

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF – M SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE



DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE
FILIERE : HYDRAULIQUE
OPTION : RESSOURCES HYDRAULIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

EN VUE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER
ACADEMIQUE

THEME

**Prévision de la sécheresse par les modèles
stochastiques : application sur le bassin
versant de oued el-ksob**

Réalisé par:

BARKAT oualhi

DJAIDJA ishak

Dirigé par :

Mr . SALIM DJERBOUAI

Année universitaire : 2019/2020

Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement à dieu tout puissant pour la
Volonté, la santé et la patience, qu'il nous a données durant les années
D'étude afin que nous puissions arriver à ce stade.

Au terme de ce travail, je tiens à remercier tout d'abord le Docteur **salim djerbouai**

Qui nous encadré tout au long de ce travail en nous

Faisant bénéficiaire de ses connaissances scientifiques et de ses conseils.

On lui exprime nous a profonde gratitude pour l'aide qu'il nous a fournie

Durant la réalisation de ce travail, qu'il trouve ici l'expression de notre

Profond respect et de nous sincère reconnaissance.

Ainsi que ceux qui ont contribué de façon directe ou indirecte à la réalisation de ce
mémoire et qui n'ont pas été cités on leurs exprime nos sincères reconnaissances.

Dédicace

Nous dédions cette thèse de master à:

*Nous remercions nos chers parents
pour leurs efforts fructueux et nous remercions nos
chères mères qui ont tout sacrifié pour nous.*

*Ainsi que des frères et sœurs qui nous
ont aidés spirituellement*

*Et à tous nos amis qui nous ont
apporté beaucoup de soutien moral et spirituel
durant ce travail*

ISHAK et OUALHI

SOMMAIRE

	page
Introduction générale.....	01
Synthèse bibliographique.....	04
Chapitre I: Généralité Sur La Sécheresse	
I -1- INTRODUCTION.....	08
I -2-Définition générale de la sécheresse.....	08
I -3-Type de sécheresse.....	10
I -4-Pluie efficace et recharge du réseau hydrologique.....	12
I -5-La circulation souterraine de l'eau.....	13
I -6-Un exemple historique de sécheresse.....	13
I -7-Les conséquences des sécheresses.....	16
I -7-1-Les principales conséquences de la sécheresse.....	16
I -8-PRESENTATION DES BASSINS VERSANTS EN ALGERIE.....	18
I -8-1- CHANGEMENTS CLIMATIQUES ATTENDUS SUR L'ALGERIE.....	19
I -8-2- Caractéristiques des précipitations.....	20
I -8-3- Tendances climatiques.....	21
I -8-4-CYCLE DE L'EAU EN ALGERIE.....	22
I -8-5-SITUATION DES RESSOURCES EN EAU EN ALGERIE.....	23
I -9-CONCLUSION.....	24
Chapitre II ; Présentation de la zone étude	
II-1- Introduction.....	26
II-2-le hodna occidental et sa place dans le Maghreb central - Géographie et histoire.....	26
II-3-présentation de la zone el hodna.....	28
II -3-1-Le cadre montagneux : un accès difficile.....	29
II-3-2- Un écoulement endoréique.....	29
II-3-3 Les limites des influences méditerranéennes.....	30
II-3-4- Les stations hydrométriques anciennes.....	31
II-3-5- Les stations hydrométriques issues du réseau récent.....	32
II-3-6- Estimations des écoulements sur les cours d'eau du bassin.....	33

II-3-7-Originalité des cours d'eau du Hodna : les crues.....	35
II-3-8-Conséquences néfastes des crues.....	36
II-3-9 Des ressources souterraines à exploiter.....	37
II-3-10- Perspectives d'aménagement des ressources en eau.....	38
II -4-Localisation et situation de la zone d'étude	39
II -5-Conclusion.....	40
Chapitre III Indicateurs de sécheresse	
III-1- Introduction.....	42
III -2-Indicateurs de sécheresse.....	42
III -2-1-indices météorologiques.....	43
a)Rapport à la normal.....	43
b) Indice standardisé de précipitation (SPI).....	43
c) Indice PDSI (Palmer Drought Severity Index).....	44
d) Indice CMI (Crop Moisture Index).....	46
e) Indice SWSI (Surface Water Supply Index).....	46
f) Déciles.....	47
III -2-2-Indicateurs de sécheresse à partir des données de télédétection.....	48
a)Indices basés sur la Réflection.....	48
i) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).....	48
ii) Végétation Condition Index (VCI, Kogan, 2003 [7]).....	49
iii) Standardized Vegetation Index (SVI, Liu & Negron Juarez, 2001).....	50
b) Indices basés sur la Température de brillance.....	51
i) Temperature Condition Index (TCI, Kogan, 1995).....	51
c) Indices basés sur la combinaison de la réflexion et la température de brillance.....	51
i) Vegetation and Temperature Condition Index (VHI, Kogan, 1997, 2000).....	51
III -3-Conclusion.....	52
Chapitre IV : Prévion de la sècheresse parles modèles stochastiques	
IV.1 Définitions : Série temporelle et processus stochastique	54
IV.2 Composantes des séries temporelles	54
IV.3 Caractéristique d'une série temporelle.....	55
IV.4 Généralités et notations.....	57
IV.5 Introduction à la stationnarité.....	58

IV.6 Modélisation des séries chronologiques	59
IV.6.1 Théorème de Wold.....	59
IV.6.2 Topologie des modèles ARMA.....	59
IV.6.2.1 Processus autorégressif d'ordre p AR(p).....	59
IV.6.2.2 Processus moyenne mobile d'ordre q MA(q).....	60
IV.6.2.3 Processus autorégressif moyenne mobile d'ordre (p,q) ARMA(p,q)	61
IV.6.2.4 Processus autorégressif moyenne mobile intégré d'ordre ARIMA (p, d,q)	61
IV.6.2.5 Processus autorégressif moyenne mobile intégré saisonnier	61
IV.6.3 Méthodologie de Box - Jenkins.....	63
IV.6.3.1 Principales étapes de la méthode.....	63
IV.7 Développement des modèles stochastiques pour la prévision de la sécheresse.....	
Conclusion générale.....	77
Références Bibliographique.....	79
Annexe.....	80

Liste des Tableaux

Chapitre I

Tableau I-01 : Paramètres statistiques des totaux annuels.....	22
--	----

Chapitre II

Tableau II-01 : Résultats des observations aux stations hydrométriques.....	33
Tableau II 02 : Disponibilité théorique en eau de surface dans le Hodna en année moyenne.....	34
Tableau II-03 : Quelques exemples de crues exceptionnelles mesurées aux stations de contrôle dans le Hodna.....	36
Tableau II-04 : Analyse des données sur le transport des sédiments.....	37
Tableau II-05 : Répartition spatiale des débits exploitables des eaux souterraines du Hodna....	38

Chapitre III

Tableau III-01 : Différents types d'indicateurs de sécheresse.....	42
Tableau III-02 : Classification de SVI (McKee, 1993)	44
<i>Tableau III-03 : Classification d' PDSI²</i> <i>45</i>	
Tableau III-04 : Classification pour les Déciles (Maher (1967)).....	48
Tableau III-05: Classifications pour le SVI.....	50
Tableau III-06 : Classification pour VHI.....	52

Chapitre IV

Tableau IV.1 Résultats d'estimation des modèles stochastiques pour le SPI-3.....	69
Tableau IV.2 Autocorrélation et auto corrélation partielle des résidus du meilleur modèle	72
TableauIV.3 Résultats de prévision par les modèles ARMA.....	73

Liste des Figure

Chapitre I

FIG I-01 : Rivières asséchées en Somalie.....	09
FIG I- 02 : Méditerranée (Albergel, 1987).....	10
FIG I-03 : Canicule et sécheresse au jardin - (sleepyneko / flickr.com).....	11
FIG I-04 : La Loire à Orléans, en période de sécheresse (étiage) - (Joël Aubry / flickr.com)....	12
FIG I- 05 : La Moisson Pierre Bruegel l'ancien 1565, huile sur bois, 119x419, Institut de l'Art canadien.....	14
FIG I- 06 : Philip Lodewijk Jacob Frederik Sadée (1837-1904), La récolte de pommes de terre (Potato digging) 1875, Whitworth Art Gallery, University of Manchester, huile sur bois, 28.4 x 59.1 cm.....	16
FIG I- 07 : Les basins versants en Algérie.....	18
FIG I- 08 : Etages bioclimatiques algériens Source : 4 ^{ème} communication nationale de l'Algérie au titre de la CCNUCC.....	19
FIG I- 09 : Tendances des moyennes annuelles des températures minimales et maximales Journalières.....	21

Chapitre II

FIG II 01 : SITUATION GEOGRAPHIQUE DU CHOTT ELHODNA	27
FIG II-02 : Les grands ensembles du relief.....	29
FIG II-03 : Carte pluviométrique du Hodna.....	31
FIG II-04 : L'Oued Ksob : un bassin-versant tellien.....	32
FIG II-05 : Localisation et situation de la zone d'étude.....	40

Chapitre IV

Fig. IV.1 Fenetre principale du pprogramme SPI Generator	67
Figure IV.2 Série développée de l'ndice SPI	68
Figure IV.3 Répartition de la base de données pour la construction des modèles ARIMA.....	68
Figure IV.4 Auto corrélation et Auto corrélation partielle de série SPI-3.....	69
Figure IV.5 SPI observé en fonction du SPI calculé.....	75
Figure IV.6Prévision de l'SPI par le modèle ARMA.....	75

Introduction générale

Introduction générale :

L'optique d'un éventuel changement climatique fait aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches scientifiques. Le changement climatique est un défi global qui exige une réponse mondiale. Il est maintenant largement reconnu que le climat de la terre change comme en témoigne la décennie 1990, la plus chaude depuis dix siècles (GIEC, 2008). Le réchauffement climatique et ses variations régionales vont avoir un certain nombre de conséquences physiques sur l'environnement. Plusieurs de ces conséquences concernent le cycle des eaux, océans, glaciers, nuages et pluies. Cependant toutes les régions ne seront pas touchées de la même manière par les changements climatiques. Mais qu'en est-il des incidences de l'évolution du climat sur les régions du bassin méditerranéen ?

Du fait qu'elle soit située dans le Sud du bassin méditerranéen, l'Algérie reste une région touchée par ces changements climatiques et catastrophes naturelles. Cependant les résultats des études effectuées par Djellouli et Daget, (1993) ont montré que depuis 1881, l'Algérie a subi deux périodes de sécheresse : la pénurie a été ressentie de 1943 à 1948 qui avait une répercussion importante sur la récolte et le bétail, et la deuxième est celle que nous subissons depuis 1980. Durant les décennies 1980, 1990 le déficit pluviométrique a été estimé à 50 % pour les régions du Centre et de l'Ouest de l'Algérie, à l'Est ; il était de 30 % et l'année 1988-1989 a été classée comme année sèche pour l'Algérie (Khetab et al, 2002). Cette sécheresse a été suivie par de nombreuses inondations qui ont été marquées sur tout le territoire algérien.

Dans ce contexte, le bassin versant de HODNA représente un réseau hydrographique très développé, Le drainage très dense s'effectue par une multitude de torrents plus ou moins long. De ce fait, La prédiction de la sécheresse est une nécessité pour anticiper ce que pourraient être les conséquences des changements climatiques futurs dans cette région et tenter de s'y adapter le mieux possible.

Actuellement la détection et la surveillance des conditions de sécheresse sont essentiellement basées sur certains indices. Les indices les plus couramment utilisés pour la surveillance de la sécheresse sont l'indice de sécheresse de Palmer (PDI) (Palmer, 1965) et l'indice de Précipitations Standardisé SPI (McKee et al., 1993) et l'indice hydrométrique 'SDI'. Par ailleurs, divers outils et méthodes pour la prévision des indices de la sécheresse ont été proposés et testés dans différentes régions au cours des dernières décennies. Les modèles statistiques ont été utilisés depuis plus de 50 ans pour la prédiction de la sécheresse, citons

Introduction générale

l'étude de Gabriel & Neumann, 1962 par la chaîne de Markov et de (Torrain, 1976) par la régression.

Dans cette étude, on se propose d'étudier et caractériser la sécheresse du sous bassin versant de hodna, en se basant sur l'indice standardisé de précipitation (SPI). Pour se faire, on a procédé comme suit : Tout d'abord, on parle du changement climatique (causes et conséquences), la définition de quelques notions climatiques, la sécheresse généralement et en Algérie précisément, sont brièvement expliqués dans le chapitre I. Ensuite une représentation de la zone d'étude (bassin de Hodna) dans le chapitre II. Le chapitre III comporte une étude sur l'ajustement et l'homogénéité des séries pluviométriques, également sur l'indices de la sécheresse SPI et un modèle de son calcul, pour qu'on puisse discuter les résultats obtenus .le travail sera achevé par une conclusion générale.

De ce fait, la question à laquelle cette étude pourrait répondre une ou plusieurs réponses est : Quel est l'état de la sécheresse en Algérie, tout en visant la région du Hodna.

Synthèse bibliographique

Introduction :

Dans cet axe, nous traitons la plupart des applications qui ont été utilisées dans la prévision de sécheresse, afin d'en tirer profit dans la réalisation de ce travail.

Modèles stochastiques :

Les modèles basés sur les séries temporelles ont été communément utilisés dans plusieurs domaines scientifiques tel que l'hydrologie, cependant leurs applications pour la prévision de la sécheresse étaient limitées. Deux classes de modèles stochastique sont généralement utilisés (Box et al., 1994) qui seront discutés en détail dans la chapitre IV.

Les modèles, Autorégressif moyenne mobile intégré ARIMA, qui considèrent une corrélation linéaire séquentielle entre les observations, et les modèles Autorégressif moyenne mobile intégré saisonniers (SARIMA), représentent généralement des séries marquées par une saisonnalité.

Les séries temporelles d'un paramètre quantifiant la sécheresse peut être utilisées pour la prévision de la sécheresse en se basant sur les observations passées.

Rao and Padmanabhan (1984) ont utilisé l'indice de sécheresse annuel et mensuel de Palmer (PDI) comme un paramètre quantifiant la sécheresse et ils ont utilisé des modèles stochastiques pour la prévision et la simulation des série de (PDI).

Mishra et Desai (2005) ont développé un modèle linéaire stochastique (ARIMA et SARIMA) pour la prévision de la sécheresse dans le bassin du fleuve Kans bâti en Inde en utilisant des série de l'indice de précipitation standardisé (SPI) en tant que paramètre quantifiant la sécheresse, une approche similaire a été également utilisée récemment en Turquie (Durdu, 2010). Ces études ont montrées que ces modèles peuvent être utilisés pour prévoir la sécheresse pour un pas de prévision maximale de deux mois.

En utilisant l'indice Végétation Température Condition Index (VTCI) comme un paramètre quantifiant la sécheresse, Han et al. (2010) ont utilisé un modèle ARIMA pour prévoir la sécheresse dans la plaine de Guanzhong en Chine.

Djrbouai et Souag (2016) ont développé un modèle ARIMA pour la prévision de la sécheresse dans bassin versant de l'Algérois.

Réseaux de neurones artificiels (ANN) :

Un réseau de neurones peut être considéré comme un modèle mathématique de traitement réparti, composé de plusieurs éléments de calcul non linéaire (neurones), opérant en parallèle et connectés entre eux par des poids.

Les réseaux de neurones connaissent depuis quelques années un succès croissant dans Divers domaines des sciences de l'ingénieur, celui l'hydrologie n'échappe pas à cette règle.

Les applications des réseaux de neurones dans la prévision de la sécheresse sont citées ci-dessous :

Mishra and Desai (2006) ont comparé les modèles stochastiques linéaires (ARIMA et SARIMA) avec les ANN pour la prévision de la sécheresse. Dans cette étude l'indice de précipitation standardisé (SPI) a été utilisé comme variable quantifiant la sécheresse dans le bassin versant Kansabatien Inde. En analysant les résultats de cette étude on peut observer que les résultats obtenus par les ANN sont légèrement améliorés par rapport à ceux des modèles stochastiques.

Morid et al. (2007) ont utilisé les ANN pour la prévision de la sécheresse dans la région de Tehran, Iran. Deux indices de sécheresse ont été utilisés dans cette étude : Effective Drought Index (EDI) et l'indice de précipitation standardisé (SPI). Les meilleurs modèles ont donné un coefficient de détermination variant entre 0.66 et 0.79 pour un pas de prévision de 6 mois.

Marj and Meijerink (2011) ont proposé un modèle ANN pour la prévision de la sécheresse agricole dans le bassin Ahar-chay dans le Nord-Ouest de l'Iran. Les indices climatiques Southern Oscillation Index (SOI) and North Atlantic Oscillation (NAO) ont été utilisés comme variables d'entrée du modèle pour prévoir le NDVI Normalisé différence végétation index qui est basé sur les données satellitaires. Les résultats ont montré que durant la période (mai, juin et juillet) le NDVI peut être prévu en utilisant (SOI) et (NAO) de la même période de l'année précédente avec un coefficient de détermination de 0.79.

Modèles hybrides :

Caractérisées par une grande complexité, dynamisme et de non-stationnarités, les prévisions hydrologiques ont toujours constituées un véritable défi pour les hydrologues, connaissant l'importance de ces prévisions dans la gestion des ressources en eaux et de l'environnement.

Récemment, le développement des modèles hydrologique s'est remarquablement amélioré par la combinaison d'un prétraitement avec une technique d'intelligences artificielles.

Les modèles hybrides : ondelettes-réseaux de neurones (WANN) sont parmi les modèles les plus performants dans la simulation et la prévision des processus hydrologique.

Depuis son développement en 1984, la transformation en ondelettes a attirée beaucoup d'attention (Grassmann et Morlet, 1984). Cette technique permet d'améliorer la qualité de prévisions en capturant l'information par la décomposition de la série des données à différents niveaux de résolution.

L'applicabilité de ces modèles hybrides a été démontrée par Kim et Valdès (2003) dans la sécheresse en utilisant le PDSI comme indice de sécheresse dans le bassin Conchos en Mexique. Les résultats ont indiqué que la combinaison ondelettes-réseaux de neurones a considérablement amélioré les performances des réseaux de neurones.

Belayneh et Adamowski, (2012) ont comparé trois modèles pour la prévision de sécheresse Les modèles ANN, les modèles SVR (support Vector régression) et les modèles ondelettes réseaux de neurones artificiels. Les résultats de prévision ont indiqué que les modèles hybrides (WANN) sont les meilleurs pour la prévision de la sècheresse.

Belayneh et al. (2014) ont comparé cinq modèles pour la prévision de la sécheresse à long terme : les modèles stochastiques (ARIMA), les réseaux de neurones artificiels (ANN), les modèles SVR (support vector régression) en plus de ces trois modèles, la transformation en ondelettes a été utilisée pour le prétraitement des entrées des modèles SVR et ANN pour former les modèles hybrides WSVR WANN. Ces cinq modèles ont été testés sur la prévision de la sécheresse en utilisant le SPI pour quantifier la sécheresse dans le bassin Awash en Ethiopie. Les modèles hybrides WANN ont donné les meilleurs résultats de prévision.

Conclusion :

Grâce à cet axe, nous avons découvert les types d'applications les plus importants appliqués dans l'étude de la prévision de la sécheresse, ce qui nous aidera à choisir la bonne avec laquelle travailler.

Chapitre I:

Généralité Sur La Sécheresse

I -1- INTRODUCTION

Le terme sécheresse est beaucoup échangé de nos jours et dans tous les domaines car c'est un terme qui indique la rareté de l'eau et est un phénomène naturel qui menace de nombreuses régions du globe dans cet axe. Nous discuterons du concept général de sécheresse et de ses différents types et discuterons de sa présence en Algérie en général et dans la région des couvées en particulier et qu'après avoir Une brève histoire à propos de la sécheresse

I -2-Définition générale de la sécheresse

Un phénomène extrême résulte de ses changements climatiques qu'est la Sécheresse, un phénomène qui se reproduit plus fréquemment ces dernières années et qui provoque des conséquences aussi désastreuses qu'une inondation. La sécheresse peut être définie comme un état d'aridité provoqué par des précipitations plus faibles que la normale pendant une période prolongée. Elle commence par une diminution du taux humidité du sol, puis des réserves de surface et de la nappe phréatique. En période de sécheresse, la croissance des plantes ralentit, et il faut restreindre la consommation, à des fins domestiques, municipales, agricoles et industrielles, des réserves de surface et de la nappe phréatique. Une sécheresse perturbe momentanément l'écosystème et favorise la propagation de certains insectes nuisibles et de maladies chez les végétaux et les animaux (Ait Mouhoub, 1998). Selon l'Organisation Météorologique Mondial, la sécheresse est définie comme étant « un déficit de pluviosité par rapport à une moyenne établie sur une longue durée, affectant de grandes surfaces pendant une ou plusieurs saisons ou années, et qui réduit notablement la production primaire des écosystèmes naturels et l'agriculture pluviale » (Organisation Météorologique Mondiale, 2009) Plusieurs études ont été menées par des chercheurs et scientifiques pour analyser ce phénomène et connaître les paramètres qui influent sur la sécheresse.



