



Université Sidi Mohammed Ben Abdellah
Faculté des Sciences Dhar El Mahraz- Fès
Centre d'Etudes Doctorales
"Sciences et Technologies"

Formation Doctorale : *Ressources Naturelles, Environnement et Développement Durable (RNE2D)*
Discipline : *Eau et Environnement*
Spécialité : *Géosciences et Ressources Naturelles*
Laboratoire : *Laboratoire de Géosystèmes – Environnement et Développement Durable*

THESE DE DOCTORAT

Présentée par
Abdelhamid EL IBRAHIMI

Apport des indices de sévérité et techniques de l'intelligence artificielle pour le suivi de la sécheresse météorologique en rapport avec la nappe phréatique superficielle : cas de la Plaine de Saïss (Nord du Maroc)

Soutenue le 05/01/2019 devant le jury composé de :

Pr. BOUSHABA Abdellah	Faculté des Sciences Dhar Mahraz Fès	Président
Pr. LABBASSI Kamal	Faculté des Sciences El Jadida	Rapporteur
Pr. EL FALEH El Mâti	Faculté des Sciences Meknès	Rapporteur
Pr. DRIDRI Abdallah	Faculté des Sciences Dhar Mahraz Fès	Rapporteur
Pr. GOURARI Lahcen	Faculté des Sciences Dhar Mahraz Fès	Examineur
Pr. BAALI Abdennasser	Faculté des Sciences Dhar Mahraz Fès	Directeur de thèse

Remerciements

Avant tout je remercie Dieu de m'avoir donné la volonté et le courage pour la réalisation de ce travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude comme il se doit aux nombreuses personnes qui ont contribué à son élaboration d'une manière directe ou indirecte.

J'exprime en premier lieu ma profonde gratitude à monsieur Abdennasser BAALI, mon directeur de thèse, pour son encadrement et ses conseils. Merci pour sa grande chaleur humaine et pour sa disponibilité quotidienne. Merci pour votre temps, vos questions et vos critiques qui m'ont fait progresser. Vous étiez toujours attentif et disponible malgré vos nombreuses charges. Votre compétence, rigueur scientifique et clairvoyance m'ont beaucoup appris.

J'exprime aussi mes remerciements les plus sincères à monsieur Abdellah BOUSHABA qui m'a honoré en acceptant de présider le jury de ma thèse. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Mes remerciements les plus chaleureux s'adressent également à monsieur Kamal LABBASSI professeur à la faculté des sciences, université Chouaïb Doukkali d'El Jadida, d'avoir eu l'amabilité de juger ce travail en tant que rapporteur et d'avoir fait le déplacement d'El Jadida afin d'assister à ma soutenance. Qu'il daigne accepter ma reconnaissance pour l'intérêt qu'il a porté à cette thèse.

J'exprime aussi mes remerciements à monsieur El Mâti EL FALEH, professeur à la faculté des sciences, université Moulay Ismaïl Meknès d'avoir accepté d'être rapporteur de thèse et d'avoir fait le déplacement de Meknès afin d'assister à ma soutenance. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

Monsieur Abdallah DRIDRI, professeur à la faculté des sciences Dhar Mahraz Fès, a aimablement accepté de juger ce travail. Je tiens à lui exprimer mes remerciements les plus sincères pour l'intérêt qu'il a porté à cette thèse.

Monsieur Lahcen GOURARI, professeur à la faculté des sciences Dhar Mahraz Fès, m'a fait l'honneur de faire partie des membres du jury de cette thèse. Qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude et de mes remerciements les plus sincères.

Mes remerciements vont aussi aux responsables de l'Agence du Bassin Hydraulique du Sebou.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à toute l'équipe d'enseignants et personnel du département de Géologie de la faculté des sciences Dhar Mahraz Fès au sein de laquelle j'ai effectué mes travaux de recherche.

Dédicace

***Je dédie ce modeste travail à
Mes parents, ma femme
Ma fille Sarae
Mes frères et mes sœurs
Mes amis
A tous ceux qui ont contribué de près
ou de loin à ma formation***

Résumé

Ces dernières décennies, une démographique galopante et un essor économique, particulièrement agricole et industriel, ont lieu dans la Plaine de Saïss (Nord du Maroc). Ceux-ci ont entraîné l'accroissement des besoins en eau d'une part et ont provoqué une menace en terme quantité et qualité des ressources en eaux d'autre part. Afin de mieux gérer une telle situation, la connaissance et la maîtrise des facteurs climatiques et l'identification de la sensibilité des eaux souterraines vis à vis des variations climatiques s'avèrent un besoin primordial. Le choix du thème de recherche a été guidé par le souci de mettre en évidence la variabilité spatio-temporelle des extrêmes pluviométriques à différentes échelles de temps dans un cadre qui vise à mieux comprendre les effets et le fonctionnement du phénomène de la sécheresse météorologique et son lien avec les ressources hydrogéologiques dans la Plaine de Saïss. Pour ce faire, diverses données climatiques sur des périodes allant de 32 à 36 ans et des outils de mesure et méthodes (indices de sécheresse, tests de détection des ruptures, télédétection, Système d'Information Géographique (SIG), modélisation et prédiction par les techniques d'intelligence artificielles) ont été appliqués. Les divers traitements appliqués ont mis en évidence une variabilité pluviométrique caractérisée par une irrégularité et alternance des périodes humides, normales et sèches et un régime de précipitations caractérisé par des ruptures. La variabilité des paramètres climatiques a eu des conséquences néfastes sur le bilan hydrologique et a affecté la recharge souterraine en eau pendant les périodes de déficit pluviométrique. L'évaluation de la sécheresse par des indices de sévérité tels que CMI, SPI, RDI et WSVI a montré que ce phénomène est assez fréquent et récurrent au cours des dernières décennies dans la Plaine de Saïss et que l'Oscillation du Nord Atlantique (ONA) pourrait être derrière ce changement. L'utilisation des images satellitaires et les indices de télédétection tels que NDVI, NDWI et NDSI a mis en évidence une modification de l'occupation du sol marquée par une réduction des sols nus contre une extension importante des zones d'arboricultures et des espaces industrialisés. Cette augmentation de surfaces végétales évoque le problème de sécheresse et augmente la pression sur les ressources hydriques de la Plaine. En effet le suivi des niveaux piézométriques de la nappe phréatique superficielle de la Plaine de Saïss a manifesté l'effet négatif de la sécheresse. Les modèles de prédiction basée sur les modèles des réseaux de neurones artificiels (RNA ou ANN), le système d'inférence neuro-flou organisé en réseau adaptatif (ANFIS) et le support vecteurs machines (SVM) ont particulièrement montré leur performance et leur robustesse à simuler et prédire le phénomène de sécheresse et son interaction avec le niveau des eaux souterraines. En vue d'améliorer la recharge artificielle et la préservation des réserves de la nappe phréatique de la Plaine de Saïss, des sites convenables à l'emplacement des barrages souterrains ou lacs collinaires ont été proposés.

Mots clés : sécheresse, nappe phréatique, indices de sévérité, indices de télédétection, modèles de prédiction, recharge artificielle, Plaine de Saïss, Maroc

Abstract

In recent decades, a galloping population and an economic boom, particularly agricultural and industrial, take place in the Saïss Plain (Northern Morocco). These have led to increased water needs on the one hand and have caused a threat in terms of quantity and quality of water resources on the other hand. In order to better manage such a situation, knowledge and control of climatic factors and identification of the sensitivity of groundwater to climate variations are a primary need. The choice of the research theme was guided by the desire to highlight the spatial-temporal variability of extreme rainfall at different time scales in a framework that aims to better understand the effects and functioning of the phenomenon of meteorological drought and its link with hydrogeological resources in the plain of Saïss. To do this, various climatic data over periods ranging from 32 to 36 years and measurement tools and methods (drought indices, fracture detection tests, remote sensing, Geographic Information System (GIS), modeling and prediction by artificial intelligence techniques) were applied. The various treatments applied have revealed a rainfall variability characterized by an irregularity and alternation of wet, normal and dry periods and a precipitation regime characterized by ruptures. The variability of climatic parameters has had adverse consequences on the water budget and has affected underground recharge in water during periods of rainfall deficit. The evaluation of the drought by severity indices such as CMI, SPI, RDI and WSVI has shown that this phenomenon is quite frequent and recurrent during the last decades in the Plain de Saïss and that the North Atlantic Oscillation (ONA) could be behind this change. The use of satellite images and remote sensing indices such as NDVI, NDWI and NDSI has revealed a change in land use marked by a reduction of bare soil against a significant expansion of arboricultural areas and industrialized areas. This increase in vegetal surface evokes the problem of drought and increases the pressure on the water resources of the Plain. Indeed, the monitoring of the piezometric levels of the surface water table of the Plain de Saïss showed the negative effect of the drought. Prediction models based on Artificial Neural Networks (ANN or ANN) models, adaptive network-based neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and machine vector support (SVM) have particularly demonstrated their performance and robustness. to simulate and predict the drought phenomenon and its interaction with the groundwater level. In order to improve the artificial recharge and the preservation of groundwater reserves of the Plain de Saïss, suitable sites for the location of underground dams or hill lakes have been proposed.

Key words: *drought, water table, severity indices, remote sensing indices, prediction models, artificial recharge, Saïss Plain, Morocco*

ملخص

في العقود الأخيرة، عرف سهل سايس (شمال المغرب) نموا سريعا في عدد السكان وازدهارا اقتصاديا، خاصة القطاعين الزراعي والصناعي. وقد أدى ذلك إلى الزيادة في الحاجيات المائية من جهة وتسبب في تهديد الموارد المائية من حيث الكمية والجودة من ناحية أخرى. من أجل تدبير جيد لمثل هذه الوضعية، تبقى معرفة العوامل المناخية والتحكم فيها وتحديد حساسيتها للمياه الجوفية حاجة أساسية لها. وقد استهدف موضوع البحث الرغبة في تسليط الضوء على التغير المكاني والزمني للأمطار الشديدة في نطاقات زمنية مختلفة في إطار يهدف إلى فهم أفضل لآثار ظاهرة الجفاف على التساقطات ووظائفها وارتباطها بالموارد الهيدروجيولوجية في سهل سايس. للقيام بذلك، تم تطبيق العديد من البيانات المناخية على فترات تتراوح بين 32 إلى 36 سنة وأدوات القياس وطرق القياس (مؤشرات الجفاف، اختبارات كشف الانقطاعات، الاستشعار عن بعد، نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، النمذجة والتنبؤ بتقنيات الذكاء الاصطناعي). وقد كشفت المعالجات المختلفة المستخدمة عن تقلب في سقوط الأمطار التي تتميز بعدم انتظام وتناوب الفترات الرطبة والعادية والجافة ونظام هطول ضعيف. وكان لتغير المؤشرات المناخية أثرا سلبيا على كمية المياه وأثر على التغذية الجوفية للمياه خلال فترات تراجع سقوط الأمطار. لقد أظهر تقييم فترات الجفاف حسب مؤشرات الشدة مثل CMI و SPI و RDI و WSVI أن هذه الظاهرة متكررة خلال العقود الأخيرة في سهل سايس وأن التذبذب الشمالي الأطلسي (ONA) يمكن أن يكون وراء هذا التغير. كشف استخدام صور الأقمار الصناعية ومؤشرات الاستشعار عن بعد مثل NDVI و NDWI و NDSI عن تغير في استخدام الأراضي يتميز بتراجع للتربة العارية مقابل توسع كبير في مناطق التشجير والمناطق الصناعية. هذه الزيادة في الغطاء النباتي تثير مشكلة الجفاف وتزيد من الضغط على الموارد المائية في السهل. وبالفعل، فإن رصد وقياس مستويات المياه الجوفية السطحية لسهل سايس أظهر التأثير السلبي للجفاف. وقد أثبتت نماذج التنبؤ المعتمدة بنماذج الشبكات العصبية الاصطناعية (RNA) أو (ANN)، واستنباط نظام الاستدلال العصبي المبني على الشبكة (ANFIS)، وطريقة دعم الانحدار (SVR) بشكل خاص على أدائها وقوتها لمحاكاة وتوقع ظاهرة الجفاف وتفاعلها مع مستوى المياه الجوفية. ومن أجل تحسين التغذية الاصطناعية والحفاظ على احتياطات المياه الجوفية في سهل سايس، تم اقتراح مواقع مناسبة لإنشاء سدود أو بحيرات.

الكلمات المفتاح: الجفاف، فرشة مائية، مؤشرات الشدة، مؤشرات الاستشعار عن بعد، نماذج التنبؤ، التغذية الاصطناعية، سهل ساس، المغرب.

Table des matières

INTRODUCTION	10
PARTIE I : CONTEXTE GENERAL ET CLIMATOLOGIE DE LA PLAINE DE SAÏSS	14
Chapitre 1 : Contexte général de la Plaine de Saïss.....	15
I. Cadre géographique et géologique	16
1. Cadre géographique	16
1.1. Situation géographique.....	16
1.2. Cadre humain	17
1.3. Aperçu économique	17
2. Cadre géologique et géomorphologique	18
2.1. Géologie.....	18
2.2. Géomorphologie	23
II. Cadre hydrographique et hydrogéologique	24
1. Caractéristiques physiographiques	24
2. Hydrographie	27
2.1. Plaine d'Aïn Taoudate.....	27
2.2. Plaine de Saïss.....	28
3. Hydrogéologie	29
3.1. Définition et évolution du terme « nappe phréatique »	30
3.2. Caractéristiques géologiques et hydrodynamique de la nappe phréatique.....	30
III. Conclusion	34
Chapitre 2 : Climatologie de la Plaine de Saïss.....	35
I. Acquisition et présentation des données climatiques.....	36
1. Présentation des données	37
2. Etude d'homogénéité des données.....	37
2.1. Estimation des données manquantes	38
2.2. Méthode du double cumul.....	38
II. Etude des paramètres climatiques	40
1. Pluviométrie.....	40
1.1. Variations annuelles et mensuelles des précipitations	40
1.2. Répartition des précipitations saisonnières.....	44
2. Température.....	45
2.1. Variations des températures moyennes annuelles et mensuelles.....	46
2.2. Anomalies des températures annuelles.....	47
3. Caractérisation du climat	47
4. Estimation de l'évapotranspiration	51

4.1. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP).....	51
4.2. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)	57
5. Bilan hydrique	58
5.1. Estimation du bilan hydrique par la méthode de Thornthwaite	59
5.2. Interprétation du bilan hydrique	60
5.3. Comparaison des résultats des ETR.....	60
5.4. Répartition de l'excédent.....	61
6. Vents.....	62
III. Conclusion	63
PARTIE II : ETUDE DE LA SECHERESSE METEOROLOGIQUE DANS LA PLAINE DE SAÏSS.....	64
Chapitre 1 : Généralités	65
I. Changements climatiques et eaux souterraines	66
1. Causes de changements climatiques	66
2. Influence climatique sur la ressource en eau souterraine	67
II. Notion de la sécheresse	68
1. Définition.....	68
2. Indices.....	69
3. Indices de sévérité de la sécheresse	70
4. Causes de la sécheresse	71
4.1. Oscillation nord atlantique (ONA).....	71
5. Impact de la sécheresse.....	72
5.1. Problème d'approvisionnement en eau	72
5.2. Impact sur le secteur agricole et l'élevage.....	73
Chapitre 2 : Étude et suivi spatio-temporel de la sécheresse météorologique.....	74
I. Détection des séquences de sécheresse météorologique.....	75
1. Méthodes de détection de ruptures	75
2. Résultats et analyse.....	76
II. Etude de la persistance de sécheresse et sa relation avec l'ONA.....	78
1. Notion des modes de télé-connections	78
2. Corrélations de l'indice SPI avec le mode de l'indice de l'ONA	80
2.1. Analyse de composites	80
2.2. Choix des intervalles.....	82
III. Evaluation spatio-temporelle des séquences de sécheresse	85
1. Identification et analyse des séquences par CMI.....	85
1.1. Méthodologie	85
1.2. Résultats et interprétation.....	86
2. Identification et analyse des séquences par SPI.....	89
2.1. Méthodologie	89

2.2.	<i>Résultats et interprétation</i>	91
3.	Identification et analyse des séquences par RDI	98
3.1.	<i>Méthodologie</i>	98
3.2.	<i>Résultats et interprétation</i>	113
4.	Identification et analyse des séquences par WSVI	118
4.1.	<i>Méthodologie</i>	118
4.2.	<i>Résultats et interprétation</i>	119
5.	Comparaison des évolutions des séquences par RDI, SPI et WSVI.....	123
5.1.	<i>Méthodologie</i>	123
5.2.	<i>Résultats et interprétations</i>	124
5.3.	<i>Discussion et analyse</i>	128
5.4.	<i>Conclusion</i>	129
	Chapitre 3 : Apport de la télédétection pour le suivi de la sécheresse météorologique	130
I.	Télédétection du couvert végétal	131
1.	Généralités	131
2.	Principe et domaines d'application.....	132
3.	Traitements	132
4.	Analyse d'une image	133
4.1.	<i>Classification non supervisée</i>	133
4.2.	<i>Classification supervisée</i>	133
II.	Matériels et méthodes	133
1.	Approche analytique « analyse visuelle »	133
2.	Critères de choix des images satellitaires	133
3.	Classification supervisée « Maximum de vraisemblance » (SMV).....	134
4.	Utilisation des indices en télédétection.....	135
5.	Détection des changements (Change detection)	138
III.	Application des indices et détection des changements à la Plaine de Saïss	139
1.	Analyse des images satellitaires	139
2.	Classification et amélioration de la composition colorée	140
3.	Détermination des classes et validation des données de terrain	141
4.	Résultat de la classification	141
5.	Application des indices.....	147
5.1.	<i>Variabilité spatio-temporelle de la végétation par NDVI</i>	147
5.2.	<i>Variabilité spatio-temporelle des surfaces d'eau par NDWI</i>	150
5.3.	<i>Variabilité spatio-temporelle du sol par NDSI</i>	153
6.	Application de la technique « Change detection »	156
IV.	Discussion	158
V.	Conclusion	159

Chapitre 4 : Prédiction de la sécheresse météorologique par application des techniques de l'intelligence artificielle	160
I. Approches et méthodes utilisées	161
1. Présentation de la méthode des Réseaux de Neurones Artificiels (RNA ou ANN)	161
2. Systèmes Adaptatifs d'Inférences Neuro-Floue (ANFIS)	164
3. Machines à Vecteurs de Support (SVM) : Support Vector Regression (SVR)	168
4. Régression Linéaire Multiple (RLM)	168
5. Transformée en Ondelette Discret (DWT)	169
5.1. Ondelette Continue Transformée (CWT)	170
5.2. Transformée en Ondelettes Discrète (DWT)	170
II. Application de la méthode du RNA	171
1. Méthodologie d'application	171
2. Résultats et analyse	175
3. Discussion	181
III. Développement d'un modèle hybride	181
1. Données et méthodes	182
1.1. Données	182
1.2. Méthodes	183
2. Conception des modèles	186
3. Résultats et analyses	187
3.1. Optimisation des performances des modèles ANN-MLP et ANFIS	187
3.2. Préviation des différents modèles	190
3.3. Prévisions des séries SPI-3 et SPI-12	190
4. Discussion	197
5. Conclusion	197
PARTIE III : DYNAMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES FACE A LA SECHERESSE	199
Chapitre 1 : Réponse des nappes phréatiques superficielles aux extrêmes pluviométriques	200
I. Effet des variations pluviométriques sur les niveaux piézométriques	201
1. Méthodes et matériels	201
2. Résultats et analyse	202
2.1. Variation du niveau piézométrique	202
2.2. Évolution des précipitations et de la piézométrie	204
3. Discussion et conclusion	206
II. Estimation de la recharge des eaux souterraines par SPI	206
1. Problématique de la recharge en zone semi- aride	206
1.1. Mécanismes de recharge	206
1.2. Processus intervenant dans la recharge	207
2. Identification de la relation entre SPI et la recharge des eaux souterraines	207

2.1.	<i>Méthodologie</i>	207
2.2.	<i>Résultats et analyse</i>	208
2.3.	<i>Discussion et conclusion</i>	216
Chapitre 2 : Modélisation Hydrodynamique des eaux souterraines		217
I.	Évaluation des performances des différents réseaux de neurones	218
1.	Apprentissage avec différentes architectures RNA	218
2.	Apprentissage avec différents algorithmes	220
3.	Architecture de réseau	220
II.	Prédiction du niveau des eaux souterraines	226
1.	Méthodologie.....	227
2.	Résultats et discussion	236
3.	Conclusion	240
Chapitre 3 : Localisation de zones de recharge induite à l'aide d'un système d'information géographique ...		242
I.	Barrages souterrains	243
1.	Concept et principe	243
2.	Conditions de l'emplacement	243
II.	Matériel et méthode	244
1.	Traitement des données et résultats	245
1.1.	<i>Géologie de surface</i>	246
1.2.	<i>Géomorphologie</i>	246
1.3.	<i>Hydrographie</i>	246
1.4.	<i>Hydrogéologie</i>	247
III.	Résultats et interprétation	248
1.	Élaboration de support unique	248
2.	Réalisation de carte de Perméabilité	248
IV.	Discussion	250
V.	Conclusion	250
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE		251
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		255
ANNEXES		270

Liste des figures

Figure 1 : Situation géographique de la Plaine de Saïss	16
Figure 2 : Cadre géologique de la Plaine de Saïss (Margat, 1964).....	19
Figure 3 : Exemples d'unités composant le bassin de Fès-Meknès (Fassi, 1999).....	20
Figure 4 : Log synthétique des différentes formations géologiques de la Plaine de Saïss (Charroud, 2007).....	21
Figure 5 : Variation de l'épaisseur des formations géologiques plio-quaternaires de la Plaine de Saïss	22
Figure 6 : Principaux linéaments structuraux de la Plaine de Saïss (Amraoui, 2005).....	23
Figure 7 : Bloc diagramme montrant la topographie de la Plaine de Saïss dans son contexte régional	24
Figure 8 : Courbe hypsométrique de la Plaine de Saïss.....	25
Figure 9 : Distribution des altitudes dans la Plaine de Saïss	26
Figure 10 : Réseau hydrographique de la Plaine de Saïss	28
Figure 11 : Colonnes stratigraphiques de certains puits de la Plaine de Saïss (Benaabidate, 2000).	30
Figure 12 : Carte piézométrique de la nappe phréatique de la Plaine de Saïss (Benaabidate, 1998)	32
Figure 13 : Carte piézométrique de la nappe phréatique de la Plaine de Saïss en 2003(El Msaddaq, 2003)	33
Figure 14 : Situation géographique des stations météorologiques dans la Plaine de Saïss	36
Figure 15 : Homogénéité de la série de mesures de la station Fès-DRH.....	39
Figure 16 : Homogénéité de la série de mesures de la station d'Ain Bittit	39
Figure 17 : Homogénéité de la série de mesures de Fès-Saïss	39
Figure 18: Précipitations moyennes annuelles de la station Fès-DRH	41
Figure 19: Précipitations moyennes mensuelles de la station Fès-DRH	41
Figure 20: Précipitations moyennes annuelles de la station Ain Bittit	41
Figure 21: Précipitations moyennes mensuelles de la station Ain Bittit	42
Figure 22: Précipitations moyennes annuelles de la station Fès-Saïss	42
Figure 23: Précipitations moyennes mensuelles de la station Fès-Saïss	43
Figure 24: Précipitations annuelles des trois stations météorologiques pour la période (1979-2014)	43
Figure 25: Comparaison des précipitations moyennes mensuelles des trois stations pour la période (1979-2014).....	44
Figure 26: Description statistique de la pluviométrie mensuelle pour les trois stations.....	44
Figure 27 : Répartition saisonnière des précipitations dans les trois stations.....	45
Figure 28: Températures moyennes annuelles à la station Fès-Saïss pour la période (1978-2014)	46
Figure 29: Températures moyennes mensuelles à la station Fès-Saïss pour la période (1978-2014)	46
Figure 30: Températures annuelles à la station Fès-Saïss pour la période (1978-2014)	47
Figure 31: Courbe ombrothermique de la station Fès-Saïss pour la période (1978-2014).....	47
Figure 32: Climats du Maroc sur la période 1961-2005 en utilisant l'indice de Martonne.....	48
Figure 33 : Estimation d'indice d'aridité mensuel pour la station Fès-Saïss.....	49
Figure 34: Climagramme d'Emberger de la station Fès-Saïss	50
Figure 35: ETP annuelle estimé par la formule de FAO Penman-Monteith à la station Fès-Saïss	53
Figure 36 : ETP annuelle estimée par la formule de FAO Penman-Monteith pour la période.....	53
Figure 37: ETP mensuelle estimée par la formule de Thornthwaite de la station Fès-Saïss (1978-2016)	55
Figure 38: ETP annuelle estimée par la formule de FAO Penman-Monteith de la station Fès-Saïss (1978-2016).....	55
Figure 39: Evolution de l'ETP annuelle estimée par la formule de Hargreaves de la station Fès-Saïss (1978-2016) .	56
Figure 40: ETP annuelle estimée par la formule de Hargreaves de la station Fès-Saïss (1978-2016)	57
Figure 41: ETP annuelle estimée par les différentes méthodes de la station Fès-Saïss (1978-2016).....	57
Figure 42: Bilan de Thornthwaite pour la station Fès-Saïss pour la période (1978-2014).....	60
Figure 43: Représentation d'ETP, ETR, et P du bilan hydrique de Thornthwaite	60
Figure 44: ETR calculée par différentes méthodes.....	61
Figure 45: Répartition des précipitations à la station Fès-Saïss	62

Figure 46: Représentation schématique des liens entre les différents types de sécheresse	69
Figure 47: Phases de l'ONA (Christophe, 2004).....	72
Figure 48 : Variabilité annuelle de l'indice d'oscillation nord-atlantique pour la période 1979-2014	80
Figure 49: Evolution des indices de l'ONA avec l'indice SPI des précipitations de Fès-DRH à l'échelle annuelle ...	81
Figure 50 : Evolution des indices de l'ONA avec SPI de Fès-Saïss pour la période de 1979-2014	81
Figure 51: Evolutions des indices de l'ONA avec SPI d'Ain Bittit pour la période de 1979-2014	82
Figure 52: Ajustement à une loi normale des VCR de l'indice de l'ONA	82
Figure 53: Ajustement à une loi normale des VCR de pluviométrie pour la station Fès-DRH.....	83
Figure 54: Ajustement à une loi normale des VCR de pluviométrie pour la station Ain Bittit	83
Figure 55: Ajustement à une loi normale des VCR de pluviométrie pour la station Fès-Saïss	83
Figure 56: Représentation des seuils de l'indice de l'ONA.....	84
Figure 57 : Représentation des seuils de VCR des totaux annuels de la pluviométrie	84
Figure 58: Schéma expliquant les événements de sécheresse (Rossi & al, 1992).....	85
Figure 59: Valeurs annuelles moyennes du CMI de la station Fès-Saïss sur la période 1973-2014	87
Figure 60: Fréquence du CMI annuel durant la période 1973-2014 de la station Fès-Saïss	87
Figure 61: Evolution du CMI durant la période 1973- 2014 à la station Fès-Saïss.....	87
Figure 62: Répartition spatiale des valeurs du CMI sur la période 1978-2014	89
Figure 63: Valeurs de SPI-3 et analyse des tendances pour la station Fès-DRH pour la période	91
Figure 64: Valeurs de SPI-3 et analyse des tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014	92
Figure 65: Valeurs de SPI-6 et analyse des tendances pour la station Fès-DRH pour la période	92
Figure 66: Valeurs de SPI-6 et analyse des tendances pour la station Ain Bittit pour la période	93
Figure 67: Valeurs de SPI-9 et analyse des tendances pour la station Fès-DRH pour la période 1979-2014	93
Figure 68: Valeurs de SPI-9 et analyse des tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014	93
Figure 69 : Valeurs de SPI-12 et analyse des tendances pour la station Fès-DRH pour la période 1979-2014	94
Figure 70: Valeurs de SPI-12 et analyse des tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014	94
Figure 71: Répartition spatiale des valeurs moyennes du SPI dans la Plaine de Saïss.....	96
Figure 72: Durées des séquences de sécheresses enregistrées durant 1978-2014 pour les trois stations	97
Figure 73: Fréquences des années sèches, normales et humides des trois stations durant 1978-2014.....	98
Figure 74: Fréquences des épisodes de sécheresse des trois stations au cours de la période 1978-2014.....	98
Figure 75: Corrélation entre ETP et P annuels de la station Fès-DRH pour la période 1978-2014	99
Figure 76: Calcul de α_k annuel normalisé pour la station Ain Bittit pour la période 1978 – 2014	100
Figure 77 : Valeurs de RDI-12 pour la station Ain Bittit pour la période 1978 – 2014	100
Figure 78: RDI annuel normalisé pour la station Ain Bittit pour la période 1978 – 2014	101
Figure 79: Évapotranspiration potentielle calculée par diverses méthodes pour la période 1979-2014.....	102
Figure 80: Diagramme d'indicateurs statistiques de performance des valeurs de RDIst-annuel	103
Figure 81: Valeurs de RDIst annuelles calculées pour les différentes méthodes de ETP	103
Figure 82: Valeurs de RDIst calculées pour les deux périodes de 6 mois (Oct-Mar et Avr-Sep) pour Fès-Saïss.....	104
Figure 83: Indicateurs statistiques de performance des valeurs de RDIst calculées pour les périodes de 6 mois	105
Figure 84: Valeurs de RDIst calculées pour les périodes de 3 mois pour la station Fès-Saïss.....	106
Figure 85: Performance des valeurs de RDIst calculées pour les périodes de 3 mois.....	107
Figure 86: Estimation de RDI modifiée (RDIe) avec deux méthodes du Bureau de Reconstitution et de la FAO ...	111
Figure 87: Valeurs de RDI originale et modifiée pour la station Fès-DRH pour quatre périodes de référence	112
Figure 88: Valeurs de RDI-3 et tendances pour la station Fès-DRH pour la période 1979-2014	114
Figure 89 : Valeurs de RDI-3 et tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014	114
Figure 90: Valeurs de RDI-6 et tendances pour la station Fès-DRH pour la période 1979-2014	114
Figure 91: Valeurs de RDI-6 et tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014	115
Figure 92: Valeurs de RDI-9 et tendances pour la station Fès-DRH pour la période 1979-2014	115
Figure 93: Valeurs de RDI-9 et tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014	116

Figure 94: Valeurs de RDI-12 et tendances pour la station Fès-DRH pour la période 1979-2014	116
Figure 95: Valeurs de RDI-12 et tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014	116
Figure 96: Caractéristiques de la sécheresse au niveau des trois stations pour la période 1979-2014	118
Figure 97: Valeurs de WSVI-3 et tendances pour la station Fès-DRH pour la période 1979-2014.....	119
Figure 98: Valeurs de WSVI-3 et tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014.....	120
Figure 99: Valeurs de WSVI-6 et tendances pour la station Fès-DRH pour la période 1979-2014.....	120
Figure 100: Valeurs de WSVI-6 et tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014.....	120
Figure 101 : Valeurs de WSVI-9 et tendances pour la station Fès-DRH pour la période 1979-2014.....	121
Figure 102: Valeurs de WSVI-9 et tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014.....	121
Figure 103: Valeurs de WSVI-12 et tendances pour la station Fès-DRH pour la période 1979-2014.....	122
Figure 104 : Valeurs de WSVI-12 et tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014.....	122
Figure 105 : Comparaison entre les valeurs de r et RMSE du SPI et de RDI	124
Figure 106: Valeurs du coefficient de corrélation entre WSVI, SPI et RDI pour les stations Fès-DRH	125
Figure 107: Comparaison des valeurs de WSVI et RDI pour la station Fès-DRH.....	126
Figure 108: Comparaison des valeurs de WSVI et SPI pour la station Ain Bittit	127
Figure 109 : Approche méthodologique de classification	135
Figure 110: Variation de NDVI selon l'état de santé de la plante (a : plante saine ; b : plante stressée	136
Figure 111 : Types d'indice de l'eau par différence normalisée (NDWI)	137
Figure 112 : Organigramme méthodologique de la détection des changements de la couverture terrestre.....	139
Figure 113: Différences visuelles et spectrales entre image corrigée (A) et image brute (B) de la Plaine de Saïss...	140
Figure 114 : Carte d'occupation du sol issue de l'image Landsat MSS 1987.....	142
Figure 115 : Carte d'occupation du sol issue de l'image Landsat TM 2011.....	142
Figure 116 : Carte d'occupation du sol issue de l'image Landsat Oli 2017.....	143
Figure 117: Histogramme des superficies par classes entre 1987 et 2017	146
Figure 118: Evolution des superficies des classes d'occupation du sol de la Plaine de Saïss (1987-2017).....	146
Figure 119: Valeurs de NDVI issues des images Landsat de la Plaine de Saïss entre 1987 et 2017	147
Figure 120: Evolution des surfaces végétales dans la Plaine de Saïss entre 1987 et 2017.....	148
Figure 121: Cartes multi-temporelles du NDVI de la Plaine du Saïss entre 1987 et 2017.....	149
Figure 122: Variation de la signature spectrale de l'eau à partir des images Landsat après traitement	150
Figure 123: Evolution des surfaces de l'eau dans la Plaine de Saïss entre 1987 et 2017	151
Figure 124: Corrélation entre NDWI et les moyennes des hauteurs annuelles des précipitations	151
Figure 125: Cartes multi-temporelles du NDWI de la Plaine de Saïss entre 1987 et 2016.....	152
Figure 126: Variation du NDSI de la Plaine de Saïss des images Landsat entre 1987 et 2017.....	153
Figure 127: Variation des superficies du sol nu de la Plaine de Saïss entre 1987 et 2017	154
Figure 128: Variation des indices NDSI et NDVI de la Plaine de Saïss entre 1987 et 2017.....	154
Figure 129: Cartes multi-temporelles du NDSI de la Plaine de Saïss entre 1987 et 2017	155
Figure 130: Détection du changement du couvert végétal par différence de NDVI entre 1987 et 2003.....	157
Figure 131: Détection du changement du couvert végétal par différence de NDVI entre 2003 et 2010.....	157
Figure 132: Détection du changement du couvert végétal par différence de NDVI entre 2010 et 2017.....	158
Figure 133: Analogie neurone biologique / neurone artificiel.....	162
Figure 134 : Processus de calcul de l'état du neurone artificiel	163
Figure 135 : Modèle d'un système entrée/sortie par la logique floue	165
Figure 136 : Système neuro-flou de Mamdani	166
Figure 137 : Réseau de neuro-flou de takagi-sugeno	167
Figure 138 : Décomposition en ondelette discrète de la série de pluie d'Ain Bittit) pour la période 1986-2014	171
Figure 139: Performances des 4 modèles de réseaux de neurones développés	176
Figure 140: Architecture simplifié du modèle RNA-MLP5.....	176
Figure 141 : Nombre de neurones dans la couche cachée en fonction du MAE de la station Ain Bittit.....	178

Figure 142: Nombre de neurones dans la couche cachée en fonction du MAE de la station Fès-DRH.....	178
Figure 143: Comparaison des critères de performance pour SPI à différentes échelles de temps de.....	178
Figure 144: Comparaison des critères de performance pour SPI à différentes échelles de temps de.....	179
Figure 145: Comparaison des critères de performance pour SPI à différentes échelles de temps de.....	179
Figure 146: Comparaison des critères de performance pour SPI à différentes échelles de temps de.....	179
Figure 147: Comparaison entre les valeurs SPI observées et estimées de la station Fès-DRH.....	180
Figure 148: Séries chronologiques de données mensuelles de précipitations pour la période de 1978-2014.....	182
Figure 149: Paramètres statistiques pour les données d'apprentissage (1978-2004)	183
Figure 150: Paramètres statistiques pour les données d'évaluation (2004 et 2014)	183
Figure 151: Etapes appliquées pour le choix du modèle de la prédiction de la sécheresse	185
Figure 152: Valeurs de r et RMSE pour différents modèles d'ANN-MLP pour des différentes échelles de temps ...	187
Figure 153: Résultats des modèles ANFIS avec le meilleur nombre de fonctions d'appartenance (2 MF).....	188
Figure 154 : Résultats des modèles Wavelet-ANN-MLP pour les différents intervalles de temps prédits.....	189
Figure 155: Résultats des modèles Wavelet-ANFIS pour les différentes étapes de temps prédites.....	189
Figure 156: Résultats de prévisions du modèle WA-ANFIS pour SPI-3 pour 1 mois d'avance (Fès-DRH).....	196
Figure 157: Résultats de prévisions du modèle WA-ANFIS pour SPI-12 pour 1 mois d'avance (Fès-DRH).....	196
Figure 158: Localisation des piézomètres et stations météorologiques dans la Plaine de Saïss.....	202
Figure 159: Résultats des quatre piézomètres dans la Plaine de Saïss durant la période 1980-2014	204
Figure 160: Corrélation entre les variations pluviométriques et les fluctuations piézométriques (Pz1)	205
Figure 161: Corrélation entre les variations pluviométriques et les fluctuations piézométriques (Pz2)	205
Figure 162: Corrélation entre les variations pluviométriques et les fluctuations piézométriques (Pz4)	205
Figure 163: Mécanismes de recharge en zone semi-aride (Lerner, 1997).....	207
Figure 164: Variation du taux de la recharge des eaux souterraines en fonction des précipitations annuelles	209
Figure 165: Variation du taux de ruissellement en fonction des précipitations annuelles pour (1979-2014)	209
Figure 166: Variation des valeurs de (SPI) en fonction de la température et des précipitations	210
Figure 167: Variation des taux de recharge des eaux souterraines en fonction du SPI	210
Figure 168: Variation des taux de recharge des eaux souterraines en fonction du SPI et la température	211
Figure 169: Variation des taux de recharge en fonction de SPI-3 et de la température.....	212
Figure 170: Variation des taux de recharge des eaux souterraines en fonction de SPI-6 et de la température	212
Figure 171: Variation des taux de recharge des eaux souterraines en fonction de SPI-12 et de la température	213
Figure 172 : Variation du ruissellement en fonction de SPI.....	213
Figure 173: Variation des taux de ruissellement de surface en fonction de SPI-1et la température	214
Figure 174 : Variation des taux de ruissellement de surface en fonction de SPI-3 et la température	215
Figure 175: Variation des taux de ruissellement de surface en fonction du SPI-6 et la température	215
Figure 176: Variation des taux de ruissellement de surface en fonction du SPI-12 et la température	216
Figure 177 : Schéma d'un neurone artificiel	219
Figure 178 : Architecture d'un réseau neuronal anticipatrice.....	219
Figure 179: Architecture d'un ELNN.....	219
Figure 180: Architecture d'un RBF	219
Figure 181: Variation des températures et évapotranspiration au cours de la période 1980-2014.....	222
Figure 182 : Valeurs observées et prédites de GWL au niveau de la station Fès-DRH pour G1	224
Figure 183 : Valeurs observées et prédites de GWL au niveau de la station Fès-DRH pour G2	225
Figure 184: Valeurs observées et calculées par FNN-LM pour différentes échelles de temps	225
Figure 185: Répartition des données destinées pour l'apprentissage et le calage des modèles.....	227
Figure 186: Schéma du modèle mathématique adopté pour la prédiction du GWL.....	228
Figure 187: Différentes étapes de l'élaboration du modèle DWT- RNA-PMC	229
Figure 188: Architecture simplifié du modèle RNA-PMC retenu pour la prédiction du GWL	230
Figure 189: Architecture du modèle DWT- RNA-PMC 3 sélectionné pour la prévision de GWL.....	230

Figure 190: Décomposition en ondelette de la série des précipitations de la station Ain Bittit en 2 niveaux	232
Figure 191: Comparaison des valeurs observées et prédites par le modèle de RLM au site de Fès-DRH	233
Figure 192: Comparaison des valeurs observées et simulées par le modèle RLM au site de Fès-DRH	234
Figure 193: Variation du coefficient de détermination R2 en fonction du temps de prévision	235
Figure 194: Comparaison entre les GWL prédites et observés par RLM à différentes échelles de temps	236
Figure 195 : Organigramme des études pour la localisation des sites du barrage souterrain	245
Figure 196 : Carte des isohyètes de la Plaine de Saïss (période 1978-2014)	246
Figure 197: Piézométrie de la nappe phréatique et distribution des points d'eau dans la Plaine de Saïss	247
Figure 198: Carte de perméabilité de surface et l'hydrographie de la Plaine de Saïss	249
Figure 199 : Carte de Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la Plaine de Saïss	249

Liste des tableaux

Tableau 1 : Répartition des superficies irriguées par commune (en ha) situées dans la Plaine de Saïss.....	17
Tableau 2: Caractéristiques physiographiques et morphométriques de la Plaine de Saïss	25
Tableau 3 : Répartition des intervalles d'altitudes en ordres dans la Plaine de Saïss.....	25
Tableau 4: Statistiques descriptives des trois stations d'étude	43
Tableau 5: Distribution des saisons dans l'hémisphère Nord.....	44
Tableau 6 : Précipitations saisonnières des précipitations dans les trois stations en (mm)	45
Tableau 7 : Indice de Martonne pour la station Fès- Saïss	48
Tableau 8: Type de climat par indice de Martonne	48
Tableau 9 : Estimation d'indice d'aridité mensuel de la station Fès-Saïss.....	49
Tableau 10: Estimation de la formule de Louis Emberger pour la station Fès-Saïss	50
Tableau 11: Application de l'Indice de Paul Moral de la Station Fès-Saïss.....	50
Tableau 12 : ETP mensuelle estimée par la formule de Thornthwaite de la station Fès-Saïss.....	54
Tableau 13 : Résultats du bilan hydrique de Thornthwaite pour la station Fès-Saïss (1978-2016)	59
Tableau 14: Valeurs de l'ETR calculées par différentes méthodes	61
Tableau 15 : Répartition des précipitations à la station Fès-Saïss.....	61
Tableau 16: Ruptures détectées par les tests de Khronostat	76
Tableau 17: Résultats de la segmentation d'HUBERT (valeurs en mm) sur la période 1977-2014.....	77
Tableau 18 : Test de rupture par la segmentation d'HUBERT pour la période 1977-2014.....	77
Tableau 19 : Corrélation entre l'ONA et des valeurs SPI des trois stations pour la période 1990-2014.....	80
Tableau 20 : Classification de la sécheresse en rapport avec la valeur du CMI.....	86
Tableau 21: Valeurs annuelles moyennes du CMI de la station Fès-Saïss sur la période 1973-2014.....	86
Tableau 22: Classification de la sécheresse en rapport avec la valeur de l'Indice Standardisé des Précipitations	90
Tableau 23 : Gravité de la sécheresse par SPI-3, SPI -6, SPI -9 et SPI -12 selon le tableau.....	95
Tableau 24 : Intensité des séquences de sécheresses durant la période 1978 à 2014 des trois stations.....	97
Tableau 25 : Durées des séquences de sécheresses durant la période 1978-2014 des trois stations	97
Tableau 26 : Indicateurs statistiques de performance des valeurs de RDIST-annuel.....	103
Tableau 27 : Indicateurs statistiques de performance des valeurs RDIST calculées par différentes méthodes ETP ..	105
Tableau 28 : Performance des valeurs de RDIST calculées pour les périodes de 3 mois	107
Tableau 29 : Estimation des précipitations efficaces basées sur les classes de précipitations mensuelles totales	109
Tableau 30 : Coefficient de corrélation entre le rendement du blé et les versions originale et modifiée de RDI	111
Tableau 31 : Classes de sécheresse pour les valeurs de RDIST	113
Tableau 32 : Gravité de la sécheresse par RDI-3, RDI-6, RDI-9 et RDI-12 (Tsakiris et al.,2007).....	117
Tableau 33 : Caractérisation de la sécheresse pour les trois stations étudiées.....	117
Tableau 34 : Classification de la sécheresse par WSVI (Tsakiris & al., 2007)	119
Tableau 35 : Gravité de la sécheresse par WSVI-3, WSVI-6, WSVI-9 et WSVI-12 selon le tableau de Tsakiris ...	123
Tableau 36 : Corrélation entre les valeurs de SPI et RDI pour les trois stations	124
Tableau 37 : Valeurs du coefficient de corrélation entre WSVI, SPI et RDI pour les stations Fès-DRH.....	125
Tableau 38 : Comparaison des indices calculés pour onze types d'objets de couverture terrestre	138
Tableau 39 : Combinaisons de bandes RVB pour Landsat 4-5 TM et Landsat8 OLI.....	140
Tableau 40 : Exemples de paysages correspondants aux différents types d'occupation du sol dans la Plaine	141
Tableau 41 : Matrice de confusion de classification de l'image TM-Landsat pour l'année 1987.....	144
Tableau 42 : Matrice de confusion de classification de l'image TM-Landsat pour l'année 2011.....	144
Tableau 43 : Matrice de confusion de classification de l'image TM-Landsat pour l'année 2017.....	145
Tableau 44 : Evolution de la superficie d'occupation du sol entre 1987 et 2017(en Km ²).....	145
Tableau 45 : Paramètres de l'évolution des surfaces végétales dans la Plaine de Saïss entre 1987 et 2017	148

Tableau 46 : Paramètres de variation de la superficie de l'eau dans la Plaine de Saïss (1987-201)	150
Tableau 47 : Paramètres de l'évolution de la superficie du sol dans la Plaine de Saïss (1987-2017)	153
Tableau 48 : Classification du modèle par Coefficient de corrélation (Koffi & al., 2006)	173
Tableau 49 : Classification du modèle par critère de Nash-Sutcliffe	174
Tableau 50 : Performances des 5 modèles de réseaux de neurones développés.....	176
Tableau 51 : Prédiction de valeurs SPI à différentes échelles de temps pour le modèle de RNA-MLP5	177
Tableau 52 : Prédiction de valeurs SPI à différentes échelles de temps pour le modèle de RNA-MLP5	177
Tableau 53 : Paramètres statistiques pour les données d'apprentissage (1978-2004).....	182
Tableau 54 : Paramètres statistiques pour les données d'évaluation (2004-2014)	183
Tableau 55 : Paramètres de formation des modèles ANFIS	185
Tableau 56 : Structures des modèles élaborés pour la prévision de la sécheresse.....	186
Tableau 57 : Valeurs de r et RMSE pour différents modèles d'ANN-MLP à différentes échelles de temps	187
Tableau 58 : Résultats des modèles ANFIS avec le meilleur nombre de fonctions d'appartenance (2 MF)	188
Tableau 59 : Résultats des modèles Wavelet-ANN-MLP à différents intervalles de temps prédits	188
Tableau 60 : Résultats des modèles Wavelet-ANFIS pour les différentes échelles de temps	189
Tableau 61 : Résultats de prévision des modèles ANN-MLP, SVR et l'ANFIS pour SPI-3.....	191
Tableau 62 : Résultats de prévision des modèles WA-ANN-MLP, WA-SVR ET WA-ANFIS pour SPI-3.....	192
Tableau 63 : Résultats de prévision des modèles WA-ANN-MLP, WA-SVR ET WA-ANFIS pour SPI-3.....	192
Tableau 64 : Résultats de prévision des modèles ANN-MLP, SVR et l'ANFIS pour SPI -12.....	193
Tableau 65 : Résultats de prévision des modèles WA-ANN-MLP, WA-SVR ET WA-ANFIS pour SPI-12.....	193
Tableau 66 : Résultats de prévision des modèles WA-ANN-MLP, WA-SVR ET WA-ANFIS pour SPI-12.....	194
Tableau 67 : Evolution des valeurs RMSE et R2 par échelle de temps en termes d'apprentissage et du Test	195
Tableau 68: Coordonnées des piézomètres utilisés	201
Tableau 69 : R2 et RMSE de sept réseaux-algorithmes utilisés pour les deux ensembles G2	223
Tableau 70 : Résidus saisonniers (m) pour chacune des sept combinaisons RNA-algorithme	224
Tableau 71 : Modèles évalués pour la prédiction du niveau des eaux souterraines	228
Tableau 72 : Différents combinaisons de modèles DWT-RNA-PMC testés pour la prédiction de GWL	231
Tableau 73 : Résultats des modèles RNA-PMC, DWT- RNA-PMC et RLM pour 1 mois.....	237
Tableau 74 : Résultats des modèles RNA-PMC, DWT- RNA-PMC et RLM pour 2 mois.....	237
Tableau 75 : Résultats des modèles RNA-PMC, DWT- RNA-PMC et RLM pour 3 mois.....	237
Tableau 76 : Comparaison des valeurs de GWL prédites et de GWL observées pour 1 mois d'avance.....	238
Tableau 77 : Performances des modèles pour la prévision de GWL au niveau de Fès-DRH pour 1 mois	239
Tableau 78 : Performances des modèles pour la prévision de GWL au niveau de Ain Bittit pour 1 mois	240
Tableau 79 : Éléments cartographiques de la base de données élaborée.....	244
Tableau 80 : perméabilité et coefficient d'infiltration de certaines roches (Banton, 1987).....	248

Abréviations

ABHS	Agence du Bassin Hydraulique de Sebou
ANFIS	Système d'Inférence Neuro-Flou organisé en réseau Adaptatif
ANN	Artificial Neural Networks
CMI	Crop Moisture Index (indice d'humidité des végétaux)
CWT	Transformée en Ondelettes Continue
DRH	Direction Régionale de l'Hydraulique
DWT	Transformée en Ondelettes Discrète
Eq	Equation
GWL	GroundWater Level (Niveau des eaux souterraines)
NDSI	Indice du Sol par Différence Normalisée
NDVI	Indice de Végétation par Différence Normalisée
NDWI	Indice de l'Eau par Différence Normalisée
RDI	Indice de Sécheresse de Reconnaissance
RNA	Réseaux de Neurones Artificiels
SPI	Indice de Précipitations Itandarisé
SVM	Support Vector Machine
SVR	Support Vector Regression
WSVI	Indice de Stress Hydrique de la Végétation

INTRODUCTION GENERALE

L'eau qui est devenue une denrée rare et précieuse, constitue un élément indispensable pour la vie et l'équilibre des êtres vivants. Elle représente un facteur déterminant pour le développement économique et social d'un pays. Cependant, les sécheresses, comme les autres événements extrêmes, peuvent amoindrir la capacité de développement des sociétés. Du fait de sa précarité et de sa fragilité, voire de son irrégularité, l'eau a une attention très particulière quant à sa mobilisation et sa gestion. Durant les dernières décennies cet élément s'est raréfié et un déficit important s'est fait sentir.

Désormais l'eau devient un enjeu économique, social et donc politique, dont le contrôle et la bonne gestion, à travers des études spécialisées, s'avèrent utiles et même nécessaires. De plus, le climat actuel que nous connaissons est en train de se modifier et se modifiera inévitablement dans le futur (Dragoni & Sukhija, 2008). Dans ce contexte, il devient nécessaire de prendre en compte les circulations souterraines sur toutes les échelles de temps et ainsi de s'intéresser aux phénomènes climatiques qui gouvernent son évolution.

Généralement, les changements climatiques entraîneront le déplacement des zones climatiques et la modification des régimes pluviométriques (GIEC, 2007). Par ailleurs, durant ces dernières décennies, le prolongement des épisodes secs est devenu une réalité dans cette partie du globe, notamment le Maroc (Sebbar & al., 2011). Certains scénarios des changements planétaires indiquent que l'occurrence et l'impact des sécheresses risquent d'augmenter dans les années à venir (Watson & al., 1997). Or, les conséquences sur la ressource en eau souterraine (réponses du système aux perturbations) peuvent se caractériser par des changements en termes de qualité et quantité de la ressource en eau. C'est pourquoi, des études visant à estimer l'impact du changement climatique sur la ressource en eau ont vu le jour (Christensen & al., 2004 ; Wilby & al., 2006 Fowler & al., 2007...).

Une atmosphère plus chaude modifie les schémas de précipitations et eaux une variabilité accrue du climat. Il y aura particulièrement une augmentation en fréquence et en intensité des phénomènes extrêmes, ce qui entraînera une succession plus nette des années de grande sécheresse (Khwaldia, 2014). Plusieurs simulations climatiques indiquent que la sécheresse est apparue dans la majorité des pays du bassin méditerranéen depuis les débuts des années 80 (GIEC, 2007) avec l'apparition fréquente des phénomènes météorologiques extrêmes et catastrophes naturelles (Zeineddine, & al, 2013).

A l'instar des pays de la rive sud méditerranéenne, le Maroc, pays à climat essentiellement semi-aride à aride dans la majeure partie de son territoire, est confronté au problème du développement et de la gestion durable de ses ressources en eau, suite aux faibles précipitations et à la sécheresse qui sévit d'année en année face à des besoins qui ne cessent d'augmenter. En effet, les précipitations totales sur l'ensemble du territoire sont évaluées en année moyenne à près de 150 milliards de m³ sur lesquels près de 29 à 30 milliards de m³ (environ 20%) sont considérées comme pluies efficaces réparties en eaux de ruissellement (20 milliards de m³) et en eaux infiltrées alimentant les nappes (9 milliards de m³) (Riad., 2003). Suite à l'accroissement démographique, le volume mobilisable par habitant qui était de 833 m³ par an en 1994 se réduirait à moins de 500 m³ en l'an 2020, ce qui place le Maroc dans la catégorie des pays pauvres en eau (Riad., 2003).

Au Maroc, les eaux souterraines constituent une part très importante du patrimoine hydraulique. Elles présentent, par rapport aux eaux de surface, des avantages certains sur le plan de la couverture des besoins. A ce propos, il est à noter qu'il existe 32 nappes profondes et plus de 46 nappes superficielles et les ressources en eau souterraines mobilisables sont estimées à 4 milliards de m³, réparties inégalement dans les différentes régions du Royaume (Margat & Zebidi, 1991).

Les précipitations annuelles des années sèches peuvent atteindre des niveaux très faibles peuvent atteindre moins de 60 à 75% de la normale. Les apports pluviométriques sont ainsi inégalement répartis sur le territoire marocain. Les régions du Nord et le bassin versant de Sebou, dont elle fait partie la Plaine de Saïss, bien que n'occupant que 8.5% de la superficie totale du pays, ils reçoivent plus de 59.5% des précipitations globales (Riad., 2003).

Aussi, les sécheresses qui ont sévi, au Maroc, au début des années 1980 et 1990 ont montré à quel point l'économie marocaine est tributaire des hauteurs des pluies et de leur répartition dans l'année (Riad., 2003). Ces difficultés expriment donc clairement le besoin avéré d'approfondir la connaissance des régimes pluviométriques en régions semi-arides à arides, leur variabilité spatiale et temporelle, sur des zones pilotes et représentatives du Maroc et la maîtrise des phénomènes pluviométriques extrêmes tel que la sécheresse en vue d'étudier leurs impacts sur l'évolution du régime et les réserves souterraines.

Marquée par un climat aride à semi-aride, la Plaine de Saïss doit faire face à des besoins en eau toujours plus importants, en raison de la croissance démographique rapide, du développement économique, de l'essor d'irrigation, des infrastructures industrielles et touristiques. L'eau disponible, provenant en grande partie des réserves hydriques souterraines est destinée notamment pour l'irrigation des champs de cultures et l'alimentation en eau potable des agglomérations rurales et urbaines dont la ville de Fès. Seule une gestion rationnelle et rigoureuse de l'eau permettra à cette région de garantir un développement socioéconomique, tout en veillant à la durabilité de cette ressource.

La Plaine de Saïss, classée parmi les zones de forte production agricole, est sujette depuis plusieurs années à des déficits pluviométriques. En effet, la gestion d'une ressource en eau souterraine utilisée par divers secteurs économiques est un phénomène compliqué et sujette à plusieurs facteurs et différents acteurs (utilisateurs et gestionnaire). Il est justement important de mieux comprendre et d'anticiper les sécheresses car ils peuvent avoir des impacts significatifs sur l'activité économique, agricole et réserve.

Suite à ces menaces, il s'avère important de se doter d'outils efficaces afin de détecter et de faire le suivi des conditions de sécheresse. C'est dans ce cadre que la problématique posée par la présente étude a été initiée en se basant sur les motivations préalables.

Dans ce travail, on s'interroge d'abord sur l'impact d'une sécheresse météorologique sur la gestion optimale d'une ressource en eau souterraine, avant et après son arrivée. Ensuite on modélise la sécheresse comme un choc (ou changement de régime) sur la dynamique de la ressource hydrique. Ce choc correspond à une diminution du taux de recharge naturelle de la nappe, c'est à dire, une baisse de la disponibilité en eau de la ressource. Et enfin on étudie comment le gestionnaire de la ressource peut s'adapter le mieux possible à cette sécheresse (ou choc) selon l'information dont il dispose.

En plus de l'introduction générale, la thèse s'articule en trois parties :

La première partie regroupe deux chapitres. Nous abordons dans le premier, de manière générale, une présentation très rapide du cadre géographique, géomorphologique et géologique de la Plaine de Saïss. L'accent a été mis particulièrement sur la situation géographique et le cadre socioéconomique ainsi que les caractéristiques physiographiques, hydrographiques et hydrogéologiques en rapport avec l'état géologique et hydrodynamique. Le deuxième chapitre consiste à analyser le contexte hydroclimatique de la Plaine de Saïss, dont on regroupe une étude des différents paramètres climatiques, tels que le type de climat, l'évolution des précipitations, l'évolution des températures, l'estimation de l'évaporation par diverses méthodes et le calcul du bilan hydrique.

Dans la deuxième partie, composée de quatre chapitres, le premier chapitre est une revue de la littérature contenant un aperçu des concepts des changements climatiques et des définitions de la sécheresse dans ses différentes formes. Certains impacts de la sécheresse et la nécessité d'un système efficace de surveillance et de prévision de la sécheresse sont discutés. Un aperçu et une comparaison des types des indices de sécheresse sont donnés et sélectionnés. Le deuxième chapitre examine également le suivi et la caractérisation de la sécheresse météorologique, son importance dans la Plaine de Saïss. Une évaluation spatio-temporelle des séquences de sécheresse météorologique à diverses échelles de temps (court, moyen et long terme) a été détaillée par le biais d'indices robustes tels que CMI, SPI, RDI et WSVI. La persistance de la sécheresse et la relation entre la pluviométrie et l'oscillation nord atlantique (ONA) sont étudiées. Une évaluation du potentiel participative des données de la télédétection au suivi de la sècheresse météorologique, sera le sujet du troisième chapitre, là où il

y a présentation des interrelations de la sécheresse climatique, les changements d'occupation du sol et le potentiel des images satellites et des indices fondés sur les données satellitaires (NDVI, NDWI et NDSI) pour la surveillance de la sécheresse. Le quatrième chapitre présente les différentes méthodes d'intelligence artificielles appliquées pour la prévision de la sécheresse (le développement théorique et la démarche abordée...) telles que les réseaux de neurones artificiels (RNA ou ANN), le système d'inférence neuro-flou organisé en réseau adaptatif (ANFIS) et support vecteurs machines (SVM). Les délais de 1 et 3 mois représentatifs des prévisions de sécheresse à court terme et les délais de 6 à 12 mois représentatifs des prévisions à long terme seront également expliqués.

La troisième partie composée de trois chapitres. Le premier chapitre concerne l'interprétation d'effet des variations pluviométriques sur les fluctuations piézométriques de la nappe phréatique superficielle et l'estimation de la recharge des eaux souterraines face à la sécheresse par application de l'indice de précipitation standardisé (SPI). Le deuxième chapitre présente les différentes approches évoquées pour la modélisation des niveaux d'eaux souterraines en zone semi-aride afin de simuler et prédire la sécheresse par application et comparaison des méthodes classiques telle que la régression linéaire multiple (RLM) et des nouvelles méthodes d'intelligence artificielle telle que la méthode neuro-floue (RNA, ANFIS et SVR) dans un cadre de prévision de la piézométrie (GWL). En matière d'aménagement des ressources en eaux particulièrement les eaux souterraines et pour faire face aux effets des phénomènes de sécheresse, le troisième chapitre présente une étude préliminaire en vue de proposer les meilleurs sites convenables à l'emplacement des barrages souterrains ou lacs collinaires comme un défi scientifique et un investissement pour l'avenir de la région pour améliorer la recharge artificielle et la préservation des réserves de la nappe phréatique superficielle de la Plaine de Saïss.

Enfin, la conclusion générale expose une synthèse des principaux résultats obtenus par la présente recherche, en adoptant les plus importants, ainsi que les perspectives et les recommandations pour les utilisateurs et les investisseurs.

PARTIE I
CONTEXTE GENERAL ET CLIMATOLOGIE DE
LA PLAINE DE SAISS

Chapitre 1

Contexte général de la Plaine de Saïss

I. Cadre géographique et géologique

1. Cadre géographique

La Plaine de Saïss, est une unité hydrogéologique importante en surface et en volume du bassin de Fès-Meknès, ce dernier nommé aussi bassin de Saïss et d'une superficie de 2100 km² (Figure 1). Il s'étale à l'Ouest sur la région de Drâa-Tafilalet par le plateau de Meknès et à l'Est sur la région Fès-Meknès par la Plaine de Saïss. La structure géologique, la morphologie et sa richesse agricole l'isolent des pays qui l'entourent. Les tribus arabes qui ont pris possession l'appelèrent Saïss, nom donné aux Plaines de parcours aisé (Taltasse, 1953).

1.1. Situation géographique

La Plaine de Saïss correspond à une partie de la région de Fès-Meknès, ayant comme chef-lieu Fès et préfectures et provinces de Fès, Meknès, Hajeb, Ifrane, Moulay Yacoub, Sefrou, Boulmane, Taounate et Taza. Elle est située au centre nord du Royaume, elle est limitée au Nord par la région de Tanger -Taounate - Al Hoceima, au Sud par la région de Draa-Tafilalt, à l'Est par la région de l'Oriental, à l'Ouest par la région de Rabat-Salé-Kénitra et au Sud-Ouest par la région de Béni Mellal-Khénifra.

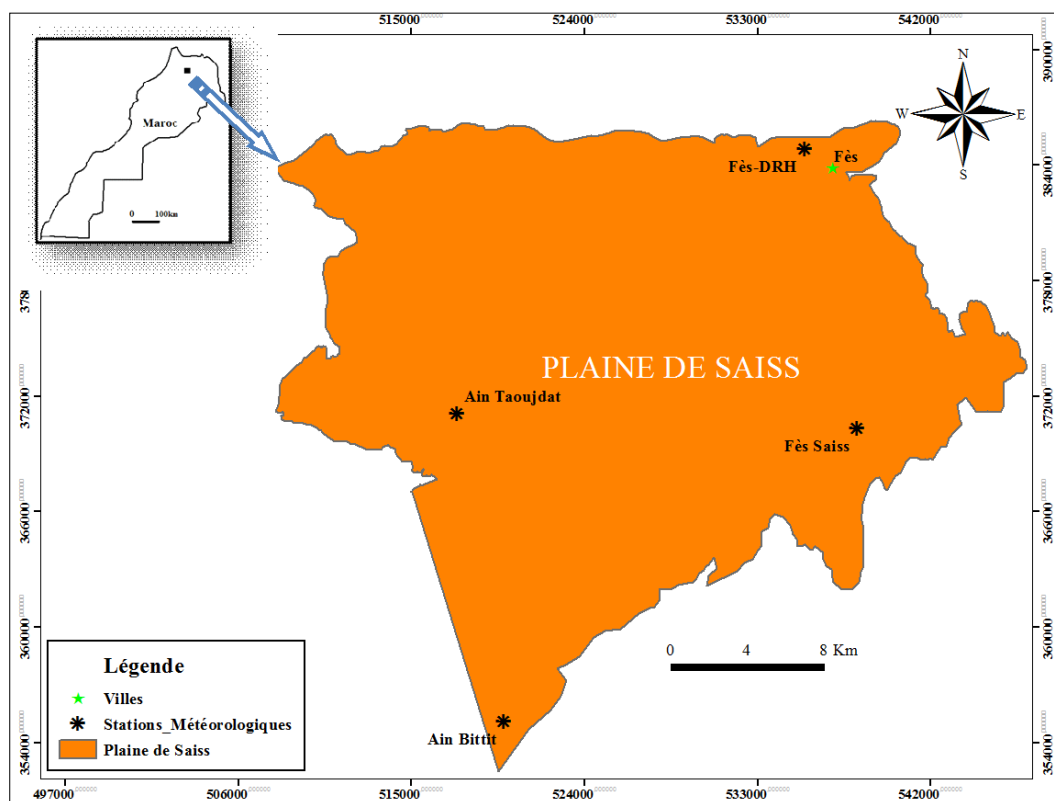


Figure 1 : Situation géographique de la Plaine de Saïss

Ce travail s'intéresse tout particulièrement à la partie orientale du bassin de Fès-Meknès, la Plaine de Saïss, d'une superficie de 600 km². Elle garde les mêmes limites du bassin au Nord et au Sud. A l'Ouest, la Plaine de Saïss s'étend jusqu'à la flexure d'Ain Taoujdate et à l'Est jusqu'au col de Touaher. La flexure de Ras-El-Ma, de direction sensiblement NE-SW, divise la Plaine de Saïss en deux parties : la Plaine de Saïss à l'Est et la Plaine d'Ain Taoujdate à l'Ouest.

1.2. Cadre humain

La Plaine de Saïss joue un rôle déterminant dans le développement du pays. Sa situation au carrefour des principaux flux migratoires entre le Nord et le Sud et entre l'Est et l'Ouest du pays, lui confère une véritable plaque tournante au centre de l'activité économique et industrielle du Maroc. Cette zone est considérée au premier rang des grandes agglomérations du pays par les potentialités économiques (agriculture, artisanat, tourisme et commerce) dont elle dispose. Le recensement général de la population et de l'habitat constitue la source principale de toutes les données intéressant la population. Les projections démographiques sont élaborées par le Centre des Etudes et de Recherches Démographiques.

Selon les projections de la population 2014, la région de Fès-Meknès s'étend sur une superficie de 40.075 Km², représentant 5,7% de la superficie du Royaume. Selon le Recensement Général de la Population et de l'Habitat de 2014, la région de Fès-Meknès compte 4.236.892 habitants (contre 3.873.214 en 2004), soit l'équivalent d'environ 13% de la population totale du pays. La population urbaine de la région est de l'ordre de 2.564.220, représentant 60,5% de sa population totale. La densité est de 105,7 habitants au km² contre environ 47,6 au niveau national. Sur le plan administratif, la région de Fès-Meknès regroupe :

- 2 préfectures : la préfecture de Fès et la préfecture de Meknès ;
- 7 provinces : Boulemane, El Hajeb, Ifrane, Moulay Yaâcoub, Sefrou, Taounate et Taza ;
- 194 communes : 33 communes urbaines et 161 communes rurales. A noter que la commune urbaine de Fès est composée de 6 arrondissements urbains.

(Source : (RGPH) Direction régionale du HCP Fès-Meknès (Direction de la statistique)).

1.3. Aperçu économique

A. Agriculture

Le secteur de l'agriculture constitue la plus grande richesse de la Plaine de Saïss (Tableau 1). Les principales cultures pratiquées sont : la viticulture, l'arboriculture, la céréaliculture et les légumineuses, tandis que l'élevage occupe une place modeste. L'artisanat garde une activité importante dans les principaux centres. Des industries de textiles, de matériaux de construction et d'agroalimentaires se sont développées dans les villes.

Tableau 1 : Répartition des superficies irriguées par commune (en ha) situées dans la Plaine de Saïss (Direction régionale de l'agriculture Fès, 2015)

COMMUNE RURALE		Surface (ha)					Total (ha)	Pourcentage (%)				
		A	B	C	D	E		A	B	C	D	E
La Plaine de Fès	Sebaa rouadi	0	2608	3691	0	0	62	0.00	41.41	58.59	0.00	0
	Ain chkef	783	10498	1323	2142	0	14745	5.31	71.20	8.97	14.5	0
	Ouled tayebe	3445	4910	0	0	0	8355	41.24	58.76	0.00	0.00	0
	Ain Bida	0	1339	0	0	0	133	0.00	100.00	0.00	0.00	0
La Plaine d'Ain Taoujdat		152	0	0	715	0	867	17.50	0.00	0.00	82.5	0
A: Céréales, légumineuses, fourrage; B: Céréales, légumineuses, fourrage + arboriculture; C: Céréales, légumineuses, fourrage + maraîchage; D: Céréales, légumineuses, fourrage + maraîchage + arboriculture; E: Céréales, légumineuses, fourrage + tournesol.												

B. Industrie

Fès est la ville chef du secteur, compte une des zones d'activité industrielle les plus importantes du Maroc. Elle bénéficie de plusieurs atouts susceptibles d'encourager la promotion du secteur, notamment : l'abondance d'une main d'œuvre qualifiée, la disponibilité de la matière première notamment agricole, la situation géographique à l'intersection de 2 axes principaux reliant les différentes villes du royaume et l'existence d'une infrastructure d'accueil importante. Les industries agro-alimentaires, de textiles et cuir, de chimiques et para-chimiques, et d'électroniques se sont développées.

C. Tourisme

La Plaine de Saïss recèle des potentialités et des atouts touristiques remarquables pouvant jouer un rôle important dans le développement socio-économique de la région.

D. Artisanat

Le secteur artisanal est considéré comme l'une des composantes fondamentales de la structure économique et sociale de la région. Il joue un rôle important en matière d'emploi et compte 15% de la population active répartis sur 205 métiers.

2. Cadre géologique et géomorphologique

2.1. Géologie

Le bassin de Meknès-Fès appelé aussi bassin de Saïss, caractérisé par sa situation géographique entre le Rif et le domaine méso-atlasique, a fait l'objet de nombreuses études géologiques (Taltasse, 1953 ; Faugères, 1978 ; Cirac, 1987 ; Aït Brahim, 1991 ; Zizi, 1996 ; Essahlaoui, 2000 ; Kenafi, 2001 et Amraoui, 2005) à savoir la lithostratigraphie, la tectonique, la reconstruction paléogéographique (datations paléontologiques et analyse paléogéographique), l'étude de l'évolution géodynamique et les études hydrogéologiques et géophysique.

A. Géologie régionale

Le bassin de Saïss dont le remplissage est constitué essentiellement d'une épaisse série de marnes bleues d'âge Tortonien suivies de sables fauves pliocènes et de conglomérats et calcaires lacustres d'âge plio-quadernaire, s'est individualisé à partir du Tortonien (Ahmamou, 1987 & Boumir, 1990).

Le Causse moyen-atlasique (Termier, 1936) est constitué de régions tabulaires situées directement au Nord et Nord-Ouest de l'accident nord-moyen-atlasique qui les sépare du Moyen Atlas plissé situé à l'Est (Colo, 1961).

Le Causse est limité à l'Ouest par les terrains primaires du bassin de l'oued Beht (Méséta primaire marocaine) et au Nord-Est par ceux du Tazzeka. Au Nord, la limite est déterminée par les terrains de recouvrement tertiaires et quaternaires du Couloir sud-rifain sous lesquels les terrains mésozoïques s'ennoient en un vaste synclinal dissymétrique, interrompu sur son flanc nord au contact du Rif et du Prérif (Chamayou & al, 1975).

Le bassin de Meknès-Fès fait partie du Couloir ou détroit sud-rifain. Il s'agit d'une dépression qui s'étend de l'Atlantique à l'Ouest au détroit de Taza à l'Est et se prolonge jusqu'à la Méditerranée par le Couloir de Taza-Oujda.

Le Sillon sud-rifain est formé au Miocène supérieur après effondrement des bordures septentrionales de la Méséta occidentale et du Causse moyen atlasique. Il se caractérise par sa situation entre deux grands domaines très différents : le Rif au Nord et le Maroc Central au Sud.

C'est un bassin à substratum anté-Miocène formé essentiellement de calcaires du Lias, sur lesquels s'est déposée en discordance une puissante série monotone mio-plio-quaternaire. Celle-ci débute par des faciès transgressifs d'âge Miocène moyen-supérieur, surmontés par des marnes du Tortono-Messinien d'une épaisseur qui peut atteindre 1000 m. Au-dessus de ces faciès se sont déposées des formations fluvio-lacustres et marines du Pliocène supérieur (Ahmamou, 1987 & Boumir, 1990) et les dépôts de nature variée (sables, conglomérats, travertins...) du Quaternaire (Figure 2). Les Rides sud-rifaines sont des reliefs qui dominent au Nord des dépôts néogènes du Sillon sud-rifain (Faugeres, 1978).

B. Géologie de la Plaine de Saïss

Deux unités structurales composent le bassin continental de Fès-Meknès (Taltasse, 1953) : Le Plateau de Meknès et la Plaine de Saïss. Le Plateau de Meknès s'adosse, au Sud et au Sud-Est au Causse moyen atlasique par une ligne de flexures et de failles d'El Hajeb. Tantôt la série du plateau vient ainsi recouvrir les terrains du Lias qui s'ennoient vers le Nord-Est, tantôt elle s'achève sur les terrains du Trias. Les formations palustres et/ou lacustres du plateau du Meknès se terminent à l'Ouest de Boufekran, au pied de collines sableuses pliocènes des Ait Yazen et des Khouma.

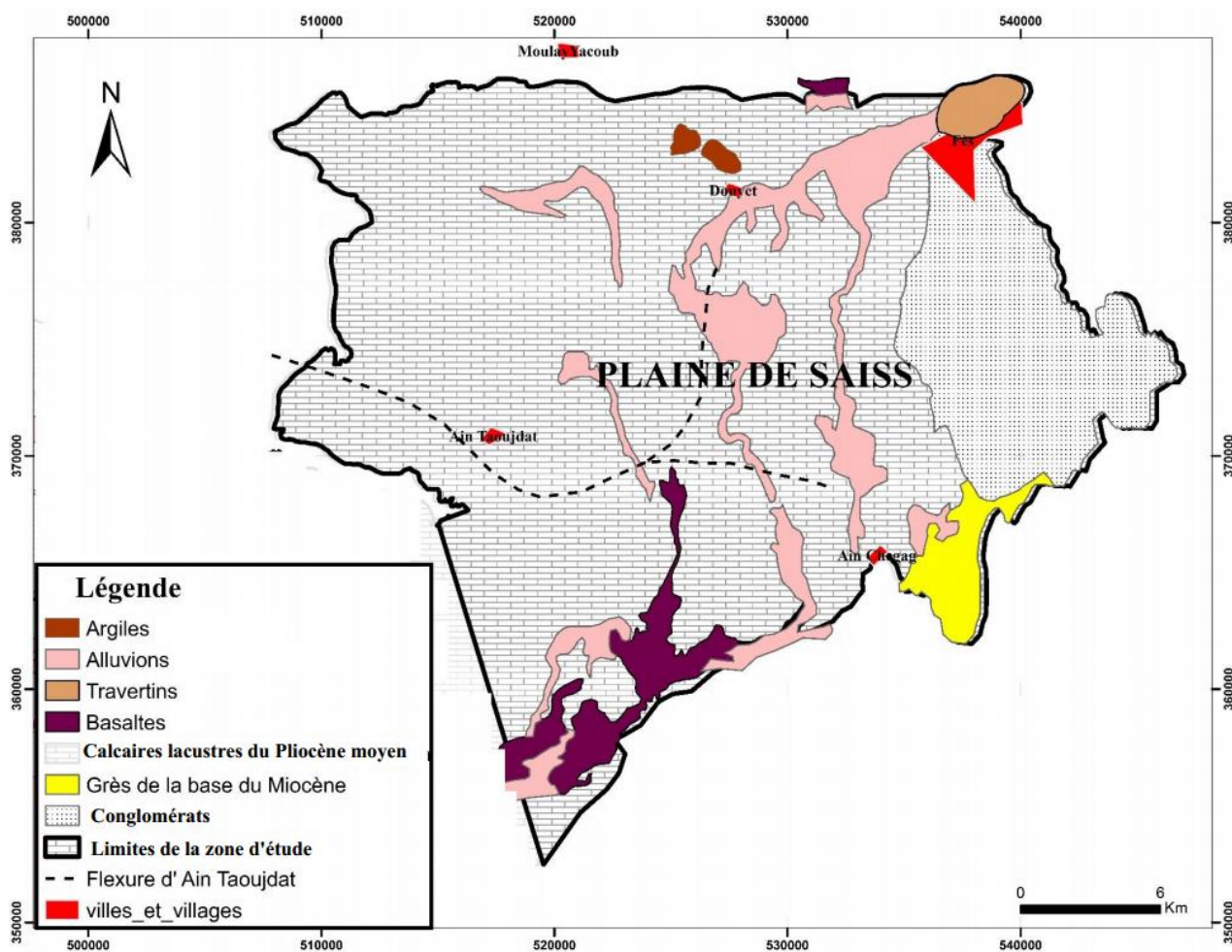


Figure 2 : Cadre géologique de la Plaine de Saïss (Margat, 1964)

La Plaine de Saïss, appuyée à l'Ouest, au Sud-Ouest et au Sud à la flexure de Dar Aït Moussa qui l'isole du plateau de Meknès, forme une large cuvette décrochée en contrebas du plateau (rejet de l'ordre de 150m). Une seconde flexure, orthogonale à la précédente et de rejet moindre, flexure de Ras El Maa, divise la Plaine de Saïss en : Plaine d'Aïn Taoujdat à l'Ouest et Plaine de Saïss à l'Est (Figure 3). Ces deux Plaines sont inclinées en pente très douce vers le Nord (Taltasse, 1953).

La monotonie de structure de la Plaine du Saïss disparaît au Nord de la vallée de l'oued Fès, en bordure des premiers contreforts du pays préifain : du Jbel Zalarh à l'Est, du Jbel Aicha Mouguetaya à l'Ouest par l'intermédiaire du Jbel Trhat et des collines de Guerzine.

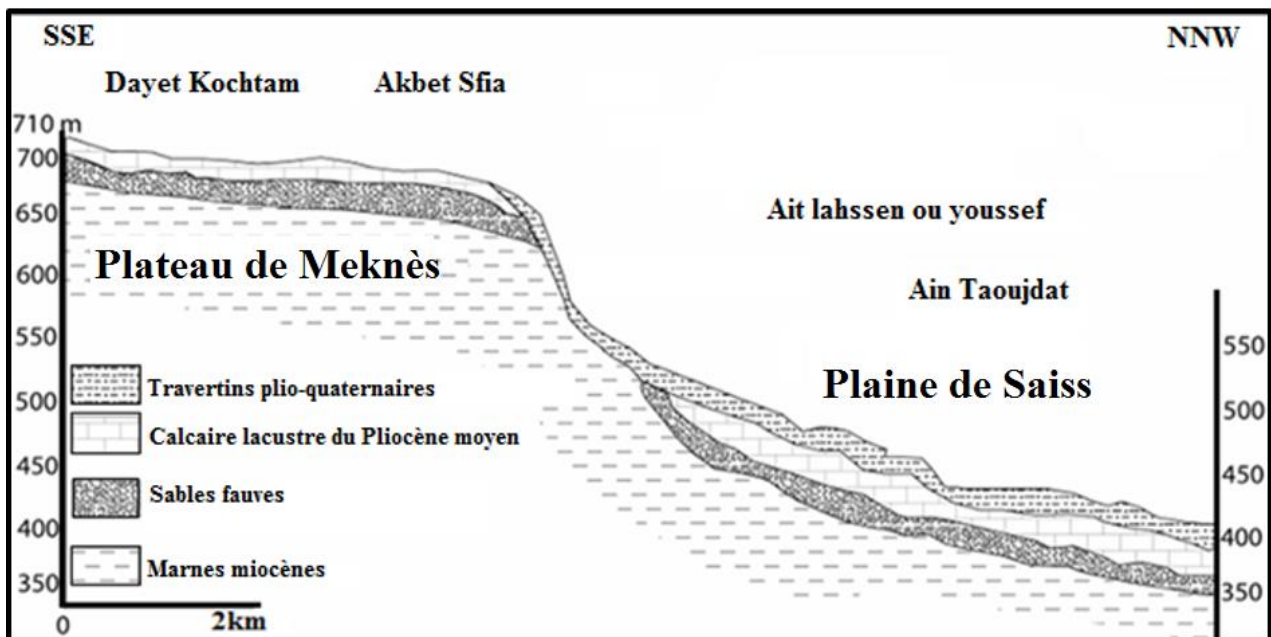


Figure 3 : Unités composant le bassin de Fès-Meknès (Fassi, 1999)

C. Stratigraphie

Le bassin de Saïss est une large structure sédimentaire tertiaire à remplissage miocène et plio-quaternaire. La lithostratigraphie régionale ne diffère pas beaucoup de celle connue à l'échelle du Nord du Maroc (Figure 4). Les variations à noter sont celles des formations plio-quaternaires qui varient selon le contexte sédimentaire local.

Le Pliocène est généralement sableux avec des sables à matrice carbonatée (Wernli, 1987), présentant des variations latérales en allant vers l'Est où elles diminuent d'épaisseur jusqu'à la disparition près de la ville de Fès. Ces formations se poursuivent par les sables fauves de couleur rouge, jaune ou brune du Pliocène moyen (Taltasse, 1953). La série pliocène se termine avec des formations de sables à pseudoïdes de 2 m (Cirac, 1987), au-dessus desquels s'installe une alternance de calcaire argileux et de calcaire micritique lacustres se présentant sous forme massive avec une épaisseur maximale au centre de la Plaine de Saïss (Taltasse 1953).

Le Plio-quaternaire dont l'épaisseur très variable (Figure 5) est représentée par des terrains qui recouvrent de larges surfaces constituées de limons anciens et des cailloutis.

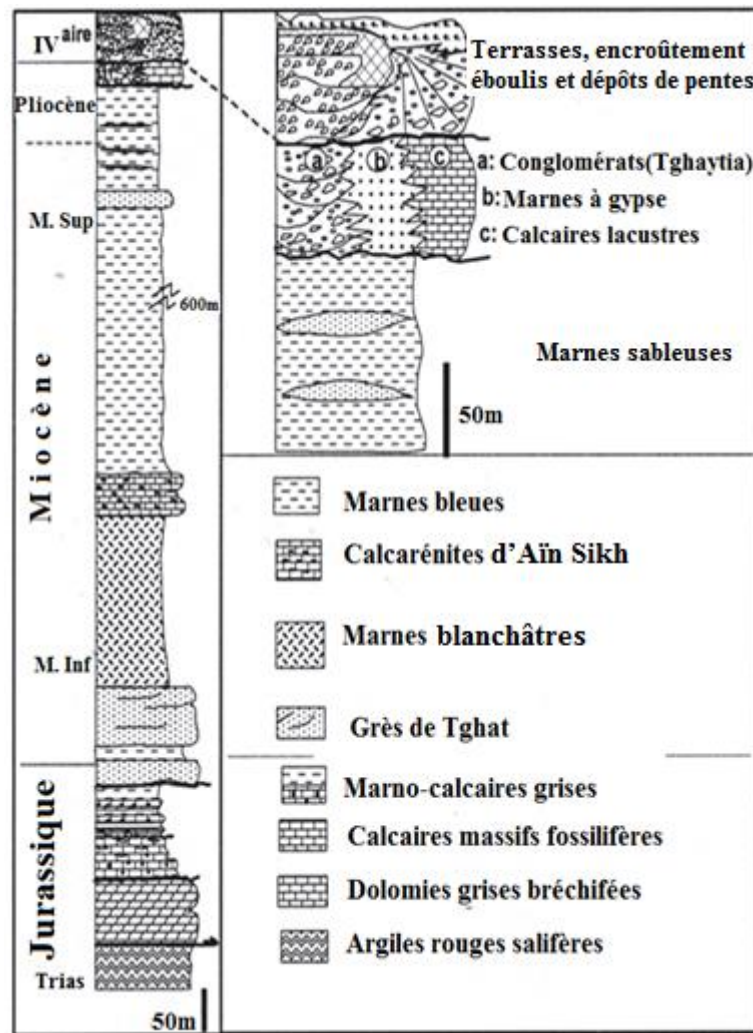


Figure 4 : Log synthétique des différentes formations géologiques de la Plaine de Saïss (Charroud, 2007)

Le Quaternaire est représenté par des alluvions et un complexe fluvio-deltaïque (Ahmamou, 1987):

- les croutes calcaires lamellaires et tufeuses, très répandues dans la Plaine de Saïss (Fassi, 1992), Les terrasses fluviales dont les plus anciennes, d'âge Tensiftien, sont des conglomérats et les plus récentes, d'âge Rharbien, sont matérialisées par des dépôts argilo-limoneux gris noirâtres bien conservés dans l'oued Fès aval (Chapond & Ichter, 1967),
- les travertins forment les assises du quartier des Mérinides, de Bab Seg-ma à Bab El Guissa se présentant sous des aspects bien différents d'un endroit à l'autre et conservent très souvent des traces d'arborescences variées, la puissance de ces formations allant de quelques mètres à 30-40 m, reposant sur les conglomérats plio-quaternaires (Chapond & Ichter, 1967),
- les limons rouges encroûtés recouvrent souvent les croutes moulouyennes. Ils sont salissiens ou amériens (Sendide, 2002). Les limons rouges soltaniens sont recouverts par des limons gris ou noirs graveleux du Rharbien à l'Actuel, les dépôts marécageux à Ras-el-Ma, Aïn Chekef sont riches en carbonates (Chapond & Ichter, 1967).
- les coulées basaltiques émises par le volcan de l'Outgui, datée de 1.5 M. A (Bellon, 1976), sont localisées sur le causse d'El Hajeb, en suivant les paléo-vallons convergeant vers la vallée de l'Oued Tizguite pour s'étaler ensuite sur la Plaine de Saïss. Ces coulées basaltiques sont soit érodées par les Oueds Tizguite et Bittit, soit masquées par les dépôts fluviaux récents.

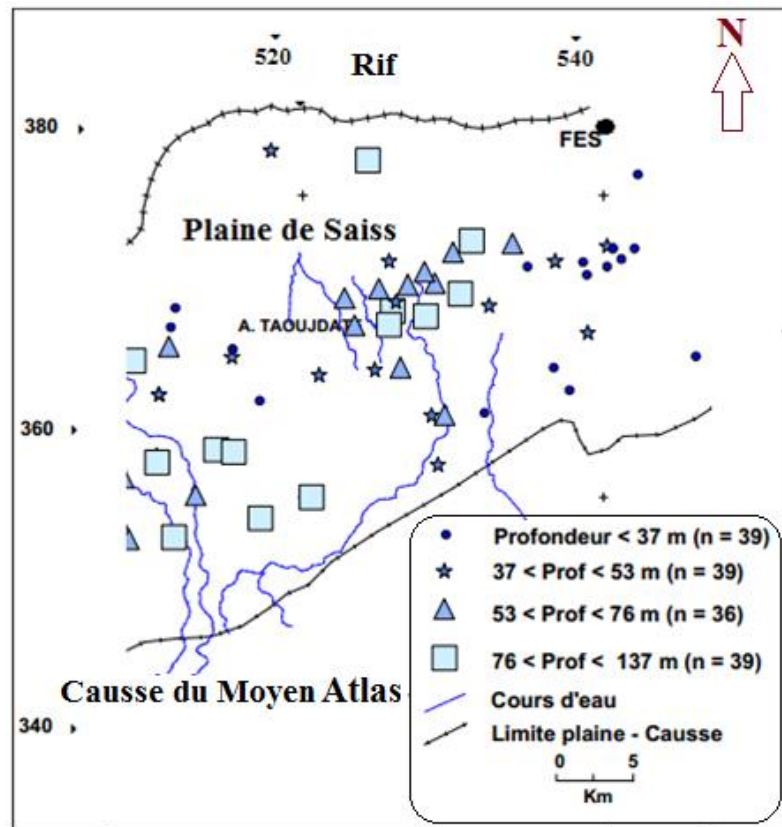


Figure 5 : Variation de l'épaisseur des formations géologiques plio-quaternaires de la Plaine de Saïss (Amraoui, 2005).

D. Cadre structural

L'histoire tectono-sédimentaire de la Plaine de Saïss s'intègre dans l'évolution des domaines montagneux encadrant, en particulier celle du domaine rifain. Cette histoire est contrôlée, depuis le Tortonien jusqu'à l'actuel, par l'effet de la convergence de l'Afrique et de l'Europe et par l'expulsion du bloc d'Alboran vers le Sud-Ouest (Morel, 1989 ; Aït Brahim & al., 1984, 1989 et 1990). Trois périodes tectono-sédimentaires ont été décrites pour expliquer l'évolution du Rif dans son ensemble, en y intégrant la Plaine de Saïss. Le bassin de Saïs, le pré-rif et les rides sud-rifaines sont en surrection, alors que la Plaine de Saïss est restée en subsidence (Amraoui, 2005). En effet cette phase est à l'origine de la morphologie actuelle de la Plaine de Saïss. (Ahmamou & Chalouan, 1988).

Globalement dans la Plaine de Saïs, le réseau d'accidents tectoniques est dense et complexe jouant un rôle essentiel dans l'organisation de l'espace (Amraoui, 2005) (Figure 6).

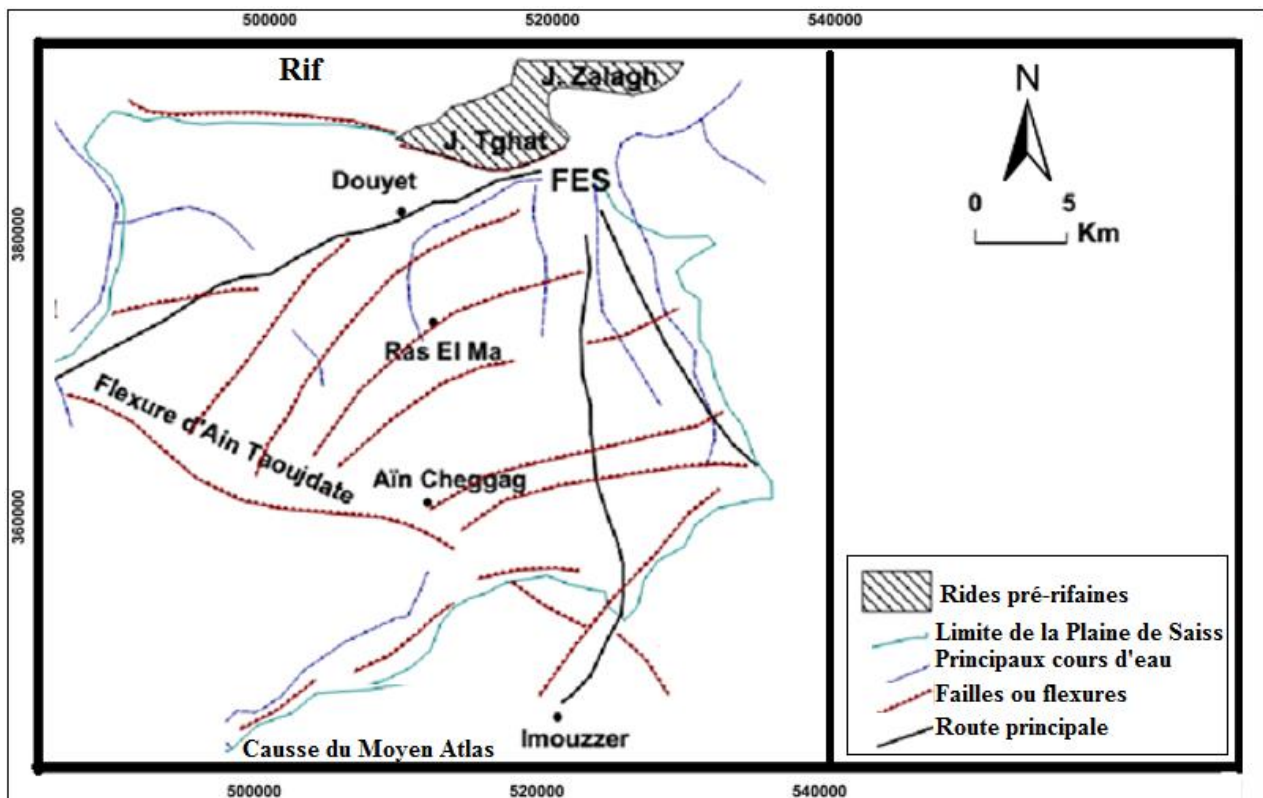


Figure 6 : Principaux linéaments structuraux de la Plaine de Saïss (Amraoui, 2005)

Dans la Plaine de Saïss, les linéaments structuraux s'ordonnent en une sorte d'éventail se fermant d'Est en Ouest, passant d'une orientation WSW-ENE pour rattraper les orientations hercyniennes NE-SW qui vont dominer dans le Plateau de Meknès.

2.2. Géomorphologie

Morphologiquement le bassin de Meknès-Fès dont fait partie de la Plaine de Saïss, est considéré comme un vaste synclinal dissymétrique de direction E-W qui s'enfonce progressivement du Sud vers le N et se redresse brusquement au contact des rides pré-rifaines (Chamayou & al., 1975). Le remplissage est constitué, au-dessus des marnes du Tortonien, par des formations détritiques et lacustres. Les calcaires du Plio-quaternaire déterminent une surface structurale que les oueds érodent et entaillent profondément, dans le Plateau de Meknès. Par contre, la Plaine de Saïss est en grande partie une plaine d'érosion (Figure7).

