont été retenus, selon la disponibilité des données à savoir : la station de Maghnia, Beni Bahdel, Tlemcen- Zenata, Arzew, Ghazaouet, Oran port, Beni Saf, Sidi Bel Abbes, Haçaiba, Sidi Ali Benyoub, Sidi M'hamed Benaouda, Mascara, Bouhanifia, Tiaret et Relizane.

Nous avons retenu pour le calcul, les stations météorologiques les plus proches des stations hydrométriques choisis alors que les autres points de mesures sont utilisés pour estimer les

données manquantes des stations avoisinantes sous les mêmes conditions climatiques et pour la même période d'observations.

Pour répondre aux objectifs de cette étude, la base de données obtenue a subi une analyse exploratoire. Elle comprend une statistique descriptive et analyse graphique, le calcul du taux de données manquantes et la reconstitution de ces dernières. Ainsi nous avons utilisé le logiciel xlstat (version 2014) pour faire l'ensemble des analyses statistique des données.

Dans l'ensemble, sur les 1640 années/stations possibles, 1362 sont disponibles (soit 83 %). Quant à la période 1968-1994, le pourcentage d'années/stations complètes n'est inférieur à 60 % que pour trois années (1980, 1981 et 1993). Le nombre de lacunes est élevé principalement sur les relevés de données hydrométriques et aussi sur celles des séries des températures.

La période de référence (1968-2009), soit 75% du réseau météorologique est récupérée. Les données manquantes soit pluviométriques ou celles de températures sont comblées par corrélation sympathique avec les séries des stations environnantes.

Les hypothèses de stationnarité (caractéristiques statistiques ne varient pas dans le temps), d'homogénéité (proviennent de la même distribution) et d'indépendance (aucune autocorrélation entre les observations) des données retenues ont été vérifiées.

Afin de déterminer si chaque indice retenu est stationnaire dans le temps, nous avons procédé à l'application du test de Dickey-Fuller Augmenté (ADF test) encore appelé test de la racine unitaire, permettant de détecter le type de non-stationnarité, notamment la présence d'une tendance dans la série étudiée (Dickey & Fuller, 1981). Ce test est appliqué en utilisant Xlstat (version 2014) dont chaque test ADF utilise les hypothèses suivantes :

Hypothèse nulle, $H_0: y = 0$

Hypothèse alternative, $H_1: y < 0$

L'hypothèse d'indépendance des données hydrométéorologiques est vérifiée à l'aide du test de Wald-Wolfowitz. Les valeurs de la statistique $|U|$ sont calculées pour chaque station dont l'hypothèse H_0 a été acceptée au niveau significatif de 1%. Le test de Pettit à un niveau de signification de 5% a été utilisé pour vérifier l'hypothèse d'homogénéité des séries de données.

D'une manière générale et sur l'ensemble de la région d'étude, les échantillons des trois paramètres analysés constituent des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuée (Tableau VII.3).

Tableau VII. 3 : Récapitulatif des résultats des tests d'hypothèses

Tests	Indépendance	Stationnarité	Homogénéité
Stations de mesure hydrométriques	14	12	12
Stations de mesure pluviométriques	20	18	20
Stations de mesure des températures (météorologiques)	13	10	10

VII.2.6. Réponse de la sécheresse hydrologique à la sécheresse météorologique

L'étude de la propagation de la sécheresse météorologique à une sécheresse hydrologique a été un sujet brûlant dans la communauté hydrologique pour la gestion des ressources en eau au cours des dernières décennies (Peters et al, 2006 ; Van Loon & Laaha, 2015 ; Barker et al, 2016 ; Peña-Gallardo et al, 2019). Ce processus est caractérisé par un certain nombre de caractéristiques, y compris la mise en commun, l'atténuation, le décalage (lag) et l'allongement (Van Loon & Van Lanen, 2012).

Il est important d'étudier la réponse de la sécheresse hydrologique à la sécheresse météorologique et ses facteurs d'influence, ce qui pourrait aider à mieux comprendre les mécanismes d'évolution de ce type de sécheresse et faciliter son suivi et sa prévision. Les indices SPI et RDI ont été sélectionnés pour caractériser la sécheresse météorologique afin d'étudier le comportement de la propagation en abordant spécifiquement les clés suivantes : (1) Sur quelle relation sont les sécheresses hydrologiques répondre le mieux aux sécheresses météorologiques ? (2) Comment varie la propagation de la sécheresse météorologique à la sécheresse hydrologique selon les échelles de temps ?

VII.2.6.1. Analyse de corrélation entre les sécheresses météorologique et hydrologique

La méthode d'analyse de corrélation des caractéristiques de la sécheresse basée sur des données hydrologiques et météorologiques mesurées possède une grande opérabilité et a été largement appliquée (Zhang et al, 2016). Récemment, l'analyse de cette relation à l'aide des coefficients de corrélation de Pearson ou de Spearman pour beaucoup de chercheurs dans ce domaine est devenue le principal axe de recherche (Barker et al, 2016 ; Ma et al, 2019 ; Peña-Gallardo et al, 2019). À cette fin, les trois indices sont calculés et analysés à plusieurs échelles de temps.

La dépendance entre les indices sélectionnés est analysée par les coefficients de corrélation de Pearson (CCP) pour vérifier les liens possibles entre les processus hydrologiques et les changements des conditions météorologiques pour la région d'étude. Les coefficients de corrélation sont dérivés pour chaque combinaison appariée d'indices et pour les trois périodes

d'agrégation. Pendant ce temps, l'indice de sécheresse hydrologique est associé à chaque indice météorologique, ce qui permet d'explorer cette relation pour les sites considérés à différentes échelles de temps, et donne aussi une matrice de coefficients de corrélation 3 par 6.

CCP est défini comme dans l'équation (7) :

$$CCP = \frac{\sum_{i=1}^n (\varphi_i - \bar{\varphi}) (\rho_i - \bar{\rho})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\varphi_i - \bar{\varphi})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\rho_i - \bar{\rho})^2}} \quad (7)$$

Où φ_i et ρ_i représentent les valeurs des deux séries chronologiques, avec $i = 1, 2, 3, \dots, n$. Les valeurs de CCP allant de -1 à 0 indiquent que les ensembles sont négativement corrélés, tandis que les valeurs de 0 à 1 signifient qu'ils sont positivement corrélés. Afin d'analyser comment la sécheresse hydrologique répond à la sécheresse météorologique, nous avons utilisé la méthode CCP pour analyser le décalage temporel entre la sécheresse hydrologique et la sécheresse météorologique à différentes échelles de temps pour chaque indice, en trouvant les différences entre les durées de sécheresse. Le CCP plus élevé suggère que ce temps de réponse est plus sensible et vice versa (Zhao et al, 2016).

VII.2.6.2. Analyse de la courbe (ROC)

La courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) est un graphe qui permet d'évaluer des décisions binaires (oui/non) basées sur un ensemble croissant de probabilités de prévision. Pour notre étude, cette courbe est conditionnée par les observations météorologiques, répondant à la question ; quelle est la réponse hydrologique correspondante ? Il mesure donc la capacité du système à faire la distinction entre les événements de sécheresse et les événements de non sécheresse, en indiquant les occurrences ratés et les fausses alarmes (Wilks, 2011). Pour évaluer les performances de prévision de la sécheresse par ROC, le nombre d'occurrences et de non-occurrences d'un événement de sécheresse est utilisé pour calculer la probabilité de fausse détection (PoD) et le taux de fausses alarmes (FAR) (Bae et al, 2017).

Par conséquent, (PoD) et (FAR) sont calculés comme suit :

$$PoD = \frac{HT}{HT+MS} \quad (8)$$

$$FAR = \frac{FA}{FA+HT} \quad (9)$$

Pour identifier la performance de la réponse prédite de la sécheresse hydrologique expliquée par celle observée, le score ROC évalue la capacité à faire la distinction entre la sécheresse et

l'absence de sécheresse. La contingence pour le calcul de cette courbe est indiquée dans le tableau VII.4.

Tableau VII.4 : Tableau de contingence 2*2 pour le calcul du ROC.

	évènement prévu	
	Oui	Non
évènement observé	Oui	raté (MS)
	Non	rejet correcte (CJ)
	détECTION (HT)	Fausse alarme (FA)

L'aire sous la courbe ROC (AUC) est fréquemment utilisée comme score de prédiction. Une AUC = 1 représente le meilleur score tandis qu'une AUC = 0,5 indique qu'une prévision n'a aucune performance, dans ce cas, les valeurs de *FAR* et *PoD* sont confondues et le système de prévision serait un processus aléatoire car il a des probabilités égales de détection et fausses alarmes.

Cet indicateur de mesure de la performance des modèles prédictifs est disponible dans Excel avec le logiciel XLSTAT (version 2014).

VII.2.7. Réponse de la sécheresse hydrologique aux caractéristiques des bassins versants

On peut noter que plusieurs mécanismes communs de propagation de la sécheresse peuvent modifier la réponse temporelle et la sévérité du processus de sécheresse hydrologique comme le montre Van Loon & Van Lanen (2012). Par conséquent, ce processus peut être également influencée par les caractéristiques des bassins hydrologiques considérés et les stratégies de gestion de l'eau, comme le montrent des études précédentes (Van Loon & Laaha, 2015 ; Apurv et al, 2017 ; Konapala & Mishra, 2020).

Pour étudier l'effet des caractéristiques du bassin dans cette interaction, l'indice de débit de base (BFI) est utilisé dans cette partie d'étude.

VII.2.7.1. Analyse de l'indice de débit de base (BFI)

Le BFI a été développé au cours d'une étude sur les faibles débits au Royaume-Uni (Institut de l'Hydrologie, 1980). Il est donc considéré comme un indicateur des propriétés de stockage et de libération du bassin versant (Bloomfield et al, 2009). Le BFI représente le rapport du volume de débit de base au volume de débit total tel qu'indiqué dans l'équation (8) (Gustard et al. 1992) :

$$\text{Indice de débit de base (BFI)} = \frac{\text{volume de débit de base}}{\text{volume de débit total}} \quad (10)$$

Cet indice peut être compris entre 0,0 et 1,0. Les valeurs BFI sont proches de 0,0 pour un bassin imperméable avec un régime d'écoulement flashy. Un BFI proche de 1,0 indique un bassin perméable avec une capacité de stockage élevée et un régime d'écoulement stable (Institute of Hydrology, 1980 ; Tallaksen & Van Lanen, 2004). De plus, Le BFI est lié au climat, à la topographie, à la végétation, au type de sol et à la géologie d'un bassin versant (Longobardi & Villani, 2008). Bloomfield et al (2009) ont montré que le facteur géologique est un déterminant clé de cet indice. Le BFI lui-même n'est pas une caractéristique du bassin mais il intègre l'effet des propriétés de stockage et de libération (Salinas et al, 2013).

Le calcul de cet indice est réalisé à l'aide d'un programme BFI qui est un outil basé sur Excel développé par Martin Morawietz au Département des géosciences de l'Université d'Oslo, en Norvège. Il a été initialement préparé pour le manuel ; Processus hydrologiques de sécheresse et méthodes d'estimation de l'écoulement des cours d'eau et des eaux souterraines (Tallaksen & Van Loon, 2004). Ce programme est téléchargeable gratuitement sur le site Web du Centre européen de la sécheresse <http://europeandroughtcentre.com/>. L'outil implémente la méthode de filtrage appelée "procédure des minima lissés" (Institute of Hydrology, 1980). Il utilise des techniques de lissage et de séparation pour traiter un hydrogramme fluvial à partir des données quotidiennes sur le débit (Combalicer et al, 2008). Plus de détails sur la procédure de calcul sont fournis dans le rapport n°3 des études sur les faibles débits de l'Institut de l'Hydrologie d'Oslo (1980) et de Wahl & Wahl (1995).

	A	B	C
1	Date	Discharge	Baseflow
2	01/01/1995	0.109	
3	02/01/1995	0.063	
4	03/01/1995	0.043	
5	04/01/1995	0.039	
6	05/01/1995	0.229	

Figure VII.3 : données d'entrée

Figure VII.4 : sélection de la saison

VII.3. Prévision des évènements de la sécheresse hydrologique

VII.3.1. Modèle à commutation de Markov (MSM)

Les modèles à commutation de Markov (ou modèles de Markov cachés) en tant que processus stochastique sont largement utilisés en hydrologie pour la simulation et la prévision, tandis que leurs applications originales sont les données de précipitations (Zucchini & Guttorp, 1991 ; Thyer & Kuczera, 2000 ; Mehrotra & Sharma, 2005 ; Khalil et al, 2010 ; Greene et al, 2011).

Cependant, plusieurs auteurs ont opté pour ce modèle dans l'analyse hydrologique (par exemple : Akintug & Rasmussen, 2005 ; Gagliardi et al, 2017 ; Hussein & Agbinya, 2019).

Ce modèle considéré ici suppose que le phénomène analysé soit dans l'un des deux états : sec (D) ou humide (W) tel qu'il est considéré par Thyer & Kuczera (2000) à chaque instant t . La variable observée y_t est supposée avoir été tirée d'une distribution de probabilité dont les paramètres sont conditionnels à l'état particulier prévalant à l'instant t et elle est normalement distribuée avec une moyenne et une variance spécifiques à l'état considéré. Étant donné la variable d'état non observée S_t , nous pourrions générer y_t comme :

$$y_t = x_t \beta_{S_t} + \sigma_{S_t} \varepsilon_t \quad (11) \quad \varepsilon_t \sim N(0, 1)$$

Où x_t est la variable exogène. β est un vecteur des paramètres de régression logistique. ε_t est le processus de bruit blanc et σ_{S_t} est l'écart type. Le mécanisme de commutation est contrôlé par S_t qui suit un processus de chaîne de Markov à états M et décrit par une distribution de probabilité de transition de S_t , étant donné le chemin complet $\{s_{t-1}, s_{t-2}, \dots, s_1\}$ uniquement dépend de l'état le plus récent s_{t-1} . Thyer & Kuczera (2000) définissent une telle probabilité de transition comme suit :

$$p_{ij} = \Pr\{s_t = j | s_{t-1} = i, s_{t-2}, \dots, s_1\} = \Pr\{s_t = j | s_{t-1} = i\}, \quad i, j = 1, \dots, M \quad (12)$$

Où i est l'état de l'événement (0 pour sec, 1 pour humide) dans la période $t - 1$ et j est l'état de l'événement dans la période t ; p_{ij} est l'élément de la i ème ligne et de la j ème colonne de sorte que les éléments de chacune des lignes de la matrice P totalisent un. s_t désigne les séquences s_1, s_2, \dots, s_T tandis que M est le nombre de symboles d'observation distincts par état, étant donné qu'à la période $t - 1$ le processus était à l'état i . La probabilité que l'état passe à l'état j à la période t est égale à p_{ij} . Une matrice de transition organise ces probabilités de transition dans une matrice $M \times M$ et est définie par :

$$P = [p_{ij}]_{M \times M}, \quad (13)$$

$$P = \begin{pmatrix} P_{00} & P_{01} & \dots & P_{0M} \\ P_{10} & P_{11} & \dots & P_{1M} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ P_{M0} & P_{M1} & \dots & P_{MM} \end{pmatrix} \quad (14)$$

VII.3.2. Modèle de régression robuste (RRM)

Cette méthode de régression est généralement proposée lorsque la distribution résiduelle n'est pas normale. C'est également un outil efficace pour analyser les données qui sont affectées par

les valeurs aberrantes, de sorte que le modèle résultant est robuste contre les valeurs aberrantes (Draper & Smith, 1998 ; Chen, 2002). Ce modèle est retenu par plusieurs auteurs en hydrologie (par exemple : Bárdossy & Singh, 2008 ; Chachi & Roozbeh, 2017 ; Zheng et al, 2019).

Nous nous intéressons à la modélisation de la relation entre le SRI et sa variable indépendante. Le modèle de régression est comme suit :

$$X_t = \beta_1 + \beta_2 X_{t-2} + \beta_3 X_{t-1} + \beta_4 X_t + \beta_5 Y_t + \varepsilon_t \quad (15)$$

Où X est la variable SRI, Y est la variable indépendante et t représente tendance temporelle.

Dans cette étude, nous nous intéressons à l'estimation MM qui est une combinaison de l'estimation M et de l'estimation S afin de traiter les valeurs aberrantes dans les variables dépendantes et indépendantes et d'obtenir des estimations avec une valeur de décomposition élevée et plus efficace (Yohai, 1987). Selon Andersen (2008), cette méthode est peut-être la technique de régression robuste la plus utilisée. L'estimateur MM- est la solution de :

$$\sum_{i=1}^n \rho_i(u_i) X_{ij} = 0 \quad \text{or} \quad \sum_{i=1}^n \rho_i\left(\frac{Y_i - \sum_{j=0}^k X_{ij} \hat{\beta}_j}{s_{MM}}\right) X_{ij} = 0 \quad (16)$$

s_{MM} est l'écart type obtenu à partir du résidu de la méthode d'estimation S (e_i) et ρ est la fonction objectif bicarrée de Tukey :

$$\rho(u_i) = \begin{cases} \frac{u_i^2}{2} - \frac{u_i^4}{2c^2} + \frac{u_i^6}{6c^2}, & -c \leq u_i \leq c; \\ \frac{c^2}{6}, & u_i < -c \text{ or } u_i > c. \end{cases} \quad (17)$$

Où les résidus mis à l'échelle sont calculés par $u_i = \frac{e_i}{s_i}$ (18)

Le paramètre d'échelle est calculé par $s_i = s_n$

c est appelé la constante d'accord

Dans cette étude, la prévisibilité des occurrences des sécheresses hydrologiques ainsi que leurs durée dépendent des facteurs suivants : (1) la performance du modèle choisi (2) les échelles de temps sélectionnées (3) le seuil de sécheresse hydrologique (4) le temps de décalage (5) les variables indépendantes. Pour le délai de décalage, le choix est fait pour 1 mois (LT-1) et 6 mois (LT-6), où 1 mois est le délai le plus court possible, tandis qu'un délai prévisionnel de 6 mois est un délai long typique de la prévision à long terme (Kim & Valdes, 2003; Mishra & Singh, 2010) et représente également le total de la période humide (Octobre à Mars) et le total de la période sèche (Avril à Septembre) pour le nord Algérien (Meddi & Hubert, 2003).

Trois approches différentes sont utilisées pour ajuster et prévoir les valeurs SRI comme suit : (1) MSM-SRI et RRM-SRI (2) MSM-SPI et RRM-SPI (3) MSM-RDI et RRM-RDI. Pour la première approche, la méthode de prévision repose sur l'autocorrélation du SRI avec des périodes décalées. Dans notre cas, seules les corrélations lag-1 et lag-2 sont utilisées. Dans ce cas, le SRI_{i-1} et SRI_{i-2} par l'échelle de temps appropriée sont considérés comme des variables explicatives. Cependant, la persistance élevée de l'indicateur de sécheresse SRI peut être utilisée pour donner des informations prédictives pour la prévision hydrologique de la sécheresse (Hao et al, 2016). En effet, notre base de données est divisée en deux ensembles : l'ensemble d'apprentissage sert à créer le modèle avec une analyse empirique basée sur des observations sur 29 ans de mesure pour suivre l'évolution des valeurs SRI et l'ensemble de test (12 ans de mesure) sert à tester l'efficacité des deux modèles.

VII.3.3. Mesures de performance

La performance des prévisions de ces modèles est évaluée par deux critères : le coefficient de détermination (R^2) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) qui sont définis comme suit :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [(SRI_{oi} - \overline{SRI_o}) (SRI_{fi} - \overline{SRI_f})]^2}{\sum_{i=1}^n (SRI_{oi} - \overline{SRI_o})^2 \sum_{i=1}^n (SRI_{fi} - \overline{SRI_f})^2} \quad (19) \quad RMSE = \sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{(SRI_{fi} - SRI_{oi})^2}{n}} \quad (20)$$

Où i est le nombre de mois, SRI_{fi} est la valeur prévue au mois i , SRI_{oi} est la valeur observée au mois i , $\overline{SRI_o}$ est la moyenne des SRI observés, $\overline{SRI_f}$ est la moyenne du SRI prévu, n est le nombre de données.

Les valeurs des séries chronologiques de SRI sont prévues par les deux modèles en utilisant un logiciel de modélisation et de prévision nommé EViews (version 9.0). Cet outil est un excellent programme interactif qui convient le mieux aux analyses des séries temporelles (Agung, 2011). Il est déjà utilisé dans plusieurs études dans le domaine hydrologiques (à titre d'exemple : Fang et al, 2017 ; Musarat et al, 2021 ; Tariq Mahgoub , 2021 ; Zhonghua et al, 2021 ; Mohammed et al, 2022)

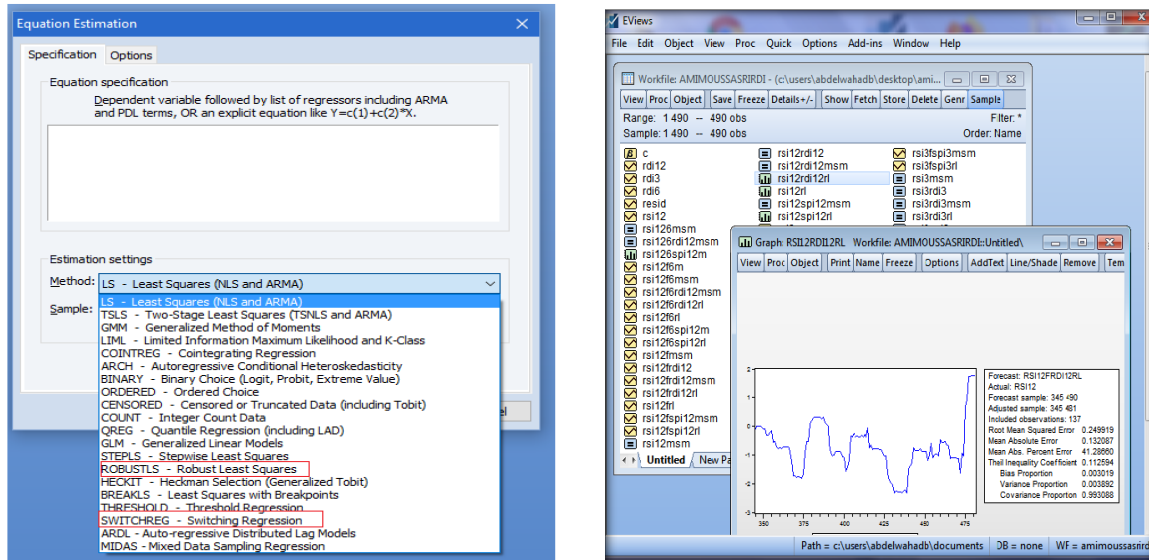


Figure VII.5 : Interface graphique Eviews sous windows (version 9.0)

VII.3.4. Changements d'erreur des prévisions basés sur le temps écoulé

Les changements de temps d'erreur et le meilleur temps de prévision sont obtenus à l'aide de deux critères suivants sont retenus des équations (21) - (22).

$$E_i = \frac{|SRI_{fi} - SRI_{oi}|}{SRI_{oi}} \quad (21)$$

$$F_i = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{i} \quad (22)$$

Où (E_i) est l'erreur relative au cours du mois i , (F_i) est la moyenne de l'erreur relative cumulée au cours du mois i , (\bar{E}) est la moyenne de l'erreur relative.

VII.4. Conclusion

La démarche de travail illustré dans cette partie présente des nouveautés dans les méthodes et les techniques employées pour la caractérisation et la prévision des occurrences de la sécheresse hydrologique. L'utilisation du programme DrinC nous a permis d'analyser l'évolution des trois indices de sécheresse choisis sur trois échelles du temps différentes à partir d'une application simple et facile avec des résultats exploitables directement.

Cette démarche nous a permis d'analyser les caractéristiques des conditions de sécheresses hydrologiques à travers les quatre bassins hydrologiques et permet aussi d'analyser l'influence et la relation entre deux facteurs sur les mécanismes de la réponse de la sécheresse hydrologique sur la région d'étude (les conditions climatiques et les caractéristiques du bassin). Il s'agit de montrer l'influence des différents paramètres sur la tendance des épisodes de la sécheresse hydrologique observés au cours de la période analysée. En outre, des différentes approches sont utilisées pour prévoir les événements hydrologiques secs tout en cherchant les meilleurs résultats de performance qui peuvent soutenir un système d'alerte précoce à cet aléa.

VIII.1. Introduction

Afin de répondre à l'objectif de la deuxième partie de recherche mené dans cette thèse, ce chapitre s'intéresse à l'analyse des résultats quant à la caractérisation et la prévision des occurrences de la sécheresse hydrologique au niveau des quatre bassins que regroupe notre région d'étude.

VIII.2. Résultats de la caractérisation de la sécheresse hydrologique

VIII.2.1. Evolution de la sécheresse hydrologique durant la période 1968-2009

La vulnérabilité globale à la sécheresse hydrologique dans la région a été évaluée dans cette étude en reconstruisant les événements historiques à l'aide de l'indice SRI à des échelles de temps de 3, 6 et 12 mois. Les valeurs SRI sont calculées pour chaque station et pour chaque mois de l'année, correspondant respectivement à SRI-3, SRI-6 et SRI-12.

Il apparaît que toutes les stations ont enregistré des baisses significatives des écoulements le long de la période d'étude, indiqué par les valeurs continuellement négatives du SRI-12 qui sont très nettes, à partir de la fin des années 70. Cette persistance de la sécheresse est plus remarquable en allant de l'Est à l'Ouest (figure VIII.1). Ainsi, des sécheresses sévères, voire extrêmes, se sont révélées traduisant un changement du régime hydrologique sur la zone d'étude et dans l'ensemble de l'Ouest Algérien au cours de la décennie 1970-1980 et à partir de cette période un déficit considérable s'est produit (Meddi & Hubert, 2003).

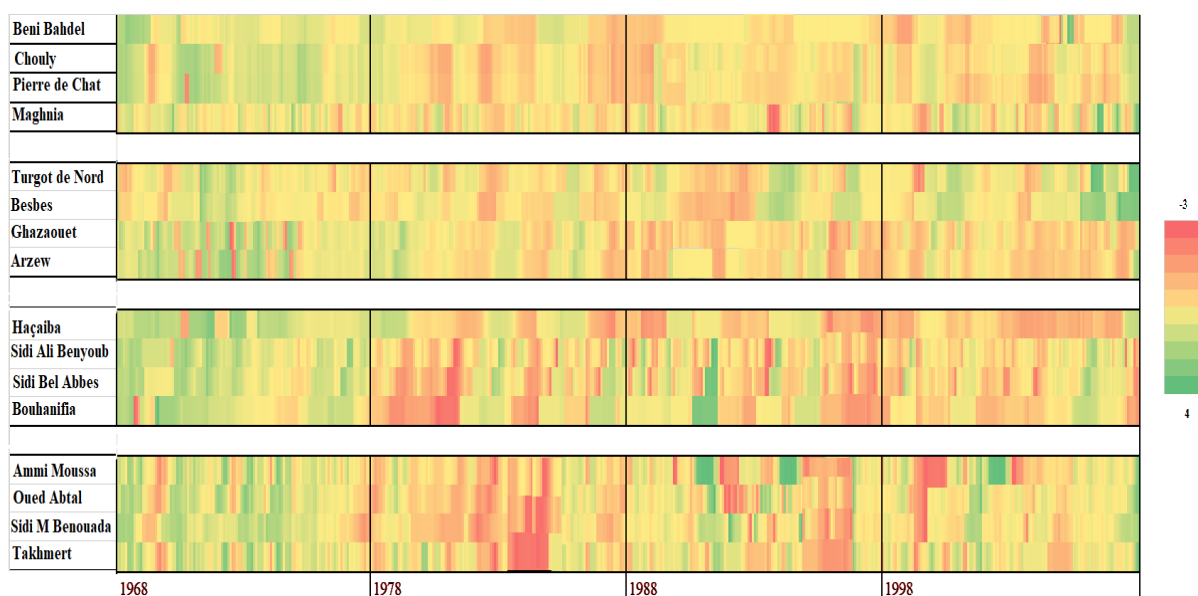


Figure VIII.1 : Représentation graphique des résultats du calcul de l'indice SRI-12 en 1968-2009, où le vert indique les mois humides, le jaune indique les mois modérément secs et le rouge indique les mois secs, l'ampleur des événements dépend de la luminosité de la couleur.

VIII.2.2. Résultats des paramètres d'analyse des périodes hydrologiques sèches

Les occurrences de la sécheresse hydrologique ont été analysées par deux paramètres : le nombre de mois secs (durée) et les valeurs négatives minimales de l'indice SRI (intensité) calculés pour chaque station hydrométrique. La répartition des valeurs des deux paramètres par région hydrologique a été représentée à l'aide de boîte à moustaches (figure VIII.2).

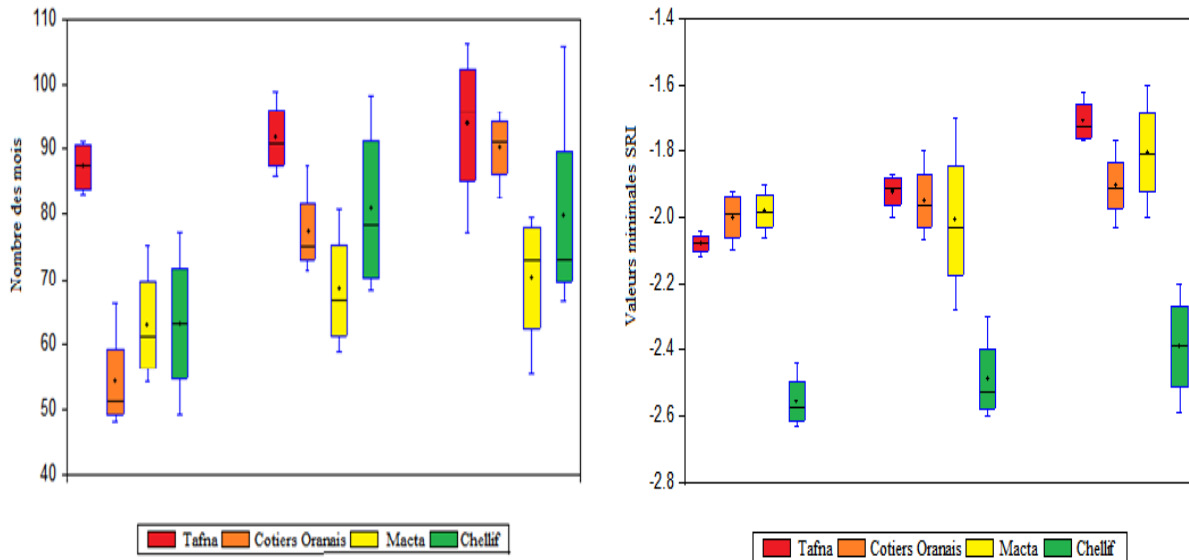


Figure VIII.2 : Répartition des valeurs des paramètres de la sécheresse hydrologique dans les différentes régions hydrologiques (la période d'accumulation augmente de gauche à droite : 3, 6 et 12 mois respectivement) : (à gauche) nombre de mois secs ; (à droite) répartition des valeurs négatives minimales de l'indice SRI par région

Comme indiqué par la figure VIII.2, le nombre des mois secs (celles où la valeur de l'indice SRI est ≤ -1), est important et plus élevé pour les stations de l'extrême ouest (Tafna) par rapport aux autres bassins en confirmant l'aspect de la persistance de ce phénomène. La tendance à la croissance des mois secs lorsque l'échelle du temps augmente est remarquable pour le bassin du côtiers oranais. L'intervalle de variation le plus réduit du nombre des mois secs lorsque l'échelle du temps se change est enregistré au bassin de la Macta alors qu'il est plus large pour le bassin du Chellif.

Quant aux valeurs négatives minimales de SRI, se sont plus importantes en allant vers l'Est de la région où les stations du Chellif enregistrent les valeurs négatives les plus bas donc les événements secs les plus intenses pour tous les pas du temps considérés. A l'opposé, les épisodes hydrologiques secs pour bassin de la Tafna sont moins intenses. Cependant, pour les périodes d'accumulation les plus longues, les valeurs négatives minimales deviennent moins importantes pour l'ensemble des stations hydrométriques.