FIG I-01 : Rivières asséchées en Somalie

De plus, la sécheresse est un phénomène complexe et mal compris. Elle affecte cumulativement l'être humain et son environnement. Pour un Hydrologue, la sécheresse peut être considérée comme étant le facteur principal qui cause la réduction des approvisionnements en eau, y compris l'écoulement superficiel, ou/et les approvisionnements d'eaux souterraines. En résumé, la sécheresse est une situation de déficit en eau suffisante pour avoir un effet inverse sur la végétation, les animaux et l'homme. Naturellement, le risque sécheresse peut affecter d'abord l'agriculture et l'élevage. Il peut avoir aussi des conséquences sur les consommations urbaines et industrielles dès lors que les ressources mobilisables pour ces consommations deviennent insuffisantes ou doivent être rationnées. La sécheresse conduit alors à une pénurie conjoncturelle Au-delà des difficultés sémantiques, il s'agit là d'un phénomène redoutable, peut-être le plus grave dans les affrontements homme - nature, et désormais au premier rang des préoccupations en matière de risques, notamment en



FIG I- 02 : Méditerranée (Albergel, 1987).

I -3-Type de sécheresse

Les différents types de sécheresse

Il existe différents types de sécheresses. Absence de pluie ne signifie pas forcément sécheresse des sols, et des réserves d'eau souterraine importantes n'empêchent pas aux plantes d'avoir soif en été lorsqu'il ne pleut pas.

a- La sécheresse météorologique

La sécheresse météorologique est celle qui est la plus facile à constater, et c'est celle que tout le monde connaît : elle survient lorsqu'il ne pleut pas durant une longue période. Cette sécheresse météorologique est relative : le déficit hydrique se mesure par rapport aux valeurs normales des précipitations. Ainsi, une absence de pluie durant 3 semaines ne sera pas forcément synonyme de sécheresse en zone méditerranéenne, alors que l'équivalent en Bretagne, si.

La sécheresse météorologique, évidente en été, peut passer inaperçu en hiver, car la végétation au repos n'est pas affectée. Elle n'est cependant pas sans conséquence, y compris en hiver, car elle ne permet pas le rechargement des nappes phréatiques.

b- La sécheresse agricole ou sécheresse des sols

La sécheresse des sols est un déficit hydrique superficiel, sur 1 à 2 mètres de profondeur. Ce type de sécheresse est lié à l'absence de pluies mais aussi à la végétation : en hiver, lorsque la végétation est au repos, un manque de pluie n'entraîne pas forcément une sécheresse du sol, puisque les racines n'absorbent que très peu d'eau. En revanche, au printemps ou en été, lorsque la végétation est active et puise l'eau du sol pour la rejeter dans l'atmosphère par évapotranspiration, le sol s'assèche plus rapidement.



FIG I-03 : Canicule et sécheresse au jardin - (sleepyneko / flickr.com)

c- La sécheresse hydrologique

On parle de sécheresse hydrologique lorsque les nappes phréatiques, les lacs, les rivières et les fleuves présentent un niveau bas. Ce type de sécheresse peut intervenir sous l'effet de plusieurs facteurs : pas de précipitations et/ou une absence d'infiltration en profondeur dans le sol jusqu'aux nappes phréatiques, soit parce que l'eau de pluie ruisselle au lieu d'être absorbée par le sol (sol

imperméable, sol compacté...), soit parce que l'eau est captée par la végétation avant d'atteindre le sous-sol.

C'est lorsque la sécheresse hydrologique est constatée (et non la sécheresse météorologique) que les usages de l'eau peuvent être limités par arrêté préfectoral (interdiction de remplir les piscines, d'arroser, de nettoyer les véhicules, etc.).



FIG I-04 : La Loire à Orléans, en période de sécheresse (étiage) - (Joël Aubry / flickr.com)

I -4-Pluie efficace et recharge du réseau hydrologique

Une pluie n'est dite efficace que si l'eau atteint les cours d'eau (ruissellement) et les nappes phréatiques (infiltration en profondeur une fois que le sol superficiel est saturé d'eau).

C'est en hiver que les pluies permettent de recharger les nappes phréatiques, car la végétation au repos n'absorbe pas l'eau. En revanche, au printemps et en été, l'eau de pluie est captée par les racines et immédiatement consommée et évapo-transpirée par les plantes : cette eau n'atteint pas les nappes phréatiques. Un printemps pluvieux ne permet donc pas de compenser un hiver sec, et le niveau des nappes phréatiques et des cours d'eau restera anormalement bas (on parle d'étiage), ce qui

pourra poser problème si l'été qui suit est sec. La succession d'hivers secs et d'étés secs génère un risque d'étiage et de pénurie d'eau.

Le phénomène de réchauffement climatique accentue la sécheresse car des températures plus élevées entraînent une plus forte évaporation de l'eau en été.

I -5-La circulation souterraine de l'eau

Dans le sous-sol, l'eau n'est pas immobile : les nappes phréatiques ne sont pas des réservoirs inertes ou clos. L'eau se déplace d'une nappe à l'autre, de manière à peu près horizontale, pour aller alimenter les lacs et les sources puis les cours d'eau, les rivières, les fleuves. La vitesse de déplacement de l'eau souterraine est relativement faible (elle doit se frayer un passage à travers des roches), ce qui explique qu'il faut un certain temps après une période pluvieuse pour que le niveau des lacs et des cours d'eau remonte.

I -6-Un exemple historique de sécheresse

Suite à la remarquable période de sécheresse que nous avons connu ces derniers mois, le Dr. Gaston Démarrée, anciennement chef du service hydrologique de l'IRM et fêret d'histoire de la météorologie, a recherché dans les plus anciennes archives disponibles les périodes de sécheresse persistantes qui ont touché la Belgique et ses pays voisins, entre les XVIème et XIXème siècles. Le Dr. Gaston Démarrée est également l'auteur de [l'historique de l'IRM](#) visible sur notre site web.

Voici la compilation des événements qu'il a pu retrouver (en ancien français dans le texte !)

“La saison de l'est de ceste année [1540] fut si chaude que plusieurs fontaines perdirent leur source et aulcunrivièrs leur coure ; il convenait aux Hesbignons amener leurs besets comme brebis, vaches et moutons en la rivière de Meuse; les grains furent cueilliez et vendaingefaicte avant le fin des moyes d'aouts.” (Belau, Chroniques liégeoises, 1913, p. 405)

“L'on a vendangé le lendemain de la St-Epvre que étoit le 16 septembre [1624], laquelle année a été si chaude, voir être trois et quatre mois sans pleuvir. ” (Lepage, 1853, Nancy, Recherches historiques..., p.55)

“Aussi cet année [1637] est la moisson fort avancée à raison de la grande sécheresse continuée tout le mois de May, de Juin, car l'on a commencé à couper les grains au mois de Juin et estoyent les durs grains ici presque tous informés devant la faste Ste Marie Magd., comme l'an passé encor fut la moisson avancée, car les orges hibernales étayent meures aucuns au mois de May, ce qui est notable.” (Van Wintershoven, Chronique tirée des registres paroissiaux d'Emael, 1904, p60)

“En mai 1672, la sécheresse avait tant baissé les eaux de l’Ys sel et du Rhin, que ce dernier était guéable sur un bras en plusieurs endroits, ce qui en permit le passage à l’armée de Louis XIV le 5 juin suivant.” (Fuster, 1845, ... sécheresses dans le Nord)

“L’ester [1684] attesté chaud et sec ; les sécheresses et sérénité de l’air ayant continués très longtemps, il y at. eu abondance de grains et de bon vin. (Chronique de Sébastien de Blanchart, 1898, Luxembourg)

“L’année 1691 fut d’une sécheresse tout-à-fait anormale. Depuis le mois de juin jusqu’au 31 décembre, la pluie ne tomba à Huy que deux fois, et encore pour une heure tout au plus. La récolte des vignobles fut exceptionnelle ; et le vin, de très bonne qualité. Par contre, les grains ne répondirent nullement à l’attente des cultivateurs.” (Frison, Huy, 1898, p. 197)

“La présente année [1701] qui fut la première du siècle fut assez remarquable ; l’été fut fort sec, il ni j eut point de pluies pendant trois ou quatre mois, les bleds furent abondons, excepté en cette paroisse, quoique c’était la grande couture.” (Mauss, Le Cartulaire de l’église de Torgny, p. 63)



FIG I- 05 : La Moisson Pierre Bruegel l'ancien 1565, huile sur bois, 119x419, Institut de l'Art canadien.

“Il y eut, en 1743, une très grande sécheresse et le 30 juin, on ordonna des prières publiques et on refit une procession avec le chef de St Lambert, mais cette fois pour obtenir de l’eau.” (Falise, Bulletin de la Société Royale le Vieux-Liège, 1938, p. 346)

“L’année 1772, depuis le mois d’Avril jusqu’à la fin du mois d’Octobre, amena un tems sec, qui n’était que très rarement interrompu par quelque pluie abondante.” (Lambert, Suite de l’Essai d’Hygrométrie, p.71)

“La sécheresse de 1781 régna au printemps et en été : sa durée fut de plus de six mois ; elle succéda immédiatement à une tempête furieuse qui eut lieu le 27 février, et elle persista, sauf quelques courtes pluies, jusqu’au milieu du mois de septembre. Cette sécheresse, accompagnée de chaleur, rendit l’année très-précoce et très fertile. Il ne tomba que 367 millimètres d’eau au lieu de 530 millimètres, et le nombre des jours pluvieux, ne s’éleva à Paris et dans les régions du Nord, qu’à 91 au lieu de 150.” (Fuster, 1845, ... sécheresses dans le Nord, p.331)

“Du 21 juin de l’an que dessus [1791], il y a eu une sécheresse qui a duré près de trois mois et Demy, il n’y a point eu de petit foin dans la plus grande partie de la paroisse, nyû raves nyû autres légumes, du vin en petite quantité dans les endroits sablonneux, mais fort cher, il s’en est vendu à 3 livres 35 l’année le vieux, 40 ou 45 livres l’année suivant sa qualité; les autres denrées ont été médiocres; a peine peut-on trouver es truffes rouges pour 5 à 6 livres le bricheton.” (<http://geneactinsolites.free.fr/secheresse%201782.htm#1762>)

“L’été de 1800 a été remarquable par la sécheresse opiniâtre qui a duré 52 jours, ce qui est sans exemple.” (Gand, manuscrit Schamp, BR Bruxelles, Ms. 2768, p. 22)

“Nous ne devons pas oublier la grande sécheresse de 1825. Des observations très-précises en font connaître le degré. Elle commença au mois de novembre 1824, et se prolongea, sans discontinuer, jusqu’au mois d’octobre 1825. On l’a signalée du midi au nord et de l’est à l’ouest, notamment à Paris, à Metz, à Rouen, à Strasbourg, à Nantes, à Berzé-la-Ville, à Tarbes, à Joyeuse, à Orange, à Marseille. Le nombre des jours pluvieux et la quantité des pluies se sont montrés partout plus faibles qu’à l’ordinaire ; partout aussi, spécialement à Paris, à Chalons, à Bordeaux, à Nevers, à Arles, l’abaissement des fleuves avait atteint ou dépassé le terme de l’étiage.” (Fuster, 1845, ... sécheresses générales, p. 327-328)



FIG I- 06 : Philip Lodewijk Jacob Frederik Sadée (1837-1904), La récolte de pommes de Terre (Potato digging) 1875, Whitworth Art Gallery, University of Manchester, Huila sure bois, 28.4 x 59.1 cm.

I -7- Les conséquences des sécheresses

"Bien que prévisible, la sécheresse est la catastrophe naturelle la plus coûteuse et la plus meurtrière de notre époque. La décision d'en atténuer les effets relève en dernier ressort du pouvoir politique. Il appartient aux gouvernements de tous les pays exposés à ce fléau d'élaborer et de mettre en œuvre, en les adaptant au contexte national, des politiques de lutte contre la sécheresse axées sur les alertes précoces, la prévention et la gestion des risques", a fait valoir le Secrétaire exécutif de la CNULCD, Luc Gnacadja. "Le coût des interventions a posteriori est bien plus élevé que celui de la gestion des risques et des mesures d'anticipation. Aussi faut-il agir sans attendre les prochaines sécheresses et leur cortège de famines et de décès." a-t-il ajouté.

I -7-1- Les principales conséquences de la sécheresse

1-Sur la population : la santé des enfants et des personnes âgées est très fragile et sensibles aux fortes chaleurs car ils n'ont pas le réflexe, ni l'envie de boire pour lutter contre leur déshydratation qui peut tuer ;

2-sur la faune : de même que pour la population, un manque d'eau affecte les poissons vivant dans l'eau, mais aussi les animaux qui s'abreuvent aux points d'eau ;

3-sur les forêts : la sécheresse va rendre les arbres plus secs et déshydratés ce qui peut causer leur mort. De plus, une végétation très sèche sera propice aux **départs de feux** ;

4-sur l'agriculture : l'irrigation des cultures (tel que le blé en France) est affectée par la sécheresse car les réserves d'eau sont faibles ;

5-sur les sols : en automne, les sols asséchés, qui ont pourtant besoin de se recharger en eau, ne vont plus pouvoir absorber les précipitations, créant des inondations et glissement de terrain ;

6-sur les réserves d'eau potable : l'alimentation et l'évacuation des eaux ménagères ne se font pas correctement, car le niveau des rivières, des fleuves et des nappes est très bas. Dans certaines zones rurales, l'eau est rationnée ou coupée ;

7-sur la production d'électricité : l'eau est utilisée pour refroidir certaines centrales nucléaires, elles sont donc mises à l'arrêt pendant les sécheresses et périodes de canicule alors que **la demande en électricité augmente** : climatisation, ventilateur, réfrigérateur qui nécessitent beaucoup d'électricité.

Les conséquences de la sécheresse peuvent perdurer longtemps après le retour des pluies : denrées alimentaires rares et chères, ressources en eau peu abondantes, sols érodés et bétail affaibli, sans parler des conflits juridiques et sociaux qui peuvent persister des années durant. Les sécheresses sont souvent suivies d'inondations de grande ampleur qui surprennent les populations au moment où elles sont les plus vulnérables, entraînant un surcroît de souffrances.

Enfin, la sécheresse assèche les sols et altère le bon développement de la faune et de la flore. Ainsi, les incendies sont souvent nombreux en période de sécheresse, et vont émettre des gaz nocifs qui vont polluer l'atmosphère et accentuer l'effet de serre. Avec le changement climatique planétaire, les phénomènes de sécheresse sont de plus en plus récurrents, il est donc important de savoir comment gérer les réserves dans ce cas et surtout, comment s'adapter à un climat qui change extrêmement vite.

Notes

1. Période de 15 jours consécutifs, pendant laquelle la précipitation enregistré est inférieure ou égale à 0,25 mm/jour.
2. Phénomène climatique impliquant une pluviométrie faible ou une disponibilité rare de l'eau naturelle disponible.
3. Quantité d'eau évacuée dans l'atmosphère par l'évaporation des sols et la transpiration (évaporation d'eau au niveau des feuilles) des plantes.
4. Formation géologique ou une roche suffisamment poreuse et/ou fissurée pouvant stocker de l'eau et qui est perméable afin que l'eau circule librement eau dont la teneur en sel est sensiblement inférieure à celle de l'eau de mer.

I -8-PRESENTATION DES BASSINS VERSANTS EN ALGERIE

Afin d'atteindre notre objectif, la connaissance des différents bassins constitués l'Algérie est indispensable étant donné que la pénurie saisonnière de l'eau a une incidence considérable sur la distribution de l'eau. L'Algérie est subdivisée en 17 bassins versants qui peuvent être regroupés dans trois catégories (voir la carte ci-dessous) :



Fig- I- 07 : Les bassins versants en Algérie

Le bassin méditerranéen qui concerne les bassins versants Oued Atlas et le littoral Sahélien. L'apport annuel dans ce bassin est estimé à 11 milliards de m³ ;

- Le bassin endoréique regroupe les sous bassins versants de haute plaine où la plus grande partie de ces eaux sont évaporés et l'apport annuel sur ce bassin ne dépasse pas 700 millions de m³.

- Le bassin saharien qui représente les oueds qui drainent les sous bassins du sud Atlas, les sud de Mont Ksour et Ghir. L'apport annuel sur ces bassins est estimé à 650 millions de m³.

I-8-1- CHANGEMENTS CLIMATIQUES ATTENDUS SUR L'ALGERIE

L'Algérie est située au sud de la méditerranée, entre 18° et 38° de latitude Nord et 9° et 12° de longitude. Ce grand territoire se divise en quatre grandes zones bioclimatique : i) l'humide ; ii) le subhumide, iii) le semi-aride et iv) l'aride/Saharien

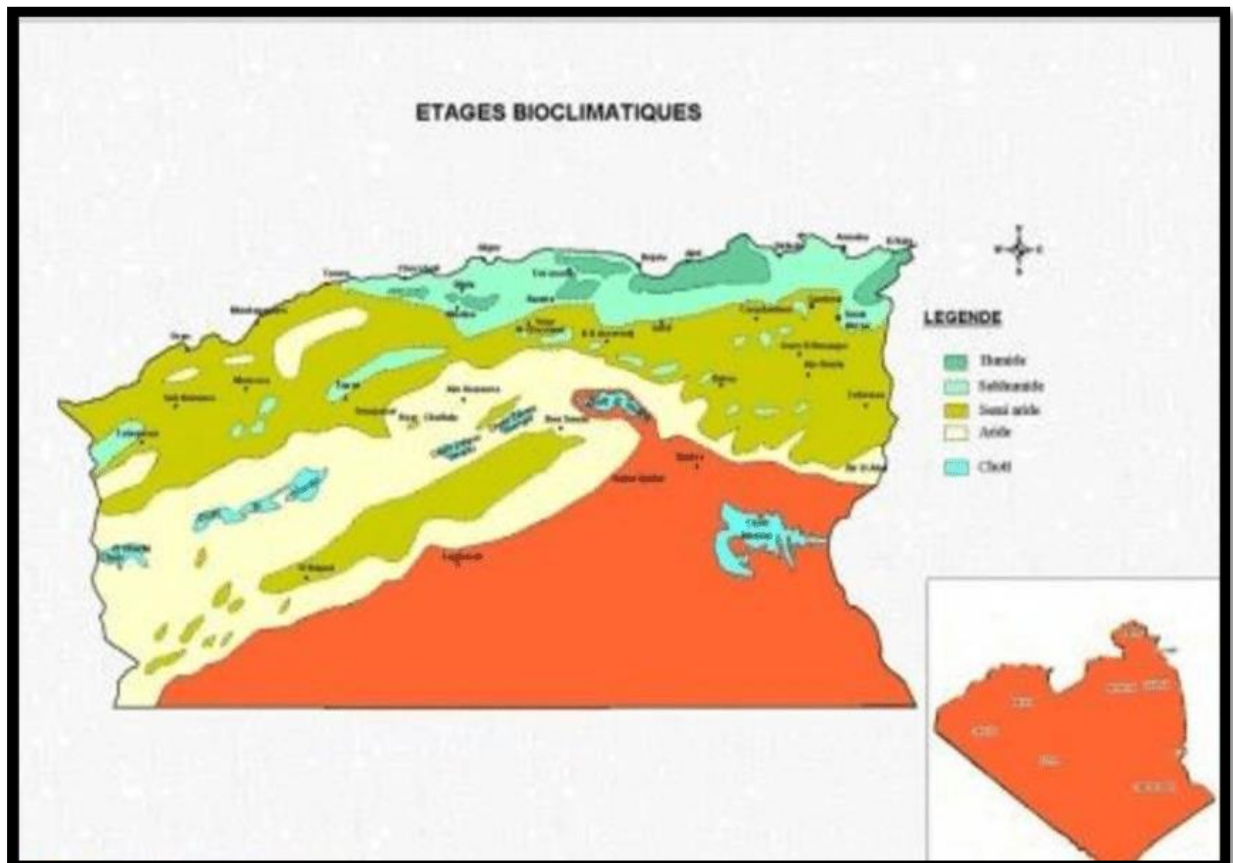


Fig I- 08 : Etages bioclimatiques algériens Source : 4 ème communication nationale de l'Algérie au titre de la CCNUCC

Les quatre étages bioclimatiques (figure 3) de l'Algérie se distinguent par :

1. Les étages humide et subhumide : Localisés essentiellement sur la côte et dans l'Atlas Tellien, Ils sont caractérisés par des hivers pluvieux et doux, et des étés chauds et secs. Les précipitations diminuent d'Est en Ouest (1000 - 400 mm) et du Nord au Sud. Les températures moyennes minimales et maximales oscillent respectivement entre 5° et 15°C en hiver et de 25° à 35°C en été. Les vents humides venant de la mer apportent des pluies, de l'automne au printemps. Ces pluies sont

plus abondantes à l'Est qu'à l'Ouest. Cependant, l'influence du désert se fait sentir à travers l'action du «sirocco», (vent sec et chaud, soufflant du Sud au Nord).