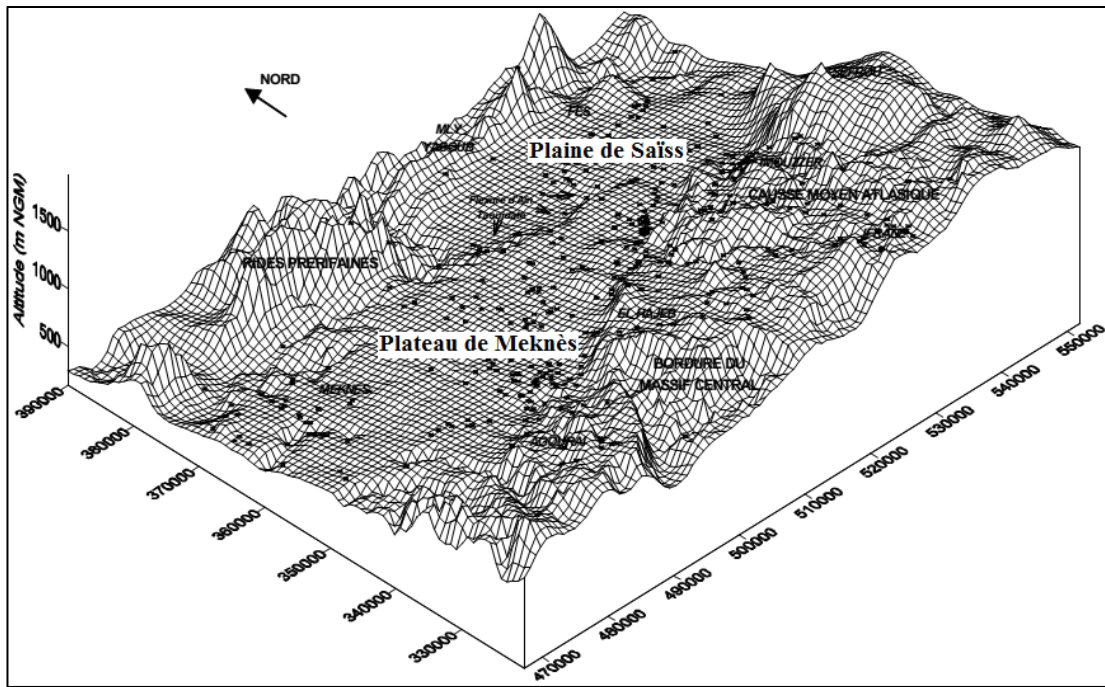


Figure 7 : Bloc diagramme montrant la topographie de la Plaine de Saïss dans son contexte régional (Amraoui, 2005)

II. Cadre hydrographique et hydrogéologique

Les formations aquifères de la nappe phréatique superficielle de la Plaine de Saïss sont constituées principalement par les sables, les conglomérats et localement par les calcaires lacustres (Essahlaoui, 2000). Le Lias est caractérisé par des failles qui sont susceptibles de former des barrières hydrauliques vis-à-vis de l'écoulement latéral des eaux souterraines.

1. Caractéristiques physiographiques

La transformation des eaux de pluie en écoulement (aussi bien superficiel que souterrain) passe par l'intermédiaire du bassin versant. Ce dernier est défini comme "la région qui reçoit des précipitations et, suite aux processus hydrologiques entraînant pertes et retards, les achemine jusqu'à un exutoire" (OMM, 1996). Outre les conditions climatiques qui gouvernent le fonctionnement du bassin versant, ses caractéristiques physiques influencent le volume (en termes de bilan) et la répartition temporelle (en terme d'hydrogrammes) des écoulements (Roche, 1963).

Par caractéristiques physiques (Annexe II, pages 275 et 276), il faut mentionner la topographie, la géologie, la nature et l'occupation du sol, mais aussi la forme du bassin versant qui influence les caractéristiques de l'écoulement résultant d'une pluie donnée (Strahler, 1964). Les hydrologues ont tenté de caractériser cette morphologie par des indices simples calculables avec le seul concours des cartes topographiques.

En se basant sur l'assemblage des cartes topographiques au 1/50000, on a pu extraire l'ensemble des principales caractéristiques physiographiques et morphométriques (Annexe II, pages 275 et 276) de la Plaine de Saïss qui se résume dans le tableau 2.

Tableau 2: Caractéristiques physiographiques et morphométriques de la Plaine de Saïss

Zone d'étude	A (km ²)	P (km)	K _G	Rectangle équivalent		S (%)	Longueur (km)	Dd
				L (km)	l (km)			
	737.158	160.966	1.660014539	78.33	9.41	0.055	30135	40.87997417

A : Superficie du bassin versant ; **P** : Périmètre ; **K_G** : Indice de compacité de Gravelius ;
L : Longueur du rectangle équivalent ; **l** : Largeur du rectangle équivalent ; **S** : Pente moyenne du bassin versant ; **Dd** : Densité de drainage ; **Li** : Longueur totale des cours d'eau en km

A. Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique demeure un outil pratique pour comparer plusieurs bassins versants entre eux ou les diverses sections d'un seul bassin versant. Elles peuvent en outre servir à la détermination de la pluie moyenne sur un bassin versant et donnent des indications quant au comportement hydrologique et hydraulique du bassin et de son système de drainage. Elle caractérise la répartition de l'altitude en fonction de la surface du bassin versant exprimée en pourcentage. Le diagramme comporte en abscisse la surface cumulée et en ordonnée les ordres (1 à 8) des intervalles d'altitudes (Tableau 3) de la Plaine de Saïss.

Tableau 3 : Répartition des intervalles d'altitudes en ordres dans la Plaine de Saïss

N°	d'ordre	Altitude min	Altitude max
1		225	321.692596
2		321.879059	418.740814
3		418.75351	515.614014
4		515.636353	612.47998
5		612.528931	709.357422
6		709.399902	805.347595
7		806.408508	901.732544
8		903.975098	1000

La courbe hypsométrique de la Plaine de Saïss est de forme concave, elle indique que celle-ci est en état de maturité (Figure 8).

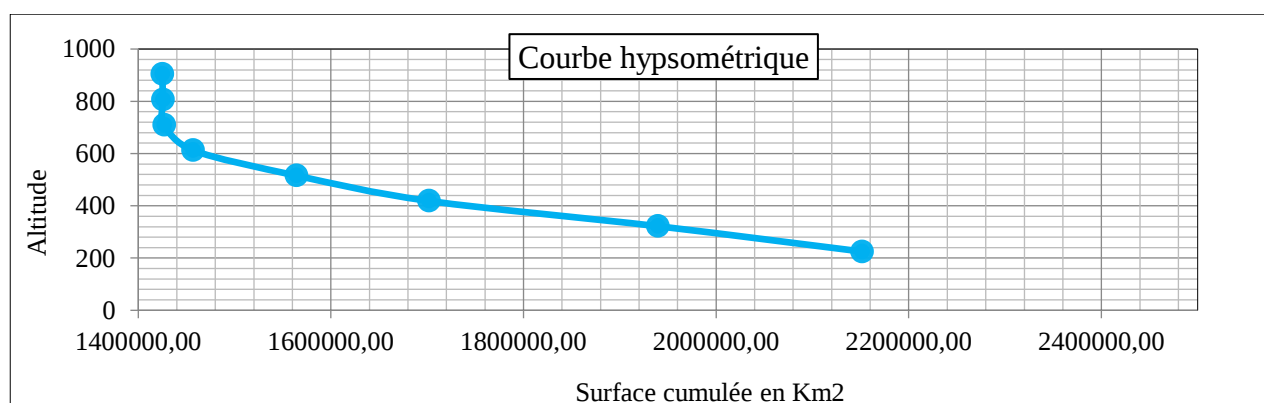


Figure 8 : Courbe hypsométrique de la Plaine de Saïss

B. Altitudes caractéristiques

Elles sont obtenues directement à partir de cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin versant tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire. Ces deux données deviennent surtout importantes lors du développement de certaines relations faisant intervenir des variables climatologiques telles que la température, la précipitation et le couvert neigeux. Elles déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de la pente.

L'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique. On peut la définir comme suit :

$$H_{moy} = \sum \frac{A_i \cdot h_i}{A} \quad (Eq\ 5)$$

Avec :

H moy : altitude moyenne du bassin versant [m] ;

Ai : aire comprise entre deux courbes de niveau [km2] ;

hi : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] ;

A : superficie totale du bassin versant [km2].

L'altitude moyenne est peu représentative de la réalité. Toutefois, elle est parfois utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre de modèles hydrologiques.

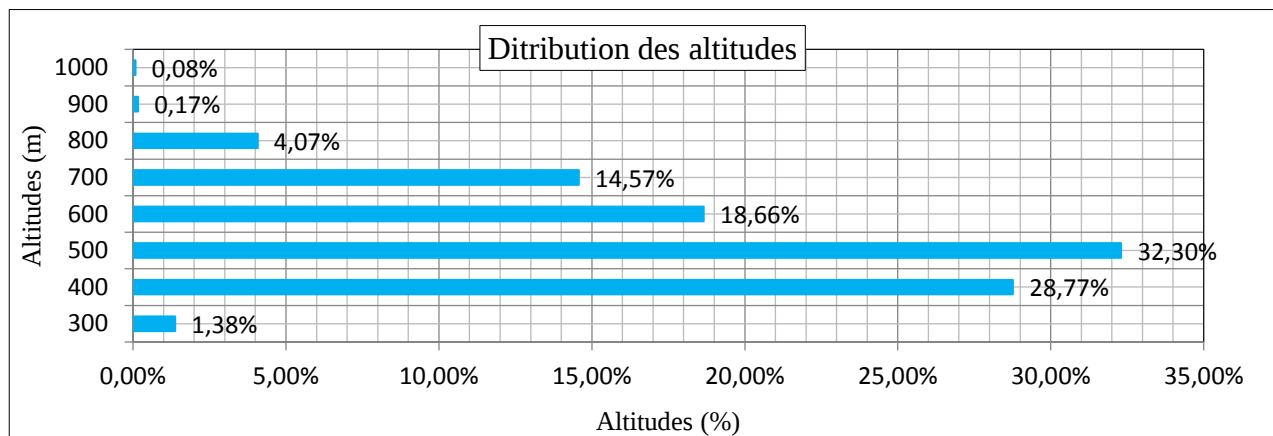


Figure 9 : Distribution des altitudes dans la Plaine de Saïss

La figure 9 indique que le point le plus élevé de la Plaine de Saïss est d'altitude 1000 m tandis que le point le plus bas est d'altitude 225m. Cependant, la distribution des altitudes montre que l'intervalle entre 516 m et 613 m est le plus fréquent sur la Plaine de Saïss alors que l'intervalle entre 904 m et 1000 m est le moins fréquent.

C. Impact sur les pluies et le ruissellement

Le bassin versant est un domaine complexe dont l'ensemble des caractéristiques (géométriques, géologiques, etc.) joueront un rôle non seulement dans la réponse hydrologique du bassin à une sollicitation des précipitations (régime des écoulements) mais aussi, en amont et pour certaines d'entre elles (altitude, exposition...), directement dans le processus de formation de la pluie. L'ensemble des

principales caractéristiques physiographiques a donc une influence importante sur la répartition spatio-temporelle des précipitations au sein de la Plaine de Saïss.

En effet, dans la Plaine de Saïss, les zones constituées de roches perméables dont les densités de drainage seront plus faibles, alors que les secteurs de roches imperméables ont des densités de drainage plus élevées. Les conditions climatiques jouent également un rôle important : les zones à climat très contrasté comme les zones semi-arides tel que la Plaine de Saïss ont des densités de drainage plus faibles que les climats ayant des précipitations réparties régulièrement tout au long de l'année. Les activités humaines dans la Plaine de Saïss ont parfois un rôle important sur l'évolution hydrologique, ceux-ci peuvent avoir un effet régulateur mais aussi un effet accélérateur du ravinement.

2. Hydrographie

Selon les études effectuées par (Chamayou & al, 1975), la Plaine de Saïss a été subdivisée en trois panneaux hydrauliques inégaux dont les limites correspondent à des lignes de courant de la nappe : le Saïss Ouest, le Saïss centre et le Saïss Est.

➤ Saïss Est

Avec une superficie de 120 km², il a la forme d'un trapèze dont la grande base se situe au pied du Causse moyen atlasique alors que la petite base est à proximité de Fès. La hauteur de pluie près d'Aïn-Chegag est proche de 600 mm/an au cours d'une année moyenne théorique. Le débit souterrain de ce panneau est de l'ordre de 0,20 à 0,25 m³/s, ce qui correspond à un débit par kilomètre de front de 30 à 35 l/s. Ce débit provient en quasi-totalité des infiltrations des eaux de pluie et d'irrigation.

➤ Saïss centre

La zone la plus complexe où les communications entre la nappe phréatique superficielle et la nappe profonde semblent les plus importantes. Les deux panneaux sont séparés par une crête hydraulique dans la région de Douyet où les eaux se partagent en deux zones de drainage E et W (oueds Fès et N'ja). Entre le Causse moyen atlasique et la ligne isopièze 500, les débits infiltrés à partir des eaux de pluies ou des eaux d'irrigation ont une valeur de 0,5 m³/s environ.

➤ Le Saïss Ouest

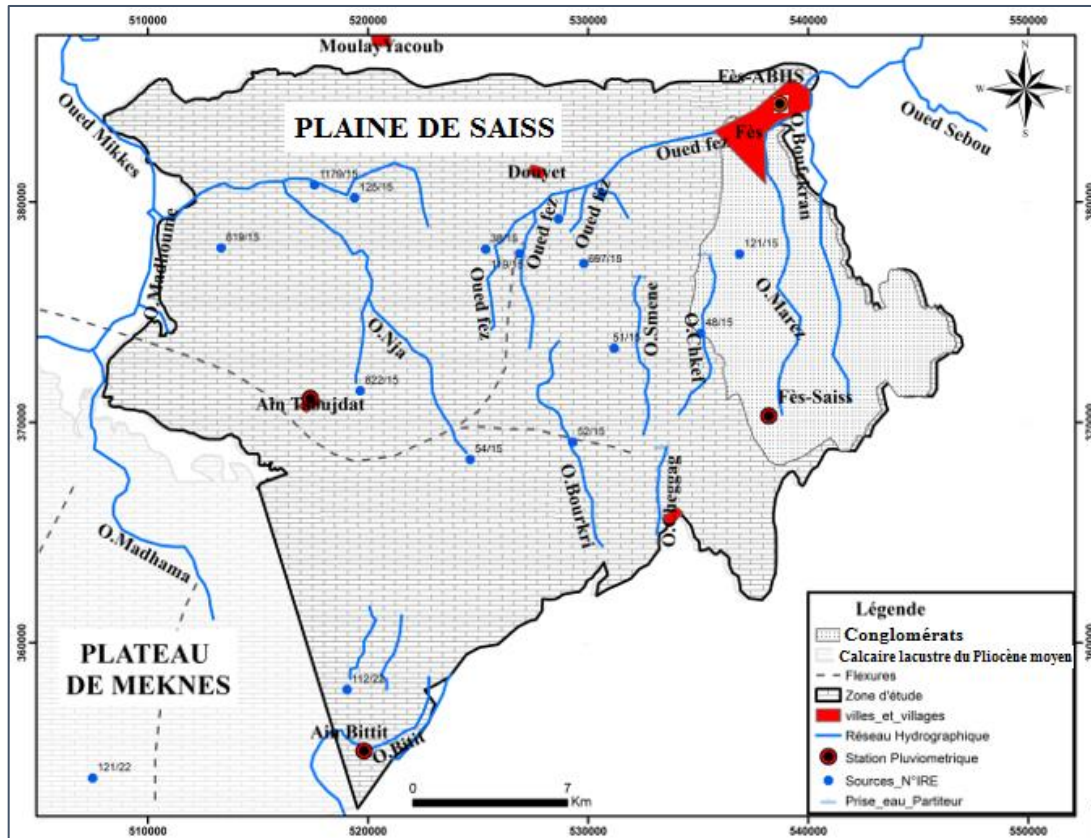
Il se situe entre le Causse et la flexure (courbe isopièze 500) et connaît des infiltrations des eaux de pluies ou d'irrigation sur une superficie de 190 km² environ. Il faut cependant signaler d'autres potentiels hydriques matérialisés par les importantes sources implantées aux niveaux des flexures de direction atlasique comme : Aïn-Chkeff ; Aïn-Ablouz ; Aïn-Amelal ; Bou-R'Keiss. En fait, la Plaine de Saïss dispose d'un potentiel hydrique important à savoir les cours d'eau superficiels principalement oued Sebou et ses affluents et les sources importantes.

A. Plaine d'Aïn Taoujdade

Les réseaux hydrographiques des deux Plaines (Saïss et Aïn Taoujdade) conservent leur individualité et se dirigent, le premier vers l'Est (oued Sebou), le second vers l'Ouest (oued Mikkès). Le réseau hydrographique de la Plaine d'Aïn Taoujdade est celui de Oued N'ja (dans la Plaine de Saïss) qui est né au pied de l'angle que forme les deux flexures au niveau des Aïoun Belouz. Oued N'ja est enrichi des débits d'oued Ezroureg drainant la nappe phréatique (Taltasse, 1953) et des oueds Jouaou et Ben Kazza nés quelques kilomètres au Nord du pied de la flexure d'Aïn Taoujdade.

B. Plaine de Saïss

Le réseau hydrographique de la Plaine de Saïss est formé par plusieurs Oueds (Smène, Beida, Cheggag, Chkeff, Bou R'keiss) se dirigeant du Sud vers le Nord.



Les débits de ces oueds sont perdus progressivement dans les calcaires perméables de leur substratum, donnant naissance à des vallées sèches.

a. Oueds

La Plaine de Saïss est drainée par les principaux affluents d'Oued Sebou (Oued Fès, Oued N'ja, Oued M'hrez, Oued Boufrane, Oued Mikkes.)

L'Oued Sebou traverse la Plaine de Saïss avec une direction de SE-NW qui devient NE-SW au pied de Jbel Zalagh, cours d'eau le plus important à l'échelle régionale. Il reçoit toutes les eaux de la Plaine de Saïss drainée principalement par les affluents de l'Oued Fès.

Les Oueds, Cheggag, M'hrez et Boufrane traversent la Plaine de Saïss dans une direction généralement N-S. Les Oueds Fès, N'ja et Mikkes, ont des apports de plus en plus faibles en raison de la baisse du débit des sources liées à l'effet conjugué de la sécheresse et de la surexploitation des eaux souterraines. Ces Oueds collectent les eaux de la Plaine de Saïss et coulent généralement du SSE-NNW, exceptés Oued N'ja qui a une direction générale de l'Est vers l'Ouest et Oued Fès qui coule de l'Ouest vers l'Est. Prennent naissance des grandes sources de la Plaine de Saïss, les séguías assurent la recharge permanente de la nappe, par la réinfiltration durant leur parcours (Taltasse, 1953). L'Oued Fès, draine dans son cours Ouest-Est la nappe des formations lacustres et rejoint l'Oued Sebou. Il a une direction E-W à NNE-

SSW et forme avec ses affluents (Oued Ain Chekef, Oued Ain Smène, Oued Zitoun, Oued Mellah), le réseau hydrographique principal de la ville de Fès.

b. Sources

Les sources constituent les exutoires naturels des aquifères phréatiques superficielles. Elles sont caractérisées par une variabilité des débits, d'origines et de températures. D'après le rapport de Mac Donald (1990), plusieurs classifications ont été proposées dont la plus retenue est la suivante :

Les sources du plateau, d'origine profonde issues essentiellement de calcaires liasiques comme Ain Chkef, Ain Smène et les sources thermo-minérales telles que Ain Skhonates (38°), Sidi Harazem (33°).

Les sources mixtes dont le débit provient de la nappe liasique profonde, sont généralement liées à la présence de failles ou de flexures, comme celle d'Ain Smène.

Les sources d'émergences de la nappe phréatique, généralement localisées dans les parties basses du bassin de Fès-Meknès.

Les sources de déversements d'origine phréatique avec des régimes variables, déversant en général dans les talwegs tels que Oueds El Kell, Zroureg, N'ja. Elles sont nombreuses dans la médina de Fès mais à de Faibles débits.

Les sources de débordements de la nappe liasique au niveau du contact bassin de Fès-Meknès et Causse moyen atlasique. La partie des eaux du Lias qui ne s'infiltre pas en profondeur donnent naissance à des sources à débit important telles que Ain Sbaa, Ain Soultane, Ain Bittit, Ain Boujaoui, Ain Maarouf et Ain Aghbal .

c. Lacs ou dayats

Dans la Plaine de Saïss, l'endoréisme, caractère des régions où l'écoulement n'atteint pas la mer et se perd dans les dépressions fermées, se manifeste par la présence de deux lacs importants temporaires ;

- **Dayat El Kochtam** : Située à 10 km d'Ain Bittit, au Sud de la flexure de Ain Taoujdat à l'extrémité orientale du plateau de Meknès. Elle se présente sur une zone semi-fermée à substratum marneux imperméable.
- **Etang de Douyet** : Correspond à une cuvette synclinale de subsidence et comblée par des dépôts quaternaires limoneux très peu perméables, située à 10 km et à l'Ouest de Fès, contribuant à la mise en charge de la nappe phréatique.

3. Hydrogéologie

Plusieurs hydrogéologues ont mis l'accent sur la richesse en eaux de la Plaine de Saïss aussi bien superficielles que profondes (Russo, 1929 ; Margat & Taltasse, 1947 ; Chapond, Chamayou & Leclerc ,1958 à 1968). Les informations recueillies ont abouti à la publication de la carte hydrogéologique au 1/100 000 et d'établir un bilan général des ressources en eau de la Plaine de Saïss (Margat, 1960).

Les eaux de la nappe phréatique superficielle de la Plaine de Saïss sont très sollicitées pour l'approvisionnement en eau potable des centres ruraux et urbains ainsi que pour l'irrigation. C'est le réservoir le plus accessible, limité au Nord par les rides pré-rifaines, au Sud par la ligne de contact entre le remplissage Plio-quaternaire et les formations calcaires liasiques du Moyen Atlas. A l'Est par l'Oued Sebou et ses affluents et à l'Ouest par la flexure d'Ain Taoujdate.

Cependant, Cette étude hydrogéologique portera principalement sur la présentation des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère plio-quaternaire et ses relations avec la géologie (lithologie et la structure).

3.1. Définition et évolution du terme « nappe phréatique »

En 1987, Daubrée a introduit l'expression de nappe phréatique pour désigner la nappe d'eau la plus proche de la surface du sol, celle qui alimente les puits ordinaires ou tubés. Elle se trouve partout dans les vallées et les plaines alluviales.

Ces nappes sont dites libres, si elles reçoivent directement, par infiltration, des eaux de surface. Elles sont captives, si les aquifères qui les contiennent sont emprisonnées entre des couches imperméables.

Il est utile tout d'abord de distinguer les eaux souterraines (le contenu) des aquifères (qui forment le contenant). Rappelons qu'un aquifère est une « formation géologique constituée de roches perméables (formations poreuses et/ou fissurées) comportant une zone saturée – ensemble du milieu solide et de l'eau contenue – suffisamment conductrice d'eau souterraine pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage (drainage, pompage. . .) de quantités d'eau appréciables.

Un aquifère libre comporte une surface libre et une zone non saturée (en eau).

Un aquifère captif est entièrement saturé, comportant une nappe captive (sans surface libre ni zone non saturée), délimité au toit par des formations à perméabilité très faible faisant obstacle à tout flux appréciable (Adour Garonne, 2002).

3.2. Caractéristiques géologiques et hydrodynamique de la nappe phréatique

Du point de vue hydrogéologique, on distingue deux réservoirs importants :

- La nappe profonde du Lias, siège dans les formations calcaires et dolomies du Lias. L'alimentation de cette nappe se fait par abouchement à partir de la nappe des Causses moyen atlasiques.
- La nappe phréatique est localisée dans des formations essentiellement calcaires et conglomérats d'âge Plio-quaternaire alternant par endroit, avec les dépôts limono-sableux. Les dépôts Tortonien de nature marneuse constituent le substratum imperméable de cette nappe. Des coupes établies à partir des colonnes stratigraphiques des forages dans la Plaine de Saïss montrent bien que les dépôts plio-quaternaires montrent une grande variation de faciès d'un puits à l'autre.

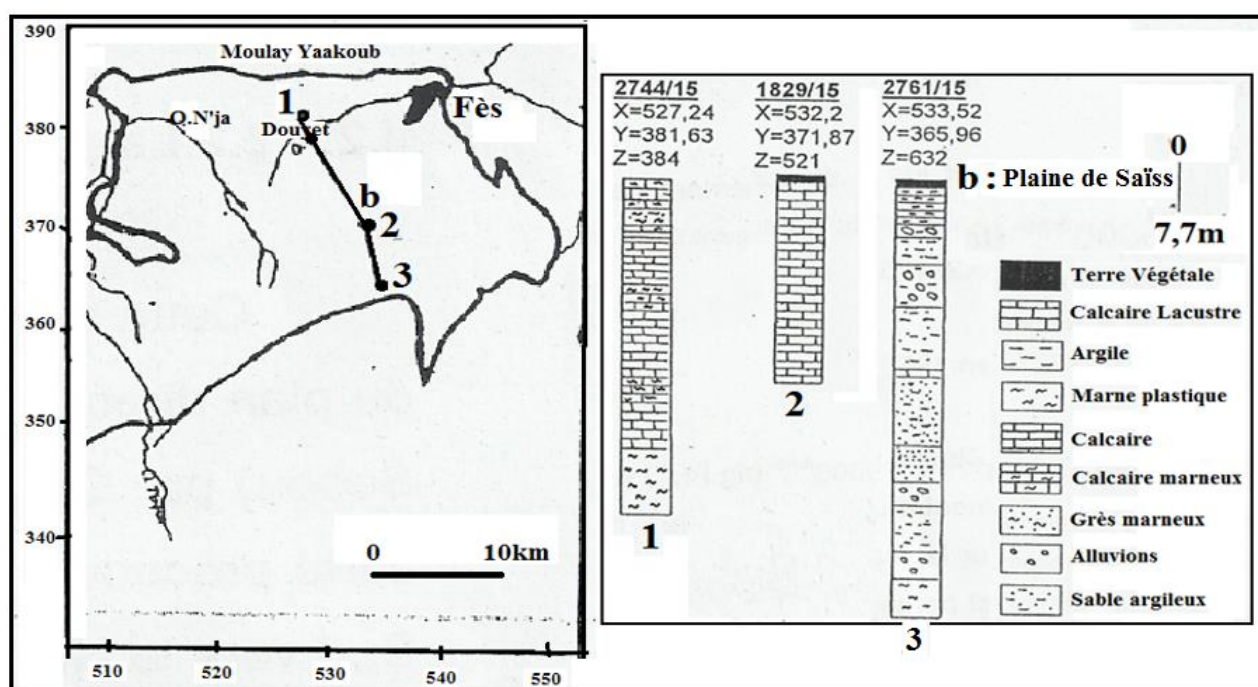


Figure 11 : Colonnes stratigraphiques de certains puits de la Plaine de Saïss (Benaabidate, 2000).

A l'échelle de la Plaine de Saïss, les niveaux aquifères sont très variés, qu'on peut distinguer, au Nord, dans la cuvette de Douyet à l'Ouest de Fès, l'aquifère constitué par une série de calcaires lacustres reposant sur des microconglomérats calcaro-dolomitiques pouvant atteindre 120m de puissance (Sendide, 2002). Ces calcaires lacustres se présentent en deux niveaux, calcaires beiges inférieurs (Saïss inférieur) et calcaires gris supérieurs (Saïss supérieur), séparés par un horizon d'argiles noires de faible épaisseur (figure 11). A l'Ouest, la nappe circule dans une épaisse couche de calcaires lacustres du Pliocène. A l'Est, les calcaires lacustres passent latéralement à des conglomérats, qui se présentent comme un épandage alluvial reposant directement sur les marnes du Miocène à l'Est de Fès. Enfin, localement, la nappe peut s'écouler dans les fissures des basaltes quaternaires (Oued Bittit) ou dans les massifs du travertin (ancienne Médina).

A. Puissance de la nappe

La puissance de l'aquifère varie largement dans la Plaine de Saïss, elle passe de quelques mètres à plus de 110 m d'après les données des forages et les différents compagnes géophysiques (Essahlaoui, 2000). C'est dans les zones où le toit du Tortonien marneux forme une cuvette que l'on rencontre les plus fortes puissances de la nappe, à savoir, la cuvette de Douyet, au niveau de la flexure d'Ain Taoujdat et entre la ville de Fès et Ain Cheggag

B. Paramètres hydrodynamiques

Les études hydrodynamiques effectuées par Chamayou & al (1975) au sein de la région montrent une grande variabilité des caractéristiques hydrauliques de la nappe phréatique, vue l'hétérogénéité des terrains aquifères.

a. Perméabilité

Ce coefficient varie selon les types de faciès lithologiques rencontrés. En fait les valeurs de perméabilité sont :

- très variables pour les calcaires lacustres comprises entre 10^{-6} m/s et 10^{-2} m/s. Elles sont liées aux degrés de karstification, à la présence et la densité des fissures et à l'alternance ou non des niveaux marneux avec les bancs calcaires.
- pour les conglomérats de la Plaine de Saïss, leur coefficient de perméabilité est de l'ordre de $2.5 \cdot 10^{-5}$ m/s, due aux degrés de cimentation élevée de ces formations.
- suite à des intercalations argileuses et marneuses, les alluvions quaternaires sont caractérisées par une faible perméabilité de l'ordre de 10^{-5} m/s à 10^{-6} m/s.

Enfin on peut dire que les résurgences de fort débit seraient en liaison avec les calcaires lacustres vue leur perméabilité importante.

b. Transmissivité

L'aquifère plio-quaternaire présente une grande hétérogénéité et par conséquent une transmissivité variable selon les faciès. Ce paramètre dépend généralement de la perméabilité et de l'épaisseur de la zone saturée : les valeurs sont très dispersées selon les différents termes lithologiques du réservoir.

Selon l'ABHS, les conglomérats ont des valeurs de transmissivité relativement homogènes qui semblent fonction de la fissuration ($4 \cdot 10^{-5}$ m²/s à $2 \cdot 10^{-5}$ m²/s), alors que les calcaires lacustres présentent des valeurs très variées. Après l'analyse de la carte, il paraît que les plus basses sont enregistrées à l'Ouest de la Plaine et varient entre $4.6 \cdot 10^{-4}$ m/s et $2.3 \cdot 10^{-3}$ m/s. Elles augmentent vers l'Est avec des valeurs maximales, pour garantir des débits plus importants aux voisinages des sources plus importantes.

c. Coefficient d'emmagasinement

Les essais du débit, effectués par l'Agence du Bassin Hydraulique de Sebou (ABHS) lors du projet d'aménagement agricole du bassin de Fès-Meknès, ont prouvés des valeurs différentes du coefficient d'emmagasinement. Ces valeurs sont réparties géographiquement en deux secteurs : l'un comprend les valeurs entre 1.10^{-3} et 3.10^{-3} et l'autre entre 1.10^{-2} et $6.5.10^{-2}$. La valeur moyenne minimale est de l'ordre de $1.5.10^{-2}$, alors que la valeur moyenne maximale est de 3.10^{-2} (Amraoui, 2005).

C. Piézométrie de la nappe phréatique superficielle

Afin de bien éclaircir la situation actuelle de la piézométrie de la nappe plio-quaternaire et pour une bonne compréhension de son fonctionnement hydrodynamique, il s'avère important d'aborder un suivi de l'évolution d'état de la piézométrie de cette la nappe durant les dernières décennies.

D'après les cartes piézométriques élaborées durant les premières études hydrogéologiques jusqu'à l'actuel, un écoulement général apparait du Sud vers le Nord, plus précisément du SE vers le NW (Margat, 1960 ; Chamayou, 1967 ; D.R.P.E, 1975 ; C.I.D, 1984 ; D.R.P.E, 1988, Macdonald & al, 1990 ; Benaabidat, 1998 ; Essahlaoui, 1999 ; Sendide, 2002 ; Tabyaoui, 2000). Le sens d'écoulement général n'a subi qu'une faible variation et il est resté le même (Tabyaoui, 2005).

a. Évolution de la piézométrie entre 1998 et 2003

Le suivi de l'évolution piézométrique de la nappe dans le temps et dans l'espace permet de reconnaître d'une part, la direction générale de l'écoulement et d'autre part d'identifier quelques paramètres hydrodynamiques (gradient hydraulique et vitesse d'écoulement). Ces derniers renseignent sur le temps de séjour des eaux d'infiltration dans la couche aquifère et par conséquent informent sur le degré des échanges géochimiques entre l'eau et la roche.

i. Piézométrie en 1998

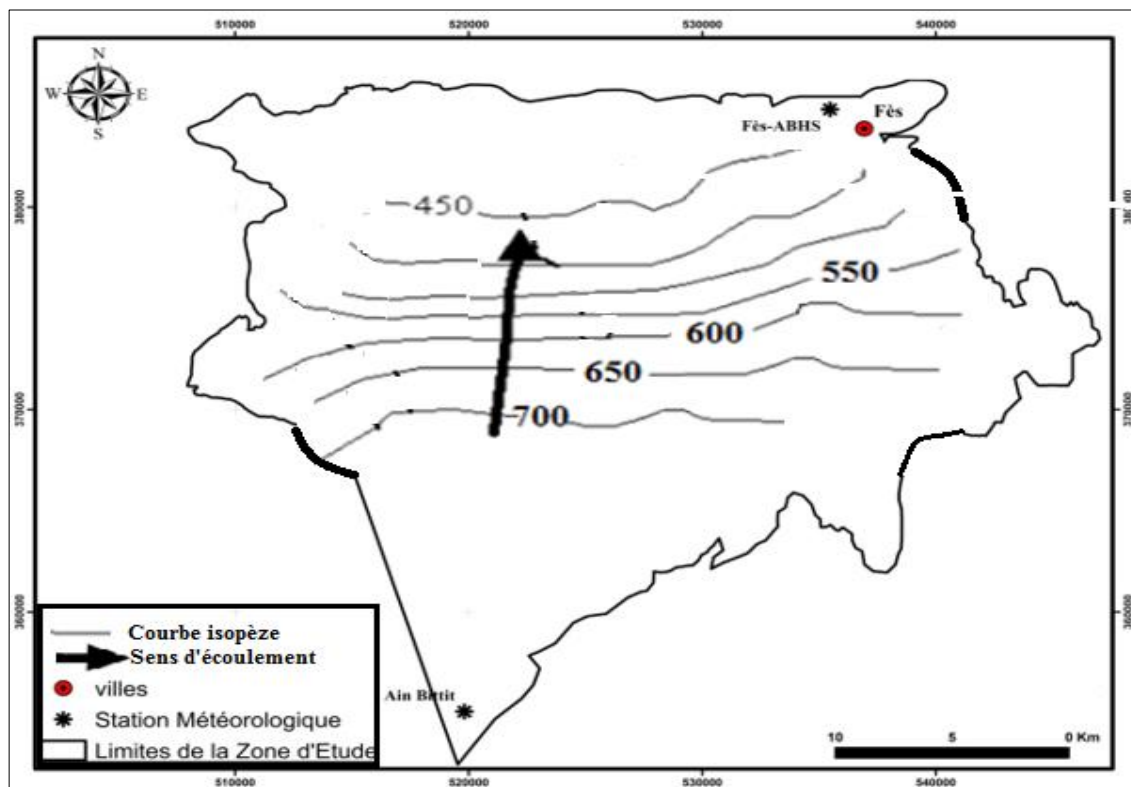


Figure 12 : Carte piézométrique de la nappe phréatique de la Plaine de Saïss (Benaabidate, 1998)

La carte piézométrique élaborée par ci-dessus montre que l'écoulement souterrain de la nappe phréatique superficielle s'effectue toujours dans le même sens du Sud vers le Nord avec les deux principaux sens d'écoulement susmentionnés. Ces deux sens sont en partie régis, d'une part, par un appel en eau vers le Nord dû à la surexploitation des eaux de la nappe pour assurer les besoins hydriques des principales zones d'irrigation (région de Douyet) et d'autre part la morphologie du réservoir (altitude décroissante du Sud vers le Nord). Bordant les Rides Sud rifaines, les eaux bloquées vers le Nord se partagent vers l'Est et l'Ouest suivant deux axes de drainage des Oued Fès et Oued N'ja (Sendid, 1994).

ii. Piézométrie en 2003

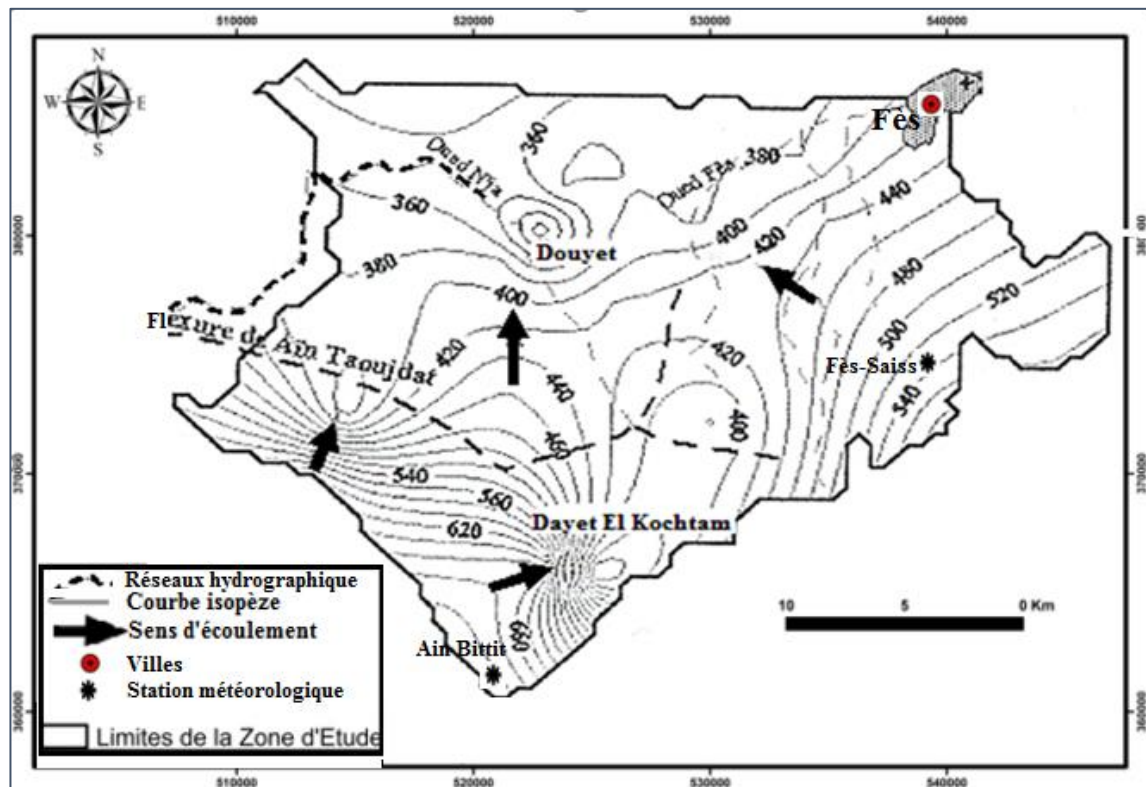


Figure 13 : Carte piézométrique de la nappe phréatique de la Plaine de Saïss en 2003(El Msaddaq, 2003)

La figure 13 montre que les courbes piézométriques indiquent le même agencement des isopézes des cartes précédentes, ce qui traduit le même régime d'écoulement du Sud vers le Nord, avec un écoulement toujours perturbé au niveau de la zone de flexure d'Ain Taoujdat où le gradient hydraulique est très élevé.

D. Battement de la nappe phréatique superficielle

Les données de mesures, fournies par l'Agence de Bassin Hydraulique de Sebou, portent essentiellement sur les puits captant la nappe phréatique superficielle de la Plaine de Saïss pour la période (1980/2014). Parmi les mesures effectuées concernent 14 piézomètres, les mesures des piézomètres les plus représentant dans l'espace et dans le temps ont été choisis. Pour mieux identifier l'effet de la variation pluviométrique sur l'évolution piézométrique de la nappe phréatique superficielle de la Plaine de Saïss, une analyse et comparaison des variations spatio-temporelles simultanées des précipitations et de la piézométrie de la nappe a été effectuées (Chap1, Partie III).

III. Conclusion

La géologie de la Plaine de Saïss a montré une diversité des formations géologiques, essentiellement celle relative au Plio-quaternaire. La Plaine de Saïss est un bassin à remplissage mio-plio-quaternaire recouvrant en discordance un substratum paléozoïque, triasique et liasique.

Le substratum géologique est formé de terrains paléozoïques, surtout schisteux et grésopélitique surmontés par des terrains argilo-gypsifère triasiques qui s'achèvent par des terrains calcaro-dolomitiques liasiques. La partie supérieure de la couverture débute par des dépôts détritiques grossiers et des conglomérats qui se déposent en discordance sur les formations liasiques. Il s'agit des dépôts caractérisant un milieu littoral. Cette série se poursuit par une épaisse formation marneuse caractérisant un milieu marin profond.

La série pliocène évoluant depuis les faciès indiquant une tendance à l'émersion (marnes et grès) puis lacustres au Pliocène supérieur (calcaires lacustres). La série du remplissage se termine avec des dépôts fluvio-deltaïques quaternaires continentaux. La structuration de la Plaine de Saïss est en liaison avec l'évolution tectonique des domaines montagneux rifaine et atlasique. Trois phases tectono-sédimentaires allant du Tortonien au Plio-quaternaire ont été distinguées.

En effet, les faciès géologiques qui affleurent dans une zone donnée ont une influence sur la répartition des écoulements superficiels et par conséquent le taux d'infiltration vers les réservoirs souterrains. En effet, un bassin formé de matériaux très perméables avec une couverture végétale continue aura en général une densité de drainage faible assurant une meilleure infiltration des eaux superficielles.

Par ailleurs, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des marnes ou des argiles, avec une végétation moyenne, présente souvent une densité de drainage élevée, ce qui favorise le ruissellement des eaux superficielles aux dépens de l'infiltration.

La Plaine de Saïss montre que les formations affleurantes essentiellement plio-quaternaires représentées par des dépôts variés (grès, calcaires, travertins, coulées basaltiques, limons et croutes calcaires, cônes de déjections et éboulis) constituant des terrains perméables à semi perméables occupant la presque totalité de la superficie de la Plaine, ce qui favorise l'infiltration des eaux de surface.

Au terme hydrogéologique, la Plaine de Saïss comporte deux principales nappes, la nappe superficielle du Plio-quaternaire et la nappe profonde liasique. L'écoulement souterrain se fait, en général, selon une direction Sud-Est, avec un gradient hydraulique moyen et constant sur la Plaine de Saïss sauf aux flux qui sont régis par la flexion de l'Ain Taoujdate.

Les valeurs les plus importantes de la perméabilité et de la transmissivité se localisent au centre de la Plaine de Saïss et les plus faibles en bordures. Le niveau piézométrique présente une évolution régulière, caractérisée par une baisse durant la période des basses eaux sous l'effet de l'évaporation et l'exploitation intense des eaux de la nappe à des fins d'irrigation et par une faible remontée pendant la période de hautes eaux, suite à la recharge de la nappe par les eaux pluviales.

Les fluctuations de la nappe phréatique superficielle de la Plaine de Saïss sont soumises aux caractéristiques climatiques de la région : faible pluviométrie d'une part et forte évaporation d'autre part, effet météorologique accentué par la surexploitation des eaux souterraines à des fins industrielles et pour l'alimentation en eau potable.

Enfin, les conséquences souvent dommageables de la variabilité climatique en général et des sécheresses en particulier, sur l'homme et ses activités suscitent des études approfondies pour mieux comprendre comment le climat et les pressions naturelles et environnementales interagissent localement avec les ressources hydriques.

Chapitre 2

Climatologie de la Plaine de Saïss

Sachant que les changements climatiques sont très importants dans la mesure où ils déterminent les fluctuations du niveau piézométrique des nappes phréatiques, les données climatiques sont d'une grande importance pour les évoquer. Le comportement des nappes aquifères et la variation du niveau piézométrique dépendent étroitement des précipitations et des prélèvements mais également d'un certain nombre de paramètres qui régissent d'une part le ruissellement et d'autre part l'évapotranspiration. Il est important de signaler à cet effet que l'alimentation est régie par la fraction de pluies infiltrées vers la zone saturée, constituant à moyen terme la véritable ressource mobilisable. On entrevoit l'étude de l'évolution pluviométrique afin de comprendre et bien interpréter les comportements des piézomètres implantés dans le secteur.

I. Acquisition et présentation des données climatiques

L'étude hydrogéologique d'une nappe phréatique superficielle nécessite un traitement des observations et des données climatiques. En raison de l'importance des précipitations dans les études hydroclimatologiques, la Plaine de Saïss a été dotée d'un nombre de stations pluviométriques réparties selon des altitudes qui varient entre 415m à 760 m.

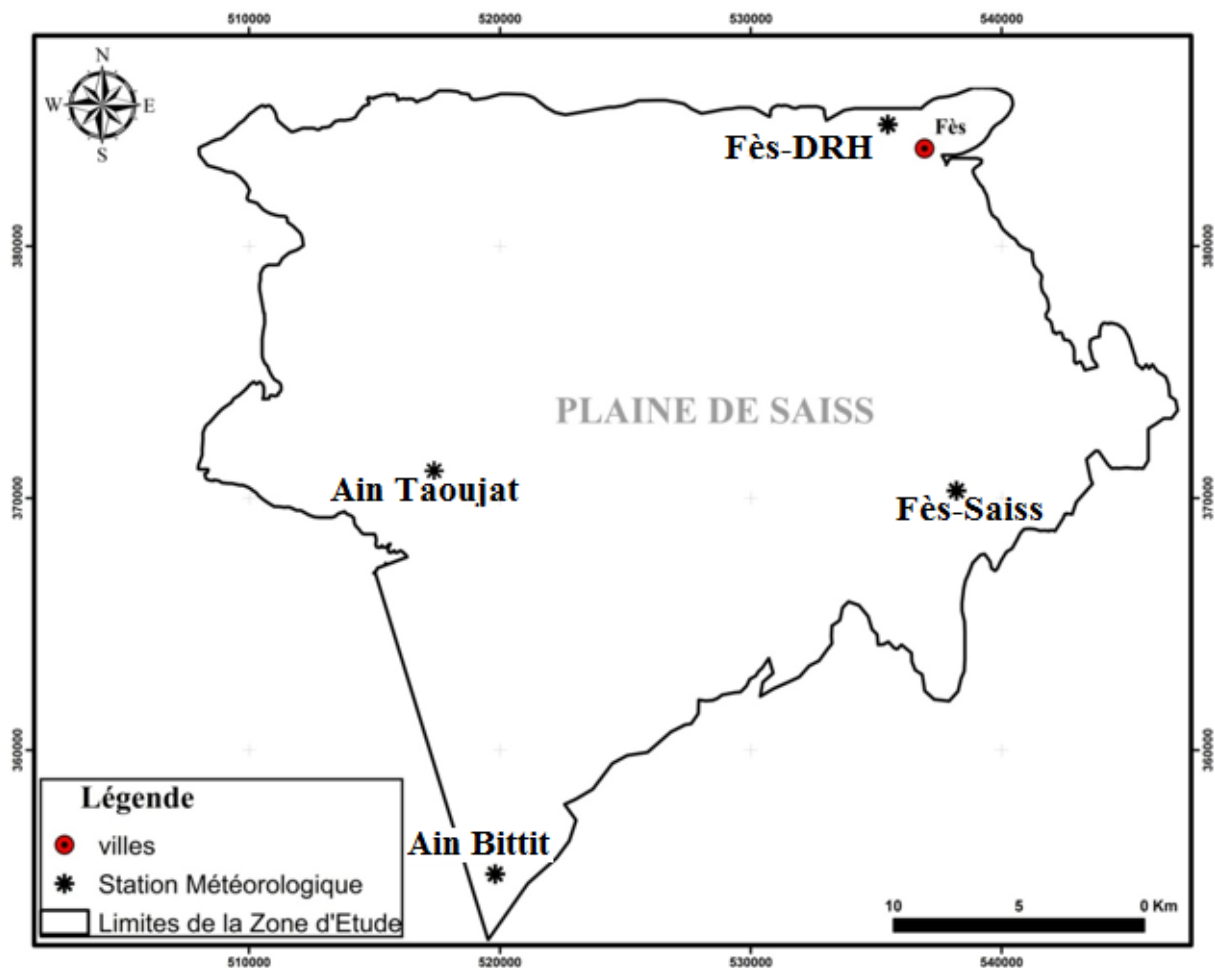


Figure 14 : Situation géographique des stations météorologiques dans la Plaine de Saïss

Vu qu'elles possèdent des séries d'observations plus longues, contiennent peu de lacunes et leur situation à l'intérieur de la Plaine de Saïss, trois stations ont été choisies, Fès-DRH, Ain Bittit et Fès-Saïss (Figure14). Il est donc essentiel, avant de traiter ces données, de se préoccuper de leur qualité et de leur fiabilité au moyen des méthodes appropriées. La majorité des stations comporte des lacunes dans

les séries d'observation. Une vérification systématique sur les fichiers de valeurs a été effectuée. Le travail consiste à combler les lacunes contenues dans les séries de mesures. En effet, des lacunes et discontinuités dans les séries chronologiques des pluies et des températures ont été remarquées pendant certaines années ou mois. La méthode des doubles masses (doubles cumuls) a été utilisée afin d'évaluer l'homogénéité des séries de mesures des stations météorologiques.

1. Présentation des données

L'ensemble des données climatiques a été mis à notre disposition par l'Agence de Bassin Hydraulique de Sebou et la station météorologique de Fès-Saïss (Aéroport-Fès). Dans ces séries de données climatiques, il a été tenté d'identifier un maximum de postes de mesures répondant aux conditions suivantes :

- la taille de l'échantillon (information couvrant les quatre dernières décennies);
- la position géographique ;
- la qualité des données (pas de lacunes de plus de trois années consécutives).

Les séries de mesures climatiques (température et pluie) les plus longues (entre 30 et 36 ans) et disponibles au niveau de la Plaine de Saïss sont utilisées. Les années présentant des mois lacunaires ont été comblées si le déficit n'a pas été trop important, c'est-à-dire si le nombre de mois manquants ne dépasse pas 3 mois, et si ceux-ci ne sont pas habituellement les plus pluvieux. La série des températures de l'air est disponible au niveau de la station Fès-Saïss, elle couvre la période (1961-2014). Ces données semblent assez homogènes, de bonne qualité et représentatives de la Plaine de Saïss.

2. Etude d'homogénéité des données

Les séries climatiques sont composées de données climatiques réelles et de ruptures artificielles dues à des modifications des conditions de mesure. Ces ruptures peuvent être du même ordre de grandeur que le signal climatique réel. La correction de ces ruptures artificielles est nécessaire avant d'entreprendre toute étude.

La question de l'homogénéité ou de la non homogénéité des observations est un problème important, compte tenu des conséquences que peut entraîner l'utilisation de séries non homogènes, considérées en fait comme homogènes. Une série est dite homogène, si les observations qui la composent ont été effectuées de la même façon et sont issues de la même population. Pour les statisticiens, la série de données est dite homogène, si les propriétés statistiques de l'erreur de mesure affectant ces données sont restées invariables au cours de la période d'observation.

D'une façon générale, les éléments climatiques dans le temps ne se produisent pas de la même façon et la série correspondante n'est pas purement stationnaire. Les causes perturbatrices les plus courantes de l'homogénéité des observations sont :

- le mauvais état ou la défectuosité d'appareils de mesures ;
- un changement d'observateur ;
- le déplacement de la station (différences topographiques) ;
- le changement de type d'appareils, de leurs conditions d'installations (hauteur au-dessus du sol) ;
- la lecture non adéquate du pluviomètre qui entraîne une forte hétérogénéité des séries pluviométriques.

L'utilisateur des données doit connaître l'historique des stations d'observations, ce qui permettra d'expliquer les causes de l'hétérogénéité lorsqu'elle existe. Cet historique comprend le nom de la station, les coordonnées, les périodes et le personnel d'exploitation et les détails sur son équipement. L'examen visuel des totaux annuels de toutes les stations pour la période d'étude 1978-2014 de la Plaine de Saïss, montre que quelques séries sont affectées par un manque de données ou par

des lacunes. Les méthodes citées ci-dessous ont été utilisées pour le comblement de lacunes et l'étude de l'homogénéité.

2.1. Estimation des données manquantes

On peut estimer les données manquantes ou erronées à une station à partir des valeurs provenant des stations voisines soumises aux mêmes conditions climatiques et situées dans la même zone géographique. Des méthodes sont proposées pour la restitution des données pluviométriques (remplacer la valeur manquante par celle de la station la plus proche, remplacer la valeur manquante par la moyenne des stations voisines...)

Cette méthode est utilisée lorsque les précipitations moyennes annuelles de la station à compléter ne diffèrent pas de plus de 10% des précipitations moyennes annuelles aux stations de référence. Pour notre étude la qualité des données pluviométriques utilisées (pas de lacunes de plus de trois années consécutives). Les années présentant des mois lacunaires ont été comblées si le déficit n'a pas été trop important, c'est-à-dire si le nombre de mois manquants ne dépasse pas 3mois et si ceux-ci ne sont pas habituellement les plus pluvieux.

2.2. Méthode du double cumul

Le principe consiste à cumuler les valeurs annuelles observées de chaque paramètre à traiter, une fois que les valeurs sont cumulées, la droite des cumuls est obtenue en fonction de la station à tester et d'une deuxième station de la même région, qu'on appellera station référence. La similitude de comportement des deux stations se traduit par un quasi alignement des points représentatifs. Une déviation de comportement d'une des deux séries (stations) va se traduire par un nouvel alignement le long d'une droite différente de la première. Cette méthode est particulièrement utilisée pour tester l'homogénéité et détecter la tendance des stations.

Les figures 15,16 et 17 montrent qu'il n'y a aucun changement de l'exploitation des stations de la Plaine de Saïss. En termes de fiabilité de données, la plupart des stations pluviométriques ont présenté une bonne homogénéité. Les coefficients de détermination montrent une bonne corrélation entre les séries pluviométriques. Les résultats obtenus (tendance linéaire) montrent que les précipitations mesurées au niveau des stations choisies sont homogènes.

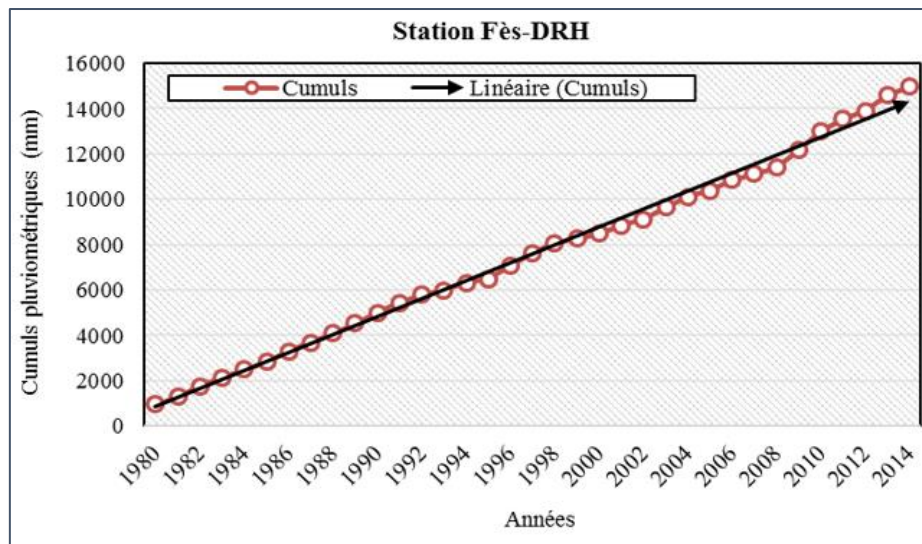


Figure 15 : Homogénéité de la série de mesures de la station Fès-DRH

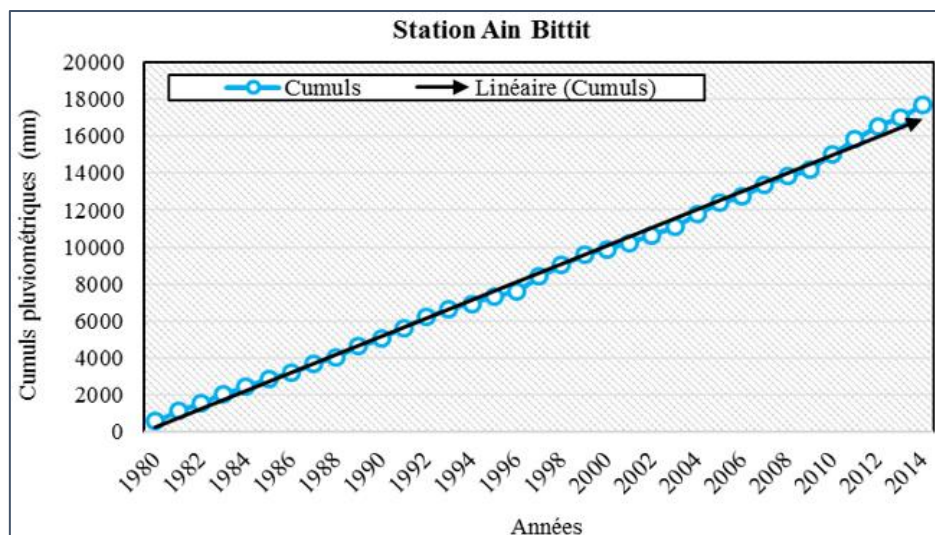


Figure 16 : Homogénéité de la série de mesures de la station d'Ain Bittit

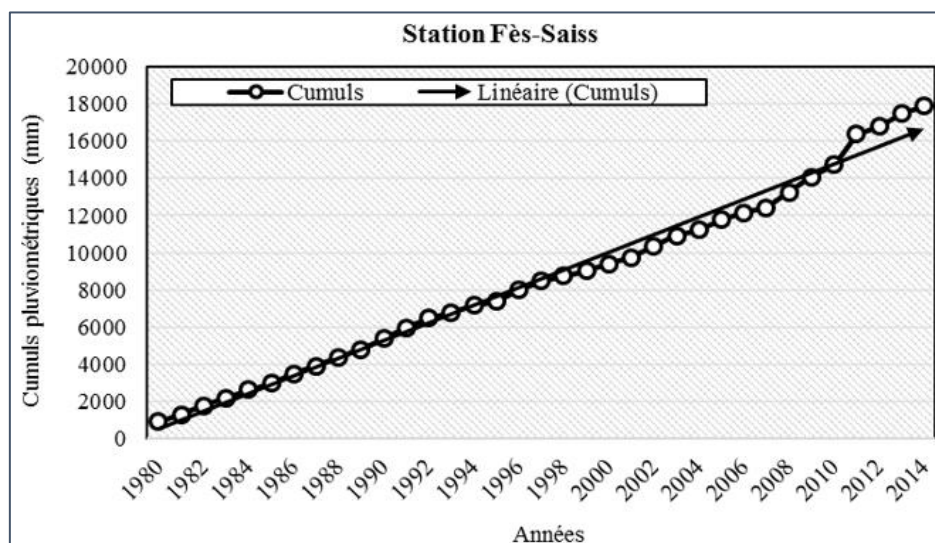


Figure 17 : Homogénéité de la série de mesures de Fès-Saïss

II. Etude des paramètres climatiques

Il est très probable que la variabilité climatique globale ou locale inclura des changements dans la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes (Meehl & al., 2000). Ces événements extrêmes sont susceptibles d'avoir des impacts importants et immédiats sur les systèmes naturels, agricoles et sociaux. L'étude climatique d'une zone donnée à l'aide d'indices ou de diagrammes permet de comparer les climats d'une région à l'autre. Ils prennent généralement en compte l'évolution pluviométrique, la demande évaporatoire et les températures.

Pour les précipitations extrêmes, les effets sont souvent lourds, provoquant des inondations ou des sécheresses (Easterling & al., 2000a). Par conséquent, il est important d'analyser les événements extrêmes associés à la variabilité naturelle du climat afin de détecter les mécanismes et les processus menant à leur apparition. Selon le GIEC, les phénomènes météorologiques rares qui se produisent à un endroit et à un moment précis sont définis comme des événements extrêmes. Lorsqu'un événement météorologique extrême persiste pendant un certain temps, il peut être classé comme un événement météorologique extrême, surtout s'il atteint une moyenne ou un total extrême (GIEC, 2007).

1. Pluviométrie

L'étude pluviométrique et son évolution spatio-temporelle présentent un intérêt considérable en hydroclimatologie, aussi bien pour décrire le régime d'écoulement superficiel que pour comprendre l'hydrodynamisme de la nappe de la zone d'étude. Ces pluies constituent le facteur principal de recharge des nappes de la Plaine de Saïss, elles se font soit directement sur la Plaine soit sur le Causse moyen atlasique et arrivent sur la Plaine par ruissellement en surface ou par infiltration et écoulement vers les nappes souterraines. Toutefois, l'étude des pluies est complexe car elle peut être envisagée sous des aspects très différents. Non seulement la quantité est importante, mais aussi la fréquence, l'intensité et la durée (Trenberth & al., 2003), ou de nombreuses autres variables liées aux distributions spatiales, saisonnières et intra-saisonnières.

Notre base de données pluviométriques comporte des enregistrements mensuels des trois stations pluviométriques réparties d'une façon homogène par rapport à la superficie de la Plaine de Saïss.

1.1. Variations annuelles et mensuelles des précipitations

A. Station Fès-DRH

Pour cette station, l'historique pluviométrique disponible correspond à la période (1978-2014). Les précipitations interannuelles moyennes obtenues pour cette période sont de l'ordre de 490 mm.

L'analyse de la courbe ci-dessous, sur une période de 36 ans (1978-2014), montre que l'année 2009-2010 est la plus pluvieuse avec 838 mm et l'année 1994-1995 est la plus sèche avec 181 mm (Figure 18).

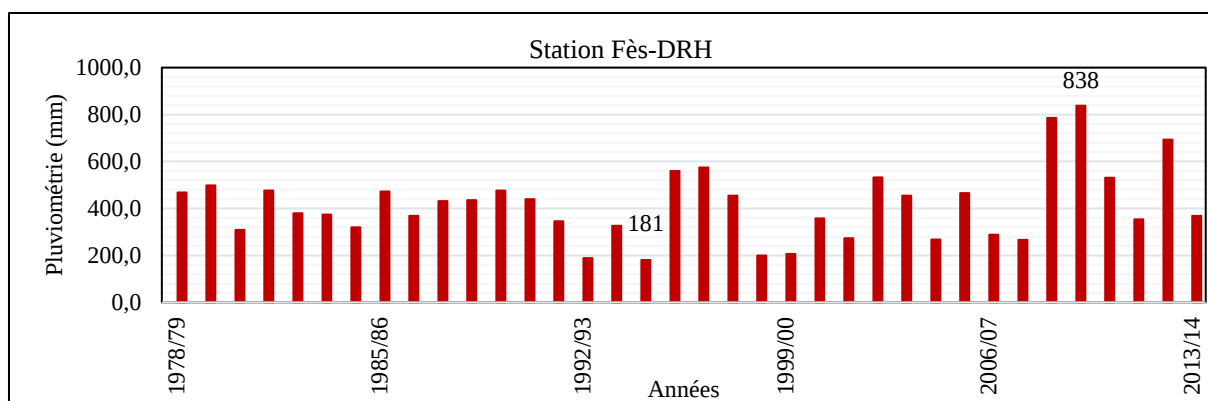


Figure 18: Précipitations moyennes annuelles de la station Fès-DRH

La figure ci-dessous montre que le mois de novembre est le mois le plus humide avec 62.9 mm, en notant également une précipitation importante du mois de janvier et le mois de juillet est le mois le plus sec avec 0.6 mm.

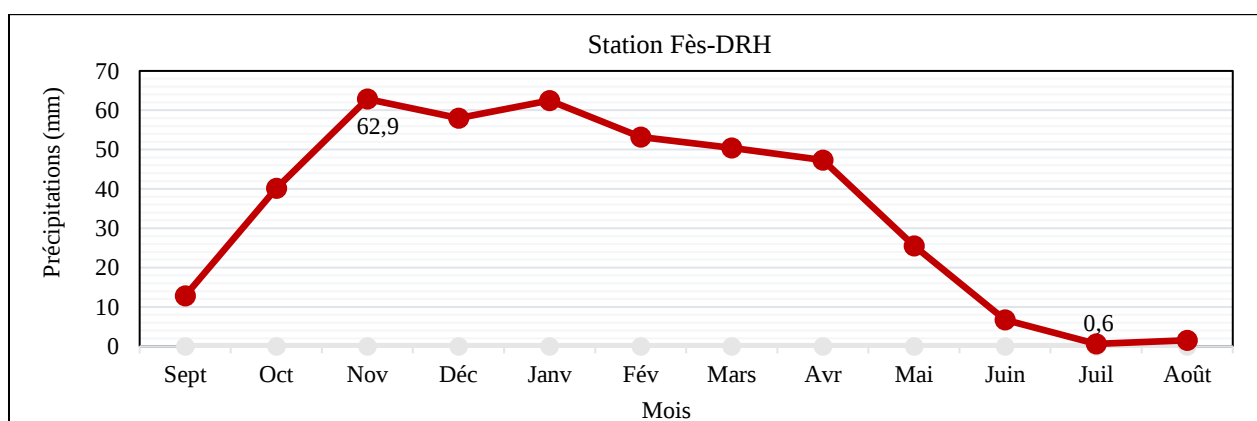


Figure 19: Précipitations moyennes mensuelles de la station Fès-DRH

B. Station Ain Bittit

Pour cette station, l'historique pluviométrique disponible correspond à la période 1978 -2014. Les précipitations interannuelles moyennes obtenues pour cette période sont de l'ordre de 480.3mm.

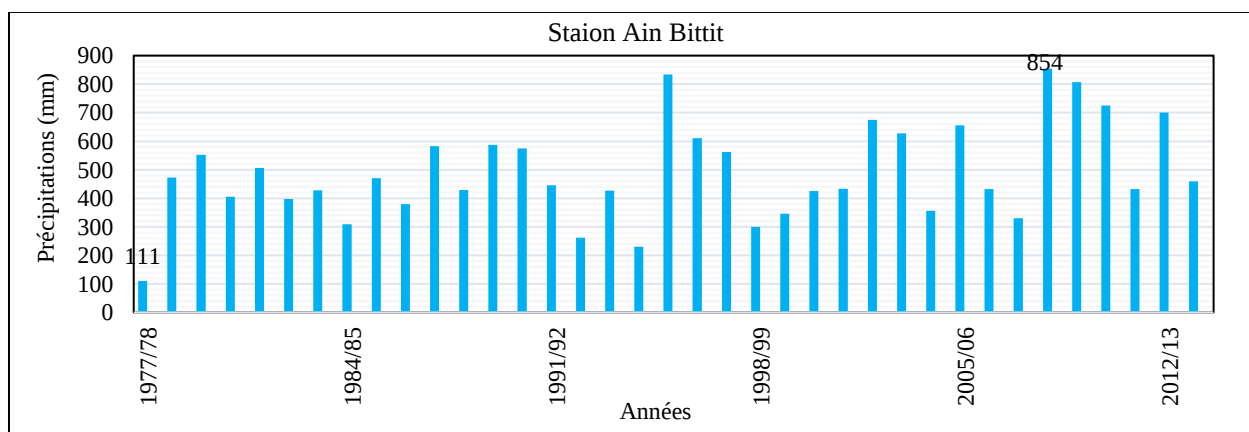


Figure 20: Précipitations moyennes annuelles de la station Ain Bittit

L'analyse de la courbe ci-dessus, sur la période (1978-2014), montre que l'année 2008-2009 est la plus humide avec 854 mm et l'année 1978-79 est la plus sèche avec 111 mm (Figure 20).

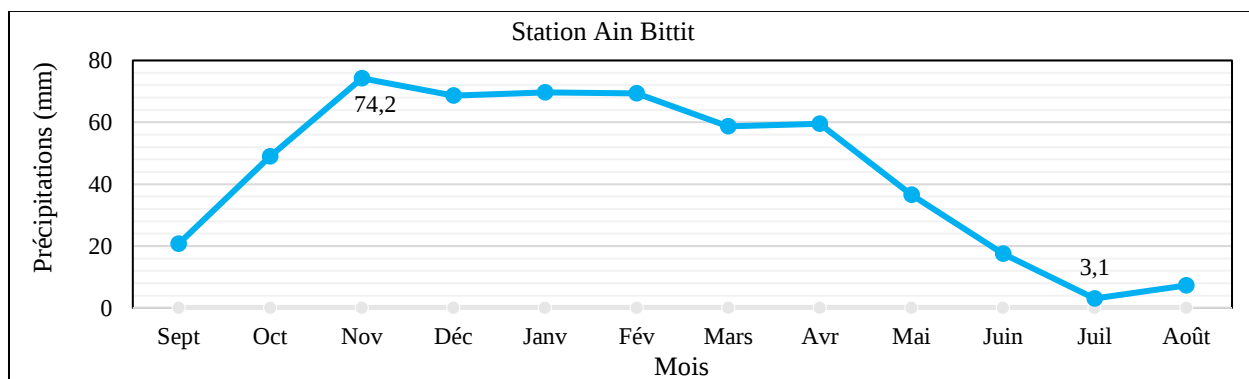


Figure 21: Précipitations moyennes mensuelles de la station Ain Bittit

La figure 21 montre que le mois de novembre est le mois le plus humide avec 74.2 mm notant également une précipitation importante du mois de janvier, et le mois de juillet est le mois le plus sec avec 3.1 mm.

C. Station Fès-Saïss

Pour cette station, l'historique pluviométrique disponible correspond à la période 1973-2014. Les précipitations interannuelles obtenues pour cette période sont de l'ordre de 455.2mm.

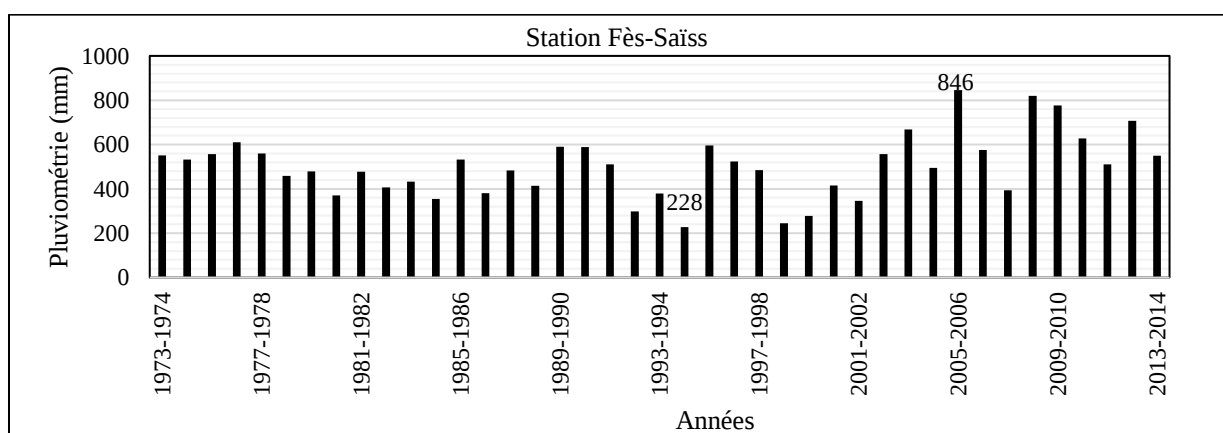


Figure 22: Précipitations moyennes annuelles de la station Fès-Saïss

L'analyse de la courbe ci-dessus, sur la période (1978-2014), montre que l'année 2006 /07 est la plus arrosée avec 846 mm et l'année 1994/95 est la plus sèche avec 228 mm (Figure 22).

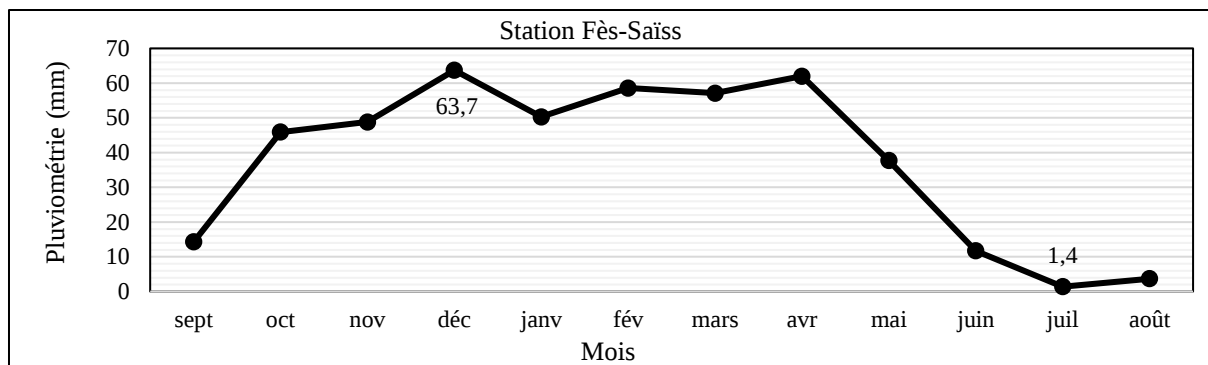


Figure 23: Précipitations moyennes mensuelles de la station Fès-Saïss

La figure ci-dessus montre que le mois de décembre est le mois le plus arrosé avec 148.6 mm et le mois de juillet est le mois le plus sec avec 1.8 mm.

Une comparaison de la pluviométrie des trois stations météorologiques Fès-Saïss, Fès-DRH et Ain Bittit pendant la période étudiée a montré une apparente synchronisation dans le déclenchement du phénomène (Figure 24).

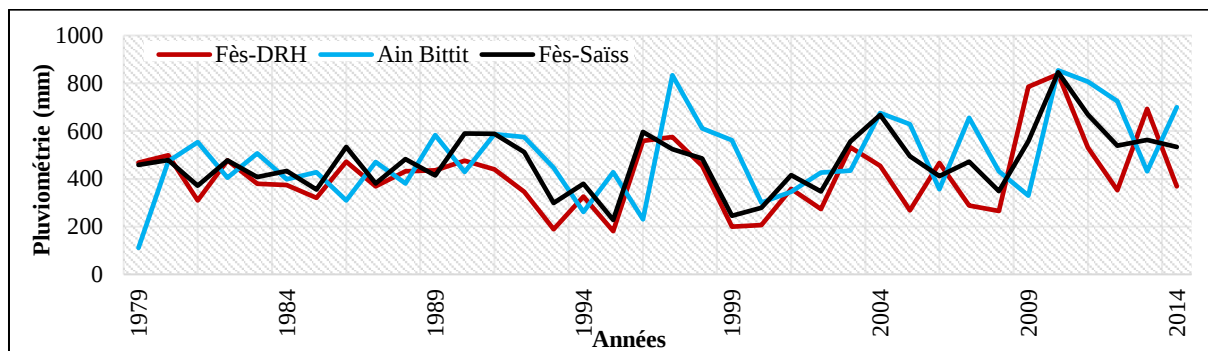


Figure 24: Précipitations annuelles des trois stations météorologiques pour la période (1979-2014)

Le graphique (Figure 24) montre que les années les plus pluvieuses sont (2007-2008), (2009-2010) et (2010-2011) ; alors que les années (1992-1993), (1994-1995) et (1998-1999) sont considérées comme les années les plus sèches.

Tableau 4: Statistiques descriptives des trois stations d'étude

Stations	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Ecart type	Coefficient de variation
Fès-DRH	181,00	838,00	419,85	431,00	153,04	36,45
Ain Bittit	111,00	854,00	490,32	446,00	169,43	34,55
Fès-Saïss	228,00	822,50	489,34	478,60	149,85	30,62

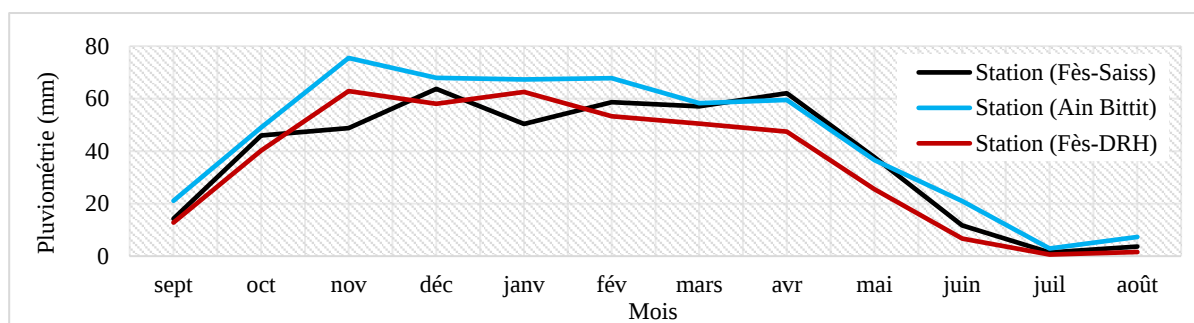


Figure 25: Comparaison des précipitations moyennes mensuelles des trois stations pour la période (1979-2014)

L'analyse du graphique (Figure 26) montre que les mois les plus humides sont novembre et décembre, tandis que les mois juin, juillet et août sont considérés comme les mois les plus secs.

A partir de ce graphique, on remarque que les quantités de pluie tombées au niveau de la station Ain Bittit, sont en moyenne supérieures à celles enregistrées au niveau des stations météorologiques Fès-Saïss et de Fès-DRH. En effet, durant la période d'étude, la station Fès-DRH est caractérisée par cinq années plus humides, 1996, 1997, 2009, 2010 et 2013 avec un maximum de 830 mm enregistré durant l'année 2010. Ces années pluvieuses sont intercalées avec sept années plus sèches, 1993, 1995, 1999, 2000, 2005, 2007 et 2008 dont le maximum est de 288 mm durant l'année 2007. La station Ain Bittit est caractérisée par quatre années pluvieuses, 1996, 2003, 2009, 2010 et 2011, avec un maximum de 854 mm de pluie enregistrée pendant 2009 (Tableau 4). Six années sèches ont marqué cette station, 1978, 1985, 1993, 1995, 2005 et 2008 avec un minimum de pluie (111mm) enregistré pendant l'année 1978. Malgré une période de suivi courte (par manque de données), on note l'influence des reliefs et l'influence de l'éloignement de la mer sur la répartition des pluies.

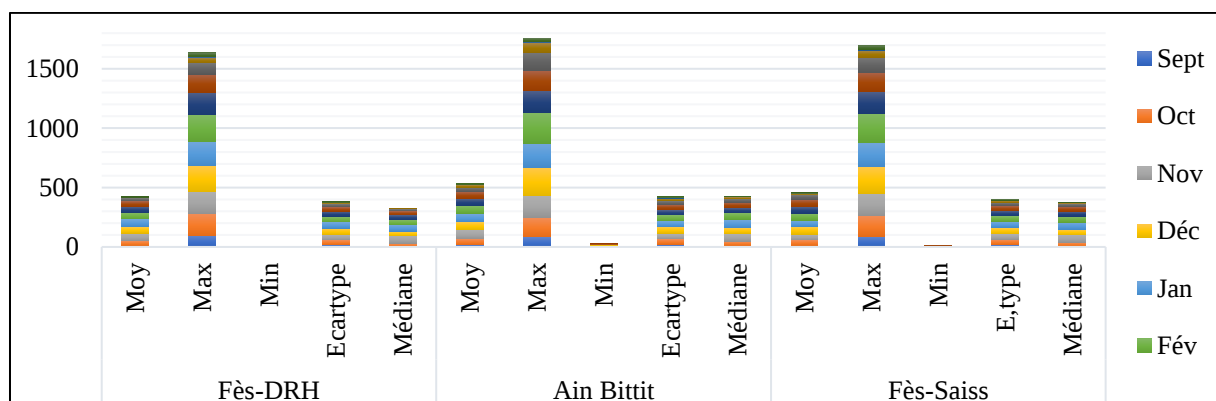


Figure 27: Description statistique de la pluviosité mensuelle pour les trois stations

1.2. Répartition des précipitations saisonnières

La distribution des quatre saisons dans l'hémisphère Nord est indiquée dans le tableau 5.

Tableau 6: Distribution des saisons dans l'hémisphère Nord

Saisons	Mois
Hiver (du 21 décembre au 21 mars)	janvier – février - mars
Printemps (du 21 mars au 21 juin)	avril – mai - juin
Été (du 21 juin au 21 septembre)	juillet – août -septembre
Automne (du 21 septembre au 21 décembre)	octobre – novembre - décembre

La répartition saisonnière des précipitations pour les trois stations est présentée dans le tableau 6.

Tableau 7 : Précipitations saisonnières des précipitations dans les trois stations en (mm)

Station	Précipitations (mm)			
	Hiver	Printemps	Eté	Automne
Fès-Saïss	286.85	163.31	53.25	364.43
Ain Bittit	166.2	79.6	14.9	161.1
Fès-DRH	197.79	113.6	31	161.9

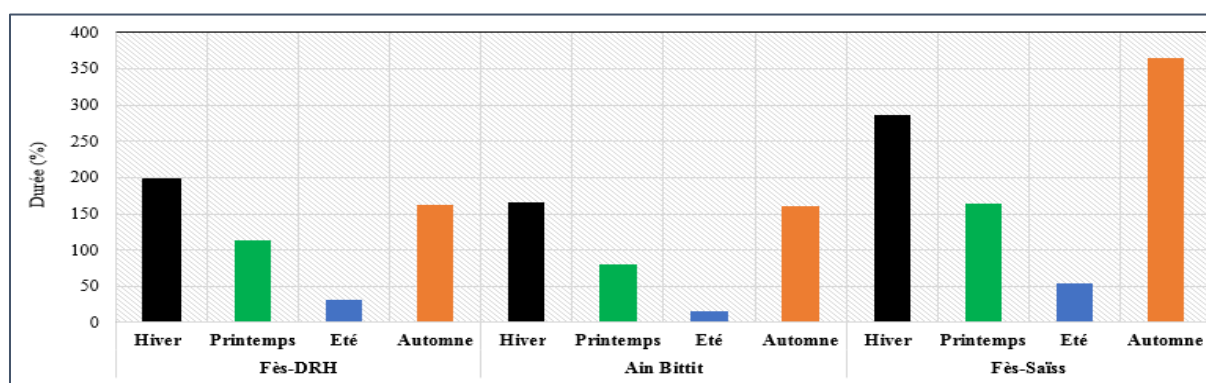


Figure 28 : Répartition saisonnière des précipitations dans les trois stations

Les saisons d'hiver et Automne sont les plus pluviales pour les trois stations avec un pourcentage de pluviométrie qui atteint 42% des précipitations annuelles. Ceci caractérise un climat méditerranéen (Figure 27).

2. Température

Plusieurs études ont examiné les tendances des températures minimales et maximales au cours des dernières décennies, tant aux échelles globales que locales. Dans de nombreux cas, les résultats indiquent que même si les températures moyennes ont augmenté, cette augmentation est surtout due à des changements dans la température minimale, tandis que les températures maximales quotidiennes sont restées stables ou ont augmenté légèrement (Easterling & al., 1997).

À l'échelle globale, les tendances des températures maximales et minimales ont été examinées par Karl & al. (1993), il a été constaté que les températures minimales moyennes sur la surface de la terre ont augmenté environ trois fois plus vite que les températures maximales moyennes pendant la période 1951-1990, avec une augmentation de 0.84 °C pour les températures minimales par rapport à une augmentation de 0.28 °C pour les températures maximales. Ces résultats sont confirmés par ceux de Easterling & al. (1997), sur les températures mensuelles enregistrées par 5400 stations du monde durant la période entre 1950 et 1993. Cette étude a révélé que la température minimale moyenne a augmenté de 1.86°C par siècle, alors que les températures maximales ont augmenté à un rythme plus lent de 0.88 °C par siècle.

Sachant que la température est un élément fondamental du climat en relation avec les radiations solaires. Sa variation influe sur la transformation des eaux en vapeur, que ce soit à la surface ou dans le sous-sol. De ce fait, elle influe sur le degré d'évapotranspiration et par conséquent le taux de salinité des eaux. Toutefois, la température a un rôle important dans la variation des composantes du bilan hydrologique.

2.1. Variations des températures moyennes annuelles et mensuelles

A partir des valeurs maximales et minimales journalières mesurées à la station Fès-Saïss, les températures moyennes annuelles et mensuelles sont calculées sur une période de 35ans de 1978/79 à 2013/14. Les courbes représentant la variation annuelle de la température, sur une période de 35 ans (1978-2014), montre que l'année la plus chaude est l'année 2013/2014 avec une moyenne de 19.96°C, et l'année la plus froide est l'année 1992/93 avec une moyenne de 15.9°C. Signalons que la température moyenne interannuelle est de l'ordre de 17.12 °C (Figure 28).

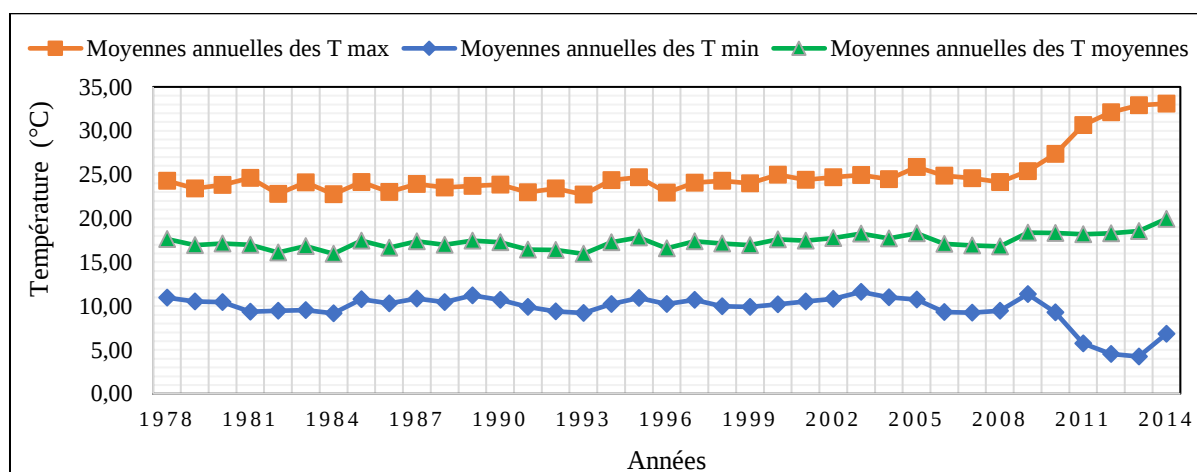


Figure 29: Températures moyennes annuelles à la station Fès-Saïss pour la période (1978-2014)

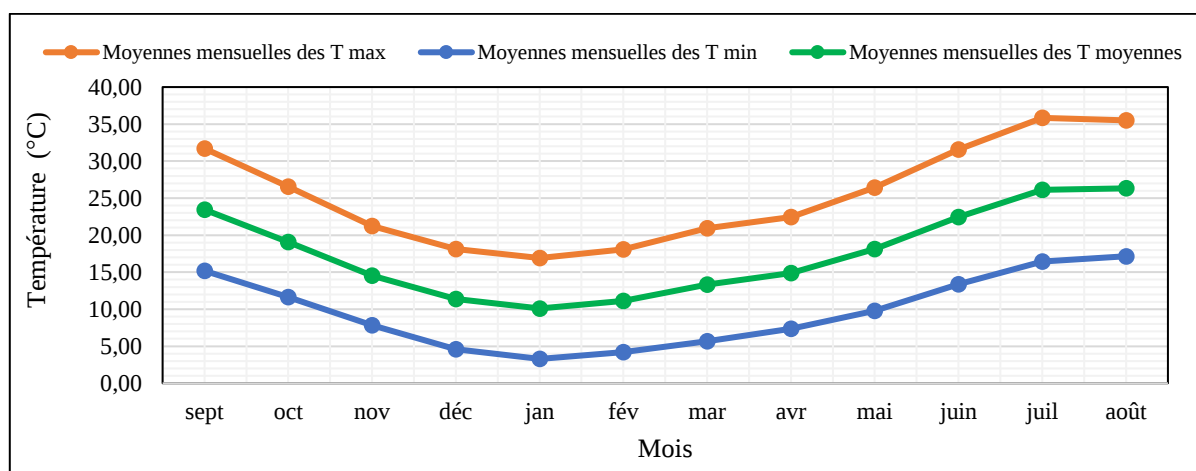


Figure 30: Températures moyennes mensuelles à la station Fès-Saïss pour la période (1978-2014)

L'analyse de la courbe de variation de la température moyenne mensuelle, sur une période de 35 ans montre que les valeurs les plus élevées sont observées pendant l'été (juin - septembre) avec des températures allant de 22.59 à 25.83°C. Les valeurs les plus basses, qui varient de 10.43 à 9.44°C, sont observées durant la période hivernale (décembre – mars), avec un minimum pendant le mois de janvier (9.44°C) (Figure 29).

2.2. Anomalies des températures annuelles

L'analyse des températures enregistrées à la station Fès Saïss depuis 1961 indique une augmentation significative du point de vue thermique (Figure30). Cette tendance est conforme au réchauffement global planétaire enregistré durant les cinquante dernières années avec l'accélération de ce processus durant la période 1993-2005 (GIEC, (2007).

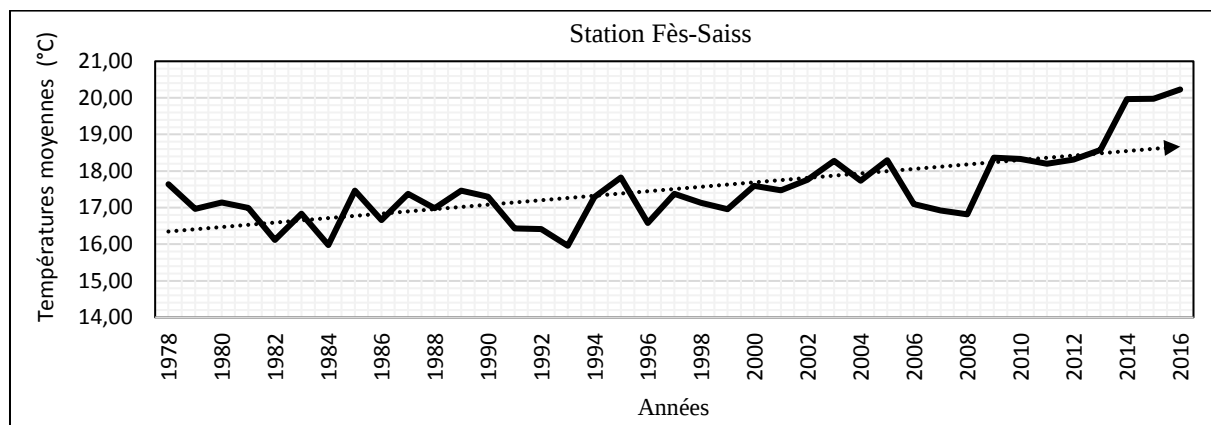


Figure 31: Températures annuelles à la station Fès-Saïss pour la période (1978-2014)

3. Caractérisation du climat

La caractérisation du climat d'une zone donnée à l'aide d'indices ou de diagrammes permet de comparer les climats d'une région à l'autre. Ils prennent généralement en compte l'offre pluviométrique, la demande évaporatoire et les températures.

3.1. Diagramme ombrothermique

Un mois sec se définit selon Bagnouls et Gaussen. (1953 et 1957) comme la somme pluviométrique (moyenne en millimètres) égale ou inférieure au double de la température ($P \leq 2T^\circ$). Ainsi, la saison sèche est formée par plusieurs mois secs consécutifs. Le diagramme de Gaussen permet de mettre en évidence une saison humide débutant au mois d'octobre et qui se termine au mois d'avril et une saison sèche qui s'étale du mois de mai jusqu'au mois de septembre (Figure 31).

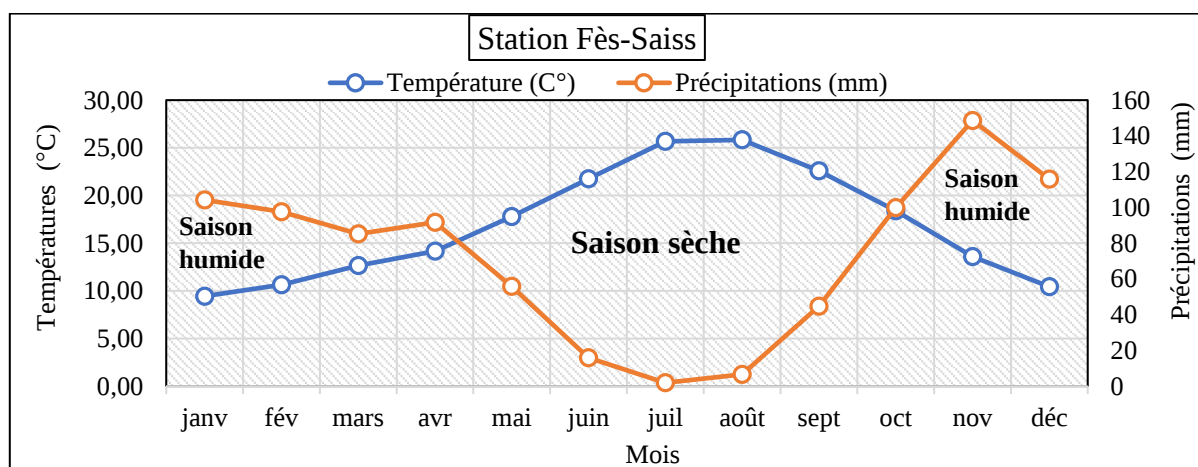


Figure 32: Courbe ombrothermique de la station Fès-Saïss pour la période (1978-2014)

3.2. Indice de Martonne

Cet indice qui permet d'identifier le degré d'aridité dans une région est fonction des températures et des précipitations, il est calculé en appliquant l'équation mentionnée dans le tableau 7

Tableau 8 : Indice de Martonne pour la station Fès- Saïss

Indice de Martonne [$I = P/(T+10)$] (Eq. 1)	Estimation (Fès-Saïss)	Type de climat
P : précipitations moyennes annuelles en mm.	P= 455.2mm	la station Fès- Saïss bénéficie d'un climat semi-aride
T : températures moyennes annuelles en °C	T= 17.12 C°	
I: indice d'aridité	<u>I=16.78</u>	

Suivant les valeurs de (I), Martonne a établi la classification suivante (Tableau 9) :

Tableau 10: Type de climat par indice de Martonne

$I < 5$	Climat hyperaride
$5 < I < 10$	Climat aride
$10 < I < 20$	Climat semi-aride
$20 < I < 30$	Climat humide.