CHAPITRE VIII : Résultats et Discussions

Par ailleurs, le tableau VIII.1 illustre les résultats de la répartition des valeurs des paramètres de la sécheresse hydrologique au niveau de chaque station étudiée et pour chaque échelle de temps considérée.

Tableau VIII.1. Paramètres de la sécheresse hydrologique pour chaque station.

N°		Paramètres	SRI-3	SRI-6	SRI-12
1.	Beni Bahdel	Nombre des mois secs	184/490	189/487	179/481
		Valeurs négatives minimales	-2,00	-1,89	-1,62
2.	Chouly	Nombre des mois secs	185/490	190/487	180/481
		Valeurs négatives minimales	-2,07	-1,87	-1,61
3.	Pierre de Chat	Nombre des mois secs	190/490	194/487	195/481
		Valeurs négatives minimales	-2,03	-1,90	-1,75
4.	Maghnia	Nombre des mois secs	179/490	188/487	180/481
		Valeurs négatives minimales	-2,01	-2,00	-1,77
5.	Turgot Nord	Nombre des mois secs	166/490	177/487	178/481
		Valeurs négatives minimales	-1,96	-1,94	-1,88
6.	Besbes CW18	Nombre des mois secs	154/490	176/487	183/481
		Valeurs négatives minimales	-1,92	-1,90	-1,90
7.	Ghazaouet	Nombre des mois secs	151/490	175/487	184/481
		Valeurs négatives minimales	-2,02	-2,01	-1,90
8.	Arzew	Nombre des mois secs	160/490	174/487	180/481
		Valeurs négatives minimales	-1,90	-1,88	-1,83
9.	Haçaiba	Nombre des mois secs	159/490	162/487	156/481
		Valeurs négatives minimales	-1,97	-2,28	-1,85
10.	Sidi Ali Benyoub	Nombre des mois secs	163/490	167/487	166/481
		Valeurs négatives minimales	-2,05	-2,03	-1,77
11.	Sidi Bel Abbes	Nombre des mois secs	169/490	173/487	165/481
		Valeurs négatives minimales	-2,00	-1,94	-1,92
12.	Bouhanifia	Nombre des mois secs	163/490	174/487	162/481
		Valeurs négatives minimales	-2,01	-1,90	-1,89
13.	Ammi Moussa	Nombre des mois secs	156/490	173/487	171/481
		Valeurs négatives minimales	-2,6	-2,56	-2,34
14.	Oued Abtal	Nombre des mois secs	155/490	176/487	170/481
		Valeurs négatives minimales	-2,55	-2,43	-2,2
15.	Sidi M. Benouda	Nombre des mois secs	160/490	179/487	175/481
		Valeurs négatives minimales	-2,29	-2,14	-2,11
16.	Takhmert	Nombre des mois secs	162/490	178/487	173/481
		Valeurs négatives minimales	-2,27	-2,29	-2,09

VIII.2.3. Répartition des valeurs de SRI selon les classes de conditions de sécheresse

Le tableau VIII.2 montre les résultats de la répartition en pourcentage de tous les mois (41 années d'observation) selon les classes de conditions de sécheresse pour les stations : Beni Bahdel (Tafna), Ghazaouet (côtiers oranais), Haçaiba (Macta) et Ammi Moussa (Chellif) respectivement. Ces stations présentent des résultats assez représentatifs pour l'ensemble des stations hydrométriques de chaque bassin versant étudié. Les résultats des autres stations sont détaillés dans l'annexe II.

CHAPITRE VIII : Résultats et Discussions

L'évolution des valeurs SRI, indique que le pourcentage de mois modérément secs dans les quatre stations (donc sur les quatre bassins) est plus ou moins identique et qu'il a augmenté à mesure que l'échelle du temps de la période d'accumulation a augmenté pour la station Ghazaouet et celle de Ammi Moussa. Le pourcentage des mois très secs a diminué à mesure que la période d'accumulation est allongée, bien que pour le Côtiers Oranais, il n'y a pas eu de tendance claire pour cette classe. Le pourcentage de mois extrêmement secs est non significatif pour toutes les périodes d'accumulation (<1%) à l'exception de la station Ammi moussa (Chellif) dont le pourcentage est le plus important et diminue en allant vers les longues périodes d'agrégation.

Tableau VIII.2. Pourcentage de distribution des classes de sécheresse selon l'indice SRI

Indice	Extrêmement secs <-2	Sévèrement secs - 2<indice<-1,5	Modérément secs - 1,5<indice<-1	Non secs
<i>Beni Bahdel</i>				
SRI-3	0,20	3,06	13,88	82,86
SRI-6	0,09	1,64	16,63	81,63
SRI-12	0,07	1,42	16,01	83,51
<i>Ghazaouet El Bor</i>				
SRI-3	0,17	2,08	8,13	89,62
SRI-6	0,08	4,82	10,27	74,83
SRI-12	0,09	2,76	14,86	82,29
<i>Haçaiba</i>				
SRI-3	0,41	3,16	8,98	86,55
SRI-6	0,23	1,85	10,65	87,27
SRI-12	0,07	1,25	10,41	88,27
<i>Ammi Moussa</i>				
SRI-3	2,65	4,08	8,98	85,00
SRI-6	2,05	3,70	9,24	84,29
SRI-12	1,87	3,33	9,56	85,24

VIII.2.4. Résultats d'analyse de la durée de sécheresse hydrologique

La durée de la sécheresse la plus longue est exprimée en termes de nombre maximum de mois secs consécutifs pour chaque station. En moyenne, la durée des événements hydrologiques secs est très proche pour les différents bassins. Cependant, la durée maximale enregistrée pour

chaque station (chaque bassin) correspond souvent à l'allongement de la période d'accumulation (Figure VIII.3). La durée maximale de la sécheresse en se basant sur SRI-12 a été enregistrée au niveau du côtiers oranais avec 34 mois consécutifs (à la station Turgot nord, du 05.1997 au 02.1982) suivie par celle enregistrée au bassin de la Macta (station Haçaïba) avec 32 mois du 11.1990 au 03.1993. Cette période sèche a été caractérisée par des épisodes sévères (-1,86) (10.1992). La durée maximale de la sécheresse minimale est observée au bassin du Cheliff précisément à la station de Takhmert avec 21 mois à partir du 12.2003 au 06.2005.

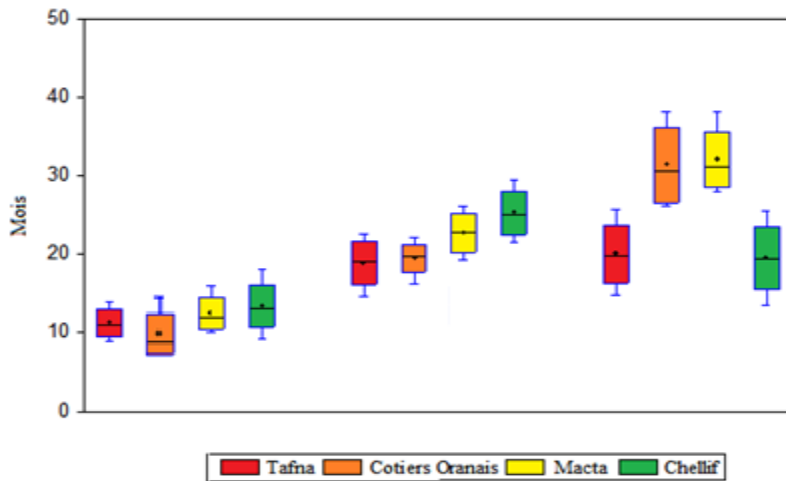


Figure VIII.3 : Boîte à moustache de la durée de sécheresse hydrologique (période d'accumulation du gauche à droite 3, 6, 12 mois respectivement)

VIII.2.5. Répartition des événements de sécheresse hydrologique par mois humides

Cette analyse vise à caractériser les événements hydrologiques par leurs mois de déclenchements le plus fréquent durant la saison humide (Octobre-Mars) du 1968-2009 (Figure VIII.4). Les résultats de l'indice SRI-3, indiquent une grande similitude entre les stations au sein du même bassin en termes de mois de déclenchement de la sécheresse hydrologique le plus dominant par rapport aux autres échelles de temps. Plusieurs événements de sécheresses au niveau des bassins de la Macta et Cheliff, se sont déclenchés au cours des mois (Novembre et Décembre). Au niveau du bassin de la Tafna, le déclenchement des épisodes secs parvenus principalement au mois d'Octobre à la station hydrométrique de Beni Bahdel et celle de Chouly alors que le mois de déclenchement le plus dominant pour la station de Turgot (au nord du bassin) est le mois de Décembre. La majorité des événements hydrologiques secs aux stations du côtiers oranais sont enregistrés entre Janvier et Mars donc trop tard par rapport aux autres bassins analysés. Pour SRI-6, le déclenchement des occurrences des sécheresses hydrologiques est plus marqué dans la première moitié de la période humide s'est poursuivie pour la majorité

des stations. Cependant, les mois de déclenchement des sécheresses hydrologiques les plus fréquents durant la saison humide en utilisant SRI-12 ne présentent aucune similitude entre les stations ou bassins.

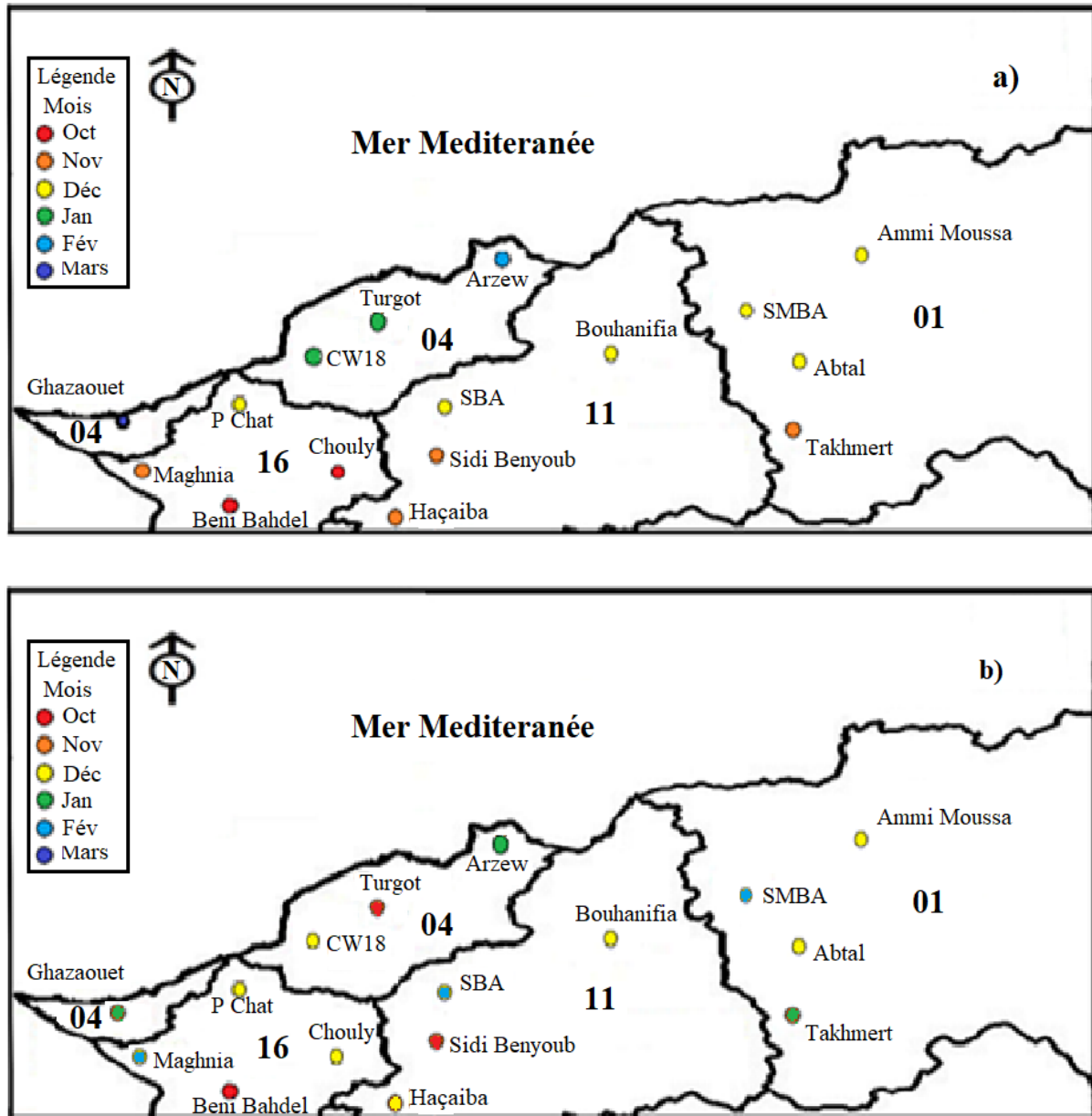


Figure VIII.4 : Répartition des stations hydrométriques selon les mois de déclenchement de la sécheresse hydrologique durant la saison humide: (a) indice SRI-3 ; (b) Indice SRI-12.

VIII.3. Résultats de la réponse hydrologique à la sécheresse météorologique

VIII.3.1. Résultats de la corrélation entre les deux types de sécheresse

Les résultats obtenus pour les stations suivantes : Beni Bahdel, Ghazaouet El Bor, Haçaiba, et Ammi Moussa sont présentés dans le tableau VIII.3. Les résultats de corrélation des autres stations sont mentionnés dans l'annexe II

CHAPITRE VIII : Résultats et Discussions

Tableau VIII.3 : Coefficient de corrélation de Pearson des stations étudiées

	Indice	SPI-3	SPI-6	SPI-12	RDI-3	RDI-6	RDI-12		Indice	SPI-3	SPI-6	SPI-12	RDI-3	RDI-6	RDI-12
	Station Beni Bahdel	SRI-3	0.29	0.17	0.02	0.31	0.17		0.01	Station Ghazaouet El Bor	SRI-3	0.27	0.22	0.16	0.29
	SRI-6	0.17	0.31	0.06	0.20	0.34	0.07		SRI-6	0.17	0.30	0.24	0.20	0.32	0.26
	SRI-12	0.04	0.09	0.33	0.09	0.14	0.37		SRI-12	0.16	0.25	0.30	0.21	0.29	0.34
	Indice	SPI-3	SPI-6	SPI-12	RDI-3	RDI-6	RDI-12		Indice	SPI-3	SPI-6	SPI-12	RDI-3	RDI-6	RDI-12
	Station Haçaiba	SRI-3	0.48	0.36	0.23	0.49	0.36		0.24	Station Ammi Moussa	SRI-3	0.65	0.50	0.37	0.67
	SRI-6	0.45	0.56	0.42	0.46	0.58	0.43		SRI-6	0.48	0.68	0.50	0.52	0.71	0.54
	SRI-12	0.32	0.44	0.62	0.33	0.46	0.64		SRI-12	0.40	0.52	0.72	0.46	0.58	0.73

*Les numéros en gras montrent le Coefficient max entre les indices parmi les différentes échelles du temps

Comme le montre le tableau VIII.3, la dépendance entre les deux types de sécheresse est statistiquement significative pour la station Ammi Moussa (Bassin Chellif) et la station de Haçaïba (bassin de la Macta), ainsi que la corrélation la plus forte est produite à mesure que l'échelle de temps augmente. À l'opposé, la station de Beni Bahdel (Tafna) et celle de Ghazaouet présentent des corrélations faibles entre les paires d'indices. De plus, les meilleurs résultats sont obtenus entre les paires des valeurs SRI et RDI appariées.

L'indice SRI-3 présente la corrélation la plus élevée avec les deux indices météorologiques basés sur des données agrégées sur 3 mois. La forte corrélation est enregistrée à la station Ammi Moussa avec $r = 0,67$, tandis que le meilleur résultat obtenu au côtières oranais par la station Ghazaouet est avec $r = 0,29$. Pour l'échelle de 6 mois, la plus forte corrélation est observée aussi à la station Ammi Moussa entre SRI-6 et RDI-6 avec $r = 0,71$ comparativement à $r = 0,58$ et $0,34$ pour les stations Haçaïba et Beni Bahdel respectivement, alors que le meilleur résultat produit à la station Ghazaouet soit $0,32$.

Ce coefficient augmente pour toutes les combinaisons appariées qui sont agrégées sur 12 mois avec des évolutions appartenant à la fourchette de $0,34$ à $0,74$. Selon les résultats obtenus, le temps de réponse de la sécheresse hydrologique par rapport aux conditions météorologiques de sécheresse est variable d'un bassin à un autre. Cependant, l'indice SRI est mieux corrélé avec les indices de la sécheresse météorologique analysés de la même période d'agrégation, principalement avec l'indice RDI.

De plus, les indices de la sécheresse sur une période agrégée de 12 mois expliquent mieux la relation entre les deux types de sécheresse que les accumulations sur une période plus courte capturant la synchronisation la plus élevée dans un changement de situation de sécheresse.

Par conséquent, l'échelle de 12 mois est considérée ici comme appropriée pour définir la relation entre les deux types de sécheresse. En guise d'explication, les valeurs de l'indice SRI sont plus dispersées et utilisent la fonction de normalisation comme celle des indices de sécheresse météorologique normalisés.

En revanche, le RDI améliore mieux cette corrélation car il est basé sur des mesures de précipitations et de température, il représente donc mieux le déficit du bilan hydrique qu'un autre indice basé uniquement sur les précipitations (Tsakiris & Vangelis, 2005). De plus, les résultats d'un exercice de corrélation entre la sécheresse météorologique et les conditions hydrologiques montrent que la corrélation la plus forte est souvent trouvée pour les indices qui incluent

l'évaporation qui joue un rôle crucial dans la saison chaude reflétée dans une corrélation plus élevée (Tijdeman et al, 2018).

D'autre part, la corrélation la plus élevée explique que l'évolution des événements de sécheresse hydrologique est significativement associée aux changements des conditions météorologiques en conséquence ; elle peut être affectée directement par les déficits pluviométriques locaux.

La faible corrélation indique qu'il y a un changement non synchronisé entre les deux types de sécheresse. Dans ce cas, la propagation de la sécheresse météorologique à la sécheresse hydrologique aurait pu être limitée du fait de l'effet des caractéristiques physiographiques du bassin.

La raison principale est que le régime hydrologique n'est pas directement affecté par le déficit pluviométrique, mais peut être lié aux caractéristiques physiographiques du bassin où différentes études ont clairement montré que la durée de la sécheresse hydrologique est étroitement liée à la réactivité du système aquifère (Peters et al, 2006 ; Van Loon, 2015).

La figure VIII.5 montre l'évolution temporelle de la sécheresse hydrologique et la sécheresse météorologique aux quatre stations représentées par SRI-12 et RDI-12 respectivement. On peut voir qu'une variation plus ou moins similaire des schémas de périodes sèches / humides enregistrée dans les stations analysées bien que ces points de mesure se situent dans des conditions climatiques assez identiques.

Des différences ont été trouvées dans le comportement des deux types de sécheresse en termes de la durée, de l'intensité et l'ampleur de certains événements secs lorsque la corrélation entre les deux types de sécheresse est moins importante.

CHAPITRE VIII : Résultats et Discussions

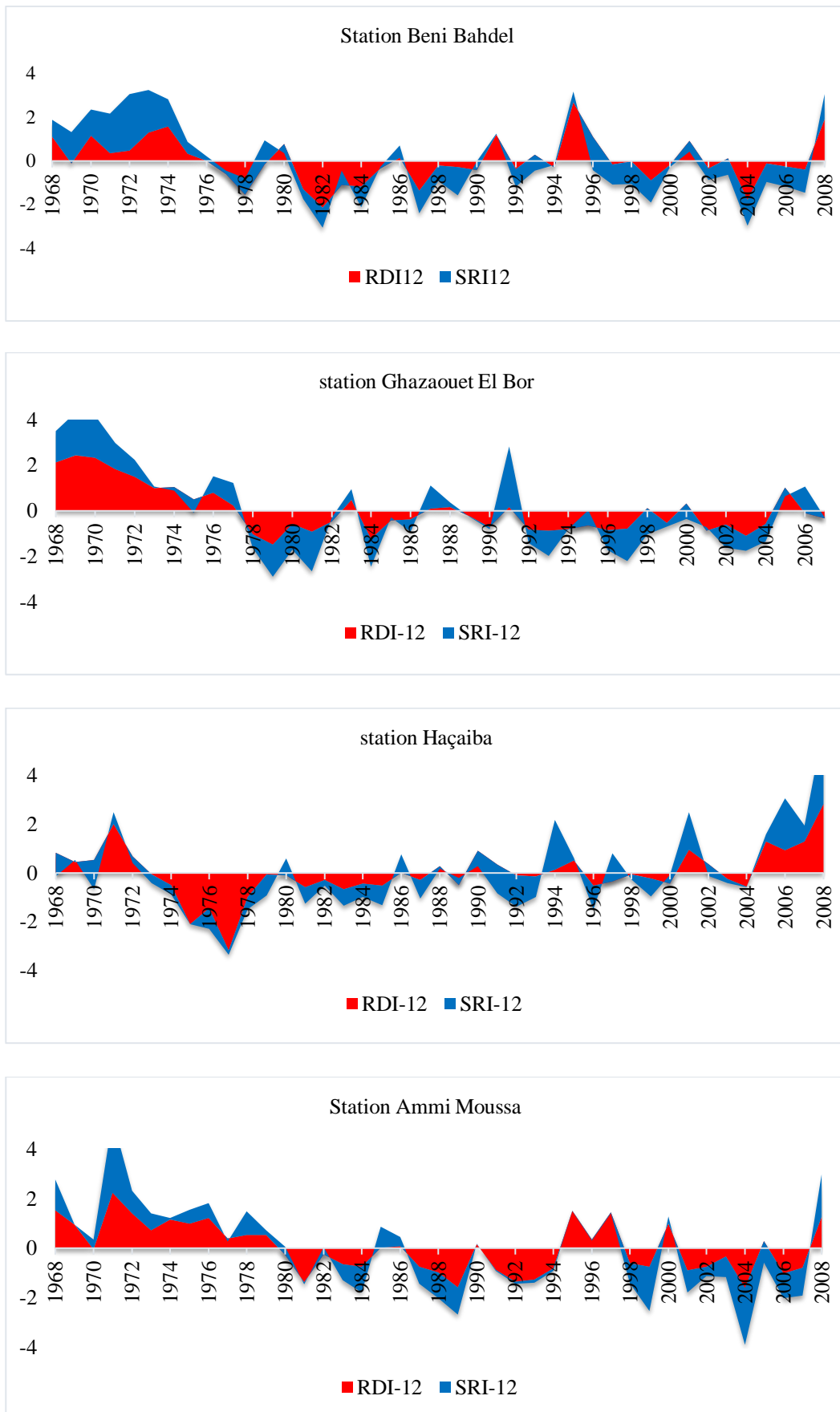


Figure VIII.5. Variations temporelles de SRI-12 et RDI-12 (1968-2009)

VIII.3.2. Analyse de la courbe (ROC)

Dans cette étude, la courbe ROC est appliquée pour vérifier la performance de la réponse prédite de la sécheresse hydrologique (l'événement prédit) expliquée par la sécheresse météorologique (l'événement observé) pour différentes échelles de temps. La courbe ROC évalue donc la capacité à faire la distinction entre la sécheresse hydrologique et l'absence de sécheresse à partir de la sécheresse météorologique observée.

Les résultats obtenus pour les stations de Beni Bahdel (Tafna), Ghazaouet El Bor (Cotiers Oranais), Haçaïba (Macta) et Ammi Moussa (Chellif) pour un seuil de sécheresse (-1) sont présentés dans le tableau VIII.4 (et annexe II)

Tableau VIII.4 : Aire sous les courbes (ROC)

Station	Echelle de temps	Aire sous courbe
Beni Bahdel	3-mois	0.573
	6- mois	0.575
	12- mois	0.592
Ghazaouet El Bor	3- mois	0.538
	6- mois	0.570
	12- mois	0.603
Haçaïba	3- mois	0.702
	6- mois	0.746
	12- mois	0.778
Ammi Moussa	3- mois	0.805
	6- mois	0.822
	12- mois	0.831

Comme le montre le tableau VIII.4, l'AUC est très variable entre les stations et selon l'échelle de temps considérée.

Ces résultats conviennent mieux au coefficient de corrélation. Donc, plus la corrélation est forte plus le AUC est important. De plus, pour l'échelle de temps la plus longue, les résultats sont plus performants. Les meilleurs résultats sont affichés à la station d'Ammi Moussa, où l'AUC se situe entre 0,805 et 0,831. Ainsi, cela indique que cette relation a une performance élevée. A titre d'explication, lorsque la sécheresse météorologique est déclarée, la probabilité de déclenchement d'une sécheresse hydrologique est plus importante. Cette performance diminue pour les autres

stations lorsque la corrélation diminue. A la station de Beni Bahdel, l'AUC est moins importante et varie entre 0,505 et 0,573.

Tenant compte les résultats de la figure VIII.6, les courbes ROC aux échelles de temps multiples sont proches ou au-dessus de la ligne de non-compétence indiquant un changement de performance significatif entre les stations.

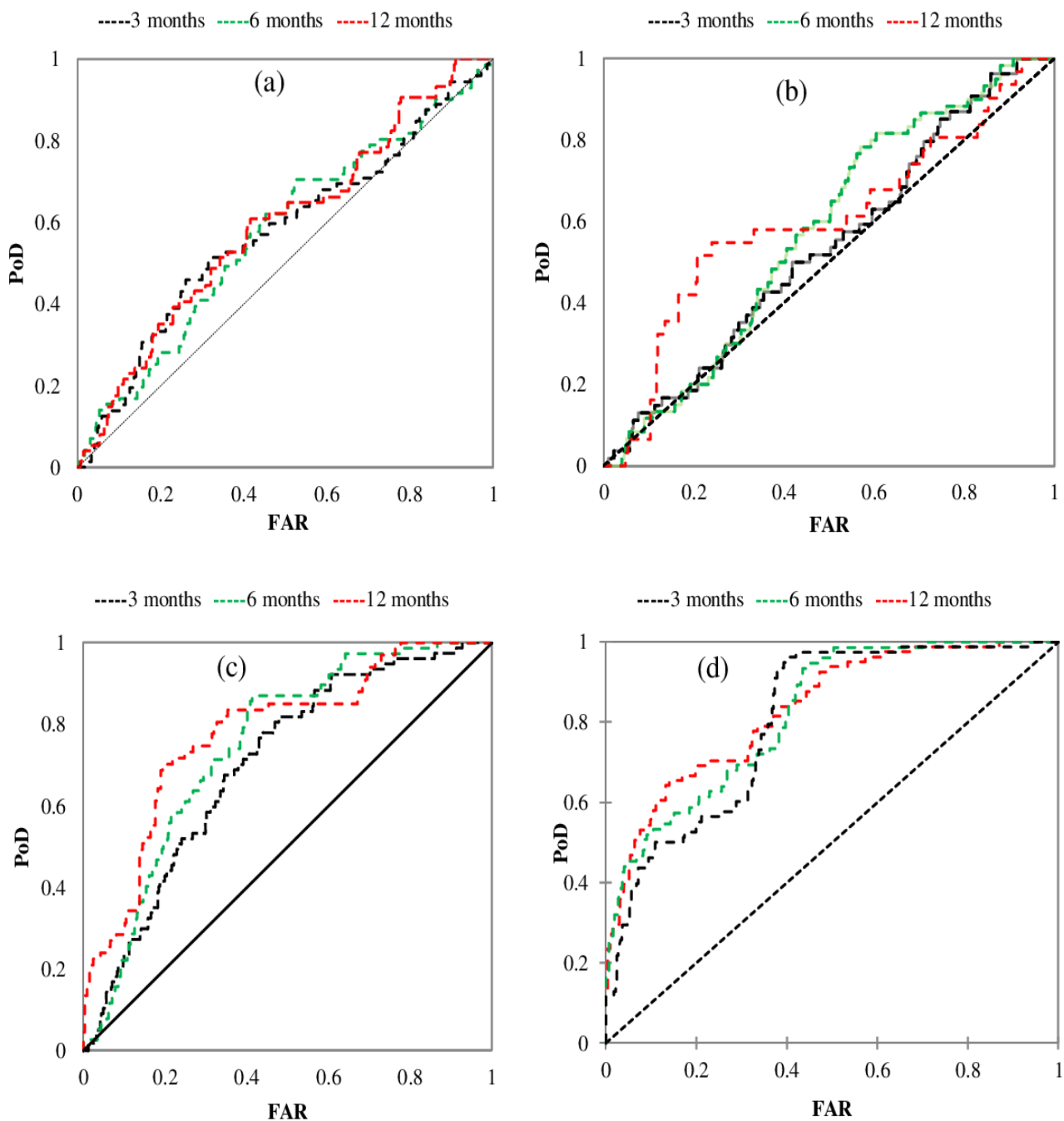


Figure VIII.6 : Variation AUC des courbes ROC pour (a) Beni Bahdel (b) Ghazaouet El Bor (c) Haçaiba (d) Ammi Moussa

VIII.4. Réponse de la sécheresse hydrologique aux caractéristiques de la région d'étude

VIII.1. Résultats de l'indice BFI

Suite aux résultats de corrélation trouvés entre les deux types de sécheresse au niveau de notre région d'étude, l'évolution hydrologique de la sécheresse dépend donc non seulement des conditions météorologiques. Les propriétés de chaque bassin versant peuvent avoir plus d'influence sur ce processus. L'indice BFI est calculé sur des échelles de temps de 3, 6 et 12 mois pour chaque site, puis les valeurs du BFI sont moyennées sur toute la période d'observation.