2. L'étage semi-aride : localisé sur les Hautes Plaines et dans l'Atlas Saharien, il est caractérisé par des précipitations faibles et irrégulières, de 200 à 400 mm par an. Les pluies sont rares, surtout sur les Hautes Plaines Oranaise. En hiver la température peut descendre au-dessous de 0 °C en revanche, en été elle dépasse 30, voire même 40 °C

3. L'étage aride/Saharien : Localisé dans la région saharienne, il est caractérisé par des pluies rares et très irrégulières provoquant souvent des inondations. Les précipitations sont inférieures à 150 mm par an. Le Sahara est l'une des régions les plus chaudes du monde : les températures de jour peuvent atteindre en été 45 et même 50 °C.

I-8-2- Caractéristiques des précipitations

Etant un pays essentiellement aride, la pluviométrie en Algérie revêt une importance particulière. En fait, elle définit dans une large mesure les étages bioclimatiques de l'Algérie. Elle se caractérise par :

Une forte variabilité avec des précipitations variant de plus 1000 mm/an le long des hauts reliefs côtiers de l'Est et du Nord, à moins de 100 mm/au Sud au Sahara

Deux saisons pluvieuses, l'une dominante en hiver, l'autre secondaire au Printemps ou l'Automne des précipitations à forte variabilité à l'échelle journalière, annuelle et interannuelle une précipitation estivale très faible.

La variation spatiale des précipitations est caractérisée par un fort gradient allant du Nord au Sud et un second, de moindre importance, allant de l'Est à l'Ouest. Ainsi, les principaux traits des précipitations se résument comme suit :

le long du littoral, les précipitations varie de 400 (Oranais) à 900 mm en allant de l'Ouest vers l'Est ;

L'atlas tellien se caractérise par des précipitations comprises entre 600 et 1000 mm/an. En revanche, les précipitations de l'Atlas saharien sont moins importantes, elles varient entre 150 et 400 mm/an ;

Les précipitations du Sahara sont faibles et disparates, ne dépassant guère les 150, voire 200 mm/an

I -8-3- Tendances climatiques

Une étude (Z. Noirceur, et al. 2013) basée sur six stations du réseau d'observation de l'Office National de Météorologie (ONM), relative à la période 1970-2012 et utilisant la méthode graphique chronologique de traitement de l'information (MGCTI), a permis de déceler les tendances climatiques suivantes (Figure 5 et 6)

Une tendance nette à la hausse des températures dès le début des années quatre-vingt : L'amorçage de ces changements s'est fait dès l'année 1984 pour les températures minimales et à partir de 1987 pour les températures maximales,

Un retour à une pluviométrie normale sur la dernière décennie suite à une forte sécheresse durant la période 1987-2002,

Ce retour à une pluviométrie normale sur la dernière décennie s'est accompagné d'une fréquence plus accrue d'épisodes pluvieux

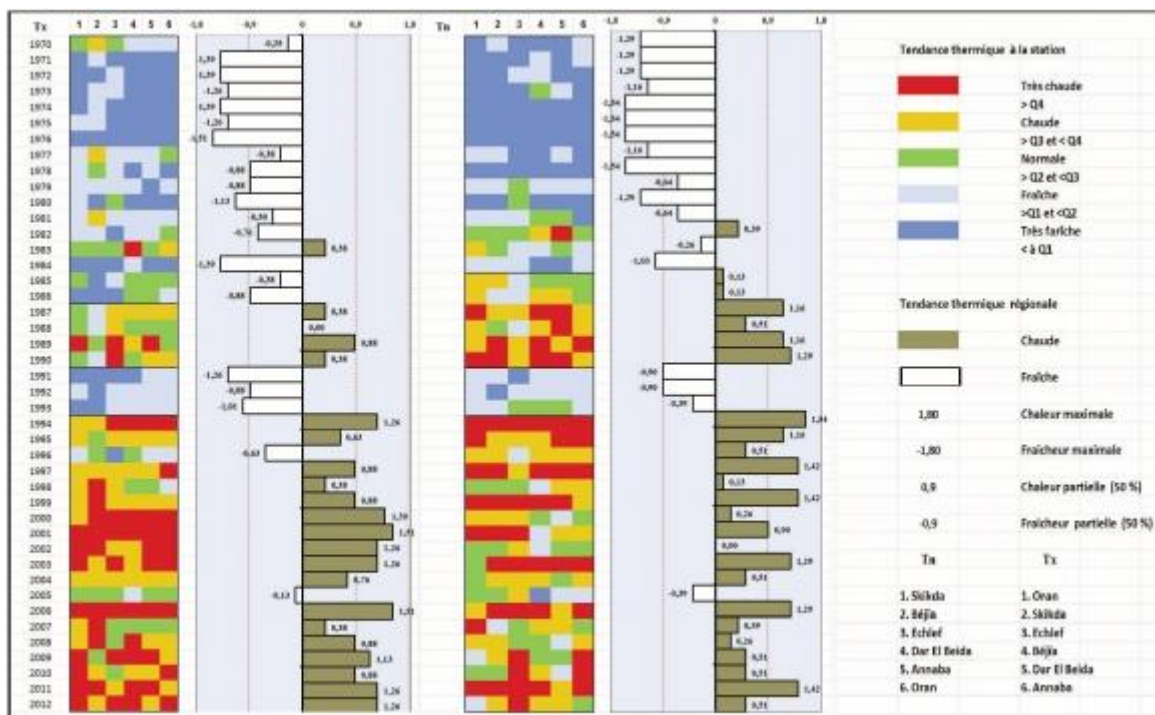


Fig I- 09 : Tendances des moyennes annuelles des températures minimales et maximales journalières

Ces tendances sont confirmées par la 2ème Communication Nationale de l'Algérie au titre de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), qui mentionne :

Une hausse de la température moyenne minimale et maximale enregistrée sur l'ensemble des stations de l'Algérie du Nord depuis les années soixante-dix et qui continue jusqu'à nos jours ;

Les impacts des Ccs ont provoqué une sécheresse endémique depuis 1975, engendrant une désertification avec une dégradation de plus de 8 % de la forêt et une érosion éolienne et hydrique des sols ;

Une tendance à la sécheresse observée durant les 30 dernières années.

I-8-4-CYCLE DE L'EAU EN ALGERIE

Pour déterminer les relations étroites entre les problèmes de fourniture d'eau douce et les problèmes de changement naturel du climat, et pour répondre aux questions posées; il faut disposer de longues séries de quantité d'eau recueillies en un nombre aussi grand que possible de stations d'observations afin de voir si les phénomènes détectés se manifestent sur l'ensemble du territoire avec la même ampleurs en phase ou non. Pour cet effet, nous avons pris en considération quelques régions du littoral Algérien qui appartiennent au bassin 04 à l'Ouest, au bassin 02 au Centre et au bassin 03 à l'Est représentées dans huit séries de totaux pluviométriques annuels et mensuels couvrant 48 années d'observations (1954-2001).

Plusieurs méthodes de critique et de traitement statistiques sont utilisées afin de garantir la qualité des données, et ainsi déterminer les meilleurs tests représentatifs pour étudier les séries pluviométriques (Ait Mouhoub, 1998). Une approche est développée, en utilisant la simulation, qui nous permet de prendre en considération la population.

Après le comblement des lacunes, nous pouvons vérifier s'il y a des anomalies à détecter dans les observations, et ainsi appliquer les tests statistiques à savoir les tests d'indépendance et d'homogénéité et de stationnarité (Aivazian et al. 1983). Le calcul de la moyenne et de l'écart type des séries de données pluviométriques annuelles indique que les faibles quantités de pluies enregistrées sont au niveau des stations de l'Ouest (avec 351mm à Ghazaouet). Les régions les plus favorisées se trouvent à l'Est et au Centre (le maximum observé est à El Kala avec 759mm), comme l'indique le Tableau II.

Tableau I-01 : Paramètres statistiques des totaux annuels.

Station	Gha	Ora	Arz	Alg	Chl	Ski	Ann	Elk
Moyenne (mm)	351	366	371	674	620	749	630	759
Ecart Type (mm)	125	113	108	197	140	178	152	159
Variance (%)	36	31	29	29	23	24	24	28

Les résultats des valeurs annuelles mettent en évidence une faible corrélation entre les stations de l'Est et de l'Ouest et d'une part une forte liaison entre les stations appartenant à la même région.

Les résultats des valeurs annuelles pour la période d'étude montre que la sécheresse météorologique (due à la diminution des précipitations) est bien apparente dans les années 80 où une longue période de phénomène de sécheresse est observée.

Deux périodes se font distinguer : une période humide (1954–2001) et une période sèche (1987-2001). Nous intégrons la simulation qui permet d'apporter une scénarii d'informations possibles pour étudier le phénomène qui peut se produire dans le futur, et que dont les caractéristiques sont conformes aux séries observées. Pour cet effet, nous avons pris en considération deux variantes différentes:

- Variante 1 : Simulation par le modèle jack nife (canif suisse) ;
- Variante 2 : Simulation par le modèle booster basé sur des données historiques.

I-8-5-SITUATION DES RESSOURCES EN EAU EN ALGERIE

L'absence de pluies pendant la saison d'automne 2001 et en parité de la saison d'hiver 2002, a rendu la situation de l'approvisionnement en eau potable est particulièrement critique dans les régions Centre, et celle de l'Ouest, et moins ressenti à l'Est du pays.

Evaluation des ressources en eau superficielles

Les ressources en eau sont généralement faibles et surtout extrêmement irrégulière, leur exploitation devient de plus en plus difficile dans notre pays. Leurs répartition sur le territoire est inégale ; et aussi elles sont exposées à des risques de pollution de plus en plus importants, qui compromettent l'utilisation des ces eaux dans de nombreuses régions du pays.

Sur l'ensemble de territoire national, il y a seulement 49 barrages en exploitation totalisant actuellement seulement une capacité de 4,48 milliards de m³ pour l'alimentation en eau potable.

Il y a les trois barrages qui alimentent la capitale Alger en l'occurrence le barrage de Keddara, Hamiz et de Béni-Amrane, sont entrés dans ce qu'on appelle « la tranche morte » avec un volume stocké en fin janvier 2002 d'environ 8,8 millions de m³, soit une baisse jamais atteinte depuis sa mise en service. La même situation s'est présentée pour les barrages de Hamiz avec un volume de 1,91 million de m³ et celui de Béni-Amrane, qui est un barrage de transfert vers Keddara avec un volume de 1,18 millions de m³. Les barrages du centre de pays s'avèrent plus touchés par la baisse sensible des eaux contrairement à l'Ouest.

Evaluation des ressources en eau souterraines

Les eaux souterraines sont généralement faible et localisées dans le Sahara, les lits d'oueds alimentent quelques nappes phréatiques souvent saumâtres: Ghir, M'zeb, Saoura, etc., sinon des nappes profonde, semi - fossiles ou fossiles comme Albien. Au nord, les précipitations sont irrégulière, mal distribuées géographiquement, elles croisent d'Ouest en Est et affectent successivement les monts de Tlemcen, le versant nord de l'Oursenis, le massif de la grande kabyle, la petite Kabylie, le nord constantinois et enfin le massif des Aurès. On note la présence des nappes phréatiques dans les rares plaines littorales et un nombre relativement élevé de points d'eau disséminés à travers territoire.

Selon une étude effectuée sur la potentialité des ressources souterraine (Ghachi, 1986), l'exploitation intensive par les camps de captage groupés dans le nord sont localisées dans deux types d'aquifères principaux : la nappe de Chott Chergui et Tolga. L'exploitation des ces ressources se fait par le creusement des sondages, des puits et des forages. Il y a environ 3976 forages répartis à l'échelle nationale.

Une étude de reconnaissance des forages demande de déterminer leurs natures, épaisseurs, et aussi leurs extensions à partir des connaissances géologiques et hydrodynamiques, y compris la vérification de la qualité des eaux. Mais, il existe des sondages aléatoires distingués par des « fonçage illicite » qui risque d'altérer gravement les ressources d'eau en mettant en péril dans l'avenir de la source d'alimentation en eau potable le cas de la nappe phréatique de Ghriss (Kabylie) qui a enregistré des rabattement non négligeable, où la source de Ain Fekan considérée comme trop-plein de cette nappe à la hauteur de 500 l/s en 1970 s'est complètement tarée.

I -9-CONCLUSION

Les sécheresses existent depuis l'Antiquité et se poursuivent à ce jour - et l'Algérie a souffert ces dernières années de ce phénomène - donc ce phénomène doit être étudié en fonction des données des années passées.

Dans cette étude nous avons choisi l'indice de précipitation standardisé (spi pour ses avantages cité précédemment).

Chapitre II

Présentation de la zone étude

II-1- Introduction :

Préalable et indispensable à toute étude efficace, la connaissance du milieu naturel du bassin doit s'acquérir dans de multiples domaines. Dans cette partie nous présentons la situation géographique, le réseau hydrographique du bassin versant de « Honda », nous analyserons les paramètres climatologiques, l'objectif est de nous permet de mener à bien notre travail.

II-2-le Hodna occidental et sa place dans le Maghreb central - Géographie et histoire-

On a coutume de soutenir l'idée selon laquelle le Hodna (Ḥudna) est une région déprimée des hautes plaines de l'Algérie, au pied des monts des Ouennougha (Wānnûgha), du Hodna et du Belezma, et ouverte vers le sud-est sur la région pré-saharienne du Zâb de Biskra. Le grand Hodna s'étend sur près de 8 600 km² et comprend surtout les ensembles suivants : les collines du Jarr au nord et à l'est, de vastes plaines alluviales partiellement inondées par les crues des oueds descendus des zones montagneuses, une grande *sebkha* de quelques 760 km² et, au sud, une région sablonneuse appelé le Rmel. Le pays est en règle générale très chaud en été et très sec (150 à 300 mm. de pluie annuelle) et il constitue une véritable steppe pré-désertique privée de la culture de l'alfa. Ce grand territoire est assez riche en eau grâce aux sources calcaires, aux crues importantes mais très irrégulières des oueds, notamment ceux de Barika, Bitham, Ksob, Lehm, Magra et Selman ainsi qu'aux nappes en partie artésiennes du sous-sol.

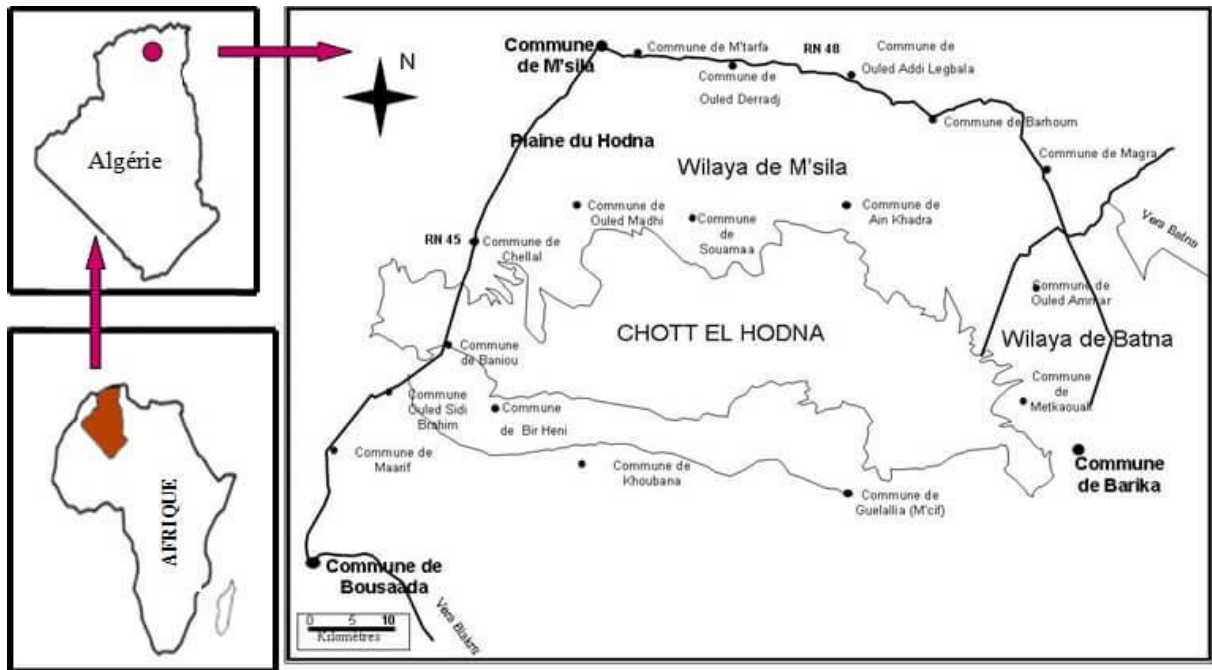


FIG II 01 : SITUATION GEOGRAPHIQUE DU CHOTT ELHODNA.

Les monts de l'Aurès, du Belezma, du Hodna et des Ouennougha constituent un arc de cercle formant ainsi une limite géographique d'une remarquable précision du point de vue physique comme du point de vue des opportunités économiques, entre les régions méditerranéennes du Tell et les plaines désertiques des Ziban et du Hodna. Il est tout à fait extraordinaire que cet arc montagneux n'ait pas servi de limite humaine ou politico-administrative qu'il semblait, à première vue, imposer. Il est admis que les populations des montagnes ont souvent étendu leur domaine économique sur la bordure des plaines et c'est ainsi que les massifs montagneux ont plutôt joué un rôle de refuge aux tribus vaincues ou refoulées des piémonts. Le mode de vie nomade a souvent envahi les hautes plaines du Tell qui ont servi de pâturages d'été aux pasteurs des steppes et du désert. À l'inverse la vie sédentaire semble être descendue tout au long des cours d'eau originaires du Tell et autour des sources en bordure du pays nomade. La frontière politique qui était généralement utilisée pour couper l'Algérie en deux blocs précis, séparant une Algérie dite orientale, soumise aux influences de Carthage, de Kairouan ou de Tunis, et une Algérie occidentale dépendante des capitales et des dynasties du Maghreb occidental (*al-Maghreb al-aqṣā*) ou de Tlemcen, n'a jamais emboîté le pas à la limite climatique, orographique et économique que la nature et le relief paraissaient imposer aux hommes. Elle est en fait toujours passée à l'ouest et au sud du Hodna comme des Ziban, rattachant donc ces deux régions à l'Ifriqiya (Desbois, 1942 : 214-218). Malgré tout ce qui vient

d'être dit, signalons que les auteurs arabes du Moyen Âge ont parfois mentionné le nom de la zone, au détour d'une notice, et il suffit de donner par exemple le cas d'Ibn Khaldûn qui évoque le Hodna et ses espaces de la manière suivante : « région d'al-Muṣna / al-Ḥuḍna » (nâḥiyat al-Muṣna [sic]) ; les sites de N'gaous, Magra et M'sila formaient le Hodna (bi-l-Ḥuṣna (Ḥuḍna) Wa-hiya Niqâwus wa-Maqqara wa-l-Masîla) ; Magra, N'gaous et M'sila comme villages du Hodna (wa-qurâ l-Ḥuṣna (Ḥuḍna) : Maqqara wa-Niqâwus wa-l-Msila) (Ibn Khaldûn, 2000-2001 : IV, 35, 46, 588). En outre indiquons au sujet de cette région que Mohamed Talbi avait bien souligné le fait que le Hodna, en tant que voie de communication, était également inclus dans le réseau des routes commerciales de l'Ifriqiya jusqu'à Sijilmâsa, voire à la « croisée des grandes routes maghrébines du passé » selon l'expression heureuse de Mostefa Lacheraf (Talbi, 1968 : 261, 262, 264 ; Lacheraf, 2003 : 13-16).