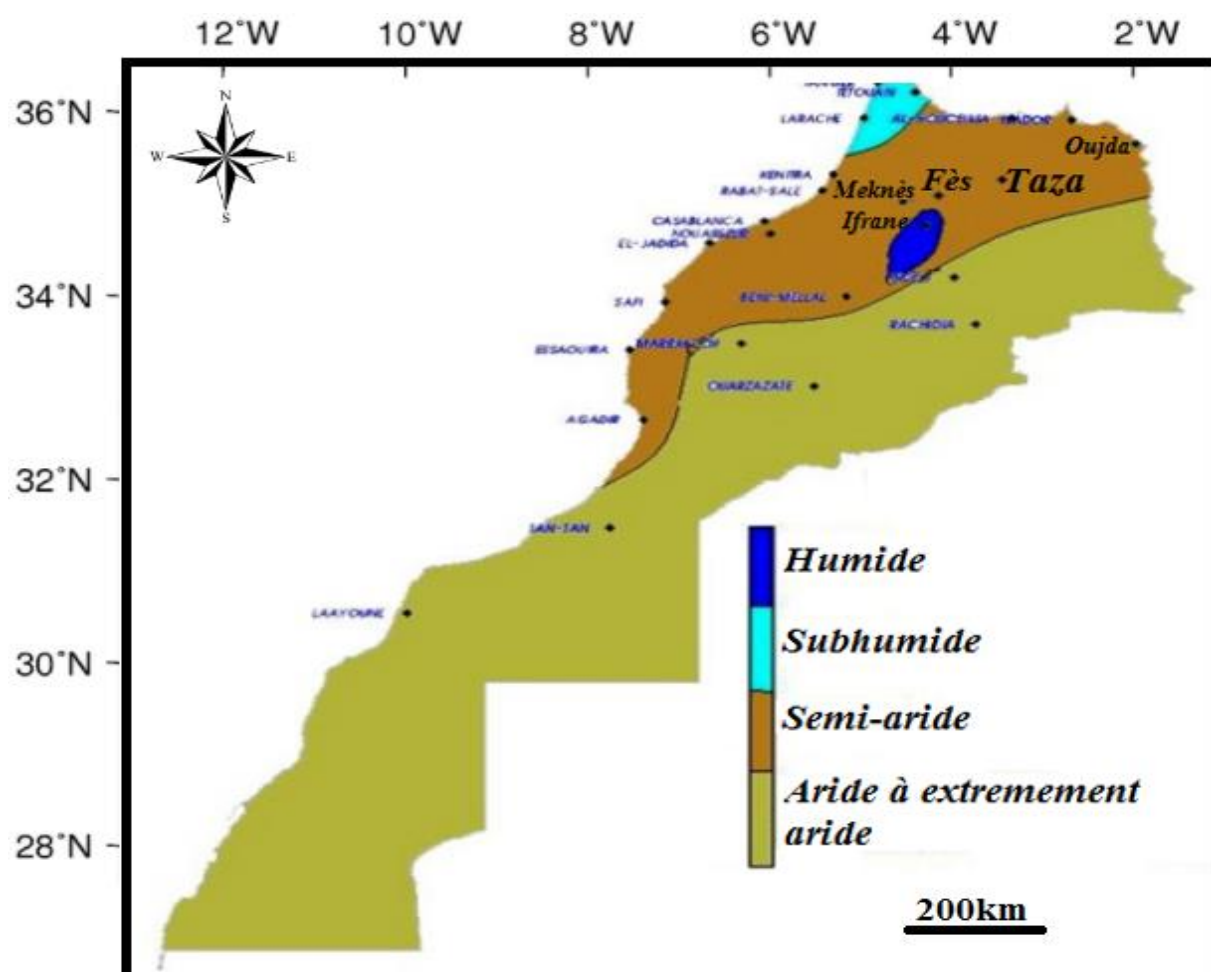


Figure 33: Climats du Maroc sur la période 1961-2005 en utilisant l'indice de Martonne (Khomsi, 2014)

3.3. Indice d'aridité mensuelle

Il est défini par la relation suivante : $i = 12p / (t+10)$ (Eq. 2)

Avec :

i : Indice d'aridité mensuelle

p : Précipitations moyennes mensuelles en mm

t : Température moyenne mensuelle en °C.

Tableau 11 : Estimation d'indice d'aridité mensuel de la station Fès-Saïss

Mois	Calcul d'indice d'aridité mensuel (i)			Etages bioclimatiques
	P (mm)	T(C°)	i	
Septembre	18,43	23,42	6,62	aride
Octobre	45,12	19,09	18,61	semi-aride
Novembre	66,29	14,52	32,44	humide
Décembre	62,59	11,37	35,15	humide
Janvier	50,38	10,10	30,07	humide
Février	57,76	11,14	32,78	humide
Mars	51,78	13,31	26,66	humide
Avril	52,35	14,90	25,22	humide
Mai	31,89	18,11	13,62	semi-aride
Juin	9,86	22,45	3,64	hyperaride
Juillet	3,70	26,14	1,23	hyperaride
Août	9,77	26,32	3,23	hyperaride

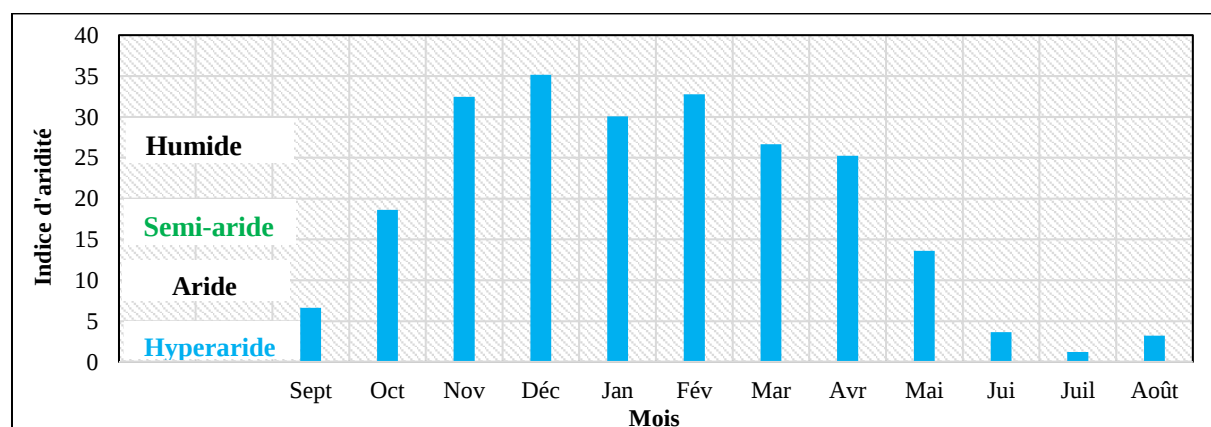


Figure 34 : Estimation d'indice d'aridité mensuel pour la station Fès-Saïss

3.4. Climagramme de Louis Emberger

Pour déterminer les climats de la zone méditerranéenne, Emberger a proposé la détermination d'un quotient pluviométrique Q2, qui dépend des précipitations moyennes annuelles et des moyennes de températures minima et maxima, respectivement des mois le plus froid et le plus chaud. Il propose donc la formule suivante :

$$Q=1000P/[(M - m) (M + m) /2] \quad (\text{Eq. 3})$$

Tableau 12: Estimation de la formule de Louis Emberger pour la station Fès-Saïss

Formule de Louis Emberger	Estimation pour la station Fès-Saïss
P : précipitations moyennes annuelles en mm.	P= 455.2mm
M : moyenne des maxima du mois le plus chaud (degrés/Kelvin)	M= 34.23C°= 307.38 °K
m : moyenne des minima du mois le plus froid (degrés/Kelvin)	m= 3.5C° =276,65°K
Q2 : Quotient pluviométrique	Q2= 50.22

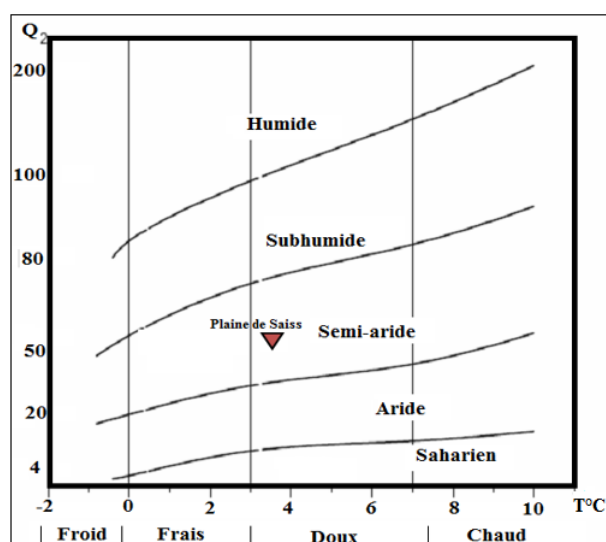


Figure 35: Climagramme d'Emberger de la station Fès-Saïss

Le rapport calculé de la station permet de placer le climat de la Plaine de Saïss dans la gamme des climats de type semi-aride (Figure 34).

3.5. Indice de Paul Moral

Les résultats précédents sont confirmés par l'indice pluviométrique de Moral (IM) (Tableau 13), qui utilise aussi la hauteur annuelle des précipitations (en mm) et les températures moyennes annuelles en °C.

Tableau 14: Application de l'Indice de Paul Moral de la Station Fès-Saïss

Indice de Paul Moral		Station Fès-Saïss	
IM<1	Climat sec	P= 455.2mm	T= 17.12 C°
IM >1	Climat humide	IM = 1.16	

On peut dire que le climat de la Plaine de Saïss est à la limite sec-humide, c'est-à-dire qu'il peut être qualifié de semi-aride.

3.6. Comparaison des indices

Sachant que les éléments climatiques les plus importants pour caractériser un climat sont les précipitations, les températures et l'évaporation ; les méthodes combinant ces éléments sont plus intéressantes que celles qui incluent un seul élément. Toutes ces méthodes ont qualifié le climat de la Plaine de Saïss comme étant semi-aride, caractérisé par des hivers tempérés et des étés très chauds et secs. Ce qui est en conformité avec la carte des étages bioclimatiques, établie par Côte (1998).

4. Estimation de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration est un processus physique qui correspond à la somme de l'évaporation de l'eau à la surface du sol, des végétaux ou des eaux libres et de la transpiration de l'eau par les plantes (Vannier & Braud, 2012). Généralement, nous nous référons à trois concepts de l'évapotranspiration : l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'évapotranspiration de référence (ET_o) et l'évapotranspiration réelle (ETR).

L'évapotranspiration potentielle ETP est la quantité d'eau qui serait évaporée ou transpirée à partir d'un bassin versant si la disponibilité de l'eau n'était pas un facteur limitant (Laborde, 2009).

L'évapotranspiration de référence (ET_o) est une valeur de l'évapotranspiration pour une végétation choisie, dans des conditions hydriques réelles, permettant ensuite de déduire l'évapotranspiration pour d'autres couverts végétaux. Des formations végétales, dans de mêmes conditions climatiques, peuvent avoir une évapotranspiration potentielle différente, si elles ne sont pas de même nature.

L'évapotranspiration réelle ETR est la quantité d'eau, généralement exprimée en millimètres, évaporée ou transpirée par le sol, les végétaux et les surfaces libres d'un bassin versant (Laborde, 2009).

4.1. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

Un certain nombre d'approches ont été utilisées pour évaluer l'évapotranspiration potentielle de référence. Ces méthodes de calcul peuvent être divisées en trois grandes catégories : les méthodes hydrologiques ou de bilan hydrique, les méthodes analytiques basées sur les variables climatiques et les estimations empiriques (Strzepek et Yates, 1997). La première catégorie comprend des approches physiques et son utilisation est limitée au laboratoire.

Dans la seconde catégorie, les processus d'évaporation et de transpiration sont décrits à travers des relations mathématiques qui se concentrent sur des composantes climatologiques. Les équations de Penman-Monteith et de Priestley Taylor sont des exemples bien connus dans cette catégorie.

Enfin, les méthodes empiriques, basées principalement uniquement sur la température, sont devenues très populaires en raison de leurs besoins limités en données. Leur inconvénient est que dans la plupart des cas, elles sont spécifiques au site (en fonction des conditions climatologiques locales) et elles doivent souvent être étalonnées. Cependant, comme les données dont elles ont besoin sont disponibles presque partout, elles sont généralement largement adoptées. Les méthodes de cette catégorie sont les équations de *Hargreaves*, *Thornthwaite* et *Blaney-Criddle*.

Dans ce cadre, des méthodes ETP utilisant uniquement des données de température et appartenant donc à la dernière catégorie sont sélectionnées. En dehors de ces méthodes, la méthode FAO Penman-Monteith a également été utilisée, la température étant la seule entrée de données. Pour comparer les résultats l'ETP calculé par les quatre méthodes ci-dessus, la méthode FAO Penman-Monteith a été utilisée comme méthode de référence.

Pour le calcul des formules des différentes méthodes, les données de la station météorologique de Fès-Saïss ont été utilisées suite aux :

- données mensuelles fiables concernant les précipitations, les températures maximale et minimale, l'humidité relative et la vitesse du vent.
- exhaustivité et longueur des séries de paramètres météorologiques pertinents
- répondre aux exigences des paramètres de la méthode la plus exigeante (FAO Penman-Monteith) qui a été utilisée comme méthode de référence pour comparer les autres méthodes les moins exigeantes en données.

Dans un premier temps, les données de la station ont été testées pour leur validité et vérifiées par des corrections mineures et le remplissage de petits écarts dans les séries chronologiques ont été effectués selon des pratiques statistiques classiques. Après les corrections, une série de données de 36 ans a été produite.

Ensuite, l'ETP a été calculé par les cinq méthodes utilisées. Les résultats de calcul sur une base annuelle sont présentés dans les figures 35, 36, 38, 39 et 40.

1.1. La méthode FAO Penman-Monteith (FAO P-M)

La méthode, actuellement recommandée comme méthode standard pour la détermination de l'ETP, a été initialement proposée en 1948 par Penman, qui a combiné le bilan énergétique avec la méthode de transfert de masse et a dérivé une équation pour calculer l'évaporation à partir d'une eau de surface libre, à partir des enregistrements climatologiques standards du rayonnement solaire (soleil), de la température de l'air, de l'humidité et de la vitesse du vent.

Cette méthode a été encore modifiée par de nombreux chercheurs et étendue à des surfaces cultivées en introduisant des facteurs de résistance. En mai 1990, un groupe d'experts et de chercheurs a été organisé par la FAO en collaboration avec la Commission internationale pour l'irrigation et le drainage et l'Organisation météorologique mondiale afin d'examiner les méthodologies relatives aux besoins en eau des cultures et de proposer des révisions et des mises à jour des procédures (Vangelis & al, 2013). L'étude a recommandé la méthode FAO Penman-Monteith pour estimer l'ETP selon l'équation suivante (Allen & al, 1998) :

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Rn-G) + \gamma \left[\frac{900}{T+273} \right] U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34U_2)} \quad (\text{Eq. 9})$$

Où,

ET_o est l'évapotranspiration de référence [mm jour⁻¹];

Δ, la pente de la courbe de pression de vapeur ;

R_n, le rayonnement net à la surface [W m⁻²];

G, la densité de flux de chaleur du sol [W m⁻²];

γ, constante psychométrique ;

T, la température moyenne quotidienne de l'air à la hauteur de 2 m;

U₂, vitesse du vent à 2 m de hauteur ;

e_s, la pression de vapeur saturée ;

e_a, la pression de vapeur réelle [kPa].

L'équation de Penman-Monteith de la FAO a été développée en définissant la culture de référence comme une culture hypothétique avec une hauteur présumée de 0,12 m, une résistance superficielle de 70 s / m et un albédo de 0,23, une culture active et un arrosage adéquat.

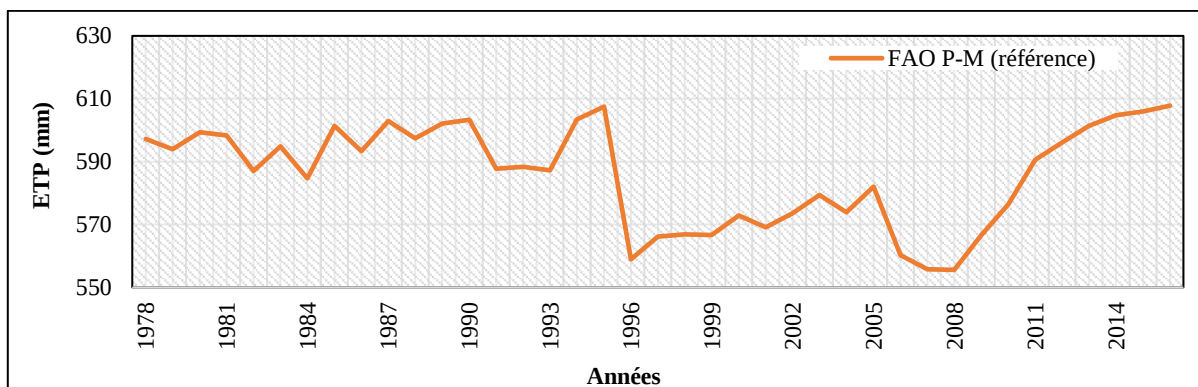


Figure 36: ETP annuelle estimé par la formule de FAO Penman-Monteith à la station Fès-Saïss (1978-2016)

Dans cette partie la valeur moyenne de 0,85 est utilisée. La méthode FAO Penman-Monteith (seulement T) : la méthode FAO Penman-Monteith nécessite un certain nombre de variables météorologiques pour son calcul, qui n'est pas toujours disponible. Même si tel est le cas, il est encore possible de calculer l'ETP selon la méthode FAO Penman-Monteith en utilisant un ensemble de données limité, contenant au moins la température maximale et la température minimale. Selon Allen & al. (1998), il est préférable d'utiliser la méthode FAO Penman-Monteith même avec un jeu de données limité au lieu d'une autre méthode empirique de calcul. La méthode appliquée pour l'évaluation de la ETP en utilisant les données manquantes estimées est appelée la méthode FAO P-M (seulement T).

En ce qui concerne les données manquantes d'humidité, la pression de vapeur réelle (e_a) peut être obtenue en supposant que la température du point de rosée (T_{dew}) est proche de la température minimale quotidienne (T_{min}). Dans les régions arides, le T_{dew} peut être mieux approché en soustrayant 2-3 °C de T_{min} (Vangelis & al, 2013).

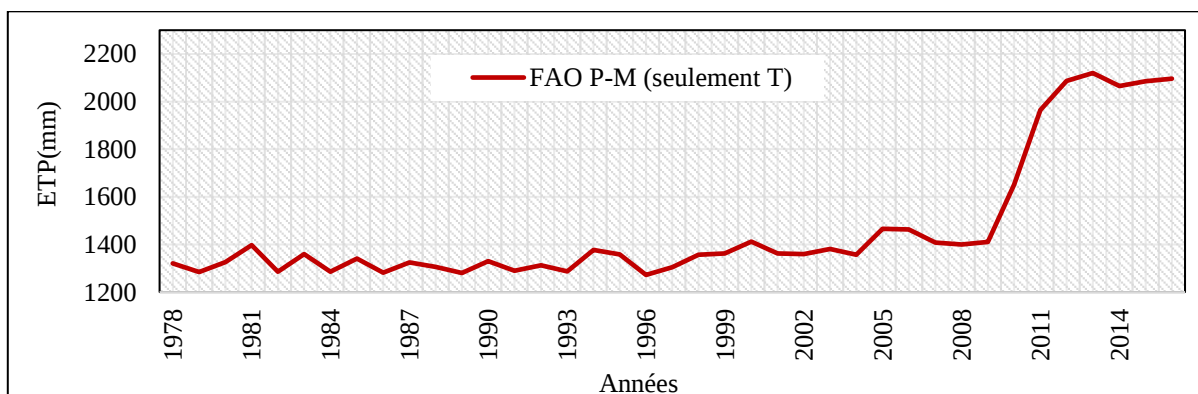


Figure 37 : ETP annuelle estimée par la formule de FAO Penman-Monteith pour la période (1978-2016)

Quand les données de rayonnement sont absentes, les ondes longues et le rayonnement net peuvent être dérivés du rayonnement solaire ou des heures de soleil, de la température de l'air et de la pression de vapeur, qui sont les paramètres météorologiques les plus couramment observés.

Les données relatives à la vitesse du vent peuvent également être estimées, puisque la variation de la vitesse moyenne du vent sur les périodes mensuelles est relativement faible et fluctue autour des valeurs moyennes.

La FAO propose des valeurs générales allant de moins de 1 m / s pour les zones de vent faible à plus de 5 m / s pour les zones de vent fort. Il est toutefois indiqué que la valeur moyenne de la vitesse du vent à 2 m de hauteur pour plus de 2000 stations météorologiques est de 2 m / s. Dans tous les cas, ces estimations devraient être validées en fonction des conditions climatiques régionales (Vangelis & al, 2013).

1.2. Méthode de Thornthwaite

L'une des méthodes les plus utilisées est celle proposée par Thornthwaite (1948). Bien qu'il existe plusieurs études qui montrent que la méthode sous-estime l'évapotranspiration, elle est applicable partout dans le monde, souvent utilisée avec un coefficient multiplicateur pour augmenter sa grandeur relative. La méthode estime l'ETP sur la base de l'équation suivante (Vangelis & al, 2013) :

$$ETP = 16 * \left(\frac{N}{12}\right) * \left(\frac{m}{30}\right) * \left(10 * \frac{T_{moyenne}}{I}\right)^a \quad (\text{Eq. 4})$$

Dans laquelle la $T_{moyenne}$ est la température moyenne mensuelle (°C), N est la moyenne des heures possibles de soleil (h / jour), m est le nombre de jours de chaque mois et a est donné par l'équation :

$$a = 6.75 * 10^{-7} * I^{3.7} * 10^{-5} * I^2 + 1.79 * 10^{-2} * I + 0.49 \quad (\text{Eq. 5})$$

Enfin, I est un indice de chaleur calculé comme la somme des 12 valeurs mensuelles selon l'équation suivante :

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_{moyenne}}{5}\right)^{1.514} \quad (\text{Eq. 6})$$

Les résultats des calculs de ces paramètres sont présentés dans le tableau 12.

Tableau 15 : ETP mensuelle estimée par la formule de Thornthwaite de la station Fès-Saïss (1978-2016)

Paramètres	Mois												Valeurs annuelles
	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	
T (°C)	22,5	18,3	13,5	10,4	9,4	10,6	12,6	14,1	17,7	21,7	25,6	25,8	16,85
i	11.9	9.7	7.2	4.5	2.6	3.1	3.1	4.0	4.8	6.7	9.2	11.8	78,6
ETP (mm)	101.6	70.6	41.4	26.17	21.9	27.1	36.67	44.7	66.6	95.3	127.5	129.2	788.74

Le graphe relatif à la station Fès-Saïss a permis de conclure que la valeur la plus faible est établie au mois de janvier avec une valeur de 21.9 mm et la valeur la plus élevée est située en mois de juillet avec un maximum d'ETP de 127.5 mm (Figure 37). Notant également la valeur annuelle d'ETP = 788.74 m (Figure 38).

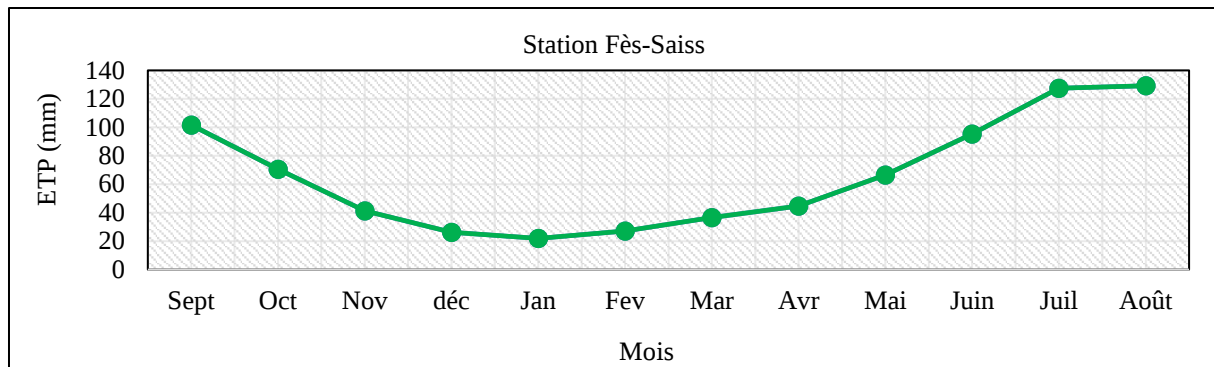


Figure 38: ETP mensuelle estimée par la formule de Thornthwaite de la station Fès-Saïss (1978-2016)

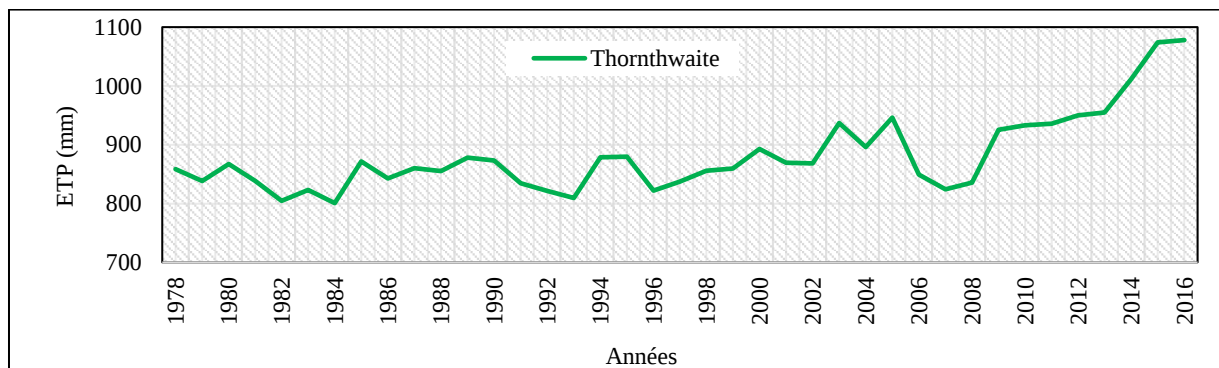


Figure 39: ETP annuelle estimée par la formule de Thornthwaite de la station Fès-Saïss (1978-2016)

1.3. Méthode de Hargreaves

L'équation de Hargreaves est une autre méthode empirique basée sur la température. En 1975, Hargreaves a publié l'équation suivante pour l'estimation ETP (Vangelis & al, 2013):

$$ETP = 0.135 * R_s * (T_{moyenne} + 17.8) \quad (\text{Eq. 7})$$

Dans laquelle R_s est le rayonnement solaire global à la surface (mm / jour) et $T_{moyenne}$ est la température moyenne annuelle (°C). Puisque R_s n'était pas facilement disponible et après l'analyse des données de climat et l'examen de la littérature, Hargreaves a conclu que R_s pourrait être calculé à partir du rayonnement extraterrestre (R_a) et le pourcentage de soleil possible (S). Enfin, Hargreaves et Samani (1982) ont proposé la forme prédictive :

$$R_s = K_{RS} * R_a * TR^{0.50} \quad (\text{Eq. 8})$$

Dans lequel K_{RS} est un coefficient empirique ajusté à R_s / R_a par rapport à TR , tandis que TR est la plage de température journalière en degrés Celsius ($TR = T_{max} - T_{min}$, dans laquelle T_{max} est la température maximale quotidienne moyenne et T_{min} est la température minimale quotidienne moyenne). En combinant les deux équations précédentes et en utilisant $K_{RS} = 0,16$ (une valeur obtenue par les données climatiques du bassin du fleuve Sénégal) Hargreaves & al. (1985) a obtenu l'équation suivante :

$$ETP = 0.0022 * R_a * (T_{moyenne} + 17.8) * TR^{0.50} \quad (\text{Eq. 9})$$

Cependant, Hargreaves et Samani (1985) ont recommandé que le coefficient soit augmenté pour tenir compte des mois de la demande de pointe, ce qui a donné lieu à l'équation de Hargreaves en 1985 :

$$ETP = 0.0023 * R_a * (T_{moyenne} + 17.8) * TR^{0.50} \quad (\text{Eq. 10})$$

L'attrait de la méthode repose sur sa simplicité, sa fiabilité, ses exigences minimales en matière de données, sa facilité de calcul et son faible impact par l'aridité des stations météorologiques (Hargreaves & allen, 2003).

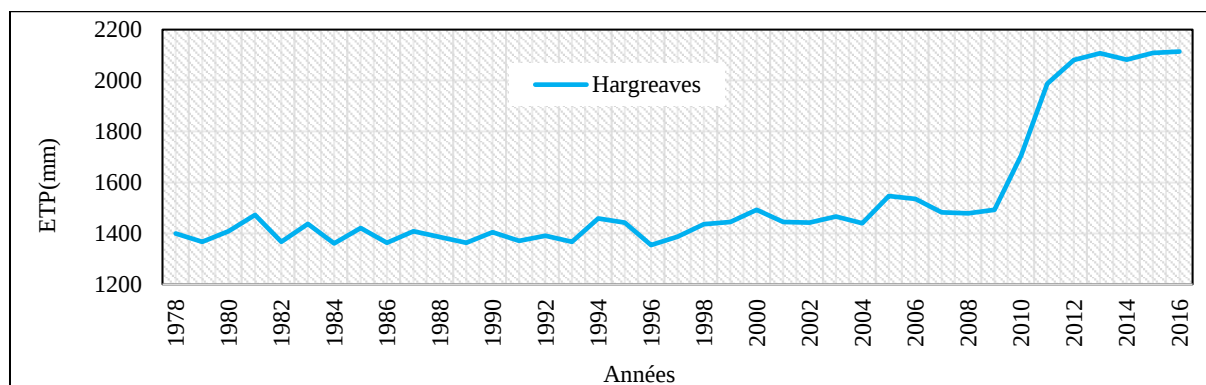


Figure 40: Evolution de l'ETP annuelle estimée par la formule de Hargreaves de la station Fès-Saïss (1978-2016)

1.4. Méthode Blaney-Criddle

L'équation de Blaney et de Criddle est l'une des premières équations pour estimer l'ETP en utilisant la température. La méthode est largement utilisée car elle a été modifiée par Doorenbos et Pruitt (1978). La forme habituelle de l'équation s'écrit :

$$ETP = k * p * (0.46 * T_{moyenne} + 8.13) \quad (\text{Eq. 11})$$

Dans laquelle $T_{moyenne}$ est la température moyenne annuelle (°C), p est le pourcentage des heures totales de jour pour la période utilisée (quotidienne ou mensuelle) sur les heures totales de jour de l'année et k est un coefficient mensuel d'utilisation de consommation selon la végétation type, emplacement et saison. La valeur de p est habituellement obtenue par des tables ; Cependant, il peut être estimé pour une latitude spécifique en utilisant l'équation suivante :

$$p = 100 * \left(\frac{\sum_{i=d_1}^{d_2} N_i}{\sum_{i=1}^{365} N_i} \right) \quad (\text{Eq. 12})$$

Dans laquelle N_i est l'heure théorique de jour du jour julien i et d_1 et d_2 sont le premier et le dernier jour julien du mois. Selon Blaney et Criddle, le coefficient k varie pour la saison de croissance (mai à octobre) de 0,5 pour l'oranger à 1,2 pour la végétation naturelle dense (Xu et Singh, 2001).

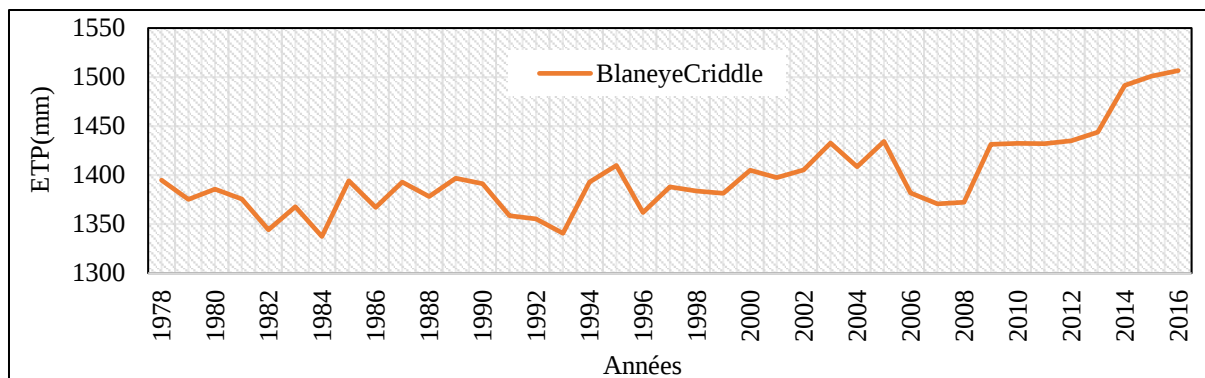


Figure 41: ETP annuelle estimée par la formule de Hargreaves de la station Fès-Saïss (1978-2016)

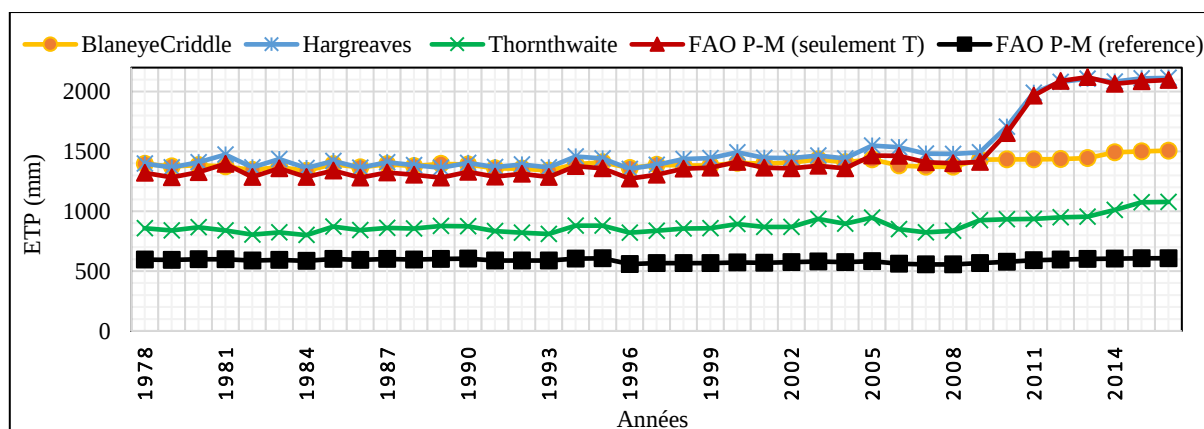


Figure 42: ETP annuelle estimée par les différentes méthodes de la station Fès-Saïss (1978-2016)

Les résultats de l'ETP présentés dans la figure 41 pourraient être considérés comme plus ou moins attendus. L'équation de Thornthwaite produit les valeurs inférieures, tandis que les deux équations de Hargreaves et Blaney-Criddle produisent des valeurs supérieures avec une légère supériorité de l'équation de Hargreaves et une différence assez significative d'environ 500 mm en valeurs moyennes entre les valeurs supérieures et les valeurs inférieures.

Un autre point intéressant est que ces équations suivent le même modèle annuel, avec des fluctuations similaires autour de leurs valeurs moyennes dans les mêmes points de temps. D'autre part, un modèle de fluctuation différent est suivi par les deux autres équations, FAO Penman-Monteith (seulement T) et Hargreaves à partir de 2009-2010. D'autre part, les valeurs calculées par les cinq équations d'ETP sont généralement plus élevées que les valeurs calculées par la méthode de référence.

Enfin, une observation intéressante est que dans le cas de l'utilisation des seules données de température dans l'équation FAO Penman-Monteith (présentée comme « FAO P-M (seulement T) » ou « FAO P-M (Temp) », comme le recommande la FAO pour le manque de données, sont très proches des valeurs déterminées par l'équation de Hargreaves. Dans cette étude, l'équation de Penman-Monteith de la FAO est considérée comme la méthode de « référence », en raison de sa supériorité qui est appuyée par plusieurs travaux de recherche sur le sujet (Vangelis & al, 2013).

4.2. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)

L'estimation de l'évapotranspiration réelle est la quantité d'eau à l'état de vapeur soustraite effectivement au sol par l'évaporation et par transpiration des végétaux. C'est donc une

éapotranspiration (ETR) qui tient compte des précipitations et de l'état hydrique du sol (L. Turc, 1954). Pour l'estimation de l'ETR, il a été choisi :

1.1. Formule de Turc

Elle s'écrit de la manière suivante (Turc, 1954) :

$$ETR = P / (0.9 + P^2/L^2)^{1/2} \quad (\text{Eq. 13})$$

où

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 ;$$

T : température moyenne annuelle de l'air en °C ;

P : précipitation moyenne annuelle en mm.

Application pour la station Fès-Saïss :

$$T : 16.85 (^\circ\text{C}) ;$$

$$P : 455.2 (\text{mm}) ;$$

$$L = 745.1.$$

D'où : ETR = 403.42 mm/an

1.2. Formule de Coutagne

Qui s'écrit de la manière suivante (Coutagne, 1935) :

$$ETR = P - \lambda P^2 \quad (\text{Eq. 14})$$

Avec

ETR : évapotranspiration réelle (mm).

$$\lambda = 1 / (0.8 + 0.14T)$$

P : précipitation moyenne annuelle en (m).

Application pour la station Fès-Saïss :

$$T = 17.12 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P = 0.4552 (\text{m})$$

$$\lambda = 0.31$$

D'où : ETR = 390.7 mm/an

5. Bilan hydrique

Le bilan permet d'évaluer les apports et les sorties en eau sur une période déterminée. L'évaluation du bilan d'eau est nécessaire pour mieux définir les besoins globaux et chiffrés du milieu et essentiellement pour l'évaluation du volume des ressources en eau souterraine (infiltration) et de surface (ruissellement). Le bilan hydrologique d'un bassin versant peut se traduire par l'équation suivante :

$$P = ETR + I + R + \Delta RFU \quad (\text{Eq. 15})$$

Avec :

P : lame moyenne précipitée sur le bassin versant en mm ;

ETR : évapotranspiration réelle en mm. L'évapotranspiration réelle correspond à la quantité d'eau effectivement évapotranspirées au-dessus de la surface étudiée ;

R : ruissellement en mm/s ;

Δ RFU : variation de la réserve facilement utilisable, c'est-à-dire de la lame d'eau stockée dans le sol, utilisable par les plantes.

La RFU commence à alimenter l'ETR quand les précipitations deviennent inférieures à l'ETP.

5.1. Estimation du bilan hydrique par la méthode de Thornthwaite

Cette méthode est utilisée pour les climats subhumide et semi-aride, elle s'articule sur l'estimation d'ETR à partir de L'ETP en plus d'autre facteurs tel que la saturation du sol, la composition lithologique de la couche superficielle du terrain, la pluviométrie.... D'après Lambert (1996), cette méthode fait intervenir la notion de réserve d'eau facilement utilisable (RFU) qui correspond la quantité d'eau stockée dans la zone superficielle du sol et reprise facilement par l'évaporation directe ou par les végétaux. Ainsi Thornthwaite a admis que le sol connaît sa saturation, après des précipitations, qui correspond à une valeur maximale de 100 mm dans les zones arides et semi-arides et elle peut être ramenée à 50 mm du fait que le sol n'est pas toujours saturé (Archambault & al, 1975). Donc le calcul de ce bilan de Thornthwaite dépend essentiellement de l'RFU (Gouaidia, 2008) :

- si pour un mois $ETP \geq P$ on pose que l'ETP = ETR, la quantité d'eau qui reste (P-ETR) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum (100 m) et si elle dépasse cette valeur il y aura un excès qui va partir soit sous forme d'infiltration efficace vers la nappe, soit sous forme de ruissellement :

$$\text{Si } ETP \geq P \text{ ----- } ETP = ETR \quad (\text{Eq. 16})$$

- si $P < ETP$, la valeur de $ETR = P + RFU$, jusqu'à égalisation avec ETP. Si la RFU est nulle, il va se produire un déficit agricole ($ETP - ETR$), ce dernier paramètre représente alors le besoin des cultures à l'irrigation :

$$\text{Si } P < ETP \text{ ----- } ETR = P + RFU \quad (\text{Eq. 17})$$

L'application de la méthode de Thornthwaite et le calcul de ses paramètres pour la station Fès-Saïss sur une période de 37 ans (de 1978 à 2014) sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 16 : Résultats du bilan hydrique de Thornthwaite pour la station Fès-Saïss (1978-2016)

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fèv.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Valeur annuelle
P (mm)	44.7	100	149	116	104	98	85.1	92	55.9	15.8	1.9	6.6	867.7
ETP (mm)	101.6	70.6	41.4	26.1	21.9	27.1	36.67	44.7	66.6	95.3	127.5	129.2	788.74
P-ETP	-56.9	29	107	89.6	82.3	70	48.4	47	-11	-80	-126	-123	76.4
RFU (mm)	0	29.3	50	50	50	50	50	50	39.3	0	0	0	368.6
ETR (mm)	44.7	70.6	41.4	26.1	21.9	27.1	36.67	44.7	66.6	55.1	1.9	6.6	443.44
Excéd. (mm)	0	0	86.6	89.6	82.3	70	48.4	47	0	0	0	0	424.26
Déficit Agri. (mm)	56.9	-	-	-	-	-	-	-	-	40.2	125.6	122.6	345.3

5.2. Interprétation du bilan hydrique

Afin d'éclaircir les résultats obtenus, une représentation graphique des données a été faite sur la figure ci-dessous.

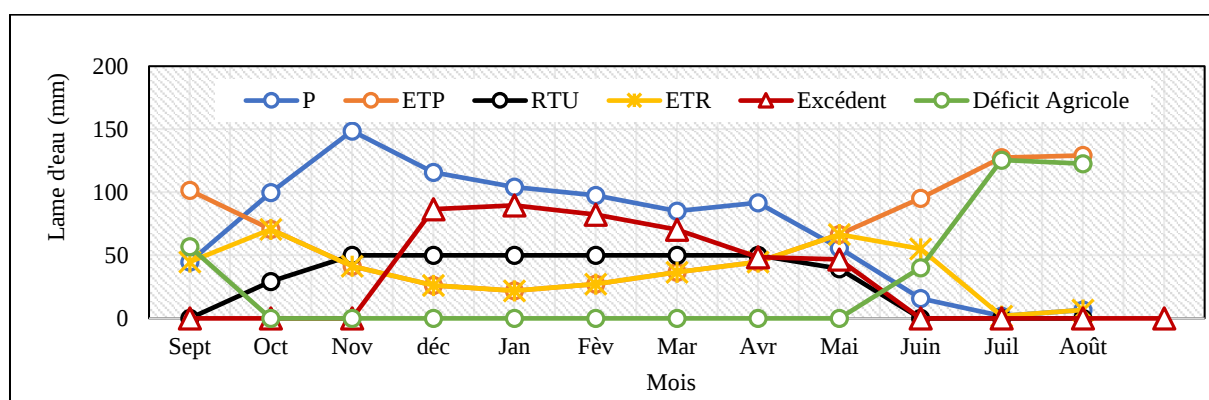


Figure 43: Bilan de Thornthwaite pour la station Fès-Saïss pour la période (1978-2014)

Pour bien visualiser la situation on va représenter seulement les 3 paramètres : P, ETP, et ETR :

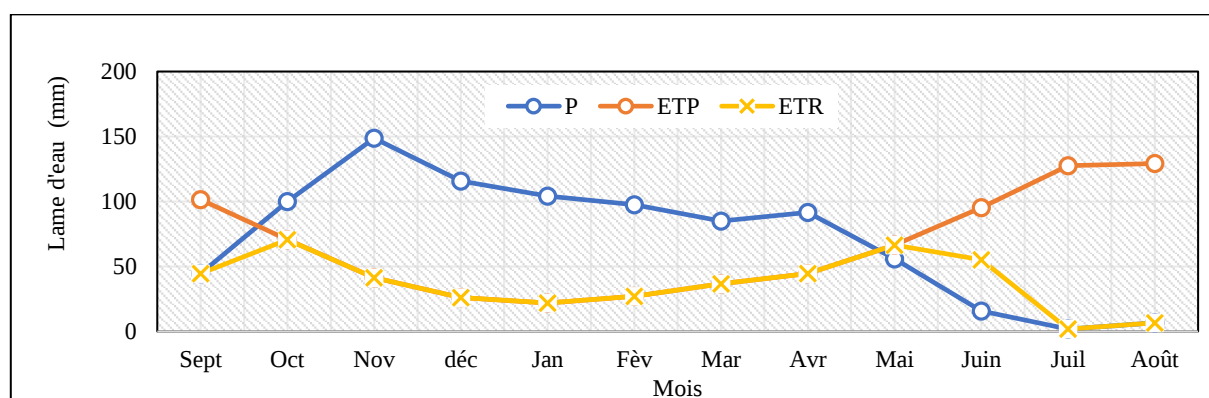


Figure 44: Représentation d'ETP, ETR, et P du bilan hydrique de Thornthwaite

L'analyse du graphe du bilan hydrologique nous amène à dire que :

- l'ETP est importante du mois de juillet jusqu'au mois d'août, avec des valeurs atteignant les 129.2 mm au mois d'août ce qui produit un déficit agricole, rendant ainsi nécessaire l'irrigation pour les zones cultures.
- à partir du mois d'octobre, on assiste à une reconstitution du stock qui s'accompagne d'une augmentation de la RFU, qui atteint son maximum entre les mois de novembre et avril où les précipitations sont importantes.
- l'excédent des précipitations joue un rôle important dans la recharge des nappes d'eau souterraines et l'alimentation du réseau hydrographique. Au-delà de cette période, on assiste à une baisse de la RFU, traduisant un épuisement du stock (Tableau 14 et figure 44).

5.3. Comparaison des résultats des ETR

A parti de la valeur moyenne calculée par les trois méthodes, l'ETR constitue 51.1% des précipitations moyennes annuelles. Par conséquent, un excédent de 48.9% va participer à l'alimentation des nappes d'eau souterraines ainsi que l'écoulement superficiel.

Tableau 17: Valeurs de l'ETR calculées par différentes méthodes

Station	Méthode	Valeurs de l'ETR annuelles (mm)	Valeurs des Précipitations (mm)
Fès-Saiss	Turque	403.42	867,7
	Coutagne	390.7	
	Bilan de Thornthwaite	443,44	
	Valeur moyenne	412.52	

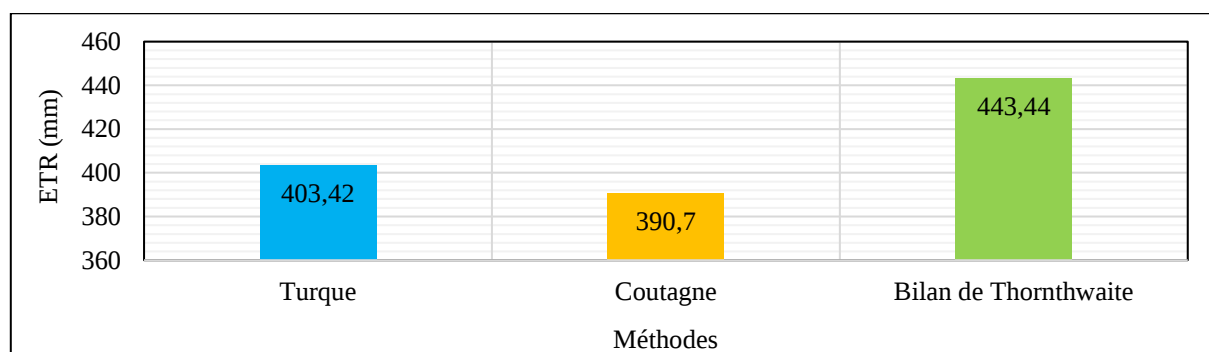


Figure 45: ETR calculée par différentes méthodes

5.4. Répartition de l'excédent

Le ruissellement est donné par application de la formule de Tixeront-Berkaloff pour une année moyenne donne le résultat suivant :

$$R = P^3/3.ETP^2 \quad (\text{Eq. 18})$$

où

R : ruissellement (m/s).

P : précipitations moyennes mensuelles (mm).

ETP : évapotranspiration potentielle (mm).

L'application numérique donne :

$$R = 350.04 \text{ mm}$$

$$\text{Infiltration (I)} : \quad I = EX - R \quad (\text{Eq. 19})$$

$$I = 74.22 \text{ mm}$$

Il est à noter que cette valeur ne représente pas réellement l'infiltration dans tout le bassin, car son estimation est basée sur les données d'une seule station pluviométrique, qui est celle de Fès-Saiss. Des estimations et des mesures d'infiltration sur toute la superficie de la Plaine de Saïss, pourrait donner des estimations plus représentatives et fiables pour ce paramètre.

Tableau 18 : Répartition des précipitations à la station Fès-Saiss

Précipitation (P)	Evapotranspiration réelle (ETR)	Excédent	
		Ruissellement (R)	Infiltration (I)
867,7(mm)	443,44(mm)	350.04 (mm)	74.22 (mm)
100(%)	51.1(%)	40.34(%)	8.5(%)

Les résultats obtenus du bilan hydrique permettent de conclure que :

- les pluies, ne garantissent pas le stockage permanent de l'eau dans le sol. Cette situation induit un déficit agricole, ce qui produit un besoin des sols agricoles à l'irrigation surtout pendant la période d'été, par les eaux superficielles (oueds) ou les eaux des nappes souterraines. Ces dernières vont profiter des eaux de retour de l'irrigation et une modification de la composition chimique des eaux.

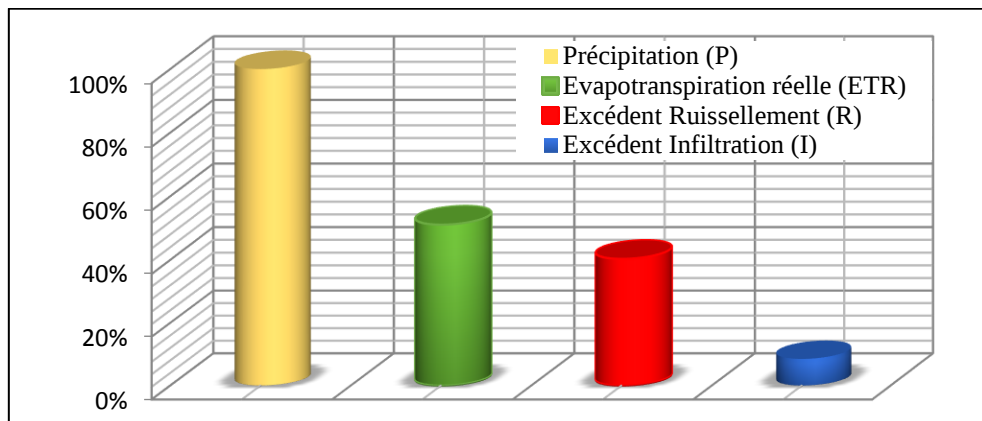


Figure 46: Répartition des précipitations à la station Fès-Saïss

- l'ETR consomme 51.1% des précipitations moyennes annuelles. Ceci induit un excédent d'ordre 48.9% dont 8.5% constitue la partie infiltrée et par conséquent la recharge de la nappe d'eau souterraine est considérée limitée.

- la saturation de la RFU, pour une année moyenne, ne dure que 03 mois de janvier à mars. Cette saturation ne dure que 02 mois pour une année sèche et peut atteindre 07 mois pour une année humide.

- pour l'année la plus sèche, le déficit agricole est enregistré pendant 07 mois (de mai à octobre) et par conséquent les sols agricoles demandent donc une irrigation par les eaux de surface qui vont produire une recharge supplémentaire de la nappe. L'enregistrement de ce déficit agricole coïncide avec la période sèche.

6. Vents

Le vent constitue dans certains biotopes un facteur écologique limitant, sous l'influence des vents violents, la végétation est limitée dans son développement. Le vent, d'un autre côté, a une action indirecte :

- En abaissant ou en augmentant la température, suivant les cas ;
- En augmentant la vitesse d'évaporation, en ayant un pouvoir desséchant.

La direction du vent intervient aussi dans la modification du milieu, car certains versants peuvent être plus arrosés que d'autres d'où la variation du couvert végétal.

La Plaine de Saïss fait partie généralement du domaine du Maroc Nord-Atlantique caractérisé en hiver par une prédominance des vents venant de l'Ouest et de Sud-Ouest qui sont chargés de vapeur et qui génèrent des pluies. La fréquence de ces vents, maximale en hiver, de novembre à avril, est faible ou nulle en été. En été le vent chaud du Nord-Est et de l'Est, est de forte intensité et néfaste pour les cultures. C'est un vent très froid en hiver et sec et brûlant (Chergui) en été, avec une fréquence maximale en juillet. Il contribue à la sécheresse relative qui sévit de mai à septembre. En hiver, ces régimes d'Est sont froids et secs mais beaucoup moins fréquents qu'en été.

Selon les données de la station Fès-Saïss, la vitesse annuelle moyenne est de 3,11 m/s (1.4 à 4.9 m/s) au cours de l'année. Les vents les plus dominants dans la région sont d'Ouest, Sud, Ouest -Sud-Ouest, Sud- Ouest, Ouest -Nord-Ouest, et Est-Nord-Est.

III. Conclusion

Les différents résultats obtenus par cette analyse succincte des paramètres climatiques tels que les précipitations moyennes mensuelles et moyennes annuelles, les températures moyennes mensuelles et moyennes annuelles, l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'évapotranspiration réelle (ETR), vents et le bilan hydrique ont permis de mettre en évidence les irrégularités des pluies avec leurs variations spatiales et temporelles, des températures, des excédents par rapport à leurs moyennes, des écarts moyens des excédents et de leurs cumuls. Toutefois, des constatations sont indiquées comme suite :

- par combinaison des pluies et des températures, un climat méditerranéen de régime semi-aride a été mis en évidence avec un hiver froid et pluvieux et un été chaud et sec ;
- les pluies sont très irrégulières d'une année à l'autre avec diminution importante des apports a été mise en évidence depuis 1979. Généralement les moyennes des pluies dans les trois stations sont du même ordre de grandeur. L'excédent au niveau de la station Ain Bittit est légèrement supérieur par rapport à ceux enregistrés au niveau des stations de Fès-DRH et de Fès-Saïss ;
- les températures moyennes annuelles varient en fonction de l'altitude. L'amplitude de variation entre les températures maximales et minimales moyennes varie de 9.5 °C et 18 °C. Le mois de janvier est considéré le plus froid alors que le mois d'août est le plus chaud ;
- les précipitations moyennes annuelles des trois stations, sur une période de 36 ans (1978 – 2014), sont estimées à 455.5 mm. Le mois de novembre est le plus humide alors que le mois de juillet est le plus sec ;
- des tendances générales à la hausse des températures extrêmes et à la baisse des événements froids au cours des saisons chaude et froide sont observées alors qu'aucune tendance significative n'est remarquée pour l'évolution saisonnière des totaux de pluies et des événements pluvieux forts ;
- les indices climatiques ont montré des liaisons statistiquement significatives avec l'évolution des paramètres climatiques au sein de la Plaine de Saïss;
- l'ETP est importante du mois de juillet jusqu'au mois d'août, avec des valeurs atteignant 129.2 mm au mois d'août, ce qui produit un déficit agricole, rendant ainsi nécessaire l'irrigation pour les zones cultivées ;
- l'évapotranspiration réelle (ETR) est estimée à 443.44 mm, mobilisant 51.1 % des précipitations. Par conséquent, un excédent de 48.9% va participer à l'alimentation des nappes d'eau souterraines ainsi que l'écoulement superficiel ;
- le ruissellement ne représente que 22 m/s, ce qui représente 40.3% des précipitations ;
- l'infiltration ne laisse percoler que 74.22 mm, ce qui ne représente que 8.5% des précipitations ;
- ceci laisse penser que l'alimentation de la nappe phréatique ne se fait pas exclusivement à l'aide de l'infiltration efficace, mais aussi grâce aux calcaires fissurés qui bordent la nappe ;
- les vents les plus dominants dans la région sont d'Ouest avec une vitesse moyenne de 3.11m/s.

A l'échelle de la Plaine de Saïss, ces résultats ont affiné nos connaissances géologiques et géomorphologiques, et compréhension de la structure spatiotemporelle du régime hydroclimatique moyen et extrêmes. Ceux-ci peuvent servir de base pour l'interprétation des résultats ultérieurs.

PARTIE II
ETUDE DE LA SECHERESSE METEOROLOGIQUE DANS LA
PLAINE DE SAÏSS

Chapitre 1

Généralités

D'après (IPCC, 2007 et 2013), de nombreux changements dans le climat ont été observés aux échelles continentales ; tels que l'augmentation de la température moyenne, des changements dans les précipitations totales, la structure des vents et les aspects des événements météorologiques extrêmes comme les sécheresses, les fortes précipitations. La forte variabilité interannuelle de ces dernières et leur importante saisonnalité influence essentiellement les ressources en eau, l'économie et le développement social dans la région méditerranéenne. Cependant, de nombreux pays du bassin méditerranéen ont souffert de la sécheresse au cours des dernières décennies (la Turquie en 1973 et 1984, le Maroc de 1980 à 1985, la Grèce, l'Espagne, la Tunisie et le Sud de l'Italie de 1988 à 1990, la France méditerranéenne en 1991 et 1992, l'Espagne et le Maroc de 1991 à 1995 et la Tunisie de 1993 à 1995) (Tsiourtis, 2001). Suite à ces sécheresses, ces pays ont souffert économiquement, socialement et écologiquement. Les systèmes naturels et les activités humaines sont les plus à risque en raison du manque d'approvisionnement régulier en eau au cours de l'année.

Au Maroc, en année sèche comme 1994-95, réputée pour être l'une des sécheresses les plus générales ayant touché le pays au cours du 20^{ième} siècle, les réserves en eau se sont trouvées diminuées au point de menacer non seulement l'agriculture irriguée mais aussi l'approvisionnement en eau potable et la production électrique (Khomsi, 2014). Il apparaît donc important d'améliorer les connaissances des situations météorologiques à diverses échelles temporelles et la compréhension des complexités climatiques relatives aux événements météorologiques extrêmes à l'échelle locale et régionale. En effet, ces connaissances doivent servir de base à l'analyse des changements climatiques régionaux et identifier les principaux facteurs qui influencent la variabilité du climat, et contribueront ainsi au développement de la gestion durable des ressources en eau.

I. Changements climatiques et eaux souterraines

1. Causes de changements climatiques

Le climat est communément défini comme étant une météorologie moyenne et plus rigoureusement comme une description statistique (moyenne, variabilité, fréquence, amplitude, tendances...) (Cubash & al., 2013) en termes de paramètres pertinents (température, précipitation...) sur des périodes de temps s'étalant du mois aux millions d'années. Le climat de la Terre est un système hautement complexe composé de nombreux compartiments toujours en mouvement et en interaction entre l'atmosphère, l'hydrosphère, la cryosphère, la surface terrestre et la biosphère qui fonctionne sous l'effet de nombreux facteurs (naturels et anthropiques), à l'origine de sa variabilité et de ses modifications.

A. Variations de l'activité solaire

L'énergie rayonnée par le soleil varie au cours du temps (Lean & al., 1995). Les mesures réalisées à partir de radiomètres ont permis de mettre en évidence une périodicité autour de 11 ans des fluctuations solaires (Fröhlich, 2006).

B. Tectonique des plaques et érosion

L'expansion des fonds océaniques déplace les continents et sa vitesse contrôle la proportion de CO₂ délivrée dans l'atmosphère et agirait donc indirectement sur la température de la Terre (Berner, 1999). D'autre part, les événements de la tectonique des plaques (subduction et collision des plaques continentales) agissent sur le relief et influencent la dynamique atmosphérique, les processus d'érosion et donc le climat (Ruddiman, 2008).

C. Effet de serre (naturel)

Le système climatique de la Terre est fonction de l'énergie solaire. L'énergie réfléchi par la surface terrestre est en grande partie absorbée par les nuages (qui réémettent aussi ces radiations) et certains constituants de l'atmosphère : vapeur d'eau, dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄), protoxyde d'azote (N₂O) et autres gaz à effet de serre...) (Cubash & al., 2013). L'effet de serre est donc un processus naturel important agissant sur le climat de la Terre maintenant une température à la surface terrestre propice à la vie, néanmoins sa dynamique peut être impactée par les activités humaines.

D. Amplification de l'effet de serre

Un nombre important d'études scientifiques s'est porté sur le fait que la structure naturelle du climat subit des perturbations. Le réchauffement global observé particulièrement sur les deux dernières décennies (augmentation moyenne des températures) est attribué en grande partie aux activités humaines et à l'émission de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (Cubash & al., 2013 ; IPCC, 2007).

E. Aérosols

Toutes les activités humaines, telles que l'agriculture et l'industrie, contribuent à importer de grandes quantités d'aérosols dans l'atmosphère. La nature (absorbeurs ou réflecteurs) et la quantité de ceux-ci ainsi que la nature de la surface sous-jacente (surface terrestre ou eau) déterminent leur effet positif ou négatif sur le réchauffement (Bellouin & al., 2011).

F. Albédo

Enfin l'homme affecte le bilan énergétique de la Terre par son influence sur la couverture de la surface terrestre (anthropisation des terres) en modifiant la manière dont laquelle la surface terrestre redistribue les flux de chaleurs (Foley & al., 2005).

Les réponses à ces perturbations climatiques peuvent être directes (hausse ou baisse de température) ou indirectes (eustatisme).

C'est pourquoi chaque perturbation d'une variable climatique (température, précipitation...) a le potentiel d'affecter directement ou indirectement le cycle hydrologique et par conséquent la ressource en eau souterraine ainsi que les différents compartiments qui y sont associés (Clifton & al., 2010).

2. Influence climatique sur la ressource en eau souterraine

En comparaison avec les systèmes d'eau de surface, les systèmes souterrains tendent à répondre plus lentement (Kelly & al., 2013) aux variations des conditions climatiques. Ces perturbations induisent des changements hydrologiques qui peuvent potentiellement se répercuter sur la ressource en eau souterraine, en relation avec certains mécanismes propres à cette ressource (recharge, décharge, stock) et/ou ses caractéristiques (quantité, qualité). Des liens entre le climat et les eaux souterraines existent donc à toutes les échelles de temps.

A. Influence sur la recharge

La recharge des eaux souterraines peut être définie comme l'eau qui atteint un aquifère que ce soit verticalement ou latéralement (Gerber & Howard, 2000). La sensibilité de la recharge aux variations climatiques est reliée aux changements de la quantité de précipitation effective (précipitations atteignant la partie souterraine) elle-même fortement dépendante de l'évapotranspiration (paramètre lui-même fortement

dépendant de la température et donc des concentrations en CO₂) (Barron & al., 2011 ; Kumar, 2012). Soulignant ainsi que les eaux souterraines sont des archives paléoclimatiques (Edmunds, 2005a)

B. Influence sur la résurgence

L'impact climatique sur la décharge est moins bien connu du fait du manque de données et de la difficulté à quantifier ces processus (Van Vliet, 2007). En effet, moins d'intérêt a été porté à l'étude des écosystèmes dépendants des eaux souterraines (végétation...) et la décharge des eaux souterraines vers les rivières, les zones humides et les océans. Les interactions des eaux souterraines avec les compartiments de surface sont aussi dépendantes des niveaux relatifs entre eux, l'impact du climat se fait donc ressentir indirectement par l'altération de la recharge et/ou des mécanismes de décharge (comme l'évapotranspiration).

C. Influence sur la qualité

Enfin, le climat n'affecte pas seulement la recharge, le stock et la décharge des systèmes souterrains, mais peut aussi influencer la qualité de l'eau souterraine (Dragoni & Sukhija, 2008). En effet, la qualité des eaux souterraines dépendante des propriétés physiques, chimiques et biologiques des aquifères est notamment contrôlée par les fluctuations climatiques. La perturbation de la recharge et de la température de l'eau modifie la chimie de l'eau, les communautés bactériennes, le transport de soluté et les temps de résidence (Van Vliet, 2007).

II. Notion de la sécheresse

Différentes définitions pour le terme « sécheresse » est retrouver dans de nombreuses sources :

« La sécheresse est l'absence ou l'insuffisance de pluie pendant une certaine période », Dictionnaire Larousse ([Site internet Dictionnaire Larousse : <http://www.larousse.fr/>]), « La sécheresse (ou sècheresse) est l'état normal ou passager du sol et/ou d'un environnement, correspondant à un manque d'eau, sur une période significativement longue pour qu'elle ait des impacts sur la flore naturelle ou cultivée, la faune sauvage ou les animaux d'élevage. », ([Site internet Wikipedia : <http://fr.wikipedia.org/>]), « Une sécheresse est une longue période sans précipitations qui a lieu, en particulier, pendant la saison de plantation. », Wilhite & Glantz (1985) , « Le terme général de sécheresse recouvre des notions différentes ».

1. Définition

En général, la notion de sécheresse est définie de plusieurs façons, selon la discipline concernée. Plusieurs classements sont ainsi proposés. Dans le rapport d'expertise « Sécheresse et Agriculture » (Amigues & al., 2006) les sécheresses sont classées en deux grandes catégories : la sécheresse hydrologique qui a lieu à cause d'une faible pluviométrie en automne et en hiver et la sécheresse édaphique qui se produit lorsque les pluies de printemps et d'été sont insuffisantes. La première a comme conséquence un remplissage peu abondant des ressources en eau pour l'irrigation, et donc affecte l'agriculture irriguée. La seconde amène à un remplissage peu abondant des réserves en eau du sol (ou réserve utile (RU), affecte surtout l'agriculture pluviale (ou non-irriguée) et dans une moindre mesure l'agriculture irriguée.

Dans le rapport CLIMSEC, Soubeyroux & al (2011) ont distingué différents types de sécheresse identifiable au cours du cycle hydrologique :

- les sécheresses météorologiques, relatives aux variables atmosphériques et principalement aux précipitations ;
- les sécheresses agricoles, relatives au contenu en eau des sols ;
- les sécheresses hydrologiques, relatives notamment au débit des rivières.

Wilhite & Glantz (1985) analysent 150 définitions du terme « sécheresse » et parviennent à les classer en 4 types : les sécheresses météorologiques, agricoles, hydrologiques ou socio-économiques.

En premier lieu, les définitions de sécheresse météorologique font référence à la durée et l'intensité de la période sèche. Par exemple, Byun & Wilhite (1999), définissent une période de sécheresse par : – les jours consécutifs sans précipitation, – les jours consécutifs avec un niveau bas de précipitation, – un niveau faible de précipitation pendant une période de temps spécifique.

Si la sécheresse est considérée juste comme un phénomène de manque d'eau, on oublie alors une de ses principales caractéristiques, son caractère « anormal », c'est à dire, le fait que cet événement ne soit pas habituel dans la région considérée. Par contre, si un manque d'eau est considéré comme normal dans une région, on parle alors de phénomène d'aridité.

Les différents niveaux de sécheresse interagissent entre eux selon le diagramme présenté dans la figure 46.

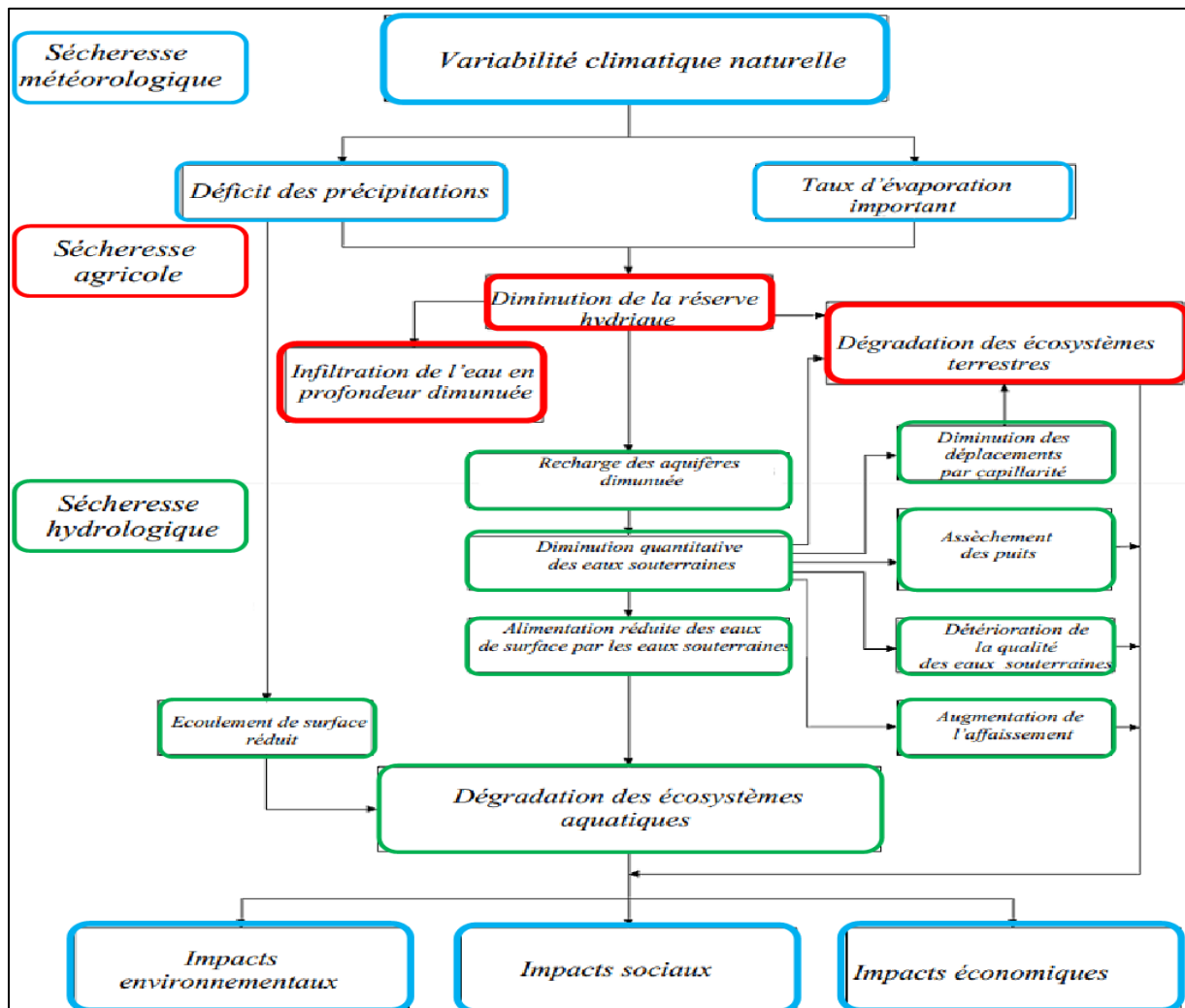


Figure 47: Représentation schématique des liens entre les différents types de sécheresse (Van Lanen & Peters, 2000)

2. Indices

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 de temps et de définir des classes d'appartenance à cet événement en fonction de sa sévérité et de sa position. Ils assurent également le suivi de la sécheresse et la détection

à différents stades de son évolution. Les indices de sécheresse constituent également un bon moyen de communication avec le public et un outil de décision pour le gouvernement.

Les indices de sécheresse sont des éléments importants de la surveillance et de l'évaluation de la sécheresse, car ils simplifient les interrelations complexes entre de nombreux paramètres climatiques et non climatiques. Les indices rendent plus facile la communication d'informations sur les anomalies climatiques à divers publics d'utilisateurs et permettent aux scientifiques d'évaluer quantitativement les anomalies climatiques en termes d'intensité, de durée, de fréquence et d'étendue spatiale (Wilhite & al., 2000).

Étant donné que les indices donnent des informations importantes utiles pour la planification, la conception et la gestion des ressources en eau liées aux différents utilisateurs et à l'environnement, de nombreux indices ont été proposés et utilisés (Richard & Heim, 2002 ; Hayes, 2004 ; Tsakiris & al, 2005).

3. Indices de sévérité de la sécheresse

3.1. Indice d'humidité des cultures (CMI)

L'indice d'humidité des cultures (CMI) a été développé par Palmer (1968) pour évaluer les conditions de sécheresse à court terme dans les principales régions productrices de cultures. Le calcul du CMI implique l'utilisation de valeurs de température et de précipitation pour calculer un simple seuil d'humidité.

3.2. Indice standardisé de précipitation (SPI)

L'indice de précipitations normalisé (SPI) a été développé par McKee & al. (1993). Un certain nombre d'avantages découlent de l'utilisation de l'indice SPI. L'indice repose uniquement sur la précipitation, ce qui rend son évaluation relativement simple.

Deuxièmement, l'indice permet de décrire la sécheresse des échelles de temps qui décrivent généralement les quatre types de sécheresse décrites précédemment.

Dans le cadre de cette étude, le SPI permettra de prévoir la sécheresse à la fois sur les échelles de temps à court terme à moyen et à long terme. Comme mentionné plus haut, les indices développés sur des échelles de temps à court terme sont utiles pour surveiller la sécheresse météorologique. De même, les indices développés sur des échelles de temps à long terme sont utiles pour surveiller la sécheresse hydrologique et socio-économique (Cacciamani & al., 2007).

Un troisième avantage du SPI est sa standardisation qui convient particulièrement pour comparer les conditions de sécheresse entre différentes périodes et régions avec des climats différents. L'indice SPI est basé sur une transformation equi-probabilité de la prévision mensuelle agrégée en une Variable normale (Cancelliere & al., 2007).

Le calcul de l'indice nécessite d'ajuster une distribution de probabilité aux précipitations mensuelles agrégées (3, 6, 12, 24, 48 mois). La fonction de densité de probabilité est ensuite transformée en un indice normalisé standard dont les valeurs classent la catégorie de sécheresse caractérisant chaque échelle de place et de temps (Cacciamani & al., 2007).

Le SPI ne peut être calculé que si suffisamment longtemps (au moins 30 ans) et éventuellement des séries temporelles continues de données de prévision mensuelles sont disponibles (Cacciamani & al., 2007). Le SPI peut être utilisé pour surveiller les conditions sèches et humides (Mori & al., 2006). Les valeurs SPI positives indiquent une précipitation supérieure à la précipitation médiane et les valeurs négatives indiquent moins que la précipitation médiane.

3.3. Indice de reconnaissance de la sécheresse (RDI)

Un nouvel indice général de sécheresse a été proposé pour l'évaluation de la sévérité de la sécheresse météorologique (Tsakiris & Vangelis, 2005). Le nouvel indice dénommé « indice de sécheresse de reconnaissance » (RDI) est basé sur les valeurs cumulatives de précipitation et d'évapotranspiration

potentielle. Trois expressions de RDI sont données : l'initiale, la normalisée et la standardisée. Le RDI standardisée peut être comparée directement à l'indice de précipitation normalisé (SPI) qui est largement utilisé (Tsakiris & Vangelis, 2005).

Le RDI a été utilisé dans plusieurs études, principalement dans le domaine de la caractérisation et de la surveillance de la sécheresse (Ravi & al., 2013). La gravité de la sécheresse peut être évaluée par le calcul de la forme normalisée (RDIst) pour une interprétation plus facile de ses résultats. Cette approche est largement utilisée principalement dans les régions arides et semi-arides (Tsakiris & al., 2007b ; Farajalla & Ziade, 2010 ; Asadi & al., 2011 ; Khalili & al., 2011 ; Elagib & Elhag , 2011 et Tigkas & al., 2012). La sévérité des événements de sécheresse augmente lorsque les valeurs de RDIst deviennent négatives.

Enfin pour des raisons de simplicité, les précipitations enregistrées et l'évapotranspiration potentielle (de préférence calculées par la formule de Hargreaves ou celle de Thornthwaite) sont les paramètres considérés dans la présente analyse.

3.4. Indice d'approvisionnement en eau de surface (WSVI)

L'indice d'approvisionnement en eau de surface (WSVI) a été développé par Shafer et Dezman (1982) pour compléter l'indice Palmer des conditions d'humidité dans l'état du Colorado. L'indice Palmer est essentiellement un algorithme d'humidité du sol calibré pour les régions relativement homogènes, mais il n'est pas conçu pour les grandes variations topographiques dans une région en ne tenant pas compte de l'accumulation de neige et l'écoulement ultérieur.

L'objectif de WSVI était d'intégrer les caractéristiques hydrologiques et climatologiques en une valeur d'indice unique ressemblant à l'indice Palmer pour chaque grand bassin de rivière dans l'état du Colorado (Shafer & Dezman, 1982). Ces valeurs seraient normalisées pour permettre des comparaisons entre les bassins.

4. Causes de la sécheresse

4.1. Oscillation nord atlantique (ONA)

L'ONA a ses principaux centres d'action dans l'Atlantique nord. Cette téléconnexion se compose d'un dipôle nord-sud des anomalies SLP (Pression en Surface de la Mer), avec un centre sur le Groenland et l'autre sur le centre de l'Atlantique nord (Figure 47).

La phase positive de l'ONA est décrite par un anticyclone des Açores anormalement fort (SLP positive et anomalies importantes dans le centre de l'Atlantique nord) et une dépression d'Islande anormalement accentuée (SLP négatif et des anomalies importantes au Nord).

La phase négative est caractérisée par l'affaiblissement à la fois de l'anticyclone des Açores et de la dépression d'Islande (van Loon & Rogers, 1978 ; CPC, 2002). L'ONA présente une variabilité interannuelle importante et sa phase positive ou négative peut persister durant plusieurs années. L'indice associé à l'ONA a montré une tendance à la baisse entre les années 1940 et 1970, avec des valeurs constamment positives à partir des années 1980 (Hurrell, 1995).

Les résultats de plusieurs études ont montré une augmentation de la fréquence d'apparition des cyclones forts et des précipitations supérieures à la normale pendant les mois de la phase négative de l'ONA sur le Nord et l'Ouest de la région méditerranéenne (Hurrell., 1995 ; Lionello & al., 2006 a). L'ONA est fortement liée aux conditions météorologiques de l'est de l'Atlantique. En Europe centrale, l'ONA est liée de manière significative à des conditions plus chaudes et à une diminution de la variabilité des températures en raison des tendances stables et persistantes des hautes pressions associées à des valeurs élevées de l'indice de L'ONA (Rebetez, 2001).

Plusieurs régions du Maroc ont été confrontées à des séries de périodes sèches depuis le début des années 1980 et qui ont eu des conséquences non négligeables sur l'économie du pays (Driouech, 2010). Différentes études de projections climatiques futures, faisant appel à des modèles climatiques, préconisent

que le Maroc est l'un des pays les plus susceptibles à être menacé par le changement climatique et enregistrera une réduction des cumuls pluviométriques d'ici la fin du siècle courant (IPCC, 2007a).

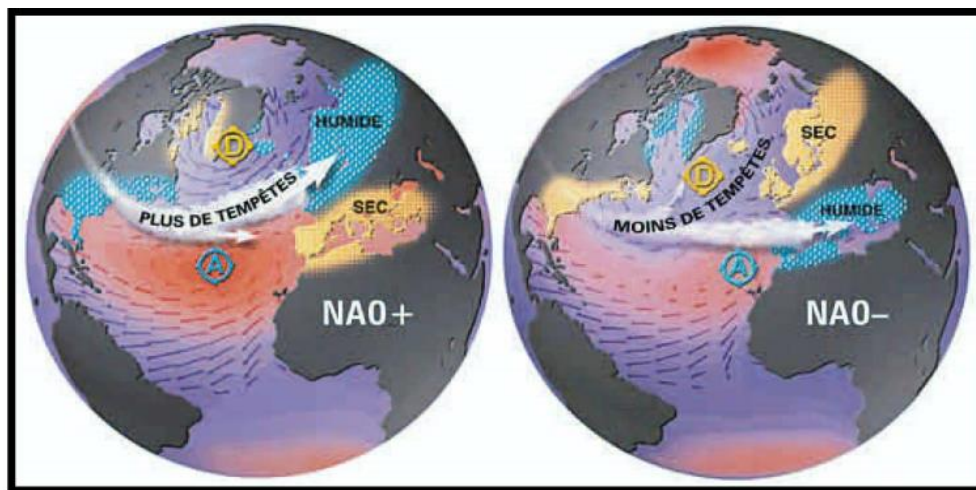


Figure 48: Phases de l'ONA (Christophe, 2004)

En effet, le climat du Maroc s'est réchauffé de façon significative au cours de la période 1961-2008. Une tendance générale vers l'assèchement est constatée (Driouech, 2010). La plupart des tendances annuelles sont comprises entre 0.2°C et 0.4°C par décennie et la diminution des précipitations est quasi-générale sur l'ensemble du territoire marocain.

D'autres études signalent que durant la phase positive de l'ONA (Oscillation Nord Atlantique) caractérisée par le creusement de la dépression d'Islande et le gonflement/intensification de l'anticyclone des Açores (Figure 47), les précipitations se trouveront réduites sur le Maroc comme sur le Sud de l'Europe. A l'inverse, la phase négative engendrera des précipitations sur celui-ci et au Nord-Ouest de l'Afrique (Driouech, 2010).

D'après Sebbar (2013), la relation entre l'ONA et les valeurs de l'indice de précipitation standardisé, a permis d'émettre des hypothèses qui expliquent l'extension spatio-temporelle de la sécheresse climatique au Maroc. En fait, l'excès d'énergie au niveau de la surface du pacifique (ENSO), renforce l'extension de l'anticyclone des Açores à travers la cellule de Hadley et par conséquent, rejette vers le Nord des perturbations liées au front polaire et apparition des phases positives de l'ONA, ce qui explique l'installation de la sécheresse au Maroc.

5. Impact de la sécheresse

5.1. Problème d'approvisionnement en eau

Au Maroc, le volume d'eau disponible par habitant et par an, indicateur de la richesse ou de la rareté de l'eau d'un pays, avoisine le seuil de 1000 m³/hab/an, communément admis comme seuil critique avant le saut vers la pénurie (RIAD, 2013).

Les ressources en eau par habitant se situeraient autour de 720 m³/hab/an vers l'horizon 2020. A cette date, près de 14 millions d'habitants, soit près de 35% de la population totale du Royaume disposeraient de moins de 500 m³/hab/an (RIAD, 2013). La pénurie chronique d'eau devient donc une donnée structurelle qu'on ne peut plus ignorer pour tracer les politiques et les stratégies de gestion des ressources en eau au Maroc.

Ces ressources sont limitées pour assurer sans contrainte un développement économique et social durable. En terme de ressources mobilisables, le Maroc dès le début des années 80, a franchi le seuil de

1000 m³/hab/an commun admis comme seuil critique indiquant l'apparition de stress hydraulique de 1.271 m³ par habitant et par an. En 1971 le seuil atteint 688 m³/hab/an. En 2000 a atteint 508 m³/hab/an. A l'horizon 2020, exception de l'Oum Er-Rebia, l'ensemble des bassins versants seront en dessous de ce seuil.

5.2. Impact sur le secteur agricole et l'élevage

Le Maroc qui fait partie des pays de la rive sud méditerranéenne, n'échappe pas au changement climatique (CC) global et à ses impacts (Knippertz & al., 2003 ; Driouech, 2010, Sebbar & al., 2012). Il est situé dans une région dont les données climatiques, écologiques et socio-économiques actuelles et les projections futures indiquent une forte vulnérabilité aux changements de climat.

Selon les différents modèles climatiques et différentes études d'impacts, le Maroc devrait en effet s'attendre à un réchauffement et une baisse des précipitations touchant une grande partie de son territoire, avec des conséquences sur les secteurs économiques clés.

Différentes études antérieures ont montré que le Maroc subit des sécheresses de plus en plus récurrentes et sévères conjuguées à une demande en eau de plus en plus croissante. Cette situation a engendré en général une diminution sensible de la production agricole en zones Bour, une réduction des apports fourragers des parcours et une baisse des disponibilités en eaux superficielle et souterraine. Elle a eu également des conséquences sur l'offre d'emploi et sur les revenus des agriculteurs des zones Bour. Outre ces impacts directs, l'importante baisse de l'activité du secteur agricole au cours des années sèches, entraîne en général des problèmes relativement sérieux pour les autres secteurs d'activité, en raison des liens du secteur agricole avec les autres secteurs de l'économie nationale.

Chapitre 2

Étude et suivi spatio-temporel de la sécheresse météorologique

Une « rupture » peut être définie par un changement dans la loi de probabilité des variables aléatoires dont les réalisations successives définissent les séries chronologiques étudiées (Lubes & al., 1994). Le choix des méthodes retenues repose sur la robustesse de leur fondement et sur les conclusions d'une étude de simulation de séries aléatoires artificiellement perturbées (Bonneaud, 1994). Elles permettent de détecter un changement dans la moyenne de la variable traitée dans la série ; à l'exception de l'approche de Pettitt qui suppose un non-changement de la variance de la série étudiée.

I. Détection des séquences de sécheresse météorologique

1. Méthodes de détection de ruptures

1.1. Test de Pettitt (1979)

Le test réputé pour sa robustesse, est non-paramétrique et dérivé de la formulation du test de Mann-Whitney. L'absence d'une rupture dans la série chronologique X constitue l'hypothèse nulle H_0 . Pettitt définit la variable $U_{t,N}$:

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (\text{Eq. 20})$$

Avec $i = 1, N$ et avec $j = t+1, N$

$D_{ij} = \text{sgn}(X_i - x)$ avec $\text{sgn}(x) = 1$ si $x > 0$; 0 si $x = 0$ et -1 si $x < 0$.

Si l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée par l'instant t définissant le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$. Ce test comporte de multiples applications (Sutherland & al., 1991 ; Vannitsem & Demarée, 1991)

1.2. Méthode bayésienne de Lee et Heghinian (1977)

La méthode bayésienne propose une approche paramétrique. Elle nécessite une distribution normale des valeurs de la série. L'absence de rupture dans la série constitue l'hypothèse nulle. Le modèle de base de la procédure est le suivant :

$$x_i = \begin{cases} \mu + \epsilon_i & i = 1, \dots, \tau \\ \mu + \delta + \epsilon_i & i = \tau + 1, \dots, N \end{cases}$$

Les ϵ_i sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance σ^2 ; τ et δ représentent respectivement la position dans le temps et l'amplitude d'un changement éventuel de moyenne. La méthode établit la distribution de probabilité a posteriori de la position dans le temps d'un changement. Lorsque la distribution est unimodale, la date de la rupture est estimée par le mode avec d'autant plus de précision que la dispersion de la distribution est faible.

La méthode est déjà appliquée à l'étude de la structure de la saison des pluies en Afrique Soudano-Sahélienne (Chaouche, 1988) et elle a donné de très bons résultats.

1.3. Statistique U de Buishand (1982 et 1984)

La procédure de Buishand fait référence au même modèle et aux mêmes hypothèses que l'approche de Lee et Heghinian. En supposant une distribution a priori uniforme pour la position du point de rupture t , la statistique U de Buishand est définie par :

$$U = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} (\frac{S_k}{D_x})^2}{N(N+1)} \quad \text{avec} \quad S_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}) \quad (\text{Eq. 21})$$

Pour $k = 1, \dots, N$ et D_x désigne l'écart type de la série.

En cas de rejet de l'hypothèse nulle, aucune estimation de la date de rupture n'est proposée par ce test. Outre cette procédure, la construction d'une ellipse de contrôle permet d'analyser l'homogénéité de la série de (x_i) . La variable S_k définie au-dessus, suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance $k = 0, \dots, N$ sous l'hypothèse nulle d'homogénéité de la série des (x_i) . Il est donc possible de définir une région de confiance dite ellipse de contrôle associée à un seuil de confiance contenant la série des S_k .

La robustesse de ce test et l'originalité de son fondement à partir d'une approche Bayésienne le rendent intéressant.

1.4. *Segmentation de Hubert (1989)*

La procédure de segmentation de séries chronologiques est quant à elle appropriée à la recherche de multiples changements de moyenne. Elle fournit au moyen d'un algorithme spécifique une ou plusieurs dates de rupture (éventuellement aucune) qui séparent des segments contigus dont les moyennes sont significativement différentes au regard du test de Scheffé (Dagnélie, 1975).

La méthode est déjà appliquée à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest (Hubert et Carbonnel, 1993) et de l'Algérie (Meddi & al., 2003).

La méthode de la segmentation d'Hubert consiste à découper la série en m segments, de telle sorte que la moyenne calculée pour un segment soit significativement différente de la moyenne du (ou des) segment(s) voisin(s) au regard du test de SCHEFFÉ (Dagnélie, 1975). D'après les auteurs (Wilhite, & al., 1985), cette méthode peut être considérée comme un test de stationnarité. Si la procédure ne produit pas de segmentation acceptable (avec deux segments ou plus), l'hypothèse nulle de stationnarité est acceptée.

2. Résultats et analyse

A. *Détection de ruptures sur les séries chronologiques de pluviométrie*

Une « rupture » peut être définie par un changement dans la loi de probabilité des variables aléatoires dont les réalisations successives définissent les séries chronologiques étudiées (Lubès & al., 1994). L'approche statistique par les tests de rupture a été réalisée pour analyser les séries chronologiques des précipitations annuelles en utilisant celles des stations Fès-DRH et Ain Bittit (Tableau 16).

Le choix est porté sur ceux qui permettent de déterminer des dates de ruptures : test de Buishand, méthode non paramétrique de Pettitt, méthode Bayésienne de Lee et Heghinian, et la segmentation de Hubert (Lubès & al., 1994).

Tableau 19: Ruptures détectées par les tests de Khronostat

Station	Buishand	Pettitt	Lee et Highinian
Ain Bittit	2009	non signifiant	2009
Fès-DRH	2008	non signifiant	2008

B. Segmentation d'HUBERT et corrélation des rangs de SPEARMAN

a. Segmentation d'HUBERT

Le tableau 17 donne les résultats de la segmentation d'HUBERT pour les trois stations références déjà utilisées. Ces stations présentent des ruptures sur la période 1977-2014, bien illustrées par des différences importantes entre les valeurs des Écartypes.

Tableau 20: Résultats de la segmentation d'HUBERT (valeurs en mm) sur la période 1977-2014

Station	Segment 1				Segment 2			
	Début	Fin	Moyen	Écartype	Début	Fin	Moyen	Écartype
Fès-DRH	1979	2008	379.600	112.437	2009	2014	594.833	209.439
Ain Bittit	1979	2009	456.935	148.661	2010	2014	703.600	163.973
Fès-Saïss	1979	2007	478.293	166.460	2008	2014	1468.60	403.195

La procédure de segmentation d'Hubert indique :

- une rupture en 2009, représentant une modification du régime pluviométrique, avec un bénéfice de 35% pour la série de mesures d'Ain Bittit ;
- une rupture en 2008, représentant une modification du régime pluviométrique, avec un bénéfice de 36.1% pour la série de mesures de Fès-DRH ;
- aucune rupture n'est détectée par le test de Pettitt qui peut être due à une insuffisance de données durant cette période d'étude courte.

En effet, ce suivi sur une période d'une trentaine d'années ne permet pas d'obtenir des statistiques robustes en termes de tendances. On ne peut donc rien conclure sur un éventuel changement dans les séries chronologiques des précipitations au niveau de la Plaine de Saïss depuis la fin des années soixante-dix .

b. Corrélation des rangs de SPEARMAN

Tableau 21 : Test de rupture par la segmentation d'HUBERT pour la période 1977-2014

Station	Seuil de confiance de 99 %	Seuil de confiance de 95 %	Seuil de confiance de 90 %	Valeur de la variable	Date de rupture au niveau de 1 % du test de SCHEFFÉ
Fès-DRH	Acceptée	Acceptée	Acceptée	0.35	2008
Ain Bittit	Acceptée	Rejetée	Rejetée	2.07	2009
Fès-Saïss	Rejetée	Rejetée	Rejetée	3.59	2007

Le test de corrélation des rangs a été appliqué aux trois stations références (Tableau 18). L'hypothèse nulle d'absence de changement n'est rejetée que pour les deux stations (Ain Bittit aux seuils de confiance de 99 et 95 % et aux 99%, 95 % et 90 % pour Fès-Saïss). Elle est acceptée pour la station Fès-DRH aux différents seuils de confiance, bien qu'elles présentent une rupture au niveau de signification 1 % du test de SCHEFFÉ.

En effet, les traitements réalisés, dans la Plaine de Saïss, mettent en évidence une diminution persistante de pluies sur les décennies 1970, 1980 et 1990 par rapport aux décennies 2000 et 2010 sur la période d'étude. La méthode de la segmentation d'HUBERT pour les trois stations étudiées montre l'existence des ruptures sur la période 1977-2014, marquées par des différences importantes entre les

valeurs des Écartypes pour chaque station. Ces ruptures confirment une évolution climatique dans la Plaine de Saïss. Quant au test de corrélation des rangs, il a été appliqué aux trois stations références. L'hypothèse nulle d'absence de changement n'est rejetée que pour les deux stations d'Ain Bittit et Fès-Saïss, aux seuils de confiance de 99 et 95 %. Elle est acceptée pour la station Fès-DRH aux différents seuils de confiance, bien qu'elle présente une rupture au niveau de signification 1 % du test de SCHEFFÉ. L'analyse des résultats (Tableau 18) témoigne de la persistance de la sécheresse durant les trois décennies 1970, 1980 et 1990, comme elle a été confirmée par l'acceptation de l'hypothèse nulle.

II. Etude de la persistance de sécheresse et sa relation avec l'ONA

1. Notion des modes de télé-connections

La circulation atmosphérique est le principal facteur des changements dans la rigueur des saisons, notamment hivernales, d'une année à l'autre. Parmi les éléments les plus distingués de la variabilité interannuelle de la circulation atmosphérique de grande échelle est l'importance de l'organisation spatiale des modes de télé-connections (Wallace & Gutzler, 1981). La circulation atmosphérique présente une grande variabilité, reflétant les modes de télé-connections, les conditions météorologiques et les systèmes de circulation qui se produisent sur différentes échelles de temps, allant de quelques jours jusqu'aux quelques mois, à plusieurs années voire quelques siècles.

Tous les modes de télé-connections sont des aspects naturels de notre système atmosphérique chaotique. Certains de ces modes, en particulier ceux localisés sur le Pacifique nord, sont souvent forcés par les changements de températures de la surface des mers tropicales et la convection tropicale associée à la fois au cycle ENSO (Mo & Livezey, 1986 ; Barnston & Livezey, 1991) et aux Madden-Julian Oscillations (MJO).

La surveillance régulière de ces modes de télé-connections est importante et nécessite des recherches, en continu, pour mieux comprendre leur rôle dans le système climatique mondial. Dix modes de télé-connections principaux peuvent être identifiés, pendant toute l'année, dans les extras tropiques de l'Hémisphère nord (Barnston & Livezey, 1987). Le principal mode retenu comme intéressant dans cette étude est l'Oscillation Nord Atlantique (ONA).

1.1. *Principe de l'oscillation nord-atlantique*

Vu qu'elle étend son influence sur l'Afrique du Nord ainsi que d'autres endroits, il s'avère intéressant d'analyser l'Oscillation nord atlantique (l'ONA) pour la mise en évidence de la nature de relation entre cette dernière et la pluviométrie sur la Plaine de Saïss.