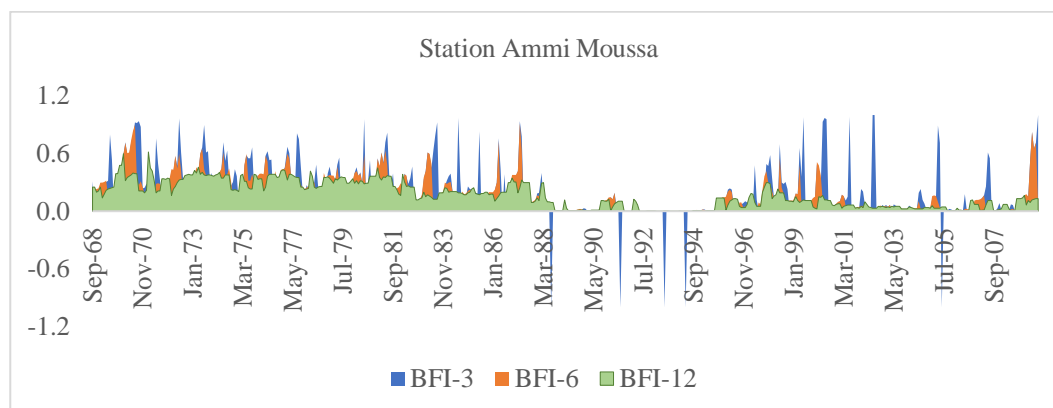


Figure VIII.7 : variation des séries de BFI-3, BFI-6 et BFI-12 pour la station Ammi Moussa (1968-2009)

Les valeurs BFI moyennes pour les stations retenues sont comparables aux meilleurs résultats de corrélation à la même échelle de temps (tableau VIII.5). Les résultats des autres stations étudiées sont indiqués dans l'annexe II

Tableau VIII.5 : BFI moyen comparable aux valeurs de r pour les stations étudiées

Station	Echelle du temps	BFI	r
Beni Bahdel	3-mois	0.68	0.31
	6- mois	0.61	0.34
	12- mois	0.53	0.37
Ghazaouet El Bor	3- mois	0.70	0.29
	6- mois	0.66	0.32
	12- mois	0.62	0.34
Haçaiba	3- mois	0.55	0.49
	6- mois	0.47	0.58
	12- mois	0.42	0.64
Ammi Moussa	3- mois	0.21	0.67
	6- mois	0.18	0.71
	12- mois	0.16	0.73

Comme l'indique le tableau VIII.5, les valeurs moyennes du BFI présentent une variabilité importante entre les stations et selon l'échelle de temps considérée. Le BFI-3 moyen varie entre

0,21 et 0,70 où la valeur la plus basse est enregistrée à Ammi Moussa par rapport à la meilleure corrélation obtenue. A l'opposé, FBI moyen le plus élevé est indiqué à la station de Ghazaouet où la corrélation entre les deux types de sécheresse est la plus faible. Ainsi, ce site a une composante du débit de base de l'ordre de 70 % du débit annuel total. Pour la même période, le BFI-6 moyen s'avère inférieur au BFI-3 moyen et varie entre 0,18 et 0,66 indiquant que 18 % à 66 % des séries d'écoulements à une échelle de temps de 6 mois peuvent provenir de l'écoulement des eaux souterraines et autres sources retardées. Pour les conditions à long terme (12 mois), cet indice présente les valeurs les plus basses pour toutes les stations où le BFI correspondant se situe entre 0,16 et 0,62, ce qui indique que la proportion à long terme des volumes d'eau pourrait provenir d'un écoulement souterrain ou d'autres effets retardés. Les sources représentent 16% - 62% du ruissellement intégré au cours de la période étudiée. Ces résultats montrent une moyenne plus élevée des valeurs BFI associées à un faible coefficient de corrélation entre les deux sécheresses et vice versa. Cependant, des valeurs BFI plus élevées sont interprétées comme l'indicateur d'une plus grande quantité d'eau provenant de sources stockées (Tallaksen & Van Lanen, 2004). De plus, les valeurs BFI moyennes les plus élevées sont enregistrées sur des formations karstiques perméables (cas par exemple du côtiers oranais constitué par une structure géologique perméable donnant une infiltration importante et donc l'écoulement est plutôt limité (Benhedda, 2014). Par ailleurs, les valeurs inférieures correspondent à des formations non karstifiées à faible perméabilité (cas de la Macta et le Chellif).

Il est à noter que notre région est très vaste avec une variabilité importante en terme géologique et d'autres caractéristiques alors que le climat est relativement uniforme régi par le même régime climatique. Ces résultats sont conformes aux études précédentes axées sur les niveaux : local, régional et mondial (par exemple, Tallaksen & Van Lanen, 2004 ; Santhi et al, 2008 ; Bakreti et al, 2012 ; Bouabdelli et al, 2020).

D'autre part, à mesure que l'échelle de temps augmente, des valeurs moyennes inférieures de BFI sont obtenues par rapport à une forte corrélation enregistrée et vice versa. Ce résultat pourrait être lié à la saisonnalité des flux et les propriétés de stockage et de libération de chaque bassin (stockage dans les sols, les aquifères, etc.). D'après ces résultats, nous pouvons conclure que la sécheresse hydrologique au niveau des différents bassins analysés est régie par une combinaison de contrôle du climat et du bassin, mais pas de la même manière. En effet, la saisonnalité des précipitations, les étés chauds et l'indice BFI sont des paramètres importants de contrôle de la sécheresse hydrologique (Tijdeman et al, 2016).

VIII.5. Résultats de performance de la prévision de la sécheresse hydrologique

VIII.5.1. La matrice des probabilités de transition entre les états (modèle Markovien)

Quant au modèle markovien (MSM), le tableau VIII.5 illustre la matrice des probabilités de transition estimée entre les états ; sec (*d*) et humide (*w*) du processus Markovien pour une station sélectionnée dans chaque bassin. Les transitions sec-sec et humide-sec présentent les valeurs de probabilité les plus élevées au-dessus de 80 %, tandis que les transitions sec-humide et humide-humide présentent la probabilité la plus faible, inférieure à 20 %. Toutes les stations ont montré les probabilités de transition les plus élevées qui conduisent à des conditions sèches ce qui montre clairement la persistance de la sécheresse pour cette partie du pays, alors que les probabilités de transition les plus faibles conduisent à des conditions humides reflétant les caractéristiques climatiques de la région d'étude. Les probabilités de transition vers l'état sec sont plus élevées pour ces stations à mesure que l'échelle de temps augmente.

Tableau VIII.6 Matrice de probabilité de transition pour une chaîne de Markov à deux états.

Beni Bahdel			Ghazaouet El Bor		
SRI 3	<i>d</i>	<i>w</i>	SRI 3	<i>d</i>	<i>W</i>
<i>d</i>	0.889	0.111	<i>d</i>	0.912	0.088
<i>w</i>	0.916	0.084	<i>w</i>	0.888	0.112
SRI 6	<i>d</i>	<i>w</i>	SRI 6	<i>d</i>	<i>W</i>
<i>d</i>	1.000	0.000	<i>d</i>	0.918	0.082
<i>w</i>	0.951	0.049	<i>w</i>	0.939	0.061
SRI 12	<i>d</i>	<i>w</i>	SRI 12	<i>d</i>	<i>W</i>
<i>d</i>	0.963	0.037	<i>d</i>	0.950	0.050
<i>w</i>	1.000	0.000	<i>w</i>	0.999	0.001
Hacaiba			Ammi Moussa		
SRI 3	<i>d</i>	<i>w</i>	SRI 3	<i>d</i>	<i>W</i>
<i>d</i>	0.814	0.186	<i>d</i>	0.956	0.044
<i>w</i>	0.801	0.199	<i>w</i>	0.881	0.119
SRI 6	<i>d</i>	<i>w</i>	SRI 6	<i>d</i>	<i>W</i>
<i>d</i>	1.000	0.000	<i>d</i>	0.885	0.115
<i>w</i>	0.901	0.099	<i>w</i>	0.995	0.005
SRI 12	<i>d</i>	<i>w</i>	SRI 12	<i>d</i>	<i>W</i>
<i>d</i>	1.000	0.000	<i>d</i>	0.913	0.087
<i>w</i>	0.965	0.035	<i>w</i>	1.000	0.000

d : état sec

w : état humide

VIII.5.2. Résultats de performance des modèles de prévision

Les résultats de performance de la prévision des événements hydrologiques par les deux modèles traduits par l'évolution des valeurs SRI à 3, 6 et 12 mois, pour les délais de décalage de 1 et 6 mois pour les stations choisies sont présentés dans les tableaux VIII.6/7/8 qui illustrent la variation des valeurs R^2 et RMSE sur de la période de prévision (1997-2009).

Le tableau VIII.7 indique que la performance de prévision des valeurs SRI-3 est assez similaire en utilisant les deux modèles en termes de valeurs R^2 et RMSE lorsque le temps de décalage est de 1 mois. Ces résultats sont plus ou moins proches pour toutes les stations dont la meilleure performance est enregistrée à la station de Beni Bahdel (bassin de la Tafna), en appliquant le modèle MSM-RDI avec respectivement 0,858 et 0,426 tandis que la station de Haçaiba (bassin de la Macta) présente les performances les plus faibles en utilisant la même approche avec 0,743 et 0,564 respectivement. L'introduction de SPI ou RDI comme des variables explicatives pour les deux modèles améliore cette performance à des degrés divers pour les stations de Beni Bahdel, Haçaiba et Ammi Moussa avec un léger avantage pour les modèles impliquant le RDI. Cependant, les résultats obtenus à la station Ghazaouet ne présentent pas cette tendance. Pour cela, la meilleure prévision SRI-3 pour un temps de décalage de 1 mois en utilisant MSM-SRI a des résultats de 0,801 et 0,437 respectivement. D'autre part, cette performance diminue pour les deux modèles et dans toutes les stations à mesure que le temps de décalage passe à 6 mois, notamment pour la régression robuste. Ainsi, le meilleur résultat est enregistré à la station Ammi Moussa en utilisant MSM-RDI en terme de R^2 avec 0,598, alors que le meilleur R^2 estimé à la station Ghazaouet avec l'approche MSM-SRI est de 0,314.

CHAPITRE VIII : Résultats et Discussions

Tableau VIII.7 : Résultats de performance de SRI-3 pour MSM et RRM

Bassin/Station	indice	Modèle	R ²	RMSE	Modèle	R ²	RMSE	Bassin/Station	indice	Modèle	R ²	RMSE	Modèle	R ²	RMSE		
<i>Délai 1 mois (LT-1)</i>																	
Tafna/Beni Bahdel	SRI 3	MSM	0.832	0.466	RRM	0.833	0.466	Côtiers oranais /Ghazaouet El Bor	SRI3	MSM	0.801	0.437	RRM	0.799	0.437		
		MSM-SPI	0.856	0.432	RRM-SPI	0.844	0.441			MSM-SPI	0.732	0.488	RRM-SPI	0.759	0.479		
		MSM-RDI	0.858	0.426	RRM-RDI	0.853	0.440			MSM-RDI	0.769	0.473	RRM-RDI	0.766	0.474		
Macta/Haçaiba		MSM	0.734	0.586	RRM	0.710	0.620	Cheliff/Ammi Moussa		MSM	0.768	0.562	RRM	0.758	0.566		
		MSM-SPI	0.740	0.574	RRM-SPI	0.722	0.603			MSM-SPI	0.842	0.463	RRM-SPI	0.837	0.463		
		MSM-RDI	0.743	0.564	RRM-RDI	0.722	0.602			MSM-RDI	0.851	0.457	RRM-RDI	0.839	0.459		
<i>Délai 6 mois (LT-6)</i>																	
Tafna/Beni Bahdel		SRI 3	MSM	0.445	0.768	RRM	0.111	0.938		Côtiers oranais /Ghazaouet El Bor	SRI 3	MSM	0.314	0.796	RRM	0.198	0.834
			MSM-SPI	0.449	0.738	RRM-SPI	0.114	0.868				MSM-SPI	0.237	0.844	RRM-SPI	0.129	0.923
	MSM-RDI		0.573	0.686	RRM-RDI	0.172	0.863	MSM-RDI	0.276			0.839	RRM-RDI	0.183	0.897		
Macta/Haçaiba	MSM		0.419	0.796	RRM	0.122	1.130	Cheliff/Ammi Moussa	MSM	0.527		0.708	RRM	0.409	1.009		
	MSM-SPI		0.374	0.813	RRM-SPI	0.106	1.152		MSM-SPI	0.584		0.639	RRM-SPI	0.522	0.805		
	MSM-RDI		0.413	0.795	RRM-RDI	0.119	1.136		MSMRDI	0.598		0.601	RRM-RDI	0.538	0.788		

Le tableau VIII .8 illustre les résultats des prévisions des valeurs SRI-6 en utilisant les mêmes approches. La performance de la prévision est plus importante pour SRI-6 par rapport à SRI-3. Pour un temps de décalage de 1 mois, les résultats obtenus sont très proches pour les deux modèles, alors que la meilleure performance en termes de critères sélectionnés est enregistrée à la station de Beni Bahdel en utilisant le processus Markovien (MSM-RDI) avec 0,953 et 0,235 respectivement. Cependant, la meilleure performance enregistrée à la station Ghazaouet en utilisant la méthode de régression (RRM-SRI) présente des valeurs de 0,852 et 0,414 respectivement. De plus, à mesure que le temps est porté à 6 mois, la précision des prévisions se détériore sur tous les sites notamment les résultats de la régression robuste. Les meilleurs résultats parmi toutes les mesures de performance ayant les valeurs les plus élevées de 0,820 et 0,492 à la station Ammi Moussa en utilisant MSM-RDI tandis que la station Ghazaouet présente le R^2 le plus bas avec 0,344 en utilisant l'approche RRM-SRI.

CHAPITRE VIII : Résultats et Discussions

Tableau VIII.8 : Résultats de performances de SRI-6 pour MSM et RRM

Bassin/Station	indice	Modèle	R ²	RMSE	Modèle	R ²	RMSE	Bassin/Station	indice	Modèle	R ²	RMSE	Modèle	R ²	RMSE
<i>Délai 1 mois (LT-1)</i>															
Tafna/Beni Bahdel	SRI6	MSM	0.937	0.258	RRM	0.932	0.265	Côtiers oranais/Ghazaouet El Bor	SRI6	MSM	0.852	0.417	RRM	0.852	0.414
		MSM-SPI	0.945	0.236	RRM-SPI	0.934	0.254			MSM-SPI	0.828	0.456	RRM-SPI	0.839	0.445
		MSM-RDI	0.953	0.235	RRM-RDI	0.938	0.253			MSM-RDI	0.829	0.449	RRM-RDI	0.842	0.437
Macta/Haçaiba		MSM	0.860	0.368	RRM	0.858	0.387	Cheliff/Ammi Moussa		MSM	0.893	0.348	RRM	0.894	0.348
		MSM-SPI	0.867	0.350	RRM-SPI	0.861	0.381			MSM-SPI	0.934	0.256	RRM-SPI	0.933	0.259
		MSM-RDI	0.867	0.350	RRM-RDI	0.861	0.381			MSM-RDI	0.936	0.248	RRM-RDI	0.934	0.252
<i>Délai 6 mois (LT-6)</i>															
Tafna/Beni Bahdel	SRI6	MSM	0.660	0.587	RRM	0.371	0.772	Côtiers oranais /Ghazaouet El Bor	SRI6	MSM	0.590	0.659	RRM	0.344	0.782
		MSM-SPI	0.739	0.492	RRM-SPI	0.401	0.695			MSM-SPI	0.385	0.875	RRM-SPI	0.285	0.934
		MSM-RDI	0.752	0.491	RRM-RDI	0.480	0.673			MSM-RDI	0.430	0.766	RRM-RDI	0.289	0.881
Macta/Haçaiba		MSM	0.368	1.183	RRM	0.217	1.242	Cheliff/Ammi Moussa		MSM	0.726	0.637	RRM	0.331	0.897
		MSM-SPI	0.454	1.001	RRM-SPI	0.372	1.143			MSM-SPI	0.808	0.534	RRM-SPI	0.584	0.716
		MSM-RDI	0.454	0.999	RRM-RDI	0.365	1.151			MSM-RDI	0.820	0.492	RRM-RDI	0.588	0.693

Le tableau VIII.9 montre que les résultats de performance du SRI-12 prévu pour chaque station sont les plus précis par rapport aux résultats du SRI-3 et du SRI-6 et pour tous les délais de décalage. Cependant, les résultats des différentes approches se sont rapprochés. Les meilleurs résultats de prévision du SRI-12 sont enregistrés à la station Beni Bahdel pour un temps décalé de 1 mois avec des valeurs R^2 et RMSE de 0,981 et 0,119 respectivement en utilisant le modèle markovien (MSM-RDI), alors que les meilleurs résultats trouvés à la station Haçaiba en utilisant la même approche sont 0,948 et 0,408 respectivement. De plus, la qualité des prévisions diminue lorsque le temps est de 6 mois. Cette dégradation des performances est plus importante en appliquant la méthode de régression. Par conséquent, la performance la plus élevée est obtenue à la station Beni Bahdel en utilisant MSM-RDI avec des valeurs de 0,901 et 0,277 respectivement. Cependant, la précision la plus faible est estimée à la station Ammi Moussa en utilisant RRM-RDI avec un R^2 de 0,677.

CHAPITRE VIII : Résultats et Discussions

Tableau VIII.9 : Résultats de performances de SRI-12 pour MSM et RRM

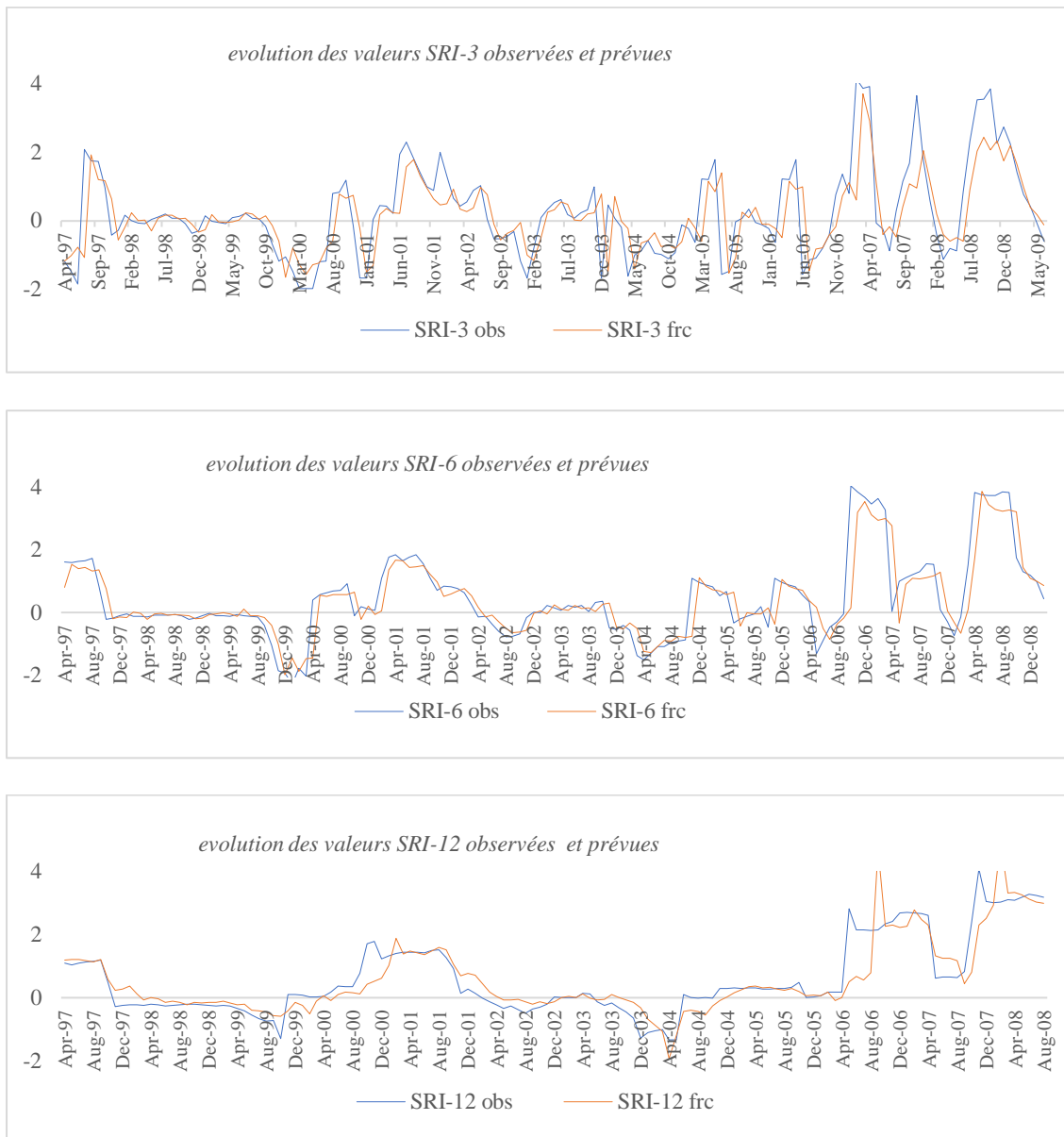
Bassin/Station	indice	Modèle	R ²	RMSE	Modèle	R ²	RMSE	Bassin/Station	indice	Modèle	R ²	RMSE	Modèle	R ²	RMSE	
<i>Délai 1 mois (LT-1)</i>																
Tafna/Beni Bahdel	SRI 12	MSM	0.978	0.132	RRM	0.977	0.135	Côtiers oranais /Ghazaouet El Bor	SRI12	MSM	0.961	0.188	RRM	0.961	0.187	
		MSM-SPI	0.973	0.123	RRM-SPI	0.970	0.128			MSM-SPI	0.949	0.213	RRM-SPI	0.957	0.196	
		MSM-RDI	0.981	0.119	RRM-RDI	0.978	0.127			MSM-RDI	0.949	0.213	RRM-RDI	0.957	0.196	
Macta/Hacaiba		MSM	0.946	0.411	RRM	0.946	0.409	Cheliff/Ammi		MSM	0.949	0.264	RRM	0.949	0.264	
		MSM-SPI	0.947	0.410	RRM-SPI	0.946	0.408	Moussa		MSM-SPI	0.963	0.227	RRM-SPI	0.956	0.248	
		MSM-RDI	0.948	0.408	RRM-RDI	0.947	0.408			MSM-RDI	0.963	0.226	RRM-RDI	0.956	0.248	
<i>Délai 6 mois (LT-6)</i>																
Tafna/Beni Bahdel	RI12	MSM	0.878	0.289	RRM	0.739	0.438	Côtiers oranais /Ghazaouet El Bor	SRI12	MSM	0.804	0.408	RRM	0.705	0.506	
		MSM-SPI	0.870	0.281	RRM-SPI	0.721	0.419			MSM-SPI	0.756	0.459	RRM-SPI	0.613	0.581	
		MSM-RDI	0.901	0.277	RRM-RDI	0.748	0.416			MSM-RDI	0.697	0.498	RRM-RDI	0.611	0.588	
Macta/Haçaiba		MSM	0.796	0.680	RRM	0.689	0.744	Cheliff/Ammi		MSM	0.771	0.513	RRM	0.624	0.716	
		MSM-SPI	0.819	0.630	RRM-SPI	0.704	0.720			Moussa	MSM-SPI	0.857	0.402	RRM-SPI	0.671	0.630
		MSM-RDI	0.848	0.575	RRM-RDI	0.719	0.700				MSMRDI	0.857	0.402	RRM-RDI	0.677	0.628

Selon ces résultats trouvés, les deux modèles à différentes échelles de temps montrent de meilleures performances à un temps de décalage de 1 mois avec une supériorité pour les prévisions des conditions de sécheresse à long terme. L'introduction des variables SPI ou RDI aux modèles retenus améliore la qualité des prévisions pour plusieurs stations avec une précision différente et une légère supériorité en utilisant l'indice RDI. Par contre, les résultats obtenus aux stations situées aux bassins du côtiers oranais et celle de la Tafna ne présentent pas la même performance. Ces résultats s'accordent bien avec ceux obtenus par la corrélation entre les deux types de sécheresse, c.à.d. lorsque ce coefficient est important, la prévision en utilisant SPI ou RDI devient plus performante et vice versa. Par ailleurs, lorsque le délai de décalage est porté à 6 mois, les résultats se dégradent pour tous les sites principalement si on utilise la méthode de régression.

Pour le bassin Chellif, l'utilisation des indices SPI ou du RDI comme des variables indépendantes, améliore fortement les performances de prévision des deux modèles, ce qui montre que l'évolution temporelle des valeurs SRI est fortement liée à l'évolution de la sécheresse météorologique. Ce résultat est évident aussi pour les stations situées dans le bassin de la Macta. En revanche, l'introduction des indices météorologiques n'améliore pas les performances des modèles pour les stations situées aux bassins de la Tafna et côtiers oranais ce qui indiquent l'existence d'un changement non synchronisé entre les valeurs du SRI et les indices météorologiques de sécheresse ou bien limité par les caractéristiques physiographiques des deux bassins.

Pour les prévisions de sécheresse à court terme, une interprétation de la faible corrélation entre les valeurs SRI-3 observées et prévues est que les variations des conditions de sécheresse à court terme sont plus sensibles à toute fluctuation du régime hydrologique dans la région. Cette sensibilité peut aussi expliquer les résultats au regard des critères de performance. De même, les valeurs de R^2 sont élevées pour les différentes stations, ce qui montre l'aspect persistant de la sécheresse.

Par ailleurs, la figure VIII.8 illustre l'évolution des valeurs SRI observés et ceux prévus par le meilleur modèle de prévision à la station Haçaiba pour les différentes échelles du temps.



Obs : observée frc : prévue

Figure VIII.8 : variation des valeurs SRI observées et prévues durant la période de prévision (cas de la station Haçaiba)

L'intervalle de confiance prévu à 95 % est obtenu en fonction des bornes supérieure et inférieure les plus étroites, comme indiqué dans les figures VIII.9 et VIII.10. L'intervalle de confiance minimum de prévision est obtenu pour un meilleur résultat de prévision sur les quatre stations. Les intervalles de confiance sont symétriques aux variations des séries SRI prévues. La largeur de l'intervalle est plus étroite pour les valeurs SRI-12 prévues et il est plus large pour les prévisions des valeurs SRI- 3 que pour SRI-6. Par conséquent, la différence entre les résultats obtenus à travers les stations étudiées est liée au temps de réponse hydrologique par rapport aux conditions météorologiques enregistrées, qui sont variables d'un bassin à l'autre.

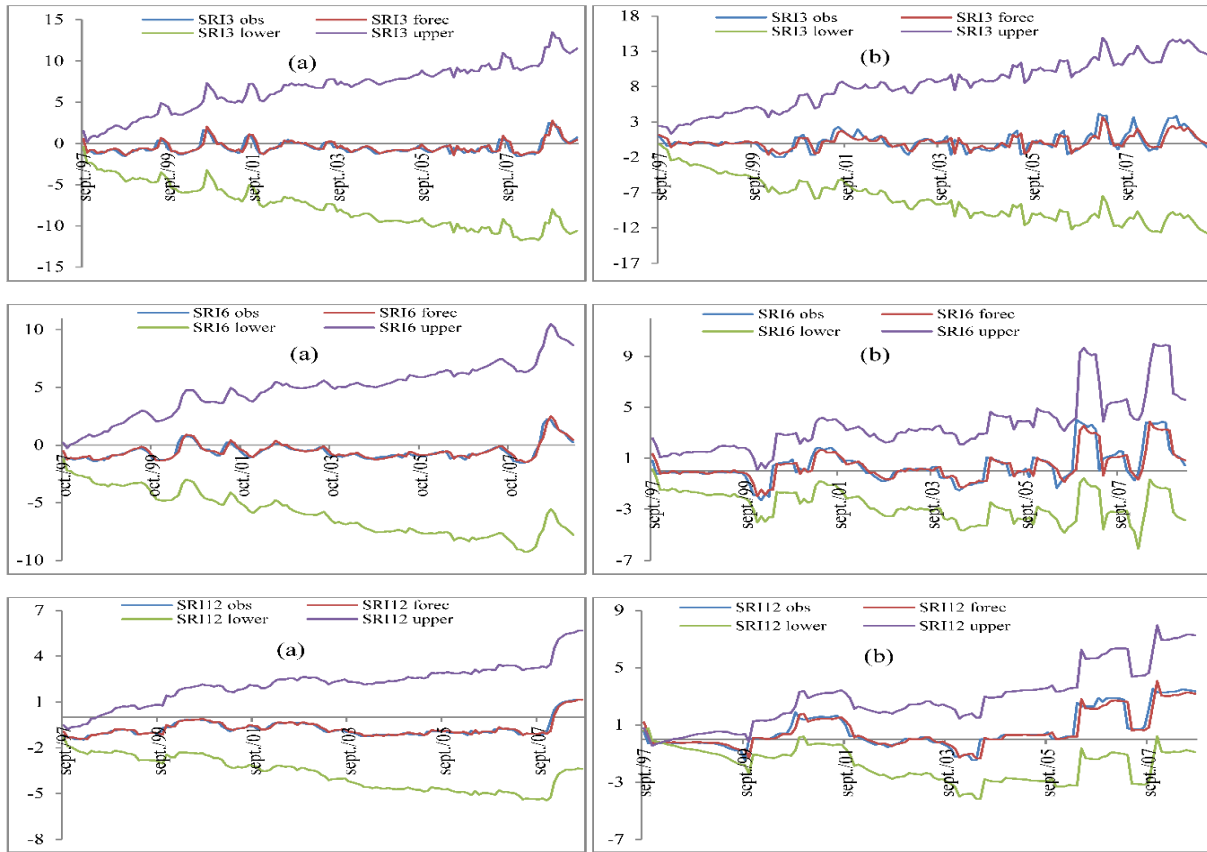


Figure VIII.9 : résultats de l'intervalle de confiance et de prévision pour (a) Beni Bahdel (b) Haçaiba au niveau de confiance 95%

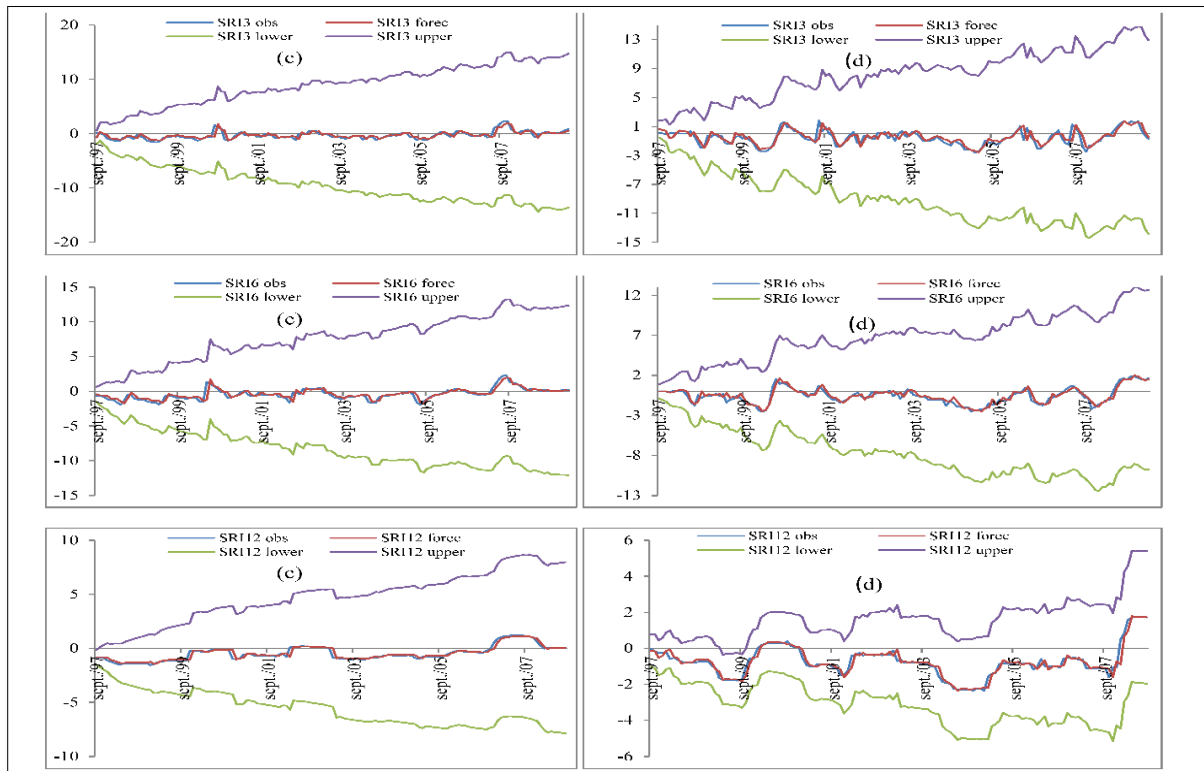


Figure VIII.10 : résultats de l'intervalle de confiance et prévision pour (c) Ghazaouet (d) Ammi Moussa au niveau de confiance 95%

VIII.5.3. Résultats de changements d'erreur des prévisions basés sur le temps écoulé :

Le tableau VIII.10 illustre les valeurs de indice de l'erreur de prévision relative E_{min} et l'indice de la moyenne de l'erreur relative cumulée F_{min} , leur mois d'occurrence à différentes échelles de temps en se basant sur les meilleurs résultats de prévision obtenus.