Zone d'influence, marche ou région frontière, pendant plus d'un millénaire, aire de passage entre les hautes steppes algéro-marocaines et les hautes plaines de l'Ifriqiya, entre le Sahara oriental et les marches du Tell, zone de nomadisme traversée par les hommes et les animaux, et habitée aussi par des populations en grande partie pastorales, le Hodna a connu, depuis l'Antiquité, et surtout depuis le Ve/xie siècle, un intense mouvement de va-et-vient de groupes humains divers et variés (Modéran, 2003 : 541-561 ; Mattingly et Hitchner, 1995 : 171-174). Après la chute de Rome, le Hodna connaît des conditions historiques nouvelles : deux périodes de troubles causées par des invasions vandales (Ve siècle) et par des conquêtes arabes (viie-VIIIe siècle) alternent avec deux moments de redressement dus aux Byzantins (vie-viie siècle) d'une part et aux diverses dynasties musulmanes installées en Ifriqiya d'autre part. Malgré cela, le Hodna, comme les Ziban ailleurs, continue de jouer un rôle de région frontière, ou au moins de marche militaire, administrative et économique face aux steppes et aux déserts échappant à un quelconque contrôle politique (Idris, 1962 : II, 482-486, 491 ; Forstner, 1979 : 54, 61, 66, 96, 98, 102, 172, 185, 188, 197 ; Dachraoui, 1981 : 94, 152, 194, 199, 211, 240, 271, 347-349, 353, 368, 378, 381)

II-3-présentation de la zone el Hodna

El Hodna : une région frontière. D'une superficie de 26 000 km², le bassin-versant du Hodna marque la transition entre le domaine tellien au nord et le Sahara au sud

Le passage entre ces deux domaines, marqué par une succession d'ensembles montagneux (le Tell au nord, l'Atlas Saharien au sud) et de plaines, favorise la diversité des milieux bioclimatiques. Cela influe fortement sur l'activité socio-économique de ces régions.

II -3-1-Le cadre montagneux : un accès difficile.

Le bassin du Hodna est souvent cité comme un territoire dont l'accès est difficile, notamment par le nord. Au nord du bassin, l'écran montagneux formé par la chaîne du Hodna et des monts du Titteri forme en effet une véritable barrière



Fig- II-02 : Les grands ensembles du relief

1. Au pied de cet obstacle, la plaine du bassin-versant est l'unité la plus vaste. Entre les massifs montagneux et la plaine centrale, le piedmont est constitué par de vastes glacis d'érosion parsemés de chebkas (ravins).

II-3-2- Un écoulement endoréique.

La disposition des reliefs montagneux du nord et du sud organisent le bassin versant du Hodna autour d'une cuvette fermée, située à 400 m d'altitude, et qui reçoit l'écoulement des eaux superficielles et souterraines de cette région. Au fond de la cuvette, le Chott El Hodna a une superficie de 1 150 km².

Les oueds provenant des régions telliennes (nord) sont à l'origine de la richesse du Hodna. Le plus important est l'Oued Ksob. Il se distingue par sa longueur (environ 200 km), la superficie de son bassin-versant (1 480 km² dont 1 330 dans le domaine tellien) et surtout par un écoulement qui se maintient même en période estivale. L'Oued Barika est plus "hodnéen" : seules ses parties supérieures qui traversent les régions telliennes ont un écoulement permanent. Les Oueds Berhoun, Enfida,

Soubella et Nakbar doivent leur débit relativement régulier à de nombreuses sources situées au pied des reliefs.

Au nord-ouest, l'Oued El Leham a un bassin-versant de 5 460 km². Il s'étend sur le Djerr (piedmont) et la plaine du Hodna. Son écoulement est irrégulier.

Au sud, l'oued Bou Saada ne coule qu'une partie de l'année. Il est alimenté par des sources qui sourdent des grès albiens à 7 km en amont de la ville de Bou Saada. L'oued M'siif, tronçon inférieur de l'immense oued Melah a un écoulement rarement continu de bout en bout de son cours. Des sources

Naissent dans son lit même et alimentent l'écoulement. Mais les prélèvements faits pour l'irrigation affectent ce dernier.

II-3-3 Les limites des influences méditerranéennes.

En été, il arrive que des cyclones du front polaire venus de l'Europe de l'ouest pénètrent dans le bassin méditerranéen occidental. Nettement affaiblis, ils sont régénérés par les basses pressions du front des alizés et causent des perturbations de courte durée. Dans le bassin du Hodna, cela se traduit par une rotation brutale des courants aériens, qui soulève ainsi des tempêtes de sables et de poussières et amènent exceptionnellement de petites pluies.

Le début de l'automne voit l'anticyclone des Açores redescendre sensiblement vers le sud. Il ouvre ainsi la voie de la Méditerranée à des perturbations originaires du front polaire.

Localisé sur l'Atlantique Nord. Le temps calme laisse alors la place à une situation variable et quelquefois pluvieuse. Dans le Hodna (à l'instar des Hautes Plaines steppiques de l'Ouest Algérien), ces perturbations n'arrivent pas à pénétrer car une dorsale de hautes pressions prolonge l'anticyclone des Açores : le beau temps calme se maintient.

A partir de fin septembre et jusque début mai, l'Afrique du Nord est sous l'influence du front polaire dont les perturbations arrivent jusqu'en Méditerranée. Toutefois, le Hodna reste en position d'abri derrière l'écran montagneux des reliefs septentrionaux. Cependant, certaines perturbations à Trajectoire submériidieime qui pénètrent dans le Bassin Méditerranéen par le sud-ouest de la France arrivent dans le bassin du Honda. Le temps devient alors nuageux et donne quelques pluies.

De ce fait, et selon la classification climatique de Gaussen, pratiquement toutes les stations du bassin-versant du Hodna sont de type aride. Ainsi, Barika présente 9 mois secs, M'sila et Bou Saada en comptent 10. Seule la station de Bordj Bou Arreridj dans le haut-bassin de l'Oued Ksob présente un caractère méditerranéen (Fig- II-03)

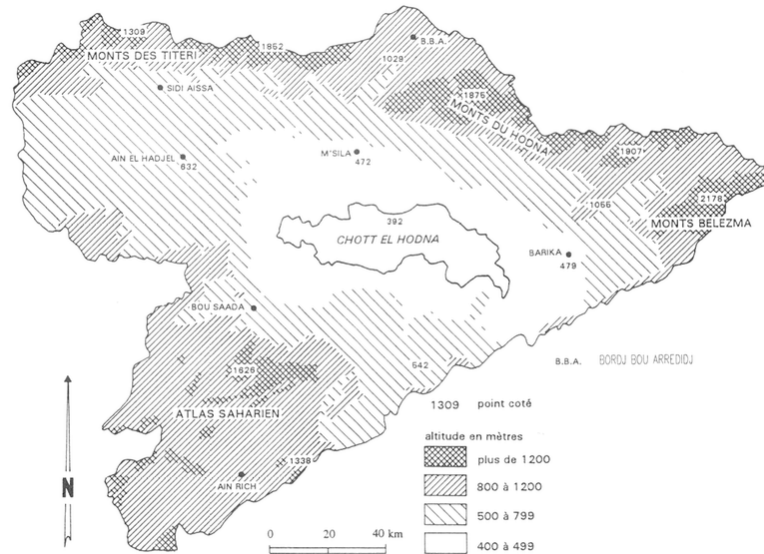


Fig- II-03 : Carte pluviométrique du Hodna

II-3-4- Les stations hydrométriques anciennes.

D'une superficie de 1 480 km² au site du barrage, l'Oued Ksob a un bassin-versant situé essentiellement dans le Tell. Il reçoit ainsi des précipitations appréciables. C'est également le seul oued sur lequel a été construit un barrage-réservoir. Ses principaux affluents lui permettent d'avoir un écoulement permanent mais dont l'importance est faible en dehors des périodes de pluies.



Fig- II-04: L'Oued Ksob : un bassin-versant tellien

Contrairement au Ksob, l'oued El Leham coule principalement sur le piedmont et la plaine du Hodna. Il est contrôlé par trois stations hydrométriques. La première située en amont du site d'Aïn Nessissa contrôle un bassin de 460 km². La seconde est située au lieu-dit Pont de la rocade sud et contrôle un bassin de 5 460 km². Grâce à son impluvium, l'oued El Leham connaît souvent des crues importantes lors de fortes averses. Leurs conséquences sont souvent désastreuses, car constitué essentiellement de matériel meuble, le bassin-versant de l'oued El Leham reste instable.

L'exemple du Pont de la rocade sud est très significatif car celui-ci a été détruit 2 fois en 10 ans. Sa dernière destruction remonte à 1978.

II-3-5- Les stations hydrométriques issues du réseau récent.

Contrairement aux oueds Ksob et El Leham dont les stations ont été créées respectivement en 1943 et 1951, l'agence nationale de la ressource hydraulique (A.N.R.H.) et la F.A.O. ont installé des stations beaucoup plus tardivement sur d'autres cours d'eau du bassin versant du Hodna (fig. 3)

- la station de Moulin Ferrero a été installée par l'A.N.R.H. sur l'oued Bou Saada en 1970. Celle-ci a cessé de fonctionner en 1978. Elle contrôlait un bassin versant de 1 020 km².

- la station de Sidi Ouaddah est située sur l'oued Soulella. Elle a fonctionné de 1973 à 1978 et son bassin-versant est de 176 km².

- située à l'amont de l'oued Ksob, la station de Medjez est implantée à 19 km au nord du barrage. Elle a été installée en 1973 et fonctionne encore à l'heure actuelle. Elle contrôle un bassin versant de 1 330 km².

II-3-6- Estimations des écoulements sur les cours d'eau du bassin :

Les observations hydrométriques sont insuffisantes à l'heure actuelle dans le Hodna (tableau n°1).

Tableau II-01 : Résultats des observations aux stations hydrométriques

Stations	Superficie	Module d'écoulement	Tranche
			d'eau écoulee
Oued El Leham		24,3 - 1,67/L/S/Km ²	
- Aïn Nessissa	460		52,80
- Aïn El Hadjel	2 670	27,99 - 0,33/L/S/Km ²	10,48
- Pont de la rocade Sud	5 460	35,16 - 0,20/L/S/Km ²	06,44
Oued Ksob	1 330	20,84 - 0,497/L/S/Km ²	
- Medjez			15,67
- Ksob Barrage	1 480	46,04 - 0,98/L/S/Km ²	
- Sidi Ouaddah	176	3,80 - 0,685/L/S/Km ²	21,50
Oued Bou Saada	1 020	6,12 - 0,19/L/S/Km ²	06,00
- Moulin Ferrero			
Oued Lougmane	334	6,83 - 0,648/L/S/Km ²	20,45
- Ced Fagues			

Nous les compléteront donc par des estimations calculées à l'aide des formules théoriques: formule de t'ixeront-Berkaloff, mise au point en Tunisie dans des conditions climatiques similaires à celles de notre bassin-versant et formule de Chaumont. Ces résultats sont présentés dans le Tableau II 02

Tableau II 02 : Disponibilité théorique en eau de surface dans le Hodna en année moyenne.

Sous bassin		Superficie	Volume des écoulements	
			annuels moyens en	
			MIL. m3	
Ksob		1 480	46,0(1)	
El Leham		5 460	35,0	(3)
Ced Fagues		334	6,8	(3)
Sidi Ouaddah		176	3,8	(1)
Rh alem-Nakrar		66	1,1	(3)
Moulin Ferrero		1020	6,1	(3)
Barika		1 880	47,0(1)	
M'Cif		4 200	33,6	(2)
Chott El-Hodna		1 150	2,3	(2)
Bou Taleb		1 000	17,6	(1)
Bitham-Berriche		1 000	11,7	(1)
Roumana-Oulthene-Fekharza		1 450	9,3	(1)
Karsa-Targa-Guernini		940	7,5	(2)
M ' Sila Ahmar-	-Rhenia	920	22,1	(1)
Selmane-Hamadou-Berhoum		1 000	23,0	(1)
Merouane-Oued El Ma		220	4,4(2)	
Chott M'Doukal		1 100	2,6	(2)
Maiter-Bourdim		1 780	25,2	(2)
Total		25 176	305,10	

(1) calculé selon la formule de Chaumont

(2) Calculé selon la formule de Tixeront-Berkaloff

(3) Valeurs observées aux stations de contrôle *.

Il est fort intéressant de signaler que "HYDROTECHNIC ENGEENERING " avance dans son rapport sur l'hydraulique de l'Aurès Hodna, le chiffre de 250 millions de m3 pour le Hodna. Lucide, expert à la F.A.O. avance, dans son étude du projet Hodna, le chiffre de 323 millions de m3 en année moyenne.

II-3-7-Originalité des cours d'eau du Hodna : les crues.

Ce qui fait l'originalité du ruissellement des cours d'eau du Hodna, c'est la violence des crues. Bien que celles-ci soient très brèves, elles sont très spectaculaires et parfois même calamiteuses. L'exemple de la crue de l'Oued Ksob du 5 octobre 1935 est très significatif. Au cours

* Les valeurs de ces stations sont sous-estimées car elles correspondent à une période sèche du point de vue climatique.

De celle-ci, on a vu le volume mensuel écoulé atteindre 29 millions de m³ sur un volume annuel de 56 millions de m³. On comprend son caractère désastreux, lorsqu'on sait qu'elle n'a duré que près de 3/4 d'heure. Elle a débuté à 13h pour atteindre son maximum à 13h30 mn avec un débit voisin de 700 m³/s. Ce phénomène est évidemment lié aux fortes pluies qui se sont abattues sur l'ensemble du bassin. En effet, le 5 octobre 1935, il est tombé : 11,5 mm entre 7h et 19h dans la région de Bordj Bou Arreridj et 35 mm entre 12h30 mn et 13h15 mn aux environs de Medjez. Pluies d'amont et d'aval ont ainsi provoqué une crue exceptionnelle.

Le tableau n°4 donne quelques exemples récents de ces crues souvent catastrophiques

Tableau II-03 : Quelques exemples de crues exceptionnelles mesurées aux stations de contrôle dans le Hodna.

Stations	Apport instantané en m ³ /s	Date	
Ain Nessissa	170	octobre 1966	
	178	mai 1955	
	189	mars 1972	
	217	janvier 1971	
	252	Septembre	19 67
	281	décembre 1967	
	313	septembre 1976	
	460	octobre 1955	
Ced Fagues	215	décembre 1971	
	239	mars 1968	
	342	septembre 1967	
	430	octobre 1969	
	450	septembre 1965	
Pont de la rocade sud	282	Janvier	19 72
	315	décembre 1957	

II-3-8-Conséquences néfastes des crues : un débit solide très élevé.

En nous appuyant sur les enregistrements disponibles, nous avons déterminé les moyennes des débits solides en suspension en g/l. Il en ressort des variations considérables suivant les divers oueds (tableau n°4).

En mai et août 1955, il a été enregistré respectivement les valeurs suivantes : 243 g/l et 123 g/l lors de crues exceptionnelles.

Tableau II-04 : Analyse des données sur le transport des sédiments

Oued	Site	Bassin Versant	Débit solide g/1
		Supérieur en	
		Km2	
El Leham	Ain Nessissa	470	3,4
	Ain El Hadjel	2 770	56,0
	Pont de la rocade sud	5 460	8,5
Lougmane	Ced Fagues	352	1,4
Ksob	Barrage	1 317	7,0

II-3-9 Des ressources souterraines à exploiter.

Le bassin versant du Hodna fait partie d'un vaste ensemble géologique et hydrogéologique qui va de l'Atlas Tellien au nord jusqu'au Grand Erg Oriental au sud. Les accidents tectoniques et les reliefs atlasiques font du Hodna un bassin pratiquement fermé vers le nord. Son sous-sol renferme des réserves aquifères considérables ; l'une d'entre elles se prolonge vers le sud jusqu'aux Hamadas. L'aquifère de sub-surface bloqué sous le Néogène continental au pied de l'Atlas Saharien s'étale sur une vaste étendue et remonte à la surface dans le Hodna. Il affleure sur les montagnes de l'Atlas Saharien. L'épaisseur de la formation correspondant à cet aquifère est grossièrement évaluée entre 150 et 180 m.

La deuxième formation qui abrite une nappe est beaucoup plus ancienne. Datant du début du Secondaire, elle est bloquée à des profondeurs parfois supérieures à 1 000 m. Son épaisseur est très importante puisqu'elle atteint probablement 400 m en certains endroits. Nous retrouvons l'affleurement de cet aquifère en surface, très au sud des Hamadas dans la région de Fort Flatters.

Le tableau 5 met en évidence les potentialités en eau du bassin du Hodna, région par région.

Tableau II-05 : Répartition spatiale des débits exploitables des eaux souterraines du Hodna.

Zones	Débits ai 1/s
Zones de M'Sila-Bir Hanate	1 300
Zone d'Aïn Khadra-Djebel Djeddar	700
Zone de Barika	500
Zone de Aïn Diss-Bou Saada	1 000
Zone de Guelalia	500
TOTAL	4 000

II-3-10- Perspectives d'aménagement des ressources en eau.

Mobiliser les ressources en eau de surface en construisant des retenues, éviter les pertes qui se produisent sous forme de crues, tel est l'objectif de toute étude hydrologique. Bien que les valeurs des écoulements que nous avons avancées ne constituent qu'une approche de la réalité du terrain, il n'en demeure pas moins que ces ressources sont loin d'être négligeables. En témoignent les fortes crues que connaissent certains oueds tels que le Ksob ou l'Oued El Leham.

Il est donc nécessaire de rechercher des sites éventuels propres à la construction de barrages réservoirs sur les cours d'eau du nord notamment. L'oued Ksob offre des sites qui correspondent aux normes exigées. Le site de Zeranzia situé à 30 km au nord-est de M'sila possède des appuis composés de calcaire et de marnes dures du Crétacé supérieur. Le calcaire constitue environ 60 % de l'ensemble. Le site de Medjez est situé à environ 2,5 km en amont du barrage actuel du Ksob. A cet endroit, le lit de l'oued fait environ 60 m de large. La roche de fond est surtout composée de calcaires massifs. L'oued Soubella offre à son débouché sur le piedmont et à hauteur de Aïn El Hammam un site favorable à la construction d'un barrage. Les écoulements observés sur cet oued montrent qu'on peut profiter d'une certaine pérennité, même en été, grâce à d'importantes sources qui l'alimentent (figure n°4).

Le Djerr est une zone favorable à la construction de retenues collinaires. Celles-ci compléteraient les barrages réservoirs d'autant mieux qu'elles ont l'avantage de réduire le problème de l'envasement qui se pose de façon grave pour les barrages. Une couverture aérienne au 1/10 000e favoriserait la recherche de sites convenables.

L'exploitation rationnelle des eaux souterraines serait d'un grand intérêt pour la satisfaction des besoins de la région. Estimées à 4 m³/s, ces réserves présentent l'avantage d'être moins exposées aux aléas climatiques que les eaux superficielles. Une période de deux années sèches consécutives altérerait sensiblement les réserves dans les barrages-réservoirs.

II -4-Localisation et situation de la zone d'étude

Le bassin versant de l'oued Ksob situé dans la partie nord de chott el hodna, c'est un sous bassin du grand bassin du Hodna, il est limité au nord et au nord-ouest par la chaîne des bibans ; au sud et au sud-ouest par les monts du hodna et à l'est par les hautes plaines de sétif.

Il est délimité ainsi par les longitudes (4°30'-5°17' EST) et les latitudes (35°45'-36°9' nord).

Le bassin versant de l'oued Ksob présente deux ensembles physiques distincts qui sont les bordures montagneuses, qui entre lesquelles s'étend une vaste plaine, appelée hautes plaines de Bordj-Bou-Argeridj.

Les bordures sont formées au sud par les monts de hodna d'orientation est-ouest est d'altitude relativement élevée (Dj Maadid 1819 m, Dj el Mzaita 1545 m et Dj Kender 1640 m) avec un point culminant de l'ordre 1875 m à Dj chelendj ; cette bordure est découpée en deux compartiments par de l'oued Ksob et au nord par la chaîne de bibane (Dj moutène) d'orientation SW-NE.