1.2. *Origine et variabilité de l'ONA*

Au cours des phases positives de l'ONA, les vents d'ouest nord-atlantique, qui fournissent une grande partie de l'humidité atmosphérique en Afrique du Nord et en Europe, se déplacent vers le nord, provoquant des conditions froides en Europe du Nord. Ceci, à son tour, entraîne des conditions sèches sur l'Europe du Sud, la Méditerranée et l'Afrique du Nord. À l'inverse, le motif inverse se produit lorsque l'ONA est dans ses phases négatives (Hurrell & Van Loon, 1997 ; Trigo & al., 2002 ; Hurrell & al., 2003).

Il existe différentes façons d'identifier la signature spatiale de l'ONA. En conséquence, il n'existe pas de l'ONA index universellement accepté pour décrire l'évolution dans le temps du phénomène. Les lecteurs peuvent se référer à Hurrell & al, (2003) pour plus de détails. En règle générale Walker & Bliss,

(1932) ont construit le premier indice basé sur une combinaison linéaire de la pression de surface et des observations de température des stations météorologiques des deux côtés de la vasque atlantique.

Plus récemment, différents indices de l'ONA ont été définis en prenant en compte la différence des anomalies de la pression de surface entre plusieurs sites du nord et du sud (indices de station). Rogers (1984) a défini l'indice de l'ONA en examinant la différence dans la pression normale de niveau de la mer (SLP) entre Ponta Delgada (Açores) et Akureyri (Islande). Basé sur des considérations précédentes, dans la présente étude, l'indice de l'ONA calculé sur les différences entre les anomalies de pression normalisées mesuré à Gibraltar et Reykjavik (Islande), compilé par l'Unité de recherche climatique de l'Université d'EastAnglia (Royaume-Uni), a été sélectionné pour la période 1979-2013 ([http ://www. cru.uea.ac.uk /cru/data / L'ONA /](http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/L'ONA/))

1.3. *Indice de l'ONA*

Selon (Rogers, 1984), cette oscillation peut être quantifiée par un indice, l'indice de l'ONA, ce dernier est défini comme la différence entre les anomalies de pressions normalisées à Lisbonne (Açores) et Reykjavik (Islande).

$$ONAi = \left(\frac{P_i - \overline{P}}{\sigma} \right)_L - \left(\frac{P_i - \overline{P}}{\sigma} \right)_R \quad (\text{Eq. 22})$$

Avec :

P_L : la moyenne normalisée à Lisbonne de la pression au niveau de la surface de la mer ;

P_R : la moyenne normalisée à Reykjavik de la pression au niveau de la surface de la mer.

L'ONA se ramène ainsi à un chiffre compris entre -5 et +5. Quand cet indice est positif, la différence de pression est maximale, les hautes et les basses pressions sont accentuées (Khaldi, 2005) ; un indice négatif correspond au contraire à un anticyclone des Açores et une dépression islandaise faible.

Les deux états de l'oscillation nord-atlantique correspondent aux deux grands types de climats hivernaux ; Un indice de l'ONA positif avec ses pressions hautes aux Açores et basses en Islande, se manifeste par des vents forts et rapides d'Ouest- Sud-Ouest balayant l'Océan atlantique ; Il engendre des tempêtes et des précipitations fréquentes sur le Nord de l'Europe et des sécheresses sur l'Afrique du nord (Khaldi, 2005).

Quand l'indice de l'ONA est négatif, ces effets sont inversés. Avec une différence de pression réduite entre le Portugal et l'Islande, les vents d'Ouest sont faibles et les perturbations s'engouffrent plus au Sud, apportant des pluies sur les régions méditerranéennes.

Sur la figure 48 on observe la succession des indices de l'ONA depuis les dernières décennies, la vision d'une périodicité n'apparaît pas évidente et l'étude statistique de cette évolution laisse place à différentes interprétations.

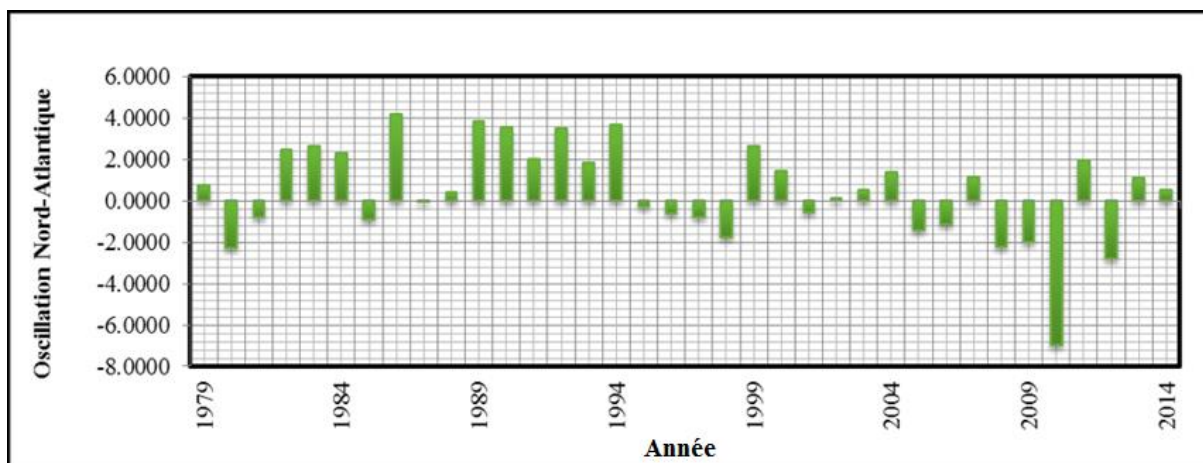


Figure 49 : Variabilité annuelle de l'indice d'oscillation nord-atlantique pour la période 1979-2014

2. Corrélations de l'indice SPI avec le mode de l'indice de l'ONA

Dans le cadre de cette analyse, la relation qui existe entre le SPI annuel calculé pour les trois stations dans la Plaine de Saïss et l'ONA ont été estimés. Un calcul des coefficients de corrélation linéaire entre la série de l'indice SPI (calculé pour les trois stations) et l'ONA sur la période disponible (1979-2014) pour les trois stations d'étude a été réalisé pour une échelle de temps saisonnière et annuelle. En procédant des mesures mensuelles de la pluviométrie sur les stations météorologiques une corrélation des SPI calculés avec l'indice d'oscillation nord-atlantique a été évoquée (Tableau 19).

Tableau 22 : Corrélation entre l'ONA et des valeurs SPI des trois stations pour la période 1990-2014

Station	Corrélation
Fès-DRH	-0.65052
Fès-Saïss	-0.40474
Ain Bittit	-0.27958

Le tableau ci-dessus présente les différentes corrélations des valeurs SPI des trois stations de la Plaine de Saïss avec l'indice de l'ONA. Le tableau montre des valeurs de corrélations significatives sachant qu'une étude de plusieurs stations serait d'une grande importance. La plus grande valeur du coefficient de corrélation significatif a été enregistrée pour la station Fès-DRH avec -0.650 suivie de la station Fès-Saïss avec -0.404 et la station Ain Bittit avec -0.279 ; toutefois le signe de corrélation est négatif. Il est à noter que la position géographique des trois stations météorologiques constitue un facteur majeur qui contribue dans ces différentes corrélations. Ces dernières augmentent toute en se déplaçant d'Ain Bittit vers Fès-DRH, c'est à dire du Sud vers le Nord. Ainsi les montagnes du Moyen Atlas jouent un rôle de barrière pour les stations situées à l'Est de la chaîne moyen atlasique.

2.1. Analyse de composites

La correspondance entre l'ONA et la variabilité des extrêmes pluviométriques de la Plaine de Saïss, est réalisée par une analyse des évolutions annuelles de l'ONA avec l'indice SPI pour les trois stations (Fès-DRH, Fès-Saïss et Ain Bittit) au cours de la période d'étude. L'influence de ces modes sur la pluviométrie au Maroc se trouve affaiblie par la barrière du Moyen Atlas. Cependant l'étude est limitée aux tendances annuelles du mode ONA au cours des périodes sèches repérées par l'indice SPI.

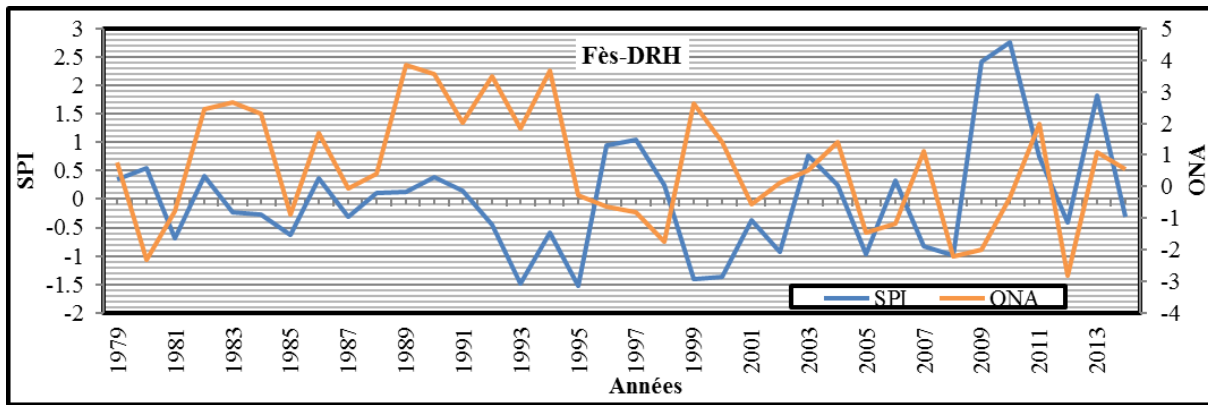


Figure 50: Evolution des indices de l'ONA avec l'indice SPI des précipitations de Fès-DRH à l'échelle annuelle au cours de la période de 1979-2014

Les variations annuelles de l'indice SPI des précipitations à Fès-DRH au cours de la période d'étude ont montré que les épisodes de 1982, 1984, 1989, 1992, 1994, 1995, 1999, 2000, 2007 et 2010 présentent les années sèches de la période 1979-2014. La plupart de ces années sèches à Fès-DRH coïncident avec des valeurs positives de ONA (Figure 49). Durant la phase positive de ONA, les précipitations se trouvent alors réduites sur le Maroc comme sur le sud de l'Europe. Avec un calcul simple on trouve que 70% de ces épisodes secs à Fès-DRH coïncident avec la phase positive du mode ONA.

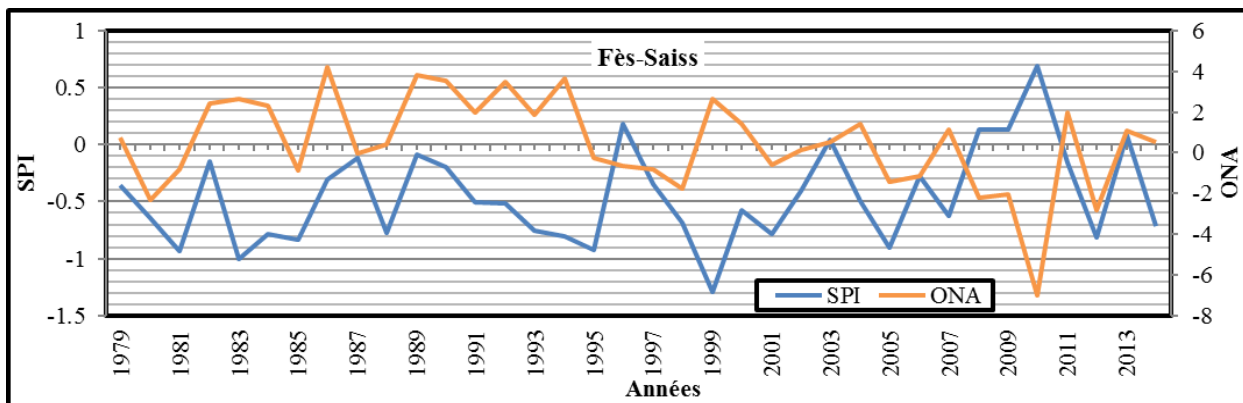


Figure 51 : Evolution des indices de l'ONA avec SPI de Fès-Saïss pour la période de 1979-2014

A l'échelle annuelle, l'indice SPI a montré que les années sèches à Fès-Saïss correspondent aux années 1982, 1983, 1991, 1993, 1994, 1999, 2000, 2001, 2007, 2008 et 2010 dont 50% coïncident avec la phase positive de l'ONA, ce qui permet d'expliquer une bonne partie des déficits pluviométriques au cours de ces périodes (Figure 50).

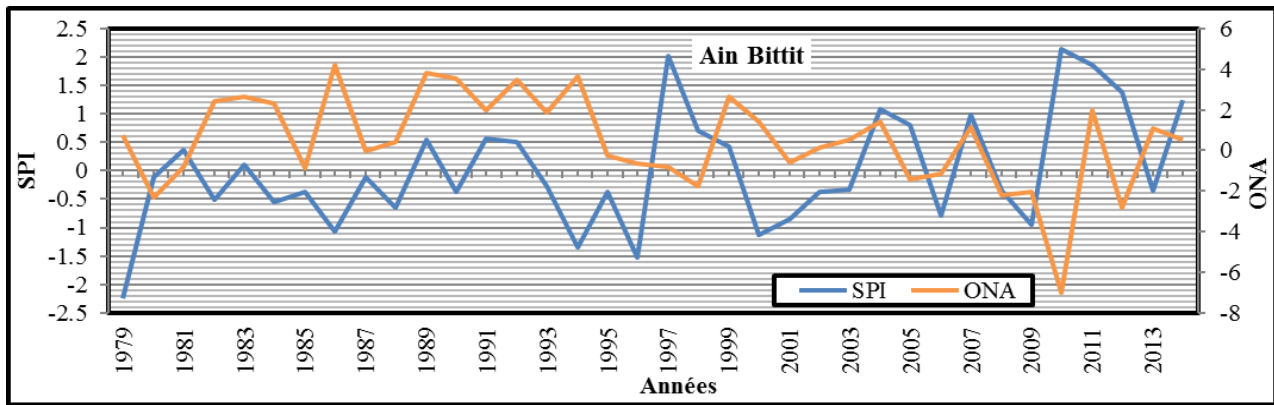


Figure 52: Evolutions des indices de l'ONA avec SPI d'Ain Bittit pour la période de 1979-2014

A l'échelle annuelle, l'indice SPI a montré que les années sèches à Ain Bittit correspondent aux années 1979, 1982, 1984, 1990, , 1994, 1995, 1998, 2000, 2001, 2008, 2010 et 2013, dont 30% coïncident avec la phase positive de ONA, ce qui permet d'expliquer une bonne partie des déficits pluviométriques au cours de ces périodes (Figure 51) . L'analyse de composite affirme que la phase positive du mode ONA coïncide assez fréquemment avec des déficits pluviométriques dans la Plaine de Saïss.

2.2. Choix des intervalles

Le choix des intervalles est une autre façon d'analyse et de représentation de la relation entre la pluviométrie et l'oscillation nord-atlantique. Cette méthode est basée sur le choix des intervalles partageant notre échantillon (série de mesures). Elle présente quand même une certaine subjectivité. En dépit de celle-ci l'analyse par intervalle minimise l'effet ponctuel de la mesure que présente la corrélation simple qui relie une valeur à une autre. Les indices d'oscillation nord-atlantique standardisés par rapport à une période de 1979-2014 suivent une loi normale (Figure 52) et les totaux annuels des précipitations, en variable centrée réduite (VCR) pour les stations considérées (Fès-DRH, Ain Bittit et Fès-Saïss) sont proches de la normale (Figures 53, 54 et 55).

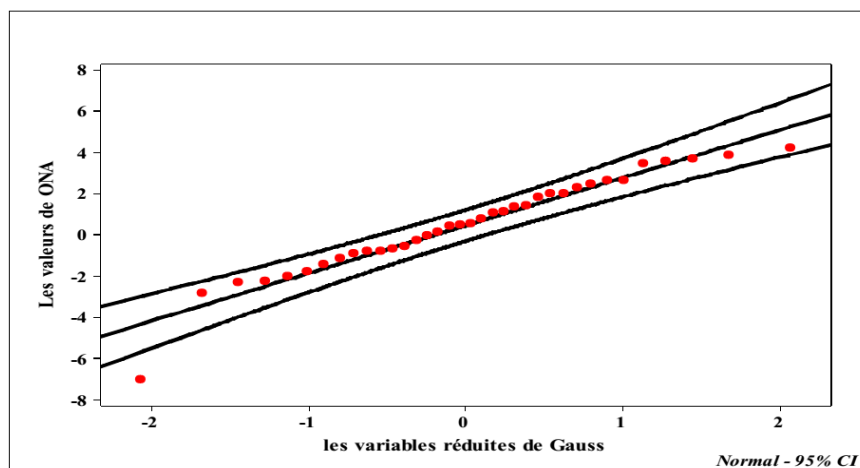


Figure 53: Ajustement à une loi normale des VCR de l'indice de l'ONA

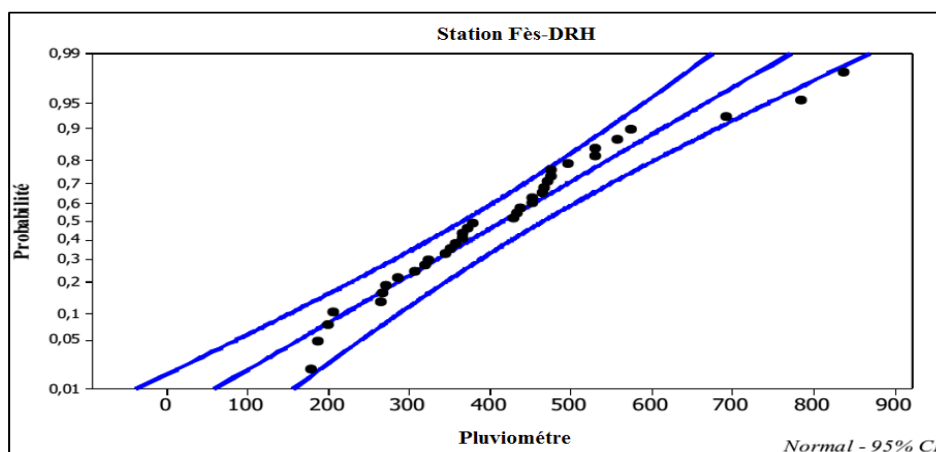


Figure 54: Ajustement à une loi normale des VCR de pluviométrie pour la station Fès-DRH

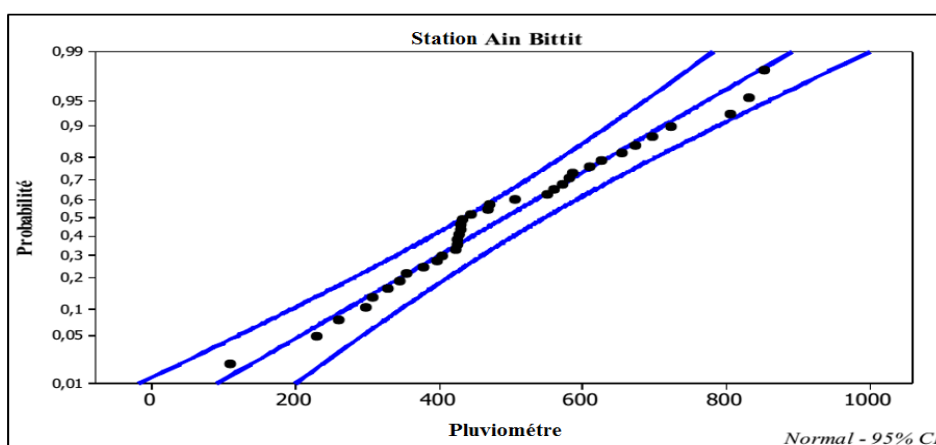


Figure 55: Ajustement à une loi normale des VCR de pluviométrie pour la station Ain Bittit

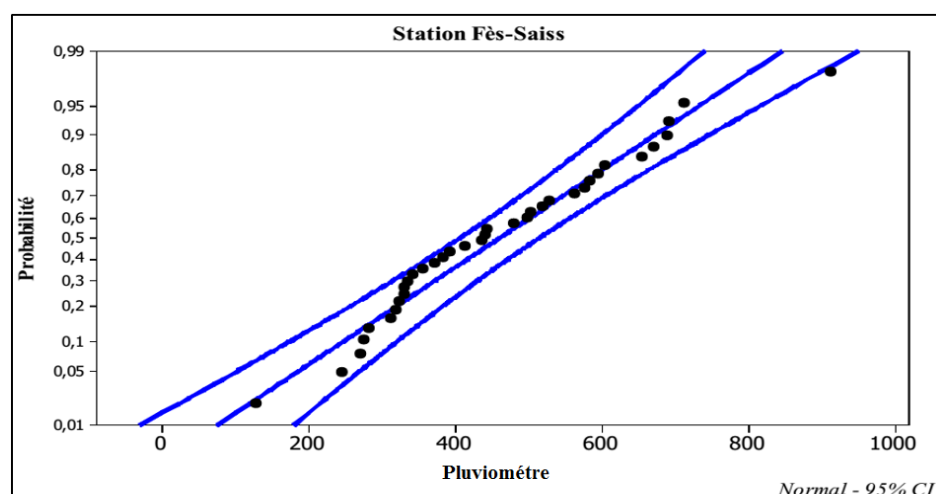


Figure 56: Ajustement à une loi normale des VCR de pluviométrie pour la station Fès-Saïss

La détermination des seuils des intervalles dépend de la période sur laquelle la moyenne et l'écart type sont calculés.

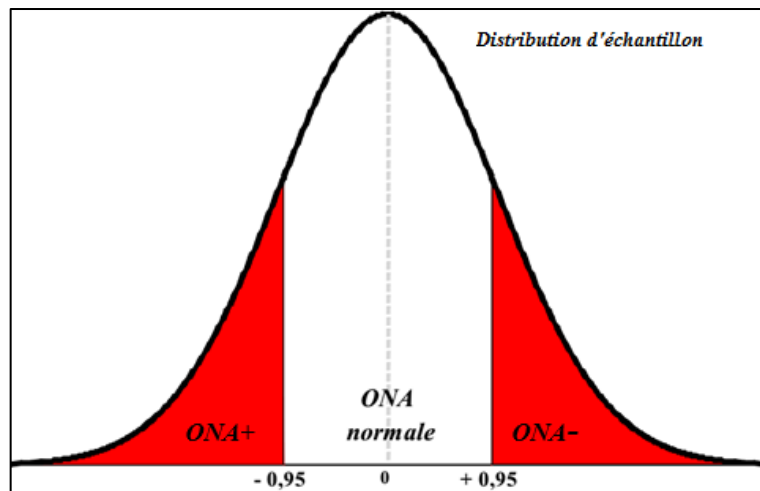


Figure 57: Représentation des seuils de l'indice de l'ONA

Elle est basée sur les résultats de l'ajustement par une loi normale des variables centrées réduites de l'indice d'oscillation nord-atlantique et des totaux pluviométriques. L'échantillon est partagé en 3 parties ; deux intervalles d'extrémités L'ONA+ et L'ONA- et l'intervalle centrale L'ONA normale (Figure 56).

Pour la pluviométrie deux intervalles d'extrémité année sèche et année humide et celui du centre année normale. Il a été opté pour les seuils suivants.

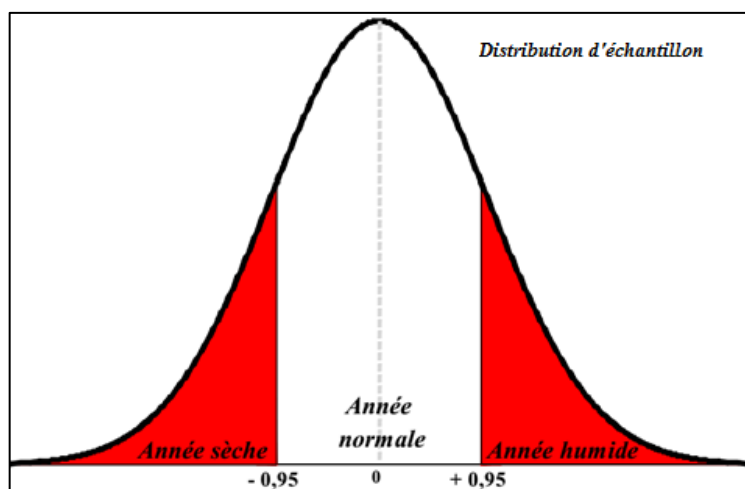


Figure 58 : Représentation des seuils de VCR des totaux annuels de la pluviométrie

En se basant sur la loi normale de distribution de notre échantillon : l'indice d'oscillation nord-atlantique sera positif (ONA+) s'il est inférieur à - 0.95 ce qui impliquera d'après la recherche précédente à une année sèche sur la région. Lorsque ces valeurs sont comprises entre - 0.95 et 0.95 l'année sera une année normale ; par contre si elles sont supérieures à 0.95, l'indice d'oscillation nord-atlantique est négatif (ONA-) et donc l'année sera pluvieuse (Figures 56 et 57).

D'une manière générale, la réponse pluviométrique notamment l'indice SPI à l'oscillation nord-atlantique montre que la période de forte sécheresse correspond à des indices ONA positifs de forte intensité, qui reflètent un renforcement de l'anticyclone des Açores et un approfondissement de la dépression d'Islande. Dans ces conditions, le rail des dépressions dérive vers les latitudes nord, ce qui favorise la mise en place d'un temps sec et doux sur la périphérie du Maroc, à savoir la Plaine de Saïss.

Lorsque le signal s'affaiblit, et encore moins lorsqu'il devient négatif, la pression associée à l'anticyclone des Açores diminue alors que la dépression islandaise devient moins creuse. Dans ces conditions, avec une légère différence de pression, le rail des dépressions se déplace vers le sud et touche donc les régions de la rive sud du Maroc, qui sera donc plus arrosées. Ce type de circulation, caractérisé par des indices de l'ONA élevés, exprime ses effets sur les précipitations au début et à la fin de la période d'étude.

III. Evaluation spatio-temporelle des séquences de sécheresse

Pour le Maroc à titre d'exemple, la sécheresse de la campagne 1994-1995 a entraîné une diminution importante de la production céréalière, une baisse du niveau de l'emploi et une baisse de la valeur ajoutée agricole (<http://www.chanvre-info.ch/info/fr/La-secheresse-au-Maroc-met-en.html>)

Appuyées sur les données climatiques provenant de trois stations météorologiques, les performances des indices tels que CMI, SPI, RDI, et WSVI sont évalués comme indicateurs météorologiques pour le suivi et la caractérisation des conditions de sécheresses à différentes échelles de temps. Ainsi que leur potentiel comme approches méthodologiques qui visent à analyser l'intensité, la durée et la fréquence des séquences sèches au niveau de la Plaine de Saïss.

Une base de données est constituée de séries de mesures pluviométriques mensuelles provenant de trois stations météorologiques dont on dispose les mesures des séries chronologiques de plus de 36 ans. Les données de température sont propres à la station Fès-Saïss. Les données ont été mises à disposition par l'Agence du Bassin Hydraulique de Sebou (ABHS).

La sécheresse est un phénomène régional caractérisé par trois dimensions : la sévérité ou l'intensité, la durée et l'étendue (Rossi & al, 1992) (Figure 58).

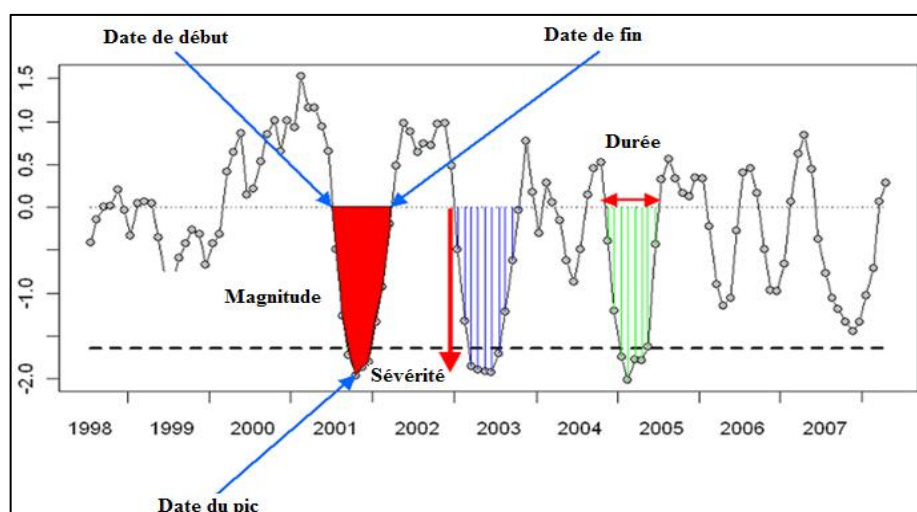


Figure 59: Schéma expliquant les événements de sécheresse (Rossi & al, 1992)

1. Identification et analyse des séquences par CMI

1.1. Méthodologie

C'est l'indicateur météorologique qui donne le statut de l'humidité disponible par rapport à la demande en humidité (Palmer, 1968). Développé à partir des procédures de l'Indice de sévérité des sécheresses de Palmer (PDSI = Palmer Drought Severity Index) (Alley, 1984). Cet indice définit les sécheresses en fonction de la magnitude et du déficit en évapotranspiration. Cet indice utilise la température moyenne et les précipitations totales comme intrants, en plus de la valeur de l'Indice d'humidité disponible

pour les cultures (CMI = Crop Moisture Index) de la semaine précédente pour évaluer les conditions agricoles. Le CMI est un indicateur normalisé qui donne un poids par endroit et par période et permet donc de comparer différentes régions.

C'est un indice qui a été utilisé afin d'avoir un aperçu du stress hydrique sur le terrain étudié (Heim, 2002), représente le ratio de la pluie annuelle sur l'évapotranspiration potentielle annuelle. Pour avoir un indice compris entre -1 et 1.

$$CMI = (P/ETP) - 1, \text{ si } P < ETP \quad (\text{Eq. 23})$$

$$CMI = 1 - (ETP/P), \text{ si } ETP < P \quad (\text{Eq. 24})$$

Pour la même raison, les données d'évapotranspiration et de pluie mensuelle de la station Fès-Saïss ont été utilisées, afin d'en extraire l'évolution du CMI au niveau de la Plaine de Saïss (Tableau 20).

Tableau 23 : Classification de la sécheresse en rapport avec la valeur du CMI

Classes du CMI	Degré de la sécheresse
$CMI > 0$	humide
$-0.6 < CMI < 0$	semi-aride
$CMI < -0.6$	aride

1.2. Résultats et interprétation

A. Etude des séquences de sécheresse et analyse des tendances

Le tableau 21 et les figures 59 et 60 indiquent que les conditions humides, caractérisées par les valeurs supérieures à 0, se retrouvent sur la période d'observation 2005-2014, avec une grande fréquence (100 %).

Tableau 24: Valeurs annuelles moyennes du CMI de la station Fès-Saïss sur la période 1973-2014

Descripteurs	Période sèche	Période humide	1973-2014
	1973-2004	2005-2014	
Moyenne	-0,51	0,66	-0,25
Maximum	-0,19	2,13	2,13
Minimum	-0,77	0,14	-0,77
Écartype	0,13	0,71	0,60

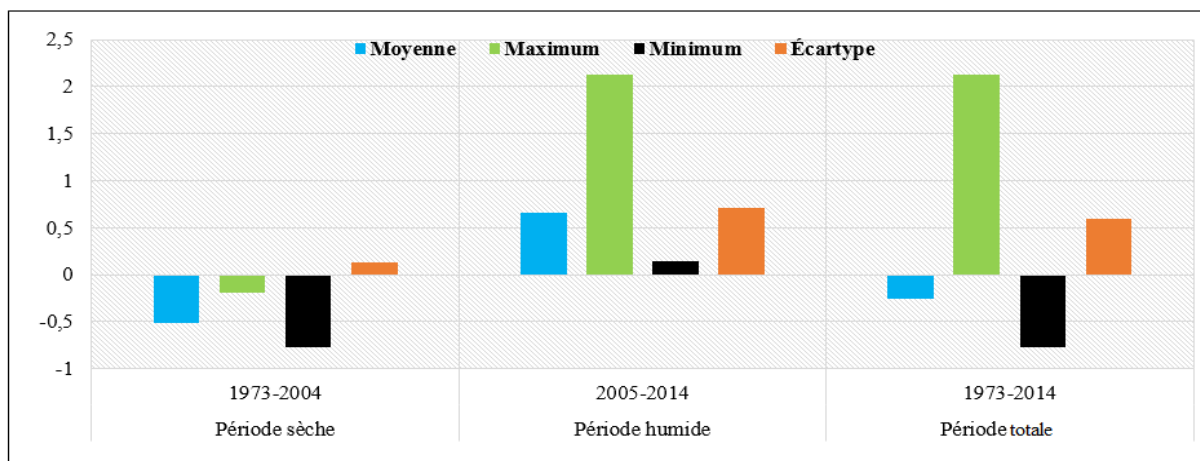


Figure 60: Valeurs annuelles moyennes du CMI de la station Fès-Saïss sur la période 1973-2014

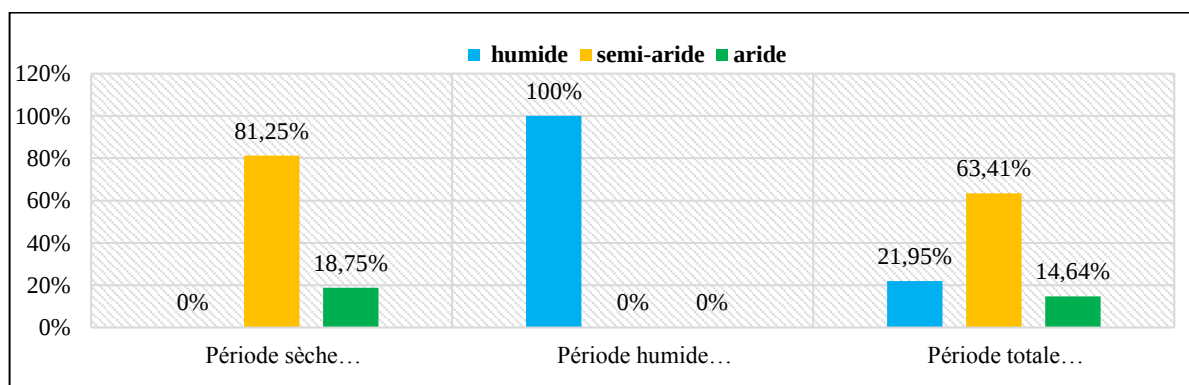


Figure 61: Fréquence du CMI annuel durant la période 1973-2014 de la station Fès-Saïss

La plupart des valeurs du CMI se rangent dans la plage des conditions semi-arides ($-0,6 < \text{CMI} < 0$), avec un pourcentage de (81,25%) pour la période de sécheresse (1973-2004) et 63,41% pour la période totale d'observation (1973-2014).

Enfin, les conditions arides, beaucoup moins fréquentes, sont surtout bien représentées dans la rubrique de sécheresse (1973-2004) (18,75 %), devant un pourcentage faible (14,64%) pour la période totale d'observation (1973-2014). En moyenne, sur l'ensemble de la période d'observation, les conditions semi-arides et arides représentent ensemble 78,05 % des valeurs annuelles. La figure 61 permet de donner une idée de la variabilité de l'indice sur la période donnée.

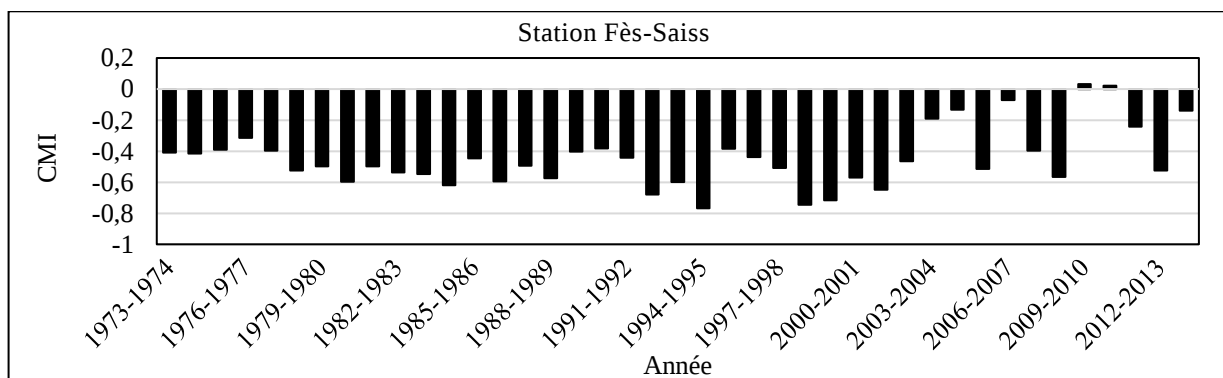


Figure 62: Evolution du CMI durant la période 1973- 2014 à la station Fès-Saïss

Il est très important de noter que la valeur annuelle de l'indice calculé à partir des résultats de la station Fès-Saïss située à l'Est de la Plaine de Saïss, présente une évolution irrégulière négative qui devient positive au cours de la période 2009-2011. Cette dernière marque une légère atténuation du stress hydrique dans la Plaine de Saïss, sachant que l'étude reste limitée à cette seule station. Tenant compte des valeurs indiquées sur la figure 61, dont la majorité est comprise entre -0,6 et 0, le climat est de régime semi-aride dans la Plaine de Saïss. Notons aussi que les données d'une seule station ne permettent pas de faire une interpolation plus représentante. Les résultats seront plus crédibles en disposant des données d'évapotranspiration pour les autres stations retenues, ce qui permet même de faire une comparaison de l'évolution des valeurs du CIM entre la partie nord et la partie sud de la Plaine de Saïss.

B. Cartographie de gravité de la sécheresse par CMI

a. Carte de gravité de la sécheresse

Les cartes de gravité de la sécheresse ont été utilisées dans de nombreuses études au cours de la dernière décennie (Tsakiris et Vangelis, 2004). Les cartes de sécheresse montrent les zones affectées par la sévérité correspondante de la sécheresse. Dans cette étude, la méthode d'interpolation de krigeage a été utilisée pour cartographier l'étendue spatiale de la sécheresse à partir des données ponctuelles.

b. Krigeage

Le krigeage est une méthode d'interpolation stochastique (Isaak & Srivastava, 1989) qui a été largement reconnue comme approche standard pour l'interpolation de surface, basée sur des mesures scalaires à différentes stations. Le krigeage tente d'exprimer la tendance des données, de sorte que « les points hauts pourraient être reliés le long d'une crête, plutôt que d'être isolés par des contours de type bull's-eye » (Sönmez & al., 2005). De nombreuses études ont montré que krigeage fournit de meilleures estimations par rapport à d'autres méthodes (van Beers & Kleijnen, 2004).

c. Cartographie par CMI

La cartographie des valeurs moyennes de l'indice (CMI) sur différentes périodes (Figure 62) met en évidence un climat du régime semi-aride sur la majeure partie de la Plaine de Saïss durant la période d'étude. Les années plus sèches 1973-2004 avec une valeur moyenne de -0.51 par rapport aux années 2005-2014 moins sèches avec une valeur moyenne à 0.66. La sécheresse est d'autant plus poussée vers le Nord et le Nord-Est. Les valeurs positives occupent des petites zones à l'extrémité sud de la Plaine de Saïss, ce qui est peut-être lié au positionnement des différentes zones de celle-ci.

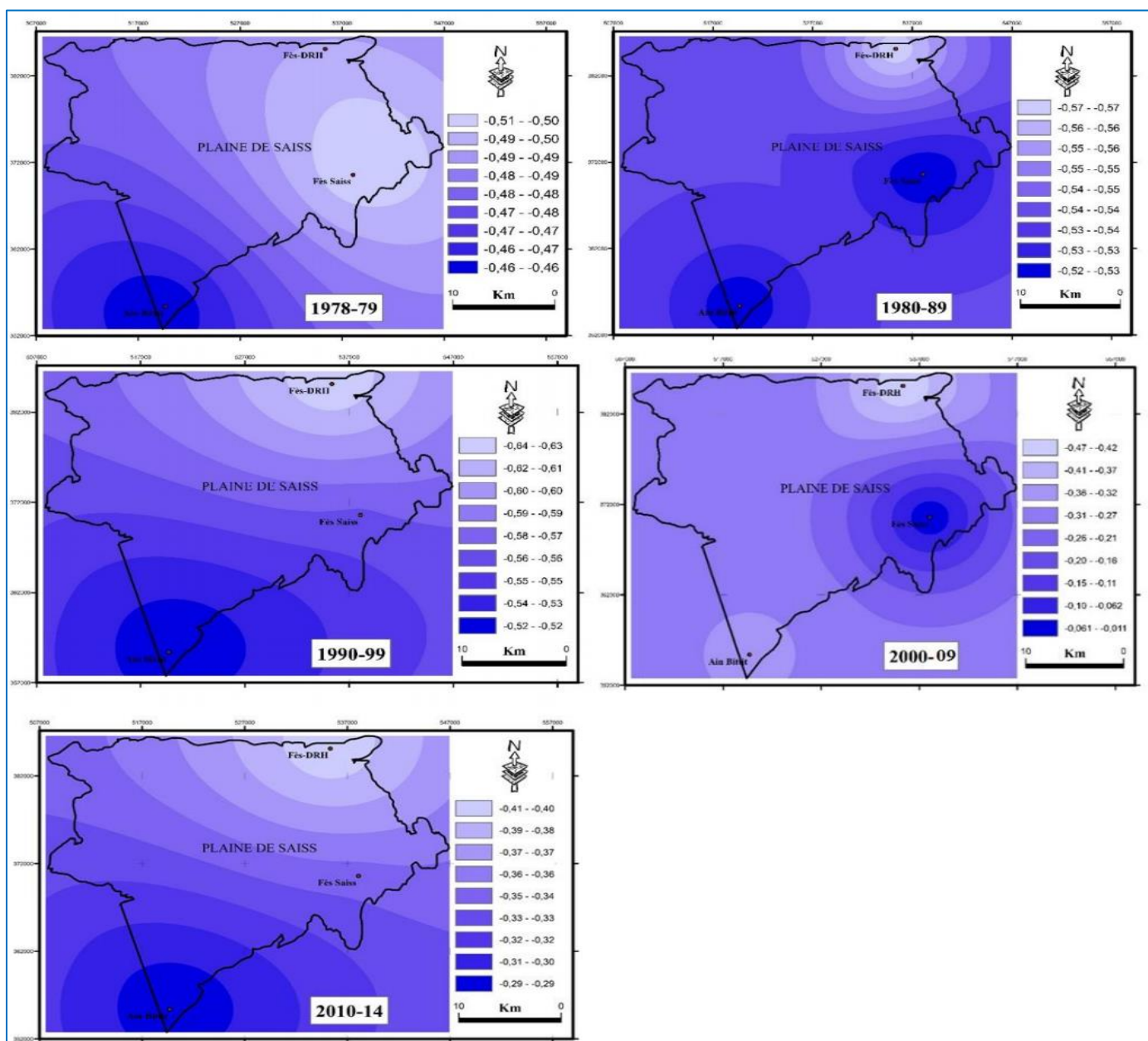


Figure 63: Répartition spatiale des valeurs du CMI sur la période 1978-2014

2. Identification et analyse des séquences par SPI

2.1. Méthodologie

L'Indice de précipitation standardisé (SPI – Standardized Precipitation Index) est l'indice de sécheresse le plus réalisable pour la Plaine de Saïss, car seules les précipitations sont nécessaires pour son développement. C'est aussi un indice standardisé qui permet d'être utilisé dans des régions climatiques et à des échelles temporelles différentes. Enfin, le SPI a été développé et appliqué dans les pays en développement. Mishra et al. (2007) ont développé le SPI aux fins de la prévision de la sécheresse dans le bassin de Kansabati River en Inde. Le SPI a également été utilisé comme outil pour lier la sécheresse météorologique et hydrologique dans le bassin de la rivière Awash en Ethiopie (Edossa & al., 2010). Au Maroc le SPI a été utilisé par Stour et Agoumi (2009) pour caractériser de la sécheresse climatique au cours de la période 1961- 2004 et par Mehdaoui et al (2018) pour analyser la variabilité spatiale et temporelle des sécheresses hivernales dans un gradient géographique aride à la bordure Est du Haut Atlas Oriental au

niveau du bassin versant de Ziz (Sud-Est du Maroc). Compte tenu des avantages et la capacité du SPI à quantifier le déficit précipité pour plusieurs échelles de temps (Tsakiris et Vangelis, 2004), la sélection du SPI comme l'indice de forçage a été jugée appropriée. Ces échelles de temps reflètent l'impact de la sécheresse sur la disponibilité des ressources en eau.

Le calcul SPI commence par sélectionner une fonction de densité de probabilité appropriée pour décrire les données de précipitation (Cacciamani & al., 2007). La probabilité cumulée d'un montant de précipitation observé est calculée après qu'une fonction de densité appropriée soit choisie. La fonction inverse normale (gaussienne) est ensuite appliquée à la probabilité (Cancelliere & al., 2007). Pour chaque mesure de chute dans cette étude, la fonction de distribution gamma a été sélectionnée pour s'adapter aux données de précipitations.

Le SPI est un index normalisé dans le temps et l'espace et cette fonctionnalité permet la comparaison des valeurs SPI entre différents emplacements. Les valeurs SPI peuvent être catégorisées selon les classes (Cacciamani & al., 2007).

McKee et al (1993) ont utilisé le système de classification des valeurs de l'indice SPI figurant ci-après (Tableau 23) pour définir l'intensité des épisodes de sécheresse en fonction de la valeur de l'indice. La formule mathématique de SPI est la suivante :

$$SPI = (pi - pm) / \sigma \quad (\text{Eq. 25})$$

Pi : Précipitation de l'année i

Pm : Précipitation moyenne

σ : Écartype

Cet indice définit la sévérité de la sécheresse en différentes classes (Tableau 22). Les valeurs annuelles négatives indiquent une sécheresse par rapport à la période de référence choisie et les valeurs positives indiquent une situation humide.

Tableau 25: Classification de la sécheresse en rapport avec la valeur de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI) (McKee & al. 1993)

Valeurs du SPI	Séquence de sécheresse
2,0 et plus	Extrêmement humide
1,5 à 1,99	Très humide
1,0 à 1,49	Modérément humide
-0,99 à 0,99	Proche de la normale
-1,0 à -1,49	Modérément sèche
-1,5 à -1,99	Très sèche
-2 et moins	Extrêmement sèche

Suite aux résultats obtenus, il y aura identification des paramètres essentiels des séquences de sécheresse. La différence par rapport à la moyenne est une indication de probabilité de la gravité de l'inondation ou de la sécheresse qui peut être utilisée pour l'évaluation des risques (Morid & al., 2006).

Plus la valeur SPI est négative pour un emplacement donné, plus la sécheresse est sévère. Les séries temporelles du SPI peuvent être utilisées pour la surveillance de la sécheresse en définissant des seuils spécifiques des applications du SPI pour définir les temps de début et de fin de la sécheresse. Les valeurs cumulées du SPI peuvent être utilisées pour analyser la gravité de la sécheresse.

2.2. Résultats et interprétation

A. Etude des séquences et analyse des tendances

Les échelles de temps à court terme (SPI-3), moyen terme (SPI-6, SPI-9) et à long terme (SPI-12) sont choisies pour cette étude.

a. SPI à court terme

L'analyse des valeurs de SPI à court terme montre qu'avant 1993, une alternance des séquences sèches et humides ont été observées dans les deux stations étudiées (Figures 63 et 64). Ainsi, de 1979 à 1993, 15 séquences sèches et 18 séquences humides ont été respectivement observées au niveau de Fès-DRH et Ain Bittit. Il est à noter que durant ces 14 années, la station Fès-DRH a connu 2 fois 2 années successives de sécheresse (79/80) et (87/88) et une fois pour la station Ain Bittit (79/80).

De 1993 à 2009, les 2 stations ont connu des périodes de sécheresses importantes marquées par un déficit pluviométrique. Ces événements secs ont été enregistrés durant les années 1993, 94/95, 2000, 2001, 2003-04 et 2008-09.

L'indice SPI a révélé que la période 2009-2014 a connu un important apport pluviométrique pour les deux stations étudiées, avec des séquences humides moyennement longues au niveau de Fès-DRH par rapport à Ain Bittit.

Durant cette période, les séquences humides l'emportent largement par rapport aux séquences sèches. Ces épisodes secs ont été observés de 2010 à 2011 et de 2013 à 2014.

L'analyse des valeurs SPI-3 de la station météorologique d'Ain Bittit montre une sécheresse modérée produite en 1978/79, 1981-1983, 1986-1989, 1993/94, 2001/02, 2008/09 et 2013/14 dans la Plaine de Saïss. Les années 2000/01 et 2011/12 ont enregistré une sécheresse sévère. Il n'y a pas eu de sécheresse extrême. Cependant existent des périodes sévèrement humides enregistrées en 1983-1991, 2003/04 et 2006-2008.

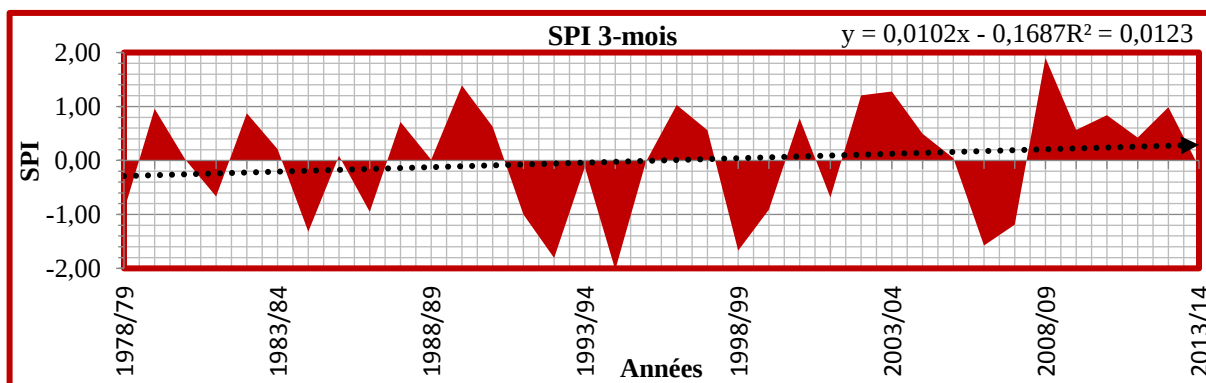


Figure 64: Valeurs de SPI-3 et analyse des tendances pour la station Fès-DRH pour la période 1979-2014

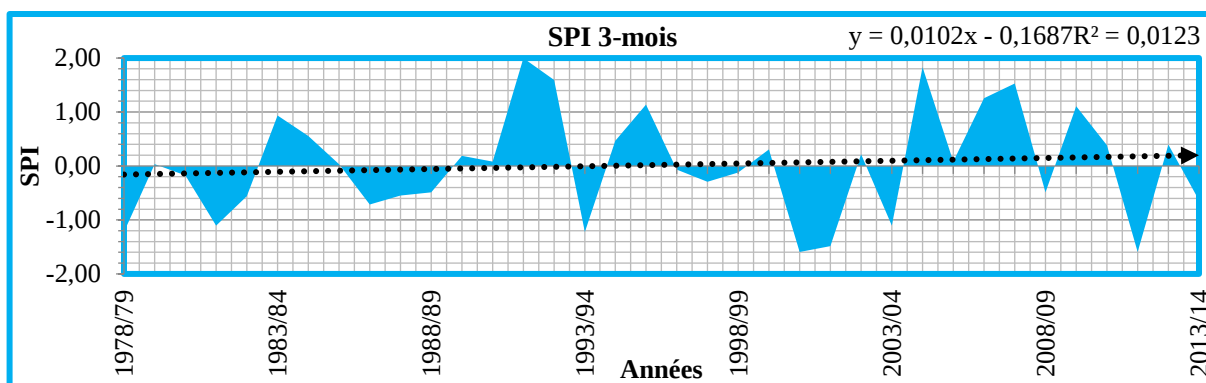


Figure 65: Valeurs de SPI-3 et analyse des tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014

b. SPI à moyen terme

A moyen terme, l'analyse des valeurs de SPI des trois premières décennies ont été marquées par une alternance de séquences humide et sèche au niveau des deux stations étudiées (Figures 65 et 66). Toutefois, la station Ain Bittit a connu des séquences de sécheresses plus intenses et longues que celles de Fès-DRH, notamment pour la période 1982-87

Durant la période 1993 à 2009, de longues séquences de sécheresse ont été enregistrées au niveau des stations étudiées. Sur cette période, six et huit séquences sèches ont été respectivement enregistrées à Fès-DRH et Ain Bittit. Parmi celles-ci certaines ont eu une apparition consécutive notamment durant quatre ans à Fès-DRH (1999-2002) et pour trois ans à Ain Bittit (1993-1995). Durant la période de 2009 à 2013 la sécheresse météorologique est moins recensée avec un apport pluviométrique important qui règne pour les deux stations météorologiques.

De même, l'analyse des valeurs du SPI-6 montre que la sécheresse modérée s'est produite en 1993-1995, 2005-06 et 1986-87 ; une sécheresse sévère est enregistrée en 2000-01 pour la station Ain Bittit. Il n'y a pas eu de sécheresse extrême, mais une période sévèrement humide a été enregistrée en 2009-08 (Figure 66).

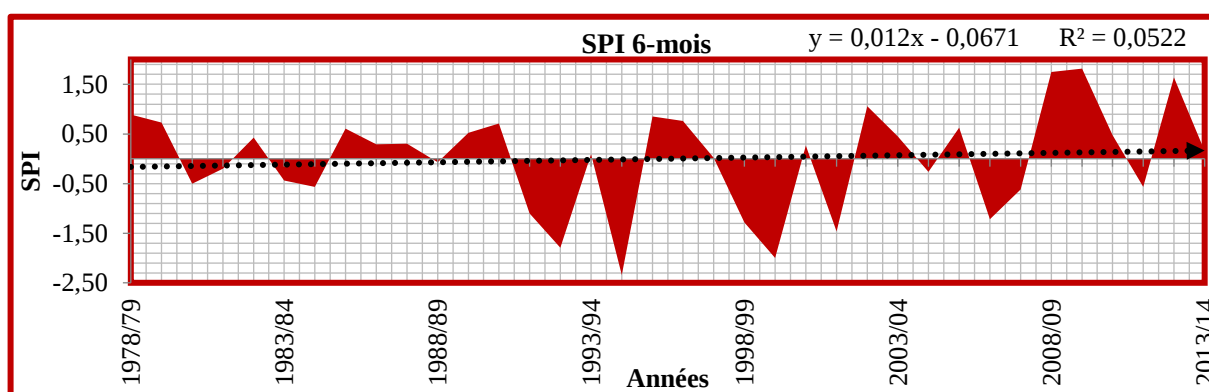


Figure 66: Valeurs de SPI-6 et analyse des tendances pour la station Fès-DRH pour la période 1979-2014

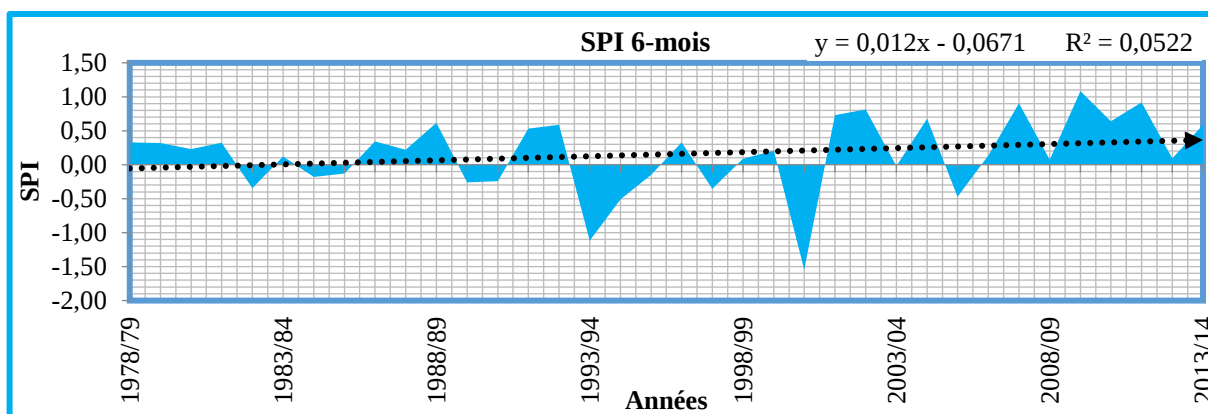


Figure 67: Valeurs de SPI-6 et analyse des tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014

Les graphiques SPI-3 et SPI-6 des figures 63, 64, 65 et 66 montrent une tendance croissante d'humidité entre 1978 et 2014 marquée par une période de sécheresse de 1966 à 1986. Et une période de pluie de 1987 à 2000 dans la Plaine de Saïss.

Selon la figure 67 ci-dessous, les années de sécheresse modérées ont été enregistrées en 1986 à 1988 et 1990 à 1993, les années de sécheresse sévères en 1984-85 et 1994-95 et les années extrêmement humides enregistrées en 1979-80 et 1982-83 à la station la Fès-DRH selon SPI-9.

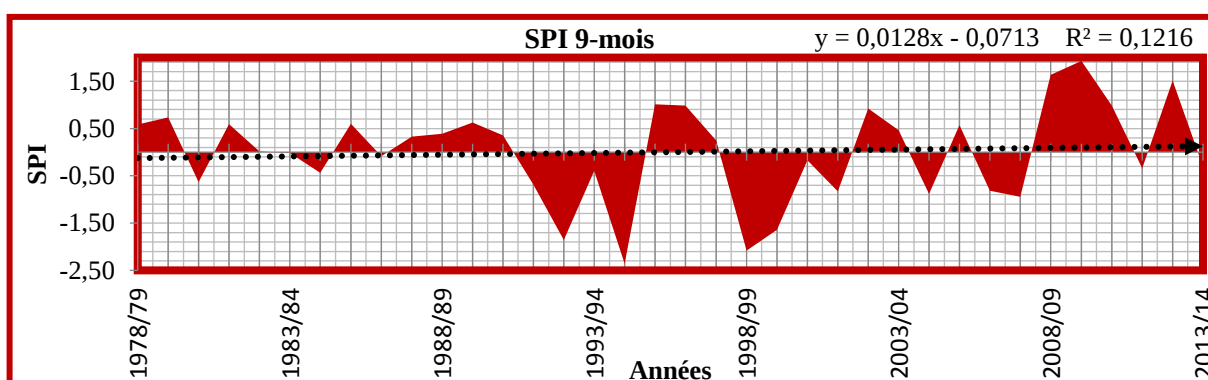


Figure 68: Valeurs de SPI-9 et analyse des tendances pour la station Fès-DRH pour la période 1979-2014

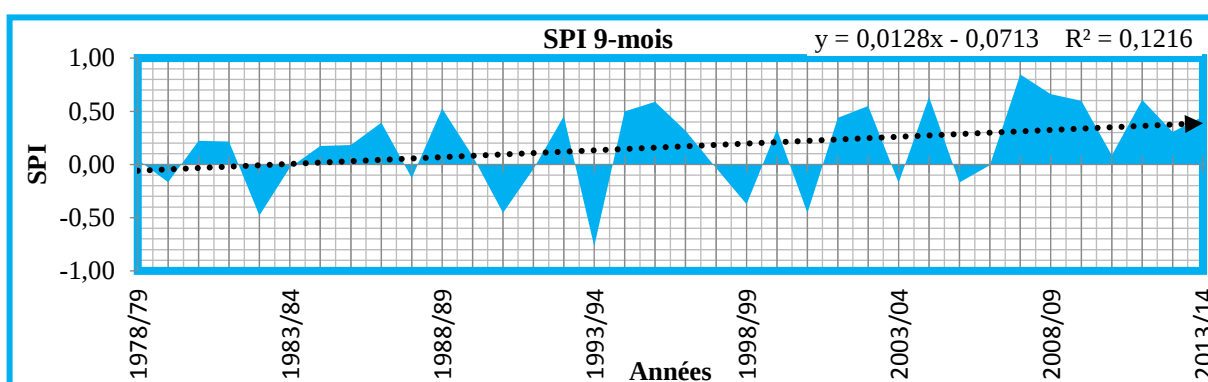


Figure 69: Valeurs de SPI-9 et analyse des tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014

Selon la figure 68, une période sèche débute jusqu'à 1985 et de 1986 à 2000, une période humide est enregistrée. Le graphique montre également une tendance croissante pour SPI-9.

c. SPI à long terme

En analysant les valeurs SPI-12, les années modérément sèches ont été enregistrées en 2007-08, les années très sèches sont enregistrées en 1992-93, 1998-99, 99-00, l'année extrêmement sèche a été enregistrée en 1994-95 et l'année extrêmement humide est 2009-10 (Figure 69).

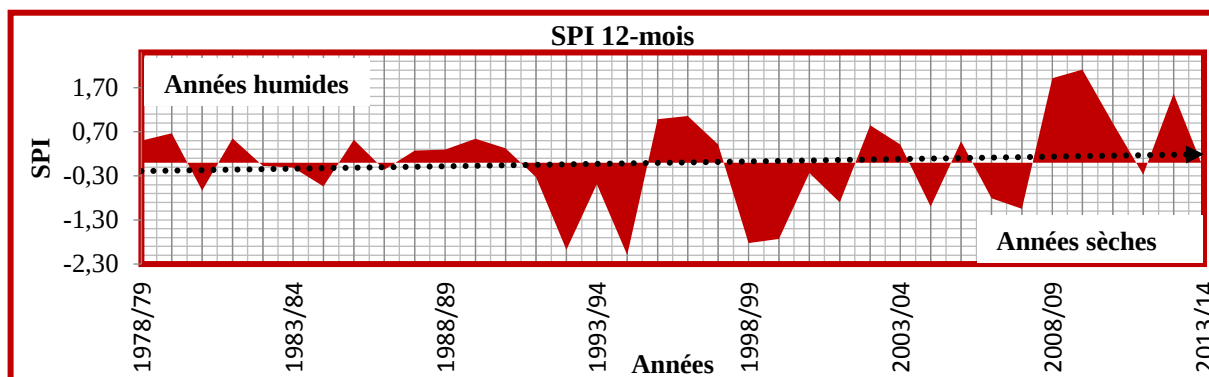


Figure 70 : Valeurs de SPI-12 et analyse des tendances pour la station Fès-DRH pour la période 1979-2014

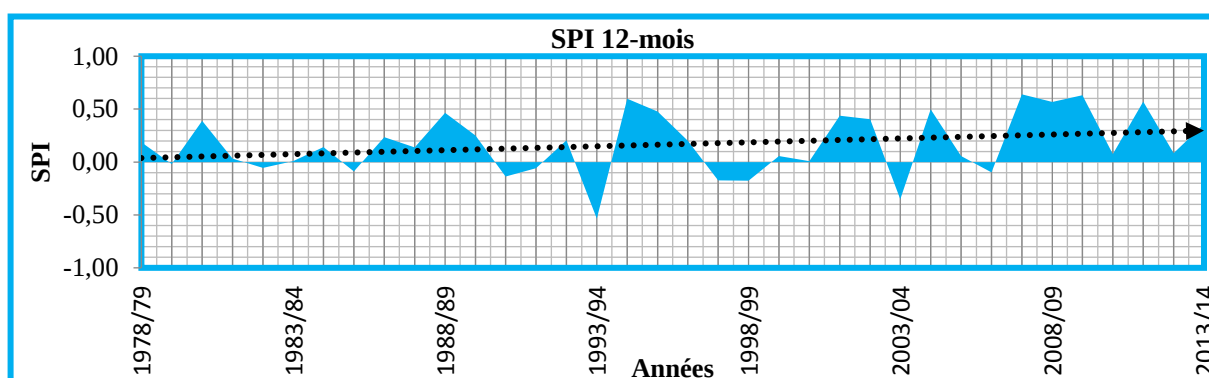


Figure 71: Valeurs de SPI-12 et analyse des tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014

Selon la figure 70, on constate que des années de sécheresse normales sont enregistrées en 1982-83, 1993-94, 1997-98, 1998-99, 2003-04 et 2007-08 à la station Ain Bittit durant la période d'étude (1978-2014). Le graphique montre également une tendance croissante pour le SPI-12.

Durant la période d'étude, on a enregistré de longues séquences de sécheresse qui sont 79/83, 89/94, 96/01, 04/05 et 79/87, 89/93, 97/00, 04/05 respectivement pour les deux stations Fès-DRH et Ain Bittit.

Selon les valeurs de SPI de 3, 6, 9, et 12 mois, la gravité de la sécheresse dans la Plaine de Saïss a été classée par trois classes, sécheresse modérée, sévère et extrême. Les figures 63 à 70 montrent les tendances de SPI-3, SPI-6 et SPI-9 et SPI-12 de la Plaine de Saïss. Les graphiques montrent que l'indice SPI suit une tendance croissante indiquant que la gravité de la sécheresse diminue et que la Plaine de Saïss acquiert de plus en plus un état humide.

Durant cinq périodes bien définies (1977/79, 1980/1989, 1990/1999, 2000/2009 et 2010/2014), les valeurs moyennes du SPI sont autour de zéro (entre -0,58 et 0,98), exceptée la station Fès-Saïss. Celle-ci a présenté pendant la période 2010-2014 une humidité modérée (SPI= 1,0 à 1,4). Dans la Plaine de Saïss, les conditions sont couramment proches de la normale (Tableau 26).

Tableau 27 : Gravité de la sécheresse par SPI-3, SPI -6, SPI -9 et SPI -12 selon le tableau de classification de Tsakiris

SPI	Sévérité	Mois	Années	
			Fès-DRH	Ain Bittit
3-mois	Modérée	octobre-déc.	84-85, 91-92 et 2007-08	78-79,81-82,93-94,01-02 et 03-04
	Sévère	octobre- déc.	92-93, 98-99 et 2006-07	00-01 et 11-12
	Extrême	octobre- déc.	94-95	rien
6-mois	Modérée	octobre - mars	91-92, 98-99, 01-02 et 06-07	93-94,01-02 et 03-04
	Sévère	octobre - mars	92-93et 99-00	2000-01
	Extrême	octobre - mars	94-95	rien
9-mois	Modérée	octobre - juin	rien	rien
	Sévère	octobre - juin	92-93 et 99-00	rien
	Extrême	octobre - juin	94-95 et 98-99	rien
12-mois	Modérée	octobre - sept.	2007-08	rien
	Sévère	octobre - sept.	92-93, 98-99 et 99-00	rien
	Extrême	octobre - sept.	94-95	rien

B. Cartographie de la gravité de sécheresse

Pour mieux cerner ce phénomène et enrichir cette étude en arguments, le nombre d'années déficitaires a été pris en considération, sachant que le déficit pluviométrique correspond à la différence entre la pluie d'une année donnée et la normale sur une période longue (dans ce cas 35 ans). Le pourcentage des années déficitaires est représenté par décennie (Figure 71) afin de mieux expliquer et interpréter les résultats obtenus :

- *La période 1977-79* : Sur la majorité de la Plaine de Saïss, le caractère déficitaire gagne d'espace avec des valeurs du SPI variant entre 0 et - 0.56. Toutefois, dans la région située au Nord-Est, un caractère excédentaire particulier est observé. Le SPI varie entre 0.06 et 0.24;
- *La décennie 1980-89* : est une période déficitaire sur l'ensemble de la Plaine de Saïss. Le SPI varie entre - 0.11et -0.5. Le nombre d'années excédentaires n'a pas dépassé une année sur dix pour la station Fès-Saïss et deux sur dix pour la station Ain Bittit, ce qui marque également le début d'un épisode sec ;
- *La décennie 1990-99* : comme il a été remarqué durant la décennie 1980-1989, la Plaine de Saïss a connu presque la même évolution durant la décennie 1990-99 marquée par une sécheresse générale. Le SPI varie entre - 0.58 et - 0.18. Il faut souligner qu'au cours de la décennie 1990-1999, c'est les parties est et nord-est ont été les plus touchées des événements de sécheresse ;
- *La décennie 2000-10* : est une période moyennement excédentaire sur l'ensemble de la Plaine de Saïss. Le SPI oscille entre 0.24 et 0.57. Le nombre d'années humides l'emporte qui marque également le début d'un épisode humide.
- *La période 2000-2014* : est une des périodes les plus excédentaires que n'a jamais connu la Plaine de Saïss durant la période d'étude. Ce caractère s'accroît et apparaît très marqué dans le côté est de la Plaine de Saïss. Les valeurs du SPI y sont beaucoup plus élevées qu'auparavant (0.56 et 1.4). Le pourcentage d'années excédentaires varie entre 50% des deux stations Fès-DRH et Ain Bittit et 70% pour la station Fès-Saïss ;

Généralement pendant la période 1977-79, seulement 5,5% de la superficie était soumise à une sécheresse modérée principalement dans la partie sud du Plaine de Saïss et plus de 94% de la zone était dans des conditions presque normales. Cependant, en 1980-89, la superficie affectée par les différentes classes de sécheresses a augmenté et seulement 20,95% de la superficie était sous des conditions presque normales. Toutefois, en 1990-99, la gravité des sécheresses s'est intensifiée et environ 95% de la superficie a été soumise à diverses sécheresses avec des nouvelles parties de la Plaine de Saïss ont été touchées par des sécheresses normales à modérées. En 2000-09, les conditions de sécheresse modérées ont persisté dans certaines parties de la Plaine de Saïss avec de légères sécheresses qu'ont couvert les différentes parties de la Plaine de Saïss. Cependant, les parties de la Plaine de Saïss sous une sécheresse grave se sont retrouvées sous un autre régime de sécheresse et autres parties ont fait face à de sévères sécheresses. De même, pendant les deux décennies 1980-89 et 1990-99 des parties de la Plaine de Saïss ont connues une augmentation de sécheresse extrême.

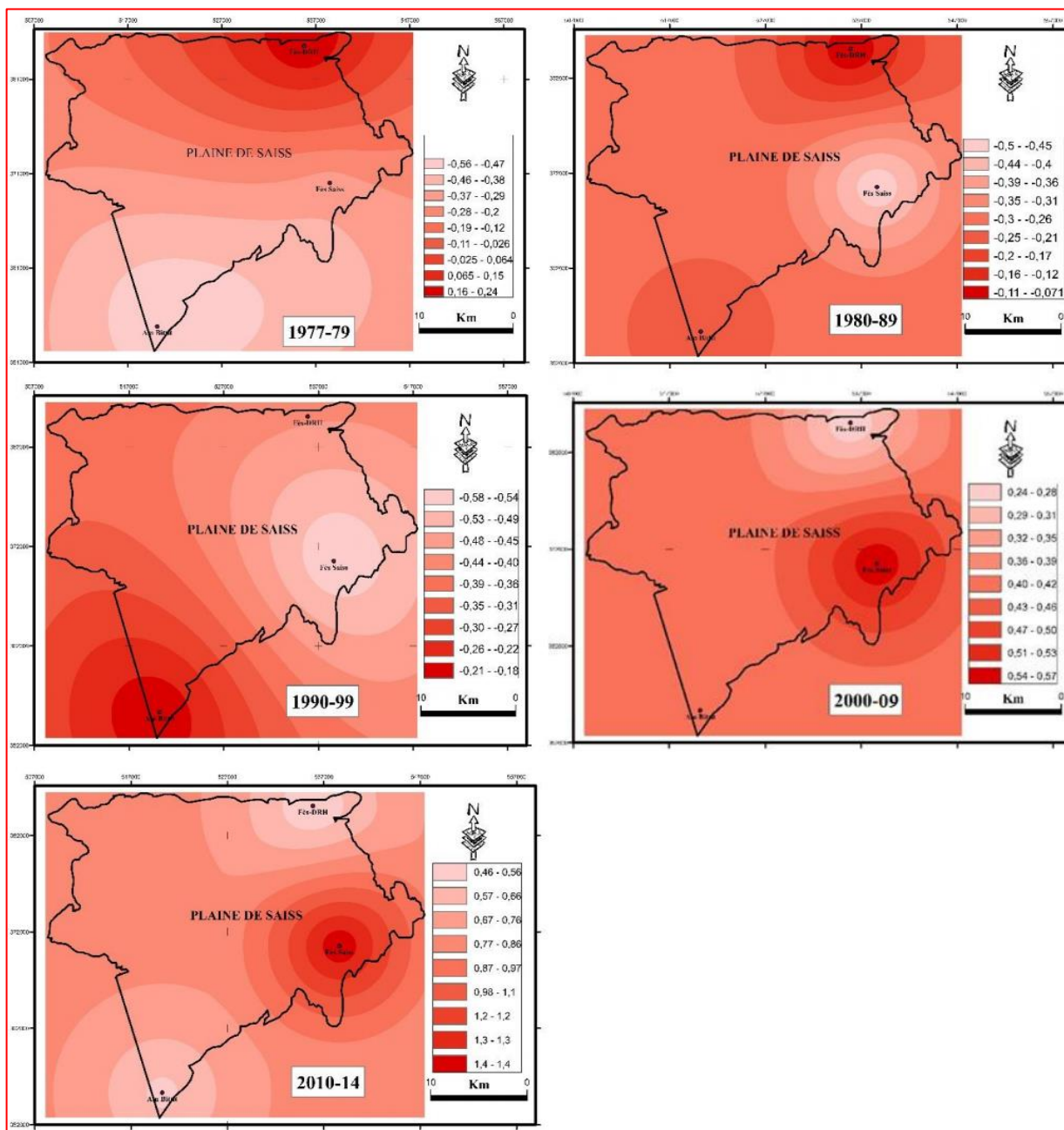


Figure 72: Répartition spatiale des valeurs moyennes du SPI dans la Plaine de Saïss

C. Analyse des paramètres descriptifs par SPI

a. Intensité

L'analyse des résultats des 36 années d'observation indique clairement que les sécheresses les plus frappantes par leur intensité ont été enregistrées durant les années 1977/78 pour la station Ain Bittit située au Sud-Ouest de la Plaine de Saïss et 1994/95 pour les deux stations Fès-Saïss et Fès-DRH dans la partie nord de la Plaine de Saïss (Tableau 25).

Tableau 28 : Intensité des séquences de sécheresses durant la période 1978 à 2014 des trois stations

Stations	Intensité (SPI)	Type	Date d'occurrence
Ain Bittit	-2.23	Extrêmement sèche	1977/78
Fès-DRH	-1.53	Sévèrement sèche	1994/95
Fès-Saïss	-1.04	Sévèrement sèche	1994/95

Les épisodes secs détectés en 1977/78 et 1994/95 ont été qualifiés sévères en terme d'intensité. La station Ain Bittit a été la plus affectée en terme d'intensité de sécheresse et qualifiée d'extrême.

b. Durée

En terme de durée des séquences de sécheresse au cours de la période d'observation, il a été déduit que les épisodes de sécheresse varient entre la station Fès-Saïss qui a connu la plus longue période de sécheresse avec six années de séquences sèches consécutives et celles de Ain Bittit et Fès-DRH qui ont connu des courtes périodes de sécheresse avec cinq années d'épisodes secs (Tableau 25 et figure 72).

Tableau 29 : Durées des séquences de sécheresses durant la période 1978-2014 des trois stations

Stations	Fès-DRH	Ain Bittit	Fès-Saïss
Durée maximale (ans)	5	5	6

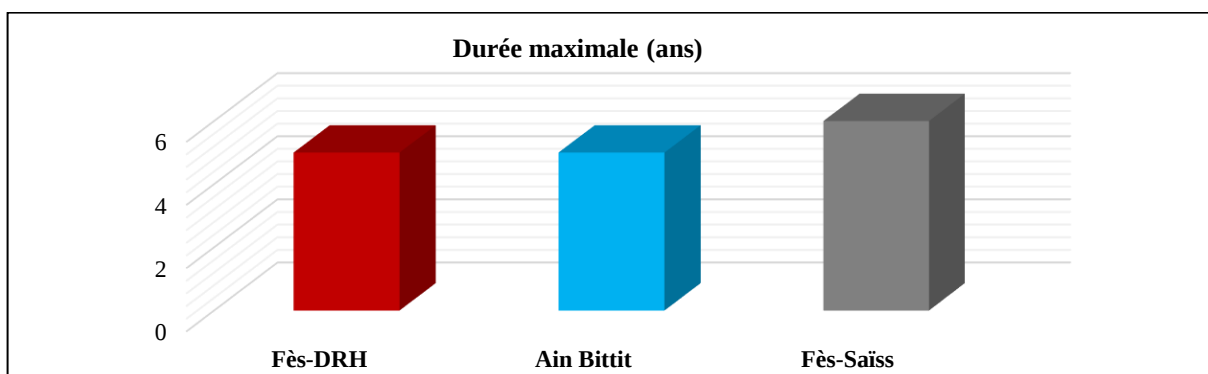


Figure 73: Durées des séquences de sécheresses enregistrées durant 1978-2014 pour les trois stations

Il est à noter que la durée maximale de sécheresse dans la Plaine de Saïss est d'au moins cinq années.

c. Fréquence

En analysant les pourcentages de sécheresse calculés ci-dessous (Figure 73), on a pu déterminer pour chacune des stations, les fréquences des années sèches, normales et humides durant la période 1978-2014. Ces dernières ont permis de constater les pourcentages 19,50%, 16,70% et 8,50% d'années sèches respectivement au niveau des stations Fès-DRH, Ain Bittit et Fès-Saïss.

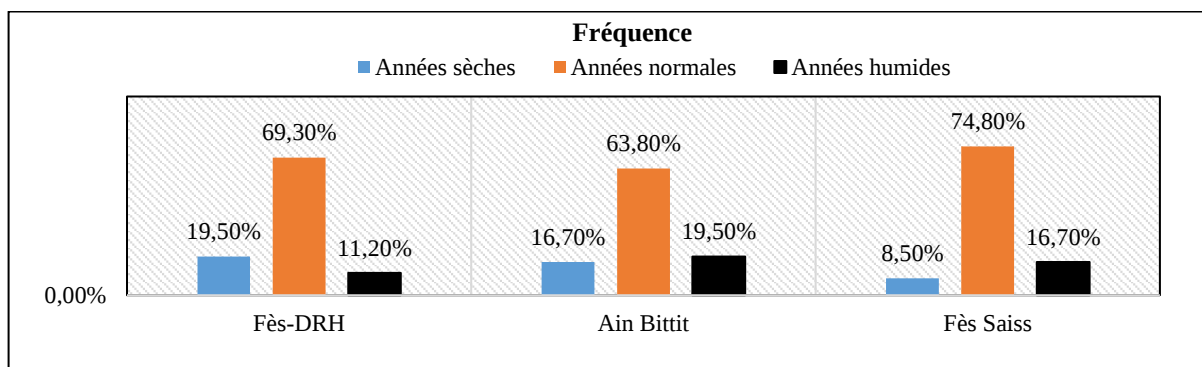


Figure 74: Fréquences des années sèches, normales et humides des trois stations durant 1978-2014

L'analyse des fréquences des années de sécheresse (extrême, sévère et modérée) observée dans la Plaine de Saïss montre que :

- la fréquence des sécheresses modérées varie entre 15,40% à Fès-DRH et 23,60 % à Fès-Saïss. Celle des sécheresses sévères oscille entre 5,20 % à Fès-DRH et 6 % à Ain Bittit (Figure 74) ;
- les fréquences sont inférieures à 50% pour les trois stations. Toutefois, la station Ain Bittit située à l'extrême sud de la Plaine de Saïss, semble la plus affectée par les séquences de sécheresse suivie Fès-Saïss qui sont respectivement 29,90% et 23,60%. La station Fès-DRH semble la moins affectée par les épisodes secs avec un pourcentage de 20,60%, plus proche de celui de la station Fès-Saïss.

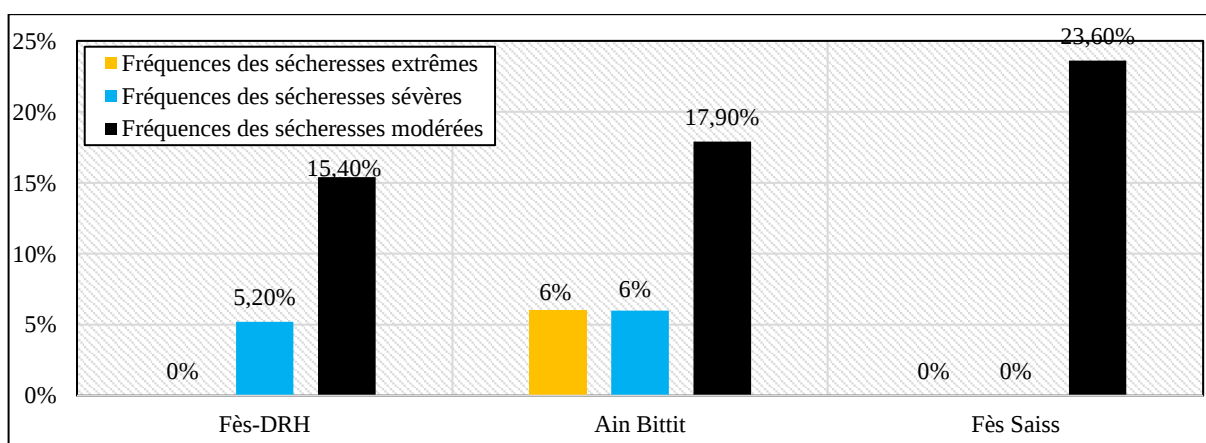


Figure 75: Fréquences des épisodes de sécheresse des trois stations au cours de la période 1978-2014

3. Identification et analyse des séquences par RDI

3.1. Méthodologie

A partir de la présentation des indices de la sécheresse, l'indice SPI se montre plus utilitaire en raison des moindres exigences en matière de données. L'utilisation étendue de SPI au cours des dernières

décennies a déjà établi ses seuils pour la caractérisation de la sécheresse. Cependant, la sécheresse météorologique, conçue comme un déficit hydrique, doit être expliquée par une sorte d'équilibre entre des intrants et des extrants. Un pas en avant pourrait être envisagé l'équilibre entre deux paramètres météorologiques majeurs tels que la précipitation (P) (entrée) et l'évapotranspiration potentielle (ETP) (sortie). Évidemment, l'évapotranspiration réelle et non potentielle est la production réelle, mais l'adoption de l'évapotranspiration réelle pourrait compliquer énormément l'évaluation de la sécheresse. Par conséquent, ETP peut être choisie comme paramètre clé représentant l'intensité de l'atmosphère pour extraire l'eau du système sélectionné. De façon analogue, l'entrée n'est pas la précipitation enregistrée dans une station météorologique, mais la portion de précipitation qui est utile et efficace pour le système étudié et non perdue. Si, par exemple, un système agricole pluvial est pris en considération, l'apport de la précipitation est la précipitation infiltrée ou la précipitation dite efficace (Tsakiris & Vangelis, 2005).

Dans une tentative d'exprimer le ETP en fonction de P, on peut utiliser une régression linéaire simple telle que celle de l'équation 1 est utilisée :

$$ETP = a + b \cdot P \quad (\text{Eq. 26})$$

dans laquelle a et b sont des constantes de régression.

Bien qu'une variété de cas puisse être rencontrée, dans la grande majorité d'entre eux, le paramètre de régression b est un nombre négatif. De plus, dans la plupart des cas, le coefficient de corrélation est significativement inférieur à zéro. Ceci est confirmé par des résultats signalés par des stations dans la Plaine de Saïss par utilisation de la méthode Penman-Monteith.

A titre d'exemple, une droite de régression linéaire similaire est produite pour la station Fès-DRH (Figure 75) marquée par une corrélation négative de ETP et le P. Par conséquent, le déficit en eau entre ETP et P est plus élevé si les deux variables sont considérées dans l'écoulement par rapport au déficit basé uniquement sur P.

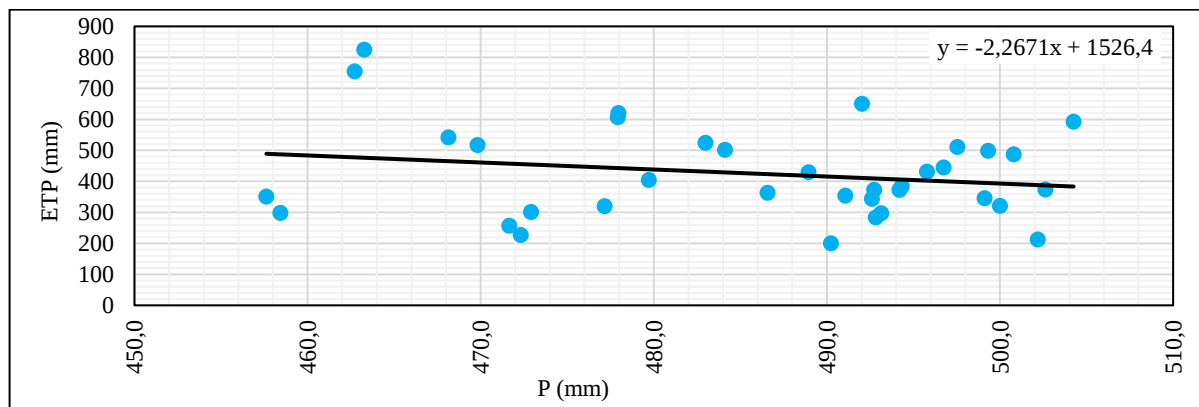


Figure 76: Corrélation entre ETP et P annuels de la station Fès-DRH pour la période 1978-2014

En d'autres termes, si l'ETP est négligé dans ce bilan hydrique la gravité de la sécheresse est sous-estimée. On s'attend également à ce que l'effort de corrélation entre un indice de sécheresse et les dommages anticipés soit plus faible en cas d'absence de ETP. La conclusion de cette analyse est que pour l'estimation de la sécheresse, en dehors des précipitations, l'inclusion de l'évapotranspiration donne une estimation plus réaliste du déficit hydrique.

Essentiellement, deux expressions doivent être évaluées à savoir les α_k initiale et RDI normalisé, c'est-à-dire RDIST (k). La valeur initiale de l'indice pour une certaine période, indiquée par un certain mois (k) au cours d'une année i, est calculée par l'équation suivante (Tsakiris & Vangelis, 2005) :

$$\alpha_k^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ij}}{\sum_{j=1}^k ETP_{ij}}, \quad i = 1(1)N \text{ et } j = 1(1)k \quad (\text{Eq. 27})$$

Dans laquelle P_{ij} et ETP_{ij} sont la précipitation et l'évapotranspiration potentielle du j-ième mois de l'année hydrologique. L'année hydrologique pour la région méditerranéenne commence en octobre, donc pour octobre $k = 1$ (Tsakiris & Vangelis, 2005). L'équation 2 peut être calculée pour toute période de l'année. Elle peut également être écrite à partir de n'importe quel mois de l'année différent d'octobre s'il est nécessaire.

Pour les applications réelles, si α_k est calculé comme un indicateur général de sécheresse météorologique, il est conseillé d'utiliser des périodes de 3, 6, 9 et 12 mois (Tsakiris & Vangelis, 2005). Au cas où une période de 12 mois serait choisie, le résultat pourrait être directement comparé à l'indice d'aridité produit pour la zone à l'étude. Si α_{12} pour une année donnée est inférieur à l'indice d'aridité calculé selon le PNUE (1992), la région souffre de sécheresse au cours de cette année.

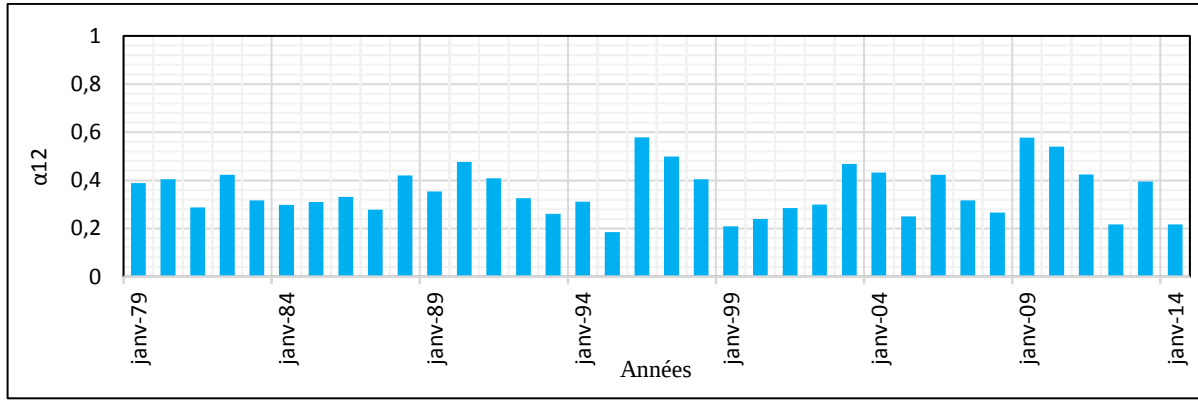


Figure 77: Calcul de α_k annuel normalisé pour la station Ain Bittit pour la période 1978 – 2014

Les deux expressions du nouvel indice sont le RDI normalisé et le RDI standardisé :

Le RDI normalisé (RDIn) est calculé, en utilisant α comme moyenne arithmétique des valeurs α_o basées sur les données obtenues (Ravi & al., 2013) :

$$RDI_n^{(i)} = \frac{\alpha_o^{(i)}}{\alpha_o} - 1 \quad (\text{Eq. 28})$$

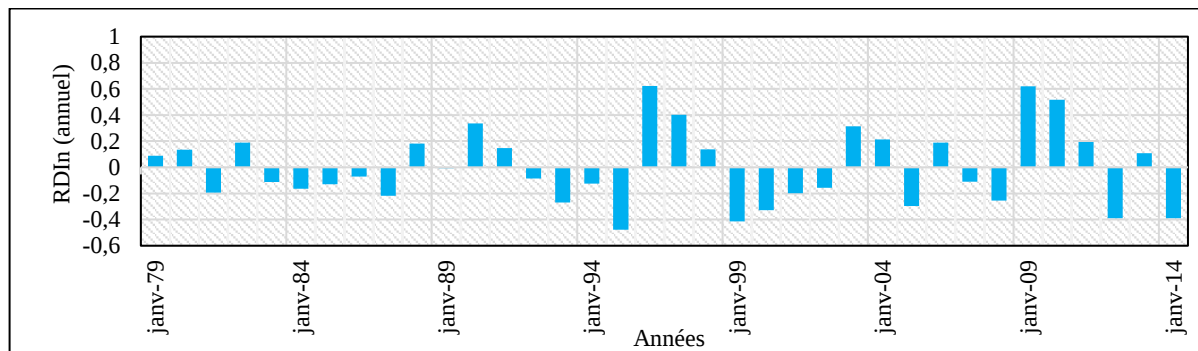


Figure 78 : Valeurs de RDIn-12 pour la station Ain Bittit pour la période 1978 – 2014

La figure 77 illustre le RDI normalisé annuel RDIn-12 pour la station météorologique d'Ain Bittit pour la période 1978-2014. Les valeurs négatives indiquent les années sèches du dossier historique. Dans le cas de la station Ain Bittit la sécheresse la plus importante s'est produite au cours de l'année 1994/1995. Il est à noter également le fait que pendant la période 1978-2014 toutes les années à RDIn-12 négatif sont considérées comme sèches.

Le RDI standardisé (RDIST) est calculé de la même manière que les douze mois de SPI (Ravi & al., 2013) :

$$RDI_{st}^{(i)} = \frac{y^{(i)} - \bar{y}}{\hat{\sigma}_y} \quad (\text{Eq. 29})$$

dans laquelle $y^{(i)}$ est $\log(\alpha^{(i)}_k)$, $\bar{y}$ est sa moyenne arithmétique et $\hat{\sigma}$ son écart-type

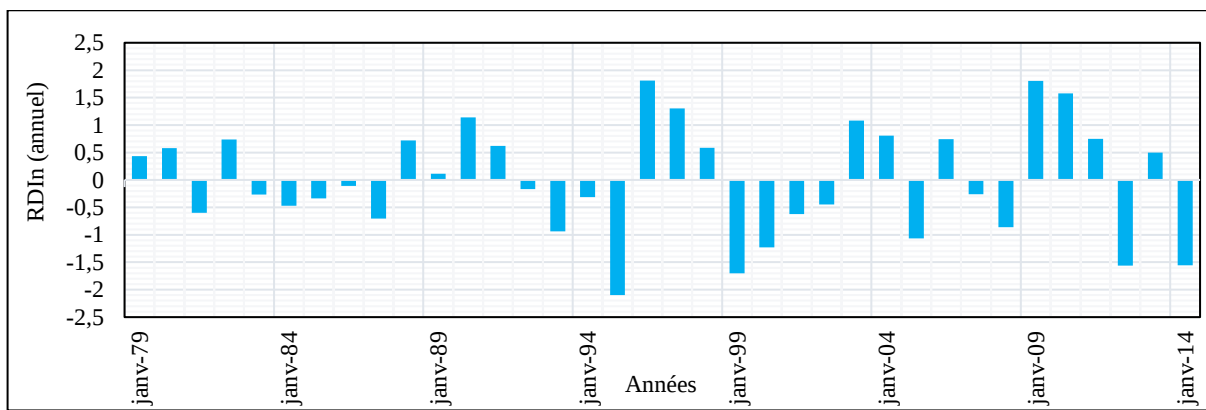


Figure 79: RDI annuel normalisé pour la station Ain Bittit pour la période 1978 – 2014

L'équation 3 présente la forme normalisée de RDI réalisée en supposant que α_k suit une distribution log-normale. Cette hypothèse a été testée en utilisant des données provenant de diverses stations en Grèce (Tsakiris & Vangelis, 2005).

Le choix de la distribution log-normale aide à concevoir une procédure unique pour évaluer la sécheresse sévère. Le RDI standardisé (RDIST) se comporte d'une manière similaire au SPI et donc l'interprétation des résultats est similaire puisque les mêmes seuils que SPI peuvent être utilisés. La figure 78 illustre le RDI annuel pour la même station Ain Bittit.

A. Effet de la méthode ETP

Récemment, un nouvel indice prometteur, l'indice de sécheresse de reconnaissance (RDI), a été proposé (Tsakiris & al., 2007a). Cet indice de sécheresse repose à la fois sur les précipitations cumulées (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Il s'agit d'un déterminant mesuré et calculé.