Tableau VIII.10 : E_{min} et F_{min} de la période de prévision

Station	SRI	E_{min}	Mois	\bar{E}	F_{min}	Mois	Station	SRI	E_{min}	Mois	\bar{E}	F_{min}	Mois
Beni Bahdel	SRI 3	0,002	4 ^{eme} Septembre	0,543	0,306	3 ^{eme} Octobre	Ghazaouet El Bor	SRI 3	0,008	3 ^{eme} Janvier	0,727	0,350	1 ^{er} Septembre
	SRI 6	0,0007	6 ^{eme} Juillet	0,349	0,249	11 ^{eme} Aout		SRI 6	0,003	3 ^{eme} Avril	0,579	0,315	3 ^{eme} Juillet
	SRI 12	0,0006	1 ^{er} Janvier	0,124	0,151	1 ^{er} Janvier		SRI 12	0,002	3 ^{eme} Avril	0,262	0,060	1 ^{er} Septembre
Hacaiba	SRI 3	0,001	9 ^{eme} Février	0,897	0,315	1 ^{er} Septembre	Ammi Moussa	SRI 3	0,032	10 ^{eme} Juillet	0,887	0,675	1 ^{er} Janvier
	SRI 6	0,001	7 ^{eme} Novembre	0,722	0,198	1 ^{er} Novembre		SRI 6	0,004	7 ^{eme} Janvier	0,583	0,278	1 ^{er} Octobre
	SRI 12	0,0008	2 ^{eme} Février	0,503	0,036	1 ^{er} Septembre		SRI 12	0,002	7 ^{eme} Avril	0,271	0,265	1 ^{er} Octobre

Les résultats mentionnés dans le tableau VIII.10 montrent une différence entre les valeurs de observées et prévues de l'indice SRI-3, SRI-6 et SRI-12 en termes de valeurs d'indice E et d'indice F pour toutes les stations qui sont plus faibles pour SRI-12 en présentant donc les changements d'erreur les moins importants et donnent donc la supériorité à l'échelle de temps le plus long. Le taux le plus bas de l'indice F_{min} s'est produit plus souvent dans les prévisions du premier mois. Pour une meilleure compréhension des changements de l'indice F au cours de la période de prévision, la Figure VIII.10 pourrait être utilisée. La fluctuation des valeurs de l'indice F pour le SRI-12 est moins importante et atteint une sorte de stagnation rapide en erreur comparativement aux autres séries. De même, cette fluctuation est plus visible pour les valeurs SRI-3 que SRI-6. La Figure VIII.11 montre aussi que les fluctuations diminuent généralement après la troisième année de prévision, donc la qualité de précision augmente pour les 9 prochaines années qui pourraient être mieux prévues par le modèle.

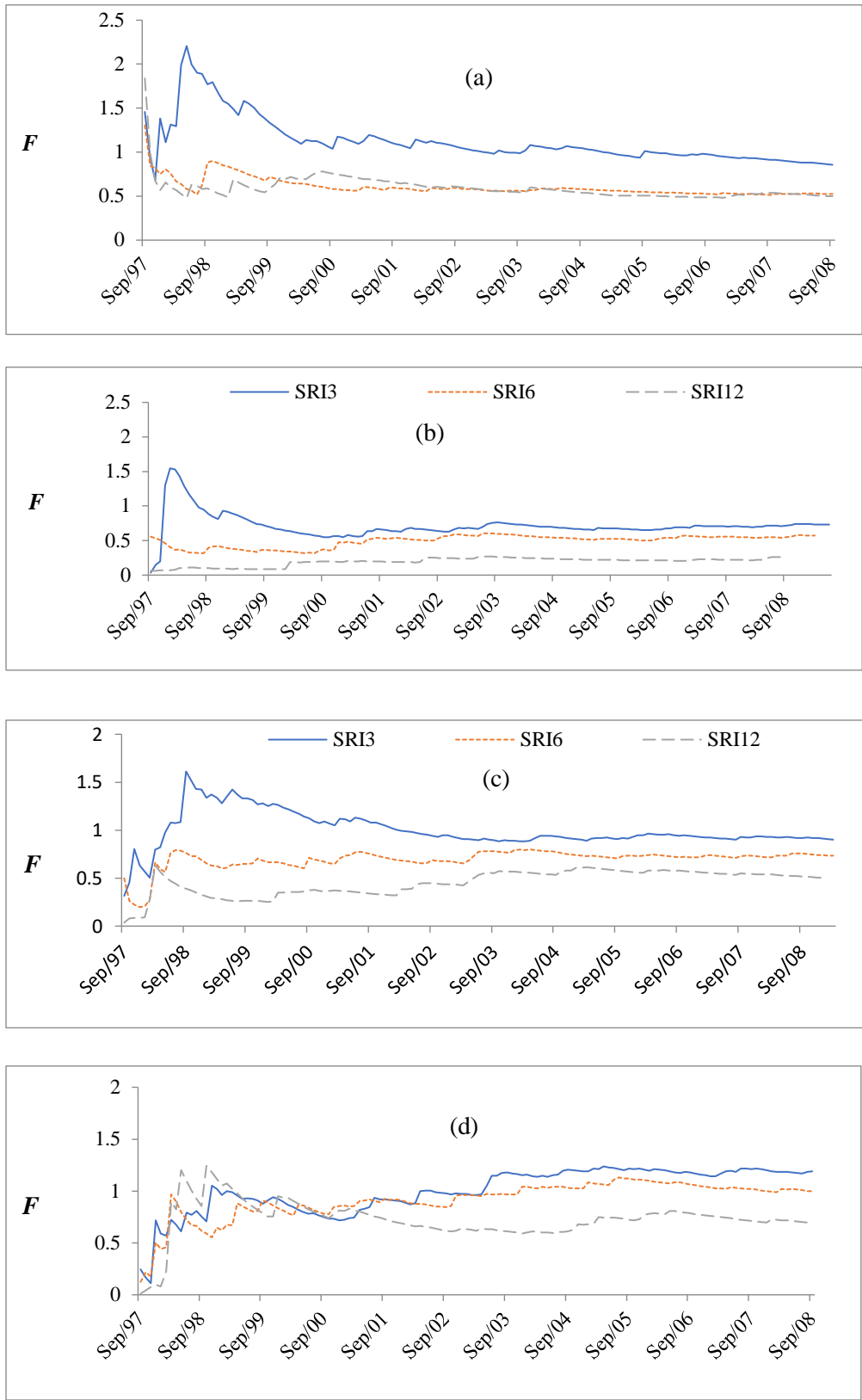


Figure VIII .11 : Variations de l'indice F (a) Beni Bahdel (b) Haçaiba (c) Ghazaouet El Bor (d) Ammi Moussa.

VIII.6. Conclusion :

Dans la présente partie, les indices de sécheresse retenus sont générés à plusieurs échelles de temps pour explorer les caractéristiques de la sécheresse hydrologique et sa réponse aux conditions de sécheresse météorologique dans la partie occidentale du pays.

Les résultats indiquent une persistance à la sécheresse hydrologique traduite par l'évolution des valeurs continuellement négatives de l'indice SRI, ce qui correspond au préalable à l'importance du réchauffement climatique dans cette partie du pays.

Les résultats ont révélé aussi que la région d'étude se distingue par des différences dans la caractérisation de la formation de sécheresse hydrologique entre les bassins hydrologique. Le comportement hydrologique des bassins est assez complexe et aucun modèle n'est clair pour mieux expliquer la dimension spatiotemporelle de ce type de sécheresse.

L'analyse révèle que la réponse hydrologique aux déficits cumulés de précipitations n'est pas homogène dans les quatre bassins et n'est pas toujours causée par une sécheresse météorologique locale. Cependant, la performance la plus élevée de cette réponse est obtenue en impliquant les indices SRI et RDI à mesure que l'échelle temporelle augmente. Aussi, l'étude a mis en évidence l'influence du contrôle des caractéristiques des bassins sur l'évolution de cette réponse.

La courbe ROC est utilisé pour mesurer la performance de réponse de la sécheresse hydrologique à la sécheresse météorologique en fonction de l'état de sécheresse. Les résultats montrent que la compétence de distinction entre les événements secs et les événements non secs varient d'une station à une autre et ce sont mieux adaptés à la corrélation entre les deux types de sécheresse pour une échelle de temps croissante.

En utilisant l'indice BFI aux échelles de temps considérées, il révèle que les caractéristiques des bassins étudiés ont affecté la corrélation entre les deux événements à des degrés différents. Par conséquent, on suppose que les processus hydrologiques de la sécheresse sur la région d'étude n'ont pas les mêmes facteurs déterminants.

Les performances du modèle de chaîne de Markov et la régression robuste en appliquant trois approches différentes pour la prévision des conditions de la sécheresse hydrologique sont testées. Les résultats obtenus indiquent que plus l'échelle de temps est longue, plus la qualité des prévisions est mieux. La performance de la prévision des valeurs SRI à différentes échelles de temps est assez similaire pour les deux modèles lorsque le temps de décalage est d'un mois

avec une légère supériorité pour les chaînes de Markov. Cependant, l'introduction des indices météorologiques comme des variables indépendantes aux modèles améliore cette performance pour plusieurs stations avec une précision différente et un léger avantage à l'approche basée sur l'indice RDI, alors que la précision de la prévision des événements secs enregistrée aux autres stations présente une tendance à la baisse.

À la lumière de ces résultats, nous ne pouvons pas considérer ces indices météorologiques comme des variables explicatives des événements hydrologiques sur l'ensemble des stations. Cependant, la précision des prévisions diminue dans toutes les stations pour différentes échelles de temps à mesure que le temps de décalage de la prévision passe à 6 mois, notamment pour le modèle de la régression.

Les changements dans l'erreur relative et la moyenne de l'erreur relative cumulée sont moins importants lorsque l'échelle de temps augmente et indiquent une nette supériorité des conditions de sécheresse prévues à long terme. En effet, la précision augmente généralement après la troisième année de la période de prévision.

Conclusion Générale et Perspectives

Un consensus mondial est que les évènements climatiques et hydrologiques extrêmes seront plus sévères et fréquents, notamment pour la région méditerranéenne, aux horizons futurs. Considérant le problème du réchauffement climatique et ses impacts, il demeure impératif d'apporter plus d'information sur la situation hydro-climatique de notre pays notamment sa partie occidentale pour mieux gérer nos ressources en eau.

Pour pouvoir atteindre cet objectif, la compréhension de la sécheresse hydrologique s'avère nécessaire dans le but d'aller vers la création d'un outil national d'alerte à la sécheresse. En effet, dans cette thèse, une partie de cette problématique a été traitée en portant plus d'attention à l'évolution de la sécheresse hydrologique sur le nord-ouest Algérien.

Dans une première partie, Les points suivants méritent cependant d'être cités :

La sécheresse est un aléa naturel complexe et une composante normale de la variabilité du climat caractérisant toutes les régions climatiques du globe. Elle constitue en fonction de leur degré d'exposition à l'aridité et de leurs politiques de gestions appliquées, une source de vulnérabilité variable d'un pays à l'autre.

La sécheresse et le réchauffement climatique et sont liés, mais ces processus ne doivent pas être confondus, ni mentionnés comme s'ils étaient interchangeables, si on vise à aborder la problématique de la gestion du risque la sécheresse sur des bases scientifiques justes.

En Algérie, ce n'est pas une nouvelle que le régime climatique change de façon inquiétante avec le temps et que ce changement pourrait avoir des impacts négatifs sur les différents secteurs économiques confrontés à un manque d'eau significativement long et important.

Des études menées en Algérie ont répertorié plusieurs occurrences de sécheresse du XXe siècle, caractérisées par une réduction importante et persistante des précipitations (sécheresse pluriannuelle) et une grande extension spatiale (touchant l'ensemble du pays ou presque) alors que d'autres études prédisent que le changement climatique va accentuer ce phénomène au niveau national et régional. Influencée particulièrement par la distribution géographique des précipitations, la partie occidentale est la plus marquée et la plus vulnérable par cet aléa avec des occurrences récurrentes et sévère depuis plusieurs décennies.

L'analyse des politiques de gestion de ce risque adoptées actuellement dans le pays révèle que la stratégie de réponse est principalement axée sur une gestion de la crise, par la déclaration d'un plan d'urgence de lutte contre ce phénomène visant à atténuer ses conséquences sur les

Conclusion Générale et Perspectives

différents secteurs. L'Algérie ne dispose pas d'un dispositif d'alerte précoce à ce risque qui nécessite une complémentarité de compétences œuvrant dans les différentes disciplines (télédétection, climatologie, hydrologie, agronomie, économie...). Bien que la sécheresse est prise par plusieurs structures et secteurs d'activité dans leur stratégies respectives, mais aucune structure n'existe pour la coordination entre les structures qui suivent ce phénomène ou à l'alerte précoce utilisée pour fournir une synthèse commune aide à la décision en cas d'une sécheresse.

La deuxième partie propose comme région d'étude une vaste zone hydrographique qui regroupe quatre bassins versants dans le nord-ouest Algérien, en visant d'analyser l'évolution des caractéristiques hydrologiques des sécheresses et les performances de prévisions de ses épisodes. Tenant compte du rôle primordial des indices dans l'examen de la sécheresse, trois indices largement utilisés par les auteurs dans les recherches scientifiques dans ce domaine qui sont retenus : l'indice SRI (sécheresse hydrologique), SPI et RDI (sécheresse météorologique) à des échelles de temps de courte, moyenne et longue période.

Le calcul de ces indices a été effectué par les séries de données hydro climatiques de longue durée émanant de quarante stations dont la répartition est moyennement homogène sur l'ensemble de la région d'étude et une période d'analyse assez satisfaisante.

Les résultats suivants méritent d'être discutés :

L'évolution des valeurs de l'indice SRI au niveau les différentes stations choisis a permis de bien représenter l'historique des évènements de sécheresse hydrologiques précédentes en indiquant la gravité, la durée et la couverture de cet aléa.

La majorité des épisodes hydrologiques sèches sont modérées, bien que des sécheresses sévères, voire extrêmes, se sont révélées traduisant un changement du régime hydrologique sur la zone d'étude à partir de la décennie 1970-1980. Cette tendance est représentée clairement par le nombre de mois secs important et plus prononcée en allant vers l'extrême ouest.

La durée de sécheresse hydrologique, a connaît leur maximum durant des périodes différentes pour chaque station et chaque bassin examiné. Ces résultats révèlent que le comportement hydrologique des bassins est assez complexe et qu'il n'y a pas de modèle clair de représentation des caractéristiques de ce type de sécheresse.

La réponse de la sécheresse hydrologique aux facteurs d'influence a montré que les liens possibles entre les processus hydrologiques, les changements des conditions météorologiques

Conclusion Générale et Perspectives

et les caractéristiques physiographiques de chaque bassin sont variables. Selon la spécificité de chaque bassin analysé, les occurrences de sécheresse hydrologique sont soit significativement associée aux conditions météorologiques ou bien sont influencée fortement par l'effet des caractéristiques physiographiques de ces bassins.

Nous avons également dû appliquer deux modèles de prévision (les chaînes de Markov et la régression robuste) en cherchant la meilleure performance possible pour obtenir des résultats qui puissent servir de points de repère dans la gestion anticipée de ce phénomène.

Les deux modèles présentent des performances similaires et satisfaisantes à différentes échelles de temps avec une supériorité pour les conditions de sécheresse à long terme et un temps de décalage le plus court.

Les facteurs d'influence de la propagation de la sécheresse météorologique exprimée par les valeurs SPI et RDI comme entrées influence la qualité des prévisions sur les stations hydrométriques. Cette approche améliore la performance des modèles pour les stations dont la corrélation entre les deux types de sécheresse est significative avec une légère supériorité impliquant l'indice RDI. Cependant, cette performance diminue lorsque l'effet des caractéristiques du bassin est dominant.

Reconnaissons que cette étude n'a pas pris en considération d'autres facteurs influençant le changement du processus hydrologique de la sécheresse et qu'elle n'a pas permis de comparer parmi des différents indicateurs de sécheresse, pour en choisir un ou plusieurs selon leur performance en termes de réussite à refléter la situation réelle des événements passés et la meilleure performance à la prévision des événements futurs afin de décider du seuil d'action (mesures de secours).

Des investigations supplémentaires sur la variabilité spatiale de cette région, y compris la coévolution du paysage, le changement climatique, les caractéristiques de l'aquifère et les activités humaines sont nécessaires pour identifier les changements temporels du phénomène de sécheresse afin de coordonner le développement intégré et les utilisations durables des ressources en eau et de fournir une base plus solide pour la surveillance et la prévision des sécheresses hydrologiques.

BIBLIOGRAPHIE :

- Abderrahmani, B. Les risques climatiques et leurs impacts sur l'environnement. Thèse doctorat. Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf. Faculté de chimie .département de chimie organique industrielle. année de soutenance 2015. disponible sur < dspace.univ-usto.dz>. consulté le :05/01/2016
- Abrha, H., Hagos, H. 2019. Future drought and aridity monitoring using multi-model approach under climate change in Hintalo Wejerat district, Ethiopia. *Sustain. Water Resour. Manag.* 5, 1963–1972. <https://doi.org/10.1007/s40899-019-00350-1>
- Achour, K., Meddi, M., Zeroual, A., Bouabdelli, S., Maccioni, P., Moramarco, T. 2020 Spatio-temporal analysis and forecasting of drought in the plains of northwestern Algeria using the standardized precipitation index. *J. Earth Syst. Sci.* 129, 1–22.
- Adams, T. E., and T. C. Pagano. 2016: Flood forecasting : a global perspective. Elsevier, Amsterdam.
- Agence Du Bassin Hydrographique (ABH), Cheliff Zahrez. 2004.Cadastre hydraulique du bassin hydrographique du Cheliff- Aval du barrage de Boughzoul,
- Agence Nationale des ressources Hydriques (ANRH). 1999 : Etude des étiages de l'Algérie du Nord (Application et Synthèse), N° : 317/ANRH/DHYL/Avril.
- AghaKouchak, A., D. Feldman, M. Hoerling, T. Huxman and J. Lund. 2015: Water and climate: Recognize anthropogenic drought. *Nature News*, vol. 524, no. 7566, pp. 409–411
- Agung, I.G.N. 2011: Cross section and experimental data analysis using Eviews. Singapore/ Wiley
- Ahmadalipour, A., Moradkhani, H., and Demirel, M.C. 2017: A comparative assessment of projected meteorological and hydrological droughts: Elucidating the role of temperature. *Journal of Hydrology*, vol. 553, pp. 785–797.
- Aissani, B., Alili, D.J., Guejda, A., Mouhous, N., Ouldamura, A., 1995. Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord au 1/500 000. ANRH, Minist. Equipt, Alger.
- Ajami, N.K., Duan, Q., Sorooshian, S. 2007: An integrated hydrologic Bayesian multimodel combination framework: Confronting input, parameter, and model structural uncertainty in hydrologic prediction. *Water Resour. Res.* 43, W01403.
- Akintuğ B., Rasmussen P. F., 2005. A Markov switching model for annual hydrologic time series, *Water Resour. Res.*, Vol 41, W09424, DOI :10.1029/2004WR003605.
- Al-Faraj. F.A.M., Scholz. M., Tigkas. D., Boni. M., 2015. Drought indices supporting drought management in transboundary watersheds subject to climate alterations. *Water Policy* 17:5.865-886
- Alessa, L., Kliskey, A., Gamble, J., Fidel, M., Beaujean, G., Gosz, J. 2015: The role of Indigenous science and local knowledge in integrated observing systems: Moving toward adaptive capacity indices and early warning systems. *Sustainability Science.* 11. 10.1007/s11625-015-0295-7.

Algérie projet sur la Neutralité dans la Dégradation des Terres (APNDT). 2010 : Sommaire du Rapport national : Neutralité en matière de dégradation des terres « Mettre le concept en pratique »

Alwan, M.A., Ziboon A.R.T., and Khalaf A.G. 2019: Utilization of reconnaissance drought index (RDI) for monitoring of meteorological drought over middle Euphrates region during the period from 1988 to 2017. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 518 022035

American Meteorological Society (AMS). 2013. Drought.

<https://www2.ametsoc.org/ams/index.cfm/about-ams/ams-statements/statements-of-the-ams-in-force/drought/>

Anctil, F., Rousselle, J., Lauzon, N. 2012 : hydrologie, cheminement de l'eau. Presses internationales polytechniques » ; deuxième Edition

Andersen, R. 2008: Modern Methods for Robust Regression. Thousand Oaks : SAGE Publications.

Andersson, L., Wilk, J., Graham, L. P., Wikner, J., Mokwatlo, S., and Petja, B. 2019: Local early warning systems for drought – could they add value to nationally disseminated seasonal climate forecasts? *Weather Clim. Extrem.* 28:100241. doi: 10.1016/j.wace.2019.100241

ANRH, (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques), 1974. Étude hydrogéologique de la plaine de Collo - Algérie. Département de l'Arrondissement de Constantine, Algérie.

ANRH, 1993 : Plan de développement 2010. Alger

Apurv. T., Sivapalan. M., Cai. X., 2017. Understanding the role of climate characteristics in drought propagation. *Water Resources Research* .. 53. 9304–9329.: <http://doi.org/10.1002/2017WR021445>

Arnold, R and Wade, J.P. 2015 : A definition of systems thinking: A systems approach, , journal of Procedia Computer Science, volume44, pages 669-678.

Atrops, F., Benest, M., 1978 : Les formations a ammonites du Malm dans le bassin Tellien, au nord de Tiaret; Leur importance pour les corrélations avec les séries de l'avant-pays de l'Ouest algérien.

Auclair, D., Biehler, J., 1967 : Etude géologique des hautes plaines Oranaises entre Tlemcen et Saida, SGA n°34.

Ault, J. S., Mankin, B. I., Cook, and Smerdon, J. E. 2016: Relative impacts of mitigation, temperature, and precipitation on 21st-century megadrought risk in the American Southwest. *Sci. Adv.*, 2, e1600873, <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600873>.

Ault, T. R. 2020 : On the Essentials of Drought in a Changing Climate. *Science* 368 (6488), 256–260. doi:10.1126/science.aaz5492

Azmi, M., Rüdiger, C., Walker, J. 2016: A data fusion-based drought index. *Water Resour Res* 52:2222–2239. <https://doi.org/10.1002/2015WR017834>

Bachmair, S., Svensson, C., Hannaford, J., Barker, L.J., Stahl, K. 2016: A quantitative analysis to objectively appraise drought indicators and model drought impacts. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20 , 2589 –2609.

- Bae, D.H., Son, K.H., So, J.M., 2017. Utilization of the Bayesian method to improve hydrological drought prediction accuracy. *Water Resources Management*. 31(11). 3527–3541.
- Bakreti, A., Braud, I., Leblois, E., Benali, A., 2012. Combined rainfall and discharge analysis in the Tafna basin, western Algeria. *Hydrological Sciences Journal*, Volume 58. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.745080>
- Bao, Y., Meng, C., Shen, S., Qiu, X., Gao, P., Liu, C., 2011. Analysis on characteristics of a typical drought event in Jiangsu Province. *Shengtai Xuebao* 31 (22), 6853—6865.
- Bárdossy, A.; Singh, S.K. 2008: Robust estimation of hydrological model parameters. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 12, 1273–1283.
- Barker, L.J., Hannaford, J., Chiverton, A., Svensson, C., 2016: From meteorological to hydrological drought using standardised indicators.” *Hydrology and Earth System Sciences*.. vol. 20. no. 6. pp. 2483–2505.
- Batool S, Mahmood S.A, Shirazi S.A. 2021. Appraisal of Drought Indices based on Climatic Variability using DrinC Software for Potwar Region in Punjab Pakistan during 1981–2019. doi:10.20944/preprints202110.0393.v1
- Baudoin, M., S. Henly-Shepard, N., Fernando, A., S., Zommers, Z. 2014: Early warning systems and livelihood resilience: Exploring opportunities for community participation. UNU-EHS Working Paper Series No. 1, United Nations University Institute of Environment and Human Security (UNU-EHS), Bonn, Allemagne, 18 p.
- Beck, H.E., Vergopolan, N., Pan, M., Levizzani, V., Van Dijk, A.I.J.M., Weedon, G.P., Brocca, L., Pappenberger, F., Huffman, G.J., Wood, E.F. 2017: Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, pp. 6201-6217
- Benabdeli, K. et Mederbal, K., 2004 : Contribution à l'étude phytoécologique sur la zone humide de la Macta. Rapport d'expertise 9 p.
- Benhedda, N. 2014 : Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin versant de l'oued El Maleh (NW algérien). Mém. Ing. Etat, univ. Tlemcen. 145p.
- Benkhamallah, Z. 2021 : Thèse doctorat : caractérisation des aléas climatiques et impacts sur la ressource eau souterraine dans l'ouest algérien : cas de la région d'Aïn Temouchent. enjeux socio-économiques et environnementaux et gestion durable. Université El Djillali Sidi Bel Abbès
- Bensaoula, F., Collignon, B., Adjim, M. 2019: Assessment of groundwater resources in the Jurassic Horst (Western Algeria). In: *The Handbook of Environmental Chemistry* (D. Barceló & A. Kostianoy, eds.). Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1–42.
- Benslimane, M., Hamimed, A., El Zerey, W., Khaldi, A., et Mederbal, K., « Analyse et suivi du phénomène de la désertification en Algérie du nord », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 8 Numéro 3 | décembre 2008, mis en ligne le 18 février 2009, consulté le 26 avril 2023. URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/6782> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/vertigo.6782>
- Berg, A., and Sheffield, J. 2018: Climate change and drought: the soil moisture perspective. *Current Climate Change Reports*, vol. 4, no. 2, pp. 180–191

- Bessaoud, O., Pellissier, J.P., Rolland, W., Khechimi. 2019 : Rapport de synthèse sur l'agriculture en Algérie. [Rapport de recherche] CIHEAM-IAMM. 2019, pp.82. hal-02137632
- Bhardwaj, K, Shah D, Aadhar S, Mishra, V. 2020: Propagation of Meteorological to Hydrological Droughts in India. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 125. 10.1029/2020JD033455.
- Blenkinsop, S., Fowler, H. 2007: Changes in European Drought Characteristics Projected by the PRUDENCE Regional Climate Models. *International Journal of Climatology*. 27. 1595 - 1610. 10.1002/joc.1538.
- Bloomfield. J. P., Allen. D. J., Griffiths. K.J., 2009. Examining geological controls on baseflow index (bfi) using regression analysis: an illustration from the thames basin. UK. *J. Hydrol.* 373 (1–2). 164–176. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol>
- Blunden, J., Arndt, D. S. et Hartfield, G. (eds). 2018. *State of the Clim*
- Boisier, J.P., R. Rondanelli, R.D. Garreaud and Muñoz, F. 2016 : Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, vol. 43, no. 1, pp. 413–421.
- Boken, V. K., Cracknell, A.P and Heathcote, R.L. 2005: *Monitoring and predicting Agricultural Drought. A global study.* Oxford University Press
- Bonaccorso, B., Peres, D.J. Castano, A., Cancelliere, A. 2015: SPI-Based Probabilistic Analysis of Drought Areal Extent in Sicily. *Water Resour Manage* (2015) 29:459–470 DOI 10.1007/s11269-014-0673-4
- Botai, C., Botai, O., Wit, J., Ncongwane, K., Adeola, A. 2017: Drought Characteristics over the Western Cape Province, South Africa. *Water*. 9. 876. 10.3390/w9110876.
- Botterill, L.C., Hayes, MJ. 2012: Drought triggers and declarations: science and policy considerations for drought risk management. *Nat Hazards* [Internet]. Springer Netherlands; 2012. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s11069-012-0231-4>.
- Bouabdelli. S., Meddi. M., Zeroual. A., Alkama. R., 2020. Hydrological drought risk recurrence under climate change in the karst area of Northwestern Algeria. *Journal of Water and Climate Change*. [jwc2020207.https://doi.org/10.2166/wcc.2020.207](https://doi.org/10.2166/wcc.2020.207)
- Bouaoune, D., Dahmani-Megrerouche, M., 2010 : Reconstitution de données climatiques pour l'Algérie du Nord : application des réseaux neuronaux, *Comptes Rendus Geoscience*, Volume 342, Issue 11, Pages 815-822, ISSN 1631-0713, <https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.09.005>.
- Boukhlija-Hassen.R .2011 : Contribution à la gestion de l'eau dans la ville d'Oran, Thèse de Magister , Université Boudiaf Mohamed d'Oran
- Brunetti, M., Maugeri, M., Monti, F., Nanni, T. 2006: Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series. *Int. J. Climatol.*26(3), 345–381.
- Brunner, M.I., Liechti, K., and Zappa, M. 2019: Extremeness of recent drought events in Switzerland: dependence on variable and return period choice, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19, 2311–2323, <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2311-2019>.
- Buttafuoco, G., Caloiero, T., Coscarelli, R. 2011: Spatial and temporal patterns of the mean annual precipitation at decadal time scale in southern Italy (Calabria region). *Appl. Clim.* 105, 431–444

Cai, X., Shafiee-Jood, M., Apurv, T., Ge, Y., Kokoszka, S. 2017: Key issues in drought preparedness: reflections on experiences and strategies in the United States and selected countries. *Water Secur.* [Internet]. Elsevier; 2017. Available from:

www.sciencedirect.com/science/S2468312416300165.

Capderou, M., 1987. Theoretical and experimental models. Solar atlas of Algeria (in French). Tome2. Vol. 1. University Publications Office. Algeria.

Carrão, H., Naumann, G., and Barbosa, P. 2016: Mapping global patterns of drought risk: An empirical framework based on sub-national estimates of hazard, exposure and vulnerability, *Global Environ. Change*, 39, 108–124, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.04.012>

Carrão, H., Naumann, G. Barbosa, P. 2018: global projections of drought hazard in a warming climate: A prime for disaster risk management. *Climate Dynamics*, vol. 50, no. 5, pp. 2137–2155.

Centre de Développement des Energies Renouvelables CDER, 2002. SSN 1112-3850

Cervi, F., Petronici, F., Castellarin, A., Marcaccio, M., Bertolini, A., Borgatti, L. 2017 : Climate-change potential effects on the hydrological regime of freshwater springs in the Italian Northern Apennines. *The Science of the total environment*. 622-623. 337-348. [10.1016/j.scitotenv.2017.11.231](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.231).

Chachi, J and Roozbeh, M. 2017: A fuzzy robust regression approach applied to bedload transport data, *journal of Communications in Statistics - Simulation and Computation*, volume 46, p 1703 - 1714

Chang, T. J., and X. A. Cleopa, 1991: A proposed method for drought monitoring. *Water Resour. Bull.*, **27** , 275–281.

Chang, N. B., Vasquez, M. V. Chen, C. F. Imen, S. and Mullon, L. 2015: Global nonlinear and nonstationary climate change effects on regional precipitation and forest phenology in Panama, Central America. *Hydrol. Processes*, 29, 339–355, <https://doi.org/10.1002/hyp.10151>.

Changnon S. A., 1987: *Detecting Drought Conditions in Illinois*, Illinois State Water Survey, Champaign, IL, USA.

Chen, C. 2002. Robust regression and outlier detection with the ROBUSTREG procedure (Proceedings of the Twenty-Seventh Annual SAS Users Group International Conference, Cary, NC : SAS Institute Inc).

Cheng, L. Xu, Z. and Liu, Z. 2010: Hydrological response to climate change in the weihe river basin,” in *Proceedings of the 4th International Yellow River Forum on Ecological Civilization and River Ethics*, vol. 1, pp. 221–230.

Chen, H. Sun, J. 2019: Increased population exposure to extreme droughts in China due to 0.5°C of additional warming. *Environ. Res. Lett.* 14, 1–9.

Chen, X., Li, F.W., Li, J.Z., Feng, P.J.T., *Climatology* .A. 2019: "Three-dimensional identification of hydrological drought and multivariate drought risk probability assessment in the Luanhe River basin, China," pp. 1-22

Cherif, El ., Errih, M., Cherif. 2009 : Modélisation statistique du transport solide du bassin versant de l'Oued Mekerra (Algérie) en zone semi-aride méditerranéenne. *Hydrological Sciences Journal*. 54. 338-348. [10.1623/hysj.54.2.338](https://doi.org/10.1623/hysj.54.2.338).

Christensen J.H., T. Carterand et F. Giorgi (2002). Prudence employs new methods to assess European climate change. *Eos*, 83,1-2.

Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, R., Jones, R., Kolli, R. K., Kwon, W. K., Laprise, R., Magana Rueda, V., Mearns, L., Menendez, C. G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A., Whetton, P., Arritt, R., Benestad, R., Beniston, M., Bromwich, D., Caya, D., Comiso, J., de Elia, R., and Dethloff, K. 2007: Regional climate projections. *Climate Change: The Physical Science Basis*, in: chap. 11, Contribution of Working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, 847–940, 2007.

Cloke, H.L., Hannah, D.M. 2011: Large-scale hydrology: Advances in understanding processes, dynamics and models from beyond river basin to global scale. *Hydrological Processes*, 25, 991–995. <https://doi.org/10.1002/hyp.8059>

CNERIB classification, 1993. Ministère de l’habitat. Recommandations architecturales. Edition ENAG Alger

CNES. 2000: L'eau en Algérie : le grand défi de demain. CNES National Report, Alger. 15th Session, Conseil National Economique et Social, 15 May. CNES

Cobb, K.M., Charles, C.D. Cheng, H. and Edwards, R.L. 2003: El Niño/Southern Oscillation and tropical Pacific climate during the last millennium. *Nature*, vol. 424, no. 6946, pp. 271–276.

Cohen, A.S., J.R. Stone, K.R. Beuning, L.E. Park, P.N. Reinthal, D. Dettman, C.A. Scholz, T. C. Johnson, J.W. King, M.R. Talbot, E.T. Brown and S.J. Ivory. 2007: Ecological consequences of early Late Pleistocene megadroughts in tropical Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 104, no. 42, pp. 16422–16427.

Combalicer, E. Cruz, R Lee, S. & Sanghyun. 2010: Assessing climate change impacts on water balance in the Mount Makiling forest, Philippines. *Journal of Earth System Science*. 119. 265-283. [10.1007/s12040-010-0025-6](https://doi.org/10.1007/s12040-010-0025-6).

Cook, E.R., Woodhouse, C.A. Eakin, C.M. Meko D.M. and Stahle D.W. 2004: Long-term aridity changes in the western United States. *Science*, vol. 306, no. 5698, pp. 1015–1018

Cook, B.I., Seager, R. Miller R.L. and Mason J.A. 2013: Intensification of North American megadroughts through surface and dust aerosol forcing. *Journal of Climate*, vol. 26, no. 13, pp. 4414–4430.

Cook, B.I., Smerdon, J.E. Seager R. and Coats S. 2014: Global warming and 21st century drying. *Climate Dynamics*, vol. 43, no. 9–10, pp. 2607–2627

Cook, B.I. Anchukaitis, K. Touchan, R. Meko, D. Cook, E. 2016: Spatiotemporal drought variability in the Mediterranean over the last 900 years. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 121. n/a-n/a. [10.1002/2015JD023929](https://doi.org/10.1002/2015JD023929).

Cook, B.I., Mankin J.S. and Anchukaitis K.J. 2018: Climate change and drought: From past to future. *Current Climate Change Reports*, vol. 4, no. 2, pp. 164–179.

Cools, J., Innocenti D. et O’Brien S. 2016 : Lessons from flood early warning systems. *Environ. Sci. Policy*, 58, 117-122

Cornet, A., 1952. L'Atlas saharien sud-oranais ; S.N. R.E.P.A.L., Régions sud-telliennes et Atlas saharien ; FLANDRIN, J., Les chaînes atlasiques et la bordure nord du Sahara :

Monographies régionales du xix^e congrès géologique international, Alger, 1952, Ir e série, Algérie, nos 12, 20 et 14.

CPDN (Contribution Prévue Déterminée au niveau National), 2015

CTCN : climate technology centre and network, 2017: Climate Change Adaptation Technologies For Water A Practitioner's Guide To Adaptation Technologies For Increased Water Sector Resilience

Dahmani, . Hadji, F., Allal, F. 2003: Traitement des eaux du bassin hydrographique de la Tafna (NW Algeria). *Desalination*. 152. 10.1016/S0011-9164(02)01054-8.

Dai, A. 2011 : Drought under global warming: A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, vol. 2, no. 1, pp. 45–65

Damania, R., Desbureaux, S., Hyland, M., Islam, A., Moore, S., Rodella, A.S., Russ, J & Zaveri, E. 2017: *Uncharted Waters: The New Economics of Water Scarcity and Variability*. 10.1596/978-1-4648-1179-1.

Darkwah S.O., Scoville M.D., Wang L.K. 2021: Geographic Information Systems and Remote Sensing Applications in Environmental and Water Resources. In: Wang L.K., Wang MH.S., Hung YT., Shammam N.K. (eds) *Integrated Natural Resources Management. Handbook of Environmental Engineering*, vol 20. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55172-8_5

Deb, P.; Kiem, A.S. Willgoose, G. 2019: Mechanisms influencing non-stationarity in rainfall-runoff relationships in southeast Australia. *J. Hydrol.* 571, 749–764

DGF. 2004 : Atlas des zones humides Algériennes d' importance internationale. 4^{ème} édition, IV. 107p.

Dickey, D & Fuller, W. 1981: The Likelihood Ratio Statistics For Autoregressive Time Series With a Unit Root. *Econometrica*. 49. 1057-72. 10.2307/1912517.

Diffenbaugh, N.S., Swain D.L. and Touma D. 2015: Anthropogenic warming has increased drought risk in California. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112(13), pp. 3931–3936

Djellouli, F., Bouanani, A., Baba-Hamed, K. 2016: Efficiency of some meteorological drought indices in different time scales, case study: Wadi Louza basin (NW-Algeria). *Journal of Water and Land Development*

Dracup, J.A., Lee K.S. and Paulson E.G. 1980: On definition of droughts, *Wat. Resour. Res.*, 16(2), 289–296.

Draper N. R., Smith H. 1998 : *Applied Regression Analysis*, Third Edition, Wiley Interscience Publication, United States.

Du, J and Shi, C.X. 2012: Effects of climatic factors and human activities on runoff of the Weihe River in recent decades, *Quaternary International*, vol. 282, pp. 58–65.

Dupigny-Giroux, L.A. 2001: Towards characterizing and planning for drought in Vermont: Part I. A climatological perspective. *Journal of the American Water Resources Association*. ;37(3):505-525. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2001.tb05489.x

Durand, D. M. 1969: Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie. *Bull. Serv. Carte Géol. Algérie, N.S., n° 39*.

- Easterling, D. Evans, J. Groisman, P. Karl, T.R. Kunkel, K. Ambenje, P. 2000 : Observed Variability and Trends in Extreme Climate Events: A Brief Review. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 81. 10.1175/1520-0477(2000)081<0417:OVATIE>2.3.CO;2.
- EDO, 2018: EDO analytical reports, JRC European Drought Observatory (EDO), Drought in Central-Northern Europe – July 2018, Drought in Central-Northern Europe August 2018. <https://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1051>. Accessed 27 Mar 2020
- Edwards, D.C. and McKee, T.B. 1997 : Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Time Scales. *Climatology Report 97-2*, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins.
- El Garouani, A. 2004 : Apport de la télédétection et du SIG à la compréhension du fonctionnement hydrologique de bassins versants: évaluation et cartographie de l'évapotranspiration, de l'érosion hydrique et de la pollution des eaux. Rapport de recherche de l'Habilitation Universitaire, Fac. Sciences et Techniques, Fès, Maroc.
- El Kenawy A. M. Lopez-Moreno J. I. McCabe M. F. Robaa S. M. Domínguez-Castro F. Peña-Gallardo M. Trigo R. M. Hereher M. E. Al-Awadhi T. Vicente-Serrano S. M. 2019 : Daily temperature extremes over Egypt: Spatial patterns, temporal trends, and driving forces. *Atmos. Res.* 226, 219–239.
- Elmeddahi, Y. 2016 : Les Changements Climatiques Et Leurs Impacts Sur Les Ressources En Eau, Cas Du Bassin Du Cheliff. Thèse de Doctorat, Université Hassiba Benbouali Chlef.
- Eltahir E. A. B. and Yeh P. J. F., "On the asymmetric response of aquifer water level to floods and droughts in Illinois," *Water Resources Research*, vol. 35, no. 4, pp. 1199–1217, 1999.
- Emberger, L. 1955: Une classification biogéographique des climats. Recueil, travaux de laboratoire géolo-zoologique, Faculté des sciences. Service botanique. Montpellier, 7, 3-43.
- Escalante-Samboal, C. Nuñez-Garcia, P. 2016 : Meteorological drought features in northern and northwestern parts of Mexico under different climate change scenarios. *Journal of Arid Land*. 9. 10.1007/s40333-016-0022-y.
- Eslamian, S. (Ed.). 2014: *Handbook of Engineering Hydrology: Modeling, Climate Change, and Variability* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16683>
- Fang, S, Renfu J, Wenrong T, and Zhilin S. 2017: Research on the Influencing Factors of Comprehensive Water Consumption by Impulse Response Function Analysis" *Water* 9, no. 1: 18. <https://doi.org/10.3390/w9010018>
- Fang, G. Yang, J. Chen, Y. Li, Z. Ji, H. De Maeyer, P. 2018 : How Hydrologic Processes Differ Spatially in a Large Basin: Multisite and Multiobjective Modeling in the Tarim River Basin. *J. Geophys. Res. Atmosph.* 2018, 123, 7098–7113.
- FAO, 2016. La planification des stratégies contre les effets de la sécheresse. Groupe d'Agrométéorologie, Service de l'Environnement et des Ressources Naturelles (SDRN), Division de la Recherche, de la Vulgarisation et de la Formation de la FAO Juillet, 1996.
- Fenet B, 1975 : Recherche sur l'alpinisation de la bordure septentrionale du bouclier africain : les monts du Djebel Tessala et les massifs du littoral oranais. Thèse d'Etat sciences. Nice.
- Feyen, L. Dankers, R. 2009: Impact of global warming on streamflow drought in Europe. *J. Geophys. Res.* 114. 10.1029/2008JD011438.

- Ficklin, D.L., Abatzoglou, J.T. Robeson S.M. and Dufficy A. 2016: The influence of climate model biases on projections of aridity and drought. *Journal of Climate* , vol. 29, no. 4, pp. 1269–1285.
- Fiorillo. F., Guadagno. F.M., 2010: Karst spring discharges analysis in relation to drought periods, using the SPI. *Water Resour. Manage.* 24: 1867– 1884.
- Fleig, A. K., Tallaksen, L. M. Hisdal, H. and Demuth S. 2006: A globalevaluation of streamflow drought characteristics, *Hydrol. Earth Syst.Sci.*,10(4), 535–552, doi:10.5194/hess-10-535-2006.
- FMI (Fonds monétaire international). 2019: Grenada Climate Change Policy Assessment. IMF Country Report N° 19/193. Washington, D.C., FMI. www.imf.org/en/Publications/CR/Issues/2019/07/01/Grenada-Climate-Change-Policy-Assessment-47062
- Foster, H.D. 1980 : *Disaster Planning*. Springer, New York, NY, États-Unis, 276 p.
- Fuchs, B.A., et al. 2014: Drought Indices for Drought Risk Assessment in a Changing Climate. In: Eslamian, S., Ed., *Handbook of Engineering Hydrology. Modeling, Climate Change and Variability*, CRC Press, Boca Raton.
- Fundel, F. Jörg-Hess, S. and Zappa, M. 2013: Monthly hydrometeorological ensemble prediction of streamflow droughts and corresponding drought indices. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 395–407, 2013 www.hydrol-earth-syst-sci.net/17/395/2013/doi:10.5194/hess-17-395-2013
- Funk C, Hoell A . 2017: Recent climate extremes associated with the West Pacific Warming Mode. In Wang, S.Y., Jin- Ho. Funk, C. Gillies, R (Eds.) *Climate Extremes: Patterns and Mechanisms*. Wiley press
- Funk, C., & Shukla, S. 2020: Drought early warning systems. *Drought Early Warning and Forecasting*, 43–59. doi:10.1016/b978-0-12-814011-6.00003-8
- Fung, K.F., Huang, Y.F. & Koo, C.H. 2019: Coupling fuzzy–SVR and boosting–SVR models with wavelet decomposition for meteorological drought prediction. *Environ Earth Sci* 78, 693 <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8700-7>
- Gagliardi F., Alvisi S., Kaplan Z., Franchini M. 2017: A probabilistic short-term water demand forecasting model based on the Markov Chain." *Journal Water*, Vol. 507, No 9.
- García, C 2012 : Concevoir et mettre en place un Système d’Alerte Précoce Intégré plus efficace dans les zones de montagnes : une étude de cas en Italie du Nord », *Revue de Géographie Alpine Journal of Alpine Research* [En ligne], 100-1 | 2012, mis en ligne le 16 avril 2012, consulté le 05 mai 2021. URL : <http://journals.openedition.org/rga/1672> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/rga.1672>
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., and Veloso-Aguila, D. 2020 : The central chile Mega Drought (2010-2018): A Climate Dynamics Perspective. *Int. J. Climatol* 40 (1), 421–439. doi:10.1002/joc.6219
- Gautier E. F. 1909 : La Meseta sud-oranaise. In: *Annales de Géographie*, t. 18, n°100, 1909. pp. 328-340. DOI : <https://doi.org/10.3406/geo.1909.6668>
- Gautier E.F., 1911 : Profils en long de cours d’eau en Algérie-Tunisie, I- Oueds du Tell » in *Annales de Géographie* n° 112 – XX° année, Armand Colin, Paris, pp 351-366.

- Ghenim, A. 2001 : Contribution à l'étude des écoulements liquides et des dégradations du bassin versant de la Tafna cas d'Oued Isser, Oued Mouillah et la Haute Tafna Mémoire de Magister Université de Tlemcen Algérie
- Ghenim A., Megnounif A., Seddini A. et Terfous A. 2010 : Fluctuations hydropluviométriques du bassin versant de l'oued Tafna à Béni Bahdel (Nord Ouest algérien). *Sécheresse*, vol.2, n° 2, p. 115-120.
- Ghenim, A. et Megnounif, A. 2011 : Caractérisation de la sécheresse par les indices SPI et SSFI (Nord-Ouest de l'Algérie), *J. Eau Environ. (LJEE)*, 18, 59-77.
- GIZ & MEER. 2017 : Analyse de Risque et de Vulnérabilité au Changement Climatique en Algérie, Rapport de synthèse, avril 2017
- Gocic M, Trajkovic S 2014 : Drought characterisation based on Water Surplus Variability Index. *Water Resour Manag* 28(10):3179–3191
- Gornall, J. Betts, R. Burke, E.; Clark, R. Camp, J.; Willett, K.; Wiltshire, A. 2010: Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 365, 2973–2989.
- Greene A. M., Robertson A.W., Smyth, P. *et al.* 2011. Downscaling projections of Indian monsoon rainfall using a non-homogeneous hidden Markov model, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 137(655), 347–359.
- Greve, P., L. Gudmundsson, and S.I. Seneviratne. 2018: Regional scaling of annual mean precipitation and water availability with global temperature change. *Earth Syst. Dynam.*, 9, 227–240, 2018. <https://www.earth-syst-dynam.net/9/227/2018/>
- Grose M.R, Bhend J, Argueso D, Ekström M, Dowdy A.J, Hoffmann P, Evans J.P, Timbal B. 2015: Comparison of various climate change projections of eastern Australian rainfall. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal* 65
- Gsell, S. 1911: Atlas archéologique de l'Algérie, Alger
- Guardia P., 1975: Géodynamique de la marge alpine du continent africain d'après l'étude de l'Oranie nord- occidentale. Relations structurales et paléogéographiques entre le Rif externe, le Tell et l'avant- pays atlasique. Thèse doctorat d'état. Université de Nice (France).
- Gudmundsson, L., S. I. Seneviratne, and X. Zhang, 2017: Anthropogenic climate change detected in European renewable freshwater resources. *Nat. Climate Change*, 7, 813–816, <https://doi.org/10.1038/nclimate3416>.
- Guenang, G.M & Kamga.F. 2014: Computation of the Standardized Precipitation Index (SPI) and Its Use to Assess Drought Occurrences in Cameroon over Recent Decades. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 53. 2310-2324. 10.1175/JAMC-D-14-0032.1.
- Guiot J, Cramer W. 2016: The 2015 Paris Agreement thresholds and Mediterranean basin ecosystems. *Science, American Association for the Advancement of Science (AAAS)*, 2016, 354 (6311), pp.465-468.
- Guo, J. Li, H. Leung, L. Guo, S. Liu, P. Sivapalan, M. 2014: Links between flood frequency and annual water balance behaviors: A basis for similarity and regionalization. *Water Resources Research*. 10.1002/2013WR014374.

- Guo, Y. Huang, S. Huang, Q. Wang, H. Fang, W. Yanga, Y.; Wang, L. 2019: Assessing socioeconomic drought based on an improved Multivariate Standardized Reliability and Resilience Index. *J. Hydrol.* 568, 904–918.
- Gustard. A., Bullock. A., Dixon. J., 1992: *Low Flow Estimation in the United Kingdom*; Institute of Hydrology: Wallingford. UK.
- GWP. 2018: *Climate Insurance and water-related disaster risk management*. [online]. Stockholm. https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/perspective-papers/11_climate_insurance_perspectives_paper.pdf (Citation July 26, 2018)
- Habi, M., et Morsli, B., 2011 : Contraintes et perspectives des retenues collinaires dans le Nord-ouest algérien. *Revue Sécheresse* Vol. 22, n° 1, 49-56.
- Habibi B. Meddi M. Torfs P. J. J. F. Remaoun M. Van Lanen H. A. J. 2018 Characterisation and prediction of meteorological drought using stochastic models in the semi-arid Chélif-Zahrez basin (Algeria). *J. Hydrol. Reg. Stud.* 16, 15–31.
- Hafied, Y., 2021. *Analyse Spatiale et temporelle des transports sédimentaires dans les hydro-systèmes du Nord-Ouest de l'Algérie*, Doctorat en sciences en : HYDRAULIQUE, Université Mohamed Khider – Biskra
- Hallouche B., 1986 : Contribution à l'étude hydrogéologique de la partie occidentale du bassin versant de l'Oued El Malah (W. AïnTemouchent). *Projet d'ingénieur d'état*.
- Hallouche, B., Hadji, F., Marok, A. & Benaabidate, L. (2017) – Spatial mapping of irrigation groundwater quality of the High Mekerra watershed (Northern Algeria). *Arab J Geosci.* vol. 10, n°233: 15p. DOI 10.1007/s12517-017-3019-8.
- Hallouz F., Meddi M., Mahé Gil, Rahmani S. A., Karahacane H., Brahimi S. 2020 : Analysis of meteorological drought sequences at various timescales in semi-arid climate: case of the Cheliff watershed (northwest of Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, 13 (6), p. art. 280 [15p.]. ISSN 1866-7511.
- Hamiche, A.; Stambouli, A.; Flazi, S. 2016: A review on the water and energy sectors in Algeria: Current forecasts, scenario and sustainability issues'. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 41, 261–276
- Hamlat A., 2013. *Contribution à la gestion des ressources en eau des bassins versants de l'ouest algérien à l'aide d'un système informatisé*, thèse de doctorat, Université d'Oran.
- Hamlet A, 2014 : *Contribution à la gestion des ressources en eau des bassins versants de l'Ouest Algerien à l'aide d'un système informatisé*. Thèse doctorat science. Université des sciences de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf
- Hannaford J, Lloyd-Hughes B, Keef C, Parry S, Prudhomme C. 2011: Examining the large-scale spatial coherence of European drought using regional indicators of precipitation and streamflow deficit. *Hydrological Processes* 25 (7) : 1146–1162.
- Hanson, P.R., Joeckel, R.M. Young A.R. and Horn J. 2009: Late Holocene dune activity in the Eastern Platte River Valley, Nebraska. *Geomorphology*, vol. 103, no. 4, pp. 555–561.
- Hao C, Zhang, J and Yao, F. 2015: Combination of multi-sensor remote sensing data for drought monitoring over Southwest China *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 35 270–83

Hao Z, Singh VP. 2016: Review of dependence modeling in hydrology and water resources. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. 40(4):549-578. doi:10.1177/0309133316632460

Hao, Z. Hao, F., Singh V.P and Zhanget, Xl. 2018: Changes in the severity of compound drought and hot extremes over global land areas .*Environ. Res. Lett.* 13 124022

Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. 2014: Updated high-resolution grids of monthly climatic observations-the CRUTS3.10 Dataset *Int. J. Climatol.*, 34, pp. 623-642

Hasan, H. H., Mohd Razali, S. F., Muhammad, N. S., Ahmad, A., Mohd Razali, S. F., Muhammad, N. S., and Ahmad, A.: 2019: Research trends of hydrological drought: A systematic review, *Water*, 11, 1–19, <https://doi.org/10.3390/w11112252>.

Haslinger K, Koffler D, Schöner W, Laaha G. 2014: Exploring the link between meteorological drought and streamflow: effects of climatecatchment inter-action. *Water Resour Res* 50:2468–2487. <https://doi.org/10.1002/2013WR015051>

Hatzfeld D. 1978 : Étude sismotectonique de la zone de collision Ibéro-Maghrébine, thèse, Grenoble, 281 p

Hayes. M. J., Svoboda. M.D., Wall. N., Widhalm. M., 2011: The Lincoln Declaration on Drought Indices - Universal meteorological drought index recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society*. v.92. p.485-488.

Hayes M, Svoboda MD, Wardlow BD, Anderson M, Kogan F. 2012: Drought monitoring: historical and current perspectives. Drought Mitigation Center Faculty. Publ. [Internet].

Available from: <https://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/94>.

Hayhoe, K., C.P. Wake, T.G. Huntington, L. Luo, M.D. Schwartz, J. Sheffield, E. Wood, B. Anderson, J. Bradbury, A. DeGaetano, T.J. Troy and D. Wolfe. 2007: Past and future changes in climate and hydrological indicators in the US Northeast. *Climate Dynamics* , vol. 28, no. 4, pp. 381–407.

Heim, R.. 2002: A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 83. 10.1175/1520-0477(2002)083<1149:AROTDI>2.3.CO;2.

Hejazi, M. I., and M. Markus, 2009: Impacts of urbanization and climate variability on floods in Northeastern Illinois. *J. Hydrol. Eng.*, 14, 606–616, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000020](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000020).

Hellwig, J, and Kerstin S. 2022: An assessment of trends and potential future changes in groundwater-baseflow drought based on catchment response times." *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 22, no. 12, 3 Dec. 2018, p. 6209. Gale Academic OneFile, link.gale.com/apps/doc/A564189117/AONE?u=anon~4d99c0c8&sid=googleScholar&xid=7df995c2.

Henn, B & Painter, T & Bormann, K & McGurk, B & Flint, A & Flint, L & White, V & Lundquist, J. 2018 : High-Elevation Evapotranspiration Estimates During Drought: Using Streamflow and NASA Airborne Snow Observatory SWE Observations to Close the Upper Tuolumne River Basin Water Balance. *Water Resources Research*. 54. 10.1002/2017WR020473.

- Hirabayashi, Y & Kanae, S & Emori, S & Oki, T & Kimoto, M. 2008: Global Projections of Changing Risks of Floods and Droughts in a Changing Climate. *Hydrological Sciences Journal* - *Journal Des Sciences Hydrologiques - HYDROLOG SCI J.* 53. 754-772. 10.1623/hysj.53.4.754.
- Hisdal, H., L. M. Tallaksen, B. Clausen, E. Peters, and A. Gustard. 2004: *Hydrological Drought Characteristics*, chap.5, pp. 139–198, ElsevierSci. B.V., Amsterdam, Netherlands.
- Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I., et al, 2018. Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.* Chapter 3. Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems. IPCC.
- Hong Y., Zhang H., Huang L., Li D., Song F. 2016 : Overexpression of a stress-responsive NAC transcription factor gene ONAC022 improves drought and salt tolerance in rice. *Front. Plant Sci.* 7:4 10.3389/fpls.2016.00004
- Howitt. R.J., Medellin-Azuara. D., MacEwan. J., Lund. D.A., 2014: *Economic Analysis of the 2014 Drought for California Agriculture.* UC Davis Cent. for Watershed Sci.. Davis. Calif.
- Huang W.C, Chou C.C. 2005 : Drought early warning system in reservoir operation: Theory and practice. *Water resources res.* Volume 41, issue; 11; doi.org/10.1029/2004WR003830
- Huang, Q. and Fan, J. 2013: Detecting runoff variation of the mainstream in Weihe River. *J. Journal of Applied Mathematics.*
- Huang S, Li P., Huang, Q., Leng, G., Hou, B., Ma, L. 2017: The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors. *J Hydrol* 547:184–195. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.041>
- Huntjens, P., Pahl-Wostl, C., Grin, J. 2010: Climate Change Adaptation in European River Basins. *Regional Environmental Change.* 10. 263-284. 10.1007/s10113-009-0108-6.
- Hurrell, J.W., Kushnir, Y. Ottersen, G. Visbeck, M. 2003: An overview of the North Atlantic Oscillation. *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact, Geophys. Monogr., Vol. 134, Amer. Geophys. Union, 1–35.*
- Hussein, A and Agbinya, J. 2019: Water Flow Forecasting Using Artificial Intelligence Techniques and Markov Chain Model: the Blue Nile Scenario (December 25, 2019) *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2019, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3769616>
- Institute of Hydrology. 1980: *Low Flow Studies Report No 3*; Institute of Hydrology: Wallingford. UK.
- Intended Nationally Determined Contribution INDC-Algeria. 2015. [https://www4.unfccc.int/sites/ndc_staging/PublishedDocuments/AlgeriaFirst/Algeria_NDC_\(English_un_official_translation\)_September_2003.2015.pdf](https://www4.unfccc.int/sites/ndc_staging/PublishedDocuments/AlgeriaFirst/Algeria_NDC_(English_un_official_translation)_September_2003.2015.pdf)
- Intrieri, E., Gigli, G., Casagli, N., Nadim, F., 2013.: Landslide Early Warning System: toolbox and general concepts. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13, 85–90.

IPCC, 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change

IPCC, 2013 : Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty

IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems

Jehanzaib, M. Eun, K. Park, J. Kim, T.W. 2019: Probabilistic Analysis of Drought Characteristics in Pakistan Using a Bivariate Copula Model.

Jehanzaib, M. Shah, S.A. Yoo, J.Y. Kim, T.W. 2020: Investigating the impacts of climate change and human activities on hydrological drought using non-stationary approaches. *Journal of Hydrology*. 588. 125052. 10.1016/j.jhydrol.2020.125052.

Jeong, D.I., Sushama, L. Khaliq, M.N. 2014: The role of temperature in drought projections over North America. *Climatic Change*, vol. 127, no. 2, pp. 289–303.

Jiang, Y., Chen, J., Yen, K., Xu, J. 2019: Ectopically Expressed IL-34 Can Efficiently Induce Macrophage Migration to the Liver in Zebrafish.

Jiao, Y. Yuan, X. 2019: More severe hydrological drought events emerge at different warming levels over the Wudinghe watershed in northern China. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 23, 621–635.

Jörg-Hess, S., Kempf, S.B., Fundel, F., Zappa, M. 2014: The benefit of climatological and calibrated reforecast data for simulating hydrological droughts in Switzerland. *Meteorological applications*. <https://doi.org/10.1002/met.1474>

Kadi, A., 1997: La gestion de l'eau en Algérie. *Hydrological Sciences - Journal des Sciences hydrologiques*, 42 (2), Limoges, France

Kang, Y. Gao, J. Shao, H. Zhang, Y. 2020: Quantitative analysis of hydrological responses to climate variability and land-use change in the hilly-gully region of the Loess Plateau, China. *Water* , 12, 82

Karthika, M. Muthiah, K. Thirunavukkarasu, V. 2017: Forecasting of meteorological drought using ARIMA model. *Indian Journal of Agricultural Research*. 51. 103-111. 10.18805/ijare.v0iOF.7631.

Kazi Tani, C. 2010 : Contribution à l'étude des communautés d'aventices des cultures du secteur phytogéographique oranais (Nord-Ouest algérien): Aspects botanique, agronomique et phyto-écologique. Thèse doctorat. Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen

Kazi tani , H.A. Bouanani , A.Bbaba-Hamed, K. 2017 : Estimations et quantifications des apports solide et liquide du bassin versant du Meffrouche (Nord-Ouest algérien). *Techniques Sciences Méthodes*. 35-46. 10.1051/tsm/20179035.

- Kendall, M.G. 1990: Rank Correlation Methods, 5th edition. Charles Griffin Book Series. Oxford University Press, United-States of America. 272 p.
- Keyantash, J. and Dracup, J. 2004: An Aggregate Drought Index: Assessing Drought Severity Based on Fluctuations in the Hydrologic Cycle and Surface water Storage', *Water Resources Research*, Vol. 40, 9, pp. 1-13.
- Khalidi, A., 2005 : Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien Monts de Tlemcen – Saida, Thèse de Doctorat d'état, Université d'Oran, Algérie.
- Khalil A. F., Kwon H.H., Lall U. *et al.* 2010. Predictive downscaling based on non-homogeneous hidden Markov models, *Hydrol. Sci. J.*, 55(3), 333–350.
- Khan, N., Zandi, P., Ali, S., Mehmood, A., Adnan, S.M., Yang, J. 2018: Impact of Salicylic Acid and PGPR on the Drought Tolerance and Phytoremediation Potential of *Helianthus annuus*. *Journal of Frontiers in Microbiology*. Volume, 9. DOI=10.3389/fmicb.2018.02507
- Khan, U. Ajami, H. Tutej, N.K. Sharma, A. Kim, S. 2018: Catchment scale simulations of soil moisture dynamics using an equivalent cross-section based hydrological modelling approach. *J. Hydrol.* 564, 944–966.
- Kim T., Valdes J.B. 2003 : Nonlinear Model for Drought Forecasting Based on a Conjunction of Wavelet Transforms and Neural Networks. *Journal of Hydrologic Engineering* 8 : 319-328.
- Kim, J.B., So, J.M. Bae, D.H. 2020 : Global Warming Impacts on Severe Drought Characteristics in Asia Monsoon Region. *Water*. 12. 1360. 10.3390/w12051360.
- Kim. T.W., Jehanzaib. M., 2020 : Drought Risk Analysis. Forecasting and Assessment. *Water*. 12. 1862; doi:10.3390/w12071862 under Climate Change
- Kingston, D.G, Fleig A. K., Tallaksen, L. M., and Hannah, D. M., 2013: Ocean–atmosphere forcing of summer streamflow drought in Great Britain. *J. Hydrometeor.*, 14, 331–344, doi:10.1175/JHM-D-11-0100.1.
- Konapala, G., Mishra, A. 2017: Review of complex networks application in hydroclimatic extremes with an implementation to characterize spatio-temporal drought propagation in continental USA, *J. Hydrol.*, 555, 600-620, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.033>.
- Konapala. G., Mishra. A., 2020: Quantifying Climate and Catchment Control on Hydrological Drought in the Continental United States. *Water resources*. Volume56. Issue1. [://doi.org/10.1029/2018WR024620](https://doi.org/10.1029/2018WR024620)
- Kumar, S & Thendiyath, R. 2021: Analysis of drought, its impact on land use/land cover and duration-severity analysis for the Sone River catchment, Bihar. *International Journal of Hydrology Science and Technology*. 12. 316. 10.1504/IJHST.2021.10040162.
- Laaha, G., Hisdal, H., Kroll, C. N., van Lanen, H. A. J., Nester, T., Rogger, M., Sauquet, E., Tallaksen, L. M., Woods, R. A., & Young, A. 2013: Prediction of low flows in ungauged basins. In G. Bloschl, S. Wagener, T. M. Viglione, & H. Savenije (Eds.), *Run-off Prediction in Ungauged Basins, Synthesis across Processes, Places and Scales* (pp. 163-188). Cambridge University Press.
- Laiolo, P. Gabellani, S. Campo, L. Silvestro, F. Delogu, F. Rudari, R. Pulvirenti, L. Boni, G. Fascetti, F. Pierdicca, N. et al. 2016: Impact of different satellite soil moisture products on the

- predictions of a continuous distributed hydrological model. *Int. J. Appl. Earth. Obs.* 2016, 48, 131–145.
- Lake. P.S. 2011: *Drought and Aquatic Ecosystems: Effects and Responses*. John Wiley & Sons.
- Larousse. (s.d.). Algérie : géographie physique. Récupéré sur Larousse encyclopédie: <http://www.larousse.fr/encyclopedie>
- Lee, M. Y., Hong, C. C. & Hsu, H. H. 2015: Compounding effects of warm sea surface temperature and reduced sea ice on the extreme circulation over the extratropical North Pacific and North America during the 2013–2014 boreal winter. *Geophys. Res. Lett.* **42**, 1612–1618.
- Lehner, B., Liermann, C. R., Revenga, C., Vörösmarty, C., Fekete, B., Crouzet, P., et al. 2011: High-resolution Mapping of the World's Reservoirs and Dams for Sustainable River-flow Management. *Front. Ecol. Environ.* 9 (9), 494–502. doi:10.1890/100125
- Le Treut, 2003 : Les scénarios globaux de changement climatique et leurs incertitudes, *Comptes Rendus Geoscience*, Volume 335, Issues 6–7, Pages 525-533, ISSN 1631-0713, [https://doi.org/10.1016/S1631-0713\(03\)00096-8](https://doi.org/10.1016/S1631-0713(03)00096-8).
- Leng, G. Tang, Q. Huang, M. Hong, Y. Leung, L.R. 2015: Projected changes in mean and interannual variability of surface water over continental China *Sci. China Earth Sci.* (2015), 10.1007/s11430-014-4987-0
- Lesk, C., & Rowhani, P., & Ramankutty, N. 2016: Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature.* 529. 84-87. 10.1038/nature16467.
- Lewis. S.L., Brando. P.M., Phillips. O.L., Van der Heijden. G.M.F., Nepstad. D., 2011: The 2010 Amazon drought. *Science* 331 (6017). 554. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1200807>.
- Lionello, P. Bhend, J. Buzzi, A. Della-Marta, P.M. Krichak, S.O. Jansa, A. Maheras, P. Sanna, A. Trigo, I.F. Trigo, R. 2006: Cyclones in the Mediterranean region: Climatology and effects on the environment. In *Mediterranean Climate Variability Developments in Earth and Environmental Sciences*; Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P., Boscolo, R., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands; Volume 4, pp. 325–372.
- Liu, D. Mishra, A.K. 2017: Performance of AMSR_E soil moisture data assimilation in CLM4.5 model for monitoring hydrologic fluxes at global scale. *J. Hydrol.* , 547, 67–79.
- Livneh, B. and A.M. Badger. 2020: Drought less predictable under declining future snowpack. *Nature Climate Change*, vol. 10, no. 5, pp. 452–458.
- Lloyd-Hughes B. 2014: The impracticality of a universal drought definition. *Theor. Appl. Climatol.* [Internet]. Springer Vienna; 2014;117:607–11. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s00704-013-1025-7>
- Lobell DB, Field CB. 2007: Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environ. Res. Lett.* 2: 1–7.
- Longobardi. A., Villani. P., 2008: Baseflow index regionalization analysis in aMediterranean area and data scarcity context: role of the catchment permeability index. *J Hydrol* 355:63–75
- Loredana P. 2008: Extreme temperature events in the Mediterranean. Thèse de doctorat, Univ. Bern, Suisse, 80 p.
- Ma, F. Luo, L. Ye, A. Duan, Q. 2018: Drought Characteristics and Propagation in the Semiarid Heihe River Basin in Northwestern China. *J. Hydrometeorol.* 2018, 20, 59–77.