Les bordures montagneuses se caractérisent par une structure complexe et charriée ; très écaillée, formée dans des formations secondaires très variées ; tel les calcaires, les grès les schistes, les marnes, les marno-calcaires, les dolomies, et les formations triasiques.

Sur le plan bioclimatique, ces bordures s'inscrivent dans un domaine semi-aride, avec une pluviométrie moyenne annuelle 500 mm ; matérialisée surtout par un couvert végétal dégradé.

La plaine, est d'une altitude voisine de 950 m au moyenne, avec une pente très faible ne dépassant pas 1%. Elle est aménagée dans des formations essentiellement quaternaires.

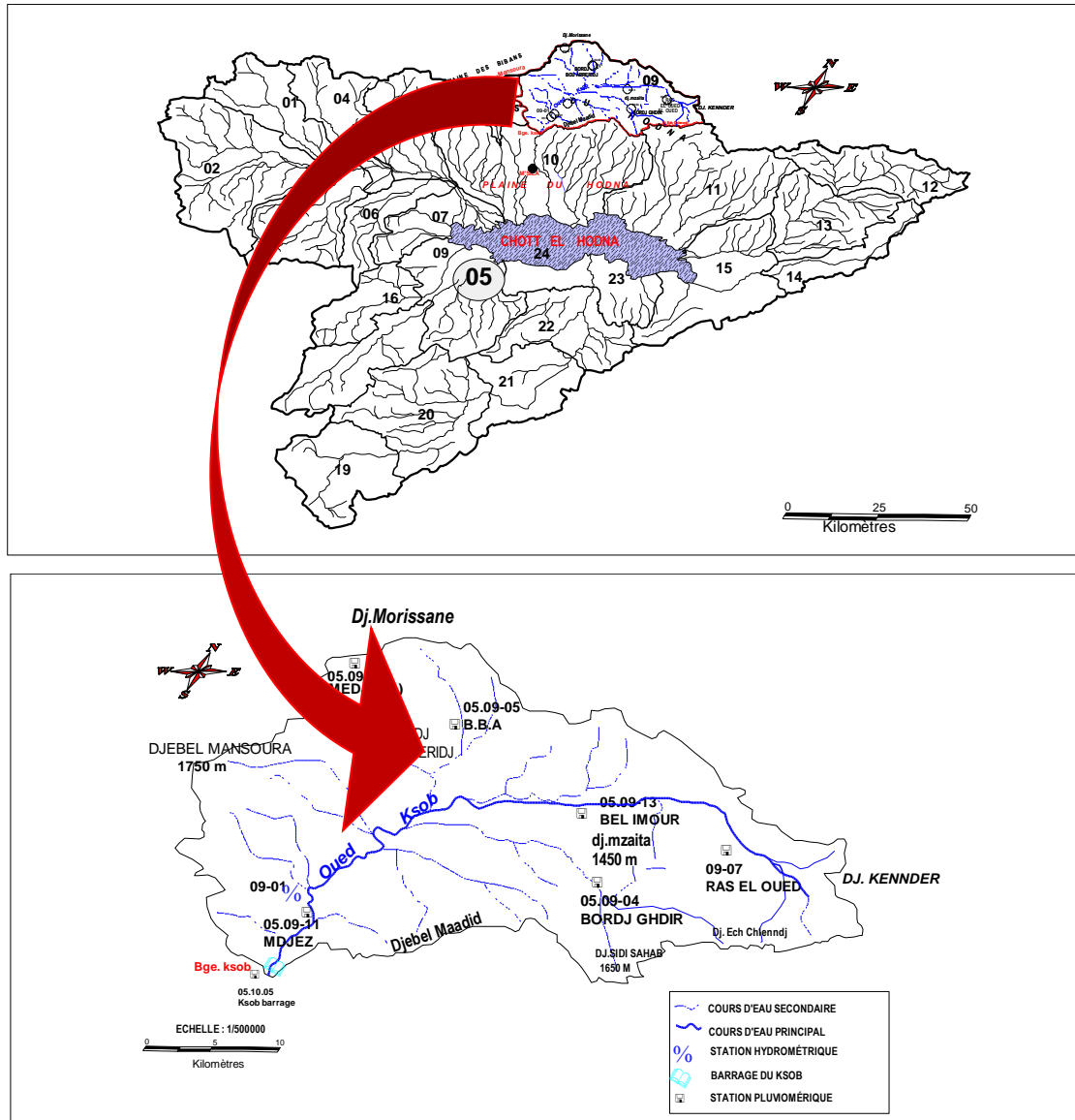


Fig- II-05 : Localisation et situation de la zone d'étude

II -5-Conclusion :

Grâce à notre étude de la situation géographique de la région de Hodna et à l'exploration de certaines informations à son sujet - il s'est avéré être une région riche en ressources en eau, nous avons donc pris la curiosité d'étudier son avenir avec la sécheresse.

Chapitre III

**Indicateurs de
sécheresse**

III-1- Introduction

Afin de mener à bien une étude sur la prévision de la sécheresse, tous les indicateurs de sécheresse doivent être connus et étudiés avec soin afin d'obtenir des résultats précis.

III -2-Indicateurs de sécheresse

La difficulté de définir la sécheresse pousse les chercheurs à définir des indicateurs de ce phénomène. Ces indicateurs permettent de déterminer d'une façon scientifique le seuil indiquant la sécheresse à différentes échelles d'empst et de définir des classes d'appartenance à cet événement en fonction de sa sévérité et de positions. Ils assurent également le suivi de la sécheresse et la détection à différents stades éd. son évolution. Ces indices constituent également un excellent moyen de communication avec le public et un outil de décision pour le gouvernement.

Le tableau suivant montre divers types de ces indices :

Tableau III-01 : Différents types d'indicateurs de sécheresse

Types des indices de sécheresse	indices météorologiques	Indices hydrauliques	Indices Agricoles	Indices socio-Economiques
Indices	<ul style="list-style-type: none"> - SPI (Standardized Precipitation Index). - PDSI (Palmer Drought Severity Index). - CMI (Crop Moisture Index). - SWSI (Surface Water Supply Index). - Deciles. 	<ul style="list-style-type: none"> - - Eaux souterraines niveaux. - - Faible débit caractéristiques. 	<ul style="list-style-type: none"> - Réserve d'humidité - Rendements attendus de les plantes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Des âges courts en l'approvisionnement en eau.

Ci-dessous sont présentés quelques indicateurs météorologiques (basés sur les données de précipitation) et indicateurs établis par télédétection (basés sur l'indice de végétation et la température de brillance).

III -2-1-indices météorologiques

Ces indices utilisent généralement les mesures de précipitation recueillies aux stations météorologiques pour décrire les conditions de sécheresse. Ils ont pour but de comparer les valeurs actuelles à la tendance historique. Ils sont simples, faciles et rapides à utiliser.

a) Rapport à la normal

Le rapport à la normale des précipitations représente le pourcentage de l'écart des précipitations d'une période par rapport à la normale historique de cette période. La normale étant habituellement la moyenne des précipitations totales de la période, calculée à partir d'environ 30 ans de données. Cet indicateur est appliqué à l'échelle locale ou régionale pour des périodes de temps variant de 1 mois à quelques mois, voire même une année.

b) Indice standardisé de précipitation (SPI)

Le SPI a été développé par McKee et al (1993). C'est un indicateur statistique utilisé pour la caractérisation des sécheresses locales ou régionales. Basé sur un historique de précipitation de longue durée, le SPI permet de quantifier l'écart des précipitations d'une période, déficit ou surplus, par rapport aux précipitations moyennes historiques de la période. Cette période varie généralement de 3 mois à 2 ans, selon le type de sécheresse que l'on désire suivre.

$$SPI = \frac{(P - P_m)}{\sigma_p}$$

où :

P	Précipitation totale d'une période (mm)
P _m	Précipitation moyenne historique de la période (mm)
σ _p	Écart-type historique des précipitations de la période (mm)

McKee *et al.* (1993) ⁽¹⁾ ont développé cet indicateur afin de faire ressortir l'impact de la période étudiée (ex. 1, 2, 3 mois) sur les différentes ressources en eau. Comme les réserves souterraines, les réservoirs, les dépôts neigeux ou les cours d'eau ne réagissent pas aux variations pluviométriques avec la même rapidité, période de calcul du SPI fait ressortir l'effet de cette variation sur chacun de ces systèmes hydrologiques. À l'échelle temporelle d'une semaine, par exemple, la réponse du SPI est très variable.

Tableau III-02 : Classification de SVI (McKee, 1993)

Spi valeurs	
2.0 +	Extrêmement humide
1.5 A 1.99	Très humide
1.0 A 1.49	modérément humide
_-0.99 A 0.99	Presque normal
_-1.0 A _1.49	Modérément sec
_-1.5 A _1.99	Très sec
_-2.0 A ET MOINS	Extrêmement sec

McKee *et al.* (1993) utilisent la classification retrouvée au tableau2, afin de définir l'intensité des sécheresses à l'aide du SPI. Selon l'auteur, une sécheresse sévit lorsque le SPI est consécutivement négatif et que sa valeur atteint une intensité de -1 ou moins et se termine lorsque le SPI devient positif. La magnitude de la sécheresse est obtenue en additionnant toutes les valeurs du SPI d'une période sèche¹.

c) Indices PDSI (Palmer Drought Severity Index)

Cet indice mesure la différence d'approvisionnement en humidité pour les phases sèches autant que pour les phases humides. Il est calculé pour des périodes hebdomadaires ou mensuelles afin de caractériser les conditions régionales. Étant donné que ces indicateurs sont normalisés, il est possible de comparer différentes régions.

$$PDSI = X(i) = 0,897X(i-1) + Z(i) / 3$$

où :

$X(i-1)$	PDSI de la période précédente
$Z(i)$	"Moisture Anomaly Index" ou Indice de l'anomalie en humidité
i	Mois de l'année

¹ Pour plus de détail, consulter les sites Internet. <http://drought.unl.edu>, <http://www.wrcc.dri.edu/spi/spi.html>

Et

$$Z(i) = K(P - P_C)$$

Où

K	Facteur de poids (voir Alley, 1984)	
P	Précipitation actuelle (mm)	
P _C	Précipitation CAFEC (mm)	
$P_C = \alpha_j PE + \beta_j PR + \gamma_j PRO - \delta_j PL$		[mm]

Où

CAFEC	“Climatically Appropriate for Existing Conditions” ou approprié pour les conditions climatiques existantes
$\alpha_j, \beta_j, \gamma_j$ et δ_j	Coefficients climatiques mensuels
j	Mois de l’année
PE	Évapotranspiration potentielle (mm)
PR	Recharge du sol potentielle (mm)
PRO	Ruissellement potentiel (mm)
PL	Perte potentielle dans le sol (mm)

Le PDSI utilise, en plus des précipitations et de la température de l’air, l’humidité contenue dans le sol. Toutefois il ne tient pas compte des ressources hydrologiques de surface pouvant influencer les conditions de sécheresse, comme les cours d’eau, les réservoirs, la couverture neigeuse ou le gel du sol. Il ne tient pas compte non plus des changements pouvant survenir dans l’utilisation des ressources en eau.

Tableau III-03 : Classification d’ PDSI²

CLASSIFICATIONS PALMER	
4.0 ou plus	Extrêmement humide
3.0 A 3.99	Tares humide
2.0 A 2.99	Modérément humide
1.0 A 1.99	Légèrement humide
0.5 A 0.99	Début de période humide
0.49 A -0.49	Presque normal

-0.5 A -0.99	Sécheresse naissante
-1.0 A -1.99	Légère sécheresse
-2.0 A -2.99	Modérément sécheresse
-3.0 A -3.99	Sévère sécheresse
-4.0 moins	Extrême sécheresse

d) Indice CMI (Crop Moisture Index)

C'est un indicateur météorologique qui donne le statut de l'humidité disponible par rapport à la demande en humidité. Développé à partir des procédures du PDSI, cet indice définit les sécheresses en fonction de la magnitude et du déficit en évapotranspiration¹.

$$CMI = EAI + WI$$

Où :

(WI) « Wetness Index » :

Recharge du sol (Précipitation) combinée au ruissellement (mm)

(EAI) « Evapotranspiration Anomaly Index » :

$$EAI = 0,67Y_{i-1} + 1,8 \frac{ET - ETc}{\sqrt{\alpha}}$$

Où :

Y_{i-1} CMI de la semaine précédente

ET Évapotranspiration (mm)

ETc Évapotranspiration attendue pour les conditions qui prévalent (mm)

α Coefficient d'évapotranspiration (évapotranspiration réelle/évapotranspiration potentielle)

Cet indice utilise la température moyenne et les précipitations totales hebdomadaires comme intrants, en plus de la valeur du CMI de la semaine précédente pour évaluer les conditions agricoles. Le cumul des CMI des semaines précédentes engendre donc une erreur cumulative dans le calcul du CMI de la semaine.

e) Indices SWSI (Surface Water Supply Index)

¹ D'après Palmer, <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>

Cet indicateur hydrologique, est un complément au PDSI qui incorpore des éléments d'hydrologie et de climatologie.

$$SWSI = \frac{[(a * PN_{sp}) + (b * PN_{pcp}) + (c * PN_{rs}) - 50]}{12}$$

Où :

a, b, c sont les poids associés à chaque composante
 et a+b+c=1
 sp Couverture neigeuse équivalente en eau (mm)
 pcp Précipitation (mm)
 rs Réservoir (mm)
 PN Probabilité de ne pas excéder (%)

Le SWSI est un indicateur normalisé qui permet de comparer différentes régions, généralement pour des périodes mensuelles. C'est un indicateur des conditions hydriques spécialement développé pour les régions où la fonte des neiges est la principale source d'écoulement des eaux superficielles. Il incorpore la couverture neigeuse, les précipitations en montagne, les cours d'eau, le contenu des réservoirs en plus du contenu en eau du sol. Il ne tient toutefois pas compte des écoulements dus à la fonte d'une accumulation antérieure de neige. C'est un indicateur des conditions de surface calibré pour une région homogène et il n'est pas conçu pour de grandes variations topographiques.

Le SWSI est simple à calculer et donne une mesure de l'approvisionnement en eau superficielle. Par contre, un réarrangement des stations amène à refaire les distributions de fréquence de chaque station et un changement dans l'exploitation du bassin signifie le développement d'un nouvel algorithme. Il est donc difficile de maintenir une série temporelle de cet index.

f) Déciles

Cette notion a été développée par Gibbs et Maher (1967) (1 ([16]) pour pallier aux faiblesses du pourcentage à la normale. Cette approche permet de connaître la fréquence d'un événement. Elle divise la distribution des fréquences des événements en 10 parties représentant chacune 10 % de la distribution. Le cinquième décile représente donc la médiane et le dixième décile le volume maximal de précipitation reçu pour une région et pour une période de temps.

Tableau III-04 : Classification pour les Déciles (Maher (1967))

Classification décile	
Déciles 1-2 Le plus bas 20%	Bien en dessous de la normal
Déciles 3-4 Suivant le plus bas 20%	En dessous de la normal
Déciles 5-6 Milieu 20%	Presque normal
Déciles 7-8 Suivant le plus élevé 20%	Dessus de la normal
Déciles 9-10 Le plus élevé 20%	Bien au dessus de la normale

III -2-2-Indicateurs de sécheresse à partir des données de télédétection

Dans le domaine de la télédétection, de nombreux chercheurs ont examiné la possibilité d'évaluer et suivre la sécheresse en utilisant soit la Réflection, soit les données thermiques ou des réponses combinées, provenant du capteur Advanced Very High Résolution Radiomètre (AVHRR) à bord du satellite National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

a) Indices basés sur la Réflexion

Ci-dessous une liste d'indices basés sur la réflexion :

i) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Mis au point par Rouse *et al.* (1973) ([16]), le NDVI est élaboré à partir de la différence entre la réflectance de la végétation fournie par le capteur AVHRR dans le proche infrarouge (canal 2 : 0,73-1,1 μm) et de celle obtenue dans le rouge (canal 1 : 0,55-0,68 μm), divisée par leur somme.

$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - \text{R}) / (\text{PIR} + \text{R})$$

Le résultat d'un NDVI prend la forme d'une nouvelle image, la valeur de chaque pixel étant comprise entre 0 (sol nu) et 1 (couvert végétal maximal). C'est l'analyse de la palette de nuances s'étendant entre ces valeurs extrêmes (très peu fréquentes) qui va renseigner l'observateur sur la densité de couvert et la quantité de biomasse verte.

Cet indice est très utilisé pour le suivi du couvert végétal à cause de la facilité de sa mise en œuvre et surtout de sa corrélation avec la densité du couvert végétal et la capacité des végétaux à absorber la lumière solaire et à la convertir en biomasse. Comme cet indice est normalisé, les effets de l'angle d'illumination et de l'angle de vue sont réduits. La normalisation permet aussi de diminuer l'effet de la dégradation de la calibration des capteurs et de minimiser l'effet de la topographie.

ii) Végétation Condition Index (VCI, Kogan, 2003 [7])

Cet indice utilise comme intrants les valeurs minimales, maximales et courantes du NDVI de la même décennie sur plusieurs années. Il nous renseigne sur les conditions de la végétation pour la décennie étudiée par rapport aux situations extrêmes (Min et Max)

Il est calculé par la formule suivante :

$$\text{VCI}(i) = \frac{\text{NDVI}(i) - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}} * 100$$

Où:

NDVI (i)	NDVI de la période étudié
NDVI _{min}	NDVI minimum de la période étudié
NDVI _{max}	NDVI maximum de la période étudié

Le VCI tente de séparer le signal climatique à court terme du signal écologique à long terme ([7]). Il reflète donc la distribution climatique et non les différences de végétation dues aux différents écosystèmes. Il permet aussi de comparer l'effet du climat sur des aires d'études différentes. Le VCI apporte donc une amélioration dans l'analyse de la condition de la végétation pour des aires non homogènes [7].

Le VCI a été utilisé sur plusieurs continents afin de détecter les situations de sécheresses à grande échelle, mais aussi les conditions d'humidité excessive (Kogan, 1997; 2003; Kogan *et al*, 2004). Ainsi, plusieurs équipes ont exploité le VCI pour suivre les conditions de sécheresse en Afrique du Sud (Kogan, 1998), en Inde (Singh *et al*, 2003) et en Grèce (Domenikiotos *et al*, 2004). Kogan *et al*. (2004) ont aussi utilisé le VCI pour dériver la biomasse des pâturages de Mongolie ou encore le rendement des cultures de maïs en Chine (Kogan *et al*, 2004; Kogan *et al*, 2005) ([1]).

iii) Standardise Végétation Index (SVI, Liu & Negron Juarez, 2001; Peters et al, 2002) ([1]).

Cet indice permet de comparer les conditions de végétation sur des périodes de temps. Il présente la différence entre l'indice de végétation standardisé et la moyenne sur la période étudiée.

Le SVI est donné par:

$$SVI_i = \frac{NDVI(i) - \overline{NDVI}}{\sigma} * 1000$$

Où :

Et

Avec :

$NDVI$	NDVI de la période étudiée
\overline{NDVI}	NDVI Moyenne de la période étudiée
σ	Ecart type
$N(i)$	Degré de liberté

Cet indice est utilisé souvent pour mesurer les effets du climat sur la végétation sur des courtes périodes de temps. La classification faite pour cet indice est la suivant ;

Tableau III-05: Classifications pour le SVI

Classification svi	
0.975 - 1.0	Très bien
0.75 – 0.975	Bien
0.25 – 0.75	Moyenne
0.025 – 0.25	Pauvres
0 - 0.025	Très pauvres

b) Indices basés sur la Température de brillance

i) Temperature Condition Index (TCI, Kogan, 1995)

Cet indicateur est basé sur la température de brillance. Il est applicable à l'échelle régionale ou continentale, de manière instantanée ou pour des périodes allant jusqu'à une année. Le TCI donne aussi une information utile concernant le stress de la végétation dû à une saturation du sol en eau (Kogan, 1997; Kogan *et al*, 2004).

La formule donnée par Kogan est ¹:

$$TCI (i) = \frac{T_B^{Max} - T_B(i)}{T_B^{Max} - T_B^{min}} * 100$$

TB représente la température de brillance dérivée la bande 4 du capteur AVHRR.