Il est donc très intéressant d'évaluer l'effet de la méthode de calcul du ETP sur les résultats de RDI et, à son tour, sur la caractérisation de la sévérité de la sécheresse par RDI, en étudiant la robustesse de cet indice de sécheresse. Cette partie vise à tester l'impact de certaines méthodes de calcul ETP populaires avec des exigences minimales de données sur l'estimation de RDI et la caractérisation ultérieure de la sécheresse.

Étant donné que le RDI repose à la fois sur les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (ETP), il est pour évaluer l'effet de la méthode de calcul ETP sur la caractérisation de la sévérité de la sécheresse obtenue par RDI. Cette partie compare les résultats de RDI pour diverses périodes de référence

en utilisant certaines méthodes ETP. Les méthodes choisies sont : Hargreaves, Thornthwaite, Blaney-Criddle et FAO Penman-Monteith (seule la température). La méthode FAO Penman-Monteith est utilisée comme méthode de référence suite à sa supériorité jugée par plusieurs recherches. Les données de la station météorologique Fès-Saïss sont utilisées.

a. Indicateurs statistiques

Afin de comparer l'impact des différentes méthodes ETP sur les valeurs RDI, les indicateurs statistiques largement utilisés sont choisis : l'erreur carrée moyenne (RMSE), l'erreur moyenne de biais (MAE), Nash et R

b. Interprétations

L'ETP a été calculé par les cinq méthodes utilisées. Les résultats du calcul sur une base annuelle sont illustrés dans la figure 79. Les résultats du ETP présentés dans la figure 79 pourraient être considérés comme plus ou moins attendus. L'équation de Thornthwaite produit les valeurs inférieures, tandis que les deux équations de Hargreaves et Blaney-Criddle produisent des valeurs supérieures avec une légère supériorité de l'équation de Hargreaves et une différence assez significative d'environ 500 mm en valeurs moyennes entre les valeurs supérieures et les valeurs inférieures.

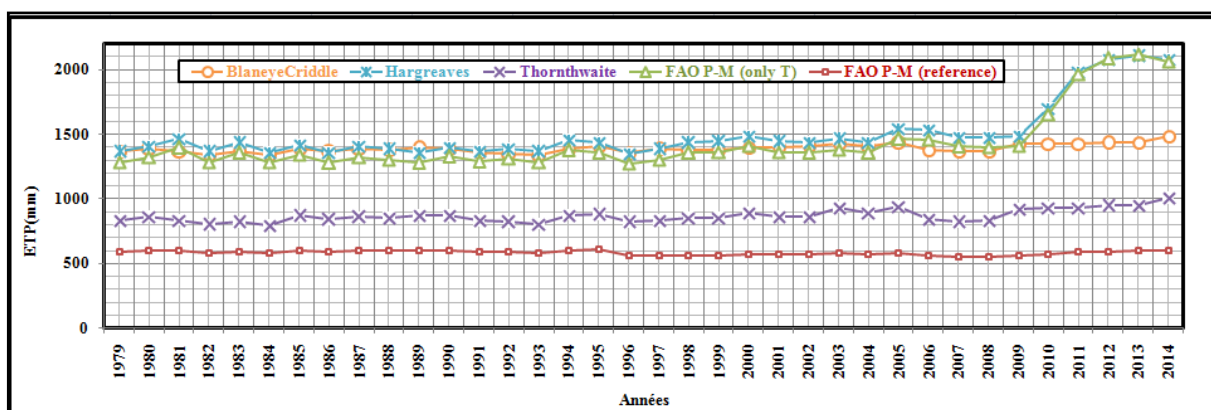


Figure 80: Évapotranspiration potentielle calculée par diverses méthodes pour la période 1979-2014

Un autre point intéressant est que ces équations suivent le même modèle annuel, avec des fluctuations similaires autour de leurs valeurs moyennes dans les mêmes points de temps. D'une part, un modèle de fluctuation différent est suivi par les deux autres équations, FAO Penman-Monteith (seulement T) et Hargreaves à partir de 2009-10. D'autre part, les valeurs calculées par les cinq équations de ETP sont généralement plus élevées que les valeurs calculées par la méthode de référence.

Enfin, une observation intéressante est que dans le cas de l'utilisation des seules données de température dans l'équation FAO Penman-Monteith (présentée comme « FAO P-M (only T) » ou « FAO P-M (Temp) » sur la figure 79), comme le recommande la FAO pour le manque de données, sont très proches des valeurs déterminées par l'équation de Hargreaves. Dans cette étude, l'équation de Penman-Monteith de la FAO est considérée comme la méthode de « référence », en raison de sa supériorité qui est appuyée par plusieurs travaux de recherche sur le sujet (Vangelis & al, 2013 ; Er-Raki & al., 2010 ; Lopez & al, 2006 ; Pereira & Pruitt & Kolakovic, 2009 ; Ventura & al., 1999 ; Xu & Singh, 2002 ; Yoder & al., 2005).

Tableau 30 : Indicateurs statistiques de performance des valeurs de RDIST-annuel

Période de calcul	Méthode de calcul	RMSE (mm)	Nash	R
RDIST-Annuel	Blaney-Cridde	0.23	91.28	0.95
	Hargreaves	0.033	99.82	0.99
	Thornthwaite	0.2	93.55	0.96
	FAO P-M (Seulement T)	0.26	89.24	0.94

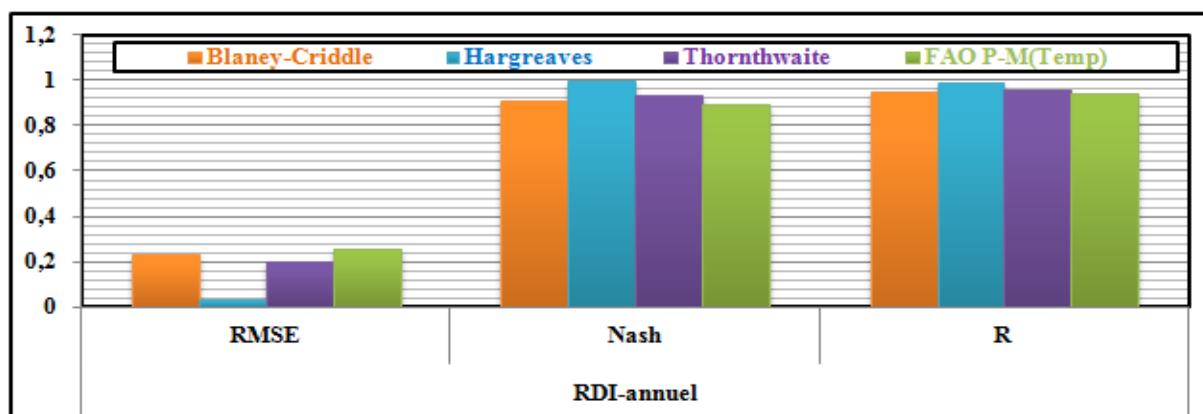


Figure 81: Diagramme d'indicateurs statistiques de performance des valeurs de RDIST-annuel

La comparaison basée sur les indices de performance statistique des résultats obtenus par les quatre méthodes ETP par rapport à la méthode de référence (Tableau 26 et Figure 80).

L'étape suivante consiste à calculer Le RDI en utilisant les valeurs de ETP produites par les différentes méthodes. La forme standardisée (RDIST) de RDI a été calculée pour une période annuelle, présentée dans la figure 81.

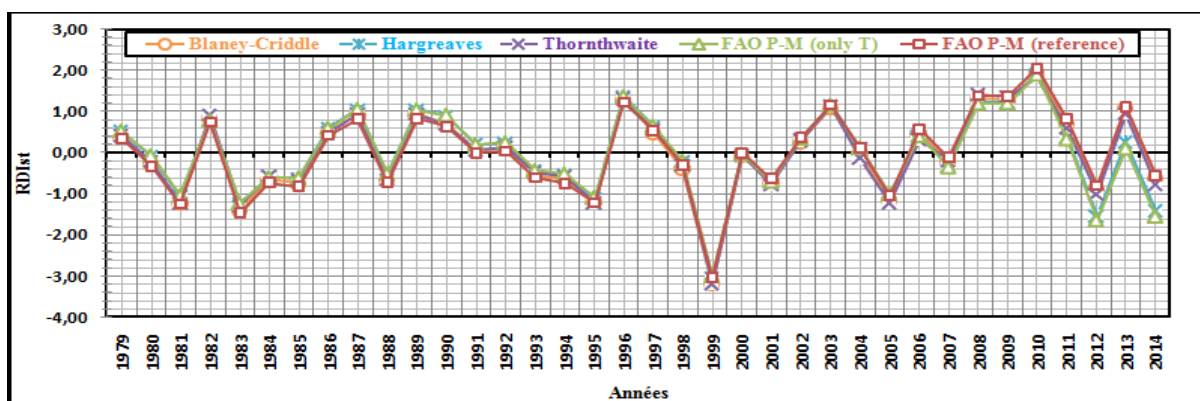


Figure 82: Valeurs de RDIST annuelles calculées pour les différentes méthodes de ETP

Les valeurs RDIST sont pratiquement les mêmes, quelle que soit la méthode utilisée pour le calcul de ETP. Les légères différences qui apparaissent en quelques années ne peuvent être pas considérées comme significatives, car elles n'influent pas sur la sévérité de la sécheresse indiquée par le RDI. Les différentes valeurs, malgré leurs différences, restent dans tous les cas dans la même classe de sécheresse sans dépasser la classe de la sécheresse donnée.

Un aspect important est que la comparaison statistique prouve en revanche que sur les performances à long terme (telles que présentées par Nash et R) les différents ensembles de données RDIST sont identiques (toutes les valeurs peuvent être pratiquement considérées très proches, tandis que sur la

performance à court terme par RMSE, elles sont également presque identiques, puisque la déviation des chiffres de RMSE par rapport au «zéro» idéal ne peut être pas considérée comme significative, avec une légère supériorité de la méthode Hargreaves. Comme on l'a montré, aucune différence significative n'a été détectée dans les valeurs RDIST de l'intervalle de temps annuel produites par les diverses méthodes de ETP.

Toutefois, il se peut qu'il ne soit pas le cas pour des périodes plus courtes. Pour cette raison, les valeurs RDIST pour des périodes de référence plus courtes qu'une année ont également été étudiées. La première approche consistait à utiliser l'échelle de 6 mois (RDIST-6mois), qui distingue grossièrement l'été de l'hiver. Les résultats des calculs RDIST pour les périodes octobre-mars et avril-septembre sont présentés dans la figure 82. Les indicateurs RMSE, Nash et R calculés pour les périodes de six mois (Oct-Mar et Avr-Sep) pour les valeurs RDIST sont présentés dans le tableau 28 et la figure 80.

Bien que les valeurs de RDI produites par les méthodes de ETP sélectionnées ne soient pas identiques à celles produites par la méthode de référence, elles sont très proches (Figure 82). Comme on pourrait s'y attendre, on constate de légères déviations pour la première période de 6 mois où l'incertitude des déterminants impliqués est plus élevée. Les écarts les plus significatifs sont produits par les méthodes de Thornthwaite et FAO P-M (Seulement T) qui présentent les performances les plus basses que les méthodes de Hargreaves et Blaney-Criddle (Tableau 28 et Figure 80).

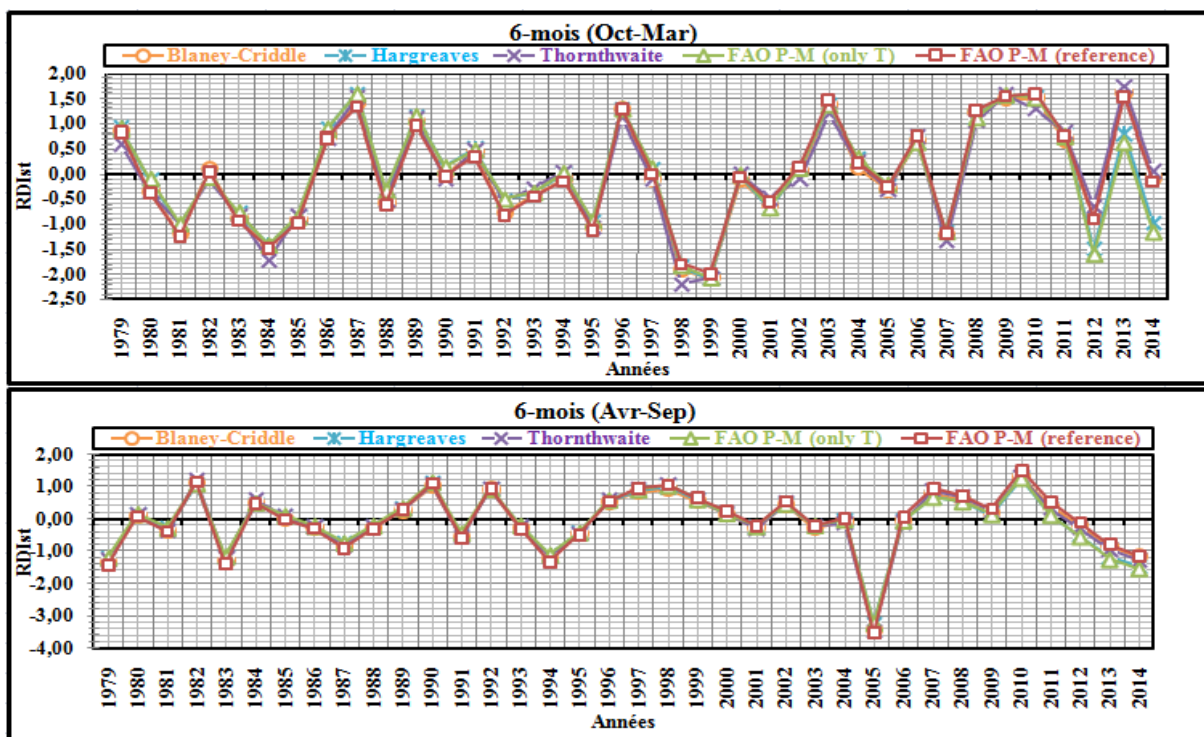


Figure 83: Valeurs de RDIST calculées pour les deux périodes de 6 mois (Oct-Mar et Avr-Sep) pour la station Fès-Saïss

Tableau 31 : Indicateurs statistiques de performance des valeurs RDIST calculées par les différentes méthodes de ETP pour les périodes de 6 mois (Oct-Mar et Avr-Sep)

	Méthode de calcul	RMSE (mm)	Nash	R
RDIST-6mois (Oct-Mar)	Blaney-Criddle	0.05	99.58	0.99
	Hargreaves	0.2	93.6	0.96
	Thornthwaite	0.14	96.85	0.98
	FAO P-M (Seulement T)	0.23	91.41	0.95
RDIST-6mois (Avr-Sep)	Blaney-Criddle	0.06	99.07	0.99
	Hargreaves	0.14	95.97	0.98
	Thornthwaite	0.08	98.73	0.99
	FAO P-M (Seulement T)	0.15	95.35	0.98

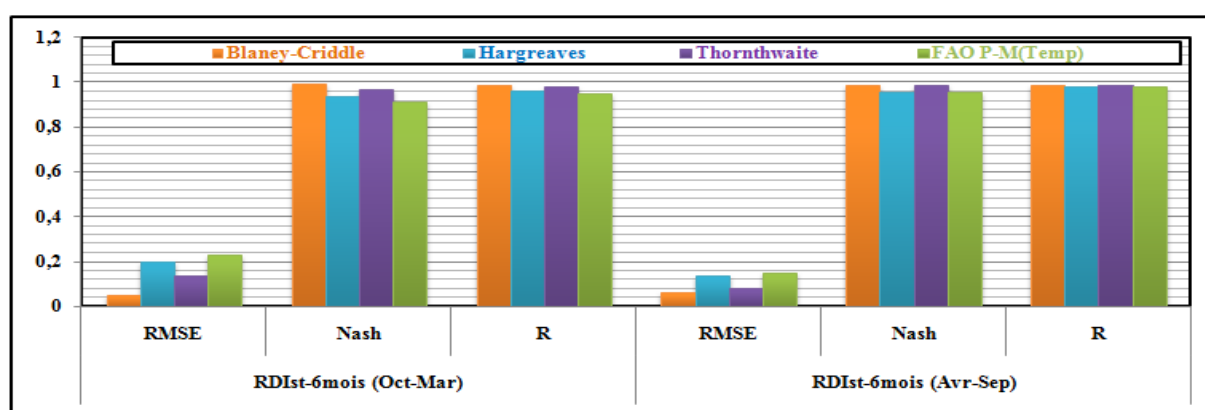


Figure 84: Indicateurs statistiques de performance des valeurs de RDIST calculées pour les périodes de 6 mois (Octobre-Mars et Avril-Septembre).

Enfin, les mêmes analyses et comparaisons sont effectuées pour les quatre périodes de 3 mois (Oct-Déc, Jan-Mar, Avr-Juin, Juil-Sep). Comme il est indiqué sur la figure 84, l'effet de la méthode ETP sur les valeurs de RDIST est faible bien que dans certains cas et en particulier pendant quelques années pendant les mois d'hiver puisse être qualifié de significatif. Ceci est observé surtout pour la période janvier-mars. Il est intéressant de noter que, dans tous les autres cas, les résultats sont de manière satisfaisante proche de ceux produits par la méthode de référence. L'équation de Blaney-Criddle garde sa grande performance pour le calcul de ETP pour les échelles de temps courtes de 3mois (Tableau 27 et Figure 84).

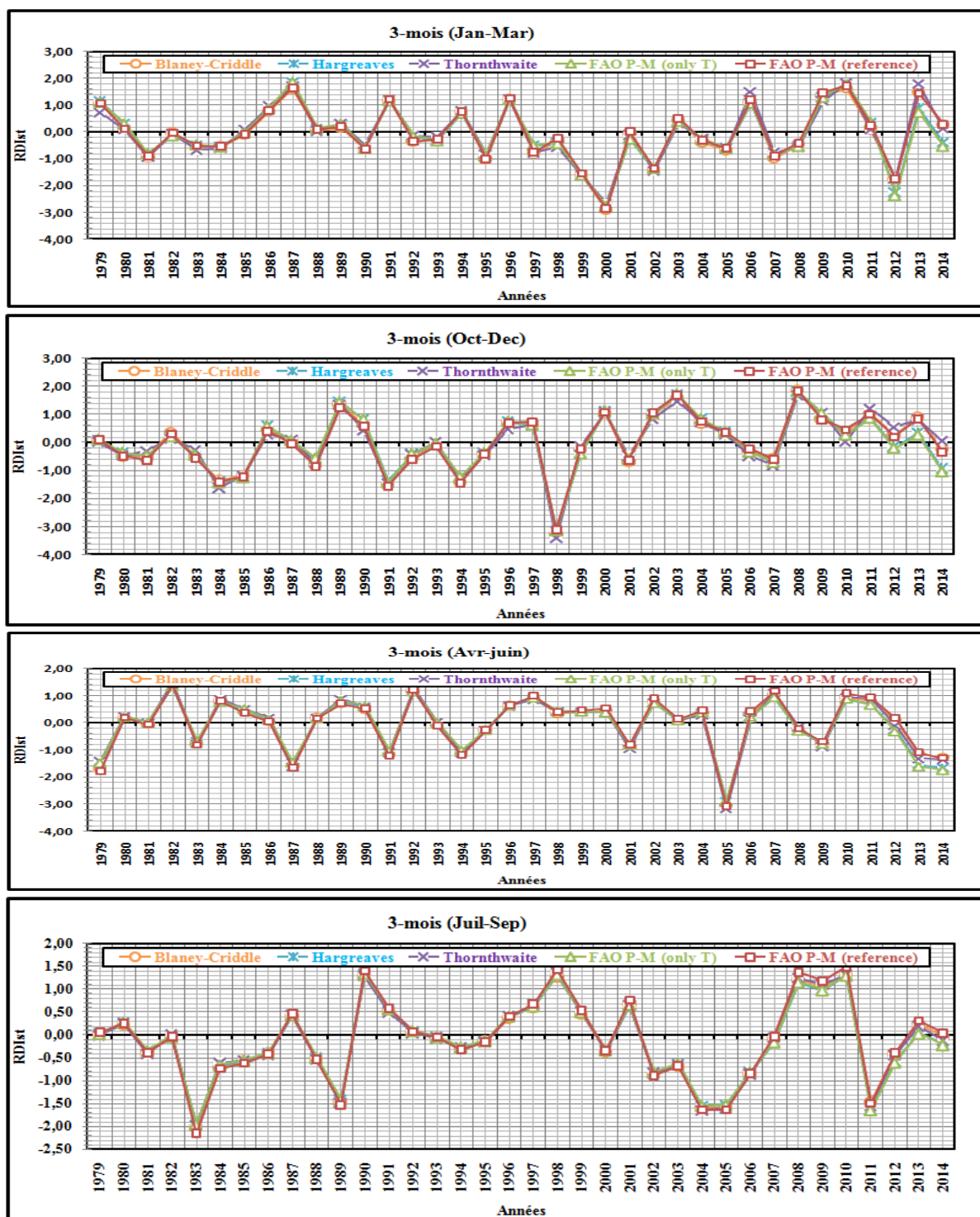


Figure 85: Valeurs de RDist calculées pour les périodes de 3 mois pour la station Fès-Saïss

À titre d'analyse générale, on peut soutenir que seule la méthode FAO P-M (Seulement T) qui se démarque de façon significative dans le cas de cette étude. Selon les résultats obtenus, on propose l'utilisation de l'une des méthodes ETP testées pour le calcul de RDist, avec la note pour éviter la méthode de FAO P-M (Seulement T) pour de courtes périodes de référence.

Tableau 32 : Performance des valeurs de RDIST calculées pour les périodes de 3 mois

	Méthodes de calcul	RMSE	Nash	R
RDIST-3mois (Oct-Déc)	Blaney-Criddle	0.05	0.995	0.99
	Hargreaves	0.15	0.963	0.98
	Thornthwaite	0.15	0.959	0.97
	FAO P-M (Seulement T)	0.16	0.954	0.97
RDIST-3mois (Jan-Mar)	Blaney-Criddle	0.04	0.996	0.99
	Hargreaves	0.15	0.962	0.98
	Thornthwaite	0.12	0.975	0.98
	FAO P-M (Seulement T)	0.18	0.947	0.97
RDIST-3mois (Avr-juin)	Blaney-Criddle	0.05	0.994	0.99
	Hargreaves	0.13	0.966	0.98
	Thornthwaite	0.11	0.979	0.99
	FAO P-M (Seulement T)	0.15	0.958	0.98
RDIST-3mois (Juil-Sep)	Blaney-Criddle	0.05	0.993	0.99
	Hargreaves	0.08	0.982	0.99
	Thornthwaite	0.05	0.992	0.99
	FAO P-M (Seulement T)	0.09	0.981	0.99

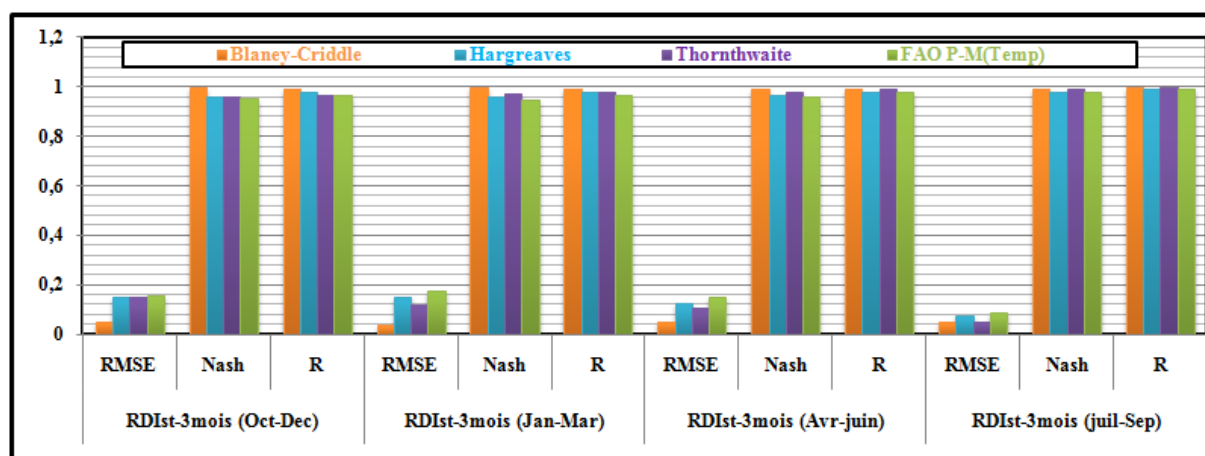


Figure 86: Performance des valeurs de RDIST calculées pour les périodes de 3 mois

On peut également conclure que la méthode Hargreaves ou celle de Thornthwaite apportent des résultats satisfaisants (Tableau 28 et figure 85). De plus, les résultats de Blaney-Criddle sont mieux corrélés avec les résultats de P-M de la FAO par rapport aux autres méthodes suivant le même modèle de fluctuation. Raison pour laquelle la méthode Blaney-Criddle fournit les résultats les plus précis dans une large mesure. Étant donné que le RDI vise à utiliser l'élément important de l'évapotranspiration, mais à maintenir les exigences en matière de données au minimum, l'équation de Thornthwaite ou la méthode Blaney-Criddle semblent être les meilleurs choix pour estimer l'ETP pour le calcul de RDI. Les comparaisons de cette étude pourraient être répétées pour toutes les autres zones géographiques et climatiques. Cela conduira à la généralisation des conclusions de cette étude.

Suite aux résultats de cette étude appliquée dans la Plaine de Saïss, l'indice de sécheresse de reconnaissance (RDI) récemment proposé, qui intègre à la fois les précipitations et l'évapotranspiration

potentielle (ETP), fournit une base théorique solide pour l'évaluation de la sévérité de la sécheresse. Dans cette étude, les valeurs produites par quatre méthodes ETP ont été utilisées pour le calcul de RDI pour la station météorologique Fès-Saïss représentant les conditions climatiques semi-arides. Il a été démontré qu'aucune influence significative sur les résultats de RDI n'a été détectée par les quatre méthodes de ETP répandues (Hargreaves, Thornthwaite, Blaney-Criddle et FAO Penman-Monteith (Seulement T), quelle que soit la période de référence analysée. Un petit écart par rapport à ce qui précède est observé pour une échelle de temps plus courte dans le cas où la méthode de FAO Penman-Monteith (Seulement T) est utilisée. Cela confirme l'opinion que le RDI est un indice robuste pour l'évaluation de la sévérité de la sécheresse qui ne dépend pas de la méthode de calcul ETP. Même si des données minimales sont disponibles (P, T), le RDI peut être évalué de manière fiable. Pour les cas étudiés et pour diverses périodes de référence choisies (12, 6 et 3 mois), on observe que les méthodes Thornthwaite et Blaney-Criddle sont relativement les meilleures. Le même exercice pourrait être effectué pour d'autres conditions climatiques et zones géographiques afin de confirmer les résultats de cette étude.

B. Précipitations efficaces

Dans cette étude, une version modifiée de l'indice de sécheresse de reconnaissance (RDI) est utilisée, qui intègre à la fois les précipitations et la température (à l'aide d'une évapotranspiration potentielle). Cependant, la précipitation totale ne peut généralement pas représenter suffisamment la quantité d'eau qui peut être consommée par les plantes. Pour cette raison, l'utilisation de la précipitation efficace, au lieu de la précipitation totale, est proposée pour la modification de RDI. Étant donné que le RDI intègre à la fois l'intrant principal et la production principale d'un système d'eau naturel, il est considéré comme un indice approprié de la disponibilité de l'eau. Sur la base de cette notion, comme le montrent des études récentes (Tigkas & al, 2016). Dans cette contribution, une version modifiée de l'indice, RDIe, est présentée dans laquelle la précipitation est remplacée par la précipitation effective. Cette approche devrait accroître la pertinence de l'indice pour l'évaluation des effets de la sécheresse sur les systèmes agricoles, en particulier pour les conditions pluviales.

a. Concept général

Le concept de précipitation efficace (Pe) peut avoir une interprétation différente pour chaque domaine scientifique ou pour différents objectifs de recherche. Par exemple, Pe pourrait être considéré comme la quantité totale de la précipitation qui entre dans un réservoir, le pourcentage de la précipitation qui contribue à la recharge de l'eau souterraine, la quantité d'eau qui peut être utilisée par le système racinaire des plantes, etc (Tigkas & al, 2016). Toutefois, il faut retenir le concept de Pe comme un facteur qui contribue à la production agricole. Par conséquent, Pe est considéré comme la partie de la précipitation totale qui peut être utilisée pour le développement des cultures, directement ou indirectement. La conservation de l'eau du sol dans la zone racinaire peut être exprimée par l'équation suivante (Patwardhan & al, 1990) :

$$V = P + IR - (I + Q + ET + DP) \quad (\text{Eq. 30})$$

Dans laquelle V est le changement d'eau du sol dans la zone racinaire, P est les précipitations, IR est la profondeur de l'eau d'irrigation, I représente les pertes d'interception, Q est le ruissellement, ET est l'évapotranspiration et DP est la percolation profonde.

Toutes les unités sont exprimées en mm et correspondent à une période de t. Le Pe est défini comme le pourcentage des précipitations totales qui entrent dans le sol (zone racinaire), mais ils ne sont pas perdus en raison de la percolation profonde

$$Pe = P - (I + Q + DP) \quad (\text{Eq. 31})$$

Le pourcentage de P total qui est considéré comme Pe dépend de plusieurs facteurs, qui peuvent également avoir un effet combiné. Pratiquement, tout facteur lié à l'infiltration, au ruissellement et à l'évapotranspiration influe sur la valeur de Pe (Martin & al, 1993).

Le Pe peut être mesuré par plusieurs techniques, par ex. le changement d'humidité du sol, les lysimètres, etc., cependant, ces techniques sont principalement limitées pour des applications expérimentales (Tigkas & al, 2016).

Dans certaines régions, il existe des études pour le développement d'équations qui déterminent Pe, en fonction des conditions et caractéristiques locales (topographie, principaux types de sols, etc.). Ces approches donnent généralement de bons résultats pratiques bien que leur application soit limitée aux régions spécifiques pour lesquelles elles ont été développées.

D'autres méthodes empiriques ont également été utilisées qui fournissent une évaluation générique de Pe. L'approche la plus simple consiste à calculer Pe en tant que pourcentage spécifié (habituellement 70-90%) des précipitations totales. Sur cette base, d'autres critères peuvent également être utilisés pour une estimation plus précise. Par exemple Caruso et al (2013) ont estimé Pe comme étant 75% du total des précipitations quotidiennes en négligeant les jours où la profondeur des précipitations était inférieure à 4 mm.

Le Bureau de Reconstruction des Etats-Unis a également mis au point une méthode pour estimation Pe, qui est principalement proposée pour les régions arides ou semi-arides. Dans cette méthode, on utilise des classes de précipitations mensuelles totales (Tableau 29), afin de définir le pourcentage correspondant pour le calcul de Pe (Hagan & al, 1967). En variante, l'équation suivante peut être utilisée (Smith, 1988) :

$$Pe = P*(125-0.2*P)/125 \quad \text{pour } P \leq 250 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 32})$$

$$Pe = 0.1*P+125 \quad \text{pour } P > 250 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 33})$$

Tableau 33 : Estimation des précipitations efficaces basées sur les classes de précipitations mensuelles totales (méthode du Bureau of Reconstruction des États-Unis)

Classes de précipitations mensuelles totales (mm)	Classe de précipitations efficaces (%)
0.0 - 25.4	90 - 100
25.4 - 50.8	85 - 95
50.8 - 76.2	75 - 90
76.2 - 101.6	50 - 80
101.6 - 127.0	30 - 60
127.0 - 152.4	10 - 40
> 152.4	0 - 10

Une méthode d'estimation plus approfondie a été proposée par U.S.D.A. [United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1970], qui a été élaborée à partir de l'analyse de 50 années de données provenant de 22 zones avec des conditions climatiques et de sols différents.

L'évaluation du Pe mensuel est basée sur les précipitations totales (P), l'évapotranspiration des cultures (ETc) et le facteur de stockage de l'eau du sol (SF), selon l'équation suivante (dans laquelle les paramètres sont exprimés en mm) (Hess, 2010) :

$$Pe = 25.4 * SF * (0.04931 * P^{0.82416} - 0.11565) * 10^{0.000955 * ET_c} \quad (\text{Eq. 34})$$

où SF est définie par :

$$SF = 0.531747 + 0.011621 * D - 8.943 * 10^{-5} * D^2 + 2.321 * 10^{-7} * D^3 \quad (\text{Eq. 35})$$

dans laquelle D est l'entreposage de l'eau du sol utilisable et se situe approximativement entre 40 et 60% de l'humidité du sol disponible dans la zone racinaire. Il est noté que Pe ne peut être supérieur aux précipitations mensuelles ou à l'évapotranspiration mensuelle. Si le résultat est supérieur à l'un de ces paramètres, le Pe est considéré égal à la plus basse des valeurs ci-dessus. Une autre méthode empirique a été proposée par la FAO (Brouwer & Heibloem, 1986). Selon cette méthode, l'équation suivante peut être utilisée pour l'estimation de Pe, sur la base de la valeur correspondante de la précipitation mensuelle totale :

$$\begin{aligned} Pe &= 0 && \text{pour } P \leq 12.50 \text{ mm} \\ Pe &= 0.6 * P - 10 && \text{pour } 12.50 \text{ mm} < P \leq 70 \text{ mm} \\ Pe &= 0.8 * P - 25 && \text{pour } P > 70 \text{ mm} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 36})$$

Des études antérieures ont montré que le RDI peut être utilisé avec succès pour l'évaluation des effets de la sécheresse sur le rendement des cultures, en particulier dans l'agriculture pluviale (Tigkas & al, 2015). Cependant, comme on l'a déjà mentionné, le Pe devrait mieux représenter la quantité d'eau qui est utilisée avantageusement par les cultures.

Par conséquent, une version modifiée de RDI et RDIE est proposée dans cette étude, en remplaçant les précipitations totales par le (Pe) Sur la base de l'équation (1), la forme initiale modifiée de l'indice (α_e) est calculée comme suit :

$$\alpha_{ek}^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ij}}{\sum_{j=1}^k ETP_{ij}} \quad (\text{Eq. 37})$$

Le calcul des formes normalisées (RDI) et standardisées (RDIST) de l'indice peut être effectué avec des procédures similaires, comme déjà décrit pour le RDI. Le Pe peut être estimé avec les méthodes mentionnées précédemment selon les conditions de chaque zone d'étude. Évidemment, pour des raisons de cohérence, la même méthode d'estimation de Pe devrait être utilisée en cas d'analyse de sécheresse spatiale (Tigkas & al, 2016). L'estimation de Pe à travers cette routine peut être réalisée avec les méthodes décrites ci-dessus du Bureau de Reconstitution des Etats-Unis (Smith, 1988) et de la FAO (Brouwer et Heibloem, 1986).

b. Interprétation

À titre d'illustration le RDIE proposé est utilisé dans la Plaine de Saïss, une zone avec une activité agricole importante. Les données météorologiques (précipitations, températures minimale et maximale) de la station météorologique Fès-Saïss, le climat défini comme étant semi-aride et 35 années hydrologiques (1978-2014) sont utilisés. L'ETP est estimé par la méthode de Hargreaves (Hargreaves et Samani, 1985).

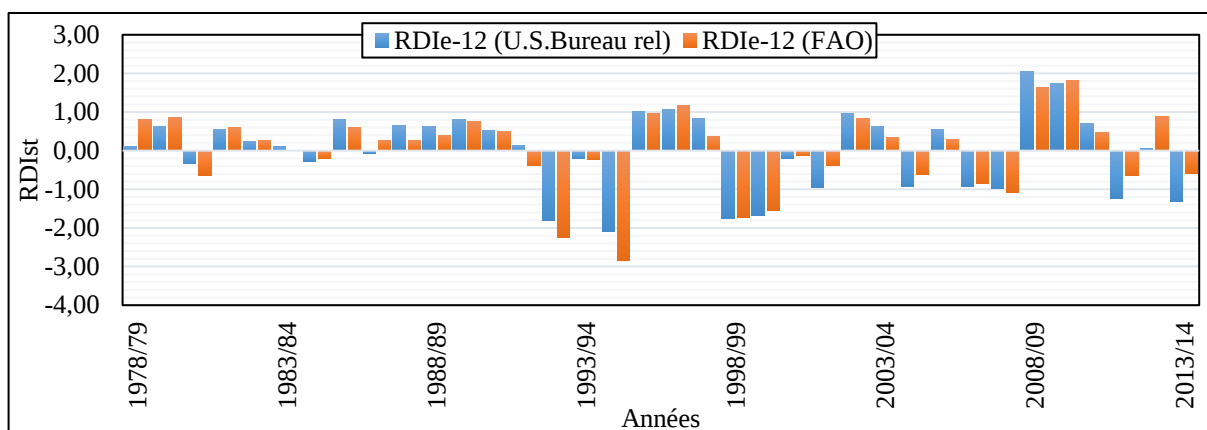


Figure 87: Estimation de RDI modifiée (RDIE) avec deux méthodes du Bureau de Reconstitution des Etats-Unis et de la FAO

Dans la figure 86, les valeurs de RDIST initiale et RDIST modifiée sont présentées pour trois périodes de référence. La première période (octobre - septembre) représente toute l'année hydrologique, la deuxième (octobre - juin) les neuf premiers mois de l'année hydrologique, tandis que la troisième (novembre - mai) correspond aux stades de développement du blé, la principale culture pluviale dans la région. On observe que les valeurs obtenues par les formes initiale et modifiée de RDI présentent des différences qui, dans certains cas, peuvent conduire à une caractérisation différente de la sécheresse.

L'approche proposée par Tigkas et Tsakiris (2015) est utilisée pour tester la réponse de RDI originale et modifiée afin d'évaluer les effets de la sécheresse sur le rendement du blé pour la zone spécifique. Cette approche utilise le modèle Aqua-Crop pour la simulation du rendement du blé, tandis que les modèles de régression sont utilisés pour la corrélation entre le RDI et le rendement des cultures. Ici, à des fins de simplicité, seul le coefficient de corrélation (r) pour les trois périodes de référence est utilisé comme simple indicateur de la performance de RDI et RDIE (Tableau 30).

Tableau 34 : Coefficient de corrélation entre le rendement du blé et les versions originale et modifiée de RDI (RDI et RDIE) pour quatre périodes de référence

Période de référence	Coefficient de corrélation (r)	
	RDIST-o	RDIST-m
3-mois	0,642	0,652
6-mois	0,765	0,784
9-mois	0,642	0,676
12-mois	0,611	0,633

Les résultats présentés ci-dessus donnent l'indication que la Plaine de Saïss présente une performance acceptable pour les quatre périodes testées. Il convient également de noter que la période de 6-mois, qui correspond à la période de développement des cultures, présente un coefficient de corrélation plus élevé par rapport aux autres périodes. Cela peut être un point critique pour l'association des effets de la sécheresse avec le rendement des cultures.

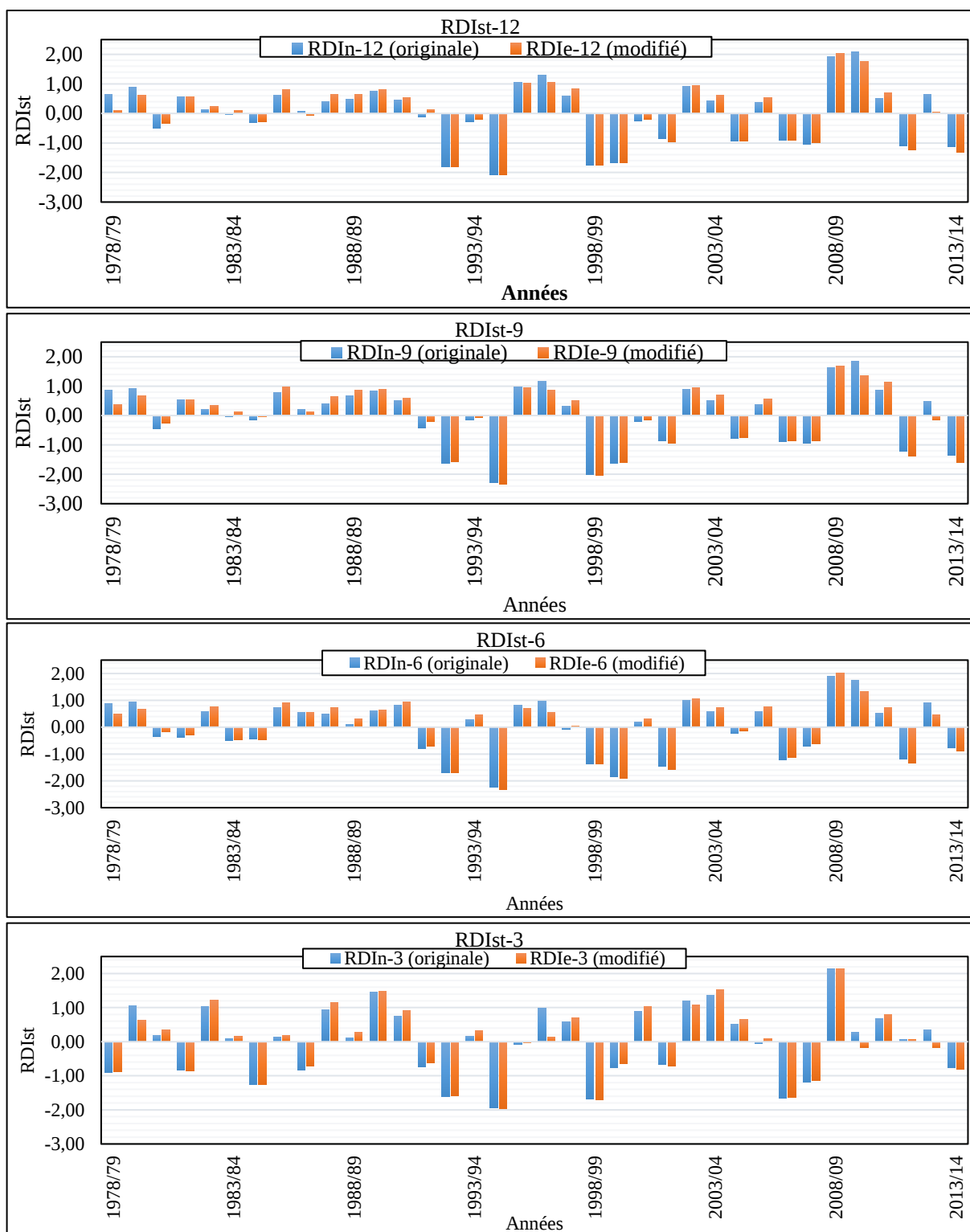


Figure 88: Valeurs de RDI originale et modifiée pour la station Fès-DRH pour quatre périodes de référence

Le RDI est un indice largement utilisé avec succès dans de nombreuses études liées à la sécheresse au cours de la dernière décennie. Dans cette étude, une version modifiée de l'index, RDIE, est introduite, en remplaçant les précipitations par les précipitations efficaces. Par rapport aux précipitations totales, les précipitations efficaces expriment plus précisément la quantité d'eau qui peut être utilisée de manière

productive par les cultures. Par conséquent, on s'attend à ce que dans la Plaine de Saïss augmente le lien entre la sécheresse et la réduction de la production agricole.

Les résultats montrent que l'indice modifié est mieux corrélé à la réduction du rendement du blé, ce qui indique que l'indice proposé peut-être un outil utile pour caractériser la sécheresse agricole et pour évaluer les impacts sur le rendement des cultures pluviales. On s'attend à ce que des applications plus complètes de RDI, dans d'autres régions où les conditions climatiques et les autres cultures sont différentes, donnent une meilleure idée de la validité de l'indice modifié proposé.

3.2. Résultats et interprétation

A. Etude des séquences de sécheresse par RDI

Les valeurs positives de RDIST indiquent les périodes humides, alors que les valeurs négatives indiquent des périodes sèches par rapport aux conditions normales de la zone. La sévérité des événements de sécheresse augmente lorsque les valeurs RDIST sont plus faibles. Dans la présente recherche, RDI est utilisé pour représenter RDIST. La classification de la catégorie de sécheresse suggérée pour le RDI (Tsakiris & al., 2007) est semblable à celle du SPI (McKee & al., 1993), comme l'illustre le tableau 31.

Ainsi, quantifier le déficit des précipitations pendant plusieurs échelles de temps, reflète l'impact de la carence en précipitations sur la disponibilité de différents fournisseurs d'eau (Zarch & al, 2011), Les RDI mensuels et annuels ont été calculés et organisés en utilisant les données mensuelles des précipitations et d'évapotranspiration des stations Fès-DRH et Ain Bittit. Pour des échelles de temps mensuelles, les valeurs RDI ont été calculées pour les périodes de 3, 6, 9, 12 mois.

Tableau 35 : Classes de sécheresse pour les valeurs de RDIST

Valeurs de RDIST ou SPI	Classes de sécheresse
> 2	Extrêmement humide
1.5 à 2	Sévèrement humide
0.5 à 1.5	Humidité Modérée
-0,5 à 0,5	Normale
-1,5 à -0,5	Sécheresse Modérée
-2 à -1,6	Sécheresse sévère
<-2	Extrêmement sécheresse

a. RDI à court terme

Après avoir analysé les deux figures 88 et 89, la valeur de RDI de 3-mois montre qu'une sécheresse modérée s'est produite à la station Fès-DRH pendant les années 1984-85, 1986-87, 1998-1999 et 2007-08, une sécheresse sévère a eu lieu en 1992-93 et 2006-07 et une sécheresse extrême est enregistrée en 1994-95. Toutefois, il y a eu une période extrêmement humide enregistrée en 2008-09.

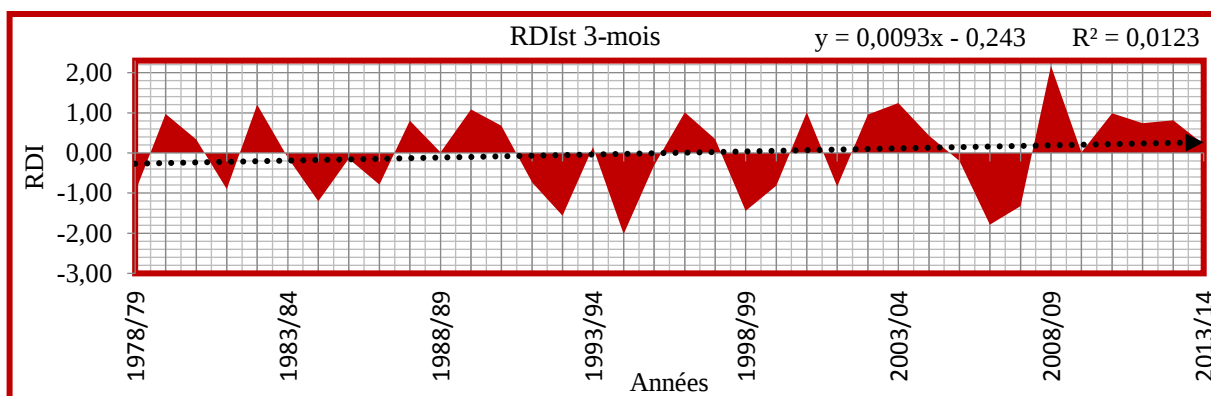


Figure 89: Valeurs de RDI-3 et tendances pour la station Fès-DRH pour la période 1979-2014

Alors que la station Ain Bittit, a enregistré pendant les années 1978-79, 1981-82, 2000-01 et 2003-04 une sécheresse modérée, une sécheresse sévère a eu lieu en 1993-94 et une sécheresse extrême est enregistrée en 2001-02.

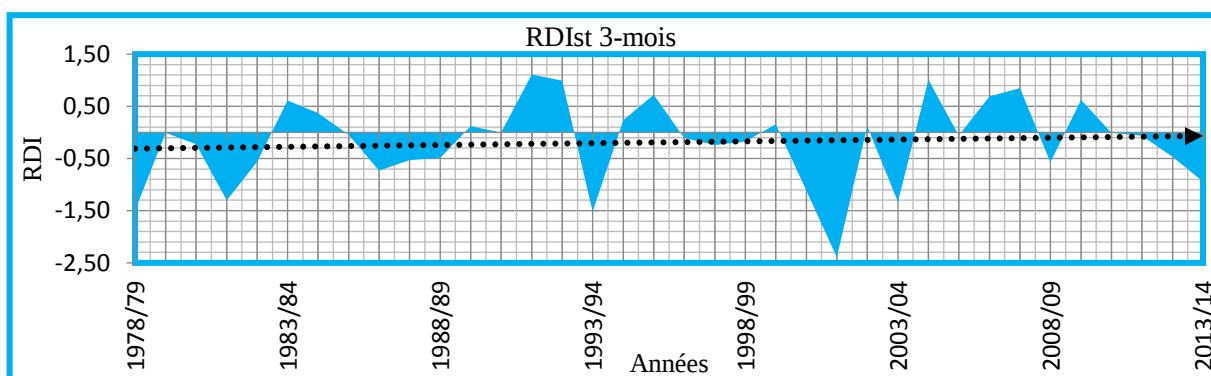


Figure 90 : Valeurs de RDI-3 et tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014

b. RDI à moyen terme

Bien que dans la station Fès-DRH, les valeurs de RDI-6 montrent que la sécheresse modérée s'est produite en 1998-99 et 2006-07, une sécheresse sévère en 1992-93, 1999-00 et 2001-02 et une extrême en 1994-95. La station Ain Bittit indique une sécheresse modérée en 1998-99 et 2006-07, une sécheresse sévère en 1992-93, 1999-00, et 2001-02, et une sécheresse extrême est enregistrée en 1994-95.

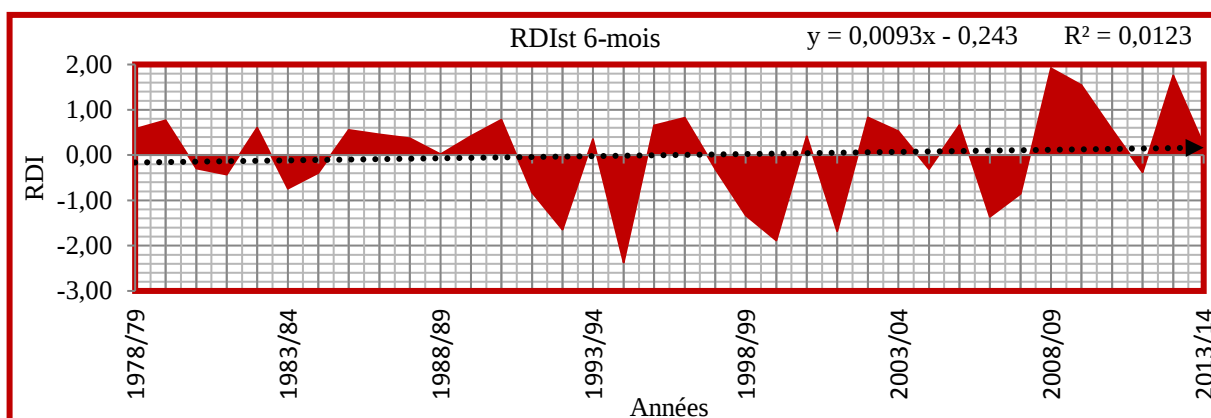


Figure 91: Valeurs de RDI-6 et tendances pour la station Fès-DRH pour la période 1979-2014

Comme le montrent les figures 90 et 91, l'analyse des tendances respectivement de RDI-3 et RDI-6, une tendance à la hausse entre 1978 et 2014 est observée.

Les valeurs de RDI montrent que pendant 1994-95, 1998-99 et 2001-02, il y a eu de graves conditions de sécheresse dans la Plaine de Saïss. Il n'y a pas eu de sécheresse extrême dans la Plaine de Saïss entre 1979 et 1990, mais il y a eu des années extrêmement et sévèrement humides survenues entre 1979-80 et 2013-14.

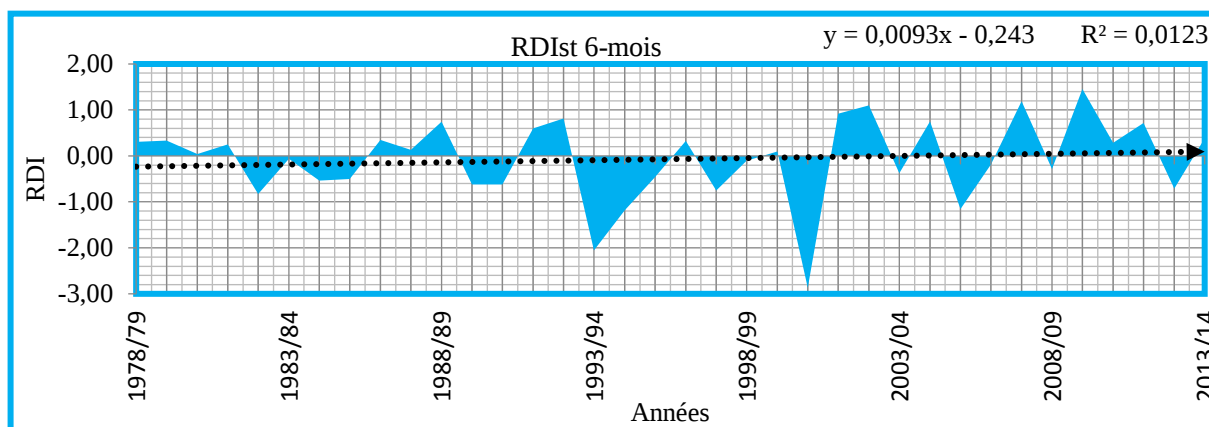


Figure 92: Valeurs de RDI-6 et tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014

c. RDI à long terme

Comme le montrent les figures 92 et 93, l'analyse des valeurs de RDI-9 dans la station Fès-DRH, la sécheresse modérée s'est produite en 2001-02, la sécheresse sévère en 1992-93 et 1999-00, et la sécheresse extrême en 1994-95 et 1998-99.

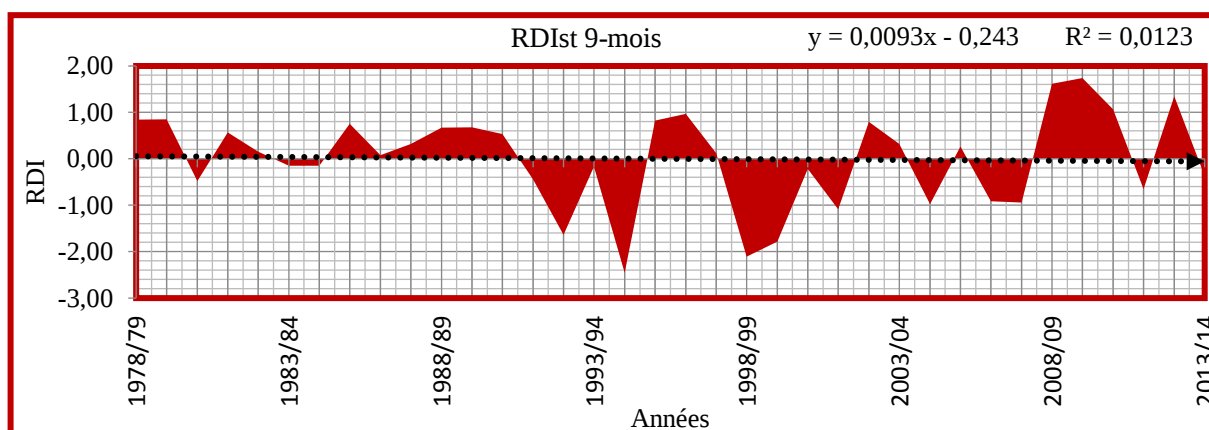


Figure 93: Valeurs de RDI-9 et tendances pour la station Fès-DRH pour la période 1979-2014

Cependant, les valeurs de RDI-9 dans la station Ain Bittit indiquent une sécheresse modérée en 1990-91, 1998-99 et 2006-07, une sécheresse sévère en 1982-83 et 2000-01 et une sécheresse extrême est enregistrée en 1994-95.

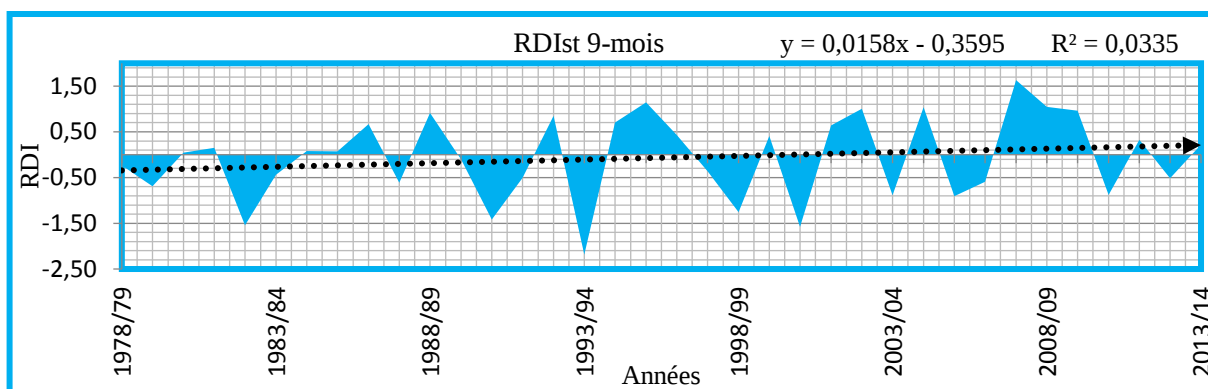


Figure 94: Valeurs de RDI-9 et tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014

Dans la station Fès-DRH, les valeurs de RDI-12 montrent qu'une sécheresse modérée s'est produite en 1998-99 et 2006-07, une sécheresse sévère en 1992-93, 1998-99 et 1999-00 et une sécheresse extrême en 1994-95.

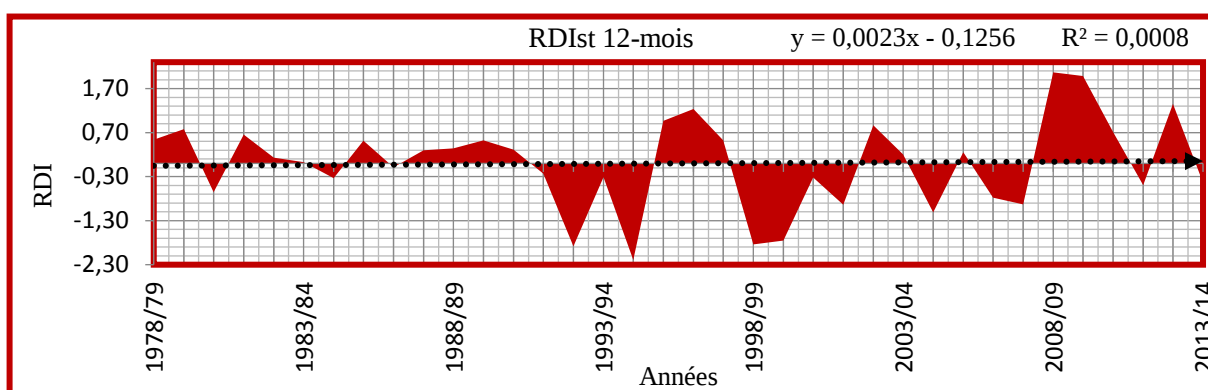


Figure 95: Valeurs de RDI-12 et tendances pour la station Fès-DRH pour la période 1979-2014

Alors que la station Ain Bittit indique une sécheresse modérée en 1998-99, 2010-11 et 2012-13, une sécheresse sévère en 2003-04 et une sécheresse extrême en 1994-95

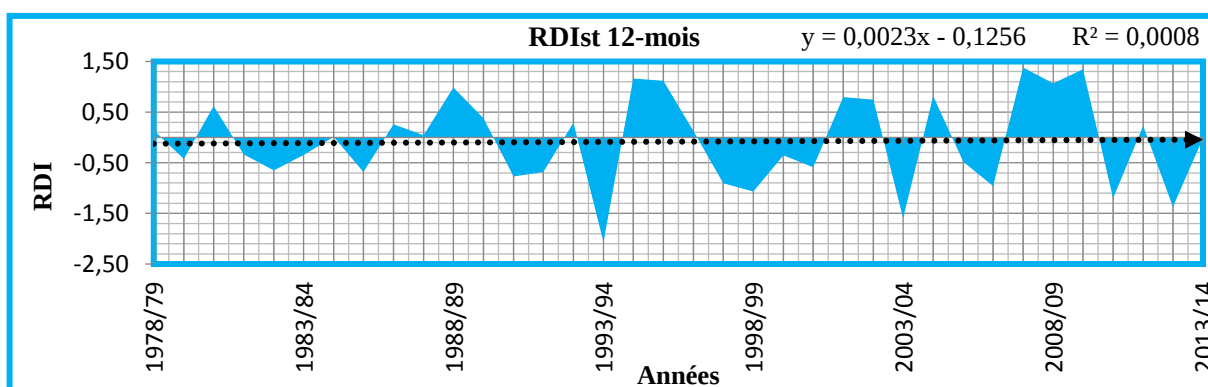


Figure 96: Valeurs de RDI-12 et tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014

Comme le montre les figures 92, 93, 94 et 95 l'analyse des tendances des RDI-9 et RDI-12 suit une tendance à la hausse entre 1978-79 et 2013-14.

Généralement les valeurs de RDI-12 montrent qu'il y avait de graves conditions de sécheresse dans la Plaine de Saïss pendant les années 1992-93, 1998-99, 1999-00 et 2003-04. Elles montrent également une sécheresse extrême pendant 1994-95 et une humidité extrême pendant 2008-2010.

L'analyse des tendances des graphiques RDI-3, RDI-6, RDI-9 et RDI-12 dans la Plaine de Saïss montre que l'indice RDI suit une tendance à la hausse en indiquant que la gravité de la sécheresse diminue et que la région se déplace vers l'état humide.

Selon les valeurs de RDI, les années de gravité de la sécheresse dans la Plaine de Saïss ont été classées par trois classes. C'est-à-dire une sécheresse modérée, sévère et extrême, qui est comme indiqué ci-dessous (Tableau 32). Dans cette étude, les valeurs de RDI sont découvertes à 3, 6, 9 et 12 mois.

Tableau 36 : Gravité de la sécheresse par RDI-3, RDI-6, RDI-9 et RDI-12 (Tsakiris et al., 2007)

RDI	Sévérité	Mois	Années	
			Fès-DRH	Ain Bittit
3-mois	Modérée	octobre-déc.	84-85, 98-99 et 07-08	78-79, 81-82, 00-01 et 03-04
	Sévère	octobre- déc.	92-93 et 06-07	93-94,
	Extrême	octobre- déc.	94-95	01-02
6-mois	Modérée	octobre - mars	98-99 et 06-07	98-99 et 06-07
	Sévère	octobre - mars	92-93, 99-00 et 01-02	92-93, 99-00 et 01-02
	Extrême	octobre - mars	94-95	94-95
9-mois	Modérée	octobre - juin	01-02	90-91 et 98-99
	Sévère	octobre - juin	92-93 et 99-00	82-83 et 00-01
	Extrême	octobre - juin	94-95 et 98-99	93-94
12-mois	Modérée	octobre - sept.	04-05	98-99, 10-11 et 12-13
	Sévère	octobre - sept.	92-93, 98-99 et 99-00	03-04
	Extrême	octobre - sept.	94-95	93-94

B. Caractérisation de la sécheresse par RDI

Une description sommaire des caractéristiques de la sécheresse pour les trois stations étudiées a été établie sur les 184 mois (période d'analyse de 1978-79 à 2013-14) à Ain Bittit, au Sud de la Plaine de Saïss, avec une gravité combinée maximale de -173,89 suivie de la station Fès-Saïss, au Nord-Est, avec une sévérité combinée maximale de -172,57 et une durée totale de 182 mois suivie de la station Fès-DRH, au Nord, avec une gravité combinée maximale de -172,06 et 171 mois comme durée totale de la sécheresse moins élevées que celles des autres stations (Tableau 33 et figure 96).

Tableau 37 : Caractérisation de la sécheresse pour les trois stations étudiées

Station	Nombre d'événements de sécheresse (NES)	Durée totale de la sécheresse (DTS)	Gravité totale de la sécheresse (GTS)
Fès-DRH	51	171	-172,06
Ain Bittit	53	184	-173,89
Fès-Saïss	52	182	-172,57

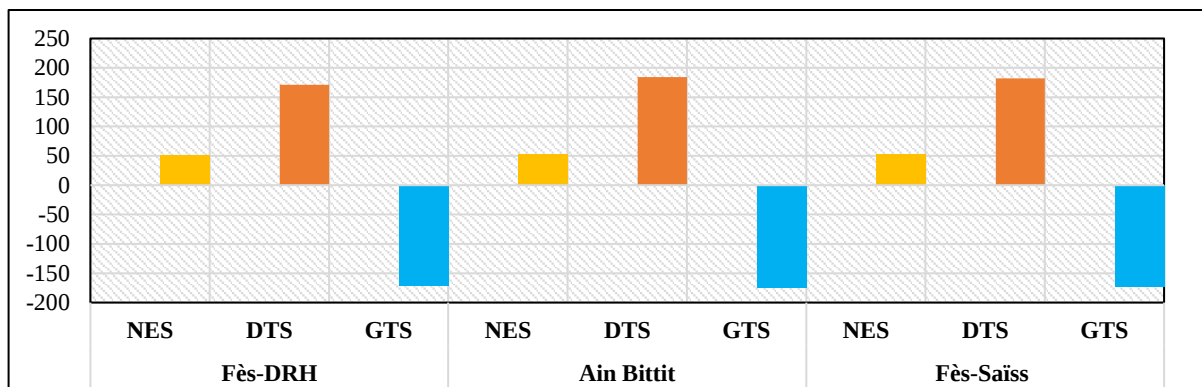


Figure 97: Caractéristiques de la sécheresse au niveau des trois stations pour la période 1979-2014

4. Identification et analyse des séquences par WSVI

Les effets du changement climatique sur la fréquence, la sévérité et la durée de la sécheresse affectent les changements dans la planification des futures ressources en eau et de la production agricole (Gocic & Trajkovic, 2013). Pour cette raison, l'évaluation, la caractérisation et la surveillance de la sécheresse nécessitent de plus en plus de considérer non seulement les précipitations, mais aussi les autres paramètres météorologiques comme l'évapotranspiration. Ainsi, certains nouveaux indices de sécheresse basés sur les précipitations et l'évapotranspiration ont été développés.

Cette partie présente un nouvel indice de sécheresse appelé l'indice de variabilité des excédents d'eau (WSVI) impliquant l'accumulation de surplus d'eau à différentes échelles de temps. Pour approuver la procédure proposée, le WSVI est comparé à l'indice de précipitation normalisé (SPI) et à l'indice de sécheresse de reconnaissance (RDI) en fonction des échelles de temps de 1, 3, 6 et 12 mois.

4.1. Méthodologie

Le calcul de WSVI est basé sur les données mensuelles de précipitation et d'évapotranspiration. Il répond aux attentes de l'indice de sécheresse, tel que présenté par (Nkemdirim & Weber, 1999). En résumé, le WSVI peut être utilisé à l'avenir comme outil d'analyse de la sécheresse, de ses caractéristiques spatiales et ses modèles. Le WSVI fournit une procédure simple pour mesurer la gravité de la sécheresse, similaire au concept de RDI. Bien que le RDI ait été caractérisé comme un indice météorologique général pour l'évaluation de la sécheresse (Tsakiris & al., 2007 ; Vangelis & al., 2011), les résultats présentés dans ce travail montrent que le WSVI peut également être utilisé à cette fin.

La différence notifiée entre le WSVI-1 et le RDI-1 est principalement due à la différence dans leur formulation, parce que le WSVI est basé sur un bilan hydrique.

A. Calcul de WSVI

La gravité de la sécheresse peut être obtenue par l'estimation de l'indice de variabilité de l'excédent d'eau (WSVI). L'équation FAO-56 Penman-Monteith (PM) est utilisée pour estimer l'évapotranspiration de référence (ET_o) (Allen & al., 1998), le logiciel d'estimation de la FAO-56 PM basé sur des données météorologiques limitées (Gocic et Trajkovic 2010) a été utilisé.

Le WSVI est calculé comme suit :

$$WSVI_k^{(i)} = \frac{D_k^{(i)} - \mu}{\sigma} \quad (\text{Eq. 38})$$

où $WSVI_k^{(i)}$ = indice de variabilité de l'excédent d'eau du k-ième mois pour l'année i, $D_k^{(i)}$ = excédent mensuel d'eau ou déficit du k-ième mois pour l'année i, μ = moyenne et σ = écart-type Du surplus mensuel en eau pour la période observée. L'excédent d'eau $D_k^{(i)}$ pour l'année i et une période de référence de k mois est estimé comme suit :

$$D_k^{(i)} = \sum_{j=1}^k (P_{ij} - ET_{ij}), i = 1(1)N \quad (\text{Eq. 39})$$

Où P_{ij} = précipitation et ET_{ij} = évapotranspiration du mois j pour l'année i et N = nombre total de données disponibles. La classification de la sécheresse de WSVI et les probabilités correspondantes d'occurrence de chaque niveau de sévérité découlant de la fonction de densité de probabilité normale sont présentées dans le tableau 34.

Tableau 38 : Classification de la sécheresse par WSVI (Tsakiris & al., 2007)

Séquence de sécheresse	Valeurs de WSVI	Probabilité (%)
Extrêmement humide	2,0 et plus	2.3
Très humide	1,5 à 2.0	4.4
Modérément humide	1,0 à 1,5	9.2
Proche de la normale	-1.0 à 1.0	68.2
Modérément sèche	-1,5 à -1,0	9.2
Très sèche	-2.0 à -1,5	4.4
Extrêmement sèche	-2 et moins	2.3

4.2. Résultats et interprétation

A. Etude des séquences de sécheresse et analyse des tendances par WSVI

a. WSVI à court terme

Après avoir analysé des deux figures 97 et 98, la valeur de WSVI de 3-mois montre qu'une sécheresse modérée s'est produite à la station Fès-DRH pendant les années 1987-88, 1999-00 et 2007-08, une sécheresse sévère a eu lieu en 1978-79, 1982-83, 1985-86 et 1997-98 et une sécheresse extrême est enregistrée en 2002-03. Toutefois, il y a eu une période extrêmement humide enregistrée en 2009-10.

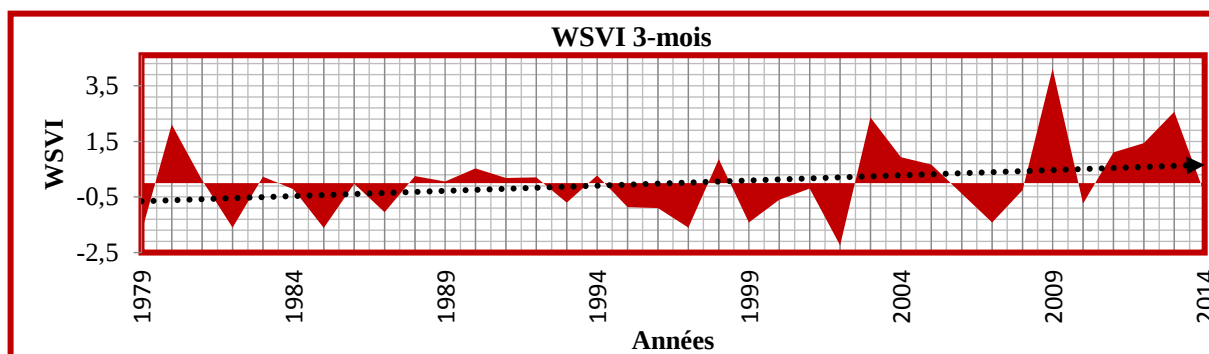


Figure 98: Valeurs de WSVI-3 et tendances pour la station Fès-DRH pour la période 1979-2014

Alors que la station Ain Bittit a enregistré pendant les années 1986-87 et 2007-08 une sécheresse modérée, une sécheresse sévère pendant les années 1978-79, 1994-95, 1999-00 et 2002-03. Néanmoins, une humidité extrême est enregistrée en 2009-10 et 2013-14.

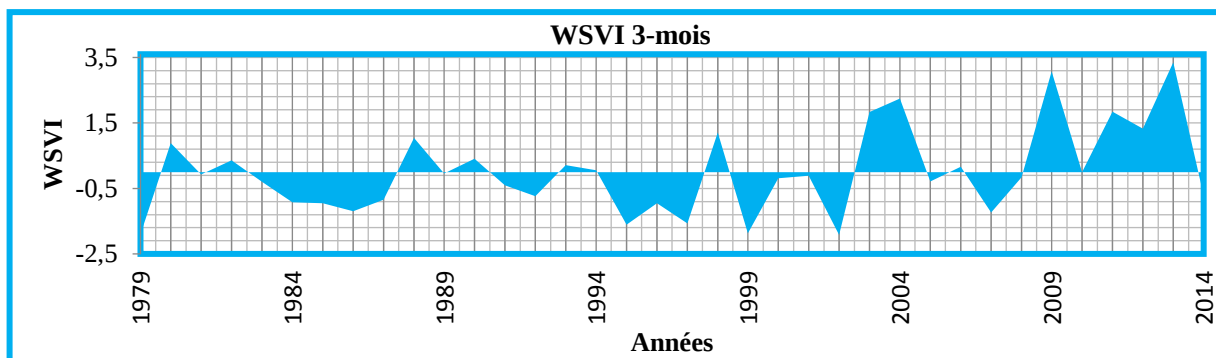


Figure 99: Valeurs de WSVI-3 et tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014

b. WSVI à moyen terme

Dans la station Fès-DRH, les valeurs de WSVI-6 montrent que la sécheresse modérée s'est produite en 1981-82, 1983-84, 1984-85, 1999-00 et 2006-07, une sécheresse sévère en 1992-93, 2000-01 et 2007-08 et la sécheresse extrême en 1994-95 et 2002-03 (Figure 99). La station Ain Bittit indique une sécheresse modérée en 1981-82, 1984-85, 1988-89, 1993-94, 1999-00 et 2006-07, une sécheresse sévère en 1983-84, 1992-93, 1994-95 et 2001-02. Cependant, une humidité extrême est enregistrée en 2009-10 (Figure 100).

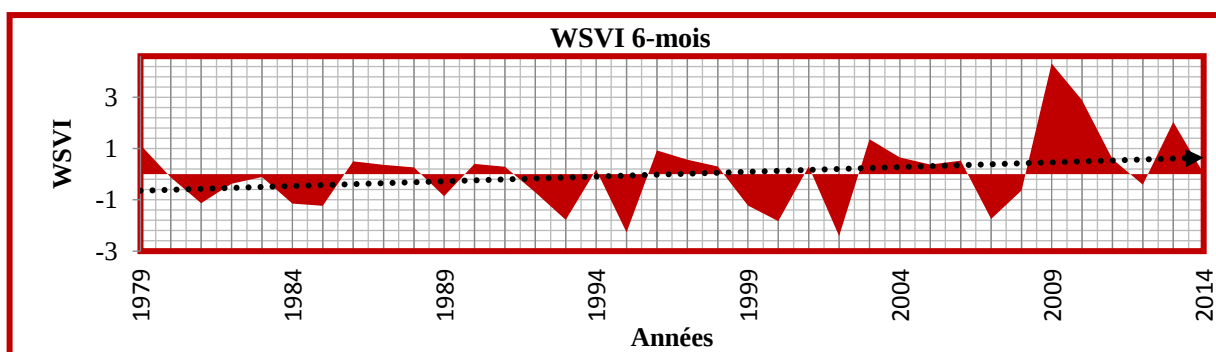


Figure 100: Valeurs de WSVI-6 et tendances pour la station Fès-DRH pour la période 1979-2014

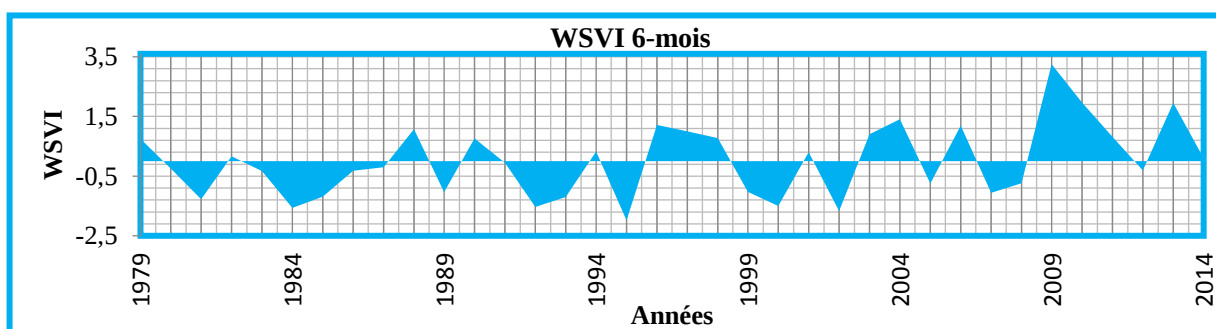


Figure 101: Valeurs de WSVI-6 et tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014

Comme le montrent les figures 99 et 100, l'analyse des tendances de WSVI-3 et WSVI-6 prouve une tendance à la hausse entre 1979 et 2014.

Les valeurs de WSVI montrent que pendant les années 1983-84, 1992-93, 1994-95, 1998-99 et 2001-02, il y a eu de graves conditions de sécheresse dans la Plaine de Saïss. Il n'y a pas eu de sécheresse extrême dans la Plaine de Saïss entre 1979 et 1990, mais il y a eu des années extrêmement et sévèrement humides survenues entre 2009-10 et 2013-14.

c. WSVI à long terme

Comme le montre la figure 101, l'analyse des valeurs de WSVI-9 dans la station Fès-DRH, la sécheresse modérée s'est produite en 2006-07 et 2007-08, une sécheresse sévère en 1993-94, 1999-00, 2000-01 et 2002-03 et la sécheresse extrême est indiquée en 1994-95.

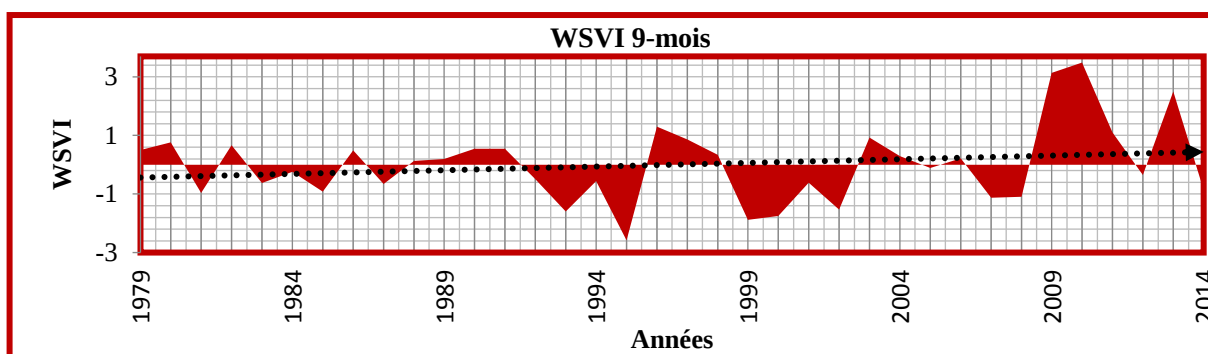


Figure 102 : Valeurs de WSVI-9 et tendances pour la station Fès-DRH pour la période 1979-2014

Alors que les valeurs de WSVI-9 de la figure 102 de la station Ain Bittit indiquent une sécheresse modérée en 1987-88, 1992-93, 1993-94, 2000-01 et 2007-08, une sécheresse sévère en 2004-05, 2006-07 et une sécheresse extrême en 1994-95. Cependant, une humidité extrême est enregistrée en 2009-10.

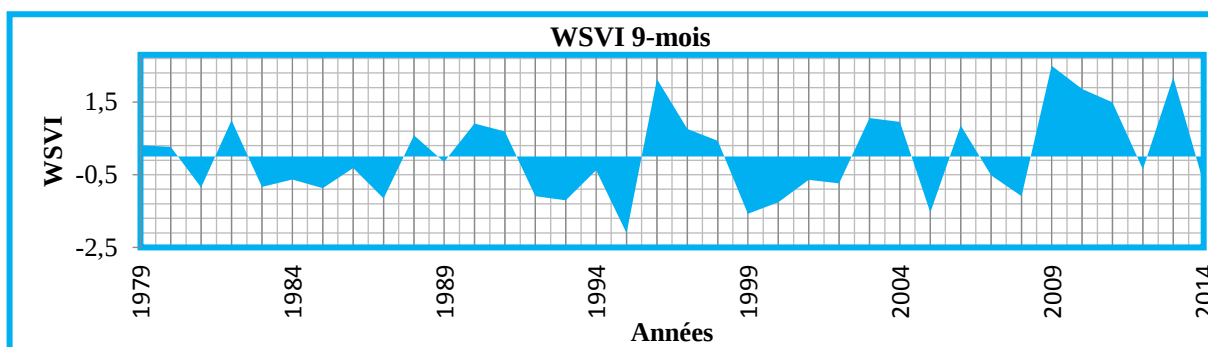


Figure 103: Valeurs de WSVI-9 et tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014

En analysant les valeurs de WSVI-12 de la figure 103, il s'avère que la sécheresse modérée est marquée dans la station Fès-DRH en 1998-99, 2010-11 et 2012-13, la sécheresse sévère en 2003-04 et la sécheresse extrême en 1994-95. Pour la station Ain Bittit, les valeurs de WSVI-12 dans la figure 104 montrent une sécheresse modérée en 1987-88 et 2003-04 et une sécheresse sévère en 1999-00, 2000-01, et une sécheresse extrême est enregistrée en 1994-95. Cependant, une humidité extrême en 2009-10.

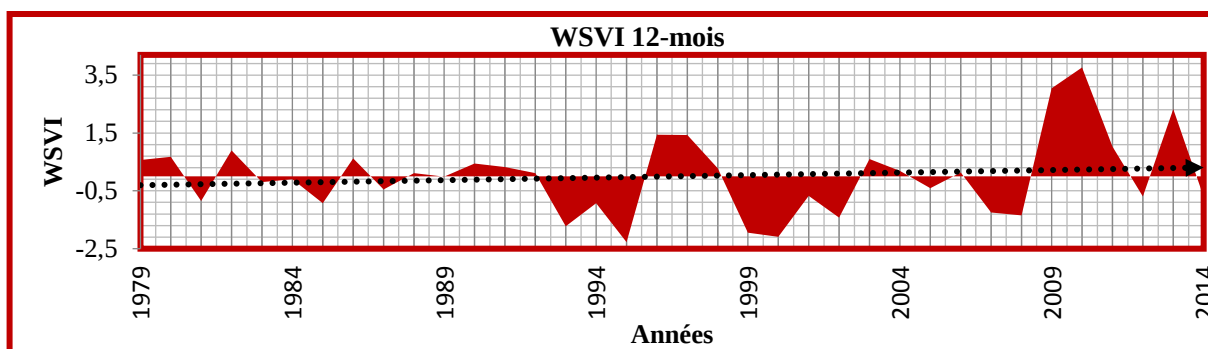


Figure 104: Valeurs de WSVI-12 et tendances pour la station Fès-DRH pour la période 1979-2014

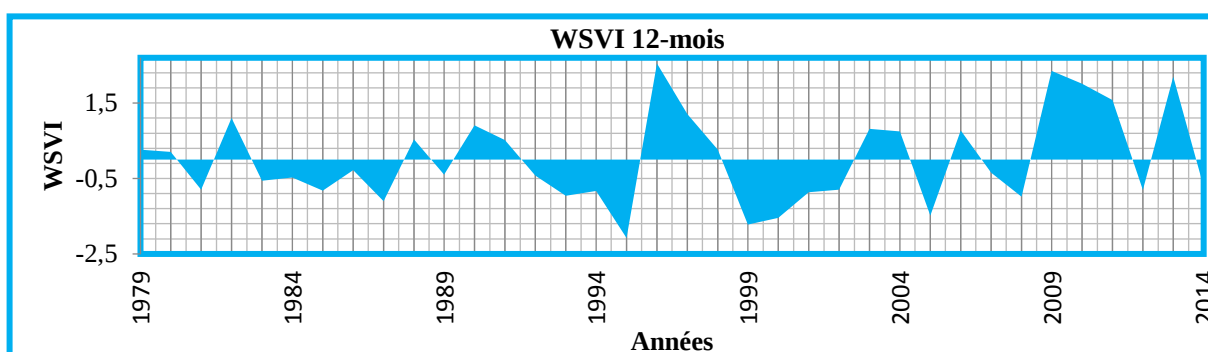


Figure 105 : Valeurs de WSVI-12 et tendances pour la station Ain Bittit pour la période 1979-2014

Après avoir analysé les figures 103 et 104, les valeurs de WSVI- 12 mois montrent qu'il y avait de graves conditions de sécheresse dans la Plaine de Saïss pendant les années 1992-93, 1998-99 ,1999-00 et 2003-04. Elles montrent également une sécheresse extrême pendant 1994-95 et une pendant 2009-2010 et une situation d'humidité extrême.

L'analyse des tendances des graphiques WSVI-3, WSVI-6 et WSVI-9 et WSVI-12 respectivement dans la Plaine de Saïss montrent que l'indice WSVI suit une tendance à la hausse en indiquant que la gravité de la sècheresse diminue et que la région se déplace vers l'état humide.

Selon les valeurs de WSVI, les années de gravité de la sécheresse dans le Plaine de Saïss ont été classées par trois classes, une sécheresse modérée, une sévère et une extrême, comme indiqué dans le tableau 35.

Tableau 39 : Gravité de la sécheresse par WSVI-3, WSVI-6, WSVI-9 et WSVI-12 selon le tableau de classification de Tsakiris

WSVI	Sévérité	Mois	Années	
			Fès-DRH	Ain Bittit
3-mois	Modérée	octobre-déc.	87-88,99-00 et 07-08	86-87 et 07-08
	Sévère	octobre- déc.	78-79,82-83,85-86 et 97-98	78-79, 94-95,99-00 et 02-03
	Extrême	octobre- déc.	02-03	----
6-mois	Modérée	octobre - mars	81-82,83-84, 84-85, 99-00 et 06-07	81-82,84-85, 88-89, 93-94, 99-00 et 06-07
	Sévère	octobre - mars	92/93, 00-01 et 07-08	83-84, 92-93,94-95 et 01-02,
	Extrême	octobre - mars	94-95 et 02-03	87-88,92-93, 93-94, 00-01 et 07-08
9-mois	Modérée	octobre - juin	06-07 et 07-08	-----
	Sévère	octobre - juin	93-94,99-00,00-01 et 02-03	04-05 et 06-07
	Extrême	octobre - juin	94-95	94-95
12-mois	Modérée	octobre - sept.	98-99, 10-11 et 12-13	87-88 et 03-04
	Sévère	octobre - sept.	03-04	99-00 et 00-01
	Extrême	octobre - sept.	94-95	94-95

5. Comparaison des évolutions des séquences par RDI, SPI et WSVI

Bien que la présentation des différents indices de la surveillance de la sécheresse dans la Plaine de Saïss ait été faite, une étude complète de la corrélation entre ces indices s'est avérée également nécessaire.

5.1. Méthodologie

Pour le calcul de la corrélation, on a utilisé le critère de coefficient de corrélation (r) calculé par l'équation suivante :

$$r = \frac{\sum RDI.SPI - \frac{\sum RDI \sum SPI}{N}}{\sqrt{\left[\sum RDI^2 - \frac{(\sum RDI)^2}{N}\right] \left[\sum SPI^2 - \frac{(\sum SPI)^2}{N}\right]}} \quad (\text{Eq. 40})$$

où N est la longueur de chaque série SPI ou RDI.

L'erreur quadratique moyenne (RMSE) a été utilisée pour évaluer la performance du modèle en obtenant des informations utiles sur la nature de la différence entre les valeurs de RDI et SPI. Le RMSE a été calculé entre RDI et SPI en utilisant l'équation suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (RDI_i - SPI_i)^2}{N}} \quad (\text{Eq. 41})$$

Dans cette équation, N est la longueur de chaque échelle de temps SPI ou RDI.

5.2. Résultats et interprétations

A. Corrélation entre SPI et RDI

Le tableau 36 et la figure 105 indiquent les valeurs du coefficient de corrélation r et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) pour SPI et RDI dans les stations climatiques étudiées à différentes échelles de temps.

Généralement les résultats SPI et RDI, tracés à différentes échelles de temps indiquent que les différences entre les indices SPI et RDI augmentent en augmentant les échelles de temps.

Tableau 40 : Corrélation entre les valeurs de SPI et RDI pour les trois stations

Stations	Echelles de temps							
	3-mois		6-mois		9-mois		12-mois	
	r	RMSE	r	RMSE	r	RMSE	r	RMSE
Fès-DRH	0.9858	0.1688	0.9847	0.1747	0.9782	0.2087	0.9549	0.3003
Ain Bittit	0.9824	0.4195	0.9655	0.4197	0.9338	0.5883	0.9235	0.6558
Fès-Saïss	0.9997	0.3421	0.9993	0.3787	0.9990	0.5398	0.9978	0.5970

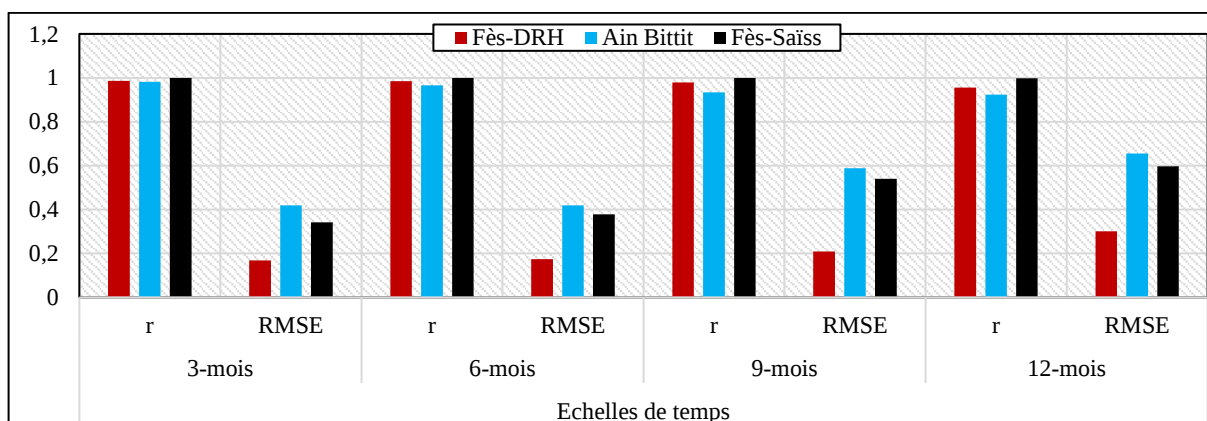


Figure 106 : Comparaison entre les valeurs de r et RMSE du SPI et de RDI

On peut déduire du tableau 36 que les coefficients de corrélation présentés ont diminué, alors que les valeurs de RMSE entre RDI et SPI ont augmenté avec une augmentation des échelles de temps. Cela signifie que la classification de la sécheresse selon RDI peut être différente en comparaison avec celle de SPI à des échelles de temps plus grandes.

L'analyse de l'effet de la longueur de l'échelle de temps (3, 6, 9 et 12 mois) a révélé plus de différences entre ces deux indices de sécheresse. La valeur la plus élevée de r entre SPI et RDI a été obtenue pour l'échelle de temps de 3-mois et la valeur la plus basse pour l'échelle de 12-mois dans les trois stations. Les valeurs moyennes des coefficients de corrélation de l'échelle de temps de 3 mois des trois stations (Fès-DRH, Ain Bittit et Fès-Saïss) sont respectivement de 0,985, 0,982 et 0,999 et de l'échelle de temps 12-mois sont respectivement 0,954, 0,923 et 0,997 pour les 12-mois (Tableau 36).

B. Corrélation entre WSVI, SPI et RDI

Le WSVI présenté dans cette étude a été comparé avec le SPI et le RDI basés sur des échelles de temps de 3, 6, 9 et 12 mois (Tableau 37 figure 106). La performance de WSVI est testée à l'aide d'indicateurs statistiques tels que RMSE et r . Les données ont été sélectionnées parmi trois stations météorologiques dans la Plaine de Saïss au cours de la période 1979-2014. Les figure 107 et 108 montrent le coefficient de corrélation de Pearson à différentes échelles de temps.