- Ma. F., Luo. L., Ye. A. Duan. Q. 2019: Drought characteristics and propagation in the semiarid Heihe river basin in northwestern China.” *Journal of Hydrometeorology*. vol. 20. no. 1. pp. 59–77.
- Maity, R., Ramadas, M., and Govindaraju, R. S. 2013: Identification of Hydrologic Drought Triggers from Hydroclimatic Predictor Variables. *Water Resour. Res.* 49 (7), 4476–4492. doi:10.1002/wrcr.20346
- Manjula, D. Dhanya, C.T. 2017: How important is heterogeneous parameter distribution in capturing the catchment response through hydrologic modelling? In *Proceedings of the 19th EGU General Assembly, EGU2017, Vienna, Austria, 23–28 April 2017*; p. 818.
- Manning, C., Widmann, M. Bevacqua, E. Van Loon, A.F. Maraun, D. and Vrac, M. 2019: Increased probability of compound long-duration dry and hot events in Europe during summer (1950–2013). *Environmental Research Letters*, vol. 14, no. 9, 094006
- Mantua, N. J., and Hare, S. R. 2002: The pacific Decadal Oscillation. *J. oceanography* 58 (1), 35–44. doi:10.1023/a:1015820616384
- Mariotti, A et al, 2013: Advancing Drought Understanding, Monitoring, and Prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 94. ES186-ES188. 10.1175/BAMS-D-12-00248.1.
- Masih. I., Maskey. S., Mussá. F.E.F. Trambauer. P. 2014: A review of droughts on the African continent: a geospatial and long-term perspective.” *Hydrology and Earth System Sciences*. vol. 18. no. 9. pp. 3635–3649.
- Massari, C.; Brocca, L.; Tarpanelli, A.; Moramarco, T. 2015: Data assimilation of satellite soil moisture into rainfall-runoff modelling: A complex recipe? *Remote Sens.* 2015, 7, 11403–11433.
- McKee. T.B., Doesken. N.J., Kleist. J. 1993. The relationship of drought frequency and duration of time scales. Eighth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society. Jan17-23. Anaheim CA. pp.179-186.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., and Kleist, J. 1995: Drought monitoring with multiple time scales,” *Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology*, Boston, MA: American Meteorological Society.
- Meddi, M., Hubert, P. 2003 : Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. In : *Hydrology of the mediterranean and semiarid regions*, IAHS publication, n°278, p. 229-235.
- Meddi H., Meddi. M. 2004 : Sécheresse et spatialisation des précipitations dans le nord-ouest de l'Algérie. Colloque International « TERRE et EAU » Annaba. 21. 22 & 23 Novembre.
- Meddi H. et Meddi M., 2009 : Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. *Sécheresse* 20, 57-65.
- MEDDI M, TALIA A., MARTIN C. 2009 : Évolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l'Algérie) », *Physio-Géo* [En ligne], Volume 3 | mis en ligne le 01 janvier 2009, consulté le 09 mai 2021. URL : <http://journals.openedition.org/physio-geo/686> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/physio-geo.686>

- Meddi M., Boucefiane A., Sadeuk Belabbes A., 2010 : Impact des changements climatiques sur les débits dans le bassin du Chéllif (Algérie). Proc. of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco, October 2010). IAHS Publ. 340, 2010
- Medjerab, A. 1998. *Régionalisation des pluies annuelles dans l'Algérie nord-occidentale*, eau et environnement en Tunisie et en milieu méditerranéen. Colloque de Hammamet (Tunisie) 14-15 novembre 1998. Publication de l'université de Tunis I, et de Paris Sorbonne. pp. 69-78.
- Medjerab, A. Henia, L. 2005 : Régionalisation des pluies annuelles dans l'Algérie nord occidentale Regionalisation of annual rainfall in the north-western parts of Algeria. Regionalisierung des Jahresniederschlags in Nordwesten Algerien. *Revue Géographique de l'Est*. 45. 10.4000/rge.501.
- Medejerab, A. and Henia, L., 2011 : Variations spatio-temporelles de la sécheresse climatique en Algérie nord-occidentale. *Courrier du savoir*, 11, 71–79.
- Meehl, G.A. and Hu, A. 2006 : Megadroughts in the Indian monsoon region and southwest North America and a mechanism for associated multidecadal Pacific sea surface temperature anomalies. *Journal of Climate*, vol. 19, no. 9, pp. 1605–1623.
- Meehl, G., Stocker, T., Collins, W.D. Friedlingstein, P. Gaye, Amadou T. Gregory, J.M. Kitoh, A. Knutti, R. Murphy, J.M. Noda, A. Raper, S.C.B. Watterson, I.G. Weaver, A.J. Zhao, Z.C. 2007: Global climate projections climate change 2007: The physical science basis. *The Physical Science Basis*. 747-845.
- Megartsi M., 1985 : Le volcanisme Mio-Plio-Quaternaire de l'Oranie nord-occidentale, Géologie, pétrologie et géodynamique. Thèse Doctorat d'Etat, USTHB (Alger), 296p.
- Mehran A, Mazdiyasn O, AghaKouchak A. 2015: A hybrid framework for assessing socioeconomic drought: Linking climate variability, local resilience, and demand. *J Geophys Res Atmos*. 120(15):7520–7533.
- Mehrotra R., Sharma A. 2005. A nonparametric nonhomogeneous hidden Markov model for downscaling of multisite daily rainfall occurrences, *J. Geophys. Res.*, 110, D16108, DOI :10.1029/2004JD005677.
- Mekahli L., 1995 : Hettangien – Bajocien supérieur dans les Monts des Ksour. Biostratigraphie, évolution paléogéographique et stratigraphie séquentielle (Atlas Saharien Occidental). Thèse d'état, Université d'Oran – Algérie. Pp. 1 – 358, 67 fig, 49 pl.
- Merabti, A & Meddi, M & Martins, D & Pereira, L. 2018: Comparing SPI and RDI Applied at Local Scale as Influenced by Climate. *Water Resources Management*. 32. 10.1007/s11269-017-1855-7.
- Mercado, V.D. Perez, G.C.; Solomatine, D. van Lanen, H.A.J. 2016: Spatio-temporal Analysis of Hydrological Drought at Catchment Scale Using a Spatially-distributed Hydrological Model. *Procedia Eng*. 154, 738–744.
- Merniz, N., Tahar, A., Benmehaia, A.M. 2019: Statistical Assessment of Rainfall Variability and Trends in Northeastern Algeria. *Journal of Water and Land Development*. 40. 87-96. 10.2478/jwld-2019-0009.

- Min Li, Ting Z, Jianzhu L, and Ping F. 2019: Hydrological Drought Forecasting Incorporating Climatic and Human-Induced Indices . *Weather and forecasting*, volume 34, issue 5. Page 1365–1376 . doi.org/10.1175/WAF-D-19-0029.1
- Ministère des Ressources en Eau (MRE). 2006a): Cadastre hydraulique, bassin Tafna. Document de synthèse. Agence de Bassin Hydrographique Oranais Chott Chergui (ABHOCC). Ministère de ressources en eau.2006 Ministère des Ressources en Eau (MRE).
- Ministère des Ressources en Eau (MRE) (2006b): Cadastre hydraulique, bassin Macta. Document de synthèse. Agence de Bassin Hydrographique Oranais Chott Chergui (ABHOCC). Ministère de ressources en eau.2006
- Ministère des Ressources en Eau (MRE). 2010: Actualisation du plan national de l'eau, Travaux d'études en cours réalisés par le groupement Sofreco/ Grontmij-Carl Bro/ OIE. Rapports provisoires : Ressources et Demandes (Mai 2010)
- Mishra, A.K., Desai, V.R. 2006: Drought forecasting using feed-forward recursive neural network. *Ecological modelling* 198. 127–138. doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.04.017
- Mishra, A.K, Singh, V.P, Desai VR. 2009: Drought characterization: a probabilistic approach. *Stoch Environ Res Risk Assess*. Springer-Verlag;23:41–55.
- Mishra, A.K, Singh, V.P. 2010: A review of drought concepts,” *Journal of Hydrology*, vol. 391, no. 1-2, pp. 202–216, 2010.View at: Publisher Site | Google Scholar
- Mishra, A.K, Singh, V.P 2011: Drought modeling - A review. *Journal of Hydrology – J HYDROL*. 403. 157-175. 10.1016/j.jhydrol.2011.03.049.
- Mishra, V., Tiwari, A.D., Aadhar, S., Shah, R., Xiao, M., Pai, D.S and Lettenmaier, D. 2019 Drought and famine in India, 1870–2016 *Geophys. Res. Lett.* 46 2075–83
- Mo, K.C. 2008: Model-based drought indices over the United States. *J Hydrometeorol*. [Internet].9:1212–30. Available from: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2008JHM1002.1>.
- Mo, K. C., Shukla, S., Lettenmaier, D. P., and Chen, L-C. 2012: Do Climate Forecast System (CFSv2) forecasts improve seasonal soil moisture prediction?, *Geophys, Res. Lett.*, 39, L23703, doi:10.1029/2012GL053598, 2012
- Mo, K.C. and Lettenmaier, D.P. 2016: Precipitation deficit flash droughts over the United States. *Journal of Hydrometeorology*, vol. 17, no. 4, pp. 1169–1184.
- Mohammed, S , Elbeltagi, A, Bashir, B, Alsafadi, K, Alsilibe, F, Alsalman, A, Zeraatpisheh, M, Széles, A, Harsányi, E, 2022: A comparative analysis of data mining techniques for agricultural and hydrological drought prediction in the eastern Mediterranean, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 197, 2022, 106925, ISSN 0168-1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106925>.
- Morawietz, M. 1997 :University of Oslo, Oslo, Norway). Personal communication.
- Moreira. E.E., Pires. C.L., Pereira. L.S., 2016: SPI drought class predictions driven by the North Atlantic Oscillation Index Using Log-Linear Modeling. *Water*. Vol. 8. Iss. 2. 43. DOI: 10.3390/w8020043.

- Mortuza, M.R., Moges, E., Demissie, Y. et al. 2019: Historical and future drought in Bangladesh using copula-based bivariate regional frequency analysis. *Theor Appl Climatol* 135, 855–871. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2407-7>
- Mu, Q., Zhao, M. Kimball, J. McDowell, N. Running, S. 2013: A Remotely Sensed Global Terrestrial Drought Severity Index. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 94, 83–98, doi: 10.1175/BAMS-D-11-00213.1
- Muhammad, W., Muhammad, S., Khan, N.M. et al. 2020: Hydrological drought indexing approach in response to climate and anthropogenic activities. *Theor Appl Climatol* 141, 1401–1413. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03227-y>
- Mukherjee, S., Mishra, A. & Trenberth, K.E. 2018: Climate Change and Drought: a Perspective on Drought Indices. *Curr Clim Change Rep* 4, 145–163. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0098-x>
- Murthy, C.S, Laxman, B, Sessa Sai M.V.R. 2015: Geospatial analysis of agricultural drought vulnerability using a composite index based on exposure, sensitivity and adaptive capacity. *Int J Disaster Risk Reduct* 12:163–171. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2015.01.004>
- Musarat, M.A.; Alaloul, W.S.; Rabbani, M.B.A.; Ali, M.; Altaf, M.; Fediuk, R.; Vatin, N.; Klyuev, S.; Bukhari, H.; Sadiq, A.; et al. Kabul River Flow Prediction Using Automated ARIMA Forecasting: A Machine Learning Approach. *Sustainability* 2021, 13, 10720. <https://doi.org/10.3390/su131910720>
- Nalbantis, I., Tsakiris, G. 2009: Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resource Management*. 23:881- 897.
- Narasimhan, B and Srinivasan, R. 2005: Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, volume 133, p 69-88
- Naulleau, A., Gary, C., Prévot, L., Hossard, L. 2021: Evaluating Strategies for Adaptation to Climate Change in Grapevine Production—A Systematic Review, *journal of Frontiers in Plant Science.*, volume 11. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2020.607859> DOI=10.3389/fpls.2020.607859
- Naumann, G.; Alfieri, L.; Wyser, K.; Mentaschi, L.; Betts, R.A.; Carrao, H.; Spinoni, J.; Vogt, J.; Feyen, L. 2018: Global changes in drought conditions under different levels of warming. *Geophys. Res.* 2018, 45, 3285–3296.
- Nekkache Ghenim, A., Megnounif, A., Seddini, A. & Terfous, A. 2010 : Fluctuations hydropluviométriques du bassin versant de l'Oued Tafna à Béni Bahdel (Nord Ouest Algérien), *Sécheresse* 21(2), 115-120.
- Nekkache Ghenim, A et Megnounif, A. 2013 : Ampleur de la sécheresse dans le bassin d'alimentation du barrage Meffrouche (Nord-Ouest de l'Algérie) », *Physio-Géo* [En ligne], Volume 7 | 2013, mis en ligne le 13 février 2013, consulté le 10 mai 2021. URL : <http://journals.openedition.org/physio-geo/3173> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/physio-geo.3173>

Neurdin-Trescartes J. 1992 : Le remplissage sédimentaire du bassin néogène du Chéelif, modèle de référence de bassins intramontagneux. Thèse de Doctorat d'État, université de Pau et Pays de l'Adour, France, 605 p.

Neussner, O. 2015 : Early warning - Some recent developments. *Planet@Risk*, 3 (1), 24-32.

Nichane. M., Khelil. M.A. 2015: Changements climatiques et ressources en eau en Algérie: Vulnérabilité. Impact et stratégie d'adaptation. *Larhyss Journal*. ISSN 1112-3680. No. 21. pp. 15-23.

Nicholson, S. E., 2017: Climate and climatic variability of rainfall over eastern Africa. *Rev. Geophys.*, **55**, 590–635, <https://doi.org/10.1002/2016RG000544>.

Nicolle, P.; Pushpalatha, R.; Perrin, C.; François, D.; Thiéry, D.; Mathevet, T.; Le Lay, M.; Besson, F.; Soubeyroux, J.-M.; Viel, C.; et al. 2014: Benchmarking hydrological models for low-flow simulation and forecasting on French catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2014, 18, 2829–2857.

Niu, J., Chen, J., Sun, L. 2015: Exploration of drought evolution using numerical simulations over the Xijiang (West River) basin in South China, *Journal of Hydrology*, Volume 526, 2015, Pages 68-77, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.029>.

Núñez J, Rivera D, Oyarzún R, Arumí JL. 2014: On the use of standardized drought indices under decadal climate variability: critical assessment and drought policy implications. *J Hydrol* 2014, 517:458–470. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.05.038.

OMM-N° 1006, 2006. Suivi de la sécheresse et alerte précoce: principes, progrès et enjeux futurs

OMM-N° 1024, 2007. Des services météorologiques, climatologiques et hydrologiques adaptés à chacun

OMM, 2018 : Les systèmes d'alerte précoce multidangers – liste de contrôle

OMS, 2015 : PROFIL PAYS CLIMAT ET SANTÉ –ALGÉRIE

OSS. 2013 : Collection Synthèse n° 4, Vers Un Système D'alerte Précoce À La Sécheresse Au Maghreb 2013

OSS. 2016 : Eau, population et ressources en eau dans la zone d'action de l'OSS. 8 p

Otkin, J.A., M. Svoboda, E.D. Hunt, T.W. Ford, M.C. Anderson, C. Hain and J.B. Basara 2018 : Flash droughts: A review and assessment of the challenges imposed by rapid-onset droughts in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society* , vol. 99, no. 5, pp. 911–919

Otmane, A., Baba-Hamed, K., Bouanani, A., Kebir, L.W. 2018 : Mise en évidence de la sécheresse par l'étude de la variabilité climatique dans le bassin versant de l'oued Mekerra (Nord-Ouest algérien). *Techniques Sciences Méthodes*. DOI: 10.1051/tsm/201809023

Ozenda, P., 1975 : Sur les étages de végétation dans les montagnes du bassin méditerranéenne: Documents de Cartographie Ecologique, v. 16, p. 1–32.

Ozenda, P., 2002 : Perspectives pour une géobiologie des montagnes. Presses polytechniques et universitaires Romandes, Lausanne.

Palmer WC. 1965 : Meteorological drought. Research Paper No. 45. Washington (DC): U.S. Department of Commerce Weather Bureau.

Panu, U.S. Sharma, T.C. 2002: Challenges in drought research: some perspectives and future directions, *Journal of Hydrological Sciences Journal*, volume 47, p S19 - S30

Parra, V. Arumí, J.L. Muñoz, E. 2019: Identifying a Suitable Model for Low-Flow Simulation in Watersheds of South-Central Chile: A Study Based on a Sensitivity Analysis. *Water* 2019, 11, 1506. <https://doi.org/10.3390/w11071506>

Parry, S., Wilby, L. R., Prudhomme, C., & Wood, J. P. 2016: A systematic assessment of drought termination in the United Kingdom. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(10), 4265–4281. <https://doi.org/10.5194/hess-20-4265-2016>

Parry, S., Wilby, R., Prudhomme, C., Wood, P., & McKenzie, A. 2018: Demonstrating the utility of a drought termination framework: Prospects for groundwater level recovery in England and Wales in 2018 or beyond. *Environmental Research Letters*, 13(6). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac78c>

Patil, A.; Ramsankaran, R. 2017: Improving streamflow simulations and forecasting performance of SWAT model by assimilating remotely sensed soil moisture observations. *J. Hydrol.* 555, 683–696.

Paulo A.A., Ferreira E.Coelho C. Pereira L.S. 2005.: Drought class transition analysis through Markov and Loglinear models, an approach to early warning. *Agricultural Water Management*. Volume 77, Issues 1–3, Pages 59-81 . doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.039

Peña-Gallardo. S.M., Vicente-Serrano. J. Hannaford et al. 2019: Complex influences of meteorological drought time-scales on hydrological droughts in natural basins of the contiguous Unites States.” *Journal of Hydrology*. vol. 568. pp. 611–625.

Pendergrass, A.G., G.A. Meehl, R. Pulwarty, M. Hobbins, A. Hoell, A. AghaKouchak, C.J.W. Bonfils, A.J.E. Gallant, M. Hoerling, D. Hoffmann, L. Kaatz, F. Lehner, D. Llewellyn, P. Mote, R.B. Neale, J.T. Overpeck, A. Sheffield, K. Stahl, M. Svoboda, M. C. Wheeler, A. W. Wood and C.A. Woodhouse 2020 : Flash droughts present a new challenge for subseasonal-to-seasonal prediction. *Nature Climate Change*, vol. 10, no. 3, pp. 191–199.

Peters A, Walter-Shea E, Ji L. 2002: Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 68:71–75.

Peters. E., Bier. G., van Lanen .H.A.J., Torfs. P.J.J.F., 2006: Propagation and spatial distribution of drought in a groundwater catchment. *J. Hydrol.* 321 (1/4). 257–275. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.08.004>.

Petrovič, F. 2021: Hydrological Impacts of Climate Change and Land Use. *Water* 2021, 13, 799. <https://doi.org/10.3390/w13060799>

PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement), 2009: Problématique du secteur de l'eau et impacts liés au climat en Algérie. Rapport national eau - adaptation. Algérie.

Potopová V, Štěpánek P, Možný M, Türkott L, Soukup J. 2015 : Performance of the standardized precipitation evapotranspiration index at various lags for agricultural drought risk

assessment in the Czech Republic. *Agric. For. Meteorol.* 202: 26–38, doi: 10.1016/j.agrformet.2014.11.022.

Pozzi, W., Sheffield, J., Stefanski, R., Cripe, D., Pulwarty, R., Vogt, J.V. et al. 2013: Towards global drought early warning capability: Expanding international cooperation for the development of a framework for global drought monitoring and forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(6), 776–785. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00176.1>

Prigent, E. 1949 : géographie de l'Afrique du Nord à l'usage du Cours Moyen et de la Classe de Fin d'Études des écoles primaires de l'Afrique du Nord

Pritchard, H. 2017: Asia's glaciers are a regionally important buffer against drought. *Nature* 545, 169–174 . <https://doi.org/10.1038/nature22062>

Pulwarty, R., 2007: Communicating Agrometeorological Information including forecasts for Agricultural decisions. WMO Guide to Agricultural Meteorological Practices (GAMP) 27.

Pulwarty, R.S. and M.V. Sivakumar. 2014 : Information systems in a changing climate: Early warnings and drought risk management. *Weather and Climate Extremes*, vol. 3, pp. 14–2

Quenault, B. 2015: De Hyōgo à Sendai, la résilience comme impératif d'adaptation aux risques de catastrophe : nouvelle valeur universelle ou gouvernement par la catastrophe ? *Développement Durable et Territoires*, 6 (3), 49-79.

Rajsekhar D, Singh VP, Mishra AK. 2015. Multivariate drought index: an information theory based approach for integrated drought assessment. *J Hydrol.* [Internet]. Elsevier; 2015; 526:164–82. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169414009366>.

Ramadan, H. H. Beighley, R. E. Ramamurthy A. S. 2013: Temperature and precipitation trends in Lebanon's largest river: the Litani basin. *J. Water Resour. Plan. Manage.* 139, 86–95

Raziei, T. "An analysis of daily and monthly precipitation seasonality and regimes in Iran and the associated changes in 1951-2014." *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 134, no. 3-4, Nov. 2018, pp. 913+. *Gale Academic OneFile*, link.gale.com/apps/doc/A560606376/AONE?u=googlescholar&sid=googleScholar&xid=31895ee9. Accessed 30 June 2022.

Reddington C L et al. 2017: The Global Aerosol Synthesis and Science Project (GASSP): measurements and modeling to reduce uncertainty *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 98 1857–77

Roger S. Pulwarty, Mannava V.K. Sivakumar, 2014: Information systems in a changing climate: Early warnings and drought risk management, *Weather and Climate Extremes*, Volume 3, Pages 14-21, ISSN 2212-0947, <https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.03.005>.

Rudd, Alison C.; Kay, A.L.; Bell, V.A. 2019: National-scale analysis of future river flow and soil moisture droughts: potential changes in drought characteristics.

Ryu, M.Y, Cho S.K, Kim, W.T. 2010: The Arabidopsis C3H2C3-Type RING E3 Ubiquitin Ligase AtAIRP1 Is a Positive Regulator of an Abscisic Acid-Dependent Response to Drought Stress, *Plant Physiology*, Volume 154, Issue 4, December 2010, Pages 1983–1997, <https://doi.org/10.1104/pp.110.164749>

- Saadat, S., Khalili, D., Kamgar-Haghighi, A.A. and Zand-Parsa, S. 2013: Investigation of spatial-temporal patterns of streamflow seasonal droughts in a semi-arid region. *Natural Hazards*, 67, 1697–1720.
- Safa A., 2010. Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin versant de la Mina, zone aride à semi-aride (Hautes plaines oranaises, Algérie nord occidentale), thèse de doctorat d'état en géologie, université d'Oran, p 21.
- Safar-Zitoun M, 2019 : Plan National Secheresse Algerie Lignes Directrices En Vue De Son Operationnalisation, Consultant CNULCD
- Salas, J.D., et al., 2005: Characterizing the severity and risk of drought in the Poudre River, Colorado. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131 (5), 383–393.
- Salimi, H., Asadi, E. & Darbandi, S. 2021: Meteorological and hydrological drought monitoring using several drought indices. *Appl Water Sci* 11, 11 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01345-6>
- Salinas. J.L., Laaha. G., Rogger. M., Parajka. J., Viglione. A., Sivapalan. M., Blöschl. G. 2013: Comparative assessment of predictions in ungauged basins – part 2: flood and low flow studies. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17 (7). 2637–2652. [http:// dx.doi.org/10.5194/hess-17-2637-2013](http://dx.doi.org/10.5194/hess-17-2637-2013).
- Salvadori G, De Michele C. 2004: Frequency analysis via copulas: Theoretical aspects and applications to hydrological events. *Water Resour Res.* [Internet]. 40. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1029/2004WR003133>
- Samaniego, L., R. Kumar, & M. Zink. 2013: Implications of parameter uncertainty on soil moisture drought analysis in Germany, *Journal of Hydrometeorology*, 14(1), 47- 68.
- Samaniego, L., S. Thober, R. Kumar, N. Wanders, O. Rakovec, M. Pan, M. Zink, J. Sheffield, E.F. Wood and A. Marx. 2018: Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts. *Nature Climate Change*, vol. 8, no. 5, pp. 421–426.
- Santhi. C., Allen. P.M., Muttiah. R.S., Arnold. J.G., Tuppada. P. 2008: *Journal of Hydrology*. Regional estimation of base flow for the conterminous United States by hydrologic landscape regions. 351. 139–153. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.12.018
- Santos, J & Portela, M & Pulido-Calvo, I. 2011 : Regional Frequency Analysis of Droughts in Portugal. *Water Resources Management*. 25. 3537-3558. 10.1007/s11269-011-9869-z.
- Schlaepfer, D. R., Bradford, J. B. Lauenroth, W. K. Munson, S. M. Tietjen, B. Hall, S. A et al 2017: Climate change reduces extent of temperate drylands and intensifies drought in deep soils, *Nature Communications*, 8, 14196. <https://doi.org/10.1038/ncomms14196>.
- Schewe, J & Heinke, J & Gerten, D & Haddeland, I et al. 2014: Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 111. 3245-3250. 10.1073/pnas.1222460110.
- Scorzini A. R. Leopardi M. 2019: Precipitation and temperature trends over central Italy (Abruzzo Region): 1951–2012. *Theor. Appl. Climatol.* 135, 959–977.
- Scott, M. et Lindsey, R. 2018: *2017 State of the Climate: Global Drought*. Site Web de United States National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). www.climate.gov/news-features/featured-images/2017-state-climate-global-drought
- Seneviratne, S & Nicholls, N & Easterling, D & Goodess, C. & Kanae, S & Kossin, J & Luo, Y & Marengo, J & McInnes, K & Rahimi, M & Reichstein, M & Sorteberg, A & Vera, C &

- Zhang, X. 2012: Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment.
- Shafer, B., and Dezman, L. 1982: Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. *Proceedings of the Western Snow Conference*, pp. 164–175.
- Shahid, S., Behrawan, H. 2008: Drought Risk Assessment in the Western Part of Bangladesh. *Natural Hazards*. 46. 391-413. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9191-5>
- Sharma, T.C. Panu, U.S. 2012: Prediction of hydrological drought durations based on Markov chains: case of the Canadian prairies, *Hydrological Sciences Journal*, 57:4, 705-722, DOI: 10.1080/02626667.2012.672741
- Sheffield, J & Wood, E. 2012: Drought: Past Problems and Future Scenarios. *Drought: Past Problems and Future Scenarios*. 1-234. 10.4324/9781849775250.
- Sheffield, J & Wood, E & Roderick, M. 2012: Little Change in Global Drought over the Past 60 Years. *Nature*. 491. 435-438. 10.1038/nature11575.
- Sheffield, J., Wood, E. F., Chaney, N., Guan, K., Sadri, S., Yuan, X., Olang, L., Amani, A., Ali, A., Demuth, S., and Ogallo, L. 2014: A Drought Monitoring and Forecasting System for Sub-Saharan African Water Resources and Food Security, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 95, 861–882.
- Shukla, S., Wood, A.W. 2008: Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophys. Res. Lett.* 35. 1–7.
- Shukla, S., Sheffield, J., Wood, E. F., and Lettenmaier, D. P. 2013: On the sources of global land surface hydrologic predictability, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 2781–2796, <https://doi.org/10.5194/hess-17-2781-2013>.
- Shukla, S et al. 2014: A seasonal agricultural drought forecast system for food-insecure regions of East Africa *Hydrol Earth Syst. Sci.* 18 3907–21
- Shukla, S., Arsenault, K. R., Hazra, A., Peters-Lidard, C., Koster, R. D., Davenport, F., Magadzire, T., Funk, C., Kumar, S., McNally, A., Getirana, A., Husak, G., Zaitchik, B., Verdin, J., Nsadisa, F. D., and Becker-Reshef, I. 2020: Improving early warning of drought-driven food insecurity in southern Africa using operational hydrological monitoring and forecasting products, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 20, 1187–1201, <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1187>.
- Sicart, JE., Hock, R., Ribstein, P., Litt, M., Ramirez, E. 2011 : Analysis of seasonal variations in mass balance and meltwater discharge of the tropical Zongo Glacier by application of a distributed energy balance model. *Journal of Geophysical research*, 16, 1-18.
- Singh H. Najafi M. R. 2020: Evaluation of gridded climate datasets over Canada using univariate and bivariate approaches: implications for hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 584, 124673.
- Sitayeb T, Benabdeli K. 2008 : Contribution à l'étude de la dynamique de l'occupation des sols de la plaine de la Macta (Algérie) à l'aide de la télédétection et des systèmes d'information géographique, *Comptes Rendus Biologies*, Volume 331, Issue 6, 2008, Pages 466-474, ISSN 1631-0691, <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2008.03.010>.