La valeur faible de TCI indique une condition climatique difficile (la température élevée) par rapport à la période étudiée, quant aux valeurs élevées, ils reflètent principalement des conditions favorables.

c) Indices basés sur la combinaison de la réflexion et la température de brillance

¹ <http://www.casde.unl.edu/imagery/svi/index.php>

i) Vegetation and Temperature Condition Index (VHI, Kogan, 1997, 2000)

Selon Kogan (1997), le TCI combiné au VCI constitue une source utile d'informations sur le stress causé à la végétation par la sécheresse. C'est aussi un outil utile afin de surveiller presque en temps réel les conditions de la végétation et l'impact du climat sur celle-ci.

Combinés aux données recueillies sur le terrain, ces indices semblent être d'excellents outils pour la surveillance des conditions de sécheresse, plus spécialement en agriculture.

Le VHI est définie par la formule suivante :

$$\text{VHI} = \alpha * \text{VCI} + (1 - \alpha) * \text{TCI}$$

Où α est la contribution relative de VCI et TCI dans le VHI. D'après la plupart des publications, $\alpha = 0.5$, en supposant une même contribution des deux indices et aussi en raison d'absence d'informations plus précises (Kogan, 2000).

Le VHI est utilisé pour différentes applications telles que la détection de la sécheresse, la durée de la sécheresse, le rendement des cultures tela production au cours de la période de végétation (Unganai et Kogan 1998).

Tableau III-06 : Classification pour VHI

classification Vhi	
Sécheresse extrême	0 - 10
Sécheresse sévère	10 - 20
Sécheresse modérer	20 - 30
légère Sécheresse	30 - 40
Pas de Sécheresse	Plus être 40

III -3-Conclusion

Dans cet axe, nous avons abordé la plupart des indicateurs de sécheresse, caractérisés par la diversité et la précision, nous choisirons donc ce qui nous aidera dans notre étude à obtenir les résultats les plus précis.

Chapitre IV : Prévision de la sécheresse par les modèles stochastiques

Introduction

L'analyse d'une série chronologique a pour but la description des principales propriétés du processus générateur de cette dernière. Ceci revient à trouver un modèle mathématique adéquat décrivant le mécanisme ayant donné lieu à cette série temporelle. Le modèle adéquat obtenu sera par la suite utilisé selon les objectifs désirés, tels que la prévision ou le contrôle.

Dans ce chapitre, nous commençons par les généralités, les notions de base sur les séries temporelles ainsi que la présentation de la méthodologie de Box-Jenkins, suivie par une description du développement du modèle de prévision de la sécheresse. Par la suite les résultats et leurs discussions sont présentés.

IV.1 Définitions : Série temporelle et processus aléatoire

Une série temporelle (ou série chronologique) est une suite de nombres réels, indexés par les entiers relatifs tels que le temps. Pour chaque instant du temps, la valeur de la quantité étudiée X_t est appelée variable aléatoire. L'ensemble des valeurs X_t est appelé processus aléatoire : $\{X_t, t \in Z\}$. (Lardic et Mignon, 2002)

Une série temporelle est aussi la réalisation d'un processus aléatoire. La classe des processus aléatoires est très large, l'analyse des séries temporelles a donc été centrée initialement sur une classe particulière de processus : les processus aléatoires stationnaires. Ces processus sont caractérisés par le fait que leurs propriétés statistiques n'évoluent pas au cours du temps.

IV.2 Composantes des séries temporelles

Avant le traitement d'une série chronologique, il convient d'en étudier ses caractéristiques stochastiques (son espérance et sa variance), si elles se trouvent modifiées dans le temps la série est considérée non stationnaire.

L'analyse des séries temporelles des phénomènes hydrologiques permet de distinguer quatre types d'évolution des séries dans le temps appelées « composantes des séries temporelles qui sont :

- a) **Tendance** : représente l'évolution à long terme de la série étudiée : elle traduit le comportement moyen de la série.

- b) **Composante saisonnière ou saisonnalité** : correspond à un phénomène qui se répète à intervalles de temps réguliers (périodique). Ce mouvement est donc une fonction du temps et est indépendant de la tendance.
- c) **Cycle** : Cette composante décrit un mouvement à moyen terme caractérisé à la fois par la périodicité et par la cyclicité, c'est-à-dire par la régularité de son amplitude comportant une phase croissante et une autre décroissante.
- d) **Composante résiduelle ou bruit ou résidu** : ce sont des fluctuations irrégulières, en général de faible intensité mais de nature aléatoire.

IV.3 Caractéristique d'une série temporelle

a) Moyenne et variance

Soit une série stationnaire $X_t, t = 1, \dots, T$. Les expressions de la moyenne et de la variance sont :

$$\text{-Moyenne : } E(X_t) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T X_t \quad (\text{IV. 1})$$

$$\text{-Variance : } V(X_t) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [X_t - E(X_t)]^2 \quad (\text{IV. 2})$$

b) Fonction d'autocovariance

Soit X_t un processus aléatoire de variance finie. On appelle fonction d'auto covariance γ_h de X_t la fonction :

$$\gamma_h = \text{Cov}(X_t, X_{t+h}) = E[[X_t - E(X_t)][X_{t+h} - E(X_{t+h})]] \quad (\text{IV. 3})$$

La fonction d'auto covariance mesure la covariance entre deux valeurs de X_t séparées par un certain délai. Elle fournit des informations sur la variabilité de la série.

- $\gamma_0 = \text{Cov}(X_t, X_t) = E[[X_t - E(X_t)]^2] = V(X_t) = \sigma_x^2 \geq 0 \quad (\text{IV. 4})$
- $|\gamma_h| \leq \gamma_0$
- $\gamma_h = \gamma_{-h}$: Fonction paire

c) Fonction d'autocorrélation

Soit X_t un processus stationnaire. On appelle fonction d'autocorrélation ρ_h la fonction :

$$\rho_h = \frac{\gamma_h}{\gamma_0}, h \in \mathbb{Z} \quad (\text{IV. 5})$$

Le graphique de la fonction d'autocorrélation est appelé corrélogramme. La fonction d'autocorrélation permet de mesurer les liaisons temporelles entre différentes composantes de la série X_t .

La fonction d'autocorrélation vérifie les conditions suivantes

- $\rho_0 = 1$
- $|\rho_h| \leq \rho_0$
- $\rho_h = \rho_{-h}$ fonction paire

d) Fonction d'autocorrélation partielle

La fonction d'autocorrélation partielle mesure la corrélation entre X_t et X_{t-h} , l'influence des variables X_{t-h+i} ($pour i < h$) ayant été retirée. Notons ρ_h et ϕ_{hh} les fonctions respectivement d'autocorrélation et d'autocorrélation partielle de X_t . Soit P_h la matrice symétrique formée des (h-

1) premières autocorrélations de X_t :

$$P_h = \begin{vmatrix} 1 & \rho_1 & \cdot & \cdot & \cdot & \rho_{h-1} \\ \cdot & 1 & & & & \\ \cdot & & \cdot & & & \\ \cdot & & & \cdot & & \\ \cdot & & & & \cdot & \\ \rho_{h-1} & & & & & 1 \end{vmatrix}$$

La fonction d'autocorrélation partielle est donnée par :

$$\phi_{hh} = \frac{|P_h^*|}{|P_h|} \quad (IV.6)$$

Où $|P_h|$ est le déterminant

de la matrice P_h et P_h^* est donnée par :

$$P_h = \begin{vmatrix} 1 & \rho_1 & \cdot & \cdot & \rho_{h-2} & \rho_1 \\ \cdot & 1 & & & & \\ \cdot & & \cdot & & & \\ \cdot & & & \cdot & & \\ \cdot & & & & 1 & \\ \rho_{h-1} & & & & & \rho_h \end{vmatrix}$$

P_h^* est ainsi la matrice P_h dans laquelle la dernière colonne par le vecteur $[\rho_1 \dots \rho_h]^h$.

on a remplacé

IV.4 Généralités et notations

a) Opérateurs

-Opérateurs retard (Backward) :

L'opérateur retard est un opérateur linéaire noté B, tel que :

$$BX_t = X_{t-1}. \text{(IV.7)}$$

- Opérateur avance (Forward) :

Par analogie, l'opérateur d'avance, noté F est tel que :

$$FX_t = X_{t+1} \text{(IV.8)}$$

- Opérateur de différence ordinaire :

On note ∇ l'opérateur de différence ordinaire associé à un processus $\{X_t, t \in \mathbb{Z}\}$ le processus tel que :

$$\nabla X_t = X_t - X_{t-1} = (1-B)X_t. \text{(IV.9)}$$

On définit le $d^{\text{ème}}$ opérateur de différence ordinaire par :

$$\nabla^d X_t = (1-B)^d X_t. \text{(IV.10)}$$

- Opérateur de différence saisonnière :

On note ∇_s l'opérateur de différence saisonnière associé à un processus $\{X_t, t \in \mathbb{Z}\}$ le processus tel que :

$$\nabla_s X_t = (1-B^s)X_t = X_t - X_{t-s}. \text{(IV.11)}$$

On définit le $d^{\text{ème}}$ opérateur de différence saisonnière par :

$$\nabla_s^d X_t = (1-B^s)^d X_t \text{(IV.12)}$$

b) Processus bruit blanc

Un processus stationnaire ε_t centré est un bruit blanc si :

$$-E(\varepsilon_t) = 0 \quad \forall t,$$

$$-V(\varepsilon_t) = \sigma_\varepsilon^2 \forall t,$$

$$-Cov(\varepsilon_t, \varepsilon_{t'}) = 0 \text{ pour } t \neq t'$$

Un bruit blanc est ainsi un processus de moyenne nulle, de variance constante et non autocorrélé.

On note : $\varepsilon_t \sim BB(0, \sigma_\varepsilon^2)$

IV.5 Introduction à la stationnarité

Soit une série temporelle $X_t, t = 1, \dots, T$ (T est le nombre d'observations de la série). Avant d'effectuer des tests spécifiques sur cette série et de chercher à la modéliser, plusieurs étapes préliminaires sont nécessaires. Il convient d'étudier ses caractéristiques stochastiques, telles que son espérance et sa variance. En particulier, avant d'appliquer les méthodes classiques des séries temporelles (par exemple les modèles ARMA), il est nécessaire de vérifier que, pour les séries étudiées, l'espérance et la variance restent stables au cours du temps.

a) Stationnarité au sens strict ou Stationnarité forte

Le processus X_t est stationnaire au sens strict si pour tout (t_1, t_2, \dots, t_n) avec $t_i \in T, i = 1, \dots, n$, et sin pour tout $\tau \in T$ avec $t_{i+\tau} \in T, \{X_{t_1}, \dots, X_{t_n}\}$ à la même distribution de probabilité jointe que $\{X_{t_1+\tau}, \dots, X_{t_n+\tau}\}$.

Un processus strictement stationnaire a toutes ses caractéristiques (c'est-à-dire tous ses moments) invariées dans le temps. Cette définition de la stationnarité est cependant trop restrictive, c'est pour cela que l'on a défini la stationnarité au second ordre.

b) Stationnarité au second ordre ou Stationnarité faible

Un processus X_t est stationnaire au second ordre si :

$$-(1) E(X_t^2) < \infty \forall t \in Z,$$

$$-(2) E(X_t) = m \quad \forall t \in Z,$$

$$-(3) Cov(X_t, X_{t+h}) = \gamma_h, \forall t, h \in Z \text{ où } \gamma \text{ est la fonction d'autocovariance du processus.}$$

IV.6 Modélisation des séries chronologiques

L'objectif de la modélisation est de développer des modèles probabilistes permettant de décrire le comportement d'une ou plusieurs séries chronologiques et de résoudre les problèmes liés à la prévision. Pour atteindre ce but, on propose de modéliser la série chronologique en employant une classe de modèles probabilistes suffisamment vaste.

Une classe particulière de modèles fortement utilisés en pratique est la classe des modèles autorégressifs moyenne mobile (ARMA) ; Cette classe de modèle n'est rien d'autre qu'une approximation d'une décomposition très connue des processus stationnaires, dite décomposition de Wold.

IV.6.1 Théorème de Wold

Le Théorème de Wold (1954) est un théorème fondamental dans la modération des processus stationnaires.

Considérons un processus stationnaire X_t . Il est toujours possible de décomposer X_t en une composante déterministe d_t (parfaitement prévisible) et une composante stochastique u_t telles que :

$$X_t = d_t + u_t \quad (\text{IV.13})$$

Avec $u_t = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i \varepsilon_i$ Où ε_i est un bruit blanc.

IV.6.2 Topologie des modèles ARMA

Les modèles ARMA (Auto Regressive Moving Average) ont été introduits par Box et Jenkins (1970). L'objet est de modéliser une série temporelle en fonction de ses valeurs passées, mais aussi en fonction des valeurs présentes et passées d'un bruit.

IV.6.2.1 Processus autorégressif d'ordre p AR(p)

Un processus $\{X_t, t \in \mathbb{Z}\}$ est dit autorégressif d'ordre p si il est caractérisé par l'équation :

$$X_t = \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \dots + \phi_p X_{t-p} + \varepsilon_t \quad (\text{IV.14})$$

En d'autres termes ; une observation dépend du résidu au temps t plus une combinaison linéaire des observations précédentes.

L'équation (14) peut aussi s'écrire :

$$\phi(B) X_t = \varepsilon_t \quad \forall t \in Z \quad (IV.15)$$

Avec : $\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$

Où $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ sont des paramètres réels à estimer et $\varepsilon_t, t \in Z$ est un bruit blanc.

- Le degré p est appelé le degré d'autocorrélation, il indique la profondeur de la mémoire.

✓ **Condition de stationnarité (Théorème)**

Une condition nécessaire et suffisante pour que le processus autorégressif soit stationnaire du second ordre est que les racines de l'équation caractéristique suivante : $\Phi(Z) = 0$ soit à l'extérieur du cercle unitaire.

IV.6.2.2 Processus moyenne mobile d'ordre q MA(q)

Un processus $\{X_t, t \in Z\}$ est dit moyenne mobile d'ordre q si il est caractérisé par la formule suivante :

$$X_t = \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (IV.16)$$

Une observation à t dépend du résidu à t moins une combinaison linéaire des résidus précédents.

L'équation (16) peut aussi s'écrire :

$$X_t = \theta(B) \varepsilon_t \quad (IV.17)$$

Avec $\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q$

Où $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ sont des paramètres réels à estimer et $\varepsilon_t, t \in Z$ est un bruit blanc.

- Le degré q est nommé le degré de la moyenne mobile.

✓ **Théorème (condition d'inversibilité)**

Une condition nécessaire et suffisante pour que le processus moyenne mobile soit inversible est que les racines de l'équation caractéristique suivante : $\theta(Z) = 0$ soit à l'extérieur du cercle unitaire.

IV.6.2.3 Processus autorégressif moyenne mobile d'ordre (p,q) ARMA(p,q) :

Un processus stationnaire X_t suit un ARMA (p, q) s'il vérifie l'équation stochastique suivante :

$$\phi(B) X_t = \theta(B) \varepsilon_t \quad (\text{IV.18})$$

Avec : $\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$ le polynôme autorégressif d'ordre p.

$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q$ le polynôme moyenne mobile d'ordre q.

ε_t , $t \in \mathbb{Z}$ Processus bruit blanc

✓ **Théorème (condition de stationnarité et d'inversibilité)**

Un processus ARMA est stationnaire si le polynôme ϕ a toutes ses racines à l'extérieur du disque unité et inversible si toutes les racines du polynôme θ sont à l'extérieur du disque unité.

IV.6.2.4 Processus autorégressif moyenne mobile intégré d'ordre ARIMA (p,d,q)

Ce sont des modèles ARMA intégrés notés ARIMA. Ils sont issus des séries stationnalisées.

Le processus X_t suit un ARIMA (p, d, q), c'est-à-dire qu'il est solution d'une équation aux différences stochastiques du type :

$$\phi(B) (1-B)^d X_t = \theta(B) \varepsilon_t \quad (\text{IV.19})$$

IV.6.2.5 Processus autorégressif moyenne mobile intégré saisonnier

Il est possible que certaines séries chronologiques soient caractérisées par une allure graphique périodique. Pour cela, il est important de les analyser en tenant compte de l'effet saisonnier. Box et Jenkins (1970) ont proposé une classe de modèle particulière appelée : Classe de modèles ARIMA saisonniers.

Ce sont des extensions des processus ARMA et ARIMA. Ils représentent généralement des séries marquées par une saisonnalité comme c'est le plus souvent le cas pour des séries hydrologique. Ces séries peuvent mieux s'ajuster par des modèles saisonniers. Ce sont les processus SARIMA (p, d, q) (P, D, Q) qui répondent au modèle:

$$\phi(B) \phi_s(B^s) (1-B)^d (1-B^s)^D X_t = \theta(B) \theta_s(B^s) \varepsilon_t \quad (\text{IV.20})$$

Où :

$\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$: polynôme autorégressif non saisonnier d'ordre p .

$\phi_s(B) = 1 - \phi_s B - \phi_s B^{2s} - \dots - \phi_s B^{Ps}$: polynôme autorégressif saisonnier d'ordre P .

$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q$: polynôme moyenne mobile non saisonnier d'ordre q .

$\theta_s(B) = 1 - \theta_s B - \theta_s B^{2s} - \dots - \theta_s B^{Qs}$: polynôme moyenne mobile saisonnier d'ordre Q

$(1 - B)^d$: Opérateur de différence d'ordre d .

$(1 - B^s)^D$: Opérateur de différence saisonnière d'ordre D .

$\varepsilon_t \sim BB(0, \sigma_\varepsilon^2)$

Les paramètres (p , d , q) correspondant à la partie non saisonnière, ils sont identifiés en examinant la coupure des fonctions d'autocorrélation simple et partielle.

Pour la partie saisonnière (P , D , Q), les paramètres P et Q , ils sont identifiés en examinant la coupure des fonctions d'autocorrélation simple et partielle à des ordres multiples de s respectivement, D représente le nombre de fois où l'opérateur de différence saisonnière d'ordre s a été appliqué.

IV.6.3 Méthodologie de Box - Jenkins

George Box & Gwilym Jenkins ont développé en 1976 une véritable méthodologie de recherche et d'étude systématique en fonction de l'étude des corrélogrammes. C'est une approche itérative qui consiste à identifier un modèle susceptible de représenter le phénomène étudié, elle se réfère à deux types de modèles autorégressifs et moyenne mobile ou à une combinaison des deux, cependant ; la modélisation d'une chronique nécessite au préalable une stationnarisation. Le diagramme qui suit illustre la démarche générale de Box & Jenkins :

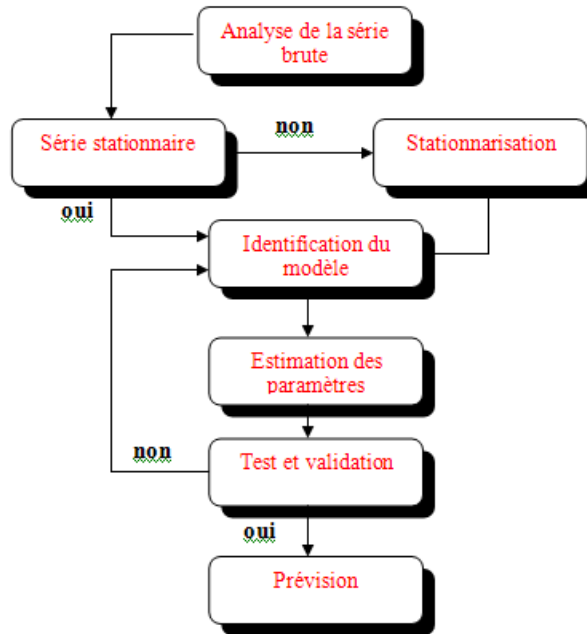


Figure IV.1 Différentes étapes de Box-Jenkins

IV.6.3.1 Principales étapes de la méthode

a) Spécification du modèle (identification)

En premier lieu, on examine le graphe représentatif de la série chronologique sous-jacente. Ceci peut nous donner une idée préliminaire sur le comportement de la série (stationnarité, tendance, saisonnalité...). Comme cité plus haut, si par exemple, la série exhibe une tendance et/ou une saisonnalité, des transformations adéquates doivent être appliquées à cette série afin de la stationnariser, car la méthodologie de Box-Jenkins est conditionnée par la stationnarité de la série.