Tableau 41 : Valeurs du coefficient de corrélation entre WSVI, SPI et RDI pour les stations Fès-DRH et Ain Bittit

Station		Fès-DRH	Ain Bittit
WSVI-3	SPI-3	0.9703	0.6498
WSVI-3	RDI-3	0.9624	0.6157
WSVI-6	SPI-6	0.9878	0.8646
WSVI-6	RDI-6	0.9680	0.8515
WSVI-9	SPI-9	0.9891	0.8973
WSVI-9	RDI-9	0.9721	0.8566
WSVI-12	SPI-12	0.9909	0.8990
WSVI-12	RDI-12	0.9893	0.8519

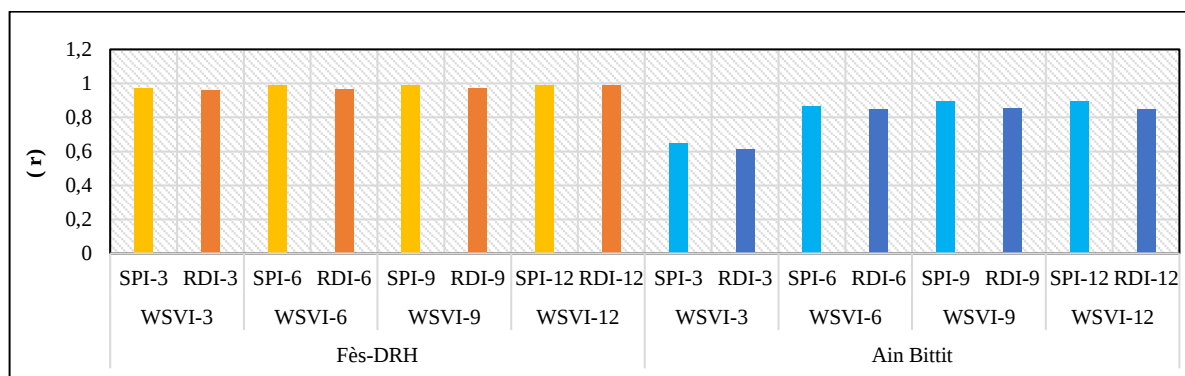


Figure 107: Valeurs du coefficient de corrélation entre WSVI, SPI et RDI pour les stations Fès-DRH et Ain Bittit

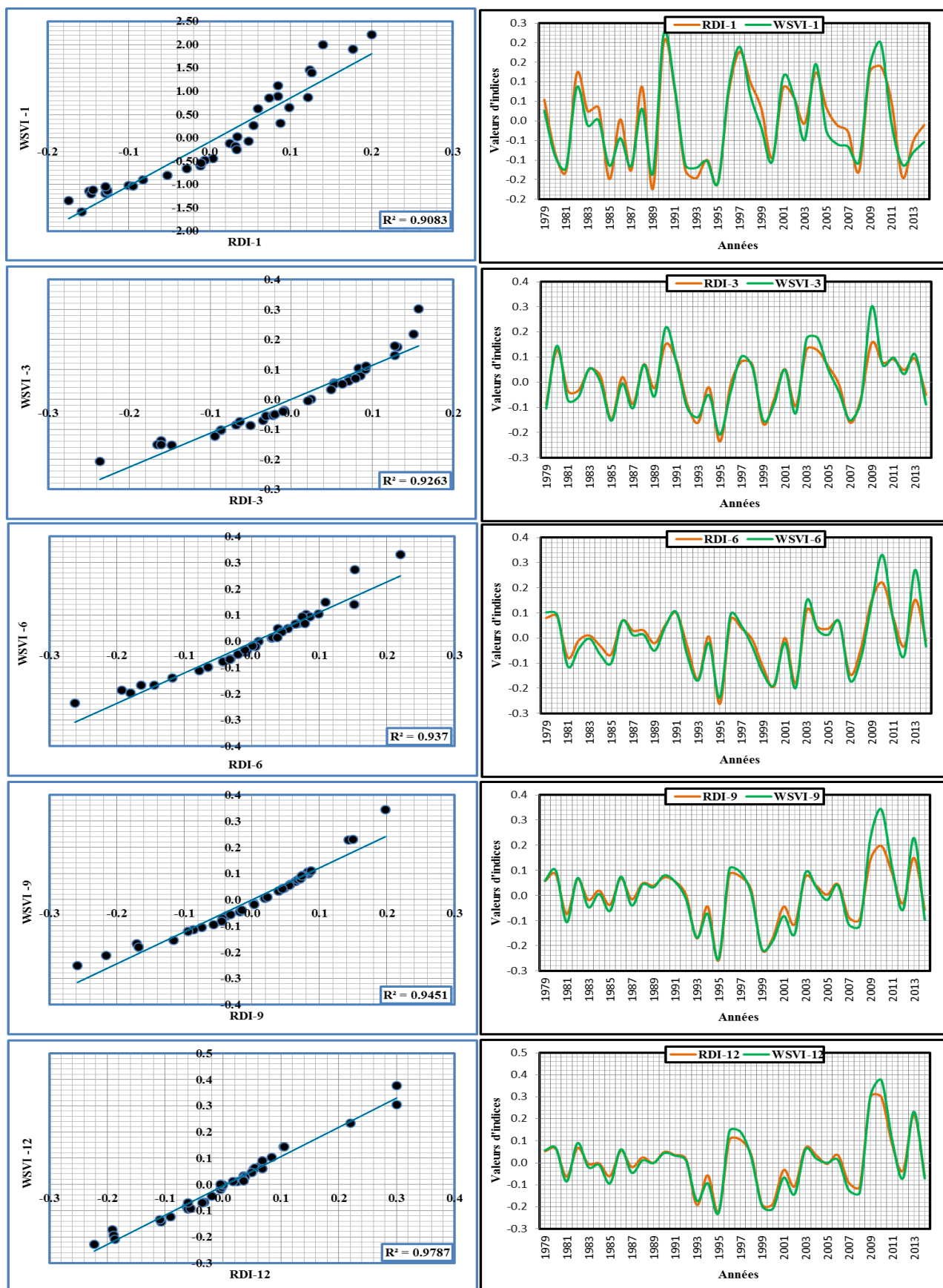


Figure 108: Comparaison des valeurs de WSVI et RDI pour la station Fès-DRH

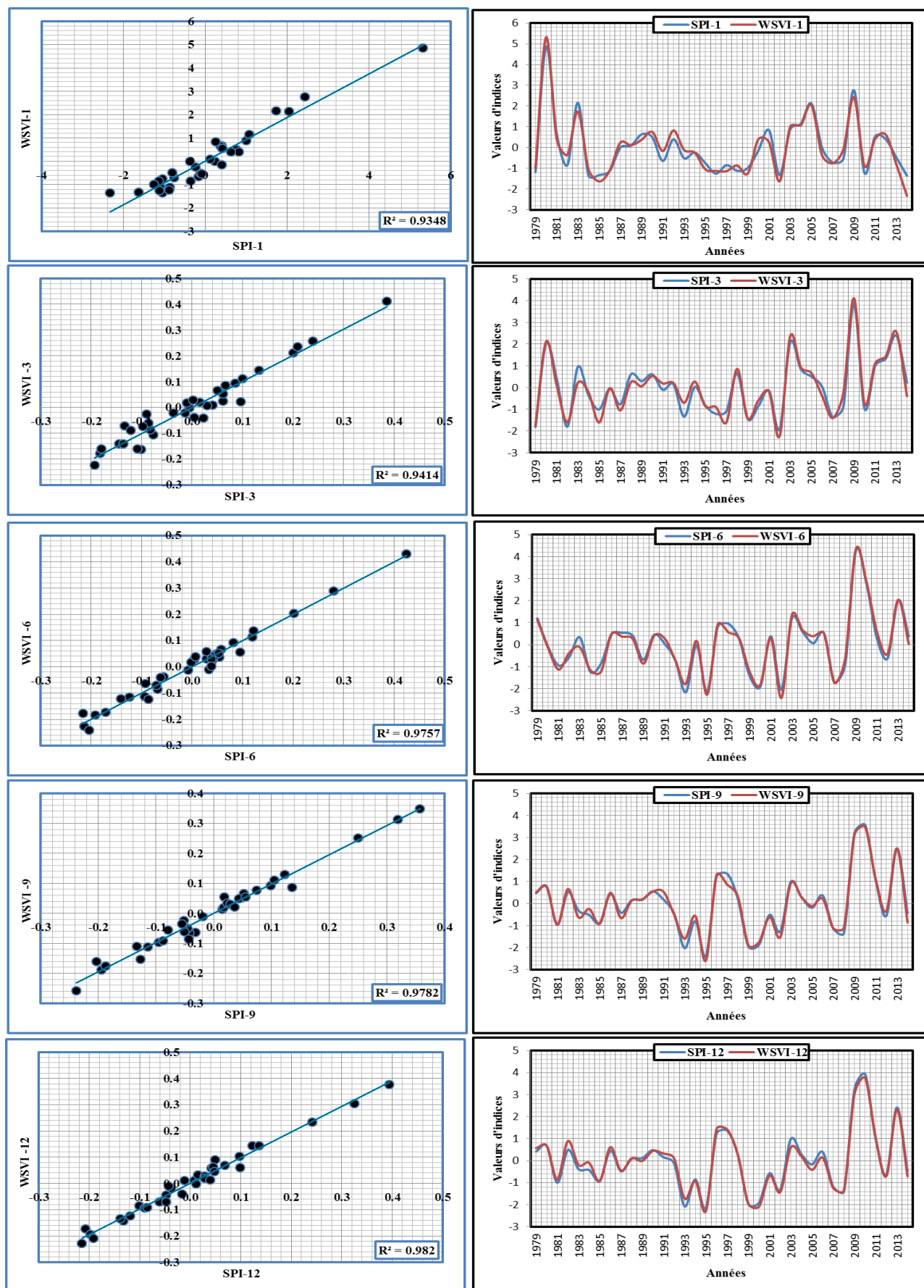


Figure 109: Comparaison des valeurs de WSVI et SPI pour la station Ain Bittit

5.3. Discussion et analyse

La réponse rapide du CMI, aux conditions à court terme, peut fournir des informations trompeuses sur les conditions à long terme. Ainsi que sa sensibilité à l'évapotranspiration potentielle constitue une autre limitation du CMI. Un accroissement du CMI peut se produire avec une augmentation de l'évapotranspiration potentielle. Une augmentation de la valeur de CMI indique des conditions d'humidité plus humides ; Cependant, il n'y a pas de cas naturel où une augmentation de l'évapotranspiration potentielle produirait des conditions d'humidité accentuées. Raison pour laquelle l'utilité du CMI reste très limitée et moins efficace pour le suivi de la sécheresse à long terme

La fréquence des épisodes de sécheresse a été calculée, ensuite, à l'aide de l'indice de précipitation normalisé (SPI) et de l'indice de sécheresse de reconnaissance (RDI) également utilisés pour détecter les changements de durée et sévérité de la sécheresse dans le Plaine de Saïss. Selon cette étude, le principal avantage de SPI est sa polyvalence, car seules les données sur les précipitations sont nécessaires pour déterminer la durée, l'intensité, la sévérité et la fréquence de la sécheresse. En outre, la sécheresse peut être calculée à différentes échelles. Cependant l'indice de sécheresse de reconnaissance (RDI) présente des avantages par rapport l'indice de précipitation normalisé (SPI) en incluant l'évapotranspiration potentielle comme deuxième paramètre en plus des précipitations. Mais les résultats pour la Plaine de Saïss montrent qu'il n'y a pas beaucoup de différences dans les valeurs de RDI et SPI. Bien que RDI semble être un peu plus précis que SPI en raison de l'utilisation d'un paramètre supplémentaire dans le calcul.

Dans cette étude, SPI-3, SPI-6, SPI-9 et SPI-12 ont été calculés pour l'évaluation de la sécheresse. L'analyse de divers graphiques montre que les indices de 12 mois sont plus précis dans la comparaison des trois autres. L'analyse du SPI-12 montre que les années modérément sèches ont été enregistrées en 2007-08, les périodes très sèches sont enregistrées en 1992-93, 1998-99 et 99-00, la période extrêmement sèche a été enregistrée en 1994-95 et la période extrêmement humide en 2009-10. De même, RDI-3, RDI-6, RDI-9 et RDI-12 ont été calculés aux fins de l'évaluation de la sécheresse.

L'analyse des valeurs de RDI-12 mois montre qu'il y avait de graves conditions de sécheresse dans la Plaine de Saïss pendant les années 1992-93, 1998-99, 1999-00 et 2003-04. Elle montre également une sécheresse extrême pendant 1994-95. Et pendant 2008-2010 il y avait la situation d'humidité extrême.

L'analyse des tendances des graphiques RDI-3, RDI-6, RDI-9 et RDI-12 respectivement dans la Plaine de Saïss montrent que l'indice RDI suit une tendance à la hausse indiquant que la gravité de la sécheresse diminue et que la région se déplace vers l'état humide. Cependant, le RDI s'avère être plus précis dans la détection de la sécheresse suite qu'il fait intervenir l'évapotranspiration dans son calcul par rapport à SPI. La période de sécheresse a été observée entre 1980-83 et 1999-00. La gravité de la sécheresse diminue de 1982-1983 à 1999-2000. À des échelles de temps plus courtes (c'est-à-dire 3 mois), les valeurs SPI et RDI sont fluctuées fréquemment au-dessus et au-dessous de la ligne zéro et il n'y a pas de période prolongée sèche ou humide. Les séries SPI et RDI de 12 mois présentent des périodes humides bien définies et des périodes sèches par rapport à 3 mois.

La performance des indices à différentes échelles de temps pour représenter la sécheresse diffère de l'identification des périodes sèches / humides. Comme on l'a vu, pour identifier les périodes sèches / humides, SPI 12 et RDI 12 montrent une plus grande utilité que SPI 3 et RDI 3. Ainsi, il est préférable d'utiliser SPI et RDI de 12 mois pour l'analyse de la sécheresse pour cette étude. Dans l'ensemble, il y a eu une situation de sécheresse modérée dans la Plaine de Saïss, mais la durée et l'intensité étaient supérieures à la normale.

L'analyse des corrélations des indices WSVI, RDI et SPI basée sur des échelles de temps de 3, 6, 9 et 12 mois (Figure 106 et Tableau 35) montre des meilleurs résultats à l'échelle 12-mois où $r = 0.982$ et $r = 0.978$ respectivement pour WSVI-12 avec SPI-12 et WSVI-12 avec RDI-12. De plus, le WSVI et le SPI avaient des valeurs de r comprises entre 0,970 et 0,990 et entre 0.646 et 0.899 respectivement pour la station Fès-DRH et la station Ain Bittit.

En outre, les corrélations entre le WSVI et le SPI indiquent que la précipitation est le facteur dominant dans le calcul de WSVI. D'après les résultats présentés dans le tableau 35, on peut conclure que le WSVI et les deux autres indices étaient les mieux corrélés, c'est-à-dire ayant une forte corrélation linéaire positive. Cela suggère également que les périodes sèches et humides indiquées par le WSVI étaient en généralement en accord avec RDI et SPI.

De plus, les graphiques de dispersion présentés (Figures 107 et 108) confirment que le WSVI correspond à la SPI et à la RDI. Le coefficient de détermination est présenté dans les figures 107 et 108. Les résultats ont montré que la droite de régression représente les meilleurs résultats dans toutes les échelles de temps avec des valeurs supérieures pour l'échelle 12-mois $R^2 > 0,9$ pour les deux stations. Le WSVI correspond mieux à des échelles de temps plus grandes telles que 9 ou 12 mois, ce qui suggère qu'il peut être utilisé comme un indicateur de conditions météorologiques à long terme.

Les précipitations comme facteur dominant dans le calcul de WSVI peut être la raison de ses excellents résultats dans les deux stations Fès-DRH et d'Ain Bittit. Cependant, l'étude doit être appliquée aux régimes climatiques différents pour tester la performance de WSVI pour caractériser la sécheresse.

Les résultats montrent aussi que les trois indices présentent un comportement globalement similaire. Le RDI en incluant ETP dans les calculs peut être très sensible à la variabilité climatique car il peut être considéré comme une indication de la sécheresse en cas d'applications agricoles (Khalili & al., 2011).

En général, les résultats actuels ont montré que la plus grande partie de la Plaine de Saïss a été affectée par la sécheresse, mais la gravité et la fréquence accrue de ce phénomène ont été observées dans les régions centrales et orientales. Il est donc nécessaire d'entreprendre de futures recherches afin d'améliorer les programmes de gestion et de développement des ressources en eau et de résoudre les problèmes socio-économiques et agricoles auxquels sont confrontées les populations de telle région.

5.4. Conclusion

Au terme de ce chapitre, la Plaine de Saïss a été affectée par des périodes sèches pendant la période 1978-79 à 2013-14. Les sécheresses les plus remarquables par leur intensité, leur durée et leur fréquence ont été observées durant la période 1978-1995. Ces épisodes secs ont atteint leur paroxysme en 1995 avec une sécheresse de type sévère, en trois stations étudiées ; celle Ain Bittit semble la plus affectée par la sécheresse.

L'aléa climatique, qui a affecté la Plaine de Saïss, s'est jusqu'à présent manifestée par un enregistrement des sécheresses modérées à fortes et non par des sécheresses extrêmes. Les sécheresses modérées sont largement dominantes avec 56,9 % des cas.

Le chapitre présente une étude comparative des indices CMI, SPI, RDI et WSVI comme indicateurs de sécheresse pour des périodes de référence de 3, 6, 9 et 12 mois.

D'après le SPI, la sécheresse garde généralement un caractère modéré et n'est que très rarement extrême. Les valeurs du CMI se rangent dans la plage des conditions semi-arides, une évolution certaine de ces valeurs indique une rupture à partir de 2006.

Le WSVI, intégrant à la fois la précipitations cumulées et l'évapotranspiration de référence, souligne l'importance de l'évapotranspiration par le surplus d'eau et était fortement corrélé avec le RDI et le SPI dans le climat semi-aride présenté par les deux stations Fès-DRH et Ain Bittit, où $r > 0.9$. Ce qui indique un accord presque parfait entre le WSVI et le SPI et le RDI. Les résultats obtenus confirment que le WSVI pourrait être utile pour la prévision et la surveillance de la sécheresse à différentes classes.

En effet, la décision sur les indices à sélectionner pour la surveillance de la sécheresse dans une zone climatique spécifique peut être basée sur la disponibilité de données climatiques. Bien que le WSVI soit facile à estimer et à appliquer, il faut faire preuve de prudence lors du calcul de l'évapotranspiration.

Chapitre 3

Apport de la télédétection pour le suivi de la
sécheresse météorologique

Ce chapitre présente la variabilité multi-échelle de la sécheresse et les relations qu'elle entretient avec le couvert végétal au sens large qui, à ces latitudes, est associé directement ou non, à la dynamique d'occupation et d'utilisation du sol. C'est dans cette optique que se fait ressentir le besoin croissant de telle étude comme initiative de gestion rationnelle pour préserver les ressources naturelles notamment les ressources en eau souterraines.

I. Télédétection du couvert végétal

1. Généralités

En raison de conditions climatiques défavorables, certaines cultures ne peuvent être semées ou cultivées et sont remplacées par d'autres types de couverts végétaux ayant un impact sur l'environnement tel que des cultures de maïs (Adams & al., 1990 ; Parry, 1989 ; Risbey & al., 1999).

1.1. *Variabilité climatique et changements d'occupation des sols*

À court terme, la variabilité climatique influence le développement de la végétation en fonction des saisons, de l'évolution des températures et précipitations et de l'insolation. Les sécheresses et le gel peuvent avoir un impact direct à court terme sur l'occupation des sols et perturber le cycle phénologique des végétaux (Kueppers & al., 2008).

1.2. *Changements d'occupation des sols*

Certains termes relatifs à l'occupation et à l'utilisation des sols font souvent l'objet de confusions. L'occupation des sols fait référence à la couverture physique de la surface terrestre, tandis que l'utilisation des sols fait référence à l'anthropisation des surfaces terrestres et plus particulièrement à la fonction socio-économique des surfaces (Brown & al., 2004).

L'occupation des sols désigne un type de couverture physique comme les forêts, les surfaces herbacées ou les surfaces artificialisées. Si les terres nues sont considérées, l'occupation des sols peut être décomposée en deux parties : le sol et la végétation. Ce sont donc les deux éléments qui permettent de décrire la couverture physique des surfaces terrestres.

1.3. *Rôle de l'occupation des sols dans les processus d'infiltration et de ruissellement*

La modification des états de surfaces constitue le facteur prépondérant de la genèse et de la dynamique des processus de ruissellement et d'infiltration (Souley, 2008). L'accélération de la rotation entre les cultures et les jachères entraîne la fatigue progressive des sols et surtout leur encroûtement superficiel qui bloque l'infiltration et génère des ruissellements. La couverture végétale intercepte une partie des précipitations et diminue l'énergie cinétique des gouttes d'eau arrivant à la surface du sol. La végétation facilite l'infiltration de l'eau à travers les horizons superficiels du sol et le sous-sol.

En effet, l'occupation des sols est un élément-clé de l'évolution des ressources en eau aux niveaux local et régional. Etant définie comme le facteur principal de l'évolution des ressources en eau doit être bien analysé en déterminant ainsi son évolution dans l'espace et le temps.

1.4. Effets sur les ressources en eau souterraine

L'impact du changement d'occupation des sols et de la variabilité climatique sur les ressources en eau a fait l'objet de nombreuses recherches à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest (Wang & al., 2004). En milieu semi-aride, les changements d'usage des sols par accroissement des cultures pluviales peuvent se traduire par des augmentations ou des diminutions de la recharge des aquifères selon les contextes, notamment du fait de la modification de la demande d'évapotranspiration (Scanlon & al., 2007a). Ainsi, une augmentation du niveau des nappes par recharge diffuse a été observée au sud-est de l'Australie (Allison & al., 1990) et au sud-ouest des USA (Scanlon & al., 2005) suite à la conversion de couverts végétaux naturels en cultures pluviales. Cependant, dans les régions où l'irrigation est pratiquée grâce aux eaux de surface, la recharge des nappes peut augmenter de manière significative, celle-ci peut être expliquée par une augmentation du coefficient de ruissellement en relation avec la modification du couvert végétal et en conséquence, par des accumulations d'eau plus importantes au niveau des rivières temporaires et des bas-fonds, considérés comme les principales zones de recharge de l'aquifère (Leblanc & al., 2008). Bien que, d'autres chercheurs n'avancent que cette hausse du niveau piézométrique pourrait aussi s'expliquer, pour partie, par une augmentation de la recharge diffuse en relation avec la rapide expansion des surfaces cultivées (Bromley & al., 2002).

1.5. Besoin d'un outil d'observation pertinent

L'imagerie satellitaire et le système d'informations géographiques (SIG) constituent des sources d'information précieuse pour le suivi de la sécheresse et des changements d'occupation des sols dans les zones semi-arides à diverses échelles de temps. En partant des spécificités que présentent les images satellites et les méthodes de traitement associée, l'objectif de cette partie est destiné pour l'évaluation de l'apport des images satellitaires et/ou du SIG pour essayer d'identifier et de caractériser la dynamique de la végétation observée sur le terrain et le suivi de la sécheresse dans la Plaine de Saïss par application des indices de sécheresse fondés sur les données satellitaires.

2. Principe et domaines d'application

La télédétection est définie comme « l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci » (Commission française interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale, 1988). Elle a pour rôle de fournir des informations sur les paysages sous forme de données images en utilisant le rayonnement électromagnétique comme véhicule de ces informations (Robin, 2002).

C'est en fait l'étude de l'information véhiculée par le rayonnement visible, infrarouge et radar du spectre électromagnétique provenant de la surface de la terre et captée par les appareils aérospatiaux évoluant à distance convenable de cette dernière. Ceci est rendu possible par le fait que les objets étudiés (plantes, maisons, surfaces d'eau, sol nu ou masses d'air) émettent ou réfléchissent du rayonnement à différentes longueurs d'onde et intensités selon leur état.

Depuis 1972, les progrès dans ce domaine sont remarquables notamment l'évolution de la résolution de 80 m (MSS de Landsat), à 30 m (Thematic Mapper), à 20 et 10 m (HRV de SPOT), IKONOS et à moins d'un mètre. En géologie ou pour l'étude de la végétation, les radars imageurs, surtout aéroportés, sont aussi très utilisés.

3. Traitements

L'observation de la Terre par les satellites peut être décomposée en cinq étapes ou processus, depuis la source d'énergie qui éclaire la surface terrestre jusqu'à la réception des données par la station satellite au

sol (UVED, 2008) : la source d'énergie, les interactions du rayonnement avec l'atmosphère, les interactions du rayonnement avec la surface terrestre, l'enregistrement du signal par le capteur satellitaire, la transmission et la réception des données.

4. Analyse d'une image

L'étude de la dynamique du couvert végétal est axée sur la bonne représentation des unités principales sur une image. Leur variation hétérogène spatiale, spectrale et temporelle exige de les présenter de façon homogène pour mieux interpréter les objets d'une image et tout processus de changement observé.

A. Classification non supervisée

Les données d'image numérique sont classées, par traitement informatique basé uniquement sur les statistiques d'image sans recours à des échantillons d'entraînement. Cette classification produit un regroupement naturel des pixels de l'image que l'on nomme "regroupement spectral" ou "classe", (les régions de l'image ayant une même signature spectrale ont un type d'utilisation du sol similaire) (Girard, 1989).

B. Classification supervisée

Procédure utilisée pour l'identification de zones « spectralement similaires » d'une image. On identifie d'abord des sites d'entraînement dont on extrait la signature spectrale et à partir desquels on extrapole pour le reste de l'image. Selon Duminil (2007), ces sites d'entraînement servent de base pour les calculs des algorithmes de classification.

II. Matériels et méthodes

Dans la mesure où la Plaine de Saïss possède une agriculture importante, y compris dans des secteurs de marge climatique semi-aride, cette étude a pour ambition d'améliorer les connaissances thématiques sur l'évolution de l'occupation et de l'utilisation des sols et des structures paysagères. Les recherches et les analyses faites sur cette thématique forment une base d'information nécessaire aux différents utilisateurs. Elles sont intéressantes pour mettre l'accent sur les problèmes environnementaux en général. Pour cela, une collection d'images satellites qui recouvrent la région d'étude est utilisée. La démarche adoptée peut-être présente en deux volets.

1. Approche analytique « analyse visuelle »

D'après Provencher et Dubois (2007), elle consiste en l'application à l'image satellitaire de la méthode classique de la photo-interprétation. Ainsi, l'examen sur écran des compositions colorées des images a permis d'identifier des zones homogènes grâce aux critères de couleurs et de texture et d'expliquer leur répartition dans l'espace. L'analyse des images disponibles a permis de suivre les changements qui ont affecté les paysages entre 1987 et 2017. Cette lecture s'est faite sur les compositions colorées mentionnées plus haut. Cette interprétation reste approximative à cause de l'intervention de divers facteurs tels que la réflexion du sol (qui dépend essentiellement de sa structure, de sa texture et de la pente), du taux de couvert végétal et de la texture et de la structure de l'image. Selon Tarhouni et al. (2007), toute confusion entre les unités de végétation sur l'image nécessite une vérification de la « réalité terrain » sur le lieu d'étude.

2. Critères de choix des images satellitaires

2.1. Choix de type des images

Le choix de type des images satellitaires dépend de plusieurs critères et plus particulièrement de la dimension spatiale de la zone d'étude et le nombre des scènes réduites (Rognon, 1996). Les données

Landsat peut être utilisées dans un système d'informations opérationnelles pour différentes applications dont la géologie, la foresterie, le suivi à long terme de l'utilisation du sol etc. (Yergeau, 1989). Les images Landsat ayant servi dans cette étude sont toutes de la période sèche c'est-à-dire d'avril à novembre. Leur résolution précise est de 28,5 mètres.

Les images de la période humide ne sont pas utilisées compte tenu du fait qu'elles sont inexploitable à cause de la grande présence de nuages sur les images. Les images retenues sont au nombre de huit et présentent une durée d'observation de 30 ans (de 1987 à 2017). Leur résolution est de trente mètres. Elles ont été obtenues de l'USGS par le biais de son site « <http://earthexplorer.gov> » en téléchargement libre. Landsat est le système d'observation de la surface terrestre par satellite le plus ancien des Etats-Unis.

Les images Landsat MSS (Multi Spectral Scanner) et TM (Thematic Mapper) présentent l'avantage d'être acquises dans le monde entier et sur une période continue de 20 ans (1972-1992). Les capteurs TM détectent la radiation réfléchi à la surface de la terre dans sept bandes spectrales dans les longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge proche, moyen et thermique.

La résolution des images TM (30 mètres) fournit suffisamment de détails pour permettre une gamme importante d'applications tout en gardant une scène suffisamment grande de 180 km de côté. À partir de Landsat 7, le capteur devient ETM+ (Enhanced Thematic Mapper). Ses huit bandes spectrales sont semblables à celles de TM, sauf que la bande thermique 6 a une résolution améliorée de 60 m (contre 120 m dans TM). La composition colorée des images Landsat facilite l'établissement de cartes d'occupation des sols (Pascal & al., 2005).

2.2. Choix des dates des images

Le choix des images Landsat a été basé principalement sur leur disponibilité dans les sites web de la NASA et sur la qualité des capteurs satellitaires qui sont exposés habituellement aux effets atmosphériques (nuages, poussière et autres) ce qui rend la vision et l'interprétation de l'image parfois pénible. Le mois de juin de chaque année est retenu pour mettre en valeur la végétation qui endure toute l'année et les surfaces d'eau permanentes afin de suivre leurs évolutions dans le temps et dans l'espace. Par contre la végétation hivernale pousse partout dans le bassin versant et les flaques d'eau se prolongent irrégulièrement en tout endroit, cela ne reflète pas d'une manière significative l'évolution de ces deux facteurs. Les images satellitaires sont aussi bien exposées en mois de juin vu que l'atmosphère reste relativement claire, ce qui permet au capteur de prendre une image propre qui ne nécessite pas trop de correction atmosphérique pour la visualiser.

3. Classification supervisée « Maximum de vraisemblance » (SMV)

La méthode par « maximum de vraisemblance » est choisie suite à son utilisation très répandue en télédétection. De plus cette méthode est très satisfaisante mathématiquement car les pixels sont classés selon une méthode probabiliste (elle considère que toutes les classes ont une probabilité a priori identique) (Duminil, 2007). La délimitation et le calcul des surfaces sont ensuite obtenus par un traitement sur SIG.

La classification supervisée par maximum de vraisemblance est réalisée sous « ERDAS IMAGINE, 2013 ». Cette classification se base sur des méthodes probabilistes. Elle consiste, selon (Omari, 2005), en une affectation des pixels aux classes préalablement définies et qui semblent les plus proches selon une distance calculée, basée sur la probabilité qu'un pixel d'appartenir à une classe donnée. Une restitution cartographique est donnée par l'algorithme du maximum de vraisemblance (Kermad, 1989).

D'après (Bonn & Rochon, 1993), le recours à cette méthode nécessite une connaissance des objets à classer et par conséquent, les aires d'entraînement doivent être choisies avec beaucoup de soin de sorte à être les plus représentatifs possible de la dynamique spectrale de chacun d'eux. Ces derniers doivent être

caractérisés par une homogénéité radiométrique plus ou moins régulière. Chaque classe doit être représentée, par au moins quatre zones d'apprentissage rassemblées dont l'effectif total des pixels doit être supérieur ou égal à 200 pixels (Girard & Girard, 1999). La démarche de l'étude peut être schématisée comme suite (Figure 109) :

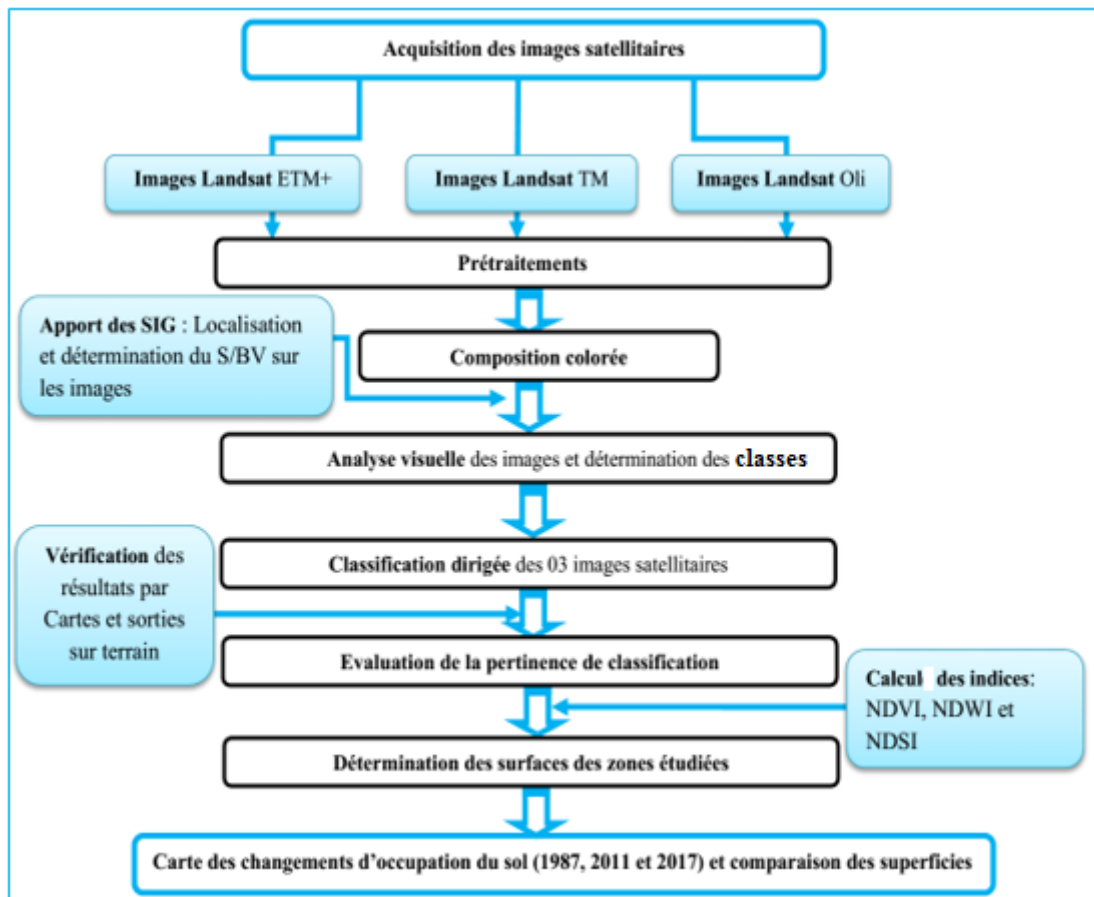


Figure 110 : Approche méthodologique de classification

4. Utilisation des indices en télédétection

Les images satellitaires multispectrales sont constituées d'une combinaison de bandes spectrales des capteurs Landsat (TM et OLI dans notre cas). Chaque bande indique une information selon le type du rayonnement électromagnétique et l'interaction de la cible avec celui-ci. Généralement, chaque cible se caractérise par des réflectances assez fortes dans certaines bandes que d'autres. Notamment, la végétation a une forte réflectance dans le proche infrarouge, ainsi que l'eau reste plus réfléchissante dans le visible. En effet, en combinant ces bandes spectrales des indices spectraux sont élaborées pour avoir des informations plus exactes sur la végétation, le sol et l'eau.

Les indices de végétation sont des combinaisons arithmétiques des réflectances dans le visible (généralement le rouge) et le proche infrarouge. Ils sont relativement corrélés à la croissance des plantes, la couverture végétale et la quantité de biomasse verte (Lecerf, 2008).

4.1. Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI)

L'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) (Rouse & al, 1973) a été élaboré par Tucker (1979) en utilisant les bandes rouges et proches infrarouges et expliqué par l'équation sur la figure 110. Le NDVI est sensible à la vigueur et la quantité du couvert végétal. Cependant, sa normalisation par la somme des deux bandes permet de réduire les effets d'éclairement. Théoriquement les valeurs de cet indice sont comprises entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondant aux éléments différents du couvert végétal (la neige, l'eau, les nuages, ...) pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Du fait que les réflectances dans le rouge et le proche infrarouge sont presque égales le NDVI présente des valeurs proches de 0 pour les sols nus. Néanmoins, sur les couverts végétaux naturels les valeurs de NDVI sont positives, généralement comprises entre 0.1 et 0.9 (Jarlon & al., 2015). Une forte valeur de NDVI indique que la végétation est en bonne santé, cela veut dire qu'elle absorbe la grande partie du rouge et réfléchit beaucoup plus le proche infrarouge et vice-versa (Figure 110).

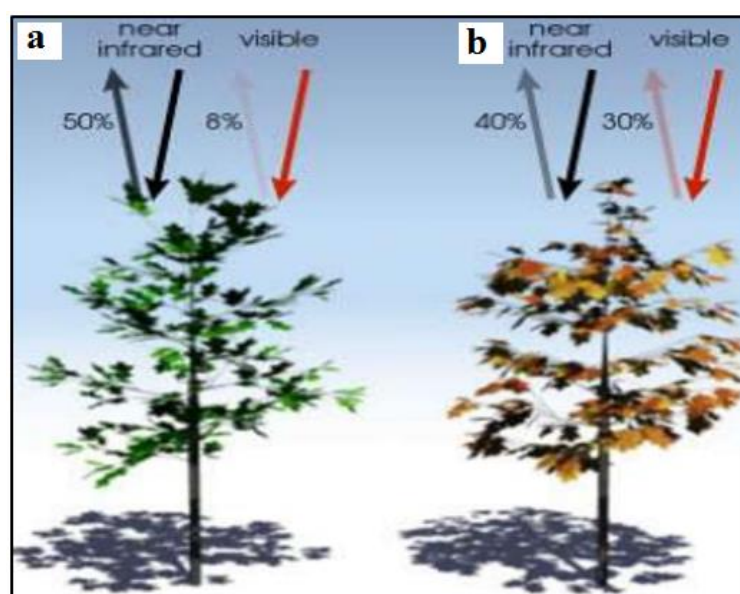


Figure 111: Variation de NDVI selon l'état de santé de la plante (a : plante saine ; b : plante stressée (Visibleearth.nasa.gov)

4.2. Indice de l'Eau par Différence Normalisée NDWI

Plusieurs auteurs ont proposé et testé des indices combinant le moyen infrarouge (MIR entre 1500 et 1750 nm) et le proche infrarouge (PIR). En 1996, Gao a testé la différence normalisée de l'eau (NDWI) et a montré que le NDWI est linéairement corrélé au contenu en eau et utilisé pour la détection de l'eau contenue dans la végétation. Cet indice permet de vérifier l'efficacité des systèmes d'irrigations puisque les plantes bien irriguées ayant une teneur en eau forte reflètent une valeur de NDWI proche de 1 et inversement. L'indice NDWI se calcule selon l'équation suivante :

$$NDWI = (PIR - MIR) / (PIR + MIR) \quad (\text{Eq. 42})$$

Le NDWI peut être calculé de telle façon à mettre l'accent sur les surfaces d'eau et non pas de l'humidité des plantes et des sols. Mc Feeters (1996) a développé un NDWI mais différent de celui de Gao (1996), car il permet l'identification des surfaces aquatiques, en se basant sur la différence du canal vert (V) avec le canal proche infrarouge (PIR) (Gond & al, 2002) (Figure 111) :

$$NDWI = (bande\ Verte - Proche\ infrarouge) / (bande\ Verte + Proche\ infrarouge) \quad (Eq. \ 43)$$

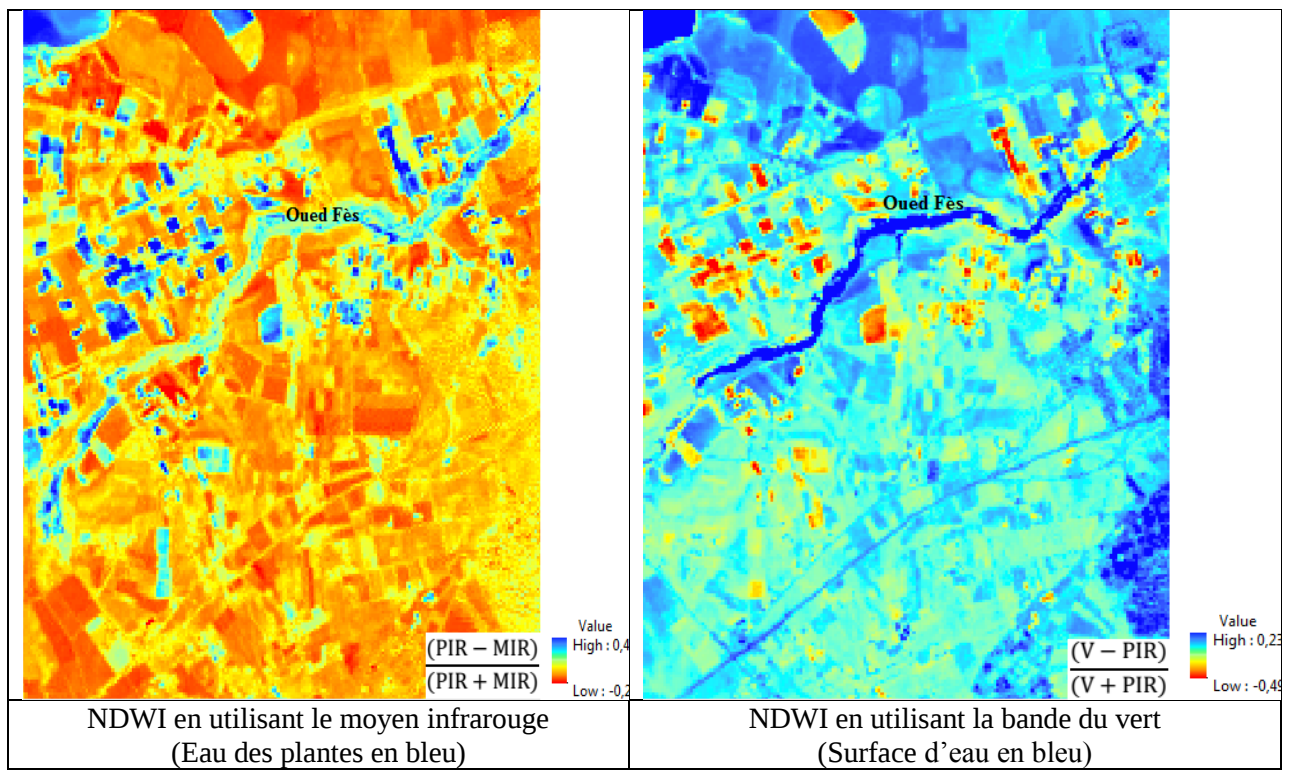


Figure 112 : Types d'indice de l'eau par différence normalisée (NDWI)

Pour extraire l'information sur la présence d'eau dans la Plaine de Saïss, le NDWI de Gao, qui augmente avec le contenu en eau des feuilles ou avec le passage du sol sec vers l'eau libre, est calculé. De même, le NDWI prend des valeurs négatives lorsque la réflectance dans le MIR est supérieure à celle du PIR (sol nu et sec). Pour renforcer la perception de l'eau libre dans notre zone d'étude on procède à la différence NDWI_NDVI notée DVW (Gond, 2003). Ainsi que le calcul de NDWI de Mc Feeters permettra de faire une comparaison et avoir une meilleure détection de l'eau libre de la Plaine de Saïss.

4.3. Indice du sol par différence normalisée NDSI (Takeuchi & Yasuoka, 2004)

Les valeurs de NDSI varient selon la signature spectrale de la bande infrarouge et le proche infrarouge moyen. Les couleurs claires (valeurs positives) symbolisent les sols et les couleurs sombres (valeurs négatives) symbolisent autres éléments du paysage (Tableau 38). Il est utile dans la cartographie des entités pédologiques, mais aussi de certains éléments de constructions environnantes. La formule pour calculer cet indice est :

$$NDSI = (MIR - PIR) / (MIR + PIR) \quad (Eq. \ 44)$$

Tableau 42 : Comparaison des indices calculés pour onze types d'objets de couverture terrestre (Takeuchi & Yasuoka, 2004)

	<i>Conifère</i> (CN)	<i>Dicotylédon</i> (DC)	<i>Herbe</i> (HB)	<i>Béton</i> (BT)	<i>Sable</i> (SB)	<i>Limon</i> (LM)	<i>Argile</i> (AR)	<i>Asèche</i> (AS)	<i>Asphalte</i> (ASP)	<i>Eau</i> (EA)	<i>Neige</i> (NE)
<i>NDVI</i>	0.83	0.83	0.81	0.08	0.23	0.22	0.14	0.24	0.15	0.06	0.05
<i>NDSI</i>	-0.47	-0.45	-0.35	-0.11	0.06	0.01	-0.02	0.11	0.02	-0.26	-0.76
<i>NDWI</i>	-0.60	-0.64	-0.65	0.03	-0.29	-0.23	-0.12	-0.34	-0.14	0.20	0.69

- NDVI a des valeurs beaucoup plus élevées positives (0,81 ~ 0,83) dans le groupe de la végétation (CN, DC, HB).
- NDSI a de plus grandes valeurs (-0,11 ~ 0,11) dans le groupe des sols (BT, SB, LM, AR, AS, ASP).
- NDWI n'a des valeurs positives (0,10 ~ 0,69) que dans le groupe d'eau (EA, NE).

5. Détection des changements (Change detection)

La détection des changements dans les systèmes d'informations géographiques (SIG) est une méthode qui permet de comprendre comment une zone donnée a changé entre deux ou plusieurs périodes de temps (Singh, 1989).

La détection de changement est utile pour visualiser le changement de la couverture végétale, les surfaces d'eau et l'utilisation des terres. Elle consiste à comparer les images satellites d'une zone prise à deux périodes différentes. En effet, « change detection » est utile pour la compréhension et le suivi des changements du couvert végétal, la surface de l'eau et l'urbanisation dans une zone donnée, à travers la comparaison des images satellitaires multi-temporelles. Dans ce cas la variable d'intérêt est généralement la signature spectrale d'objets inclus dans cette même zone. Ensuite, une variation significative dans la signature spectrale signifie un changement dans la couverture terrestre.

Cependant, pour obtenir de bons résultats des conditions en relation avec les données spatiales, temporelles, spectrales et radiométriques doivent être vérifiées (Fengmei, 2012).

La deuxième technique consiste à calculer un rapport entre deux images de dates différentes. Le résultat du rapport est une image des changements survenus dans la zone étudiée. Les valeurs de l'histogramme de cette image sont regroupées dans trois classes suivant les types de changements : les valeurs inférieures à 0 indiquent une régression de radiométrie. Les valeurs égales à 0 indiquent qu'il n'y a pas de changement alors que les valeurs supérieures à 0 indiquent une progression de radiométrie. L'analyse de ces résultats a permis de faire un lien entre l'état de la végétation et l'état des surfaces d'eau et le type de changement détecté.

La régression de la radiométrie est liée à une dégradation de l'état d'objets détectés. L'augmentation de la radiométrie est un signe de variation progressive. Par contre la radiométrie inchangée correspond aux zones relativement stables, généralement dans le cas des sols nus et les bâtis. La figure 112 montre en gros le principe de la technique de détection des changements appliqués dans notre étude.

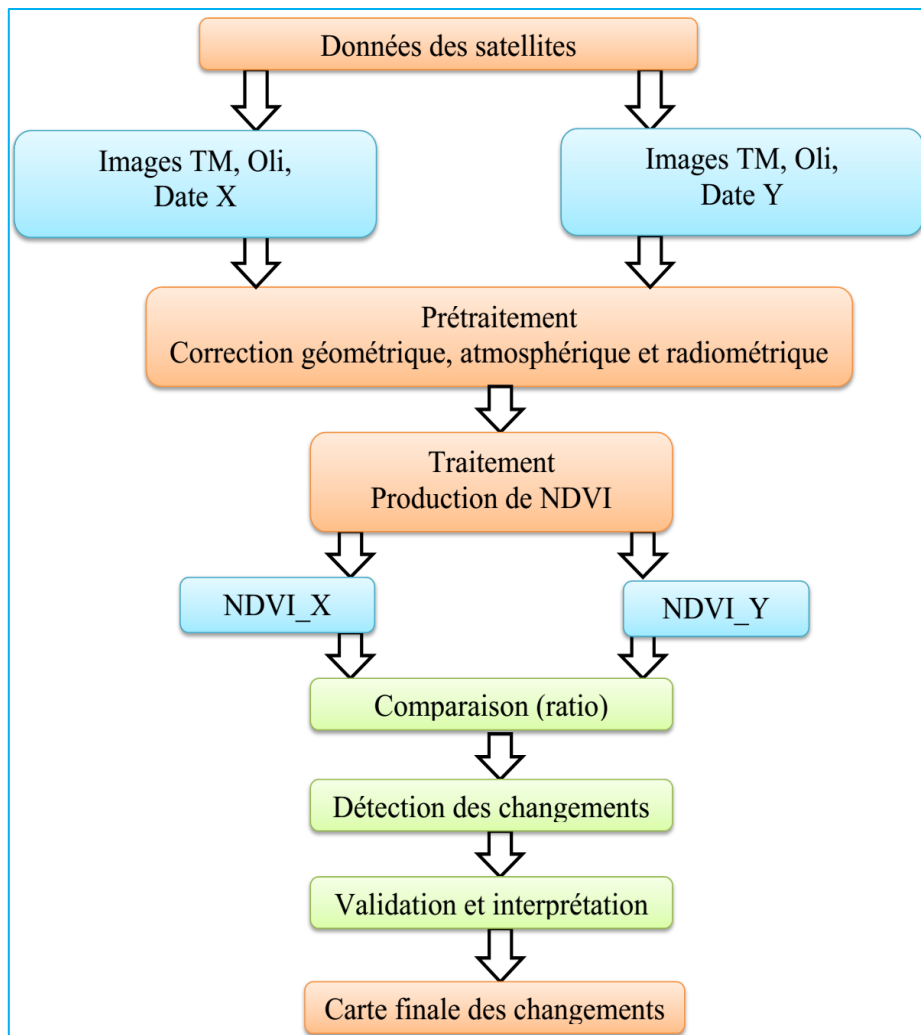


Figure 113 : Organigramme méthodologique de la détection des changements de la couverture terrestre

III. Application des indice et détection des changements à la Plaine de Saïss

1. Analyse des images satellitaires

Afin d'améliorer la qualité des pixels sur les images satellitaires retenues, une correction atmosphérique est utilisée pour extraire une information indépendante des effets de l'atmosphère et une autre correction radiométrique spatiale et spectrale afin de raffiner la valeur de chaque pixel, ce qui amène à une interprétation visuelle des images plus claire et adéquate. Pour ce faire, les valeurs numériques des images satellitaires sont converties en valeurs de luminance en vue de les calibrer en réflectance (Figure 113). Les valeurs de réflectance, vont bien distinguer la variabilité spatiale de la végétation dans notre zone d'étude.

La figure 113 montre, sur le plan visuel, une amélioration dans la netteté de l'image facilitant ainsi l'interprétation visuelle par une meilleure distinction entre les objets de l'image. Toutefois, c'est au niveau du résultat numérique que la différence est plus claire.

A titre d'exemple, la représentation graphique du spectre issu d'une parcelle agricole montre une discrimination plus importante dans la réponse spectrale entre les mêmes objets pour la même zone après la correction de l'image et la transformation des comptes numériques en réflectance. C'est ainsi qu'on peut voir une augmentation dans la réponse de l'infrarouge.

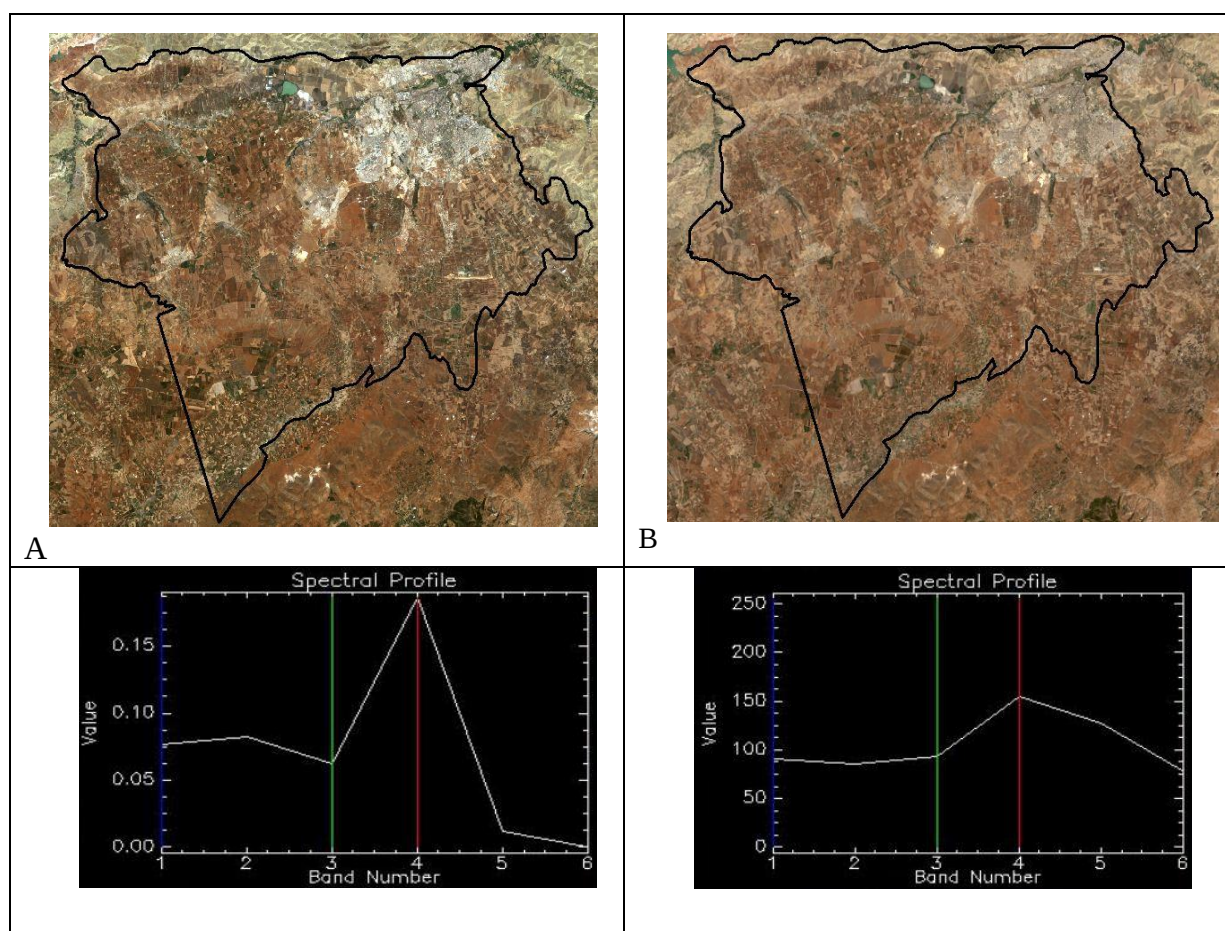


Figure 114: Différences visuelles et spectrales entre image corrigée (A) et image brute (B) de la Plaine de Saïss

2. Classification et amélioration de la composition colorée

Le mode supervisé a été choisi pour réaliser la classification du milieu de la zone d'étude. L'opération « classification » des images a nécessité de délimiter spatialement les parcelles tests sur la composition colorée. Dès lors, en utilisant le logiciel ERDAS IMAGINE.13, l'affichage d'une image numérique à l'écran peut se faire par une seule bande au niveau de gris ou par l'association de 3 bandes appelée un composé coloré (Tableau 39).

Tableau 43 : Combinaisons de bandes RVB pour Landsat 4-5 TM et Landsat8 OLI

Couleur	Satellite	
	Landsat4-5 TM	Landsat8 OLI
Infrarouge	4, 3, 2	5, 4, 3
Naturelle	3, 2, 1	4, 3, 2
Fausse Couleur	7, 5, 3	7, 6, 4

Cette étape a pour tâche de réaliser la combinaison des bandes 3, 2 et 1, car sur cette combinaison de canaux l'aspect visuel naturel des différentes unités paysagères est mieux représenté et traduisant la réalité du terrain. Ceci a pu être réalisé grâce à la faible corrélation des canaux et par la concordance entre les bandes spectrales et le thème se rapportant à notre étude. L'ensemble des images a subi un traitement

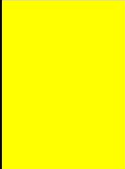
d'amélioration de contraste afin de parvenir à une composition colorée mettant en évidence la plus grande partie de l'occupation des espaces (Figure 113).

3. Détermination des classes et validation des données de terrain

Avant d'entamer les missions de repérage des zones test à l'aide de GPS et des fiches descriptives des stations d'échantillonnage, un travail préliminaire de la classification supervisée (échantillonnage sur image) est réalisé. Des visites de reconnaissance de terrain ont été effectuées pour le repérage et la connaissance d'un certain nombre de parcelles représentatives des différents types d'occupation des sols que l'on rencontre sur la zone d'étude.

Enfin, après confrontation de l'image à la réalité physique (composition colorée avec les informations récoltées sur terrain) une généralisation de l'analyse de l'image a été établie à partir des clés d'interprétation. Cette généralisation, par conséquent, a abouti à une typologie des principales occupations du sol retenues dans cette étude.

Tableau 44 : Exemples de paysages correspondants aux différents types d'occupation du sol dans la Plaine de Saïss

Numéro des classes	Classes d'occupation du sol de la Plaine de Saïss		
	Nom	Couleur	Photos
1	Oliviers		
2	Eau/Zones humides		
3	Cultures/arboricultures		
4	Sol nu et roches		
5	Zones d'agglomération		

4. Résultat de la classification

Pour les images classées (Figures 114, 115 et 116) des années 1987, 1999 et 2011, les couleurs ont été attribuées pour représenter plus ou moins la réalité du terrain d'une part et pour différencier visuellement les différentes classes d'autre part.

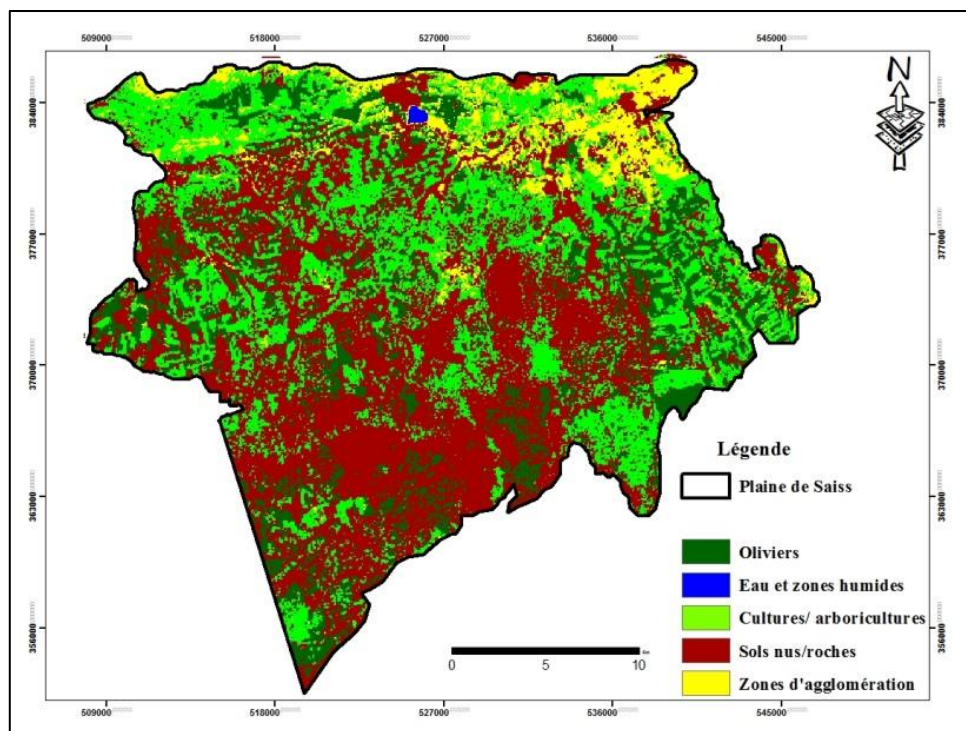


Figure 115 : Carte d'occupation du sol issue de l'image Landsat MSS 1987

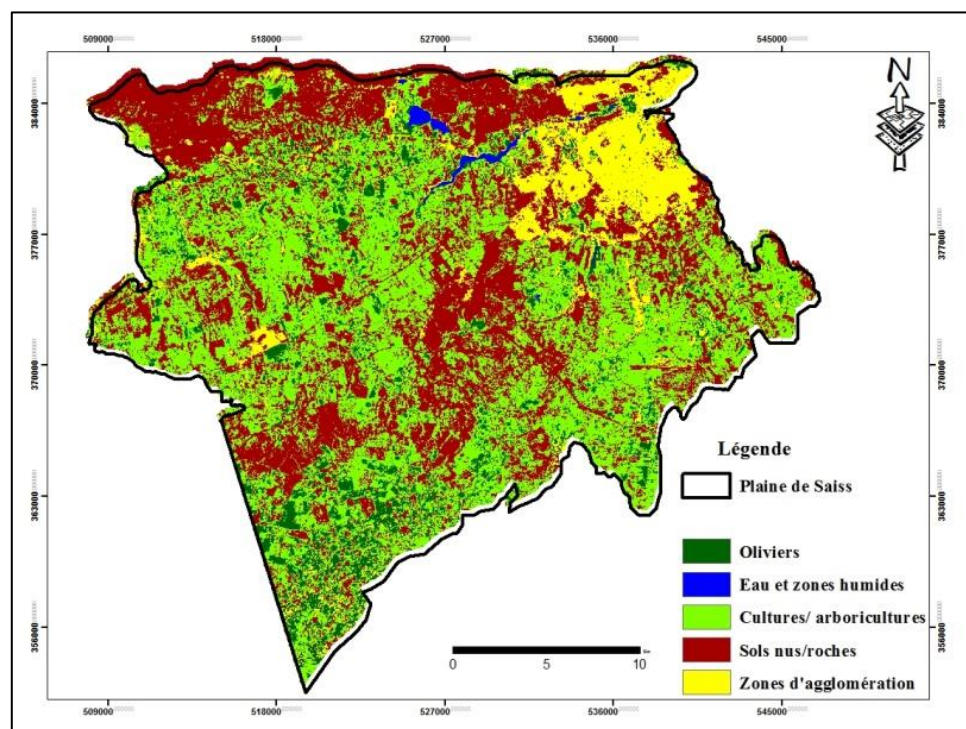


Figure 116 : Carte d'occupation du sol issue de l'image Landsat TM 2011

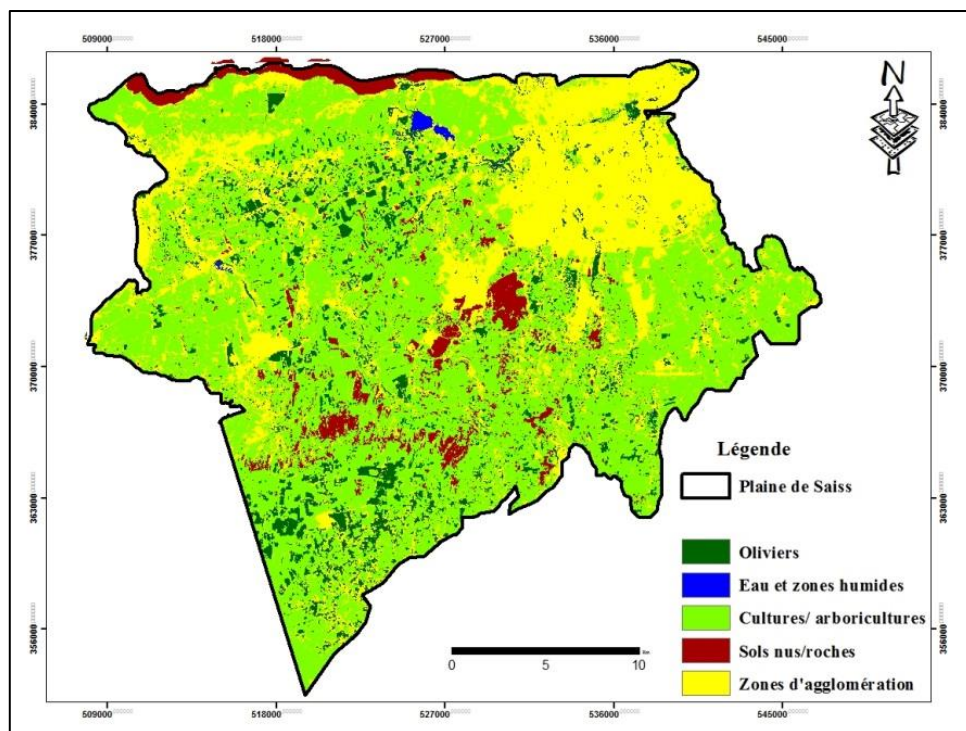


Figure 117 : Carte d'occupation du sol issue de l'image Landsat Oli 2017

4.1. Pertinence de la classification

D'après Girard (1999), il n'est pas toujours évident d'affecter un pixel à une classe donnée ni d'associer sur le terrain un relevé à une classe précise, d'où la nécessité d'évaluer dans l'ensemble l'efficacité de la classification. Pour définir la qualité de cette dernière, les paramètres suivants sont utilisés : Calcul de matrice de confusion et l'analyse par le coefficient de KAPPA.

A. Calcul de matrice de confusion

Sur la matrice de confusion, la précision d'une classification correspond aux pourcentages des pixels bien classés traduits par les valeurs sur la diagonale. Les autres valeurs permettent d'analyser les proximités radiométriques entre les différentes classes et de juger ainsi de l'importance des confusions thématiques. Ces matrices permettent de juger la pertinence de l'algorithme de classification (Omari, 2005). L'idéal serait d'obtenir une matrice dont les valeurs sur la diagonale sont de 100%, ce qui signifierait que pour chaque classe, tous les pixels observés sur les sites d'entraînement ont été affectés à la bonne classe lors de la procédure de classification.

B. Coefficient de Kappa

Le coefficient de Kappa a une valeur légèrement inférieure à la précision totale, ce dernier exprime le taux d'erreurs à éviter et qui seraient obtenues lors de l'échantillonnage qui doit être complètement au hasard (Dos Santos, 2001). Les valeurs du coefficient de Kappa estimées dans notre cas sont : 91.74 %, 94.17 % et 98.80 % respectivement aux années 1987, 2011 et 2017, sachant que la valeur critique de ce dernier au-delà de laquelle une classification est jugée acceptable est de 75 % (Girard, 1999). Donc une bonne correspondance entre la cartographie issue de la classification de données de la télédétection et les observations de terrain est établie.

D'après la matrice de confusion de l'image classée pour l'année 1987 (Tableau 41), on peut dire que presque la totalité des pixels affectés à ces classes ont été bien classés. Les faibles confusions constatées ne dépassent pas les 6 % pour la majorité des classes. Les classes sont clairement séparées et ne montrent pas des chevauchements (minimum de pixel de chevauchement entre les différentes classes). Les confusions les plus élevées ont été retrouvées pour les classes (Cultures/ Arboricultures et Sols nus /Roches). La confusion entre les classes citées peut être expliquée par une réponse spectrale très proche. D'autre part l'indice de kappa calculé à partir de la matrice de confusion a une valeur de 0.917 et renseigne qu'environ 92% de la classification a été bien choisi. Cet indice montre une bonne séparabilité entre les classes, ce qui donne une idée sur la qualité de la classification.

Tableau 45 : Matrice de confusion de classification de l'image TM-Landsat pour l'année 1987

	Oliviers	Cultures/ Arboricultures	Eau et zones humides	Zones d'agglomération	Sols nus /Roches
Oliviers	98.94	0.13	0	0.1	0.3
Cultures/ Arboricultures	0.76	94.39	0	2.65	5.13
Eau et zones humides	0	0	99.36	0	0
Zones d'agglomération	0.15	2.04	0.64	96.76	2.02
Sols nus/Roches	0.15	3.44	0	0.49	92.54
Total	100	100	100	100	100
Indice de Kappa	91.74%				

L'analyse de matrice de confusion de l'image classée pour l'année 2011 (Tableau 42), indique que presque la totalité des pixels affectés à ces classes ont été bien classés. Les classes sont clairement séparées et ne montrent pas des chevauchements (minimum de pixels de chevauchement entre les différentes classes). De même pour 1987, les confusions les plus élevées ont été retrouvées dans les classes (Cultures/ Arboricultures et Sols nus /Roches). La confusion entre les classes citées peut être expliquée par une réponse spectrale très proche. D'autre part l'indice de kappa calculé à partir de la matrice de confusion qui prend une valeur de 0.941 renseigne qu'environ 94% de la classification a été bien choisi. Ce qui indique une bonne qualité de la classification.

Tableau 46 : Matrice de confusion de classification de l'image TM-Landsat pour l'année 2011

	Oliviers	Cultures/ Arboricultures	Eau et zones humides	Zones d'agglomération	Sols nus /Roches
Oliviers	95.76	0.15	0	0	0
Cultures/ Arboricultures	4.24	87.33	0	0	3.98
Eau et zones humides	0	0	100	0	0
Zones d'agglomération	0	0	0	99.76	0.09
Sols nus/Roches	0	12.52	0	0.24	95.93
Total	100	100	100	100	100
Indice de Kappa	94.17%				

A travers la matrice de confusion de l'image classée pour l'année 2017 (Tableau 43), presque la totalité des pixels affectés à ces classes ont été bien classés. Les faibles confusions constatées ne dépassent pas 2 % pour la majorité des classes. Les confusions sont presque nulles.

Tableau 47 : Matrice de confusion de classification de l'image TM-Landsat pour l'année 2017

	Oliviers	Cultures/ Arboricultures	Eau et zones humides	Zones d'agglomération	Sols nus /Roches
Oliviers	99.89	0.2	0.11	0	0
Cultures/ Arboricultures	0.11	99.61	0	0.91	0.97
Eau et zones humides	0	0	98.58	0	0
Zones d'agglomération	0	0.19	1.31	99.09	0.62
Sols nus/Roches	0	0	0	0	98.41
Total	100	100	100	100	100
Indice de Kappa	98.80%				

Les différents traitements effectués sur les trois scènes des images pendant la période de 1987 à 2017 ont permis d'obtenir la carte des changements d'occupation des sols. L'utilisation des données de télédétection à travers la dynamique de la couverture des sols et de la composition colorée diachronique a permis de mettre en évidence les différents changements qui ont eu lieu entre 1987 et 2017. Ces changements concernent les mutations des unités paysagères dans cette zone.

L'analyse de la carte des changements pour toute la zone a montré l'impact de l'effet anthropique reflété par l'extension des zones d'agglomération. En effet, l'observation du tableau 44 qui représente les pourcentages des surfaces d'occupation du sol déduit de la matrice de confusion montre que : Cette zone a subi des changements importants liés à des conditions climatiques sévères notamment la sécheresse, ainsi qu'à des conditions anthropiques défavorables.

4.2. Comparaison des superficies

Pour faire une étude comparative entre les superficies occupées par les différents éléments d'occupation du sol dans la Plaine de Saïss entre 1987 et 2017, on a limité les classes de classification (SVM) seulement à 5 classes. Généralement, d'après les deux cartes d'occupation du sol (Figures 117 et 118) une régression remarquable des sols nus et de l'eau devrait être une évidence devant une augmentation des superficies d'activités humaines notamment les surfaces agricoles et les zones de constructions et d'habitats.

Tableau 48 : Evolution de la superficie d'occupation du sol entre 1987 et 2017(en Km²)

Années	Les classes d'occupation du sol				
	Cultures/ Arboricultures	Eau /Zones humides	Oliviers	Sols nus/Roches	Zones d'agglomération
2017	55973.800	102.560	8035.230	5404.530	28650.600
2011	10149.000	111.060	2034.150	8812.440	2410.830
1987	3735.660	127.800	1962.240	5615.740	973.200

Cela montre le développement qu'a connu la Plaine de Saïss pendant la dernière trentaine d'années non seulement sur le plan agricole mais aussi sur le plan urbain dû à l'expansion démographique de la région.

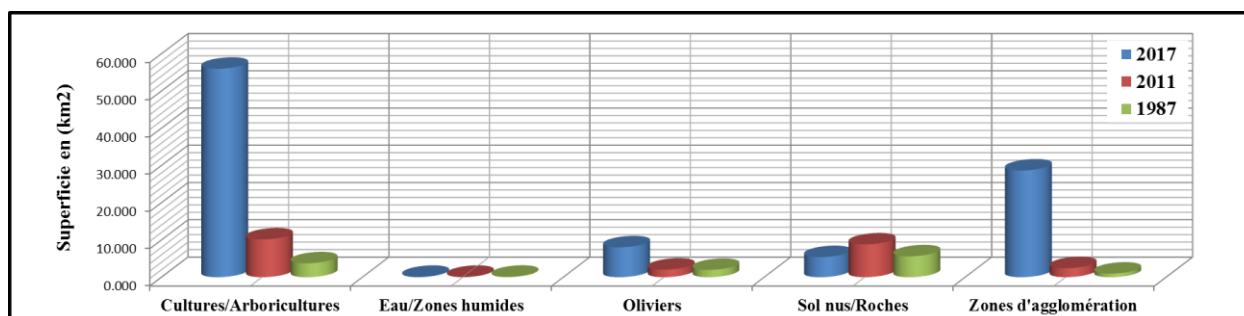


Figure 118: Histogramme des superficies par classes entre 1987 et 2017

D'après les figures 118 et 119 et malgré la diminution de la surface de l'eau de 3km² durant la dernière trentaine d'année, la superficie occupée par les cultures a connu une augmentation estimée de 133 km² entre 1987 et 2017. De même la surface des oliviers s'est développée pendant la même période sur environ 415 km². Les zones d'habitats ont progressé avec une augmentation d'environ 68km². Toutes ces augmentations expliquent la régression du sols nus 613 km² pendant la même période.

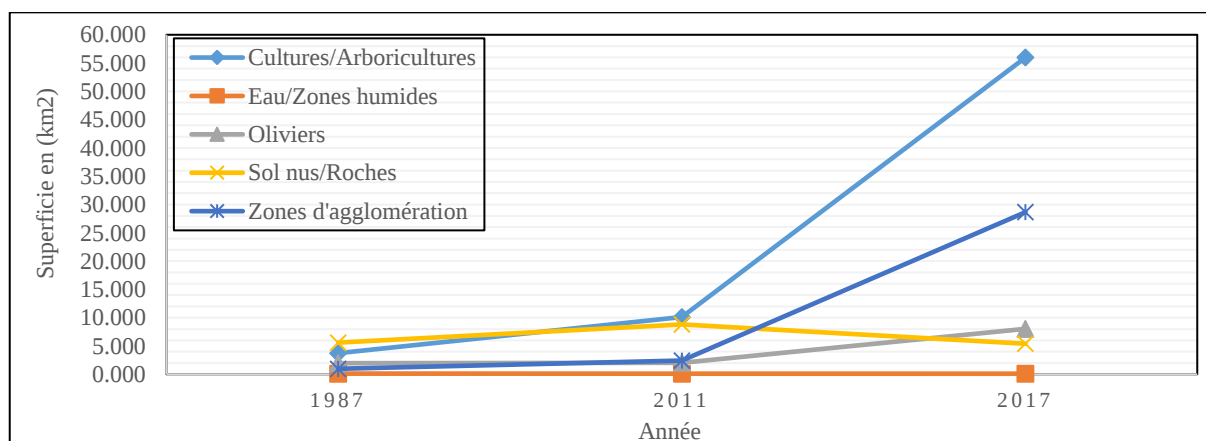


Figure 119: Evolution des superficies des classes d'occupation du sol de la Plaine de Saïss (1987-2017)

Les dégradations produites entre 2011 et 2017 ont conduit à l'extension des sols nus, à raison de + 10 % entre 1987 et 2011. Cependant, les cultures et les habitats ont connu une augmentation rapide produisant une réduction des sols nus.

Ces résultats montrent que le couvert végétal fluctue dans l'espace et dans le temps. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces fluctuations, notamment la pression anthropique (incendies, surpâturage, activités agricoles...), l'application de techniques inappropriées, les attaques parasitaires ainsi que la fréquence des périodes sèches.

4.3. Impacts de l'évolution climatique

La Plaine de Saïss est caractérisée par d'importantes variations interannuelles de la pluviométrie, avec une alternance des années déficitaires et des années excédentaires. Ces variations ont pour conséquence l'apparition de périodes de sécheresse. Le déficit pluviométrique qui en résulte entraîne la rareté, voire la disparition, des espèces pérennes (réduction de la densité du couvert végétal), tandis que le

surplus pluviométrique mène à la régénération de la végétation disparue par les incendies et les différentes formes de dégradation.

5. Application des indices

Les mois de juin, juillet et août sont fixés comme des dates de référence pour toutes les images traitées pour mettre l'accent sur la végétation qui pousse toute l'année et les surfaces d'eau permanentes afin de suivre leurs évolutions dans le temps et dans l'espace. Les images recueillies sont ensuite calibrées et corrigées géométriquement et radiométriquement.

5.1. Variabilité spatio-temporelle de la végétation par NDVI

Les propriétés optiques de la végétation, sa réflectance élevée dans le domaine du proche infrarouge et une absorption élevée dans le domaine du rouge, sont très contrastées par rapport à la plupart des autres éléments de la surface terrestre. Ces propriétés rendent relativement simple la détection des surfaces végétales. La série chronologique de NDVI, étant créée par le regroupement des valeurs de NDVI de toutes les images entre 1987 et 2017 dans la Plaine de Saïss a conduit à cartographier et mesurer les superficies végétales. Néanmoins, l'indice de végétation par différence normalisée ne dépasse pas 0,74 en 2007 comme valeur maximale (Figure 119) sachant que théoriquement, le NDVI prend des valeurs qui varient entre -1 et 1.

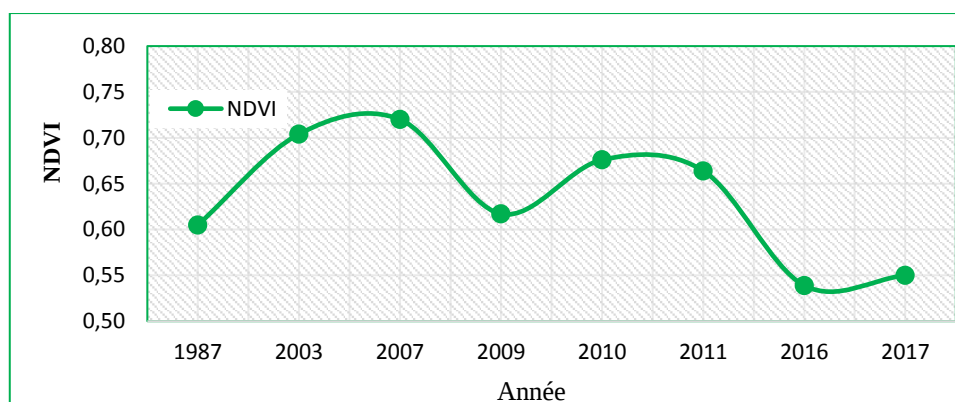


Figure 120: Valeurs de NDVI issues des images Landsat de la Plaine de Saïss entre 1987 et 2017

D'après la figure 119 et le tableau 45, l'évolution globale de la superficie recouverte par la végétation entre 1987 et 2017 dans la Plaine de Saïss a progressé d'une superficie d'environ 12578.8km² en 1987, à 3629.9 km² en 2003. Cependant, en 2007 une faible régression a été marquée pour atteindre une superficie de 2520.2 km². Après, généralement, la superficie occupée par la végétation a continué à accroître jusqu'à 2016 où elle occupe environ 15886.1km², avec une légère diminution en 2017 avec 13836.5km².

Tableau 49 : Paramètres de l'évolution des surfaces végétales dans la Plaine de Saïss entre 1987 et 2017

Année	NDVI	Nombre de pixel	Superficie (km ²)	Superficie (%)	Taux de variation (km ²)	Taux de variation (%)
1987	0.61	20962	1257.7	11		
2003	0.70	120998	3629.9	15	2372.22	188.61
2007	0.72	84008	2520.2	11	-1109.70	-30.57
2009	0.62	93705	2811.2	12	290.91	11.54
2010	0.68	133300	3999	16	1187.85	42.25
2011	0.66	121467	3644.0	15	-354.99	-8.88
2016	0.54	529537	15886.1	17	12242.10	335.95
2017	0.55	461216	13836.5	14	-2049.63	-12.90

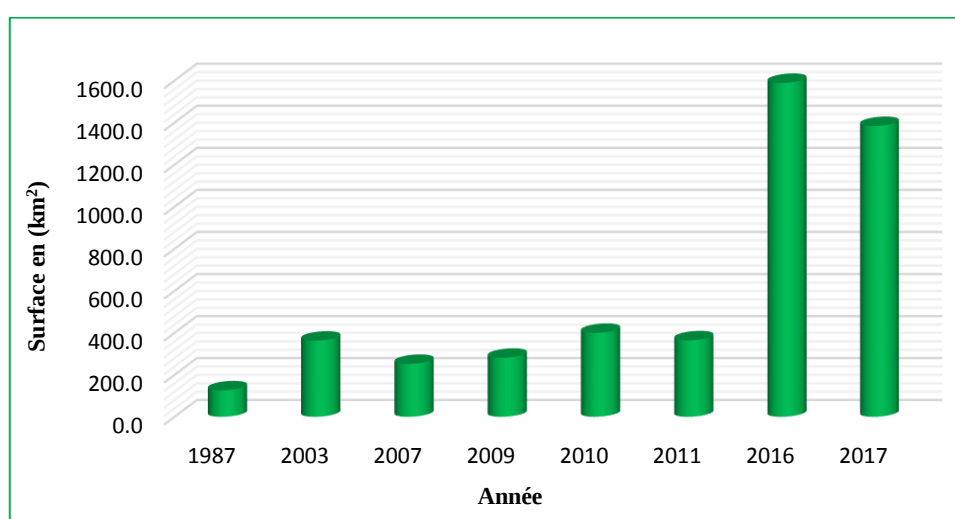


Figure 121: Evolution des surfaces végétales dans la Plaine de Saïss entre 1987 et 2017

Normalement les conditions climatiques jouent un rôle primordial dans la variation des surfaces occupées par la végétation et surtout les pluies qui influencent immédiatement l'accroissement ou la régression de cette surface végétale dans une zone donnée. Cependant, dans la Plaine de Saïss malgré la grande variation des précipitations d'une année à l'autre pendant toute la période 1987-2017, la superficie couverte par la végétation est indépendante de la variation des pluies. Une diminution des taux pluviaux entre 1987 (583mm) et 2007 (330mm) (Figure 120) est marquée néanmoins par une superficie occupée par la végétation d'environ 1257.7km² en 1987 contre 2520.2 km² en 2007 et un accroissement remarquable d'environ 1262,5km². Cela peut être expliqué par le développement des systèmes d'irrigation devenus bien développés dans la Plaine de Saïss et l'augmentation des investissements dans le domaine agricole et l'intégration d'irrigation.

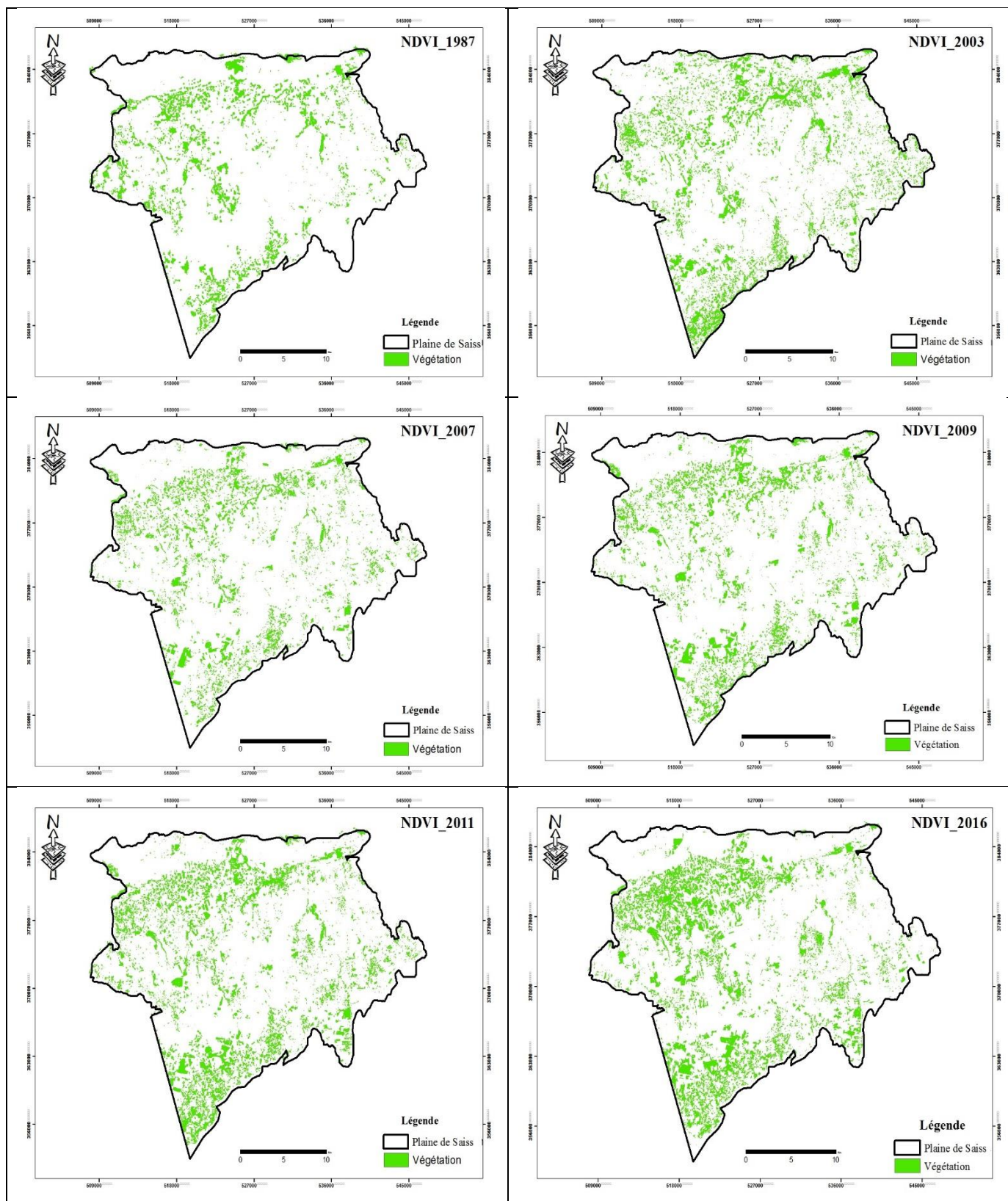


Figure 122: Cartes multi-temporelles du NDVI de la Plaine du Saïss entre 1987 et 2017

5.2. Variabilité spatio-temporelle des surfaces d'eau par NDWI

La signature spectrale des surfaces d'eau, comme tous les objets de la surface de la terre, varie légèrement dans le temps ; elle dépend de plusieurs facteurs : distance Terre-Soleil, superficie, composition chimique, date de prise de l'image, type de capteur et effets atmosphériques. Le traitement des images tend à adoucir l'impact de ces facteurs sur la réflectance pour homogénéiser l'empreinte spécifique de chaque objet.

L'indice de l'eau par différence normalisée NDWI calculé à partir des images Landsat (Résolution spatiale 30 m), calibrées et corrigées des effets atmosphériques, prend ses valeurs entre 1 et -1. La valeur moyenne de NDWI dans la plaine est de l'ordre de 0,28 déterminée à travers les sites d'entraînements (Figure 122). A partir de cette valeur la cartographie des surfaces d'eau a été réalisée afin de suivre leurs dynamiques dans le temps et dans l'espace.

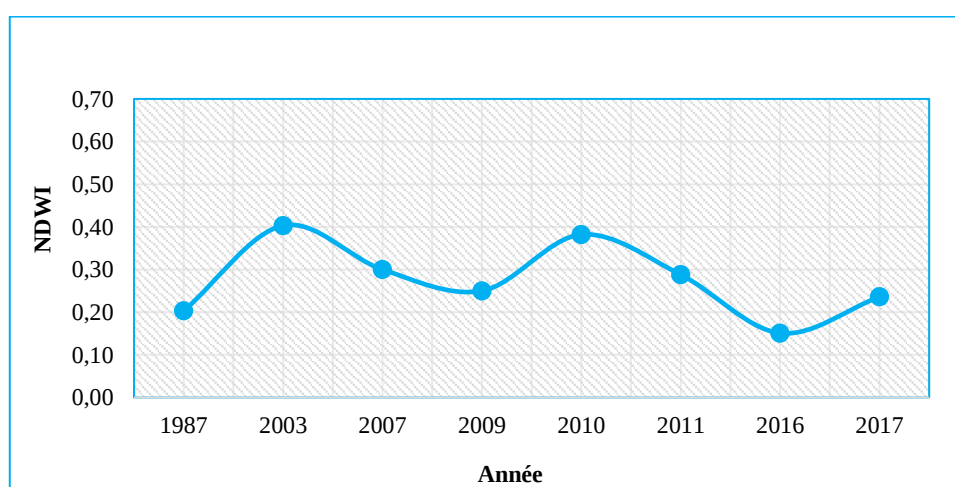


Figure 123: Variation de la signature spectrale de l'eau à partir des images Landsat après traitement de la Plaine de Saïss

L'analyse des cartes temporelles de NDWI (Figure 123 et tableau 46) montre une augmentation remarquable des surfaces d'eau dans la Plaine de Saïss d'environ 84.91% entre 1987 avec une superficie de 12.5 km² et 2003 avec une superficie de 153.2 km². Une régression globale a été indiquée du 2004 jusqu'à 2009 avec une superficie de 33 km². En 2010 l'eau n'a occupé que 49 Km² avant qu'elle atteigne des surfaces respectivement de 116.1 km² et 125.9 km² en 2016 et 2017.

Tableau 50 : Paramètres de variation de la superficie de l'eau dans la Plaine de Saïss (1987-201)

Année	NDWI	nombre de pixel	superficie (km ²)	superficie (%)	Taux de variation(km ²)	Taux de variation (%)
1987	0.20	209	12.5	0.11		
2003	0.40	1805	153.2	0.22	140.61	1121.29
2007	0.30	1506	45.2	0.19	-107.97	-70.50
2009	0.25	1099	33.0	0.14	-12.21	-27.03
2010	0.38	1647	49	0.21	16.44	49.86
2011	0.29	930	27.9	0.11	-21.51	-43.53
2016	0.15	3870	116.1	0.12	88.20	316.13
2017	0.24	4196	125.9	0.13	9.78	8.42

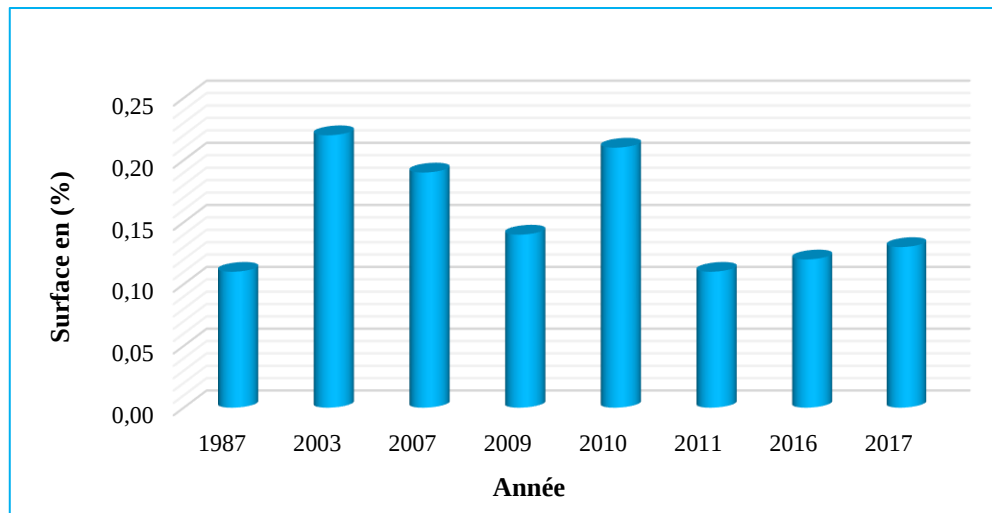


Figure 124: Evolution des surfaces de l'eau dans la Plaine de Saïss entre 1987 et 2017

La variation des surfaces d'eau peut être expliquée par plusieurs facteurs, la forte demande des ressources en eau avec les changements climatiques (accroissement de la population, activités agricoles intenses...).

L'indice de l'eau par différence normalisée montre une forte corrélation avec les moyennes des hauteurs mensuelles de pluie (Figure 124), chose qui apparaît évidente puisque ce facteur reste le plus exigeant dans l'interprétation de ces changements. Les surfaces d'eau importantes ont été enregistrées pendant les années 2003 et 2010, 2016 cela s'explique par le taux de précipitation important qu'a connu la Plaine de Saïss durant ces années.