- Sohn, S.J & Tam, C.Y. 2015: Long-lead station-scale prediction of hydrological droughts in South Korea based on bivariate pattern-based downscaling. *Climate Dynamics*. 46. 10.1007/s00382-015-2770-3.
- Sohrabi, M.M., Ryu, J.H., Abatzoglou, J., and Tracy, J. 2015: Development of soil moisture drought index to characterize droughts. *J. Hydrol. Eng. ASCE*, doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001213, 2015.
- Son, N. T., Chen, C. F., Chen, C. R., Chang, L. Y., and Minh, V. Q. 2012: Monitoring Agricultural Drought in the Lower Mekong basin Using Modis Ndvi and Land Surface Temperature Data. *Int. J. Appl. Earth Observation Geoinformation* 18, 417–427. doi:10.1016/j.jag.2012.03.014
- Spinoni J, Naumann G, Carrao H, Barbosa P, Vogt J. 2014: World drought frequency, duration, and severity for 1951-2010. *International Journal of Climatology*. 34(8):2792-2804. DOI: 10.1002/joc.3875
- Spinoni, J., Vogt, J., Naumann, G., Marinho Ferreira Barbosa, P. and Dosio, A., 2018: Will drought events become more frequent and severe in Europe, *INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY*, ISSN 0899-8418, 38 (4), 2018, p. 1718-1736, JRC104154.
- Spinoni, J., P. Barbosa, E. Bucchignani, J. Cassano, T. Cavazos, J.H. Christensen, O.B. Christensen, E. Coppola, J. Evans, B. Geyer, F. Giorgi, P. Hadjinicolaou, D. Jacob, J. Katzfey, T. Koenigk, R. Laprise, C.J. Lennard, M.L. Kurnaz, L.I. Delei, M. Llopart, N. McCormick, G. Naumann, G. Nikulin, T. Ozturk, H.- J. Panitz, R.P. da Rocha, B. Rockel, S.A. Solman, J. Syktus, F. Tangang, C. Teichmann, R. Vautard, J.V. Vogt, K. Winger, G. Zittis and A. Dosio. 2020: Future global meteorological drought hot spots: A study based on CORDEX data. *Journal of Climate*, vol. 33, no. 9, pp. 3635–3661.
- Stahl, K. and Hisdal, H.2004: Hydroclimatology, in: *Hydrological Drought, Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*, Chapter 2, edited by: Tallaksen, L. M. and Van Lanen, H. A. J., *Dev. Water Sci.*, 48, Amsterdam, 19–51.
- Stahle, D.W. 2020 : Anthropogenic megadrought. *Science*, vol. 368, no. 6488, pp. 238–23
- Stagge. J.H., Tallaksen. L.M., Gudmundsson. L. Van Loon. A.F and Stahl. K. 2015: Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *Int. J. Climatol*. 35. 4027–4040.
- Staudinger, M; Stahl, K; Seibert, J (2014). *A drought index accounting for snow*. *Water Resources Research*, 50(10):7861-7872. <https://doi.org/10.1002/2013WR015143>
- Steiger, N.J., J.E. Smerdon, B.I. Cook, R. Seager, A.P. Williams and E.R. Cook (2019). Oceanic and radiative forcing of medieval megadroughts in the American Southwest. *Science Advances*, vol. 5, no. 7, eaax0087.
- Steinemann A, Iacobellis SF, Cayan DR. 2015: Developing and evaluating drought indicators for decision-making. *J Hydrometeorol* 16(4): 1793–1803
- Sternberg, T. 2012: Chinese Drought, Bread and the arab spring. *Appl. Geogr.* 34, 519–524. doi:10.1016/j.apgeog.2012.02.004
- Stoelzle, M.; Weiler, M.; Stahl, K.; Morhard, A.; Schuetz, T. 2015: Is there a superior conceptual groundwater model structure for baseflow simulation? *Hydrol. Process*. 2015, 29, 1301–1313.

- Su, B.; Huang, J.; Fischer, T.; Wang, Y.; Kundzewicz, Z.W.; Zhai, J.; Sun, H.; Wang, A.; Zeng, X.; Wang, G.; et al. 2018: Drought losses in China might double between the 1.5 °C and 2.0 °C warming. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2018, 115, 10600–10605.
- Sun, C. X., Huang, G. H., Fan, Y., Zhou, X., Lu, C., & Wang, X. Q. 2019: Drought occurring with hot extremes: Changes under future climate change on Loess Plateau, China. *Earth's Future*, 7(6), 587-604.
- Surendran U.P & Anagha, B. & Pushpanathan R & Veluswamy, K & Karuppusamy R & Jayakumar. M. 2019: Analysis of Drought from Humid, Semi-Arid and Arid Regions of India Using DrinC Model with Different Drought Indices. *Water Resources Management*. 33. 10.1007/s11269-019-2188-5.
- Sutanto S J, Wetterhall. F . Van LanenH. A. J 2020: Hydrological drought forecasts outperform meteorological drought forecasts *Environ. Res. Lett.* 15 084010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8b13>
- Svoboda, M., D. Le Comte, M. Hayes, R. Heim, K. Gleason, J. Angel, B. Rippey, R. Tinker, M. Palecki, D. Stooksbury, D. Miskus, and S. Stephens. 2002: The Drought Monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83(8):1181–1190.
- Svoboda, M., 2009. The U.S. Drought Monitor: A Composite Indicator Approach. WMO Inter-Regional Workshop on Indices and Early Warning Systems for Drought Lincoln, NE, December 8-11, 2009
- Svoboda, M & Fuchs, B & IDMP, Integrated. 2016: Handbook of Drought Indicators and Indices.
- Tadesse, T., 2016: Strategic framework for drought risk management and enhancing resilience in Africa. In: African Drought Conference
- Tadross, M. 2016: Climate Information & Early Warning Systems. (UNDP presentation, unpublished).
- Taibi S., Meddi M., Souag D. and Mahe G., 2013: Évolution et régionalisation des précipitations au nord de l'Algérie (1936-2009). In: *Climate and land surface changes in hydrology*. IAHS Publ. 359, 191-197.
- Tallaksen. L.M., Van Lanen. H.A. 2004; *Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*; Elsevier: Amsterdam. The Netherlands. Volume 48.
- Tallaksen. L.M., Hirdal. H., and Lanen. H.A.J.V. 2009: Space-time modelling of catchment scale drought characteristics." *Journal of Hydrology*. vol. 375. no. 3-4. pp. 363–372.
- Tang, L., Macdonald, N., Sangster, H., Chiverrell, R., and Gaulton, R. 2020: Reassessing long-term drought risk and societal impacts in Shenyang, Liaoning Province, north-east China (1200–2015), *Clim. Past*, 16, 1917–1935, <https://doi.org/10.5194/cp-16-1917-2020>, 2020.
- Tariq Mahgoub, M. 2021: Forecasting of Monthly Flow for the White Nile River (South Sudan). *American Journal of Water Science and Engineering*. Vol. 7, No. 3, 2021, pp. 103-112. doi: 10.11648/j.ajwse.20210703.1
- Tate, E. & Gustard, A. 2000: Drought Definition: A Hydrological Perspective. 10.1007/978-94-015-9472-1_3.

- Taylor, A. L., Kox, T., and Johnston, D. 2018: Communicating high impact weather: improving warnings and decision making processes. *Int. J. Disast. Risk Reduct.* 30, 1–4. doi: 10.1016/j.ijdrr.2018.04.002
- Tegegne G, Park, D.K, Kim, Y.O.2017: Comparison of hydrological models for the assessment of water resources in a data-scarce region, the Upper Blue Nile River Basin. *J Hydrol: Reg Stud* 14:49–66 <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.10.002>
- Thierry T.N. 2020: Evaluation et impact de la sécheresse sur une région agricole : Cas de la plaine irriguée de la Beqaa. *École Doctorale Science De La Societe Territoire, Economie, Droit, université d'Orléans*
- Thomas, G. 1985 : Géodynamique d'un bassin intramontagneux : le bassin du bas Cheliff occidental (Algérie) durant le Mio-Plioquaternaire, thèse, université de Pau, France
- Thomas, A. C., Reager, J. T., Famiglietti, J. S., & Rodell, M.2014: A GRACE-based water storage deficit approach for hydrological drought characterization. *Geophysical Research Letters*, 41(5), 1537–1545.
- Thomas. T., Jaiswal. R.K., Galkate. R.V., Nayak. T.R. 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. 05.005
- Thornthwaite. C.W. 1948; an approach toward a rational classification of climate. *GeogrRev.* 38(55):94
- Thyer M., Kuczera G. 2000: Modeling long-term persistence in hydroclimatic time series using a hidden state Markov model, *Water Resour.Res.*, 36(11), 3301–3310.
- Tigkas. D., Vangelis. H., Tsakiris. G. 2012: Drought and climatic change impact on streamflow in small watersheds. *Sci. Total Environ.* 440 33–41.
- Tigkas, D. Vangelis, H. Tsakiris. G. 2015: DrinC: a software for drought analysis based on drought indices *Earth Sci. Informatics.*, 8 (3) (2015), pp. 697-709
- Tijdeman. E., Bachmair. S., Stahl. K. 2016: Controls on hydrologic drought duration in near-natural streamflow in Eu-rope and the USA. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*. 20. 4043–4059.<https://doi.org/10.5194/hess-20-4043-2016>.
- Tijdeman. E., Barker.L.J., Svoboda. M.D., Stahl. K. 2018. Natural and Human Influences on the Link Between Meteorological and Hydrological Drought Indices for a Large Set of Catchments in the Contiguous United States .*Water resources research.* Volume54. Issue9 Pages 6005-6023. <https://doi.org/10.1029/2017WR022412>
- Ting, M., and H. Wang, 1997: Summertime U.S. precipitation variability and its relation to Pacific sea surface temperature. *J. Climate*, **10** , 1853–1873
- Tokarczyk T, Szalinska W. 2014: Combined analysis of precipitation and water deficit for drought hazard assessment. *Hydrol Sci J* 59(9):1675–1689
- Touazi, M. 2001: *Évaluation des ressources en eau et acquisition de bases de données à références spatiales et temporelles en Algérie du Nord.* Thèse de Doctorat, Univ. Nice Sophia-Antipolis, France, 310 p.

- Touazi, M., Laborde, J.P. Bhiry, N. (2004 : Modelling rainfall-discharge at a mean inter-yearly scale in Northern Algeria. *J. Hydrol.*, 296, 179-191.
- Toutou M & Abul. A. 2018 : Climate change and water resources in Algeria: vulnerability, impact and adaptation strategy. *Economic and Environmental Studies*. 18. 411-429. 10.25167/ees.2018.45.23.
- Toutain G, 1979: *Eléments d'agronomie saharienne: de la recherche au développement » Cellule des zones arides*, Institut national de la recherche agronomique, Groupe de recherche et d'échanges technologiques, 276 pages
- Trambauer P., Maskey S., Werner M., Pappenberger F., van Beek L. P. H., and Uhlenbrook S. 2014: Identification and simulation of space–time variability of past hydrological drought events in the Limpopo River basin, southern Africa. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 2925–2942, 2014. doi:10.5194/hess-18-2925-2014
- Trambauer P et al. 2015: Hydrological drought forecasting and skill assessment for the Limpopo River basin, southern Africa *Hydrol Earth Syst. Sci.* 19 1695–1711
- Trenberth, K & Shea, D. 2005: Relationship between precipitation and surface temperature. *Geophys. Res. Lett.* 32. 10.1029/2005GL022760.
- Trenberth K E, Dai A, van der Schrier G, Jones P D, Barichivich J, Briffa K R and Sheffield J 2013: Global warming and changes in drought *Nat. Clim. Change* 417–22
- Tsakiris. G., Vangelis. H. 2005: Establishing a Drought Index Incorporating Evapotranspiration. *Eur. Water* 9-10. 3-11.
- Tsakiris. G., Pangalou. D., Vangelis. H. 2007: Regional Drought Assessment Based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resour. Manage.* 21:5. 821-833.
- Tsiros I. X. Nastos P. Proutsos N. D. Tsaousidis A. 2020: Variability of the aridity index and related drought parameters in Greece using climatological data over the last century (1900–1997). *Atmos. Res.* 240, 104914.
- UNESCAP. 2020: *The Disaster Riskscape across South and South-West Asia: Key Takeaways for Stakeholders*. ST/ESCAP/2879. <https://www.unescap.org/sites/default/files/IDD-APDR-Subreport-SSWA.pdf> (accessed 09 July 2021).
- UNFCCC. 2015: *Report of the Conference of the Parties on its Twenty-First Session, Held in Paris from 30 November to 13 December 2015. Part Two: Action Taken by the Conference of the Parties at its Twenty-First Session*. United Nations. FCCC/CP/2015/10/Add.1. 2015. Available online: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10a01.pdf> (accessed on 29 January 2016)
- UNISDR, United Nations International Strategy for Disaster Reduction, 2011. *Drought Risks*. Chapter 3 in “Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. Revealing Risk, Redefining Development, GAR 2011”, pp. 54-69.
- UNISDR. 2015. *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 – 2030*
- UNISDR, 2017. *2016-17 Biennium Work Programme Final Report*
- Valiya Veetil, A.; Mishra, A.K. 2020: Multiscale hydrological drought analysis: Role of climate, catchment and morphological variables and associated thresholds. *J. Hydrol.* 582, 124533.

- Van Dijk, A. I. J. M., Beck, H. E., Crosbie, R. S., de Jeu, R. A. M., Liu, Y. Y., Podger, G. M., et al. 2013: The Millennium Drought in Southeast Australia (2001-2009): Natural and Human Causes and Implications for Water Resources, Ecosystems, Economy, and Society. *Water Resour. Res.* 49 (2), 1040–1057. doi:10.1002/wrcr.20123
- Van Huijgevoort. M. Hydrological drought: 2014; characterisation and representation in large-scale models. Ph.D. thesis. Wageningen University. the Netherlands.
- Van Lanen, H. A. Fendekova, J., M. Kupczyk, E. Kasprzyk, A. and Pokojski, W. 2004: Flow Generating Processes, Development in *Water Science*, 48, Hydrological drought ed., chap. 3, pp. 53–96, Elsevier Sci.B.V., Amsterdam, Netherlands.
- Van Lanen, H. A. Wand J., N. Tallaksen, L. M. and Van Loon, A. F. 2013: Hydrological drought across the world: Impact of climate and physical catchment structure, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 1715–1732, doi:10.5194/hess-17-1715-2013.
- Van Loon. A.F., Van Lanen. H.A.J. 2012: A process-based typology of hydrological drought *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16 (7). pp. 1915-1946. 10.5194/hess-16-1915-2012
- Van Loon, A.F. and Van Lanen, H.A.J., 2013 : Making the distinction between water scarcity and drought using an observation-modeling framework. *Water Resources Research*, 49, 1483–1502. doi:10.1002/wrcr.20147
- Van Loon A. F., On the Propagation of Drought: How Climate and Catchment Characteristics Influence Hydrological Drought Development and Recovery, 2013.
- Van Loon, A. F., E. Tijdeman, N. Wanders, H. A. J. Van Lanen, A.J. Teuling, and R. Uijlenhoet 2014: How climate seasonality modifies drought duration and deficit, *J. Geo-phys. Res. Atmos.*, 119, 4640–4656, doi:10.1002/2013JD020383
- Van Loon AF. 2015 : Hydrological drought explained. *WIREs Water*. 2(4):359–392.
- Van Loon. A.F., Laaha. G. 2015: Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. *Journal of Hydrology*. 526. 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.059>.
- Van Loon, A.F., et al., 2016. Drought in the Anthropocene. *Nature Geoscience*, 9, 89–91. doi:10.1038/ngeo2646
- Van Tiel, M., Teuling, A. J., Wanders, N., Vis, M. J. P., Stahl, K., and Van Loon, A. F. 2018: The Role of Glacier Changes and Threshold Definition in the Characterisation of Future Streamflow Droughts in Glacierised Catchments, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 463–485, <https://doi.org/10.5194/hess-22-463-2018>, 2018
- Van Vliet. M.T.H., Yearsley. J.R., Ludwig. F., Vogele. S., Lettenmaier. D.P., Kabat. P. 2012. Vulnerability of US and European electricity supply to climate change. *Nature Clim. Change* 2 (9). 676–681. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1546>.
- Vasiliades, L. Sarailidis, G. and Loukas, A. 2017 : Hydrological modelling of low flows for operational water resources management. *European Water* 57: 223-229, 2017.
- Vazifekhhah, S & Kahya, E. 2018: Hydrological drought associations with extreme phases of the North Atlantic and Arctic Oscillations over Turkey and northern Iran. *International Journal of Climatology*. 38. 4459-4475. 10.1002/joc.5680.

Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno JI. 2010: A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index – SPEI. *J Clim.* 23(7):1696–1718.

Vicente-Serrano, S. M., S. Beguería, and J. I. López-Moreno, 2011: Comment on Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index (PDSI) during 1900–2008” by Aiguo Dai. *J. Geophys. Res.*, 116, D19112, doi:10.1029/2011JD016410.

Vicente-Serrano, S & Beguería, S & Lorenzo-Lacruz, J & Camarero, J & López-Moreno, J.I. & Azorin-Molina, C & Revuelto, J & Morán-Tejeda, E & Sanchez-Lorenzo, A. 2012: Performance of Drought Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications. *Earth Interactions.* 16. 1-27. 10.1175/2012EI000434.1.

Vidal. J.P., Martin. E., Franchistéguy. L., Habets. F., Soubeyroux. J.M., Blanchard. M., Baillon. M., 2010: Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14 (3). 459–478. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-14-459-2010>.

Villagran De León, J.C., J. Bogardi, S. Dannenmann Et R. Basher. 2006 : Early warning systems in the context of disaster risk management. *Entwicklung & Ländlicher Raum*, 2, 23-25.

Villalobos, C. 2007: A Pasture-Based Model for Extended Drought Management, Long-Term Sustainability, and Economic Viability in the Southern High Plains. *Forage and Grazinglands.* 10.1094/FG-2007-1108-01-MG..

Wahl, K.L., and Wahl, T.L., 1995: Determining the flow of Comal Springs at New Braunfels, Texas, in *Proceedings of Texas Water '95, August 16-17, 1995, San Antonio, Texas: American Society of Civil Engineers*, p. 77-86, information available on the World Wide Web, accessed March 25, 2003, at URL http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/twahl/bfi/texaswater95/comalsprings.html

Wanders, N.; Van Lanen, H.A.J. 2015: Future discharge drought across climate regions around the world modelled with a synthetic hydrological modelling approach forced by three general circulation models. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2015, 15, 487–504.

Wang, L and Qu, J.J. 2007: NMDI: a normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing *Geophys. Res. Lett.* 34 L20405

Wang W, Maurits W. Ertsen, M.D. Svoboda, M.H. 2016: Propagation of Drought: From Meteorological Drought to Agricultural and Hydrological Drought", *Advances in Meteorology*, vol. 2016, ArticleID 6547209, 5 pages, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/6547209>

Wang, L. and Yuan, X. 2018: Two types of flash drought and their connections with seasonal drought. *Advances in Atmospheric Sciences*, vol. 35, no. 12, pp. 1478–1490.

Wang, J, Wen W, Hui C, Hongjie W, and Ye Z. 2021: Propagation from Meteorological to Hydrological Drought and Its Influencing Factors in the Huaihe River Basin" *Water* 13, no. 14: 1985. <https://doi.org/10.3390/w13141985>

Welsch J., 1890: Les terrains crétacés du Seressou occidental et du Lehou. *Bulletin Société géologique. France*, 3eme série, XVIII, pp. 493-510.

World Health Organization & United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). Climate and health country profile 2015: Algeria. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/246137>

Wilhelmi, O.V., Wilhite, D.A. Assessing Vulnerability to Agricultural Drought: A Nebraska Case Study. *Natural Hazards* 25, 37–58. 2002: <https://doi.org/10.1023/A:1013388814894>

Wilhite, D & Glantz, M. 1985 : Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International - WATER INT.* 10. 111-120. 10.1080/02508068508686328.

Wilhite D.A. 1993 : The Enigma of Drought. In: Wilhite D.A. (eds) *Drought Assessment, Management, and Planning: Theory and Case Studies.* Natural Resource Management and Policy, vol 2. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3224-8_1

Wilhite D. Chapter 1. 2000 : Drought as a natural hazard: concepts and definitions. Drought Mitigation Center Faculty. Available from: <https://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/69>.

Wilhite, A., Svoboda, D., Hayes, J. 2007. Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water Resour. Manag.* 21. 763–774.

Wilks, D.S. 2011: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences.* 3rd edn. Academic Press: Oxford; 676. https://www.who.int/gho/publications/world_health_statistics/2020/en/

Williams, A.P., Cook, E.R. Smerdon, J.E. Cook, B.I. Abatzoglou, J.T. Bolles, K. Baek, S.H. Badger, A.M. Livneh, B. 2020: Large contribution from anthropogenic warming to an emerging North American megadrought.

Windhoek Declaration. 2016: The Windhoek Declaration for Enhancing Resilience to Drought in Africa. Namibia.

WMO, 2011: *Proceedings of an Expert Meeting 2–4 June, 2010, Murcia, Spain*

WMO, 2012: *Standardized Precipitation Index User Guide (WMO-No. 1090).* Geneva.

Wood, E. F., Schubert, S. D., Wood, A. W., Peters-Lidard, C. D., Mo, K. C., Mariotti, A., & Pulwarty, R. S. 2015: Prospects for advancing drought understanding, monitoring and prediction. *Journal of Hydrometeorology*, 16(4), 1636–1657. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0164.1>

World Bank. 2019. *Assessing Drought Hazard and Risk : Principles and Implementation Guidance.* World Bank, Washington, DC. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/33805> License: CC BY 3.0 IGO.”

World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP) (2014). *National Drought Management Policy Guidelines: A Template for Action.* Integrated Drought Management Programme (IDMP) Tools and Guidelines Series 1. WMO, Geneva, Switzerland and GWP, Stockholm, Sweden. http://www.droughtmanagement.info/literature/IDMP_NDMPG_en.pdf

WMO and GWP.2016:; *Handbook of Drought Indicators and Indices*, M. Svoboda and B.A. Fuchs, eds. *Integrated Drought Management Programme, Integrated Drought Management Tools and Guidelines, Series 2.* Geneva. Available at https://www.droughtmanagement.info/literature/GWP_Handbook_of_Drought_Indicatorsand_Indices_2016.pdf.

- Wu J. Chen X. Yao H. Gao L. Chen Y. Liu M. 2017: Non-linear relationship of hydrological drought responding to meteorological drought and impact of a large reservoir. *J. Hydrol.* 551, 495–507.
- Wu, J., Chen, X., Yao, H., Liu, Z., & Zhang, D. 2018: Hydrological Drought Instantaneous Propagation Speed Based on the Variable Motion Relationship of Speed-Time Process. *Water Resources Research*, 54(11), 9549–9565. <https://doi.org/10.1029/2018WR023120>
- Xiang, Y.; Wang, Y.; Chen, Y.; Bai, Y.; Zhang, L.; Zhang, Q. 2020: Hydrological Drought Risk Assessment Using a Multidimensional Copula Function Approach in Arid Inland Basins, China. *Water* 2020, 12, 1888. <https://doi.org/10.3390/w12071888>
- Xiao, M., Zhang, Q., and Singh, V. P. 2015: Influences of Enso, Nao, Iod and Pdo on Seasonal Precipitation Regimes in the Yangtze River basin, china. *Int. J. Climatol* 35 (12), 3556–3567. doi:10.1002/joc.4228
- Xu . K et al.2019: Comparative analysis of meteorological and hydrological drought over the Pearl Riverbasin in southern China," vol. 50, no. 1, pp. 301-318, 2019.
- Yahiaoui, A., Touaïbia, B., Bouvier, C., 2009 : Frequency analysis of the hydrological drought regime. Case of oued Mina catchment in western of Algeria. *Rev. Nature et Technologie*, n° 01/Juin 2009, 3-15. Pardé M., (1963) : Fleuves et rivières, A. Colin, Paris, 224 p
- Yebdri D., Errih M., Hamlet A. et Tidjani A.B. 2007: The Water Resources Management Study of the Wadi Tafna Basin (Algeria) Using the Swat Model. *African Water Journal*, vol. 1, n° 1, p. 33-47.
- Yihdego, Y. 2016: Drought and groundwater quality in coastal area.”In *Handbook of drought and water scarcity (HDWS): Vol. 2: Environmen-tal impacts and analysis of drought and water scarcity*, edited by S. Eslamian and F. A. Eslamian. Boca Raton, FL: Francis & Taylor.
- Yihdego, Y., Vaheddoost, B. & Al-Weshah, R.A. 2019: Drought indices and indicators revisited. *Arab J Geosci* 12, 69 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4237-z>
- Yohai, V. J. 1987. High breakdown-point and high efficiency robust estimates for regression. *The Annals of Statistics* 15, 642-656.
- Yu, M., Liu, X. & Li, Q. 2020: Responses of meteorological drought-hydrological drought propagation to watershed scales in the upper Huaihe River basin, China. *Environ Sci Pollut Res* 27, 17561–17570 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06413-2>
- Yuan, X., Wood, E. F., Chaney, N. W., Sheffield, J., Kam, J., Liang, M., and Guan, K. 2013: Probabilistic Seasonal Forecasting of African Drought by Dynamical Models, *J. Hydrometeorol.*, 14, 1706–1720, <https://doi.org/10.1175/jhm-d-13-054.1>, 2013.
- Yuan, X., Z. Ma, M. Pan, and C. Shi 2015: Microwave remote sensing of short-term droughts during crop growing seasons, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 4394–4401, doi:10.1002/2015GL064125.
- Yuan, X., F. Ma, L. Wang, Z. Zheng, Z. Ma, A. Ye, and S. Peng, 2016: An experimental seasonal hydrological forecasting system over the Yellow River basin—Part 1: Understanding the role of initial hydrological conditions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 2437–2451, <https://doi.org/10.5194/hess-20-2437-2016>.

- Yuan, X et al. 2017: Understanding and seasonal forecasting of hydrological drought in the Anthropocene *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21 5477–92
- Zarei, A & Mehdi, M & Mahmoudi, M. 2016: Parametric and Non-Parametric Trend of Drought in Arid and Semi-Arid Regions Using RDI Index. *Water Resources Management.* 30. 10.1007/s11269-016-1501-9.
- Zeleňáková. M., Vido. J., Portela. M., Purcz. P., Blišťán. P., Hlavatá. H., Hlušík. P. 2017: Precipitation Trends over Slovakia in the Period 1981–2013. *Water.* 9(12):922.
- Zeroual A. Assani A. 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., Assani, A. A., Meddi, M., and Alkama, R. 2019: Assessment of climate change in Algeria from 1951 to 2098 using the Köppen–Geiger climate classification scheme, *Clim. Dynam.*, 52, 227–243, <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4128-0>, 2019.
- Zettam, M.A., 1018. Transfert des nitrates du bassin versant de la Tafna (Nord-Ouest de l'Algérie) vers la mer Méditerranée. Approche couplant mesures, modélisation et changement d'échelle vers les grands bassins versants Nord africains.
- Zhang, L. 2005: Multivariate Hydrological Frequency Analysis and Risk Mapping. Ph.D. Thesis, Beijing Normal University, Beijing, China
- Zhang, A. J., C. Zhang, G. B. Fu, B. D. Wang, Z. X. Bao, and H. X. Zheng, 2012: Assessments of impacts of climate change and human activities on runoff with SWAT for the Huifa River Basin, Northeast China. *Water Resour. Manage.*, 26, 2199–2217, <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0010-8>.
- Zhang, A and Jia, G. 2013: Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data *Remote Sens. Environ.* 134 12–23
- Zhang. B., He. C., Burnham. M et al. 2016: Evaluating the coupling effects of climate aridity and vegetation restoration on soil erosion over the Loess Plateau in China.”*The Science of the Total Environment.* vol. 539. pp. 436–449.
- Zhang, Y., Q. You, C. Chen and X. Li. 2017: Flash droughts in a typical humid and subtropical basin: A case study in the Gan River Basin, China. *Journal of Hydrology*, vol. 551, pp. 162–176.
- Zhang, J & Zhang, S & Cheng, M & Jiang, H & Zhang, X & Peng, C & Lu, X & Zhang, M & Jin, J. 2018 : Effect of Drought on Agronomic Traits of Rice and Wheat: A Meta-Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health.* 15. 839. 10.3390/ijerph15050839.
- Zhang, Y., You, Q., Mao, G. et al. 2019: Short-term concurrent drought and heatwave frequency with 1.5 and 2.0 °C global warming in humid subtropical basins: a case study in the Gan River Basin, China. *Clim Dyn* 52, 4621–4641 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4398-6>
- Zhao, L & Xia, J & Xu, C.Y & Wang, Z & Sobkowiak, L & Long, C. 2013 : Evapotranspiration estimation methods in hydrological models. *Journal of Geographical Sciences.* 23. 359-369. 10.1007/s11442-013-1015-9.

- Zhao, T. and Dai, A. 2015 : The magnitude and causes of global drought changes in the twenty-first century under a low–moderate emissions scenario. *Journal of Climate*, vol. 28, no. 11, pp. 4490–4512.
- Zhao, L., Wu, J., Fang, J. 2016: Robust response of Streamflow drought to different timescales of meteorological drought in Xiangjiang river basin of China.” *Advances in Meteorology*. vol. Article ID 1634787. 8 pages.
- Zhao, G., and Gao, H. 2019: Estimating Reservoir Evaporation Losses for the united states: Fusing Remote Sensing and Modeling Approaches. *Remote Sensing Environ.* 226, 109–124. doi:10.1016/j.rse.2019.03.015
- Zheng T, Bergin M.H, Sutaria R, Tripathi S.N, Caldow R, and Carlson D.E. 2019: Gaussian process regression model for dynamically calibrating and surveilling a wireless low-cost particulate matter sensor network in Delhi. *Atmos. Meas. Tech.*, 12, 5161–5181, 2019 <https://doi.org/10.5194/amt-12-5161-2019>
- Zhonghua H, Cuiwei Z, Hong L, Zhaohui Y. 2021: The Response Relationship between Land Use/Land Cover and Watershed Lagged Effect based on Different Time Scales--A Case Study in Central Guizhou of China. *Research square?* doi.org/10.21203/rs.3.rs-564002/v1
- Zillman, J.W. 2003 : Meteorological and hydrological early warning systems. Dans: *Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction*. ZSCHAU, J. et A.N. KÜPPERS (Éditeurs). Springer, Berlin, Allemagne, Chap. 4.2., pp. 135-164.
- Zou, L., Xia, J. & She, D. 2018: Analysis of Impacts of Climate Change and Human Activities on Hydrological Drought: a Case Study in the Wei River Basin, China. *Water Resour Manage* 32, 1421–1438 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1877-1>
- Zucchini W., Guttorp P. 1991. A hidden Markov model for space-time precipitation, *Water Resour. Res.*, 27(8), 1917–1923. <https://doi.org/10.1029/91WR01403>.