L'idée générale de l'identification consiste à comparer la structure des corrélations estimées que présente la série à travers le corrélogramme (diagramme représentatif des autocorrélations estimées simples et partielles) avec la structure de corrélation théorique exhibée par des modèles bien connus. Ainsi l'étude du corrélogramme est très utile pour la détermination des ordres p et q , puisque les fonctions d'autocorrélations simple et partielle peuvent indiquer la présence d'un modèle moyenne mobile ou autorégressif respectivement.

b) Estimation des paramètres

Parmi les méthodes qui peuvent être utilisées la méthode du maximum de vraisemblance et la méthode des moindres carrés fut l'une des premières utilisées et avait montré des résultats satisfaisants.

L'étape d'estimation achevée, l'étape suivante va nous permettre de valider le(s) modèle(s) estimé(s).

c) Validation

A l'étape de l'identification, les incertitudes liées aux méthodes employées font que plusieurs modèles en général sont estimés et c'est l'ensemble de ces modèles qui subit alors l'épreuve des tests, il en existe de très nombreux critères permettant de comparer les performances entre modèles ; nous pouvons citer les tests sur le modèle, les tests sur les paramètres et les tests sur les résidus.

c.1) Tests sur les paramètres

Le premier test qu'on peut effectuer est le test de l'hypothèse nulle $p' = p - 1$ et $q' = q$. On regarde si l'on peut diminuer le nombre de retards intervenant dans la partie AR. Autrement dit, on teste l'hypothèse nulle du processus ARMA ($p - 1, q$) ($\phi_p = 0$) contre l'hypothèse alternative de processus ARMA ($p; q$) ($\phi_p \neq 0$). Ce test est très simple puisqu'il s'agit de tester la significativité du

coefficient ϕ_p . Pour cela, on calcule la statistique de Student de ϕ_p : $t_{\hat{\phi}_p} = \frac{\hat{\phi}_p}{\hat{\sigma}_p}$ et la règle du test est la suivante :

Si $|t_{\hat{\phi}_p}| < t_{1-\frac{\alpha}{2}}$, on accepte l'hypothèse nulle de processus ARMA ($p - 1, q$).

Si $|t_{\hat{\phi}_p}| \geq t_{1-\frac{\alpha}{2}}$, on rejette l'hypothèse nulle de processus ARMA (p, q).

Les mêmes démarches sont valables pour les paramètres θ_q .

c.2) Tests concernant les résidus

Le processus estimé est évidemment de bonne qualité si la chronique calculée suit les évolutions de la chronique empirique. Les résidus entre les valeurs observées et les valeurs calculées par le modèle, doivent se comporter comme un bruit blanc normal.

c.2.1) Test d'absence d'autocorrélation : Test de Box-Ljung

Lorsque le processus est bien estimé, les résidus entre les valeurs observées et les valeurs estimées par le modèle doivent se comporter comme un bruit blanc. Nous noterons par la suite $\hat{\varepsilon}_t$ le résidu d'estimation du modèle.

Ce test permet de savoir si les résidus forment un bruit blanc ou non, pour le réaliser : nous observons le corrélogramme des erreurs du modèle optimal, si tous les pics sont dans la bande de confiance de plus la probabilité de significativité et supérieur à 0.05 alors les résidus forment un bruit blanc.

Pour confirmer ce résultat nous testons

H_0 : « Les autocorrélations au pas K , ($k=N/4$) sont non corrélés » C'est-à-dire :

$$H_0: \rho_1 = \rho_2 = \dots = \rho_k = 0 \quad (\text{IV. 21})$$

H_0 : Il existe au moins un ρ_1 significativement différent 0

La Statistique de Box-Ljung est :

$$Q = n(n+2) \sum_{i=1}^K \frac{\rho_i^2(\varepsilon)}{n-i} \quad (\text{IV.22})$$

Où : K : nombre de retard choisi, N : Taille de la série brute, n : nombre de résidus.

- Règle de décision : Si $Q < \chi^2(K - p - q - P - Q)$, degrés de liberté nous acceptons l'hypothèse H_0 que les résidus sont non corrélés, Sinon les résidus ne forment pas un bruit blanc et le modèle est inadéquat.

c.2.2) Tests de normalité

Le test de Jarque & Bera (1984) peut s'appliquer pour tester la normalité des résidus ; Ce dernier est fondé sur la notion d'asymétrie (l'asymétrie de la distribution, moment d'ordre 3) et d'aplatissement.

Soit $\mu_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^k$, le moment centré d'ordre k , le coefficient d'asymétrie $\beta_1^{\frac{1}{2}}$ est égale à $\beta_1^{\frac{1}{2}} = \frac{\mu_3}{\mu_2^{3/2}}$ et le coefficient d'aplatissement $\beta_2 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2}$.

$$\beta_1^{\frac{1}{2}} \rightarrow N(0; \sqrt{\frac{6}{n}}) \quad \text{et} \quad \beta_2 \rightarrow N(3; \sqrt{\frac{24}{n}}) \quad (\text{IV.23})$$

On construit alors les statistiques

$$v_1 = \frac{\beta_1^{\frac{1}{2}} - 0}{\sqrt{\frac{6}{n}}} \text{ et } v_2 = \frac{\beta_2 - 3}{\sqrt{\frac{24}{n}}} \quad (\text{IV.24})$$

Si les hypothèses $H_0: v_1 = 0$ (symétrie) et $v_2 = 0$ (Aplatissement normal) sont vérifiées alors $|v_1| < 1.96$ et $|v_2| < 1.96$, dans le cas contraire l'hypothèse de normalité est rejetée.

d) Choix du modèle

Après les étapes précédentes, plusieurs formulations dans la vaste classe des modèles ARMA pourraient être retenus ; il faut donc choisir le meilleur modèle parmi ceux sélectionnés. Pour cela nous utilisons les critères d'information :

Ils existent des critères d'informations qui sont utilisés, comme guide, dans le choix du modèle, ce qui nous permet d'éviter la sélection arbitraire des paramètres p et q du modèle.

Parmi ces critères, ils existent les critères d'information qui mesurent l'écart entre la vraie loi inconnue et le modèle proposé. Les estimateurs de la quantité d'information qui ont été proposés sont :

- Critère d'information d'Akaike (AIC) (1969) :

Le meilleur des modèles ARMA (p, q) est le modèle qui minimise la statistique :

$$AIC = -2l/N + 2k/N \quad (\text{IV.25})$$

- Critère d'information bayésien de Schwartz (BIK) (1978) :

$$BIC = -2\left(\frac{l}{N}\right) + k \log(N)/N \quad (\text{IV.26})$$

Où : N est le nombre d'observation, k est le nombre de paramètres à estimer du modèle et l est le log- [vraisemblance](#) du modèle.

e) Prévision

Une fois le meilleur modèle est choisi, On procède à la prévision. A l'étape de la transformation, plusieurs techniques ont pu être employées afin de stationnairiser le processus générateur dans la classe des processus ARMA. Il est nécessaire à l'étape de prévision de prendre en compte la transformation retenue (recoloration de la prévision).

IV.7 Développement des modèles stochastiques pour la prévision de la sécheresse

IV.7 Développement de la série de l'SPI

Comme il a été déjà signalé, que dans le présent travail nous avons choisi l'indice de précipitation standardisé (SPI) pour quantifier la sécheresse.

Le calcul de l'indice SPI a été fait en utilisant le programme (SPI Generator) développé par le centre American : *National Drought Mitigation Center l'université de Nebraska, USA*.

La figure ci-dessous présente la fenêtre principale d'utilisant du programme, SPI Generator.

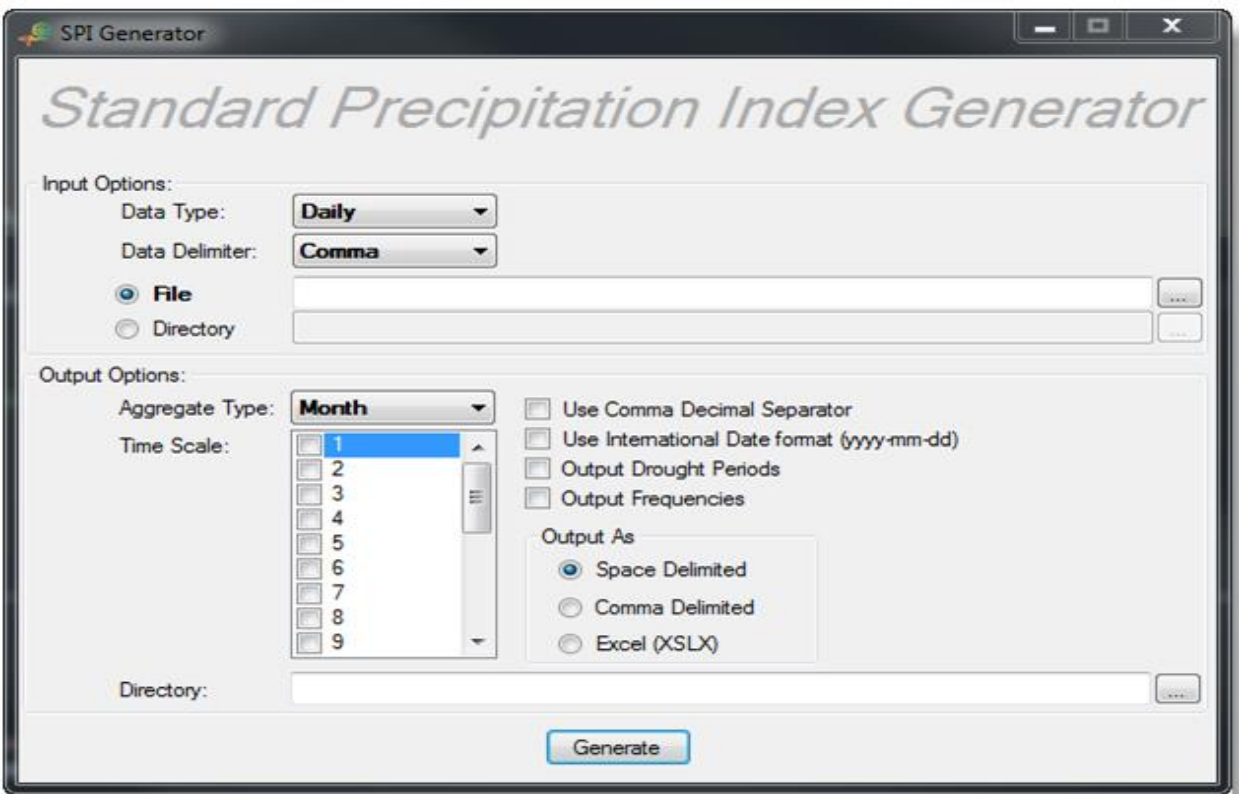


Fig IV.1 Fenêtre principale du programme SPI Generator

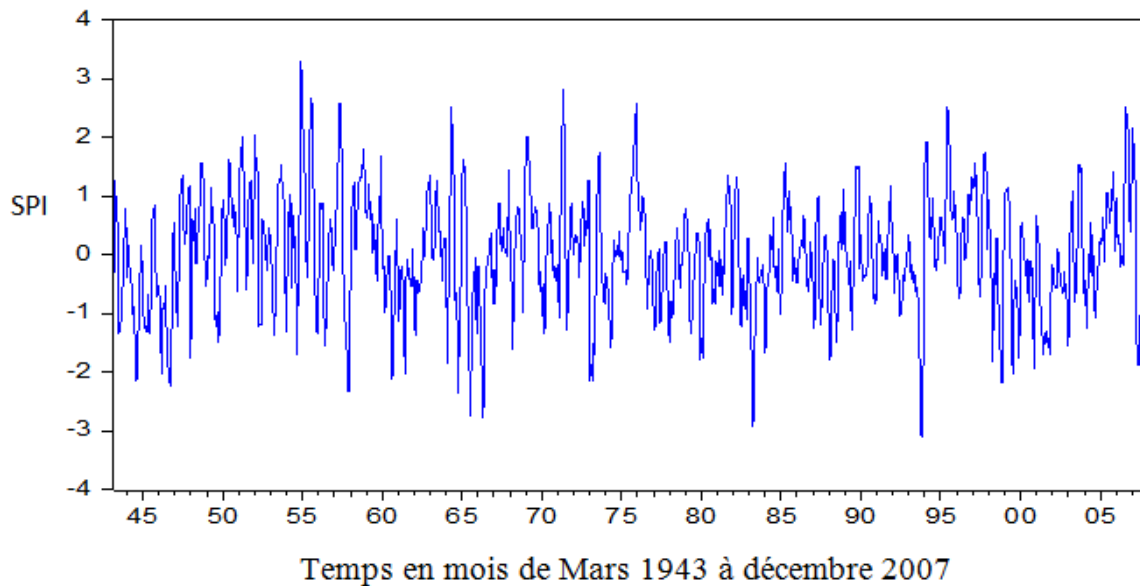


Fig IV.2. Série développée de l'indice SPI

Le développement des modèles stochastiques consiste en trois étapes, i.e. identification, estimation et validation (Box et Jenkins, 1976).. La répartition des données utilisées est présentée par la figure IV.2.

SPI-3	Base de données de départ : 778 observations de 03/1943 à 12/2007	
	Calage : 518 Obs. 2/3 de de la base de données 03/1943 à 04/1986	Test : 260 obs. 1/3 de la base de données de 05/1986 à 12/2007

Figure IV.3 Répartition de la base de données pour la construction des modèles ARIMA

Etape 1 Identification

Une première intuition concernant la stationnarité peut être fournie par l'étude du graphique des séries de l'SPI ainsi que par ses autocorrélations.

a-SPI-3: D'après l'analyse des fonctions d'autocorrélation et Autocorrélation partielle figureIV.3, nous constatons que la fonction d'autocorrélation montre une décroissance très rapide (uniquement les deux premières autocorrélations sont significativement différentes de zéro) Donc la série SPI-3

est stationnaire, et que les quatre premières autocorrélations partielles sont significativement différentes de zéro.

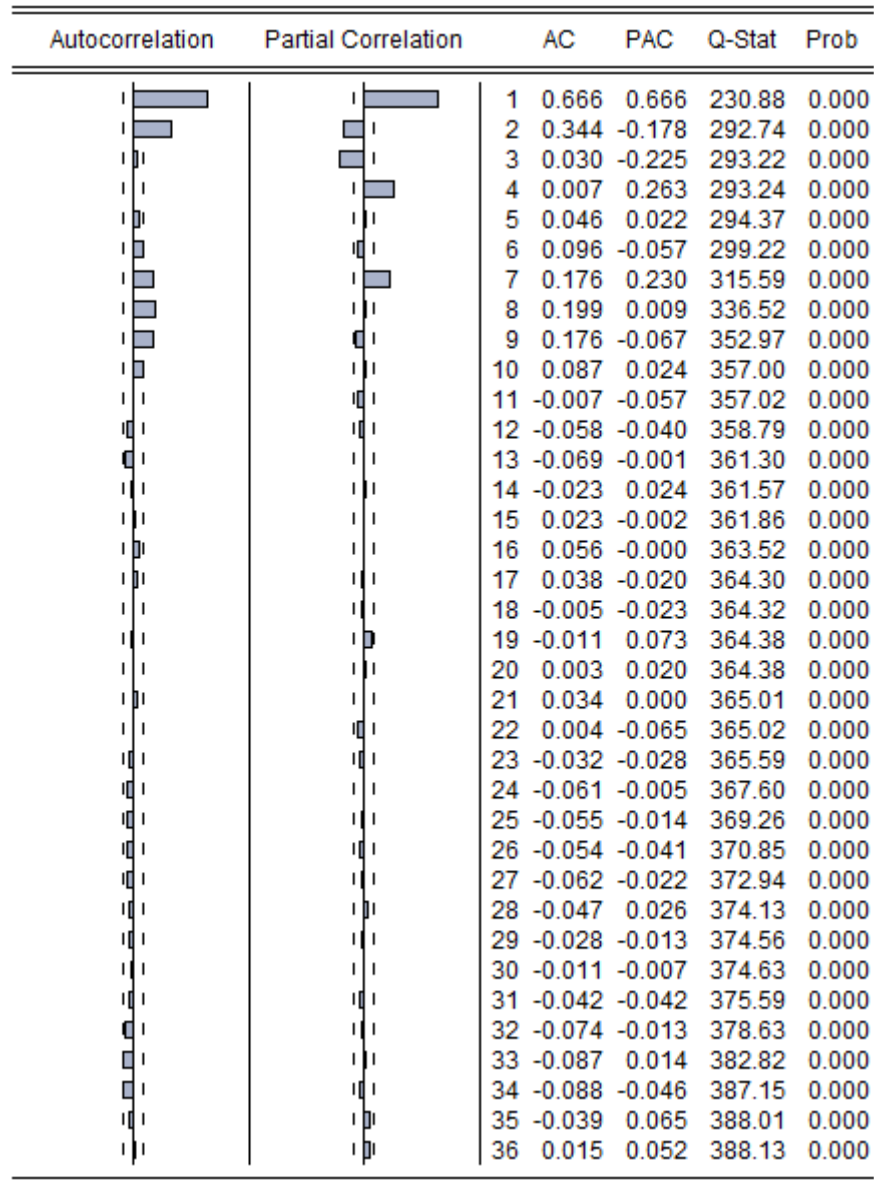


Figure IV.4 Autocorrélation et Autocorrélation partielle de série SPI-3

-La 1^{ère} et la 2^{ème} autocorrélation sont significativement différentes de 0.

-La 1^{ère}, 2^{ème}, 3^{ème}, 4^{ème}, et 7^{ème} autocorrélation partielle est significativement différente de 0. Donc on peut identifier les processus de la forme : **ARIMA (p,0,q)**, Avec

p : peut prendre les valeurs : 1, 2,3, 4 et 7 q : peut prendre les valeurs 1 et 2.

p, q, sont choisis en fonction des termes significatifs d'autocorrélations et autocorrélations partielles.

Etape 2 : Estimation

Après avoir identifié les modèles pour la série de l'SPI, on procède à l'estimation des paramètres de ces modèles par la méthode des moindres carrés. Les tableaux IV.1, IV.2 et IV.3 présentent les résultats d'estimation des modèles identifiés pour les séries de SPI3.

Remarque : les coefficients non significatifs ont été supprimés lors de l'estimation

Tableau IV.1 Résultats d'estimation des modèles stochastiques pour le SPI-3

.....