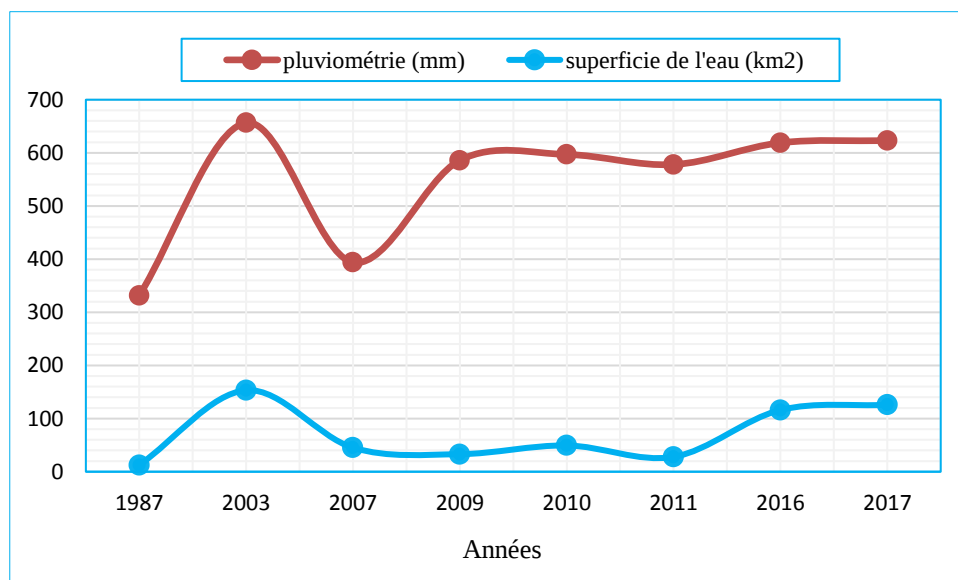


Figure 125: Corrélation entre NDWI et les moyennes des hauteurs annuelles des précipitations dans la Plaine de Saïss

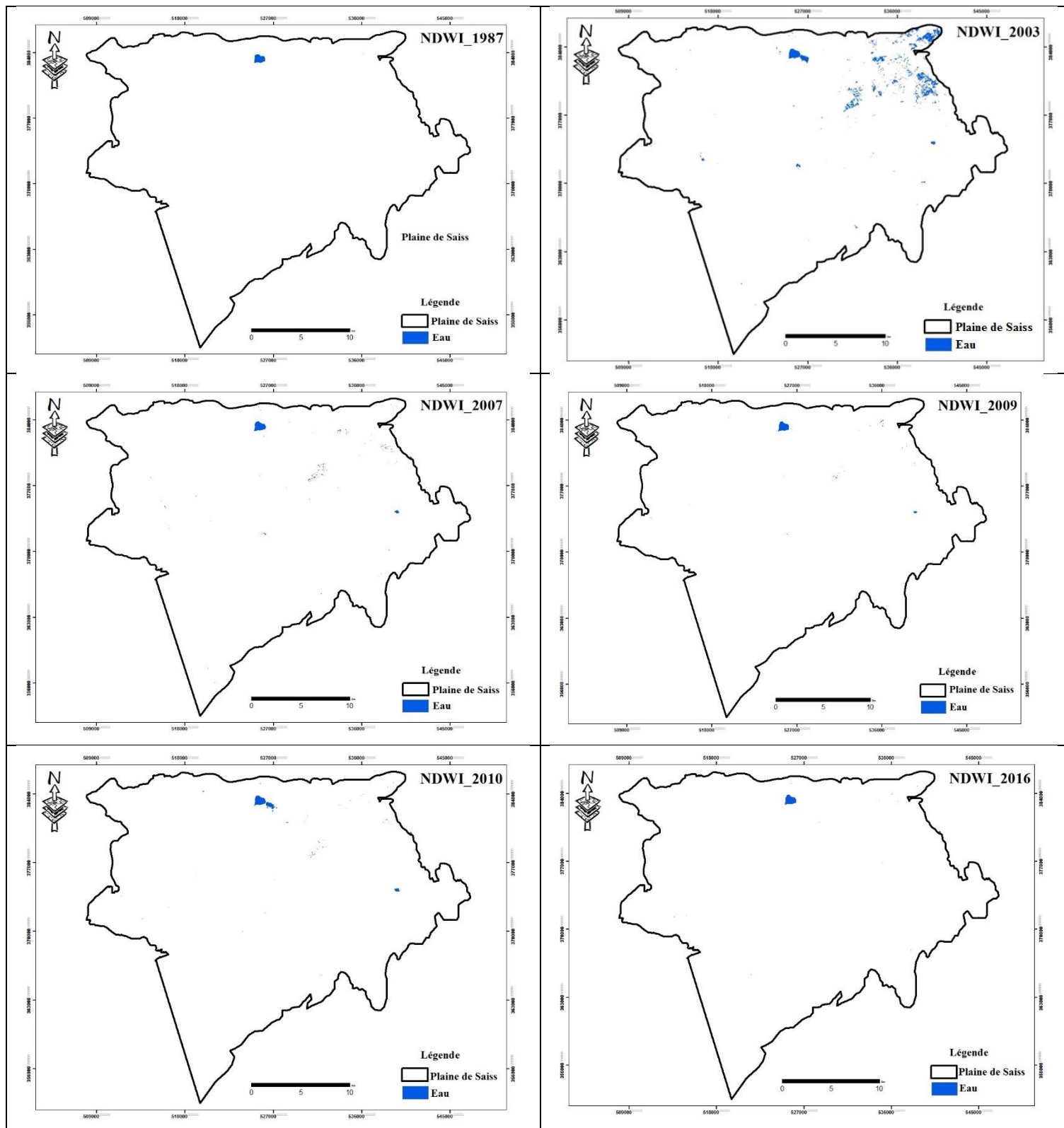


Figure 126: Cartes multi-temporelles du NDWI de la Plaine de Saiss entre 1987 et 2016

5.3. Variabilité spatio-temporelle du sol par NDSI

La connaissance des paramètres de l'évolution de la superficie du sol (tableau 47) a permis de suivre la variation de l'indice du sol (superficie du sol) par différence normalisée NDSI pendant la période 1987-2016 (figure 126).

Ce dernier prend des valeurs comprises entre -1 et 1 et change selon les mêmes conditions que NDWI (conditions atmosphériques, type de capteur et image, la date d'acquisition des images...etc.).

Tableau 51 : Paramètres de l'évolution de la superficie du sol dans la Plaine de Saïss (1987-2017)

Année	NDSI	Nombre de pixel	Superficie (km ²)	Superficie (%)	Taux de variation (km ²)	Taux de variation (%)
1987	0.15	176801	10608.1	89.40		
2003	0.34	698773	20963.2	85.24	10355.1	97.62
2007	0.44	705554	21166.6	89.36	203.4	0.97
2009	0.26	693128	20793.8	88.09	-372.8	-1.76
2010	0.36	660192	19805.8	83.61	-1488.2	-4.75
2011	0.25	668095	20042.9	84.63	237.1	1.20
2016	0.11	264431	7932.9	34.15	-12109.9	-60.42
2017	0.18	284165	8525.0	39.14	592.0	7.46

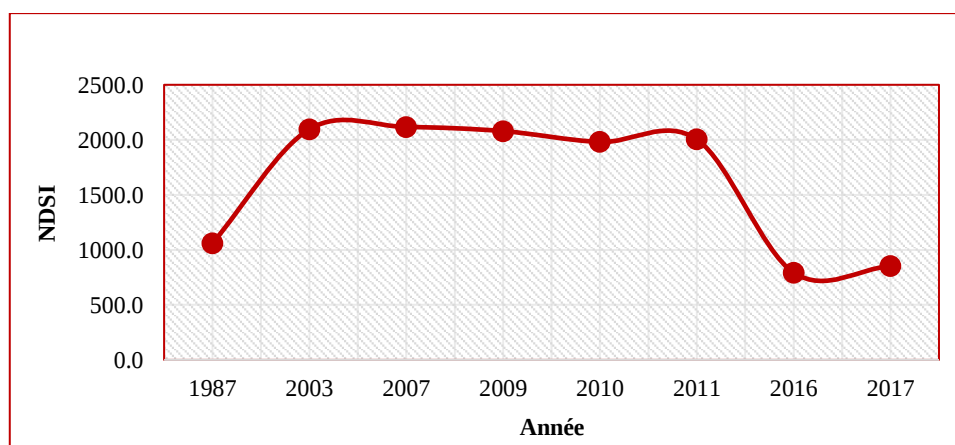


Figure 127: Variation du NDSI de la Plaine de Saïss des images Landsat entre 1987 et 2017

L'analyse de la série temporelle des cartes de NDSI montre en général une diminution des surfaces du sol pendant les dernières 31 ans dans la Plaine de Saïss. En 1987, le sol nu a occupé environ 10608.1 km², cette surface a augmenté pour atteindre sa valeur maximale avec 21166.6 km² en 2007. Dès cette date le recul des superficies du sol nu dans la Plaine de Saïss a commencé et continué jusqu'à 2009 avec 20793.8 km². Cependant en 2016 et 2017 le sol nu n'a respectivement occupé que 7932.9 km² et 8525.0 km² marquant une régression plus importante de 12641,6 km² de moins en 2016. Tandis qu'une légère augmentation a été enregistré en 2017 (Tableau 47 et Figure 127).

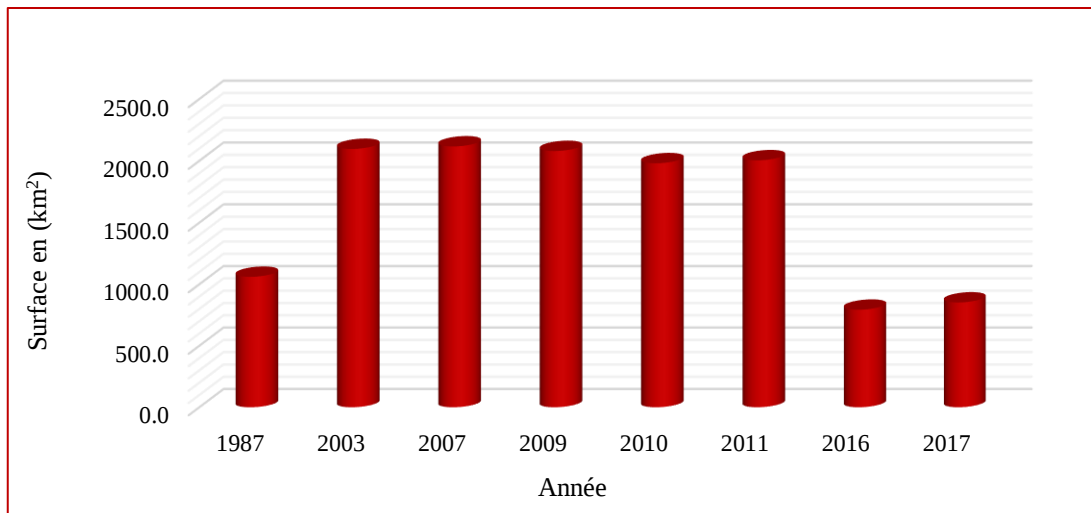


Figure 128: Variation des superficies du sol nu de la Plaine de Saïss entre 1987 et 2017

Le sol réfléchit mieux dans l'infrarouge moyen (MIR) et contrairement à la végétation, il absorbe une grande partie du proche infrarouge (PIR). De plus, la Plaine de Saïss présente une superficie favorable en termes de nature, texture et épaisseur du sol pour l'agriculture diversifiée et par conséquent l'opportunité d'exploitation des terres de Saïss est toujours possible avec la présence des conditions favorables (eau d'irrigation, subvention de l'état...etc.). De ce fait, Ces deux entités sont toujours liées l'une à l'autre, ce qui explique la variation synchronisée entre les deux (NDSI et NDVI) montrant une évolution opposée.

Les capteurs de la télédétection spatiale (Landsat TM et OLI) permettent l'enregistrement des rayonnements réfléchis par les surfaces terrestres et par la suite la détection des caractéristiques physiques et biologiques de l'élément qui recouvrant cette surface. Par conséquent, plus il y a des surfaces recouvertes par la végétation plus une régression des surfaces occupées par le sol se manifeste. A titre d'exemple en 1987 la surface recouverte par la végétale est de 1257.7km² et celle du sol nu est de 10608.1 km² et en 2016 les surfaces occupées sont respectivement de 15886,1 km² et 7932.9km²

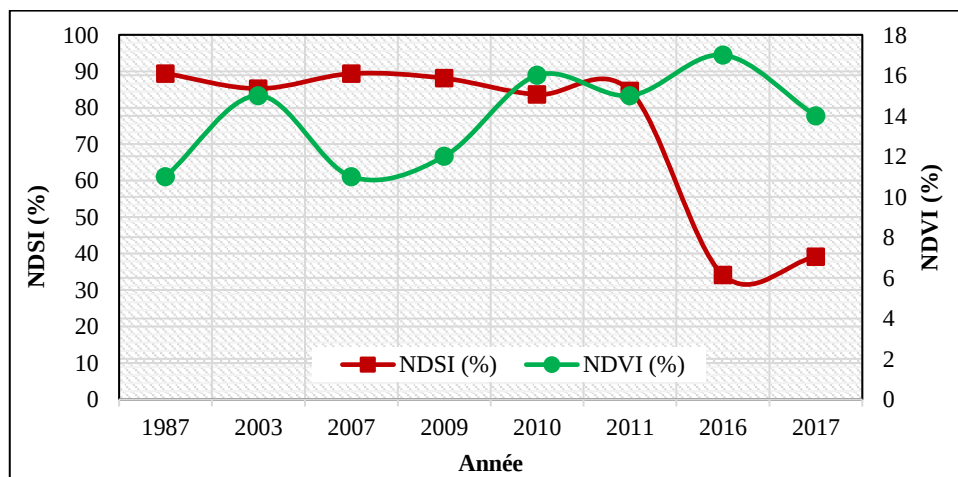


Figure 129: Variation des indices NDSI et NDVI de la Plaine de Saïss entre 1987 et 2017

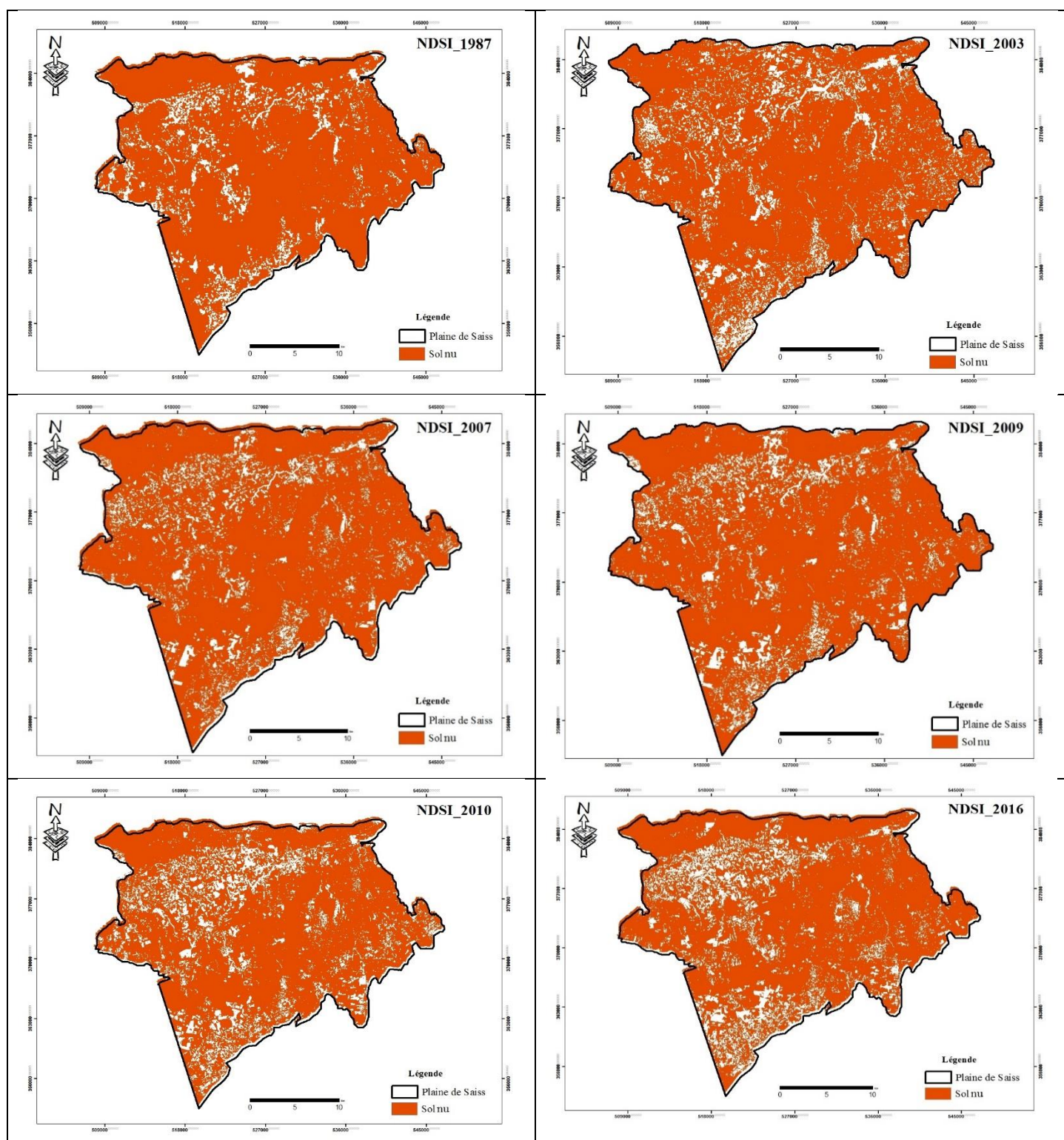


Figure 130: Cartes multi-temporelles du NDSI de la Plaine de Saïss entre 1987 et 2017

Généralement, les résultats ainsi obtenus montrent que :

- Les données de terrain et les images de NDVI révèlent également un accroissement de la végétation de 14% depuis 1987 ;
- L'analyse des cartes de NDWI élaborées à partir des images Landsat, montrent un recul global des étendues d'eau dans la plaine d'environ 10 % dans ces dernières 30 années ;
- La surface occupée par le sol a été de l'ordre de 89.4 % en 1987, après 30 ans son extension est estimée à 39.14% c'est ce qui a été obtenue par l'analyse des cartes NDSI.

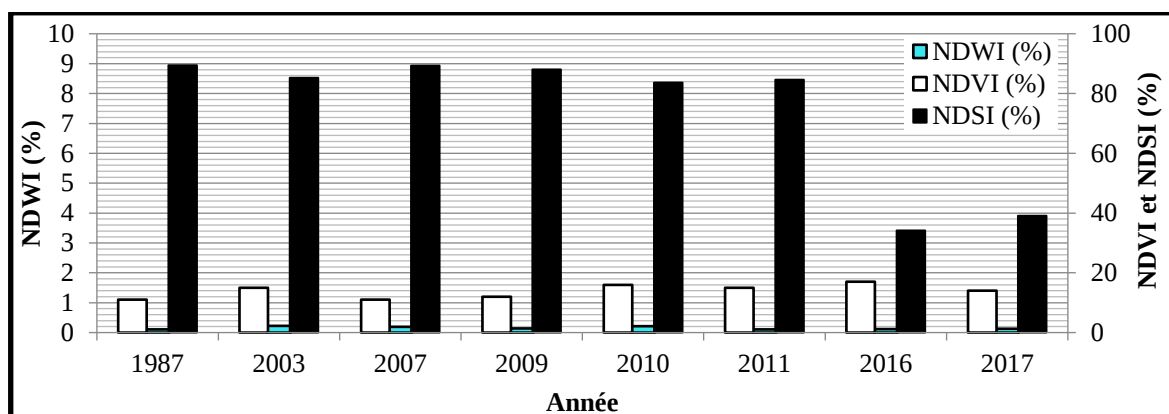


Figure 130 : Evolution des indices de la végétation (NDVI), du sol (NDSI) et de la surface d'eau (NDWI) dans la Plaine du Saïss depuis 1987

6. Application de la technique « Change detection »

Afin de mieux détecter les changements de l'occupation du sol dans la Plaine de Saïss et multiplier les méthodes de traitement des images satellitaires, la technique de « Change detection » appliquée sur les images Landsat apparaît évidente. Dans ce cas on procède par différence entre deux images de NDVI de deux dates différentes :

$$\begin{aligned} \text{NDVI}_{2003} (\text{Landsat}) - \text{NDVI}_{1987} (\text{Landsat}) &= \text{Change detection}_{2003-1987} (\text{Landsat}) \\ \text{NDVI}_{2010} (\text{Landsat}) - \text{NDVI}_{2003} (\text{Landsat}) &= \text{Change detection}_{2010-2003} (\text{Landsat}) \\ \text{NDVI}_{2017} (\text{Landsat}) - \text{NDVI}_{2010} (\text{Landsat et Oli}) &= \text{Change detection}_{2017-2010} (\text{Landsat et Oli}) \end{aligned}$$

Sur toutes les cartes produites par « Change detection », la couleur bleue indique les zones d'extension de la végétation, la couleur rouge indique les zones où le couvert végétal a régressé (disparu), en fin la couleur blanche représente les zones inchangées.

La différence entre le NDVI de l'image de 2003 et celui de l'image de 1987 montre une régression du couvert végétal à environ 47.76 km² contre une augmentation d'environ 631 km² pendant la même période (Figure 130). Cela confirme les résultats déjà extraits par la méthode traditionnelle (une augmentation de la surface couverte par végétation d'environ 583,24 km²). C'est une évolution parallèle aux données pluviométriques qui montrent un fort cumul annuel des pluies pendant 2003.

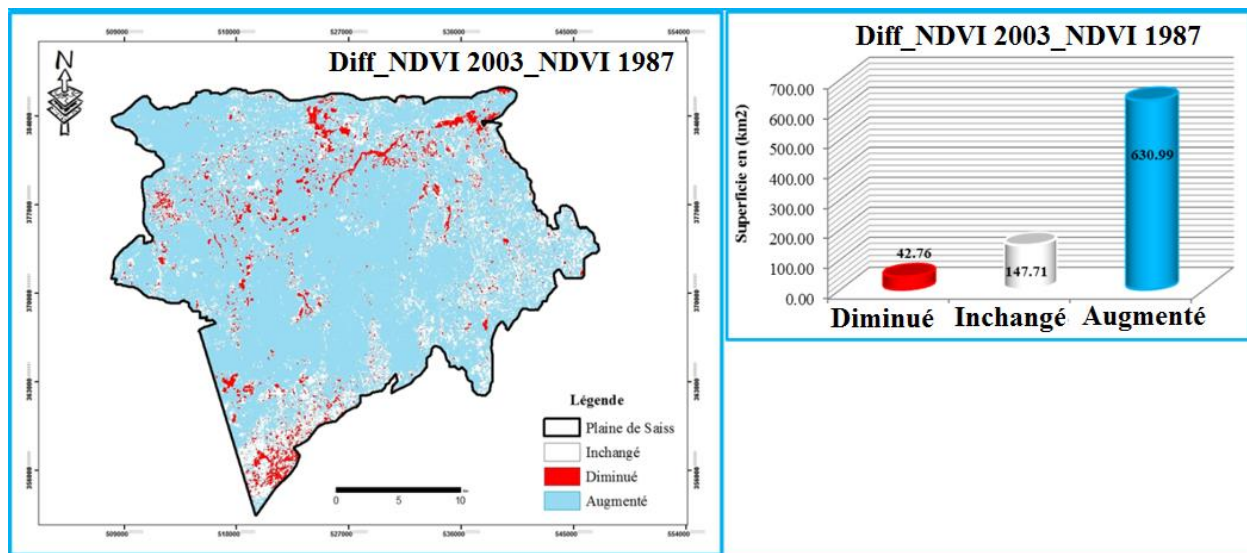


Figure 131: Détection du changement du couvert végétal de la Plaine de Saïss par différence de NDVI entre 1987 et 2003

L'analyse de la différence (change détection) des images entre 2003 et 2010, montre une régression des superficies végétales au niveau de la Plaine de Saïss ; cette régression est estimée à 284.02 km² en opposition à une augmentation d'environ 163 km². Le bilan est négatif avec une diminution globale des superficies végétales d'environ 121,02 km² (Figure 131).

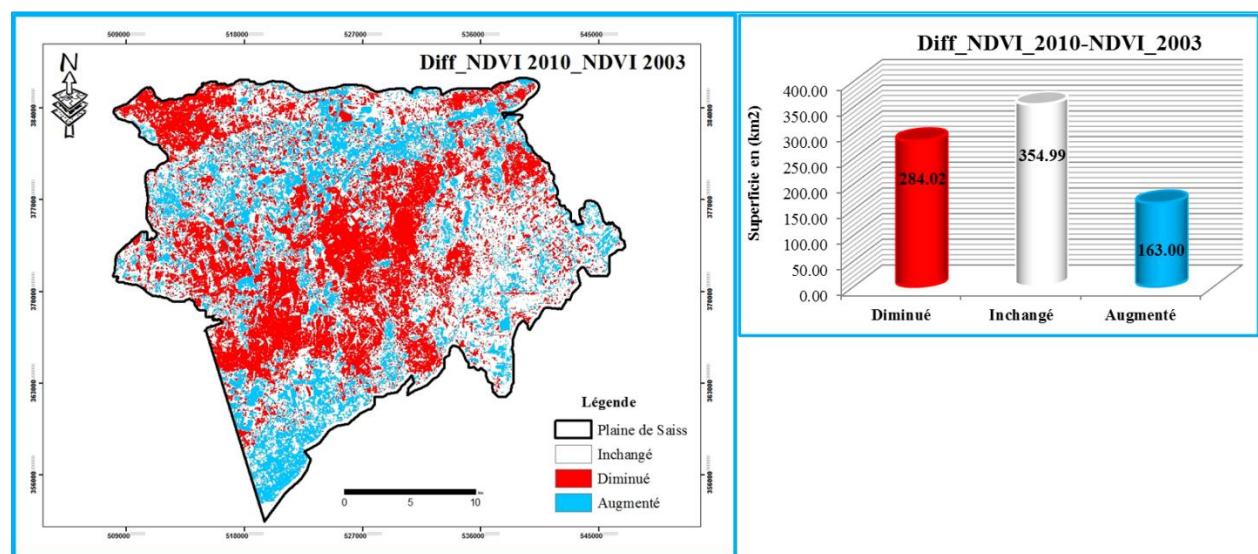


Figure 132: Détection du changement du couvert végétal de la Plaine de Saïss par différence de NDVI entre 2003 et 2010

L'analyse de la carte du changement du couvert végétal entre 2010 et 2017, cette dernière montre une extension de la végétation dans la Plaine de Saïss estimée 234.08 km² et un recul du couvert végétal pendant la même période d'environ 195.24 km² (figure 132). Donc un bilan d'augmentation de la surface végétale de 38,84 km² entre 2010 et 2017.

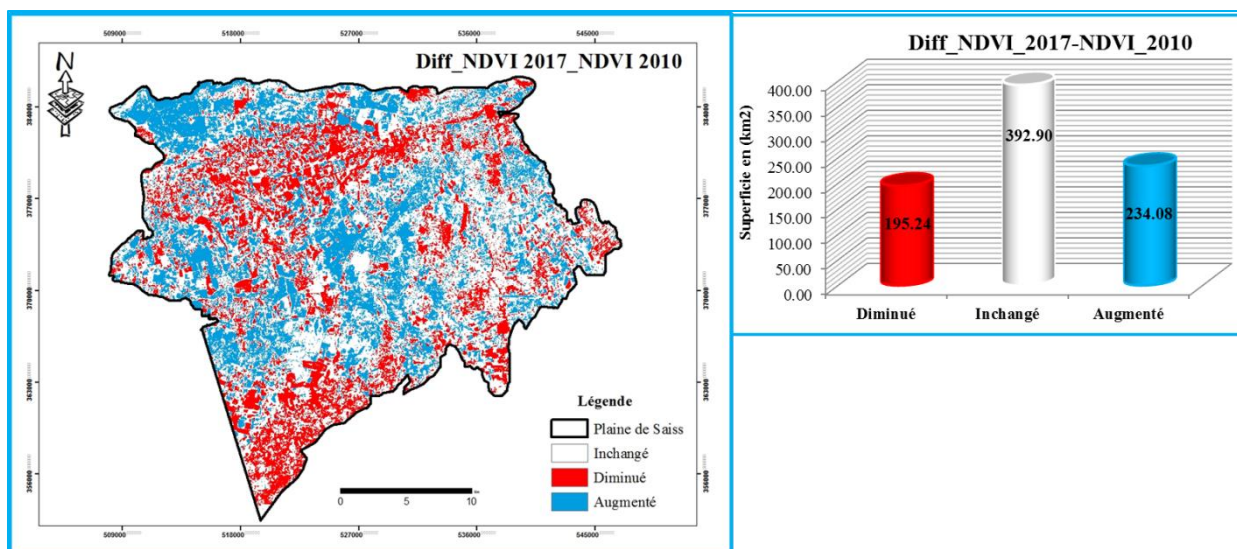


Figure 133: Détection du changement du couvert végétal de la Plaine de Saïss par différence de NDVI entre 2010 et 2017

IV. Discussion

L'apport de la télédétection dans l'évaluation et le suivi de la sécheresse dans la Plaine de Saïss entre 1987 et 2017 a été réalisé grâce à l'application des indices de traitement et analyse des images satellitaires. Ces dernières issues du capteur Landsat TM (1987, 2003, 2007, 2009, 2010 et 2011) et Landsat OLI (2016 et 2017) qui ont été traitées et analysées par plusieurs outils et méthodes notamment la technique « change detection », les indices de l'eau (NDWI), du sol (NDSI) et de la végétation (NDVI). Ces traitements et analyses ont permis de cartographier l'évolution des éléments d'occupation du sol dans la Plaine de Saïss montrant une régression globale des surfaces de l'eau dans la Plaine de Saïss d'environ 10% dans les dernières 30 années et une diminution des surfaces du sol dans la Plaine de l'ordre de 89.4 % en 1987 et environ 39.14% après 30 ans. Cependant, les cartes multi-temporelles de NDVI montrent une évolution globale importante de la superficie recouverte par la végétation, environ 14% de la surface de la plaine entre 1987 et 2017. Dans le détail, l'analyse des images Landsat TM et OLI, montre que le couvert végétal a connu une légère évolution entre 1987 et 2003 estimé à environ 583,24 km² de la surface totale de la Plaine de Saïss. Cependant, de 2003 jusqu'à 2010 la superficie couverte par la végétation a été bien moins développée et atteint une surface d'environ 121,02 km² de la surface en km² de la Plaine de Saïss. Toutefois, Entre 2010 et 2011 une très faible augmentation de la surface occupée par la végétation proche 38,84 km² a été indiquée.

Les variations spatio-temporelles de l'occupation du sol remarquées, semblent normales et corrélées aux la variation des taux pluviaux annuels. Les années à forte pluviométrie montrent une forte augmentation des superficies végétales, mais dans le cas des années sèches, une faible régression se marque. Cela s'explique par l'irrigation moderne avec des méthodes efficaces à différents stades et étapes de cultures (irrigation, fertilisant, récolte, ...etc.).

Cette augmentation des surfaces végétales et la diminution des ressources en eau pose un problème et augmente la pression énorme sur les ressources hydriques de la région. Ce problème est sûrement déjà pris en compte par les décideurs et des solutions sont déjà en cours (Le goutte à goutte par exemple financer par l'état en grande partie). Cependant, seule une enquête sur le terrain sera capable de dénicher les vrais problèmes de besoins en eau et les conséquences de l'abus d'utilisation des eaux des nappes et par des forages clandestins ou non recensés.

En dépit de la double contrainte démographique et climatique à laquelle est soumis la Plaine de Saïss, l'état de son couvert végétal et son évolution semblent un peu inquiétants. La base cartographique

mise en place constitue un outil de gestion des unités de conservation et de suivi de l'évolution des couverts végétaux et de l'occupation des sols. Couplée aux systèmes d'informations géographiques (SIG), la télédétection apparaît comme un outil efficace à mettre à la disposition des gestionnaires, dans ce domaine le travail réalisé constitue une première approche. Il a pour objectif de faire un suivi de l'évolution du couvert végétal dans la Plaine de Saïss. Au-delà de l'aspect pratique de cette étude, elle ouvre des pistes pour mener des projets d'aménagement et de réhabilitation du couvert végétal.

Afin de mieux cerner les problèmes, la télédétection pourrait toujours approfondir les analyses et les études, ainsi pour détecter les différents changements de l'occupation du sol dans la Plaine de Saïss d'une manière plus exacte, détaillée et plus rentable, une série d'images satellitaires à haute résolution spatiale couvrant toute la période d'étude (1987 à 2017) avec une résolution temporelle régulière est nécessaire. La série temporelle régulière d'image n'est pas disponible sur les sites web qui fournissent des images satellitaires gratuites. Donc l'étude a besoin d'investissements dans des images à haute résolution spatiale régulière. Les résultats de traitements de ces images associés à d'autres données climatiques (température, humidité, évapotranspiration), anthropiques (plans d'aménagement, nature d'irrigation, ...etc.) et un suivi d'état des lieux sur le terrain pourrait aboutir à une modélisation des variations des facteurs étudiés dans la Plaine de Saïss et à une simulation permettant une gestion participative des usagers des ressources en eau des surfaces agricoles de la région.

Dès son application en 2009, le plan Maroc vert vise l'amélioration de la production et l'augmentation des surfaces agricoles dans la région. Ce plan devait envisager une stratégie prenant en compte tous les facteurs capables de bouleverser l'objectif et /ou exigences socio-économiques.

V. Conclusion

L'évolution spatio-temporelle des surfaces du couvert végétal, d'eau et du sol dans la Plaine de Saïss, en calculant les différents indices spectraux (NDVI, NDWI et NDSI) des images Landsat et en utilisant la technique de détection des changements de la couverture terrestre était l'étape principale de notre objectif fixé.

Les résultats ainsi obtenus peuvent être expliqués par la variation de la pluviométrie qui montre une corrélation avec les indices calculés et aussi par les tentatives qui ont été mises en place dans la plaine du Saïss pour encourager l'investissement dans le domaine d'agriculture.

En fin, les objectifs dressés tels que, l'analyse des performances de détection des changements, la détection des changements de la couverture de la terre depuis 1987 jusqu'à 2017, Développement d'un système de classification pour classer la couverture terrestre et établir des cartes d'occupation des sols de chaque période du temps et la vérification de l'utilité des indices NDVI, NDSI et NDWI pour analyser la détection de changement de la couverture terrestre dans la zone d'étude, ont été atteints.

Enfin, la télédétection présente un outil privilégié en terme d'outils d'acquisition d'informations, elle permet d'avoir des données régulièrement distribuées dans l'espace et le temps pour caractériser les surfaces terrestres en termes d'occupation des sols. Ces données peuvent être utilisées dans un schéma de modélisation spatialisée pour appréhender le fonctionnement et la dynamique des agroécosystèmes. D'un point de vue économique, l'utilisation de la télédétection offre la possibilité de réduire les coûts d'obtention de l'information à l'échelle d'une zone donnée.

Chapitre 4

Prédiction de la sécheresse météorologique par application des techniques de l'intelligence artificielle

La variabilité du climat de la Plaine de Saïss combinée à la forte dépendance de ce secteur sur l'agriculture dépendant de la pluie le rend vulnérable aux impacts de la sécheresse. Les prévisions efficaces de ce phénomène présentent un outil essentiel pour la gestion efficace de ressources d'eau contre les effets néfastes de la sécheresse. Dans cette optique, le présent chapitre a pour objectif d'anticiper les conséquences de la sécheresse à des échelles du temps différente par application des techniques d'intelligence artificielle à savoir les réseaux de neurones artificiels (RNA ou ANN). La création de tels modèles nécessite un passage par des étapes afin de réaliser une modélisation performante et de produire des prévisions et simulations fiables.

I. Approches et méthodes utilisées

1. Présentation de la méthode des Réseaux de Neurones Artificiels (RNA ou ANN)

Avant d'entamer le processus de modélisation, un aperçu est donné sur la technique RNA et ses applications dans le domaine de l'eau et climat ainsi que sur la création d'une méthodologie ayant pour but de créer un modèle RNA fiable et performant.

1.1 Principe général

Les études par réseaux de neurones artificiels (RNA) datent depuis les années 1940. Grâce aux développements des recherches sur le cerveau et à la disponibilité des outils de simulation, (Mc Culloch & Pitts, 1943) étudièrent un ensemble de neurones formels interconnectés. Ce réseau, déjà développé à l'époque, permettait d'effectuer quelques opérations logiques simples. Jusqu'aux quatre-vingt, la recherche était freinée par la limitation théorique du perceptron. Peu après cette époque, (Hopfield, 1985) lança de nouveau la recherche dans ce domaine après avoir montré l'analogie entre les RNA et les systèmes physiques en 1982. Les RNA sont des assemblages fortement connectés d'unités de calcul (neurones formels).

Le réseau de neurones artificiels (RNA) simule le principe de fonctionnement du cerveau humain qui gère un flux d'informations à partir d'une base de données d'apprentissage (Najjar, 1997). Ce sont des modèles mathématiques non linéaires de type 'boîte noire' capables d'établir des relations entre les entrées et les sorties d'un système. Les réseaux de neurones sont organisés en couches. Le grand avantage des RNA réside dans leur capacité d'auto-apprentissage, ce qui permet de résoudre des problèmes complexes tel que la reconnaissance de formes, les relations non linéaires, la classification ...etc, sans nécessité de recours à des modèles complexes, tout en étant tolérants aux erreurs (Najjar & Zhang, 2000). Les RNA de type perceptron multicouches (PMC) ou à fonctions radiales (RFR) sont les modèles couramment utilisés pour simuler des relations non linéaires (Zaier, 2010). En particulier, les PMC sont les plus usités et les plus sophistiqués (Lallahem, 2003 ; Sion, 2011), raison pour laquelle ils ont été choisis dans le cadre de ce travail. Le RNA ne présente pas un modèle explicite physiquement, mais il présente une technique durable pour développer des simulations d'entrées-sorties (Uvo, 2000). Cette technique se base sur les étapes principales suivantes : construction, apprentissage, validation et exploitation du modèle RNA (Piechowiak, 2004). Afin de comprendre ce qui précède, quelques définitions de base sur le RNA sont abordées.

1.2 Inspiration biologique

Le principe et le fonctionnement du RNA sont inspirés de celui du système nerveux humain. Les RNA sont inspirés des tentatives d'imiter la tolérance aux erreurs et la capacité d'apprentissage des systèmes de neurones biologiques en simulant la structure du cerveau. Par analogie, un RNA est formé par des nœuds (neurones) qui interagissent entre eux pour céder au réseau son comportement global. Le réseau de neurones artificiels est conçu pour calquer le fonctionnement du cerveau humain par l'acquisition des connaissances à travers un processus d'apprentissage et calculer des poids optimaux pour les interconnexions des cellules nerveuses (Liu, 2003). Il est composé par des processeurs élémentaires fortement connectés qui fonctionnent en parallèle. Avec un

changement d'état dynamique, chaque processeur reçoit et traite des informations afin de calculer une sortie unique (Hecht-Nielson, 1990). Le RNA, à travers ces critères, permet l'utilisation d'une structure de programmation parallèle capable de représenter la complexité des processus non-linéaires qui relient les entrées et les sorties de tout système (Hsu, 1997). Il peut atteindre des résultats remarquables par rapport aux autres types de modèles.

1.3 Neurone artificiel

Un réseau de neurones est un système de calcul qui traite l'information par un changement d'état dynamique d'éléments de traitement simples fortement interconnectés (Hecht Nielsen, 1990) : les neurones artificiels. Un réseau de neurones artificiel est composé d'un ensemble d'unités de calcul (neurones). La figure 134 montre l'analogie entre le neurone biologique et celui artificiel. Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire qui reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de l'extérieur ou d'autres neurones du réseau. A chacune de ces entrées est associé un poids w représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones. Selon (Lallahem, 2003), un neurone artificiel est caractérisé par trois concepts : son état, ses connexions avec d'autres neurones et sa fonction d'activation.

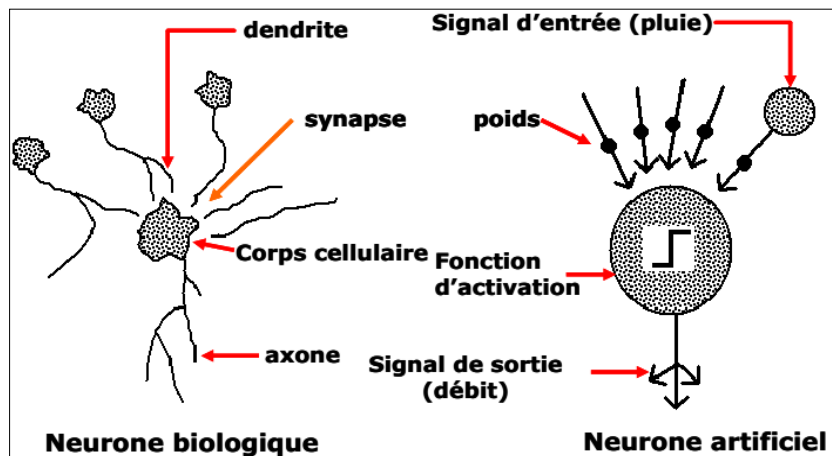


Figure 134: Analogie neurone biologique / neurone artificiel

A. État du neurone artificiel

Un neurone artificiel est caractérisé par son état interne dynamique. Il reçoit des signaux qui lui permettent de modifier son état à l'aide des fonctions mathématiques (Lallahem, 2003). Soit « A » l'ensemble des états possibles d'un neurone artificiel. « A » pourra prendre toutes les valeurs possibles, par exemple $\{0, 1\}$ ou « 0 » sera interprété comme l'état inactif et « 1 » l'état actif (Kharroubi, 2013). Dans le comportement d'un neurone artificiel, existe deux phases. La première est habituellement la somme pondérée des entrées selon l'expression suivante (Figure 135) :

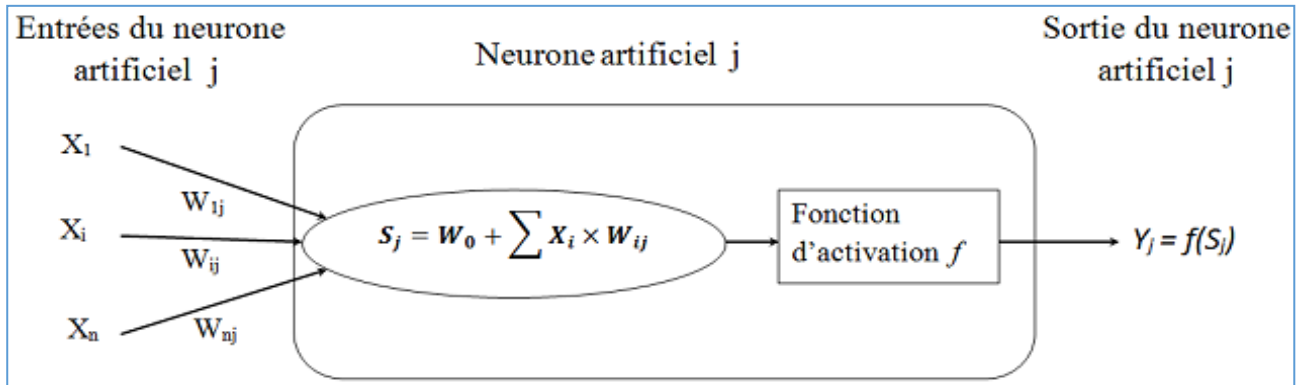


Figure 135 : Processus de calcul de l'état du neurone artificiel

Avec S_j : somme des poids entre les entrées du j -ème neurone de la couche cachée ; X_i : valeur de sortie du i -ème neurone de couche précédente ; W_{ij} : poids synaptique du neurone i de la couche d'entrée au neurone j de la couche cachée, W_0 est le biais ou le seuil d'activation du neurone j .

A partir de cette valeur, dite d'activation, une fonction de transfert calcule la valeur de sortie, ou de production, du neurone (El tabach, 2005). Elle sera transmise aux neurones voisins.

B. Fonction de transfert

La fonction de transfert f peut avoir plusieurs formes dont les plus usitées sont la fonction « sigmoïde » et la fonction « tangente hyperbolique » (Chokmani, 2008). La fonction sigmoïde est la plus utilisée, car elle est inspirée directement du comportement des cellules nerveuses face aux signaux reçus et introduit la non-linéarité du système (Lallahem, 2003).

À la différence des neurones biologiques dont l'état est binaire, la plupart des fonctions de transfert sont continues, offrant une infinité de valeurs possibles comprises dans l'intervalle $(0, +1)$ ou $(-1, +1)$. Dans le cadre de notre travail, la fonction sigmoïde utilisée est continue, différentiable et bornée, dont la présentation mathématique est la suivante :

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-s}} \quad (\text{Eq. 45})$$

Où s est la variable.

1.4 Perceptron Multicouche (PMC)

Il existe une grande variété d'agencements possibles de neurones artificiels (Lippmann, 1987), mais le type de réseau le plus utilisé pour la prévision est le Perceptron Multicouche (PMC ou en anglais (MLP) Multi-Layer Perceptron). Ce réseau comporte une couche de neurones artificiels pour capter les entrées, une ou plusieurs couches cachées et une couche de neurones artificiels pour émettre les sorties du modèle.

La détermination de l'architecture du RNA est une étape axiale à partir de laquelle est introduite l'influence de chaque paramètre dans le système ayant pour but de produire des modélisations fiables. Le nombre de couches, de neurones par couche et les différentes fonctions d'activation déterminent l'architecture du RNA (Chokmani, 2008).

La première couche reçoit les variables d'entrées (X_i) à travers les neurones d'entrées i , les transforme avec la fonction d'activation f sur le neurone d'entrée et les envoie aux neurones j de la première couche cachée. Généralement, les fonctions d'activation des neurones d'entrées sont de type identique, c'est-à-dire que les signaux d'entrées restent inchangés. La couche cachée se compose des neurones de traitement qui reçoivent les sommes pondérées S (Eq. C-2) issues de la couche d'entrée, puis effectuent leurs transformations (avec la

fonction d'activation) et finalement les transfèrent à la couche suivante (cachée ou sortie selon l'architecture RNA déterminée).

$$S_{ij} = \sum_i^n X_i \times W_{ij} + W_0 \quad (\text{Eq. 46})$$

Avec : n est le nombre d'éléments d'entrée ; X_i est la valeur de la sortie du i ème neurone de la couche précédente ; W_{ij} est la valeur du poids entre le neurone i et le neurone j ; W_0 est le biais.

Les PMC fonctionnent le plus souvent avec une seule couche cachée qui offre déjà un degré de liberté suffisant et se rapproche d'une fonction de type non-linéaire (Funahashi, 1989 ; Hornik, 1989). Quelque soit le nombre de couches cachées dans un PMC, il existe un PMC équivalent avec une seule couche cachée (Riad, 2003). Donc, dans cette étude, les PMC avec une seule couche cachée sont utilisés.

2. Systèmes Adaptatifs d'Inférences Neuro-Floue (ANFIS)

2.1. Méthode Neuro-Floue (NF)

A. Logique floue (LF)

Depuis son introduction, a été le sujet de plusieurs applications industrielles et scientifiques (Commande du métro au Japon 1985, estimations géophysiques et biologiques (Bardossy et Duckstein, 1995), estimation des imprécisions des produits phytosanitaires (Freissinet, 1997).

La logique floue a été développée par (Zadeh, 1965) qui a proposé de modéliser un système complexe par un raisonnement « approximatif » basé sur des variables linguistiques et des sous-ensembles flous (Zadeh, 1971). Aujourd'hui la logique floue a fait l'objet de plusieurs applications dans le domaine de l'ingénierie (Lekfir & al., 2006).

B. Méthode Neuro-Floue hybride

Cette hybridation a permis la création des contrôleurs NF qui sont actuellement l'un des domaines de recherche les plus populaires. Les systèmes hybrides NFs (Chekroun, 2009), permettent de tirer les avantages de ces deux approches, du fait que les ANN-MLPs offrent une capacité d'apprentissage et de généralisation permettant une représentation efficace de la connaissance et la LF permet de traduire l'expérience humaine en un ensemble de règles linguistiques et facilite le traitement des connaissances imprécises. Les systèmes hybrides NFs sont classés généralement en deux catégories : systèmes d'inférence neuro-floue (INF) et système d'inférence neuro-floue adaptative (ANFIS). La deuxième catégorie est la plus utilisée, conçue pour combiner les capacités d'apprentissage des ANN-MLPs et les propriétés de raisonnement de la Logique Floue. La fonction principale du ANN-MLP est d'apprendre davantage le comportement du système d'inférence floue et d'utiliser cette connaissance pour modifier de manière adaptative ses paramètres (Mellah, 2006 ; Eltamaly & al., 2010).

C. Avantage des systèmes NF

— Rapidité de calcul

Les systèmes sont très rapides parce que l'évaluation d'un système compétent implique typiquement des opérations de la comparaison simple et un nombre limité de calculs de la surface linéaire (Fakhreddine, 2004).

— *Flexibilité*

L'architecture d'un système NF peut grandir dynamiquement et efficacement en réponse à la complexité des données d'apprentissage (Mellah & al., 2015).

— *Généralisation des connaissances*

Les systèmes NFs peuvent compenser des problèmes de généralisation pendant la phase de l'apprentissage en changeant (adapter) leur structure interne (Oussar, 1998).

D. Modélisation par la méthode NF hybride

Le problème de modélisation floue ou de construction de modèles peut être vu comme un processus d'identification de système (Figure 136).

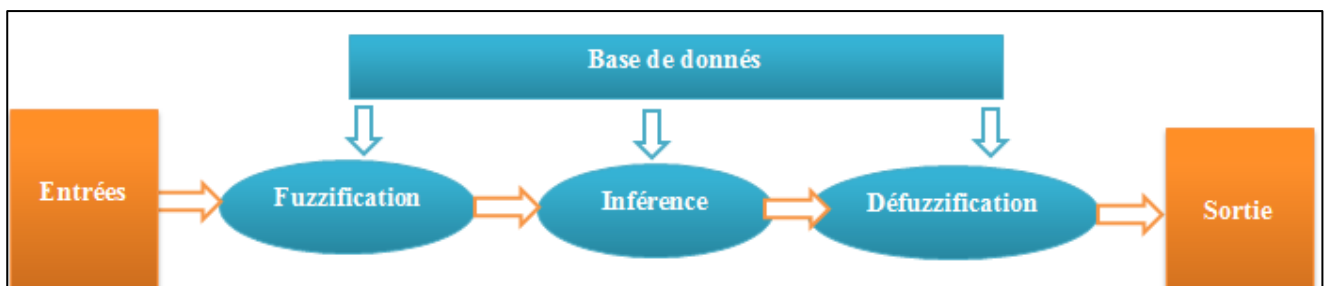


Figure 137 : Modèle d'un système entrée/sortie par la logique floue

Ce processus est composé de trois phases (Jang, 1992) :

— *Phase d'identification de la structure du modèle*

Cette phase se base sur la détermination de la structure de la base des règles, du nombre de symboles et de la structure des conclusions des règles.

— *Phase d'identification des paramètres du modèle*

L'identification des paramètres d'un modèle se fait à partir d'un ensemble de données appelé ensemble d'apprentissage. Cette phase permet l'identification des paramètres d'entrée, des paramètres de sortie et de la base des règles ou de la relation floue sous-jacente.

— *Phase de validation du modèle*

Cette phase sert à tester la validité du modèle d'abord par rapport à l'ensemble d'apprentissage, puis sur les nouvelles données de test.

2.2. Modèles NF hybrides

Un modèle flou d'un système est une représentation de son comportement par les concepts de la théorie des sous-ensembles flous. Cette représentation caractérise la relation entre les variables d'entrées et de sorties du système (Bouchon-Meunier, 1995).

Les systèmes flous sont répertoriés selon leur nature structurelle. Il existe des systèmes flous à conclusions symboliques (Mamdani, 1977) ou modèles flous linguistiques (systèmes de Mamdani), dans lesquels l'antécédent et le conséquent sont tous les deux des propositions floues qui utilisent des variables linguistiques

(Équation 10) et des systèmes Flous à conclusions fonctionnelles ou modèles flous de Takagi-Sugeno-Kang (TS) (Équation 11) (Takagi & Sugeno, 1985).

— *Système de type Mamdani*

Le système NF hybride de Mamdani utilise la technique d'apprentissage supervisé (rétropropagation) pour faire un apprentissage des paramètres des fonctions d'appartenances. L'architecture du système NF hybride de Mamdani est illustrée ci-dessous (Mellah R., 2006).

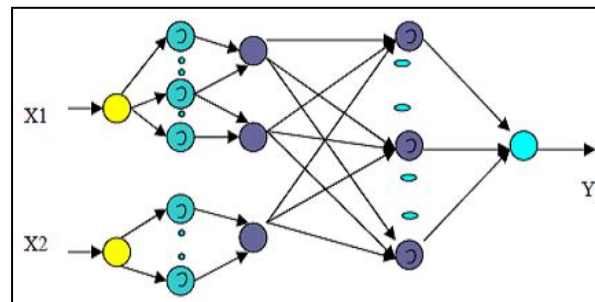


Figure 138 : Système neuro-flou de Mamdani

- *la première couche* : Chaque nœud dans cette couche qui correspond à une variable d'entrée transmet des valeurs d'entrée à la prochaine couche,
- *la deuxième couche (Fuzzification)* : chaque nœud dans cette couche correspond à un terme linguistique approprié à une des variables d'entrée dans la couche 1. Un algorithme de regroupement décidera du nombre initial et du type de fonctions d'appartenance qui doit être alloué à chacune des variables d'entrée,
- *la troisième couche (Permise des règles)* : un nœud dans cette couche représente la partie antérieure d'une règle. Habituellement un opérateur t-norme est utilisé dans ce nœud,
- *la quatrième couche (partie conclusion des règles)* : elle a deux tâches fondamentales à savoir : combiner les nouveaux antécédents des règles et déterminer le degré auquel ils appartiennent à la variable linguistique de sorties (faible, moyen, vite etc.). Le nombre de nœuds dans cette couche sera égal au nombre de règles,
- *la cinquième couche (Défuzzification)* : elle fait la combinaison de toutes les conclusions des règles qui utilisent un opérateur t-conorme et finalement calcule la sortie après Défuzzification.

— *Système de type takagi-sugeno*

Le système NF de type Takagi-Sugeno c'est une structure à 5 couches qui affine les règles floues déjà établies par des experts humains et réajuste le chevauchement entre les différents sous-ensembles flous pour décrire le comportement d'entrée-sortie d'un système complexe. Les systèmes NF de type Takagi-Sugeno font usage d'un mélange d'algorithme de rétro propagation pour faire un apprentissage des fonctions d'appartenance et la méthode des moindres carrés pour déterminer les coefficients des combinaisons linéaires dans les conclusions des règles (Joycer & al., 2011).

Les premiers travaux sur l'optimisation des systèmes d'inférence floue (SIF) ont été explicitement inspirés de l'algorithme de rétropropagation par réseaux de neurones (YVES, 1999). Un type spécial de réseaux neuro-flous a été présenté ici. Il s'agit de l'approche ANFIS (Jang, 1993). Pour simplifier le modèle, un système à deux entrées x_1 et x_2 , une sortie et un modèle flou de type TSK de ce système sont utilisés, ces derniers sont composés des deux règles suivantes :

$$\text{Si } x_1 \text{ est } A_1 \text{ et } x_2 \text{ est } B_1 \text{ Alors } y_1 = f_1(x_1, x_2) = a_1x_1 + b_1x_2 + c_1 \quad (\text{Eq. 47})$$

$$\text{Si } x_1 \text{ est } A_2 \text{ et } x_2 \text{ est } B_2 \text{ Alors } y_2 = f_2(x_1, x_2) = a_2x_1 + b_2x_2 + c_2 \quad (\text{Eq. 48})$$

L'architecture du système NF hybride de Takagi-Sugeno est illustrée sur la figure 138, (Takagi & Sugeno, 1985).

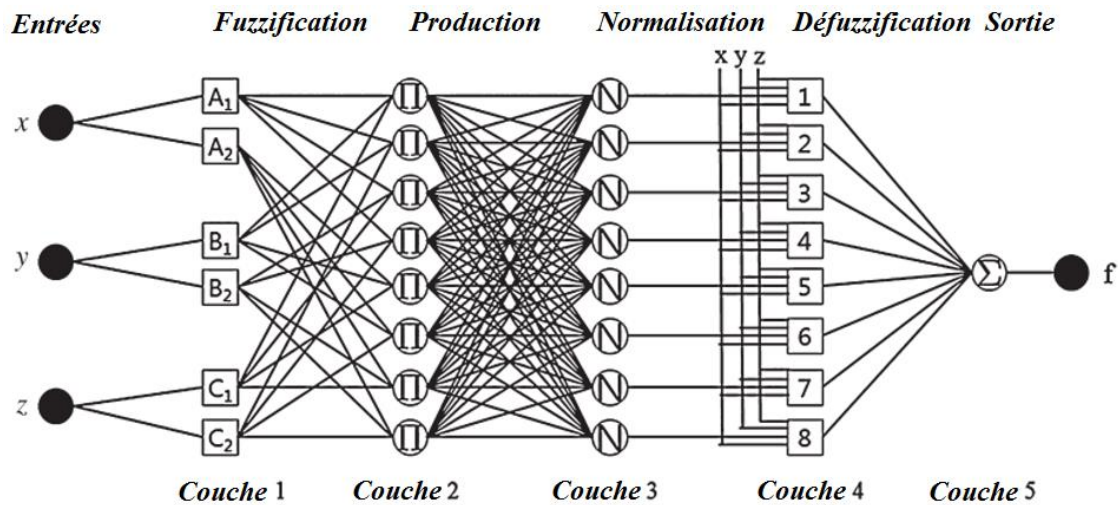


Figure 139 : Réseau de neuro-flou de takagi-sugeno

Ces modèles permettent d'approcher le comportement d'un système complexe par une collection de modèles locaux. Ils ont une capacité de représentation importante. En effet, le nombre de règles nécessaires pour le rapprochage d'un système à un certain degré de précision est réduit (Babuska & Verbruggen, 1995).

2.3. Implémentation des réseaux NF

Selon l'interaction entre la logique floue et les réseaux de neurones, deux types de systèmes NF peuvent être distingués : le système d'inférence Neuro-flous (INF) et le système d'inférence neuro-flou organisé en réseau adaptatif (ANFIS) (Cheng-Jian & al., 2006).

A. Système d'Inférence Neuro-Flou (INF)

L'objectif principal du système INF est de réaliser un processus de raisonnement flou en utilisant, une architecture d'un ANN-MLP de telle manière que les paramètres du raisonnement flou représentent les poids du réseau de neurones (Mellah & al., 2015). Ainsi, le système INF peut identifier automatiquement en ajustant les fonctions d'appartenance, par modification des poids de connexion du ANN-MLP via un algorithme d'ajustement paramétrique approprié. Par conséquent les fonctions d'appartenance peuvent être finalement optimisées par une architecture neuronale. Comme, la configuration de base d'un système flou possède trois parties, à savoir la fuzzyfication des entrées, engin d'inférence à base des règles floues et des sorties floues, dont chacune peut être réalisée par plusieurs méthodes (Mellah, 2006).

B. Système d'Inférence Neuro-Flou organisé en réseau Adaptatif (ANFIS)

Le système ANFIS est un réseau adaptatif proposé par Jang en 1993. Ce système peut être vu comme un réseau de neurones non bouclé pour lequel chaque couche est un composant d'un système flou. Le modèle ANFIS est le modèle le plus utilisé en pratique. Des applications notamment dans le traitement du signal, le filtrage adaptatif et la commande des systèmes ont été réalisées avec cette architecture. Plusieurs ouvrages et articles présentent des meilleures performances du modèle ANFIS lorsqu'il est utilisé dans la commande et en particulier la navigation des robots mobiles (Mellah, 2006). Cette architecture NF affine les règles floues obtenues par des

experts humains pour décrire le comportement entrée-sortie d'un système complexe en utilisant une base de données pour l'apprentissage. Il s'agit d'une technique NF hybride qui apporte les capacités d'apprentissage des réseaux de neurones au système d'inférence flou de type Takagi-Sugeno. Le rôle de l'apprentissage est l'ajustement des paramètres de ce système d'inférence flou (partie prémisse et partie conclusion des règles).

Le système hybride NF de type ANFIS est composé de cinq couches où les nœuds adaptatifs sont situés à la première et la quatrième couche (Mellah & al., 2015 ; Limin & al., 2002) (Figure 138). Afin de présenter l'architecture de base et le fonctionnement d'un modèle NF de type adaptatif utilisé dans ce travail et étant donné que notre étude concerne un système d'entrée/sortie, on considère un système d'inférence flou de type Takagi-Sugeno du premier ordre.

Le réseau adaptatif ANFIS est un réseau multicouche dont les connexions ne sont pas pondérées, ou ont toutes un poids de 1. Les nœuds sont de deux types différents selon leur fonctionnalité : les nœuds carrés (adaptatifs) contiennent des paramètres et les nœuds circulaires (fixes) n'ont pas de paramètres. Toutefois, chaque nœud (carré ou circulaire) applique une fonction sur ses signaux d'entrées (Figure 138) (Fakhreddine, 2004 ; Mellah & al., 2015),

3. Machines à Vecteurs de Support (SVM) : Support Vector Regression (SVR)

Les modèles SVR adhèrent au principe de minimisation du risque structural par opposition au principe empirique de minimisation du risque utilisé par les réseaux de neurones classiques (Vapnik, 1995). Par conséquent, ces modèles réduisent l'erreur de généralisation par opposition à l'erreur d'apprentissage. Avec SVR, le but est d'estimer une dépendance fonctionnelle $f(X)$ entre un ensemble de points échantillonnés $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ à partir de R^n et les valeurs de cible $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ avec $y_i \in R$ (les vecteurs d'entrée et de cible (x_i et y_i) se rapportent aux enregistrements mensuels de l'indice SPI).

Le développement de modèles SVR se trouve dans (Cimen, 2008). Tous les modèles SVR ont été créés à l'aide du logiciel Online SVR créé par (Parrella, 2007), qui peut être utilisé pour construire des machines vectorielles de soutien pour la régression. Les données ont été divisées en deux ensembles : un ensemble d'étalonnage et un ensemble de validation. 90% des données ont été réparties dans l'ensemble d'étalonnage tandis que les 10% finals des données ont été utilisées comme ensemble de validation. Contrairement aux réseaux de neurones, les données ne peuvent être divisées qu'en deux ensembles, l'ensemble d'étalonnage étant équivalent aux ensembles d'apprentissage et de test trouvés dans les réseaux neuronaux. Toutes les entrées et les sorties ont été normalisées entre 0 et 1.

Tous les modèles SVR utilisaient alors le noyau de la fonction racine basique (RBF). En conséquence, chaque modèle SVR se composait de trois paramètres sélectionnés : gamma (γ), coût (C) et epsilon (ϵ). Le paramètre γ est une constante qui réduit l'espace du modèle et contrôle la complexité de la solution, tandis que (C) est une constante positive qui est un paramètre de contrôle de capacité et ϵ est la fonction de perte qui décrit le vecteur de régression sans toutes les données d'entrée (Kisi & Cimen, 2011). Ces trois paramètres ont été sélectionnés sur la base d'une procédure d'essai et d'erreur. La combinaison des paramètres qui ont produit les valeurs RMSE les plus faibles pour les ensembles de données d'étalonnage ont été sélectionnées.

4. Régression Linéaire Multiple (RLM)

Le concept général de la régression consiste à étudier une relation entre deux variables quantitatives et à l'exploiter pour estimer la valeur inconnue de l'une à l'aide de la valeur connue de l'autre. On étudie en régression deux variables quantitatives, dont l'une, appelée variable expliquée, est considérée comme dépendante de l'autre, appelée variable explicative ou indépendante. On notera Y la variable expliquée et X la variable explicative.

Selon (Montgomery & Peck, 2001), le modèle de régression s'écrit :

$$Y = f(X) + \varepsilon \quad (\text{Eq. 49})$$

La variable Y est donc supposée approximativement égale à une fonction f de X, le terme ε caractérisant la marge d'erreur ou d'imprécision du modèle appelée variable résiduelle

On suppose en outre que le modèle vérifie deux propriétés :

- La variable résiduelle ne dépend pas de X ;
- La moyenne de la variable résiduelle est nulle.

Pour effectuer la régression, on dispose de données qui se présentent sous la forme d'une suite de n couples (x(i), y(i)) numérotés de i = 1 à n (données individuelles). On considère souvent le modèle le plus simple, c'est-à-dire la liaison linéaire entre les variables, de la forme :

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_p X_{pi} + \varepsilon_i \quad (\text{Eq. 50})$$

L'objectif général de régression multiple est d'en apprendre davantage sur la relation entre plusieurs variables indépendantes ou explicatives et une variable dépendante. Le problème de calcul qui doit être résolu dans une analyse de régression multiple est d'adapter une ligne droite (plan ou dans un espace à n dimensions, où n est le nombre de variables indépendantes) à un certain nombre de points. Dans le cas le plus simple - une dépendante et une variable indépendante - on peut visualiser cela dans un diagramme de dispersion. Ainsi, les procédures de régression multiple vont estimer une équation linéaire de la forme :

$$Y = a + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + \dots + b_p * X_p + \varepsilon \quad (\text{Eq. 51})$$

Avec :

Y correspond à la variable dépendante ;

X₁, X₂..., X_p correspondent aux variables explicatives ε correspond à l'erreur d'estimation du modèle ;

a, b₁, ..., b_p correspondent aux coefficients qui permettent de réduire l'erreur ε .

La démarche dans l'élaboration du modèle de régression multiple obéit donc aux étapes suivantes :

- 1) Construction de la base de données : identification des variables expliquées et explicatives et prélèvement des observations sur les diverses variables supposées explicatives Construction de la base de données explicatives,
- 2) Le modèle général : spécification de l'équation de régression qui sera analysée
- 3) Les tests d'hypothèses : estimation globale de la signification du modèle et contribution marginale de chaque variable explicative. Plus de détails sur la méthode de la régression dans (Montgomery & al. 2001).

5. Transformée en Ondelette Discret (DWT)

Au cours des deux dernières décennies, les transformées en ondelettes ont été largement testées dans de nombreux domaines tels que le traitement du signal, traitement d'images, les communications, l'informatique et les mathématiques (Rao & Bopardika, 1998). Morlet en 1984 a étudié les transformées en ondelettes motivés par le fait que certains signaux sismiques peuvent être modélisés de façon appropriée et en combinant les traductions dilatations d'une fonction oscillatoire simple, appelé ondelettes. La transformée de Fourier peut aussi décomposer un signal stationnaire en sinusoides continues des fréquences différentes. Dans la transformation du domaine des fréquences, une information de temps est perdue. Lors d'une transformée de Fourier d'un signal, il est impossible de dire quand un événement particulier a lieu (Misiti & al., 2000). Les ondelettes sont des fonctions mathématiques qui donnent une représentation temps-échelle de la série chronologique et leurs relations pour analyser les séries chronologiques qui contiennent des non stationnarités. L'analyse par ondelette permet l'utilisation de longs intervalles de temps pour obtenir des informations de basse fréquence et des intervalles plus courts pour une information de haute fréquence. L'analyse par ondelettes est capable de révéler les aspects des données comme les tendances, les points de rupture et les discontinuités que d'autres techniques d'analyse de signaux pourraient manquer. En outre, il peut souvent compresser ou débruiter un signal.

L'objectif de base de transformées en ondelettes est de parvenir à une représentation complète échelle de temps des phénomènes localisés et transitoires se produisant à l'échelle de différents temps (Labat & al., 2000). Une étape importante dans l'utilisation des transformées en ondelettes est le choix d'une ondelette mère (à ψ).

Traditionnellement, le nombre de décalages d'ondelettes est déterminé par essai et erreur ou en utilisant la formule $L = \log(N)$, avec N est le nombre d'échantillons. En utilisant cette formule, le nombre optimal de décompositions serait $L = 3$. Dans cette étude, la méthode ci-dessus a été répétée pour les niveaux de décomposition des ondelettes 1 à travers 9 jusqu'à ce que le niveau approprié soit déterminé à l'aide des résultats précités.

5.1. Ondelette Continue Transformée (CWT)

Définie comme la somme sur tous les temps de la signaler versions multiplié par échelle et décalées de l'ondelette fonction ψ (Labat & al., 2000) :

$$W(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t - \tau}{s} \right) dt, \quad (\text{Eq. 52})$$

Où s est le paramètre d'échelle ; τ est la traduction et $*$ correspond au conjugué complexe (26). CWT produit un continuum de toutes les échelles, que la sortie. Chaque échelle correspond à la largeur de l'onde ; par conséquent, une moyenne plus grande échelle que plus d'une série temporelle est utilisée dans le calcul du coefficient par rapport à des échelles plus petites. Le CWT est utile pour le traitement de différentes images et des signaux ; cependant, il n'est pas souvent utilisé pour la prévision parce que son calcul est complexe et prend du temps.

5.2. Transformée en Ondelettes Discrète (DWT)

Comme alternative, dans des applications de prévision, la transformée en ondelettes discrète (DWT) est utilisé, en raison de sa simplicité et la réduction du temps de calcul. Les échelles et les positions DWT sont généralement basées sur des puissances de deux (échelles dyadiques et positions). Ceci est réalisé en modifiant la représentation en ondelettes à (Labat & al., 2000)

$$\psi_{j,m}(m) = \frac{1}{\sqrt{|s_0^j|}} \sum_k \psi \left(\frac{k - m\tau_0 s_0^j}{s_0^j} \right) x(k) \quad (\text{Eq. 53})$$

Où j et m sont des nombres entiers qui contrôlent la taille et la traduction, respectivement, tandis que $s_0 > 1$ est une étape de dilatation fixe et τ_0 est un facteur de traduction qui dépend de l'étape de dilatation précitée. L'effet de la discrétisation l'ondelette est que l'échelle espace-temps est maintenant échantillonnée à des niveaux discrets. Le DWT exploite deux ensembles de fonctions : passe-haut et passe-bas filtres. La série chronologique d'origine est passé à travers passe-haut et passe-bas filtres et des coefficients détaillés et des séries d'approximation sont obtenus. Un exemple de décomposition de la série de pluie de la station Ain Bittit est indiqué sur la figure 139.

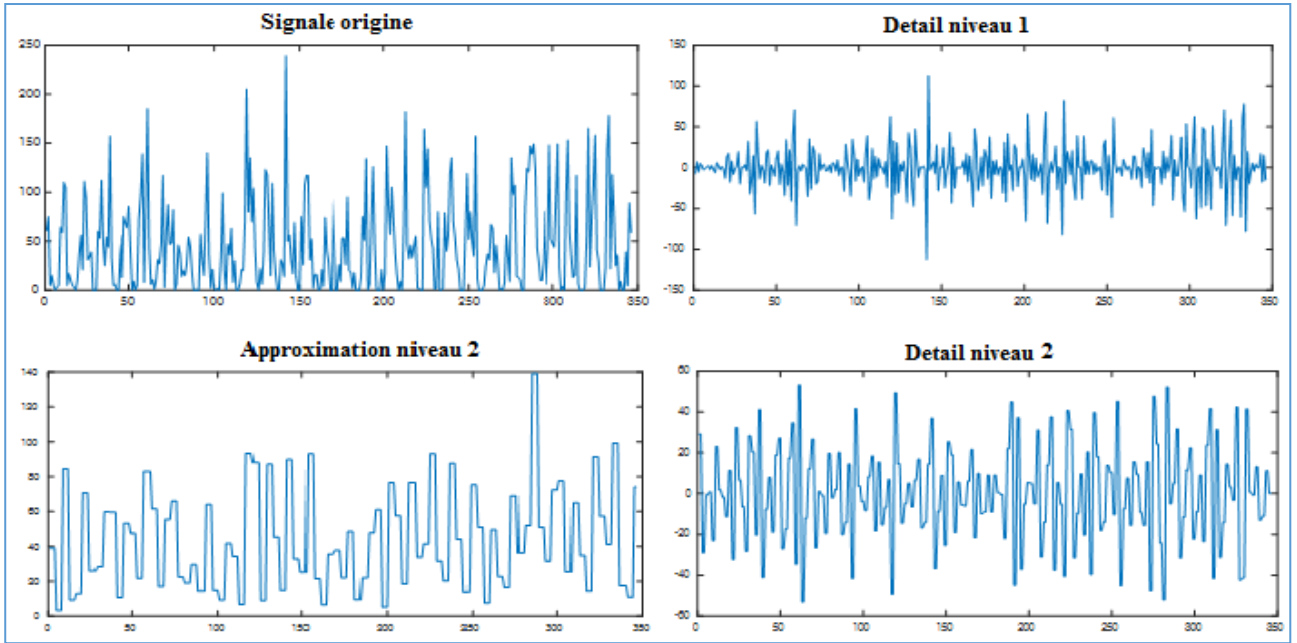


Figure 140 : Décomposition en ondelette discrète de la série de pluie d'Ain Bittit) pour la période 1986-2014

L'un des défis inhérents à l'utilisation du DWT pour des applications de prévision est que si les valeurs sont changées au début de notre série chronologique, tous les coefficients d'ondelettes seront ensuite changés. Pour surmonter ce problème, un algorithme redondant, appelé algorithme "à trous" peut être utilisé, étant donné par Misiti & al, (2000)

$$C_{i+1}(k) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} h(l)c_i(k + 2^i l), \quad (\text{Eq. 54})$$

Où h est le filtre passe-bas et l'échelle la plus fine est la série chronologique d'origine. Pour extraire les informations, $W_i(k)$, qui ont été éliminés dans (21), la version lissée du signal est soustraite du signal grossier qui l'a précédé, donnée par (Misiti & al., 2000).

$$w_i(k) = c_{i-1}(k) - c_i(k), \quad (\text{Eq. 55})$$

Où $c_i(k)$ est l'approximation du signal et $c_{i-1}(k)$ est le signal grossier. Chaque application de (20) et (21) crée une approximation lisse et extrait un niveau de détail plus élevé. Enfin, l'ondelette de Haar non symétrique peut être utilisée en tant que filtre passe-bas pour empêcher toute information future d'être utilisée lors de la décomposition (Misiti & al., 2000).

II. Application de la méthode du RNA

Les performances des RNA sont utilisés pour la prévision de la qualité de l'eau (Maier & Dandy, 1996), pour la prévision de la demande en eau (Cubero., 1991), pour la prévision du débit (Sivakumar & al., 2002) et pour la prévision des précipitations (French & al., 1992). En outre, les réseaux de neurones sont utilisés pour modéliser la relation pluie-débit (Dawson & Wilby., 1998 et 2000) et pour la prédiction de l'évaporation (Sudheer & al., 2002), simulation et la prévision de la piézométrie (Lallahem, 2002).

1. Méthodologie d'application

Dans une modélisation RNA la reconnaissance du système se fait à travers la phase d'apprentissage. La fiabilité de cette phase dépend de l'architecture de RNA qui diffère d'un système à un autre (Kharroubi, 2013).

La phase de construction (ou la création de l'Architecture du RNA) est l'une des principales phases de la modélisation RNA. Dans cette étape, l'architecture pour fixer le nombre de couches, le nombre de neurones dans chaque couche et le choix des fonctions d'activation associées aux neurones sont déterminés. Ensuite, un apprentissage du réseau de neurones artificiels est effectué. Cet apprentissage est une phase de calcul et d'optimisation des poids informatifs des interrelations non-linéaires entrées-sorties. Cette étape est itérative. Elle est suivie par deux étapes de vérification « test » et « validation » (Kharroubi, 2013).

Selon (Chokmani, 2008), l'approche systématique pour optimiser la performance du modèle RNA comporte la sélection des variables d'entrée, la détermination de l'architecture du réseau adapté, l'optimisation de l'apprentissage du réseau et l'utilisation d'une méthodologie de validation fiable

1.1. Architecture du RNA

La façon la plus appropriée et la plus efficace pour déterminer l'architecture du RNA (nombre de neurones d'entrée, cachés, de sortis et leurs fonctions d'activation) est d'adopter les essais expérimentaux (essais-erreurs) selon les objectifs d'application. Après le choix des variables d'entrée, il est impératif de déterminer le nombre de nœuds dans la couche cachée. En effet, la dimension de cette couche influence directement le fonctionnement du réseau, un nombre assez important de nœuds garantira un nombre suffisant de degrés de liberté pour le RNA et assez petit minimisera le risque de perte de la capacité de généralisation du réseau. Par contre, un accroissement inutile de la dimension de la couche cachée mènera à une augmentation de temps de calcul de l'apprentissage et de l'exploitation du RNA et au sur apprentissage du réseau. Le nombre de neurones artificiels dans la couche de sortie est fixé selon l'objectif de l'application. Dans ce travail, l'utilisation d'une seule couche cachée est suffisante pour le modèle de RNA (Hornik & al., 1989). Parfois l'addition d'une couche cachée n'a pas diminué l'erreur et elle fait décliner la performance et la convergence du modèle. Les meilleurs résultats de la simulation avec bonne convergence et performance du modèle sont obtenus dans le cas d'utilisation d'une seule couche cachée (Lallahem, 2002).

1.2. Modèles RNA-MLP

Les modèles RNA-MLP pour la prévision météorologique de la sécheresse ont été développées à l'aide du logiciel MATLAB R2010. Deux réseaux ont été construits incluant le réseau neuronal feed-forward (FNN) et Elman ou le réseau neuronal récurrent (RNN). En outre, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 et 10 nœuds ont été testés en tant que nombre de nœuds dans la couche cachée. Les nombres de nœuds ont été sélectionnés en utilisant une approche commune d'essai et d'erreur.

Il existe plusieurs algorithmes d'apprentissage pour les ANN-MLP, la rétropropagation du taux d'apprentissage adaptatif (GDX), Le BR est un algorithme qui définit automatiquement les valeurs optimales pour les paramètres de la fonction objectif. L'Levenberg-Marquardt (LM) est l'algorithme utilisé pour former les modèles RNA dans cette étude parce qu'il est rapide, précise et fiable. En outre, les études antérieures ont indiqué que le LM est un très bon algorithme pour développer un modèle RNA de prévisions (Daliakopoulos & al., 2005).

1.3. Apprentissage de RNA

Les réseaux neuronaux sont des outils hautement non-linéaire, qui sont calés en utilisant des techniques itératives (Adamowski & Karapataki, 2010). L'apprentissage de RNA nécessite des données historiques afin de caler le modèle de prévision. Il calcule les poids des interconnexions neuronales des différentes couches pour l'identification du système.

Cet apprentissage détermine la qualité du modèle du RNA non fini avec les valeurs introduites (des données historiques) dans la couche sortie et évalue la performance des poids déterminés en calculant l'erreur quadratique entre les sorties observées et estimées (Kharroubi, 2013). L'erreur se propage en rétro-propagation afin d'ajuster les poids des interconnexions. Après chaque itération, le modèle non-fini passe en phase de test avec une autre base de données différente de celle d'apprentissage. La comparaison entre l'erreur du test et celle de l'apprentissage permet d'éviter le sur-apprentissage du RNA.

Finalement et après l'enregistrement du modèle le plus performant, la phase de la validation (deuxième test) et de l'exploitation est évaluée où le modèle sur une base de données différente de celles de l'apprentissage et du test est appliqué.

1.4. Normalisation des données

L'une des étapes du prétraitement des données est la normalisation des données. La nécessité de faire l'harmonie et l'équilibre entre la plage de données du réseau et la fonction d'activation utilisée fait que les données sont normales dans la plage de fonction d'activation. La fonction de logarithme sigmoïde (Logsig) est utilisée pour tous les calques de cette étude. En considérant le sigmoïde, on peut voir que son intervalle est compris entre 0 et 1, donc les données doivent être normalisées entre (0, 1):

$$x_n = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (\text{Eq. 56})$$

Lorsque x est la donnée réelle et x_{min} est la valeur minimale de la série originale n x_{max} est la valeur maximale de la série originale.

1.5. Critères de performance

Les critères de performance du modèle de réseaux de neurones sont de nature statistique : on trouve fréquemment dans la littérature (Lachtermacher & Fuller, 1994) le coefficient de corrélation (r , équation 61), la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE, équation 63) elle donne une indication quantitative sur l'erreur des calculs obtenue par le modèle de prévision pendant la phase de modélisation. Le coefficient de détermination (R^2 , équation 65) et la moyenne des erreurs (MAE, équation 62). Le critère de Nash (équation 64) représente numériquement la proportion de la variance totale de la prévision. Il permet de déterminer l'adéquation entre les valeurs calculées ou prévues avec les valeurs observées réellement.

A. Coefficient de corrélation (r)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{estm,i} - \bar{x}_{estm,i}) \times (x_{real,i} - \bar{x}_{real,i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{real,i} - \bar{x}_{real,i})^2 \times \sum_{i=1}^N (x_{estm,i} - \bar{x}_{estm,i})^2}} \quad (\text{Eq. 57})$$

Avec X_i = SPI mesurée ; Y_i = SPI calculée ; $\bar{X}$ moyenne des SPI mesurées ; $\bar{Y}$ moyenne des SPI calculées.

Tableau 52 : Classification du modèle par Coefficient de corrélation (Koffi & al., 2006)

Coefficient de corrélation	Performance du modèle
$R = 1$	Parfaite
$R > 0,8$	Très forte
$0,5 < R < 0,8$	Forte
$0,2 < R < 0,5$	Moyenne
$0 < R < 0,2$	Faible
$R = 0$	Nulle

B. Erreur moyenne absolue (MAE)

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_{real,i} - x_{estim,i}| \quad (\text{Eq. 58})$$

C. Erreur quadratique moyenne (RMSE)

Sa formulation mathématique est donnée par la relation suivante (Koffi & al., 2006) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{real,i} - \bar{x}_{estim,i})^2}{N}} \quad (\text{Eq. 59})$$

Avec X_{estim} et X_{real} qui sont les valeurs observées et calculées ; N est le nombre de données.

D. Critère de Nash-Sutcliffe (Nash)

$$Nash = (100) \times \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_{real,i} - \bar{x}_{estim,i})^2}{\sum_{i=1}^N (x_{real,i} - \bar{x}_{real,i})^2}\right) \quad (\text{Eq. 60})$$

Avec X_{estim} et X_{real} qui sont les valeurs observées et calculées ; N est le nombre de données.

Le critère de Nash-Sutcliffe (Nash-Sutcliffe, 1970) varie de $-\infty$ à 1 et l'échelle suivante est généralement utilisée :

Tableau 53 : Classification du modèle par critère de Nash-Sutcliffe

Critère de Nash-Sutcliffe	Catégorie du modèle
$\geq 90 \%$	Excellent
80% à 90%,	Très bon
60% à 80%,	Bon
$\leq 60 \%$	Mauvais

E. Coefficient de détermination R^2

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{estim,i} - \bar{x}_{estim,i})^2}{\sum_{i=1}^N (x_{real,i} - \bar{x}_{real,i})^2} \quad (\text{Eq. 61})$$

Où Avec X_{estim} et X_{real} qui sont les valeurs observées et calculées ; N est le nombre total de cas.

Le coefficient de détermination R^2 représente la proportion de variation de la valeur de sortie qui est « expliquée » par le modèle. Les valeurs idéales pour RMSE et MAE sont 0, pour R^2 c'est 1.

1.6. Conception du modèle

Les étapes d'élaboration du modèle RNA sont citées dans la figure ci-dessous.

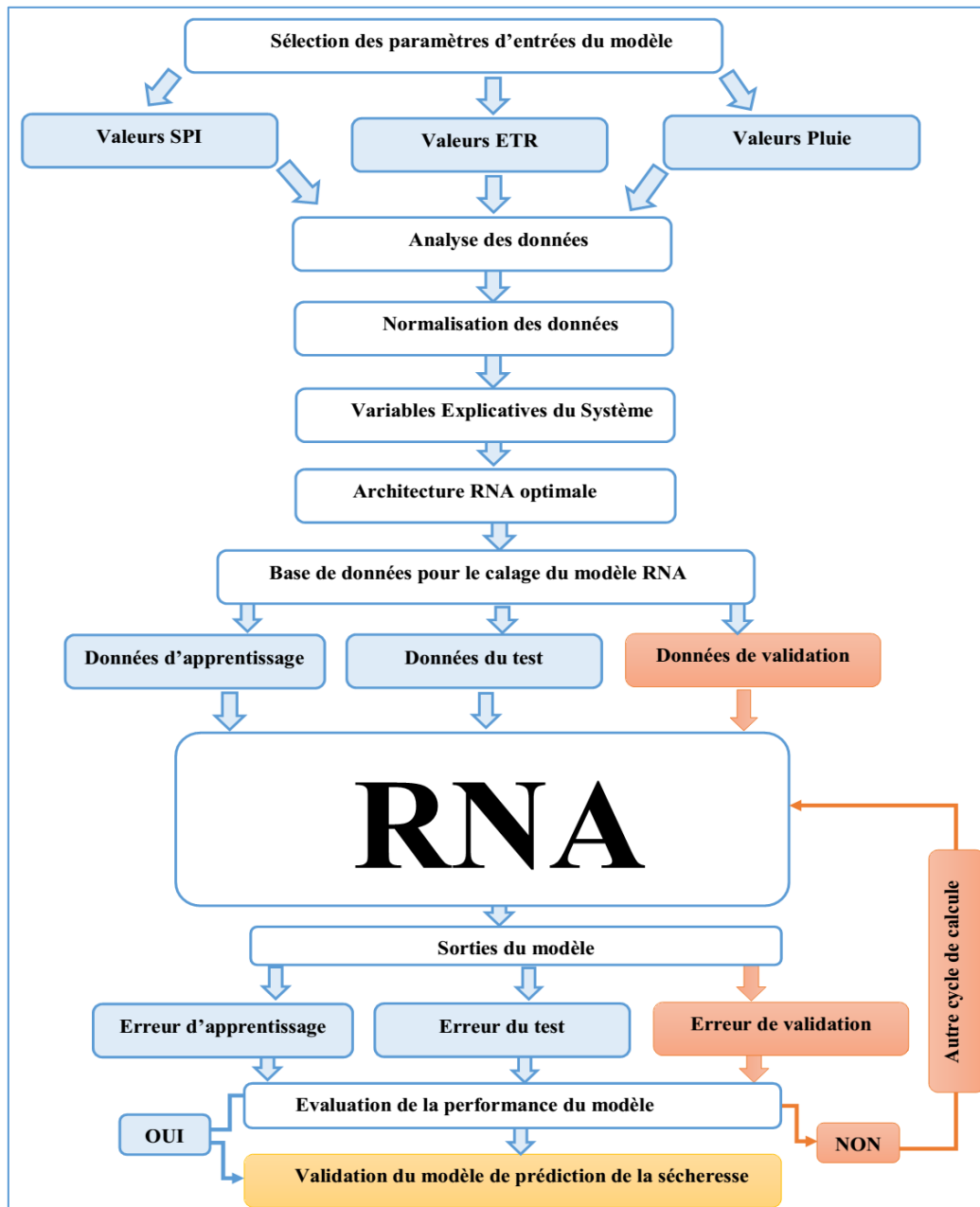


Figure 138 : Structure de la modélisation par RNA appliquée à la prédiction de la sécheresse

2. Résultats et analyse

Au cours de la présente étude on a procédé à l'élaboration de cinq modèles (RNA-MLP1, RNA-MLP2, RNA-MLP3, RNA-MLP4 et RNA-MLP5) pour la prédiction du SPI qui diffèrent par le nombre et les types de variables d'entrées. L'évaluation de la modélisation a été effectuée à partir des résultats de la validation. Le tableau 50 et la figure 141 illustrent les différents résultats évalués selon les critères de performance numérique (R, R², MSE, RMSE,).

Tableau 54 : Performances des 5 modèles de réseaux de neurones développés

Modèles	Entrées des modèles	Validation					
		MAE	RMSE	R		Nash	
				Valeur	Modèle	Valeur	Modèle
RNA-MLP1	P(t), P(t-1), P (t-2)	0.698	0.835	0.055	Faible	27%	Mauvais
RNA-MLP2	P(t), P(t-1), P (t-2) ; SPI(t), SPI(t-1), SPI (t-2)	0.247	0.497	0.806	Très fort	64,63%	Bon
RNA-MLP3	P(t), P(t-1), P (t-2) ; SPI(t), SPI(t-1), SPI (t-2) ; ETP(t) etP(t-1) etP(t-2)	0.242	0.492	0.811	Très fort	65.32%	Bon
RNA-MLP4	P(t), P(t-1), P (t-2) ; SPI(t), SPI(t-1), SPI (t-2) ; ETR(t) etR(t-1) etR(t-2)	0.234	0.484	0.820	Très fort	66.48%	Bon
RNA-MLP5	P(t), P(t-1), P (t-2) ; SPI(t), SPI(t-1), SPI (t-2) ; ETP(t) etP(t-1) etP(t-2) ; T(t), T(t-1), T(t-2)	0.211	0.459	0.836	Très fort	70.80%	Bon

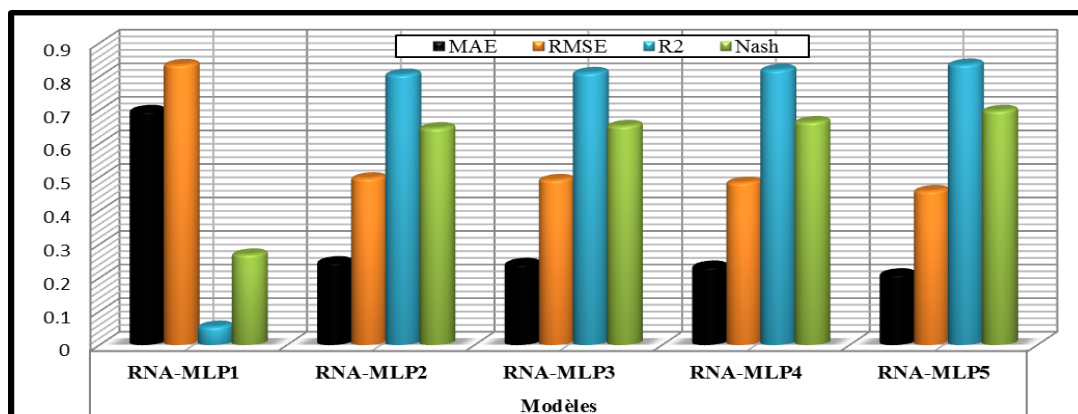


Figure 141: Performances des 4 modèles de réseaux de neurones développés

Pour une prévision de SPI(t+1) (Tableau 50), le critère NASH ne montre pas une différence considérable. Ceci amène à comparer les modèles à travers les critères RMSE, MAE et R. Ces critères indiquent des résultats satisfaisants et admissibles pour toutes les combinaisons à l'exception du modèle RNA-MLP1. Le modèle RNA le plus performant est le modèle n° 5 avec l'architecture RNA-MLP5 (12-4-1) (Tableau 50) avec des variables de pluies, des SPI et des ETP du mois t et des 2 mois précédents (t-1) et (t-2).

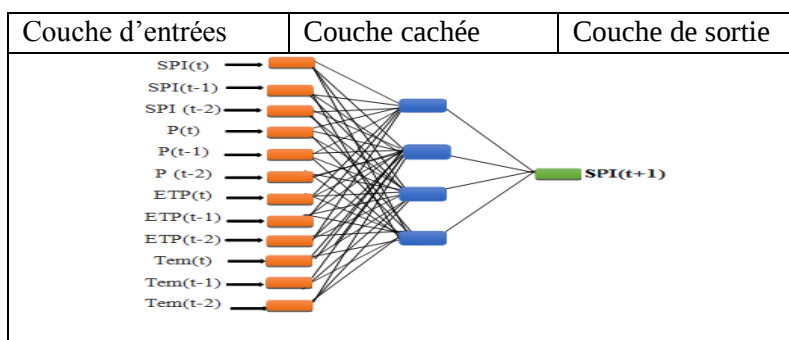


Figure 142: Architecture simplifiée du modèle RNA-MLP5

En effet, l'ajout de l'information de la température (Tem) et l'ETP à celle de la pluviométrie (P) dans un même modèle de prévision de la sécheresse change leurs influences vis-à-vis de ce modèle ainsi que les résultats produits. Les différentes combinaisons ont produit un modèle RNA amélioré par rapport aux autres (Tableaux 51 et 52). Les architectures optimales et les prévisions du modèle RNA-MLP5 par comparaison des valeurs réelles et prédites pour les deux stations Fès-DRH et Ain Bittit pour SPI à différentes fenêtres de temps (Tableaux 51 et 52).

Tableau 55 : Résultats de la prédiction de valeurs SPI à différentes échelles de temps pour le modèle de RNA-MLP5 de la station Fès-DRH

	SPI à différentes échelles de temps					
	SPI 3	SPI 6	SPI 9	SPI 12	SPI 24	SPI 48
Architecture	12-4-1	12-29-1	12-29-1	12-4-1	12-4-1	12-17-1
MAE	0.211	0.251	0.158	0.091	0.066	0.027
RMSE	0.459	0.501	0.395	0.303	0.254	0.165
R	0.836	0.890	0.923	0.993	0.969	0.987
	Très fort	Très fort	Très fort	Très fort	Très fort	Très fort
Nash	69.80%	77.11%	84.76%	86.64%	94.02%	97.57%
	Bon	Bon	Très Bon	Très Bon	Excellent	Excellent

Tableau 56 : Résultats de la prédiction de valeurs SPI à différentes échelles de temps pour le modèle de RNA-MLP5 de la station Ain Bittit

	SPI à différentes échelles de temps					
	SPI 3	SPI 6	SPI 9	SPI 12	SPI 24	SPI 48
Architecture	12-4-1	12-12-1	12-10-1	12-30-1	12-17-1	12-12-1
MAE	0.364	0.306	0.107	0.104	0.047	0.030
RMSE	0.581	0.548	0.322	0.323	0.217	0.173
R	0.732	0.835	0.934	0.956	0.980	0.988
	Fort	Très fort	Très fort	Très fort	Très fort	Très fort
Nash	52.31%	68.94%	87.21%	91.15%	95.77%	97.49
	Mauvais	Bon	Très bon	Excellent	Excellent	Excellent

Le nombre de neurones dans la couche cachée est optimisé en utilisant les données disponibles. Pour ce faire, on a procédé par essais et erreurs basés sur la mesure de la valeur absolue moyenne (MAE) pour les données utilisées pour tester chaque modèle. Les figures 143 et 144 montrent la variation du nombre de neurones dans la couche cachée en fonction du critère MAE pour les deux stations (Ain Bittit et Fès-DRH) pour les modèles SPI élaborés. 12 neurones dans la couche cachée est le nombre optimal pour la station Ain Bittit et 17 neurones pour la station Fès-DRH.

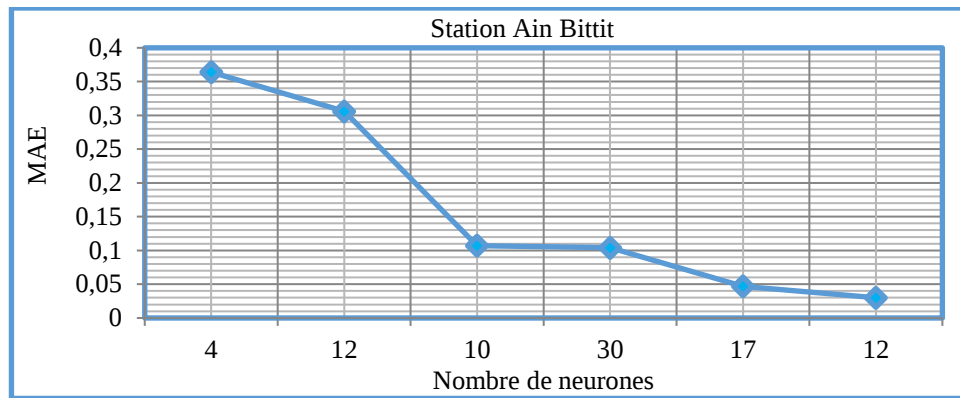


Figure 143 : Nombre de neurones dans la couche cachée en fonction du MAE de la station Ain Bittit

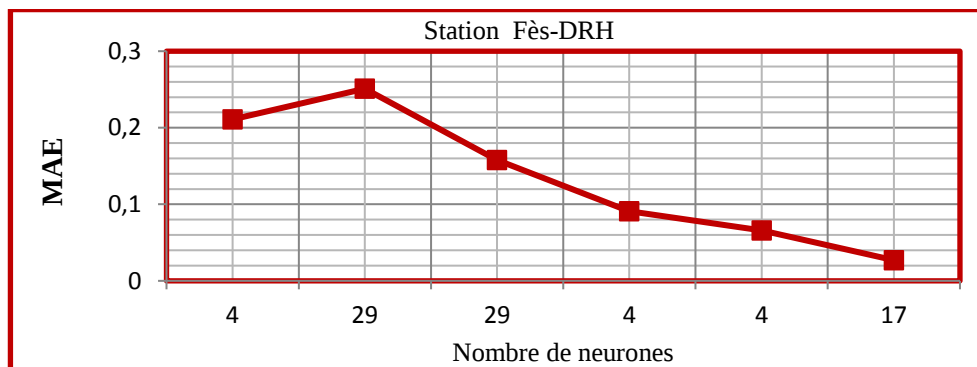


Figure 144: Nombre de neurones dans la couche cachée en fonction du MAE de la station Fès-DRH

Graphiquement les résultats illustrent bien les bonnes performances du modèle RNA-MLP5 pour les deux stations Fès-DRH (Figure 145) et Ain Bittit (Figure 146).