ANNEXE I :

Tableau I.1 : Indicateurs et indices météorologiques

Météorologie	Facilité d'emploi	Paramètres	Informations complémentaires
AAI – Indice d'aridité anormale	Vert	P, T, EPT, ET	Disponible en exploitation pour l'Inde
Déciles	vert	p	Facile à calculer; les exemples provenant de l'Australie sont utiles
KBDI – Indice de sécheresse de Keetch-Byram	Vert	P,T	Calculs fondés sur le climat de la zone visée
Rapport à la normale des précipitations	Vert	P	Calculs simples
SPI – Indice de précipitations normalisé	Vert	P	Recommandé par l'OMM comme point de départ pour le suivi de la sécheresse météorologique
WASP – Anomalie pondérée des précipitations normalisées	Vert	P, T	Suivi de la sécheresse dans les régions tropicales à partir de données aux points de grille
AI – Indice d'aridité	Jaune	P, T	Peut aussi servir à la classification des climats
CMI – Indice d'humidité des cultures	Jaune	P, T	Valeurs hebdomadaires nécessaires
CZI – Indice Z chinois	Jaune	P	Destiné à améliorer le SPI
DAI – Indice de zone de sécheresse	Jaune	P	Donne une idée de la pluviosité pendant la mousson
DRI – Indice de détection de la sécheresse	Jaune	P, T	Requiert les valeurs mensuelles des températures et des précipitations
EDI – Indice de sécheresse efficace	Jaune	P	Programme disponible en contactant directement les concepteurs
HTC – Coefficient hydrothermique de Selyaninov	Jaune	P, T	Calculs simples, plusieurs exemples en Fédération de Russie
Indice Z de Palmer	Jaune	P, T, TED	Une des nombreuses valeurs produites par les calculs du PDSI
NDI – Indice de sécheresse de la NOAA	Jaune	P	Destiné surtout aux applications agricoles
PDSI – Indice de sécheresse de Palmer	Jaune	P, T, TED	Codé jaune en raison de la complexité des calculs et de la nécessité d'avoir des séries de données complètes
RAI – Indice d'anomalie de pluviosité	Jaune	P	Séries de données complètes requises

SAI – Indice d'anomalie normalisé	Jaune	P	Description des conditions régionales à l'aide de données ponctuelles
sc-PDSI – Indice de sécheresse de Palmer auto-étalonné	Jaune	P, T, TED	Codé jaune en raison de la complexité des calculs et de la nécessité d'avoir des séries de données complètes
SPEI – Indice de précipitations et d'évapotranspiration normalisées	Jaune	P, T	Séries de données complètes requises; valeurs de sortie similaires au SPI mais intégrant la température
ARID – Indice de référence pour la sécheresse agricole	Rouge	P, T, Mod.	Mis au point dans le sud-est des États-Unis d'Amérique, peu testé ailleurs
CSDI – Indice de sécheresse par type de culture	Rouge	P, T, Tr, V, Ray, TED, Mod, DC	Données de qualité requises pour de nombreuses variables, d'où une utilisation difficile
RDI – Indice de sécheresse du <i>Bureau of Reclamation</i> des États-Unis	Rouge	P, T, MN, RS, EF	Similaire au SWSI, mais intégrant la température

Tableau I.2 : Indicateurs et indices agronomiques

Humidité du sol	Facilité d'emploi	Paramètres	Informations complémentaires
SMA – Anomalie d'humidité du sol	Jaune	P, T, TED	Destiné à améliorer le bilan hydrique du PDSI
ETDI – Indice de déficit d'évapotranspiration	Rouge	Mod.	Calculs complexes et multiples valeurs d'entrée requises
SMDI – Indice de déficit d'humidité du sol	Rouge	Mod.	Valeurs hebdomadaires à différentes profondeurs ; calculs compliqués
SWS – Stockage d'eau dans le sol	Rouge	TED, RS, TS, DHS	Interpolation difficile sur de vastes étendues en raison des variations du type de sol et de culture

Tableau I.3 : Indicateurs et indices hydrologiques

Hydrologie	Facilité d'emploi	Paramètres	Informations complémentaires
PHDI – Indice de sécheresse hydrologique de Palmer	Jaune	P, T, TED	Séries de données complètes requises
SDI – Indice de sécheresse fondé	Jaune	EF	Calculs similaires à ceux du SPI, en remplaçant les précipitations par des données sur l'écoulement

sur l'écoulement fluvial			
SRSI – Indice d'alimentation des réservoirs normalisé	Jaune	RS	Calculs similaires à ceux du SPI avec des données sur les réservoirs
SSFI – Indice d'écoulement fluvial normalisé	Jaune	EF	Utilise le programme du SPI avec des données sur l'écoulement fluvial
SWI – Indice de niveau d'eau normalisé	Jaune	ES	Calculs similaires à ceux du SPI, en remplaçant les précipitations par des données sur les eaux souterraines ou les niveaux dans les puits
SWSI – Indice d'apport de surface	Jaune	P, RS, EF, MN	Nombreuses méthodes et valeurs dérivées disponibles, mais la comparaison entre bassins est subordonnée à la méthode choisie
ADI – Indice de sécheresse agrégé	Rouge	P, ET, EF, RS, TED, MN	Pas de programme, calculs expliqués dans les articles scientifiques
SMRI – Indice de pluie et d'eau de fonte normalisé	Rouge	P, T, EF, Mod.	Peut être calculé avec ou sans données sur le manteau neigeux

Tableau I.4 : Indicateurs et indices de télédétection

Télédétection	Facilité d'emploi	Paramètres	Informations complémentaires
ESI – Indice de stress fondé sur l'évaporation	Vert	Sat., PET	N'est utilisé en exploitation que depuis peu
EVI – Indice de végétation amélioré	Vert	Sat	Ne distingue pas le stress dû à la sécheresse des autres stress
NDVI – Indice de végétation par différence normalisé	Vert	Sat	Calculé pour la plupart des emplacements
NDWI et LSWI – Indice de quantité d'eau par différence normalisé et indice de quantité d'eau en surface	Vert	Sat	Produit en exploitation à partir des données de spectroradiomètres imageurs à moyenne résolution
TCI – Indice des conditions de température	Vert	Sat	Généralement présenté avec les calculs du NDVI
VCI – Indice des conditions de végétation	Vert	Sat	Généralement présenté avec les calculs du NDVI
VegDRI – Indice de réaction de la végétation à la sécheresse	Vert	Sat., P, T, TED, CT, ER	Prend en compte de nombreuses variables pour distinguer le stress dû à la sécheresse des autres stress subis par la végétation

VHI – Indice de santé de la végétation	Vert	Sat	L'une des premières tentatives de suivre la sécheresse par télédétection
WRSI et WRSI géospatial – Indice de satisfaction des besoins en eau	Vert	Sat., Mod., CC	Produit en exploitation pour de nombreux emplacements
SAVI – Indice de végétation ajusté pour le sol	rouge	Sat.	N'est pas produit en exploitation

Tableau I.5 : Indicateurs et indices composites

Valeurs composites ou modélisées	Facilité d'emploi	Paramètres	Informations complémentaires
CDI – Indicateur de sécheresse composé	Vert	Mod., P, Sat.	Utilise à la fois des données de surface et de télédétection
GIDMaPS – Système mondial intégré de suivi et de prévision de la sécheresse	Vert	Plus., Mod.	Produit opérationnel qui donne les valeurs mondiales de l'indice d'humidité du sol normalisé, du SPI et du MSDI
GLDAS – Système mondial d'assimilation des données sur les terres émergées	Vert	Plus., Mod., Sat.	Utile pour les régions où les données sont rares étant donné sa couverture mondiale
MSDI – Indice de sécheresse normalisé multivarié	Vert	Plus., Mod.	Disponible, mais une interprétation est nécessaire
USDMS – Système américain de suivi de la sécheresse	Vert	Plus.	Disponible, mais une interprétation est nécessaire

Remarque :

Un indice est codé vert si l'une au moins des conditions suivantes est remplie :

- Un logiciel ou programme d'exécution de l'indice est facilement et librement accessible;
- Il n'est pas nécessaire de détenir des données quotidiennes;
- Les données peuvent comporter des lacunes;
- La valeur de sortie est produite en exploitation et accessible en ligne.

Un indice est codé jaune si l'une au moins des conditions suivantes est remplie:

- De multiples variables ou données d'entrée sont requises pour les calculs;
- Il n'existe pas de logiciel ou de programme d'exécution de l'indice dans le domaine public;
- Une seule variable ou donnée d'entrée est requise, mais il n'existe pas de logiciel;
- La production de l'indice exige des calculs de complexité minimale.

Un indice est codé rouge si l'une au moins des conditions suivantes est remplie:

- Un logiciel doit être élaboré pour calculer l'indice selon une méthode publiée;
- L'indice ou les éléments dérivés ne sont pas faciles à obtenir;

- L'indice est peu connu et peu employé, mais il pourrait convenir;
- L'indice renferme des données modélisées ou fait partie des calculs.

CC = coefficient de culture

CT = couverture terrestre

DC = données de culture

DHS = déficit hydrique du sol

EF = écoulement fluvial

ER = écorégion

ES = eaux souterraines

ET = évapotranspiration

ETP = évapotranspiration potentielle

MN = manteau neigeux

Mod. = valeur modélisée

P = précipitations

Plus. = plusieurs indicateurs

Ray. = rayonnement solaire

RS = réservoir

Sat. = satellite

T = température

TED = teneur en eau disponible

Tr = température de rosée ou point de rosée

TS = type de sol

ANNEXE II

Tableau II.1. Pourcentage de distribution des classes de sécheresse selon l'indice SRI

Indice	Extrêmement secs <-2	Séverement secs - 2<indice<-1,5	Moderement secs - 1,5<indice<-1	Non secs
<i>Chouly</i>				
SRI-3	0,29	3,49	11,28	84,83
SRI-6	0,11	1,98	14,30	83,61
SRI-12	0,10	1,84	15,42	82,64
<i>Arzew</i>				
SRI-3	0,33	2,77	9,40	87,50
SRI-6	0,15	2,31	10,33	87,21
SRI-12	0,22	2,01	13,29	84,48
<i>Bouhanifia</i>				
SRI-3	0,89	4,11	11,04	83,96
SRI-6	0,64	3,15	12,27	83,94
SRI-12	0,17	1,66	13,41	84,76
<i>SMBA</i>				
SRI-3	3,03	5,00	13,65	78,32
SRI-6	2,48	3,28	11,24	83,00
SRI-12	1,96	3,18	11,01	83,85

Tableau II.2. Pourcentage de distribution des classes de sécheresse selon l'indice SRI

Indice	Extrêmement secs <-2	Séverement secs - 2<indice<-1,5	Moderement secs - 1,5<indice<-1	Non secs
<i>Maghnia</i>				
SRI-3	0,44	3,33	17,22	79,01
SRI-6	0,21	1,95	17,03	80,81
SRI-12	0,15	1,31	15,45	83,09
<i>Turgot Nord</i>				
SRI-3	0,66	2,97	12,11	89,62
SRI-6	0,41	3,55	14,27	84,26
SRI-12	0,44	2,11	14,76	82,69
<i>Sidi Belabbes</i>				
SRI-3	1,04	2,23	7,91	88,82
SRI-6	0,88	1,65	11,15	86,32
SRI-12	0,25	1,14	6,62	92,00
<i>Takhmert</i>				
SRI-3	5,05	7,02	12,78	75,15
SRI-6	3,88	4,49	10,23	81,40
SRI-12	2,24	3,77	9,54	84,54

Tableau II.3. Pourcentage de distribution des classes de sécheresse selon l'indice SRI

Indice	Extrêmement secs <-2	Séverement secs - 2<indice<-1,5	Moderement secs - 1,5<indice<-1	Non secs
<i>Pierre de Chat</i>				
SRI-3	0,19	3,22	14,08	82,51
SRI-6	0,08	1,69	15,14	83,63
SRI-12	0,05	1,13	15,58	83,24
<i>Besbes</i>				
SRI-3	0,55	4,12	9,17	86,16
SRI-6	0,33	4,42	10,57	84,68
SRI-12	0,27	1,28	12,12	86,33
<i>Sidi Ali Benyoub</i>				
SRI-3	1,11	4,23	8,90	85,76
SRI-6	0,28	3,83	11,50	84,39
SRI-12	0,25	1,17	11,41	87,17
<i>Oued Abtal</i>				
SRI-3	1,97	3,73	9,02	85,28
SRI-6	1,86	3,21	9,34	85,59
SRI-12	1,53	2,88	9,71	85,88

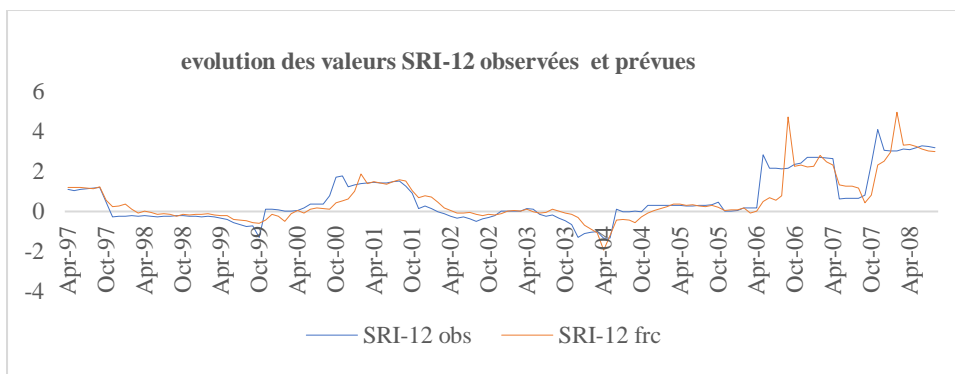
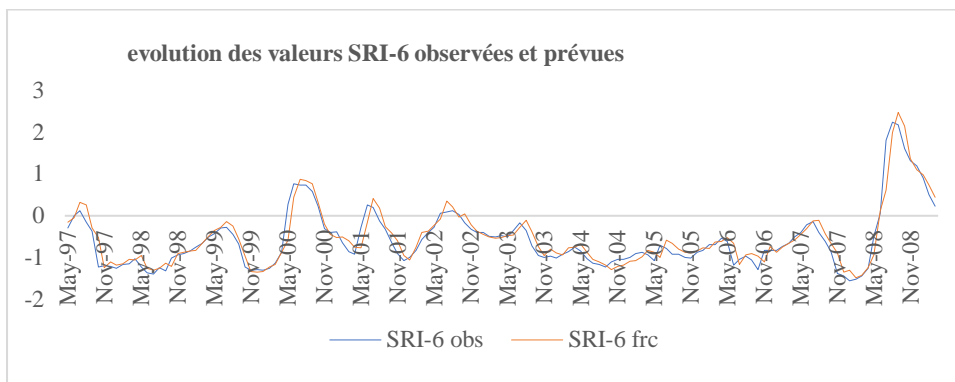
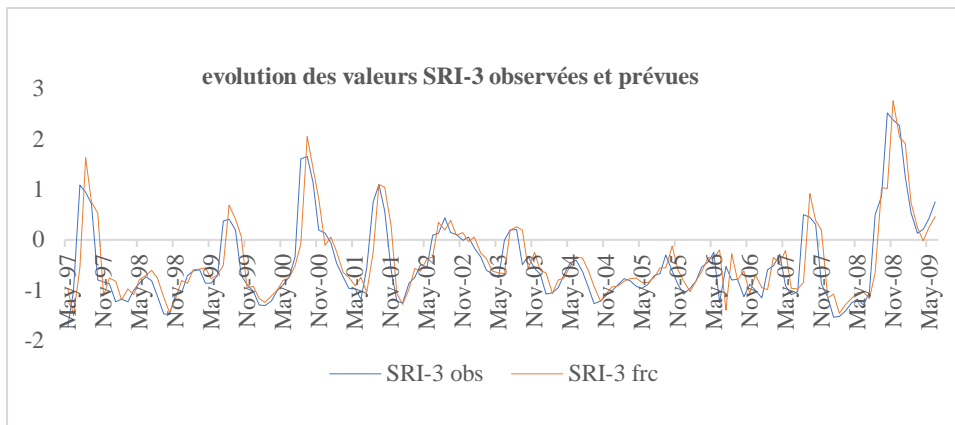


Figure II.1. Évolution des valeurs SRI observées et SRI prévues à la station Beni Bahdel

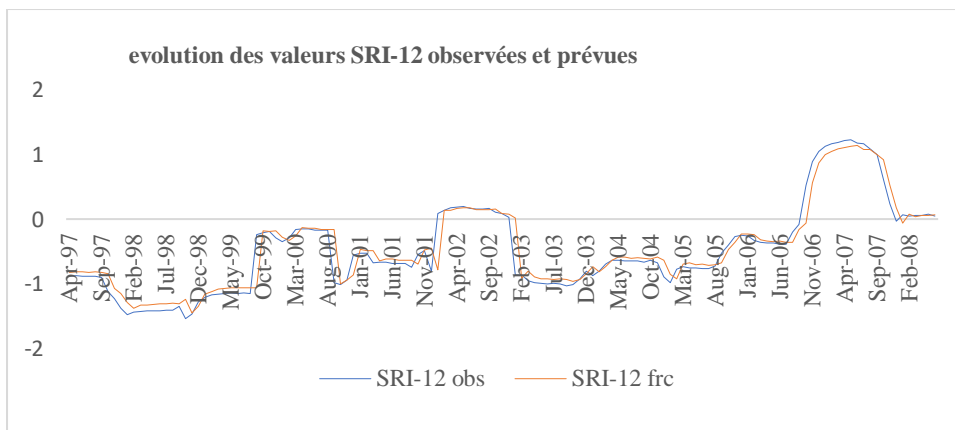
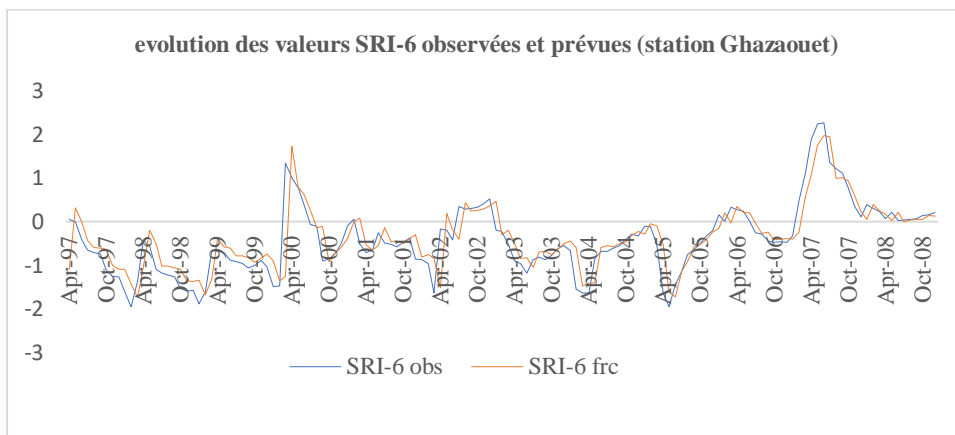
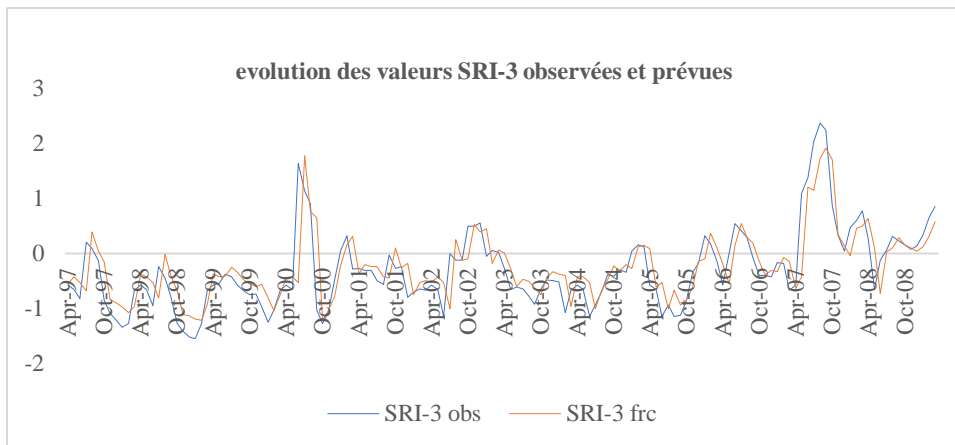


Figure II.2 : évolution des valeurs SRI observées et SRI prévues à la station Ghazaouet El Bor

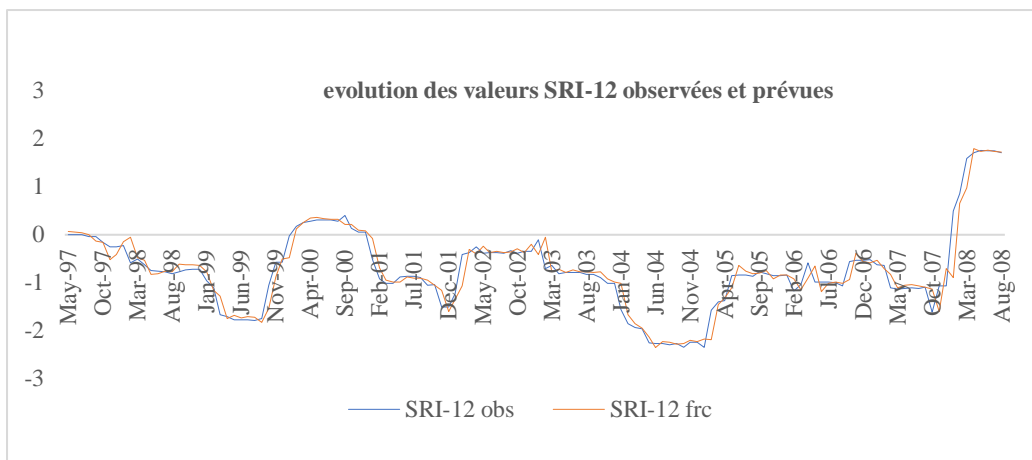
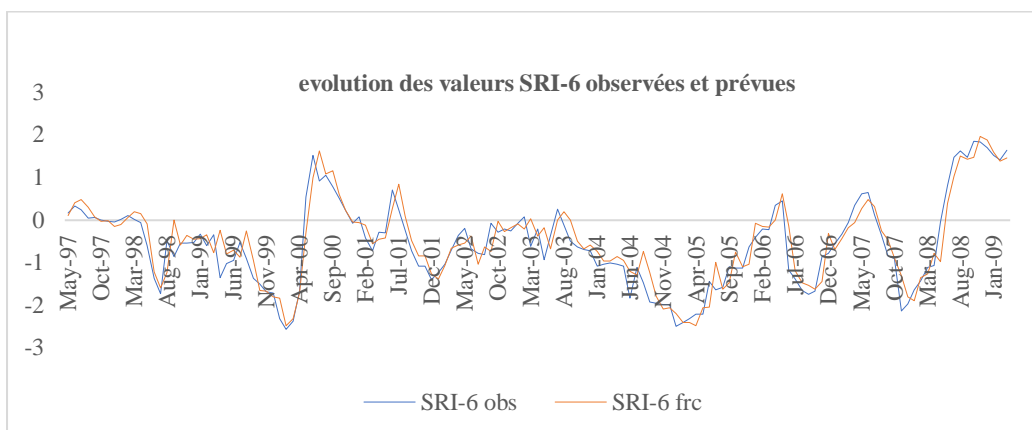
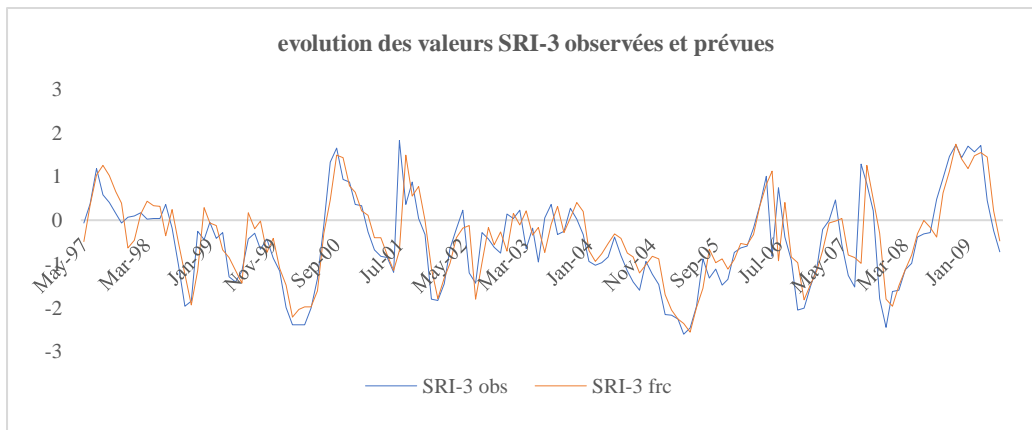


Figure II.3 : évolution des valeurs SRI observées et SRI prévues à la station Ammi Moussa

Tableau II.4 : Coefficient de corrélation de Pearson des stations (Chouly, Arzew, Bouhanifia et SMBA)

Station Chouly	Indice	SPI-3	SPI-6	SPI-12	RDI-3	RDI-6	RDI-12	Station Arzew	Indice	SPI-3	SPI-6	SPI-12	RDI-3	RDI-6	RDI-12
	SRI-3	0.31	0.18	0.01	0.33	0.19	0.03		SRI-3	0.29	0.24	0.17	0.32	0.26	0.20
	SRI-6	0.18	0.33	0.09	0.22	0.36	0.07		SRI-6	0.18	0.30	0.22	0.22	0.35	0.27
	SRI-12	0.07	0.10	0.36	0.11	0.17	0.38		SRI-12	0.16	0.28	0.33	0.23	0.31	0.37
Station Bouhanifia	Indice	SPI-3	SPI-6	SPI-12	RDI-3	RDI-6	RDI-12	Station SMBA	Indice	SPI-3	SPI-6	SPI-12	RDI-3	RDI-6	RDI-12
	SRI-3	0.51	0.38	0.25	0.52	0.38	0.30		SRI-3	0.66	0.55	0.44	0.68	0.52	0.39
	SRI-6	0.48	0.58	0.44	0.49	0.59	0.49		SRI-6	0.50	0.70	0.49	0.52	0.73	0.54
	SRI-12	0.33	0.47	0.63	0.37	0.50	0.65		SRI-12	0.43	0.62	0.74	0.46	0.58	0.75

Tableau II.5 : Coefficient de corrélation de Pearson des stations (Maghnia, Turgot Nord, Sidi Belabbes et Takhmert)

Station Maghnia	Indice	SPI-3	SPI-6	SPI-12	RDI-3	RDI-6	RDI-12	Station Turgot Nord	Indice	SPI-3	SPI-6	SPI-12	RDI-3	RDI-6	RDI-12
	SRI-3	0.28	0.15	0.01	0.29	0.16	0.01		SRI-3	0.30	0.20	0.18	0.33	0.29	0.19
SRI-6	0.15	0.29	0.04	0.18	0.31	0.09	SRI-6	0.20	0.33	0.27	0.24	0.35	0.25		
SRI-12	0.04	0.06	0.31	0.04	0.11	0.32	SRI-12	0.19	0.24	0.35	0.22	0.28	0.37		
Station Sidi Bel Abbes	Indice	SPI-3	SPI-6	SPI-12	RDI-3	RDI-6	RDI-12	Station Takhmert	Indice	SPI-3	SPI-6	SPI-12	RDI-3	RDI-6	RDI-12
	SRI-3	0.55	0.35	0.22	0.57	0.37	0.32		SRI-3	0.63	0.48	0.34	0.64	0.50	0.32
SRI-6	0.49	0.58	0.44	0.51	0.60	0.38	SRI-6	0.40	0.66	0.48	0.49	0.67	0.50		
SRI-12	0.37	0.45	0.64	0.38	0.47	0.66	SRI-12	0.33	0.39	0.69	0.41	0.55	0.71		

*Les numéros en gras montrent le CCPmax entre les indices parmi les différentes échelles du temps

Tableau II.6: Coefficient de corrélation de Pearson des stations (Pierre de Chat, Besbes, Sidi Ali Benyoub et Oued Abtal)

Station Pierre de Chat	Indice	SPI-3	SPI-6	SPI-12	RDI-3	RDI-6	RDI-12	Station besbes	Indice	SPI-3	SPI-6	SPI-12	RDI-3	RDI-6	RDI-12
	SRI-3	0.27	0.14	0.01	0.28	0.14	0.01		SRI-3	0.26	0.20	0.11	0.27	0.22	0.14
	SRI-6	0.16	0.29	0.07	0.15	0.29	0.04		SRI-6	0.13	0.28	0.20	0.18	0.28	0.21
	SRI-12	0.05	0.06	0.31	0.05	0.12	0.32		SRI-12	0.14	0.26	0.29	0.20	0.27	0.30
Station Sidi Ali Benyoub	Indice	SPI-3	SPI-6	SPI-12	RDI-3	RDI-6	RDI-12	Station Oued Abtal	Indice	SPI-3	SPI-6	SPI-12	RDI-3	RDI-6	RDI-12
	SRI-3	0.52	0.38	0.27	0.54	0.30	0.32		SRI-3	0.72	0.63	0.50	0.74	0.60	0.49
	SRI-6	0.47	0.54	0.45	0.50	0.59	0.53		SRI-6	0.61	0.77	0.58	0.58	0.79	0.66
	SRI-12	0.38	0.47	0.63	0.39	0.52	0.67		SRI-12	0.49	0.62	0.79	0.49	0.70	0.82

*Les numéros en gras montrent le CCPmax entre les indices parmi les différentes échelles du temps

Tableau II.7 : BFI moyen comparable aux valeurs de r pour les stations étudiées

Station	Echelle du temps	BFI	r	Station	Echelle du temps	BFI	r	Station	Echelle du temps	BFI	r
Maghnia (Tafna)	3-mois	0.71	0.29	Chouly (Tafna)	3-mois	0.65	0.33	Pierre de Chat (Tafna)	3-mois	0.71	0.28
	6- mois	0.68	0.31		6- mois	0.58	0.36		6- mois	0.64	0.29
	12- mois	0.66	0.32		12- mois	0.51	0.38		12- mois	0.60	0.32
Turgot Nord (côtiers oranais)	3- mois	0.66	0.33	Arzew (côtiers oranais)	3- mois	0.69	0.32	Besbes (côtiers oranais)	3- mois	0.73	0.27
	6- mois	0.58	0.36		6- mois	0.60	0.35		6- mois	0.67	0.28
	12- mois	0.55	0.37		12- mois	0.52	0.37		12- mois	0.64	0.30
Sidi Bel Abbes (Macta)	3- mois	0.43	0.57	Bouhanifia (Macta)	3- mois	0.52	0.51	Sidi Ali Benyoub (Macta)	3- mois	0.52	0.54
	6- mois	0.37	0.60		6- mois	0.44	0.58		6- mois	0.44	0.59
	12- mois	0.33	0.66		12- mois	0.40	0.63		12- mois	0.34	0.67
Takhmert (Chellif)	3- mois	0.25	0.64	SMBA (Chellif)	3- mois	0.22	0.68	Oued Abtal (Chellif)	3- mois	0.19	0.74
	6- mois	0.21	0.67		6- mois	0.16	0.73		6- mois	0.12	0.79
	12- mois	0.19	0.71		12- mois	0.13	0.75		12- mois	0.10	0.82

Tableau II.8 : Aire sous les courbes (ROC)

Station	Echelle de temps	AUC	Station	Echelle de temps	AUC	Station	Echelle de temps	AUC
Maghnia (Tafna)	3-mois	0.554	Chouly (Tafna)	3-mois	0.574	Pierre de Chat (Tafna)	3-mois	0.560
	6- mois	0.560		6- mois	0.582		6- mois	0.563
	12- mois	0.572		12- mois	0.593		12- mois	0.570
Turgot Nord (côtiers oranais)	3- mois	0.561	Arzew (côtiers oranais)	3- mois	0.566	Besbes (côtiers oranais)	3- mois	0.551
	6- mois	0.574		6- mois	0.570		6- mois	0.560
	12- mois	0.612		12- mois	0.607		12- mois	0.582
Sidi Bel Abbes (Macta)	3- mois	0.774	Bouhanifia (Macta)	3- mois	0.712	Sidi Ali Benyoub (Macta)	3- mois	0.733
	6- mois	0.798		6- mois	0.750		6- mois	0.771
	12- mois	0.814		12- mois	0.786		12- mois	0.800
Takhmert (Chellif)	3- mois	0.796	SMBA (Chellif)	3- mois	0.813	Oued Abtal (Chellif)	3- mois	0.827
	6- mois	0.814		6- mois	0.841		6- mois	0.860
	12- mois	0.820		12- mois	0.853		12- mois	0.877