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	0.014913	0.094441	0.157903	0.8746
AR(1)	0.214711	0.119654	1.794435	0.0733
AR(2)	-0.073799	0.089116	-0.828119	0.4080
AR(3)	-0.023231	0.080969	-0.286920	0.7743
AR(4)	0.050961	0.070269	0.725218	0.4687
AR(7)	0.123825	0.047094	2.629320	0.0088
MA(1)	0.614791	0.112941	5.443460	0.0000
MA(2)	0.597593	0.082593	7.235392	0.0000
R-squared	0.549559	Mean dependent var	0.014188	
Adjusted R-squared	0.543290	S.D. dependent var	1.010766	
S.E. of regression	0.683079	Akaike info criterion	2.091119	
Sum squared resid	234.6981	Schwarz criterion	2.157442	
Log likelihood	-526.2808	Hannan-Quinn criter.	2.117119	
F-statistic	87.66902	Durbin-Watson stat	2.013890	
Prob(F-statistic)	0.000000			

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
AR(1)	0.215095	0.119513	1.799759	0.0725
AR(2)	-0.073912	0.089041	-0.830086	0.4069
AR(3)	-0.023328	0.080900	-0.288359	0.7732
AR(4)	0.051166	0.070183	0.729032	0.4663
AR(7)	0.123939	0.047033	2.635124	0.0087
MA(1)	0.614454	0.112818	5.446424	0.0000
MA(2)	0.597453	0.082528	7.239365	0.0000
R-squared	0.549537	Mean dependent var	0.014188	
Adjusted R-squared	0.544174	S.D. dependent var	1.010766	
S.E. of regression	0.682418	Akaike info criterion	2.087254	
Sum squared resid	234.7098	Schwarz criterion	2.145287	
Log likelihood	-526.2935	Hannan-Quinn criter.	2.110005	
Durbin-Watson stat	2.013864			

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
AR(1)	0.198233	0.105797	1.873717	0.0615
AR(2)	-0.080043	0.084374	-0.948672	0.3432
AR(4)	0.039864	0.060017	0.664209	0.5069
AR(7)	0.121038	0.047364	2.555489	0.0109
MA(1)	0.631510	0.097226	6.495260	0.0000
MA(2)	0.617284	0.045154	13.67074	0.0000
R-squared	0.549464	Mean dependent var	0.014188	
Adjusted R-squared	0.545003	S.D. dependent var	1.010766	
S.E. of regression	0.681797	Akaike info criterion	2.083503	
Sum squared resid	234.7478	Schwarz criterion	2.133245	
Log likelihood	-526.3349	Hannan-Quinn criter.	2.103003	
Durbin-Watson stat	2.013857			

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
AR(1)	0.118808	0.067148	1.769358	0.0774
AR(7)	0.104986	0.044656	2.351012	0.0191
MA(1)	0.709921	0.053676	13.22613	0.0000
MA(2)	0.617505	0.041173	14.99770	0.0000
R-squared	0.548826	Mean dependent var	0.014188	
Adjusted R-squared	0.546156	S.D. dependent var	1.010766	
S.E. of regression	0.680932	Akaike info criterion	2.077089	
Sum squared resid	235.0801	Schwarz criterion	2.110251	
Log likelihood	-526.6964	Hannan-Quinn criter.	2.090090	
Durbin-Watson stat	2.009575			

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
AR(1)	0.147638	0.080705	1.829363	0.0679
AR(2)	-0.044619	0.071632	-0.622898	0.5336
AR(7)	0.110888	0.045830	2.419555	0.0159
MA(1)	0.682385	0.068209	10.00425	0.0000
MA(2)	0.625060	0.042662	14.65157	0.0000
R-squared	0.549136	Mean dependent var		0.014188
Adjusted R-squared	0.545572	S.D. dependent var		1.010766
S.E. of regression	0.681371	Akaike info criterion		2.080316
Sum squared resid	234.9186	Schwarz criterion		2.121768
Log likelihood	-526.5208	Hannan-Quinn criter.		2.096567
Durbin-Watson stat	2.012833			

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
AR(7)	0.088852	0.044951	1.976629	0.0486
MA(1)	0.779648	0.034383	22.67563	0.0000
MA(2)	0.649599	0.033785	19.22752	0.0000
R-squared	0.546036	Mean dependent var		0.014188
Adjusted R-squared	0.544248	S.D. dependent var		1.010766
S.E. of regression	0.682362	Akaike info criterion		2.079341
Sum squared resid	236.5339	Schwarz criterion		2.104212
Log likelihood	-528.2716	Hannan-Quinn criter.		2.089091
Durbin-Watson stat	1.910543			

Etape 3 Validation

A l'étape d'identification, les incertitudes liées aux méthodes employées font que plusieurs modèles, en général, sont estimés et c'est l'ensemble de ces modèles qui subissent alors l'épreuve des tests. Il en existe de très nombreux permettant d'une part valider le modèle retenu, d'autre part de comparer les performances entre modèles

a- Test sur les paramètres

Le test de Student sur les paramètres a été effectué au fur et à mesure de l'estimation les coefficients non significatifs ont été supprimés lors de l'estimation.

b- Choix du modèle

Le modèle qui minimise les deux critères d'informations d'Akaike et celui de Schwarz a été choisi comme le meilleur modèle pour la prévision de la sécheresse. D'après les tableaux d'estimation des modèles, le modèle qui minimise AIC et BIC est :

ARIMA (7,0,2).

c-Test d'absence d'autocorrélation des résidus

Le test d'absence d'autocorrélation des résidus a été effectué sur les résidus des trois modèles choisis.

L'analyse visuelle du corrélogramme des résidus Figure VI.6, montre que tous les termes sont à l'intérieur de l'intervalle de confiance, donc les résidus forment un bruit blanc.

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob	
		1	0.044	0.044	1.0129	
		2	0.006	0.004	1.0301	
		3	0.022	0.021	1.2766	
		4	-0.027	-0.029	1.6548	0.198
		5	0.029	0.031	2.0875	0.352
		6	0.012	0.009	2.1601	0.540
		7	0.002	0.002	2.1626	0.706
		8	0.070	0.068	4.7452	0.448
		9	0.105	0.100	10.455	0.107
		10	0.014	0.005	10.564	0.159
		11	-0.029	-0.035	11.014	0.201
		12	-0.023	-0.022	11.294	0.256
		13	-0.057	-0.055	12.994	0.224
		14	-0.021	-0.023	13.230	0.279
		15	0.002	0.000	13.232	0.352
		16	0.048	0.048	14.467	0.342
		17	0.028	0.012	14.894	0.385
		18	-0.027	-0.039	15.290	0.431
		19	-0.010	-0.006	15.345	0.500
		20	-0.023	-0.012	15.630	0.550
		21	0.070	0.086	18.282	0.437
		22	0.005	0.010	18.294	0.503
		23	-0.045	-0.041	19.382	0.497
		24	-0.030	-0.042	19.857	0.530
		25	-0.000	-0.010	19.857	0.592
		26	-0.011	-0.018	19.923	0.647
		27	-0.014	-0.007	20.031	0.695
		28	-0.046	-0.037	21.190	0.682
		29	-0.036	-0.033	21.883	0.695
		30	0.060	0.051	23.850	0.639
		31	-0.039	-0.043	24.663	0.646
		32	-0.073	-0.060	27.571	0.541
		33	0.014	0.027	27.676	0.588
		34	-0.067	-0.049	30.117	0.511
		35	-0.046	-0.039	31.267	0.503
		36	0.027	0.032	31.665	0.534

Figure IV.6.a SPI-3

Figure IV.4 Autocorrélation et autocorrélation partielle des résidus du meilleur modèle

Étape 4 Prévision de la sécheresse

Une fois le meilleur modèle est choisi, on procède à la prévision de la sécheresse.

L'évaluation de la qualité des prévisions est réalisée par l'utilisation de critères de performances suivants :

- Critère de Nash NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient) : Le critère de Nash est meilleur que le coefficient de détermination pour l'évaluation de la performance de prévision. (Legates and McCabe, 1999). Il est exprimé comme suit :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (SPI_i - \widehat{SPI}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (SPI_i - \overline{SPI})^2} \quad (IV. 27)$$

- La racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur moyenne absolue (MAE), sont largement répandues et utilisées pour évaluer la performance de prévision, elles sont données par les expressions suivantes :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (SPI_i - \widehat{SPI}_i)^2}{N}} \quad (IV. 28)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |SPI_i - \widehat{SPI}_i|}{N} \quad (IV. 29)$$

Où : SPI_i est la valeur observée ; \widehat{SPI}_i est la valeur prévue et N est le nombre d'observations.

En général, des valeurs élevées de NSE (jusqu'à 100 %) et de faibles valeurs de RMSE et MAE indique un bon modèle. Ces mesures peuvent être utilisées pour évaluer la performance des modèles hydrologiques de façon satisfaisante (Legates and McCabe, 1999).

Les résultats de prévision sont présentés dans le tableau IV.6.

Tableau IV.6 Résultats de prévision par les modèles ARMA

Critère	Valeur
NSE	54%
RMSE	0.64
MAE	0.49

L'analyse des résultats obtenus montre que, pour un pas de prévision d'un mois les modèles ARMA, donne une valeur acceptable du critère de NSE de 54 %, et des valeurs faibles des erreurs RMSE et la MAE.

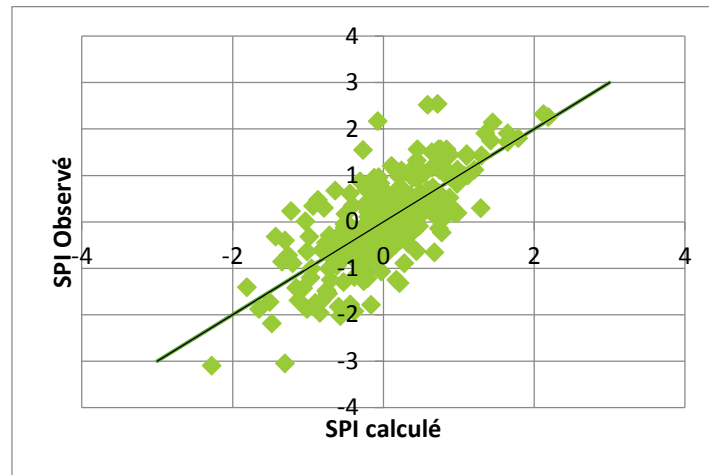


Figure IV5 SPI observé en fonction du SPI calculé

La figure ci-dessus présente le SPI observé en fonction de celui calculé, cette figure montre que les points ne sont pas vraiment alignés sur la première bissectrice, cela signifie que les prévisions sont d'une qualité moyenne.

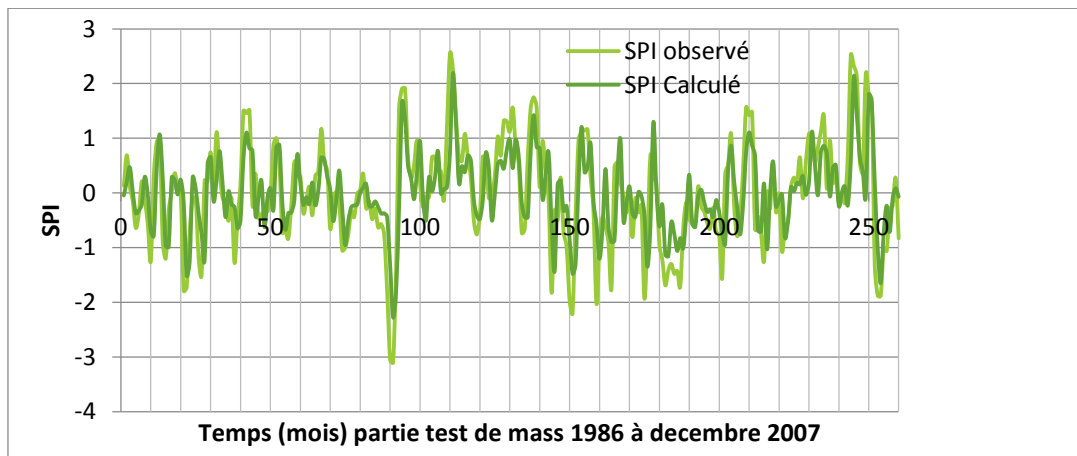


Figure IV.6Prévision de l'SPI par le modèle ARMA

La figure ci-dessus montre les SPI calculé et observé sur le même graphique, l'analyse de cette figure montre que le modèle ARMA a sous-estimé les valeurs extrêmes de l'SPI.

La qualité moyenne des prévisions peut être expliquée par le fait que les modèles ARMA sont incapables de modéliser les séries de l'indice de précipitation standardisé (SPI) qui présente un caractère non linéaire.

Conclusion

Les résultats de prévision obtenus par les modèles stochastiques, montre que, ces modèles donne des résultats acceptables pour un pas de prévision limite de 1 mois.

Pour des application qui nécessitent des prévisions d'un pas supérieur à un mois , les modèles stochastiques ne sont pas capables de représenter la sécheresse, en utilisant les SPI comme paramètre de quantification, cela est dû au fait que ces modèles sont à la base des modèles linéaires.

Conclusion générale

Conclusion générale :

a sécheresse s'explique par déficit pluviométrique temporaire, qui n'est pas propre au climat de la zone touchée mais qui dure suffisamment longtemps pour être dommageable. L'aridité s'explique par une faiblesse des précipitations moyennes (moins de 250 mm/an) associée à une forte évapotranspiration (plus de 2000 mm).

Par conséquent, nous avons traité la plupart des indicateurs de déshydratation caractérisés par la diversité et la précision, et nous avons décidé que SPI cela nous aidera dans notre étude à obtenir les résultats les plus précis.

Dans ce travail, nous avons démontré le rôle des modèles ARMA. Là où les résultats de prédiction obtenus au moyen de modèles aléatoires ont montré que ces modèles donnent des résultats acceptables pour une étape de prédiction dans un délai d'un mois. Pour les applications nécessitant des prévisions avec un pas supérieur à un mois, les modèles aléatoires de demande de sécheresse n'étaient pas fixes, en utilisant le SPI comme norme quantitative, du fait que ces modèles sont des bases de modèles linéaires.

Les études et recherches académiques sont hautement souhaitables pour soutenir les décideurs dans leur mission, et pour développer la région de manière durable afin qu'elle conserve son rôle dans l'agriculture dans le pays et évite les catastrophes naturelles, nous fixons donc ces attentes de sécheresse.

Références Bibliographique

Références Bibliographique

Références et liens

- Comment gérer la sécheresse ? - Ministère de l'Environnement
- Impacts du changement climatique sur les phénomènes hydrométéorologiques - Météo-France
- La sechresse en Algerian
- DESPOIS J. (1953), Le Hodna (Algérie), Paris P.U.F.
- DEREKOY A.M. (1967), Hydrogéologie du bassin du chott El Hodna, Essai de synthèse des connaissances actuelles. Projet F.A.O. Algérie.
- KEBICHE M. (1986), Le bassin-versant du Hodna : ressources en eau et potentialités d'aménagement, Thèse de Doctorat de 3e cycle, Université de Nancy 2.
- POPOV G. (1970), Premier rapport hydro climatologique du bassin du Hodna. Projet F.A.O. Hodna. SARY M. (1976), Géographie physique d'une haute plaine steppique algérienne : Le Hodna, Thèse de Doctorat de 3e cycle, Strasbourg.
- **Wilhite, D.A., 2000.***Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions*. Drought: A Global Assessment Routledge, London, UK.
- **Soro, G.E. ; Anouman, D. G.L. ; Goula, BI T.A. ; Srohorou, B. et Savane, I., 2014.** Caractérisation des séquences de sécheresse météorologique à diverses échelles de temps en climat de type soudanais : Cas de l'extrême Nord-ouest de la Cote d'ivoire. *Larhys/Journal*, 18, 107-124.
- **Obassi, G.O., 1994.** WMO's Role in the International Decade for Natural Disaster Reduction. *Bulletin of American Meteorological Society*, 75, 1655–1661.
- **Beaudin, I., 2007** ; Potentiel de la télédétection pour le suivi et la caractérisation des conditions de sécheresse en milieu méditerranéen, Rapport de Maîtrise en sciences géomatiques.
- **Palmer, W.C., 1965.** Meteorological drought, U.S.Department of Commerce. *Weather Bureau Research Paper*. no. 45, 58 pages.
- **McKEE T.B.; DOESKEN N.J.; KLEIST J. (1993):** The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scale. 8th Conference on Applied Climatology, 179-184.
- **Gibbs, W.J. ; Maher, J.V., 1967.** Précipitations déciles comme indicateurs de sécheresse. *Bureau de météorologie Bulletin n ° 48, Common wealth d'Australie*, Melbourne.
- **Tsakiris, G. ;Vangelis, H.** ; “Establishing a drought index incorporating evapotranspiration”, *European Water*, no. 9-10, pp. 3–11, 2005.
- **Tsakiris,G. ; Pangalou, D. ; Vangelis, H.** “Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index _RDI_,” *Water Resources Management*, vol. 21, no. 5, pp. 821– 833, 2007.
- **Mußhoff, O.; Odening, M.; Xu, W.** “Modeling and hedging rain risk,” in Proceedings of the

Références Bibliographique

- Annual Meeting of the American Agricultural Economics Association, Long Beach, Calif, USA, 2006.
- **Asadi Zarch, M. A.; Malekinezhad, H. ; Mobin, H.M. ; Dastorani, M. T.; Kousari, M. R.** “Drought Monitoring by Reconnaissance Drought Index (RDI) in Iran”, *Water Resour Manage* (2011).
- **Dipanwita, D.; Arnab, K.; Patel, N.R.:** Assessment of agricultural drought in Rajasthan (India) using remote sensing derived Vegetation Condition Index (VCI) and Standardized Precipitation Index (SPI), *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* .April 2015
- **Otun, J.A.; Adewumi, J.K.:** Drought quantifications in Semi-Arid Regions using Precipitation Effectiveness Variables, *Dept of Water Resources & Environ. Engineering, Ahmadu Bello University, Zaria, Nigeria.*2009

- **Hazaymeh, K.; Quazi, K. H.:** Remote sensing of agricultural drought monitoring: A state of art review, Department of Geomatics Engineering, Schulich School of Engineering, University of Calgary, Alberta, Canada.Currently affiliated with the Department of Geography, Faculty of Arts, Yarmouk University, Irbid,Jordan.2016.
- **Tsakiris, G.; Pangalou, D.; Vangelis, H.:** “Regional Drought Assessment Based on the Reconnaissance Drought Index (RDI)” *Water Resour Manage*, pp 821–833, 2007.
- **Asadi Zarch, M.A.; Malekinezhad, H.; Mobin, M.H. et al,** Drought Monitoring by Reconnaissance Drought Index (RDI) in Iran, *Water Resour Manage.*2011
- **Pashiardis, S. et Michaelides, S. :** Implementation of the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Reconnaissance Drought Index (RDI) for Regional Drought Assessment: A case study for Cyprus, *Meteorological Service, Nicosia, Cyprus. European Water* ,2008.
- **Niemeyer, S.:** New drought indices In López-Francos (ed.). *Drought management: scientific and technological innovations.* Zaragoza: CIHEAM, pp 267-274, 2008.
- **Tigkas, D. H.; Vangelis ; Tsakiris, G.:** Regional Drought Assessment Based on the Reconnaissance Drought Index (RDI), *Water Resour Manage* ,2007.
- **Ikeda, N.; Watanabe, S., 1989:** Stochastic differential equations and diffusion processes. Kodansha North Holland, 2nd Edition.
- **Ksendal, B., 1998:** Stochastic differential equations: an introduction with applications, 5th Edition, Springer verlag.
- **Benth, F. E.; Benth, J. S.:** “The volatility of temperature and pricing of weather derivatives,” *Quantitative Finance*, vol. 7, no. 5, pp. 553–561, 2007.
- **Alaton, P.; Djehiche, B.; Stillberger, D.:** “On modeling and pricing weather derivatives,” *Applied Mathematical Finance*, vol. 9, pp. 1–20, 2002.
- **Kahl, C. :** Positive numerical integration of stochastic differential equations, Diploma Thesis, University of Wuppertal,Wuppertal, Germany, 2004.
- **Han, S.:** Numerical solution of stochastic differential equations, M.S. thesis, University of Edinburgh and Heriot-Walt University, Scotland, UK, 2005.
- **Roche,M. :**Hydrologie de surface, Office de la recherche scientifique et technique outre-mer(Paris) ,1963.

Références Bibliographique

- **Kaabeche, M. ,1996** : Les relations climat-végétation dans le bassin du Hodna (Algérie), *Acta Botanica Gallica*, 143:1, 85-94.
- **Belagoune, F. ; Boutoutaou, D.:** "Hydrological Study of Watersheds Arid and Semi-Arid South-Eastern Algeria (Chott Melghir, Chott El Hodna and Highlands Constantine)," *International Journal of Geosciences*, Vol. 4 No. 10, 2013, pp. 1483-1490.
- **Bounani, A., 2004** : Hydrologie, transport solide et modélisation, Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie).

Annexes

ملخص:

تعد ظاهرة الجفاف مشكلة عالمية تهدد جميع مناطق العالم لما يسببه من ضرر للكائنات، حيث تسعى جميع الدول إلى إجراء دراسات حول هذه الظاهرة للحد منها ومكافحتها.

في هذا العمل قمنا بدراسة ظاهرة الجفاف بشكل عام وفي الجزائر ومنطقة الحضنة بشكل خاص، وبفضل ذلك تمكنا من استخراج البيانات التي ساعدتنا على التنبؤ بالجفاف بطرق عشوائية للمنطقة. الكلمات المفتاحية: حوض واد القصب؛ الجفاف؛ ARIMA.

Abstract:

The phenomenon of drought is a global problem that threatens all regions of the world due to the damage it causes to creatures, as all countries seek to conduct studies on this phenomenon in order to reduce and combat it.

In this work, we have studied the phenomenon of drought in general and in Algeria and the brood region in particular. Thanks to this, we were able to extract data that helped us predict drought by random methods of the area.

Keywords:

Wadi el-ksob watershed; Drought; ARIMA

Résume :

Le phénomène de la sécheresse est un problème mondial qui menace toutes les régions du monde en raison des dommages qu'il cause aux créatures, car tous les pays cherchent à mener des études sur ce phénomène afin de le réduire et de le combattre.

Dans ce travail, nous avons étudié le phénomène de la sécheresse en général et en Algérie et la région de couvain en particulier Grâce à cela, nous avons pu extraire des données qui nous ont aidés à prédire la sécheresse par des méthodes aléatoires de la zone.

Mots clés :

Bassin versant de oued el-ksob ; Sécheresse ; ARIMA