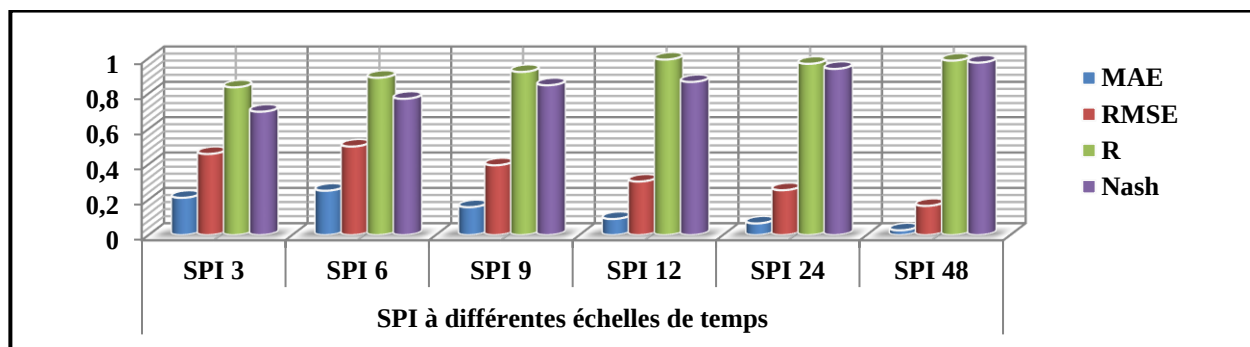


Figure 145: Comparaison des critères de performance pour SPI à différentes échelles de temps de la station Fès-DRH

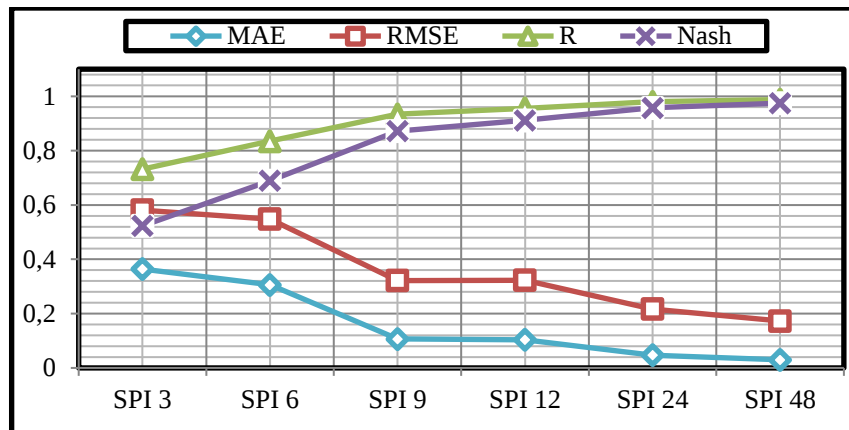


Figure 146: Comparaison des critères de performance pour SPI à différentes échelles de temps de la station Fès-DRH

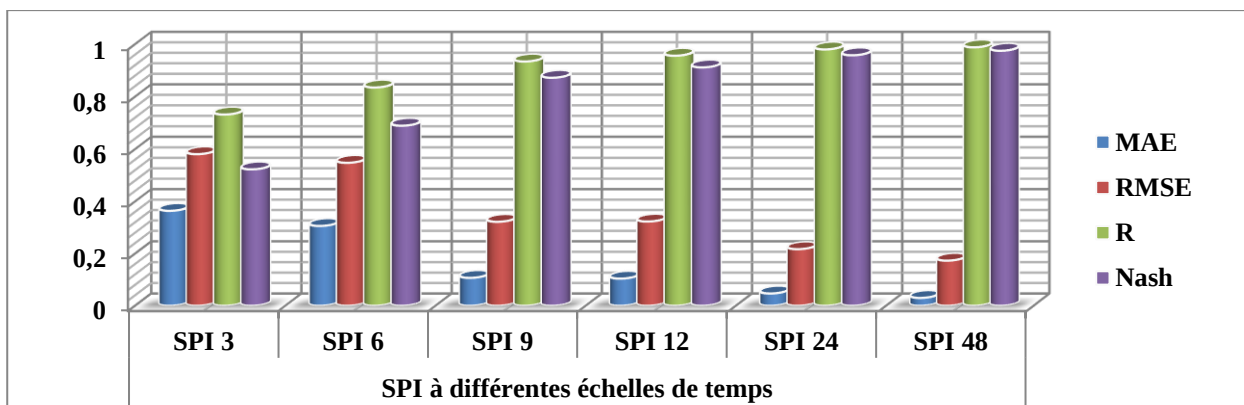


Figure 147: Comparaison des critères de performance pour SPI à différentes échelles de temps de la station Ain Bittit

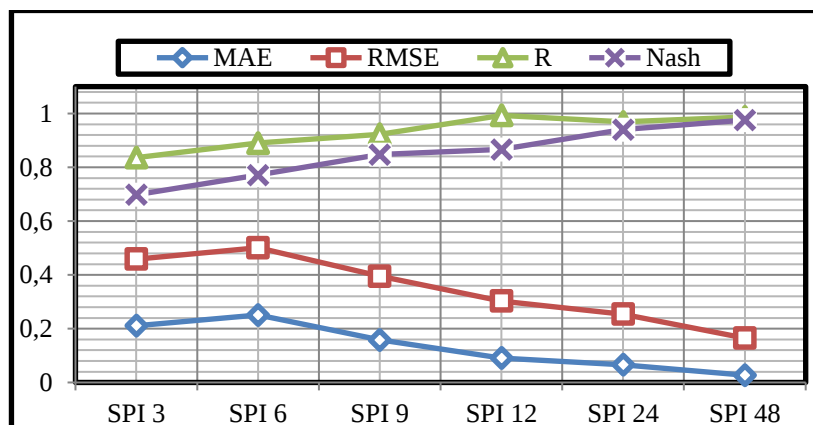


Figure 148: Comparaison des critères de performance pour SPI à différentes échelles de temps de la station Ain Bittit

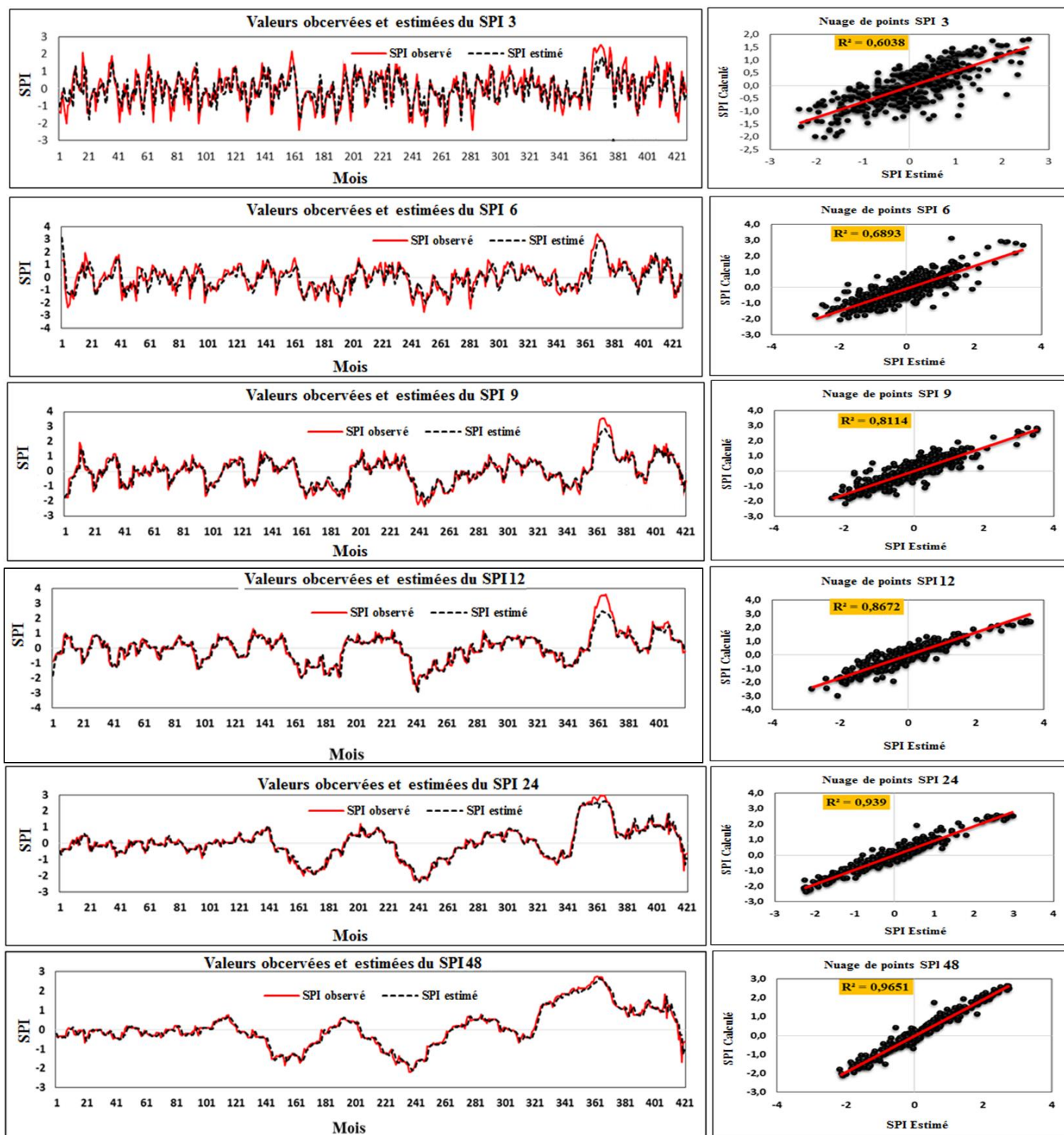


Figure 149: Comparaison entre les valeurs SPI observées et estimées de la station Fès-DRH

Les figures ci-dessus comparent des données observées et estimées de SPI qui forme un nuage de points situé autour de la droite linéaire pour la phase du test du modèle. Les résultats obtenus montrent une concordance importante illustrée par un coefficient de corrélation élevé, à l'exception de SPI3 et SPI6 qui indiquent des performances moyennes entre les valeurs observées et prévues.

On s'aperçoit aussi que, la corrélation entre les valeurs observées et estimées du modèle augmente de manière significative à une échelle de temps plus élevée. Ceci peut être expliqué par la voie de la série chronologique SPI calculé. Contrairement à la série de précipitations, SPI suit une norme distribution normale.

Cette conversion soudaine élimine les pics laissant une courbe lisse lentement variable qui est plus facile à prévoir par utilisation des modèles de réseaux neuronaux.

3. Discussion

Des études similaires ont montré que, plus on dispose de données pour l'apprentissage plus les modèles ne reproduiraient fidèlement les débits. Parmi ces études, on peut citer celles de (Piechowiak, 2004) sur la prévision des débits de la rivière Apalachicola (Floride, USA) avec les réseaux de neurones artificiels. En effet, ces auteurs ont fait la prévision des débits à plusieurs pas de temps (temps journalier, mensuel, trimestriel et annuel) et ont obtenu des coefficients de corrélation de Pearson respectifs de 0,98 ; 0,95 ; 0,91 et 0,83. L'analyse de ces performances montre que plus le pas de temps considéré est petit, ce qui est équivalent à un nombre élevé de données, les modèles de prévision développés apparaissent plus performants. Les travaux de (Lallahem & al., 2002) ont aussi permis de conclure que plus les données en entrée des réseaux de neurones sont nombreuses plus ces modèles ne sont pas performants.

La mauvaise prévision par les réseaux de neurones dans des études pourrait être due à la séparation des bases de calage et de validation. Une séparation aléatoire pourrait améliorer les performances de ces modèles.

Dans le cas de la Plaine de Saïss, l'application des réseaux de neurone pour l'estimation de la sécheresse a permis d'obtenir d'assez bons résultats. En effet, les coefficients de corrélation entre les valeurs prédites et celles mesurées varient de 0,63 à 0,97. Dans ce cas les performances obtenues sont relativement bonnes et pourraient être améliorées en utilisant une base de données plus importante. Le choix de variables explicatives de bonne qualité pourrait en outre permettre d'obtenir de meilleurs résultats.

En effet, un Perceptron Multicouches avec une seule couche cachée et quelques neurones suffisent pour faire la prévision de la sécheresse au niveau de la Plaine de Saïss, avec des bonnes performances. Les nombres de neurones 4 de la station Fès-DRH et 48 de la station Ain Bittit sur les couches cachées des réseaux développés ont données des résultats impressionnants. Il ressort de cette étude que la pluie et l'évapotranspiration potentielle avec la température sont suffisantes comme données d'entrée des Perceptrons Multicouches Dirigés pour faire la prévision des sécheresses dans un contexte de climat semi-aride.

Le modèle RNA-MLP5 est avéré être le modèle le plus efficace pour les prévisions de SPI 3 à SPI 48 dans les deux stations météorologiques. Le modèle a montré une plus grande corrélation entre le SPI observé et le SPI prédit par rapport aux autres modèles. Ainsi Le modèle RNA-MLP5 a aussi constamment affiché des valeurs inférieures de RMSE et MAE par rapport aux autres modèles. Le modèle retenu a montré des résultats de prévisions accrus pour SPI 48 par rapport à SPI 3. Les résultats de prévisions se sont détériorés avec l'augmentation du délai de prévision pour tous les modèles. Les méthodes de RNA ont prouvé leur efficacité dans la prévision du SPI comme technique d'apprentissage automatique. Cette tendance s'est produite dans la Plaine de Saïss et devrait être appliquée dans d'autres régions et doit être comparée aux d'autres techniques. Les études futures devraient tenter d'explorer les modèles Wavelet-RNA avec des décompositions d'ondelettes et les prévisions SPI dans d'autres régions avec des caractéristiques différentes. Elles devraient également tenter de quantifier l'erreur de changement de temps, partie des problèmes de prévision avec les modèles de régression.

III. Développement d'un modèle hybride

Afin de minimiser les effets négatifs de la sécheresse sur la nature et l'environnement, il est nécessaire de chercher une solution précise à sa prévision. À cet égard différentes méthodes ont été introduites jusqu'à présent. Bacanlı & al., (2008) ont utilisé le système d'inférence neuro-floue adaptatif (ANFIS) pour prévoir la sécheresse en Turquie, Keskin & al., (2009) ont également utilisé les modèles ANFIS et la logique floue pour prévoir la sécheresse météorologique. Cette partie présente une analyse comparative des performances des modèles ANN, SVR face au modèle ANFIS pour estimer la sécheresse météorologique à l'aide du SPI.

1. Données et méthodes

1.1. Données

Les données de la série chronologique des deux stations Ain Bittit et Fès-DRH sur la période comprise entre 1978/79 et 2013/14, les valeurs de SPI et les précipitations des mois précédents pour la génération d'un modèle d'estimation de la sécheresse avec la méthode d'ANFIS ont été utilisées. Pour cela, les sorties SPI pour 1, 3, 6, 9 et 12 mois ont été considérées.

Les ensembles de données pour les deux stations ont été divisés en trois sous-ensembles, d'apprentissage de validation et de test. L'ensemble de données d'apprentissage comprend des données mesurées entre les années 1978/79 et 2003/04.

Afin d'obtenir une évaluation et une comparaison plus fiables, les modèles sont testés en évaluant un ensemble de données n'étant pas utilisé pendant le processus d'apprentissage. L'ensemble de données de validation et de test est enregistré entre les années 2004/05 et 2013/14.

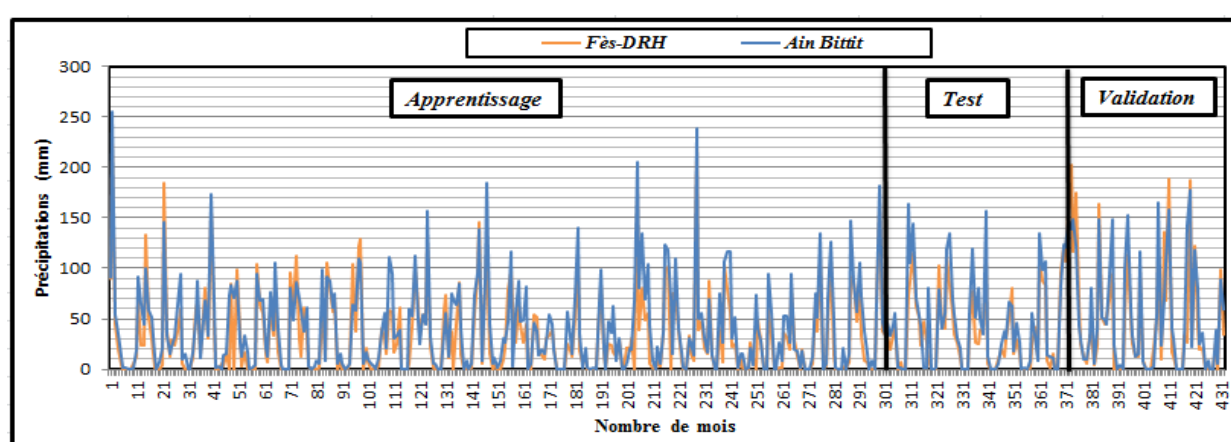


Figure 150: Séries chronologiques de données mensuelles de précipitations pour les deux stations Fès-DRH et Ain Bittit pour la période de 1978-2014

Les paramètres statistiques pour les ensembles de données d'apprentissage et d'évaluation, tels que la valeur minimale, La valeur maximale, la moyenne, l'écart type, la variance, le coefficient d'asymétrie et le Kurtosis ont été calculés et donnés dans les tableaux 53, 54 et les figures 149 et 150 pour faire une comparaison des deux ensembles de données.

Tableau 57 : Paramètres statistiques pour les données d'apprentissage (1978-2004)

Apprentissage	Paramètres statistiques	Stations	
		Fès-DRH	Ain Bittit
	Nombre d'échantillons	300	300
	Minimum	0	0
	Maximum	224	256
	Moyenne	32.36	41.04
	Ecart type	40.26	44.20
	Variance	1620.94	1954.02
	Coefficient de variance	124.40	107.69
	Médiane	17	27

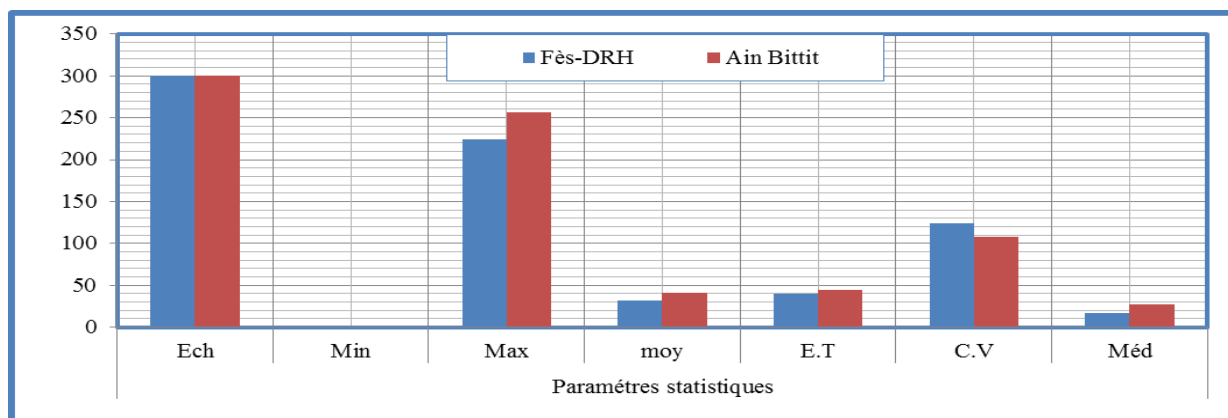


Figure 151: Paramètres statistiques pour les données d'apprentissage (1978-2004)

Tableau 58 : Paramètres statistiques pour les données d'évaluation (2004-2014)

	Paramètres statistiques	Stations	
		Fès-DRH	Ain Bittit
Validation et test	Nombre d'échantillon	132	132
	Minimum	0	0
	Maximum	202	178
	Moyenne	41,46212	49,38939
	Ecart type	47,10706	50,18955
	Variance	2219,075	2518,991
	Coefficient de variance	113,6147	101,6201
	Médiane	26	34,5

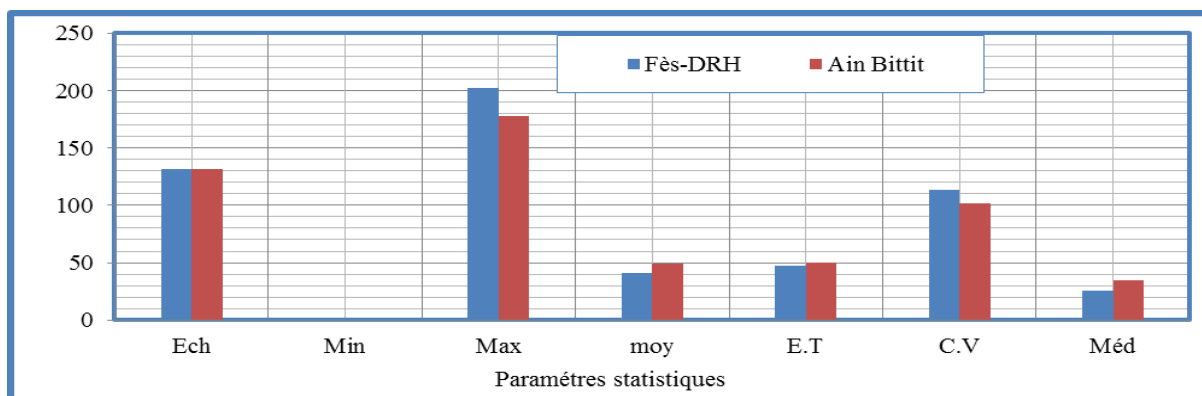


Figure 152: Paramètres statistiques pour les données d'évaluation (2004 et 2014)

1.2. Méthodes

A. Modèles SVR

Les modèles SVR adhèrent au principe de minimisation du risque structural par opposition au principe empirique de minimisation du risque utilisé par les réseaux de neurones classiques (Vapnik, 1995). Par conséquent, ces modèles réduisent l'erreur de généralisation par opposition à l'erreur d'apprentissage.

Le développement de modèles SVR par Cimen (2008) ont été créés à l'aide du logiciel Online SVR créé par Parrella (2007), qui peut être utilisé pour construire des machines vectorielles de soutien pour la régression. Les données ont été divisées en deux ensembles, 70% des données ont été réparties dans l'ensemble d'étalonnage

tandis que les 30% finales ont été utilisées comme ensemble de validation. Contrairement aux réseaux de neurones, les données ne peuvent être divisées qu'en deux ensembles, l'ensemble d'étalonnage étant équivalent aux ensembles d'apprentissage et de test trouvés dans les réseaux neuronaux.

Toutes les entrées et les sorties ont été normalisées entre 0 et 1. Tous les modèles SVR utilisaient alors le noyau de la fonction racine basique (RBF). En conséquence, chaque modèle SVR se composait de trois paramètres sélectionnés : gamma (γ), coût (C) et epsilon (ϵ). Le paramètre γ est une constante qui réduit l'espace du modèle et contrôle la complexité de la solution, tandis que (C) est une constante positive qui est un paramètre de contrôle de capacité et ϵ est la fonction de perte qui décrit le vecteur de régression sans toutes les données d'entrée (Kisi & Cimen, 2011).

Ces trois paramètres ont été sélectionnés sur la base d'une procédure d'essai et d'erreur. La combinaison des paramètres qui ont produit les valeurs RMSE les plus faibles pour les ensembles de données d'étalonnage ont été sélectionnées.

B. Modèles ANFIS

Les modèles ANFIS permettent de s'affranchir de l'effet « boîte noire » reproché aux réseaux de neurones classiques, d'associer la connaissance dysfonctionnelle disponible sous la forme de règles floues et de conserver une capacité d'apprentissage issue des réseaux de neurones (Keskin & al., 2004). Une des plus importantes étapes pour la génération de la structure des réseaux neuro-flous (ANFIS) est l'établissement des règles d'inférence floues.

En utilisant un mécanisme d'inférence, les règles sont définies comme combinaisons des fonctions d'appartenance des différentes variables d'entrée. Les variables d'entrée sont divisées en un nombre limité de valeurs linguistiques (étiquette), chacune caractérisée par une fonction d'appartenance (et leurs combinaisons mènent à beaucoup de règles d'inférences floues).

Il n'existe pas de règle de base pour délimiter le nombre de fonctions d'appartenance (MF) des modèles ANFIS et ils sont habituellement déterminés par une approche par essais et erreurs. Pour choisir le nombre de MF, un modélisateur doit éviter d'utiliser un grand nombre de fonctions ou de paramètres d'appartenance pour gagner du temps et calculer l'effort (Keskin & al., 2004).

L'ajustement des paramètres de l'ANFIS est réalisé lors de la phase d'apprentissage. Pour cela, un ensemble de données associant les séquences d'entrées et de sorties est nécessaire. Pour la réalisation de cette phase, l'algorithme d'apprentissage hybride est utilisé.

L'algorithme d'apprentissage hybride est une association de la méthode de descente de gradient de l'erreur et de la méthode d'estimation des moindres carrés. La méthode de descente de gradient de l'erreur permet d'ajuster les prémisses alors que la méthode LSM (Least Square Method) ajuste les paramètres linéaires (conséquents ou conclusions).

L'apprentissage se fait de façon itérative jusqu'à ce que le nombre de cycles d'apprentissage soit atteint ou jusqu'à ce que l'erreur moyenne entre la valeur de sortie désirée et générée par l'ANFIS atteigne une valeur prédéterminée. Cette phase dépend donc de la qualité de l'ensemble des données au sens où cet ensemble doit représenter au mieux les différents comportements attendus (Wang & Mendel, 1992a et 1992b).

Ce modèle a été formé et testé en utilisant quatre différentes fonctions d'appartenance (MF) testées pour les modèles ANFIS dans ce travail, c'est-à-dire Gaussien (MFgauss), en forme de cloche (MFgbell), triangulaire (MFtri), splinebased (MFpi) ou Piduetois (Jang, 1993).

Tableau 59 : Paramètres de formation des modèles ANFIS

AND méthode	Prod
Imp. méthode	Minimum
Aggr. méthode	Maximum
Méthode de défuzzification	Wtaver
Taille de pas	0,21
Taux de diminution de la taille des pas	0,8
Taux d'augmentation de la taille des pas	1,20
Fonction d'adhésion	Fonction d'appartenance de cloche généralisée (m = 3)

Des modèles ANFIS avec différents types de MF ont été exécutés avec 2, 3, 4 et 5 MF et 50, 100, 150, 200, 250, 300 et 400 itérations pour chaque nœud de données d'entrée (Rajae, 2011). Les caractéristiques de la formation du modèle ANFIS sont présentées dans le tableau 55.

Les données SPI pour l'heure actuelle ont été importées en tant qu'entrées et le SPI pour 1, 2 et 3 temps (12 mois) à venir considérés comme cible. La structure des étapes appliquées pour le choix du modèle pour la prédiction de la sécheresse est illustrée dans la figure 153.

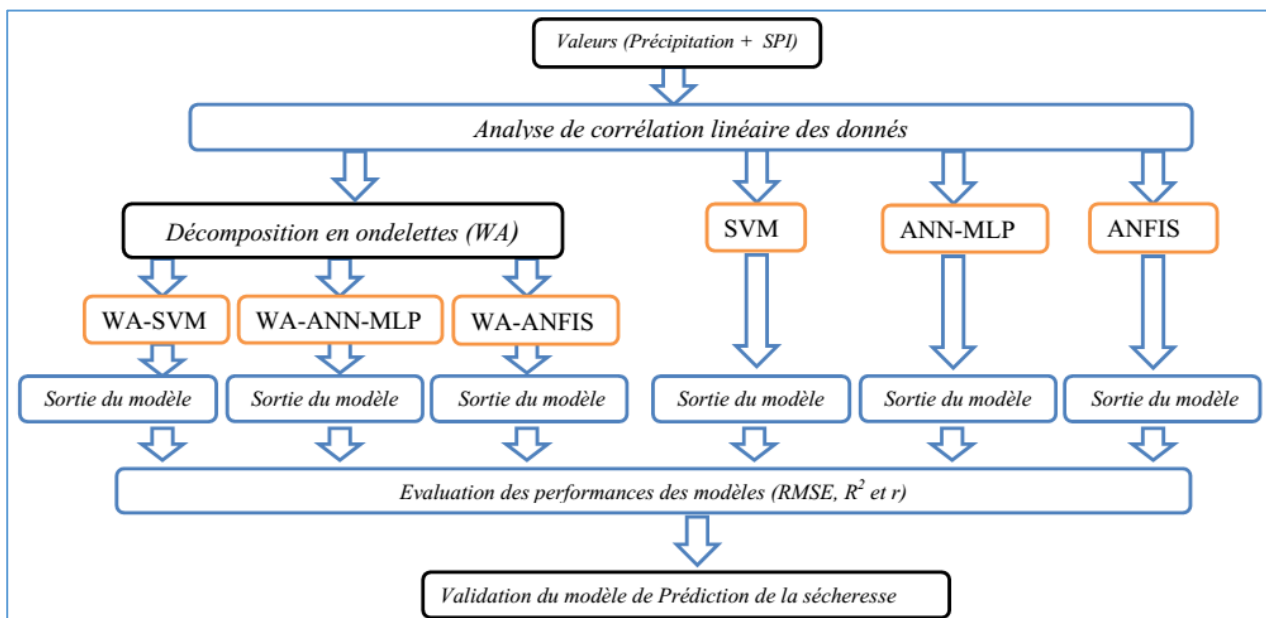


Figure 153: Etapes appliquées pour le choix du modèle de la prédiction de la sécheresse

C. Modèles WA-ANFIS, WA-ANN-MLP et WA-SVR

Afin de construire un modèle Wavelet-ANFIS et Wavelet-ANN-MLP, les sous-séries qui sont dérivées de l'utilisation de la transformée d'ondelette discrète sur les données de séries temporelles d'origine ont été utilisées comme entrées pour des modèles de réseaux neuronaux.

Chaque élément de sous-série joue un rôle unique dans la série chronologique originale et la performance de chaque sous-série est distincte.

Dans la première étape, les données SPI d'origine ont été décomposées en une série de détails en utilisant une transformée en ondelettes discrètes. Le processus de décomposition a été itéré avec des signaux d'approximation successifs décomposés tour à tour, de sorte que la série temporelle originale a été décomposée en plusieurs composantes de basse résolution (Adamowski & Fung Chan, 2011).

Toutes les variables mentionnées ont été décomposées en 1, 2, 3 et 4 niveaux par sept types différents d'ondelettes, c'est-à-dire les ondelettes db4, bior1.1, bior1.5, rboi1.1, rboi1.5, coif2 et coif4.

Les modèles WA-SVR ont été formés exactement de la même manière que les modèles SVR avec le logiciel Online-SVR (2007) à l'exception que les entrées étaient en forme d'ondelettes décomposées. Les données pour les modèles WA-SVR ont été partitionnées exactement comme les données pour SVR. Les paramètres optimaux pour les modèles WA-SVR ont été choisis en utilisant la même procédure utilisée pour trouver les paramètres des modèles SVR.

2. Conception des modèles

En tant que modèles basés sur les données, la capacité d'ANFIS et SVR à faire des estimations raisonnables dépend principalement de la sélection des paramètres d'entrée, Une considération adéquate des facteurs qui contrôlent le système étudié est donc cruciale pour le développement d'un réseau fiable.

Pour faciliter notre étude, un test préliminaire a été effectué pour les vingt modèles en vue de choisir le modèle qui montre les performances les plus importantes. Par conséquent ce dernier sera retenu pour la comparaison des trois méthodes ANN-MLP, SVM, ANFIS destinées pour la prévision de la sécheresse météorologique, à différentes échelles de temps, dans la Plaine de Saïss.

Comme il est impossible de montrer les résultats des modèles pour les phases comportant 20 modèles en raison de restrictions d'espace, les performances de validation et du test des modèles pour SPI-3, en utilisant RMSE et r , des deux stations Fès-DRH et Ain Bittit sont présentées dans le tableau (Annexe III). Le tableau montre que les performances de modèles, composés de valeurs de précipitation précédentes seules, sont inférieures aux performances des autres modèles.

Tableau 60 : Structures des modèles élaborés pour la prévision de la sécheresse

Modèles	Entrées	Sortie
Mod1	SPI(t), SPI(t-1)	SPI(t+1)
Mod2	SPI(t), SPI(t-1), SPI(t-2),	SPI(t+1)
Mod3	SPI(t), SPI(t-1), SPI(t-2), SPI(t-3),	SPI(t+1)
Mod4	SPI(t), SPI(t-1), SPI(t-2), SPI(t-3), SPI(t-4),	SPI(t+1)
Mod5	SPI(t), SPI(t-1), SPI(t-2), SPI(t-3), SPI(t-4), SPI(t-5),	SPI(t+1)
Mod6	SPI(t), SPI(t-1), SPI(t-2), SPI(t-3), SPI(t-4), SPI(t-5), SPI (t-6),	SPI(t+1)
Mod7	P(t-1)	SPI(t+1)
Mod8	P(t-1), P(t-2),	SPI(t+1)
Mod9	P(t-1), P(t-2), P(t-3),	SPI(t+1)
Mod10	P(t-1), P(t-2), P(t-3), P(t-4),	SPI(t+1)
Mod11	P(t-1), P(t-2), P(t-3), P(t-4), P(t-5),	SPI(t+1)
Mod12	P(t-1), P(t-2), P(t-3), P(t-4), P(t-5), P (t-6),	SPI(t+1)
Mod13	SPI(t), SPI(t-1), P(t-1)	SPI(t+1)
Mod14	SPI(t), SPI(t-1), SPI(t-2), P(t-1)	SPI(t+1)
Mod15	SPI(t), SPI(t-1), SPI(t-2), P(t-1), P(t-2)	SPI(t+1)
Mod16	SPI(t), SPI(t-1), SPI(t-2), SPI(t-3), P(t-1)	SPI(t+1)
Mod17	SPI(t), SPI(t-1), SPI(t-2), SPI(t-3), P(t-1), P(t-2)	SPI(t+1)
Mod18	SPI(t), SPI(t-1), SPI(t-2), SPI(t-3), SPI(t-4), P(t-1)	SPI(t+1)
Mod19	SPI(t), SPI(t-1), SPI(t-2), SPI(t-3), SPI(t-4), P(t-1), P(t-2)	SPI(t+1)

Mod20	SPI(t), SPI(t-1), SPI(t-2), SPI(t-3), SPI(t-4), SPI(t-5), P(t-1)	SPI(t+1)
-------	--	----------

3. Résultats et analyses

3.1. Optimisation des performances des modèles ANN-MLP et ANFIS

Dans cette étude actuelle, la capacité des modèles susmentionnés à prévoir efficacement SPI sur différents délais a été évaluée. Le tableau 57 montre le r, le RMSE pour différents modèles, plusieurs réseaux différents ont été testés, Le meilleur nombre de neurones dans la couche cachée, a été déterminé à 13 neurones et pour les différentes prévisions d'échelles de temps. Comme le montre le tableau 57, FNN-LM (6 13 1) était le meilleur réseau, Ce résultat est en conformité avec la suggestion exprimée par (Kavzoglu & Mather 2003), Ils suggèrent que le nombre de neurones dans la couche cachée doit être fixé à deux fois les nœuds d'entrée plus un, Il confirme que le nombre de neurones dans la couche cachée doit être déterminé en utilisant une méthode d'essai et d'erreur,

Tous les modèles prévoient la sécheresse météorologique pour un temps et deux en avance, mais pour 3 et 4 mois à l'avance, le coefficient de corrélation r diminuait et le RMSE augmentait significativement, En d'autres termes, on s'attend à une durée de temps plus longue moins de précision (tableau 57).

Tableau 61 : Valeurs de r et RMSE pour différents modèles d'ANN-MLP à différentes échelles de temps

Algorithmes d'apprentissage	Fonction de transfert pour la couche cachée	Prédiction pour des échelles de temps différentes					
		SPI(t+1)		SPI(t+2)		SPI (t+ 3)	
		Test		Test		Test	
		r	RMSE	r	RMSE	r	RMSE
Train LM	Logsig	8.583	2.646	8.396	3.849	7.688	4.691
Train SCG	Logsig	8.374	4.404	8.109	3.830	7.403	4.437
Train RP	Logsig	7.662	4.569	7.739	4.282	7.395	4.510

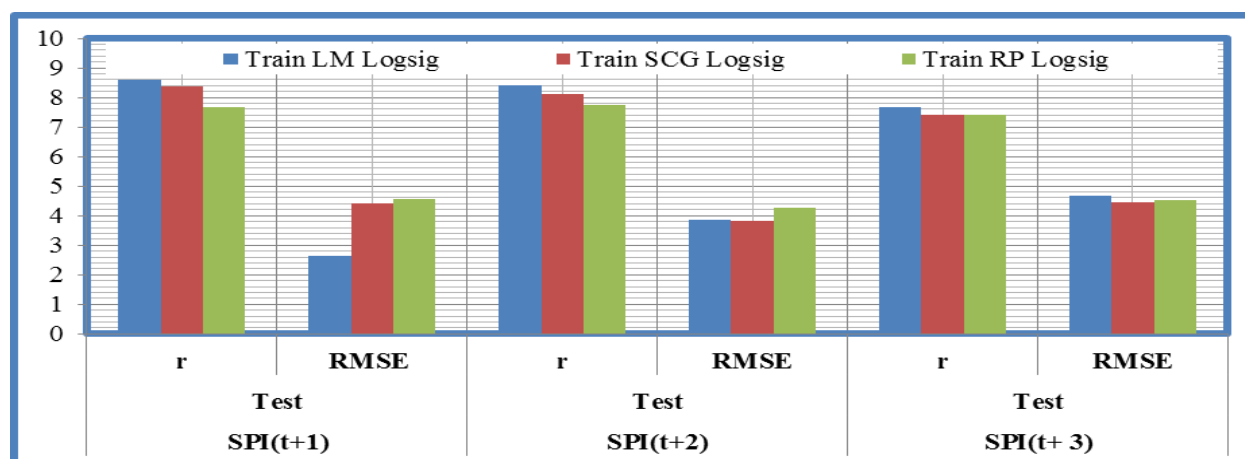


Figure 154: Valeurs de r et RMSE pour différents modèles d'ANN-MLP pour des différentes échelles de temps

Il n'existe pas de règle de base pour délimiter le nombre de fonctions d'appartenance (MF) des modèles ANFIS et ils sont habituellement déterminés par une approche par essais et erreurs. Pour choisir le nombre de MF, un modélisateur doit éviter d'utiliser un grand nombre de fonctions ou de paramètres d'appartenance pour gagner du temps et calculer l'effort (Keskin & al., 2004).

Quatre types de fonctions d'appartenance (MF) ont été testés dans cette étude : Gaussien (MFgauss), Bell-shaped (MFgbell), Triangulaire (MFtri), Spline-based (MFpi) ou Piduetoits (Jang 1993). Des modèles

ANFIS avec différents types de MF ont été exécutés avec 2, 3, 4 et 5 MF et avec 50, 100, 150, 200, 250, 300 et 400 itérations pour chaque nœud de données d'entrée (Tableau 58).

En général, ANFIS effectue plus efficacement que les modèles ANN en raison de l'effet de fuzzification de l'entrée par les fonctions d'appartenance.

Tableau 62 : Résultats des modèles ANFIS avec le meilleur nombre de fonctions d'appartenance (2 MF)

Fonctions d'appartenance (MF)	Prédiction à différentes échelles de temps					
	SPI(t+1)		SPI(t+2)		SPI(t+ 3)	
	r	RMSE	r	RMSE	r	RMSE
Gauss	0.91	0.086	0.88	0.089	0.88	0.095
Gbell	0.88	0.089	0.87	0.090	0.86	0.092
Pi	0.92	0.087	0.90	0.089	0.91	0.091
Triangular	0.88	0.090	0.87	0.089	0.87	0.092

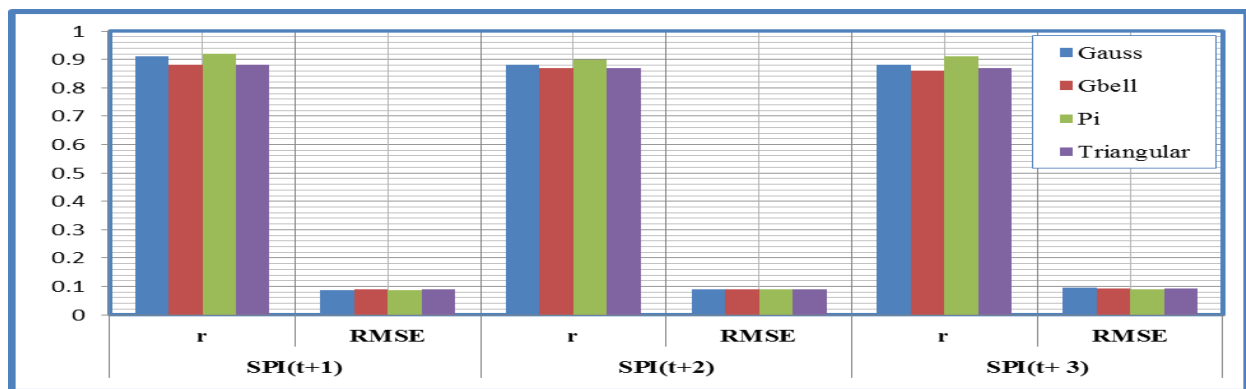


Figure 155: Résultats des modèles ANFIS avec le meilleur nombre de fonctions d'appartenance (2 MF)

Ensuite, les modèles Wavelet-ANN-MLP et Wavelet-ANFIS ont été testés, le meilleur modèle d'ANN-MLP a été choisi pour faire des modèles Wavelet-ANN-MLP hybrides, Les données ont été regroupées en 1, 2, 3 et 4 niveaux,

Les meilleurs modèles Wavelet-ANN-MLP et Wavelet-ANFIS ont été trouvés plus précis que les deux modèles ANN-MLP et ANFIS pour prévoir SPI, Le tableau 60 montre les résultats de modèles Wavelet-ANN-MLP avec le meilleur réseau (c'est-à-dire FNN-LM) et pour des intervalles de temps prédits différents).

Tableau 63 : Résultats des modèles Wavelet-ANN-MLP à différents intervalles de temps prédits

Types d'ondelettes	Prédiction à différentes échelles de temps								
	L (t+1)			L (t+2)			L (t+ 3)		
	RMSE	R ²	NE	RMSE	R ²	NE	RMSE	R ²	NE
Db4	0.316	0.93	0.87	0.369	0.94	0.83	0.980	0.93	0.73
Bior 1,1	0.328	0.91	0.84	0.356	0.90	0.82	0.919	0.89	0.72
Bior 1,5	0.316	0.92	0.85	0.339	0.88	0.85	0.998	0.87	0.75
Rboi 1,1	0.338	0.93	0.85	0.359	0.90	0.82	0.943	0.90	0.72
Rboi 1,5	0.220	0.94	0.90	0.229	0.93	0.87	0.652	0.92	0.77
Coif 2	0.370	0.92	0.86	0.389	0.92	0.79	0.820	0.91	0.76
Coif 4	0.387	0.91	0.84	0.379	0.94	0.82	0.871	0.92	0.72

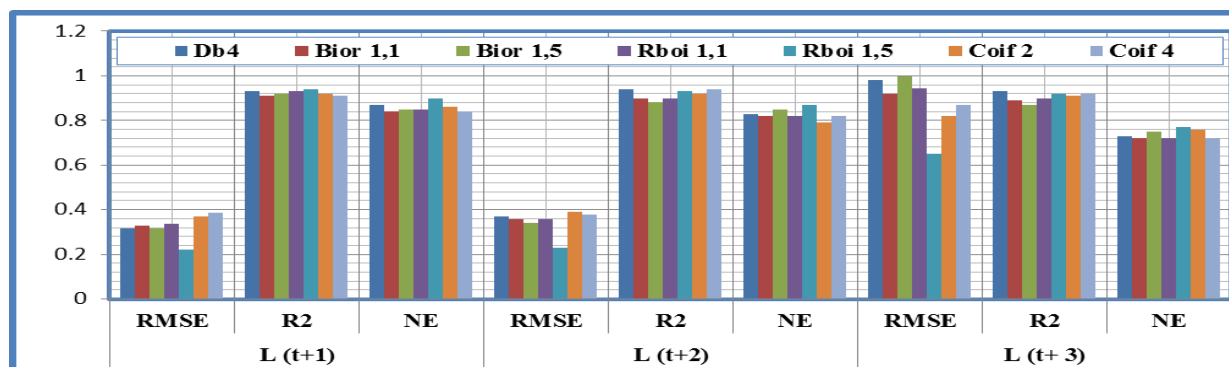


Figure 156 : Résultats des modèles Wavelet-ANN-MLP pour les différents intervalles de temps prédits

De plus, le tableau 60 montre les résultats des modèles Wavelet-ANFIS avec le meilleur nombre et le meilleur type de MF (c'est-à-dire la fonction d'appartenance 4 et la fonction d'appartenance à la bellshape) et pour des intervalles de temps prédits différents,

Selon la résolution mensuelle du calendrier, dans le sous-groupe de niveau 2, il y a 2 sous-ensembles (mode de 21 mois qui est presque le mode annuel et 22 mois), En fait, la durée et l'intervalle de temps des séries de données doivent être considérés afin de déterminer le nombre approprié de niveaux de décomposition.

Tableau 64 : Résultats des modèles Wavelet-ANFIS pour les différentes échelles de temps

Types d'ondelettes	Prédiction à différentes échelles de temps								
	L (t+1)			L (t+2)			L (t+ 3)		
	RMSE	R ²	NE	RMSE	R ²	NE	RMSE	R ²	NE
Db4	0.112	0.97	0.87	0.169	0.95	0.88	0.241	0.93	0.79
Bior 1,1	0.131	0.95	0.85	0.156	0.93	0.86	0.232	0.89	0.80
Bior 1,5	0.113	0.96	0.85	0.119	0.94	0.88	0.253	0.90	0.80
Rboi 1,1	0.154	0.97	0.91	0.159	0.96	0.89	0.262	0.91	0.81
Rboi 1,5	0.096	0.98	0.94	0.10	0.97	0.92	0.171	0.96	0.87
Coif 2	0.147	0.94	0.88	0.189	0.94	0.89	0.275	0.91	0.77
Coif 4	0.133	0.92	0.89	0.179	0.91	0.90	0.286	0.91	0.78

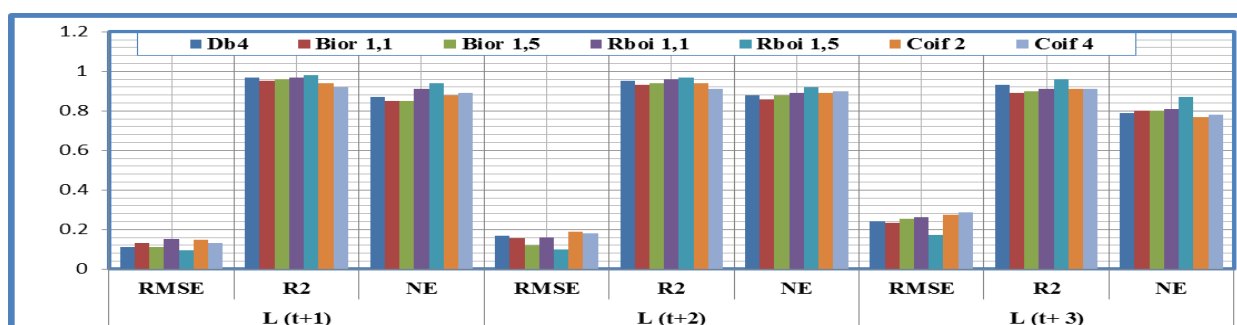


Figure 157: Résultats des modèles Wavelet-ANFIS pour les différentes étapes de temps prédites

En général, les modèles Wavelet-ANFIS et Wavelet-ANN-MLP fournissent une sécheresse météorologique plus précisément prédite que les modèles ANN-MLP et ANFIS, en outre, il a été atteint que le modèle hybride Wavelet-ANFIS est capable de prévoir SPI plus précisément que Wavelet-ANN-MLP

3.2. Préviation des différents modèles

Les résultats des modèles (tableau (Annexe II)) dans lesquels SPI est utilisé, montrent que le modèle Mod5 a une meilleure performance que les autres, Une diminution générale de la performance a été observée dans tous les modèles lorsque les valeurs à $(t - 6)$ ont été utilisées.

Lorsque les valeurs de précipitation sont les seules évaluées, les résultats des modèles indiquent que le Mod9 et le Mod11 sont les modèles les plus performants pour les deux stations, On a également observé que le modèle (Mod7) composé des valeurs de précipitation à $(t - 1)$ est le moins performant, alors que le Mod12 généré en utilisant les valeurs en $(t - 6)$ ont généralement des performances inférieures pour les deux stations. D'un autre côté, L'étude des résultats donnés dans le tableau (Annexe II) pour SPI montrent que les modèles générés avec les valeurs précédentes des données de SPI et les précipitations ont une meilleure performance, Avec l'utilisation des variables de précipitation et de SPI pour les deux stations, une amélioration a été observée dans les performances des modèles.

L'évaluation générale des 20 modèles élaborés (tableau (Annexe II)) indique la performance élevée, lors des combinaisons des précipitations et SPI, des autres modèles pour les deux stations. Par conséquent le modèle 17 est retenu pour l'étude comparative des trois méthodes ANN-MLP, SVR et ANFIS (Annexe 2). Le coefficient de détermination (R^2), l'erreur quadratique moyenne (RMSE), le coefficient de Nash-Sutcliffe (N_a) et le coefficient de corrélation (r) ont été utilisés pour comparer la performance des modèles et choisir le meilleur.

3.3. Prévisions des séries SPI-3 et SPI-12

Les statistiques relatives aux performances de prévision de tous les modèles dans les phases d'apprentissage et du test sont comparées par RMSE et R^2 dans les tableaux de 61 à 67. En générale, on constate que tous les modèles produisent des prévisions suffisantes, en particulier aux échelles 1 et 2-mois en avance et faibles à une échelle de 3-mois en phase d'apprentissage et de test à la fois.

Avant le prétraitement des séries SPI, les tableaux 61 et 64 illustrent les meilleurs résultats des modèles SVR, ANN et ANFIS, en termes d'apprentissage et de test, pour les séries chronologiques SP-3 et SP-12. Les mêmes tableaux montrent que le modèle ANFIS présente des meilleures prévisions, avec des valeurs RMSE plus petites et des valeurs R^2 plus élevées par rapport aux modèles SVR et ANN, en particulier pour 1 et 2-mois en avance. D'autre part, la précision de prévision des modèles SVR et ANN sont très proches à tous les délais de prévision, même si la méthode ANN présente une légère supériorité par rapport au SVR. On constate que les trois modèles ont démontré performance acceptable, alors que le modèle ANFIS indique une bonne prévision au cours des 3 délais de temps aux niveaux des deux stations. Ces résultats montrent que Le modèle ANFIS capture plus facilement les caractéristiques et les tendances de la modification des entrées du modèle. Cependant, les meilleurs SPI-3 prévus sont indiqués pour un délai de 1 mois. L'analyse du coefficient de détermination R^2 et RMSE pour la phase d'apprentissage et de test à la fois (Tableaux 62, 63, 64, 65 et 66) indique une baisse des performances en passant d'apprentissage au test. Bien que, les performances des différents modèles diminuent au fur et à mesure que le délai de prévision augmente.

Cependant, comme le montrent les tableaux 62, 63, 64, 65 et 66, l'utilisation de transformées en ondelettes ont amélioré la capacité de prévision des modèles, justifier par des valeurs inférieures de RMSE pour les modèles WA-SVR WA-ANN et WA-ANFIS, par rapport aux modèles SVR, ANN et ANFIS. Les RMSE passent de 0.546 à 0.163, de 0.515 à 0.144 et de 0.242 à 0.130 en apprentissage, de 0.406 à 0.195, de 0.404 à 0.156 et de 0.139 à 0.125 en phase de test au délai d'1-mois en avance pour WA-SVR, WA-ANN et WA-ANFIS respectivement.

Bien que, la majorité des prévisions SPI-3 présentent des valeurs inférieures en termes de R^2 et supérieures en termes de RMSE par rapport à SPI-12, lorsque le délai de prévision est porté à 3 mois, les prévisions se détériorent de manière prédominante dans la majorité des mesures prévisionnelles pour les deux stations en phase d'apprentissage et de test. Une explication possible pour la faible corrélation entre les valeurs

SPI-3 prédites et observées est le faible niveau d'autocorrélation entre l'ensemble de données, alors qu'il existe une meilleure autocorrélation dans les séries temporelles SPI-12 lorsque l'échelle de temps augmente.

Pour SPI 3 et d'autres SPI à court terme, chaque nouveau mois a un impact important sur la somme de précipitations. Par conséquent, le SPI 3 est sensible à tout changement de précipitation d'un mois à un autre, ceux-ci sont une explication possible pour savoir pourquoi les résultats des prévisions SPI 3 ont des valeurs R² inférieures. Dans le cas du SPI 12, chaque mois n'a pas d'impact sur le total et l'indice n'est pas aussi sensible aux variations de précipitations d'un mois à l'autre. Le fait que le SPI 3 est plus sensible aux changements de précipitation donne des résultats de prévision moins précis que le SPI -12. Cependant, les effets de l'analyse des ondelettes sont plus significatifs pour le SPI-3 que pour le SPI -12, en particulier pour les délais de prévision de 1-mois.

En ce qui concerne les meilleures prévisions de SPI 3 et SPI 12 pour les deux stations, Il existe une variabilité. Par exemple, la meilleure prévision de SPI 3 de la station Fès-DRH, le RMSE et le R² des modèles SVR se détériorent respectivement à un délai de 1 mois, tandis que la meilleure prévision de SPI 12 à un délai d'un mois s'est produite dans la station Ain Bittit.

Tableau 65 : Résultats de prévision des modèles ANN-MLP, SVR et l'ANFIS pour SPI-3

SPI-3								
1-mois								
Station	Fès-DRH				Ain Bittit			
Méthode	Apprentissage		Test		Apprentissage		Test	
	RMSE	R²	RMSE	R²	RMSE	R²	RMSE	R²
SVR	0.546	0.7253	0.406	0.7628	0.402	0.7747	0.508	0.773
ANN-MLP	0.515	0.7742	0.404	0.7506	0.423	0.7022	0.509	0.762
ANFIS	0.242	0.7902	0.139	0.7825	0.170	0.7785	0.309	0.798
2-mois								
Station	Fès-DRH				Ain Bittit			
Méthode	Apprentissage		Test		Apprentissage		Test	
	RMSE	R²	RMSE	R²	RMSE	R²	RMSE	R²
SVR	0.675	0.690	0.582	0.689	0.574	0.685	0.574	0.688
ANN-MLP	0.602	0.624	0.510	0.610	0.598	0.620	0.515	0.631
ANFIS	0.329	0.748	0.236	0.719	0.212	0.739	0.234	0.761
3-mois								
Station	Fès-DRH				Ain Bittit			
Méthode	Apprentissage		Test		Apprentissage		Test	
	RMSE	R²	RMSE	R²	RMSE	R²	RMSE	R²
SVR	0.817	0.577	0.718	0.574	0.744	0.525	0.740	0.548
ANN-MLP	0.829	0.504	0.739	0.514	0.703	0.512	0.735	0.524
ANFIS	0.531	0.620	0.341	0.606	0.305	0.617	0.337	0.721

Tableau 66 : Résultats de prévision des modèles WA-ANN-MLP, WA-SVR ET WA-ANFIS pour SPI-3

SPI-3								
1-mois								
Station	Fès-DRH				Ain Bittit			
Méthode	Apprentissage		Test		Apprentissage		Test	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²
WA-SVR	0.163	0.798	0.1950	0.795	0.1895	0.790	0.1803	0.7389
WA-ANN-MLP	0.144	0.737	0.156	0.733	0.161	0.748	0.177	0.7123
WA-ANFIS	0.130	0.852	0.1254	0.925	0.1298	0.891	0.1214	0.8750
2-mois								
Station	Fès-DRH				Ain Bittit			
Méthode	Apprentissage		Test		Apprentissage		Test	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²
WA-SVR	0.2263	0.7021	0.2450	0.745	0.2552	0.7705	0.2603	0.7698
WA-ANN-MLP	0.2005	0.7123	0.2151	0.756	0.2236	0.7989	0.2298	0.7731
WA-ANFIS	0.1702	0.7993	0.1805	0.825	0.1715	0.8239	0.1691	0.8150
3-mois								
Station	Fès-DRH				Ain Bittit			
Méthode	Apprentissage		Test		Apprentissage		Test	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²
WA-SVR	0.2300	0.6952	0.3539	0.738	0.2663	0.7808	0.2742	0.7722
WA-ANN-MLP	0.2233	0.7004	0.3404	0.745	0.2351	0.7720	0.2102	0.7835
WA-ANFIS	0.1965	0.752	0.3023	0.765	0.1952	0.7822	0.1891	0.7881

Tableau 67 : Résultats de prévision des modèles WA-ANN-MLP, WA-SVR ET WA-ANFIS pour SPI-3

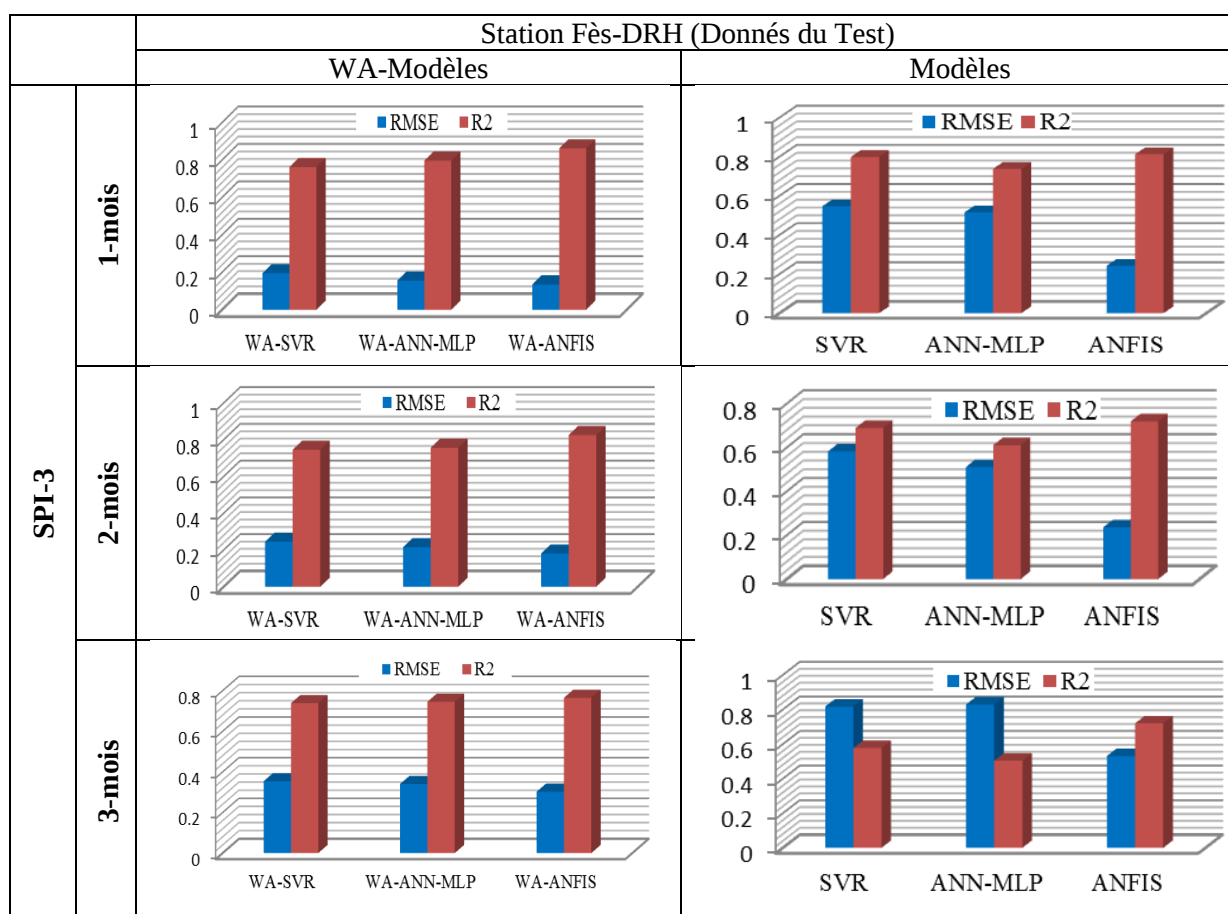


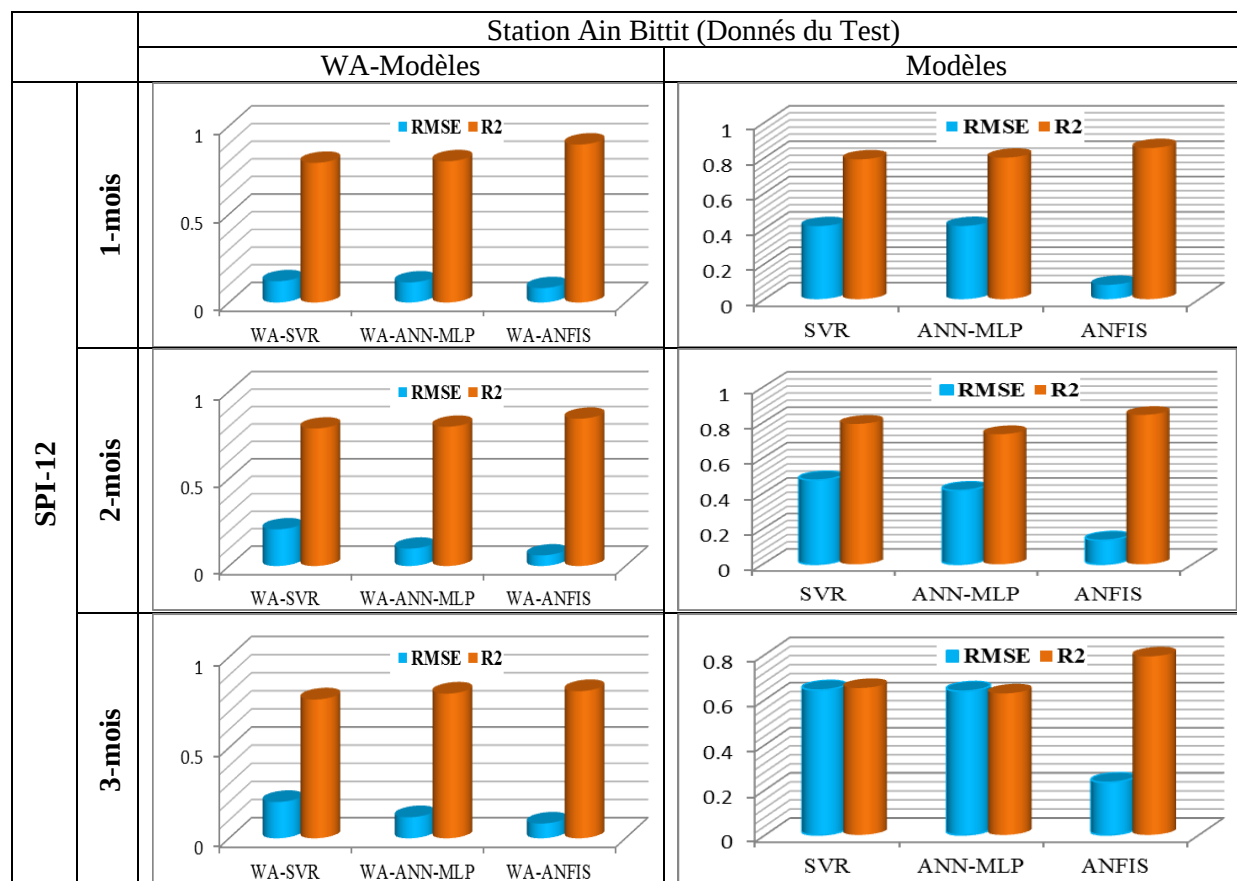
Tableau 68 : Résultats de prévision des modèles ANN-MLP, SVR et l'ANFIS pour SPI -12

SPI-12								
1-mois								
Station	Fès-DRH				Ain Bittit			
Méthode	Apprentissage		Test		Apprentissage		Test	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²
SVR	0.432	0.789	0.311	0.7921	0.307	0.7987	0.413	0.7911
ANN-MLP	0.445	0.740	0.309	0.8056	0.328	0.7152	0.414	0.8003
ANFIS	0.301	0.815	0.115	0.8725	0.105	0.8425	0.081	0.8550
2-mois								
Station	Fès-DRH				Ain Bittit			
Méthode	Apprentissage		Test		Apprentissage		Test	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²
SVR	0.577	0.783	0.493	0.794	0.479	0.790	0.476	0.793
ANN-MLP	0.504	0.727	0.415	0.715	0.499	0.725	0.417	0.735
ANFIS	0.331	0.791	0.141	0.823	0.183	0.844	0.136	0.8440
3-mois								
Station	Fès-DRH				Ain Bittit			
Méthode	Apprentissage		Test		Apprentissage		Test	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²
SVR	0.719	0.680	0.623	0.679	0.649	0.630	0.642	0.651
ANN-MLP	0.731	0.607	0.644	0.619	0.608	0.619	0.637	0.627
ANFIS	0.433	0.723	0.246	0.783	0.255	0.757	0.233	0.791

Tableau 69 : Résultats de prévision des modèles WA-ANN-MLP, WA-SVR ET WA-ANFIS pour SPI-12

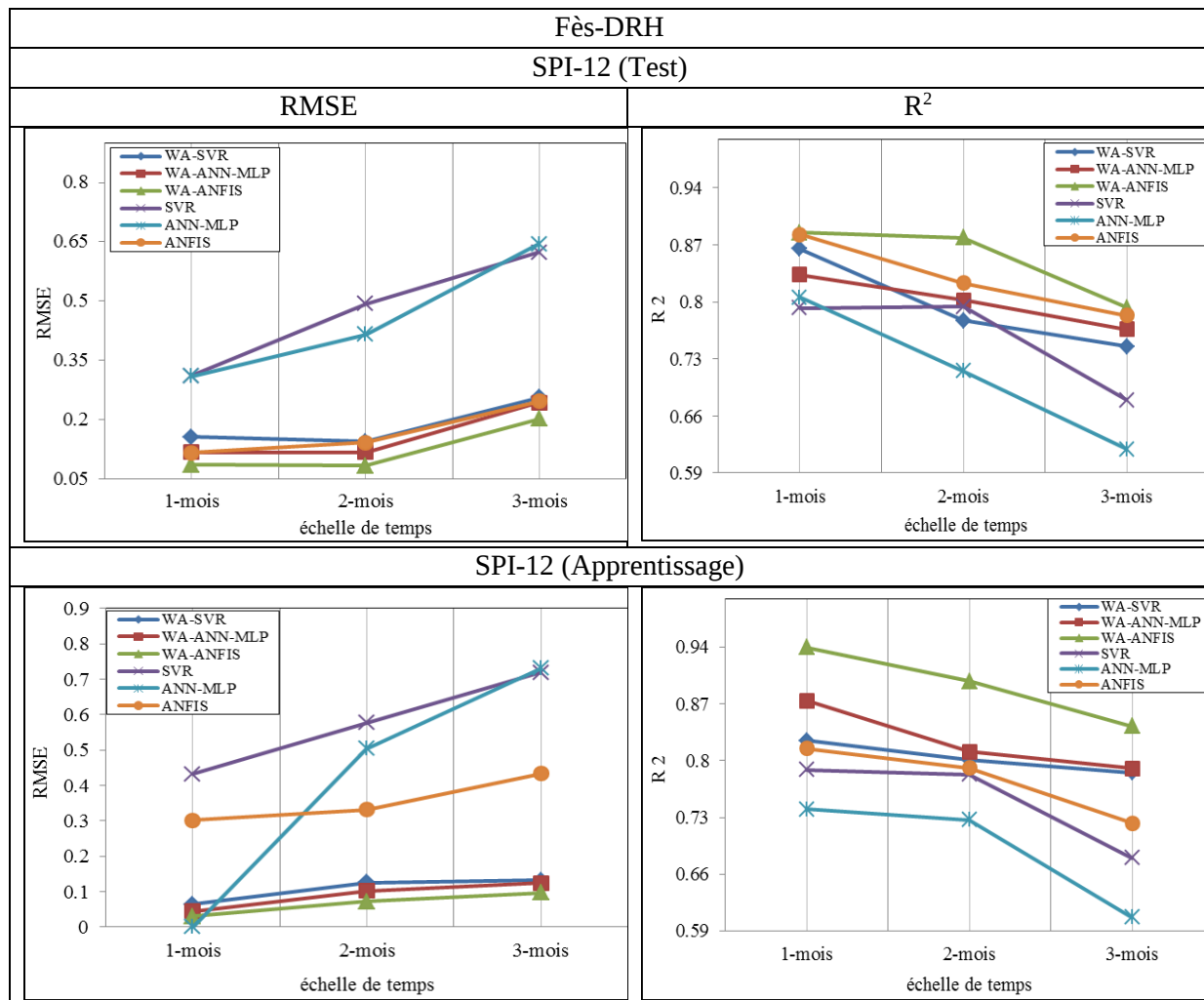
SPI-12								
1-mois								
Station	Fès-DRH				Ain Bittit			
Méthode	Apprentissage		Test		Apprentissage		Test	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²
WA-SVR	0.0632	0.8249	0.1550	0.865	0.1295	0.895	0.1203	0.897
WA-ANN-MLP	0.0445	0.8738	0.1167	0.833	0.1017	0.853	0.1137	0.865
WA-ANFIS	0.0301	0.9398	0.0851	0.985	0.0798	0.941	0.0814	0.911
2-mois								
Station	Fès-DRH				Ain Bittit			
Méthode	Apprentissage		Test		Apprentissage		Test	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²
WA-SVR	0.1256	0.8011	0.1441	0.777	0.1752	0.7895	0.2103	0.7878
WA-ANN-MLP	0.1017	0.8113	0.1173	0.802	0.1436	0.8059	0.0998	0.7981
WA-ANFIS	0.0711	0.8982	0.0832	0.879	0.0915	0.8839	0.0611	0.864
3-mois								
Station	Fès-DRH				Ain Bittit			
Méthode	Apprentissage		Test		Apprentissage		Test	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²
WA-SVR	0.1314	0.7852	0.2551	0.745	0.2323	0.7712	0.2002	0.7662
WA-ANN-MLP	0.1242	0.7904	0.2423	0.766	0.2101	0.8024	0.1162	0.7985
WA-ANFIS	0.0971	0.8426	0.2012	0.793	0.1152	0.8627	0.0812	0.8121

Tableau 70 : Résultats de prévision des modèles WA-ANN-MLP, WA-SVR ET WA-ANFIS pour SPI-12



Les séries chronologiques observées et prédites de SPI-3 et SPI-12, pendant 1 mois d'avance, des modèles WA-ANFIS et ANFIS, ainsi que les diagrammes de dispersion de la période du test (2005 -2014) à la station Fès-DRH, sont illustrés dans les figures 156 et 157.

Tableau 71 : Evolution des valeurs RMSE et R2 par échelle de temps en termes d'apprentissage et du Test



Il ressort clairement de ces figures que WA-ANFIS surpasse ANFIS. L'amélioration des valeurs de R2 fournies par WA-ANFIS, pendant 1 mois d'avance, est très pertinente. Passant de R2=0.782 pour ANFIS à R2=0.925 pour le modèle WA-ANFIS pour la série SPI-3 et de R2=0.782 pour ANFIS à R2=0.925 pour le modèle WA-ANFIS pour la série SPI-12. Cette augmentation des valeurs R2 par le modèle WA-ANFIS peut être liée à sa configuration. L'idée principale derrière la méthode est basée sur la bande d'ondelettes.

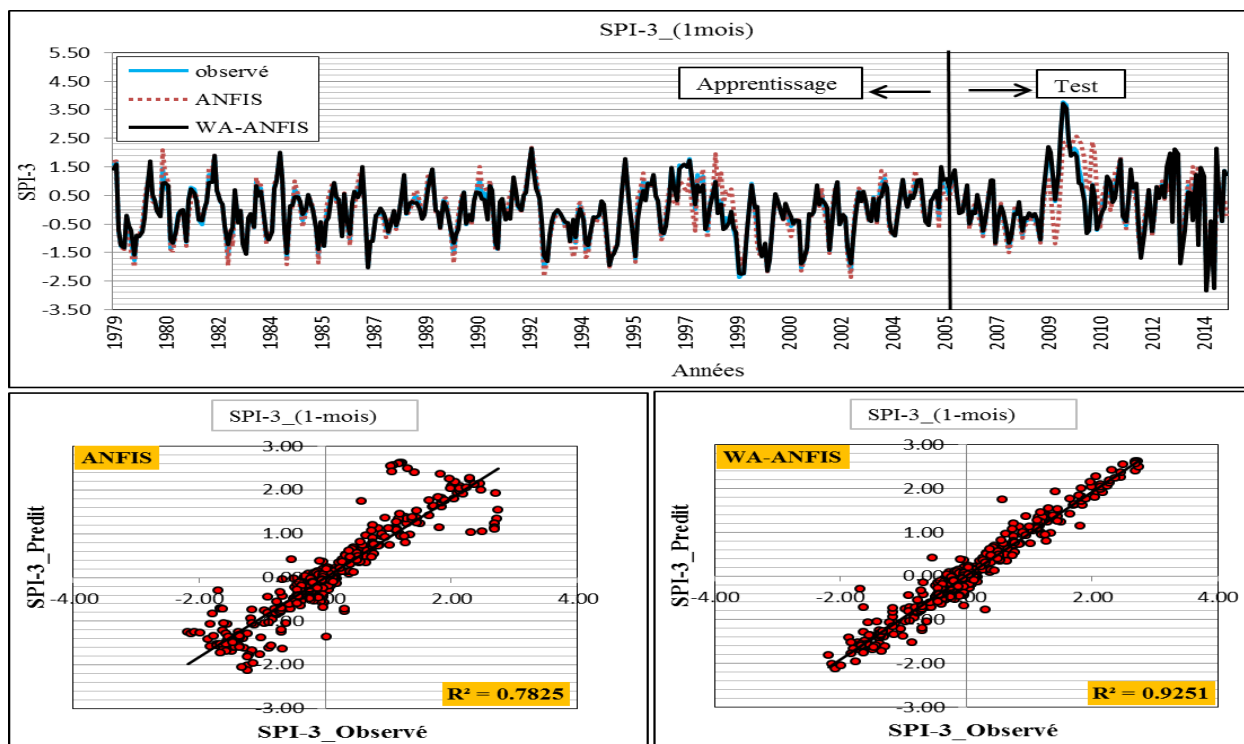


Figure 158: Résultats de prévisions du modèle WA-ANFIS pour SPI-3 pour 1 mois d'avance (Fès-DRH)

Étant donné que WA-ANFIS utilise des informations à différentes bandes spectrales séparément, elle peut capturer et modéliser le comportement des données facilement par rapport au modèle ANFIS simple.

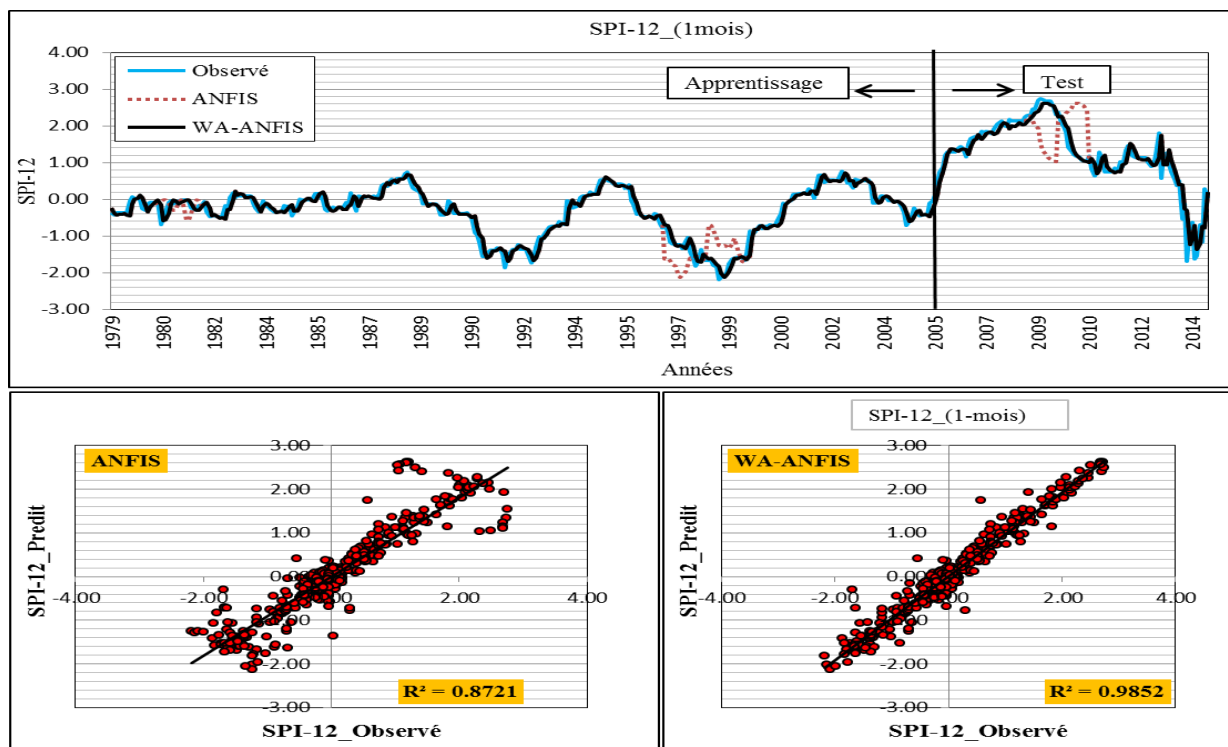


Figure 159: Résultats de prévisions du modèle WA-ANFIS pour SPI-12 pour 1 mois d'avance (Fès-DRH)

4. Discussion

Le système d'inférence neuro-floue adaptatif (ANFIS) a été proposé comme outil alternatif de prévision de la sécheresse météorologique aux méthodes traditionnelles tel que les réseaux de neurones artificiels (ANN) et systèmes vecteurs de régression (SVR), couramment utilisés. Les approches de la transformée en ondelettes, ANN-MLP et ANFIS ont été combinées afin de développer deux modèles hybrides pour prévoir le SPI pour différentes échelles temporelles.

Au début, les résultats des modèles ANN-MLP et ANFIS utilisés sans prétraitement, ont montré qu'ils peuvent être incapables de faire face à la non-linéarité et au caractère saisonnier des données. Ensuite la transformée en ondelettes a été exécutée sur les données prétraitées et utilisées comme entrée pour les modèles SVR, ANN-MLP et ANFIS.

Affiché dans les résultats prévus pour SPI-3 et SPI-12, l'utilisation de l'analyse des ondelettes a augmenté la précision de prévision pour les délais de 1 mois à 3 mois. Une fois les séries SPI originales ont été décomposées à l'aide d'une analyse en ondelettes, il a été constaté que la série d'approximation du signal était proportionnellement plus importante pour les prévisions futures par rapport aux données d'ondelettes du signal.

Indépendamment du nombre de niveaux de décomposition, l'absence de la série d'approximation entraînerait de mauvaises prévisions. L'ajout de la série d'approximation aux détails de l'ondelette n'a pas amélioré sensiblement les résultats des prévisions par rapport à l'utilisation de la série d'application seule dans la plupart des modèles.

En général, les modèles WA-ANFIS ont eu les meilleurs résultats de prévision en termes de R^2 et RMSE pour les deux stations. Les modèles WA-SVR et WA-ANN ont eu les deuxièmes meilleurs résultats de prévision. Bien que les modèles WA-SVR, WA-ANN et WA-ANFIS aient été efficaces dans la prévision de SPI-3, la plupart des modèles WA-ANFIS avaient des prévisions les plus précises. De plus, comme le montrent les figures 156 et 157, les prévisions du modèle WA-ANFIS semblent être plus efficaces pour prévoir les valeurs extrêmes de SPI, qu'elles soient sévères ou fortes précipitations.

Par ailleurs, les résultats prévus pour SPI 12 sont meilleurs que les résultats prévus pour SPI 3 dans presque tous les cas. Les résultats de la prévision pour SPI-3 étaient faibles en termes de coefficient de détermination, probablement à cause des faibles niveaux d'autocorrélation des ensembles de données par rapport à SPI-12. Bien que le modèle WA-SVR reflète de près les tendances observées de SPI, il semble sous-estimer les événements de sécheresse extrêmes par rapport à ANN.

La raison pour laquelle les modèles WA-ANN semblent être légèrement plus efficaces que les modèles WA-SVR et semblent être plus efficaces dans la prévision des événements extrêmes est probablement due à la faible efficacité des SVR par rapport aux modèles RNA, comme leur simplicité en termes de développement et leur temps de calcul réduit, car l'analyse des ondelettes utilisée pour les deux techniques de machine-apprentissage est la même. Cette observation est également étayée par le fait que la plupart des prévisions d'ANN ont de meilleurs résultats que les modèles SVR, comme le montre le tableau (Annexe III, page 277).

L'incertitude concernant les trois paramètres SVR augmente le nombre d'essais requis pour obtenir le modèle optimal. En raison du temps de calcul prolongé des modèles SVR, la même quantité d'essais ne peut être effectuée que pour les modèles ANN. Pour les modèles ANN, même dans les systèmes complexes, la relation entre les variables d'entrée et de sortie n'a pas besoin d'être complètement comprise.

5. Conclusion

Cette partie a démontré que les données prétraitées peuvent améliorer les prévisions SPI. En outre, les résultats ont montré que le modèle hybride Wavelet-ANFIS avait la meilleure performance. En outre, il a été conclu que toutes les approches de modélisation sont capables de prévoir SPI avec précision acceptable. Le fait que les modèles à base d'ondelettes avaient les meilleurs résultats est probablement dû au fait que la décomposition des ondelettes a pu capter facilement les caractéristiques non stationnaires des données.

Les résultats indiquent que les modèles ANN sont plus efficaces que les modèles SVR à la prévision. L'utilisation de l'analyse par ondelettes a amélioré les résultats de prévision des modèles ANN, en particulier pour prédire les événements extrêmes comme le montre les tableaux 62 et 64. En effet, en utilisant la décomposition en ondelettes, l'erreur relative du modèle ANN a été réduite à plus de 60%.

Le fait que l'analyse par ondelettes soit un outil efficace pour révéler les discontinuités locales aide à expliquer pourquoi il a été plus efficace pour prédire les événements extrêmes. L'analyse par ondelettes peut aider à réduire le bruit de la série temporelle d'origine par rapport à un modèle traditionnel. La prévision de ce signal débruité peut expliquer davantage le fait que les événements extrêmes sont mieux prévisibles en utilisant l'analyse en ondelettes.

Une augmentation des délais de prévision entraîne une détérioration de la performance de tous les modèles. Cependant, cette détérioration n'entraîne pas de modèles médiocres, ce qui indique la stabilité de ces modèles basés sur les données dans la prévision de la sécheresse.

PARTIE III
DYNAMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES FACE A LA
SECHERESSE

Chapitre 1

Réponse des nappes phréatiques superficielles aux extrêmes pluviométriques

L'occurrence des épisodes sèches plus ou moins longs est une caractéristique dominante du régime des ressources en eau du Maroc. La Plaine de Saïss ne fait pas exception; la pénurie des ressources hydriques en surface a entraîné, pendant les dernières décennies, une exploitation intense des nappes souterraines traduite par un abaissement du niveau piézométrique de la nappe phréatique superficielle. Celle-ci a fait l'objet de plusieurs études (Margat & Taltasse, 1952; Taltasse, 1953 ; Margat, 1960; Benaabidate, 2000; Essahlaoui, 2000; et Amraoui, 2005). Il est à craindre que, dans un avenir proche, ces ressources en eaux souterraines, ne seront plus compatibles, en termes de quantité et qualité, non seulement avec l'alimentation humaine, mais aussi avec d'autres usages économiques.

I. Effet des variations pluviométriques sur les niveaux piézométriques

Le développement rapide des concentrations urbaines et leurs activités industrielles et du secteur d'agriculture dans la Plaine de Saïss a aggravé l'état des réserves des nappes phréatiques. Mettre l'accent sur l'évolution de la variabilité et le changement climatique et leur impact sur la variation du niveau piézométrique de la nappe phréatique au cours de ces dernières années, constituent l'objectif de cette partie.

1. Méthodes et matériels

Sachant que les facteurs climatiques sont d'une grande importance dans la détermination des fluctuations du niveau piézométrique, les données climatiques sont d'une grande importance à évoquer. Les données des niveaux piézométriques de la nappe, en plus des précipitations, sont obtenues auprès de l'Agence du Bassin Hydraulique de Sebou (ABHS).

L'étude hydrogéologique d'une nappe souterraine non profonde demande au préalable un traitement des observations et données climatiques. L'évolution de l'état de la nappe phréatique superficielle de la Plaine de Saïss a été identifiée par l'observation directe de ses fluctuations à plusieurs piézomètres. Parmi les résultats des mesures effectuées au niveau de 14 piézomètres, quatre piézomètres témoins ont été choisis afin de suivre l'évolution du niveau piézométrique dans la Plaine de Saïss dans l'espace et dans le temps (Tableau 68).

Tableau 72: Coordonnées des piézomètres utilisés

Piézomètre (Pz)	N°IRE*	Localisation	Ordonnées		
			X (km)	Y (km)	Z (m)
Pz1	1197/15	Plaine de Saïss (N)	531,750	380,250	385,9
Pz2	2253/15	Plaine de Saïss (W)	520,900	378,840	394
Pz3	2762/15	Plaine de Saïss (S)	537,325	372,600	525
Pz4	2278/15	Plaine de Saïss (E)	529,200	378,600	403
*Numéro d'Inventaire des Ressources en Eau					

La démarche est basée sur l'analyse de l'évolution interannuelle du niveau piézométrique de la nappe, d'une part sur les mesures des quatre piézomètres témoins, Pz1, Pz2, Pz3 et Pz4 et d'autre part sur une corrélation entre les variations pluviométriques et les fluctuations piézométriques durant la même période (1980/2014).

Pour atteindre notre objectif, le logiciel Khronostat (1998) a été utilisé, un outil informatique développé par l'IRD (Lubès & al., 1994) qui propose plusieurs tests statistiques. Le choix a porté sur ceux qui permettent de déterminer des dates de ruptures : méthode non paramétrique de Pettitt, méthode Bayésienne de Lee et Heghinian et la segmentation de Hubert (Lubès & al., 1994).

Vue leur situation, la richesse des données et la possibilité de comparaison, seules les stations Fès - DRH et Ain Bittit sont mises en considération.

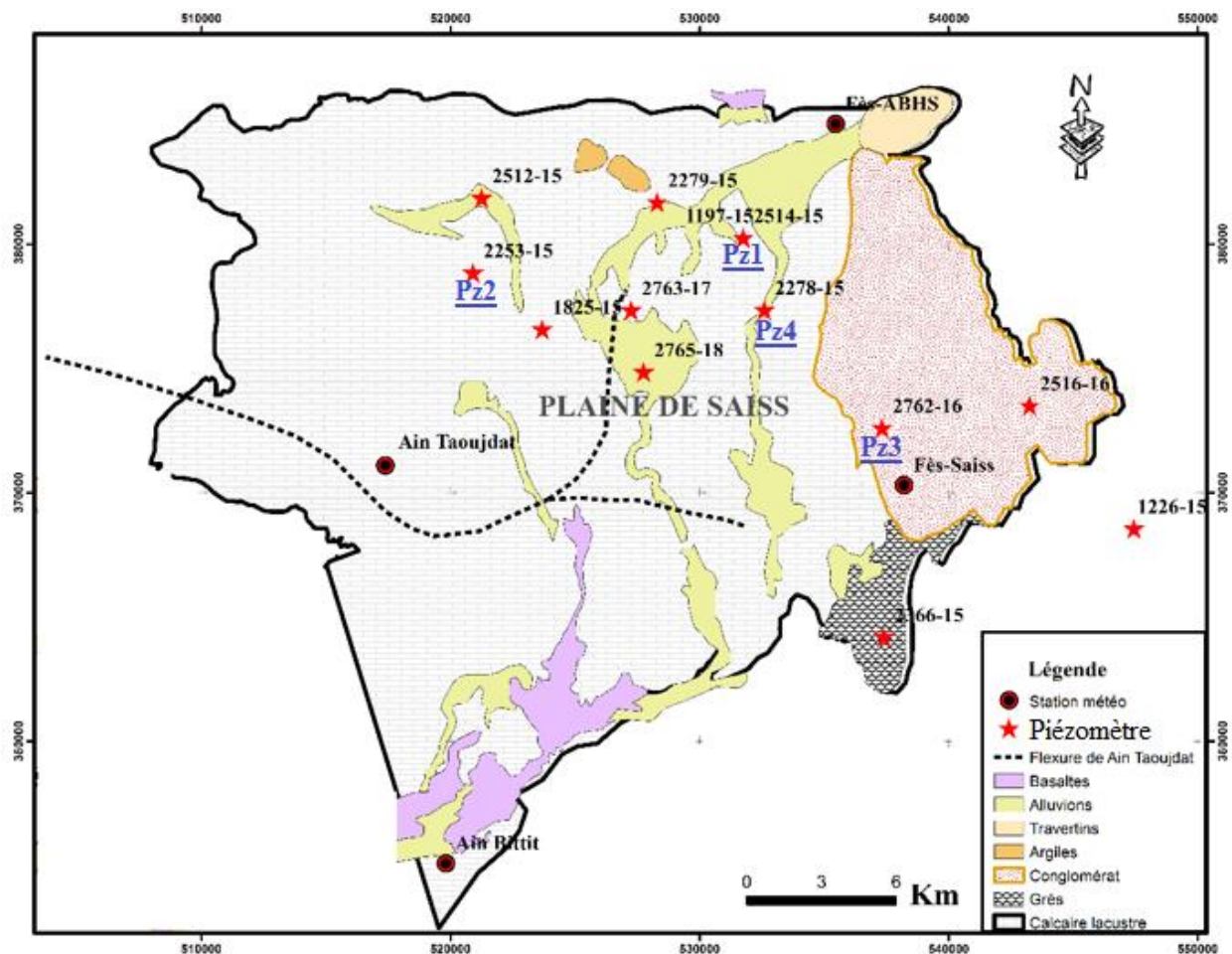


Figure 160: Localisation des piézomètres et stations météorologiques dans la Plaine de Saïss

2. Résultats et analyse

2.1. Variation du niveau piézométrique

Afin de suivre l'évolution des niveaux piézométriques dans la Plaine de Saïss, l'analyse des niveaux statiques est effectuée pour quatre piézomètres témoins (Tableau 68). Les observations montrent l'existence d'une baisse générale moyenne sur l'ensemble des piézomètres Pz1, Pz 2 et Pz3 de l'ordre respectivement de 3m, 20 m et 7 m (Figure 159). Cette baisse remarquable du niveau d'eau de la nappe est observée durant les périodes 1982-1983, 1994-1995, 1998-2000, 2006-2007 et 2009-2011 à l'exception du piézomètre Pz4 qui a connu une certaine stabilisation avec de légères élévations jusqu'en 2011. Cette hausse du niveau moyen de la nappe phréatique superficielle est due à une recharge liée aux précipitations, confirmée par les indices pluviométriques positifs.

En effet à partir de 1995, une augmentation bien marquée de la pluviométrie, notamment, l'année 96/97 est exceptionnellement pluvieuse avec 834 mm, plus du double de la moyenne pluviométrique calculée sur 31 ans. Cette situation pluviométrique exceptionnelle s'est bien répercutée, évidemment, sur la recharge efficace annuelle. L'évolution du niveau piézométrique Pz1 témoigne d'une remontée légère du niveau piézométrique de la nappe superficielle. Le phénomène d'accroissement continu au niveau de ce piézomètre suggère l'existence d'une roche mère constituée de formations ayant de bonnes caractéristiques hydrodynamiques, par contre la diminution illustrée dans les autres piézomètres Pz2 et Pz3 est principalement due à la diminution des précipitations et à l'augmentation du nombre de

points d'eau au niveau des champs de captage et des puits, implantés sur toute la partie orientale de la Plaine de Saïss, induite suite à l'expansion des superficies agricoles irriguées.

Le volume total d'eau prélevé dans toute la nappe phréatique superficielle a été évalué à 212 à 260 Mm³/an (Sendide, 2002; El msaddaq, 2004). Le volume des prélèvements anthropiques, destinés aux différents secteurs, faible, est estimé de 16 à 20 Mm³/an (7% du volume total). Les exhaures naturelles, représentées par drainage des cours d'eau sont très élevées (70% du volume total). Les débits des émergences et sources de déversement restent moyens (23% du volume total). Les apports sont inférieurs aux débits extraits et évalués à 180 à 205.9 Mm³/an, dont la part des précipitations constitue le facteur important de la recharge. Cette dernière est estimée à 38%, la réinfiltration des eaux d'irrigation à 14% et l'apport de la nappe profonde à 48% par abouchement (2.3%) et drainance ascendante (97,7%). La nappe phréatique présente un déséquilibre suite au taux des prélèvements supérieurs aux apports. En effet, la différence de recharge de la nappe, par endroits, peut être expliquée, d'une part par la différence des coefficients de perméabilité des terrains traversés par l'eau d'infiltration et d'autre part par l'intensité des pompages et le taux pluviométrique.

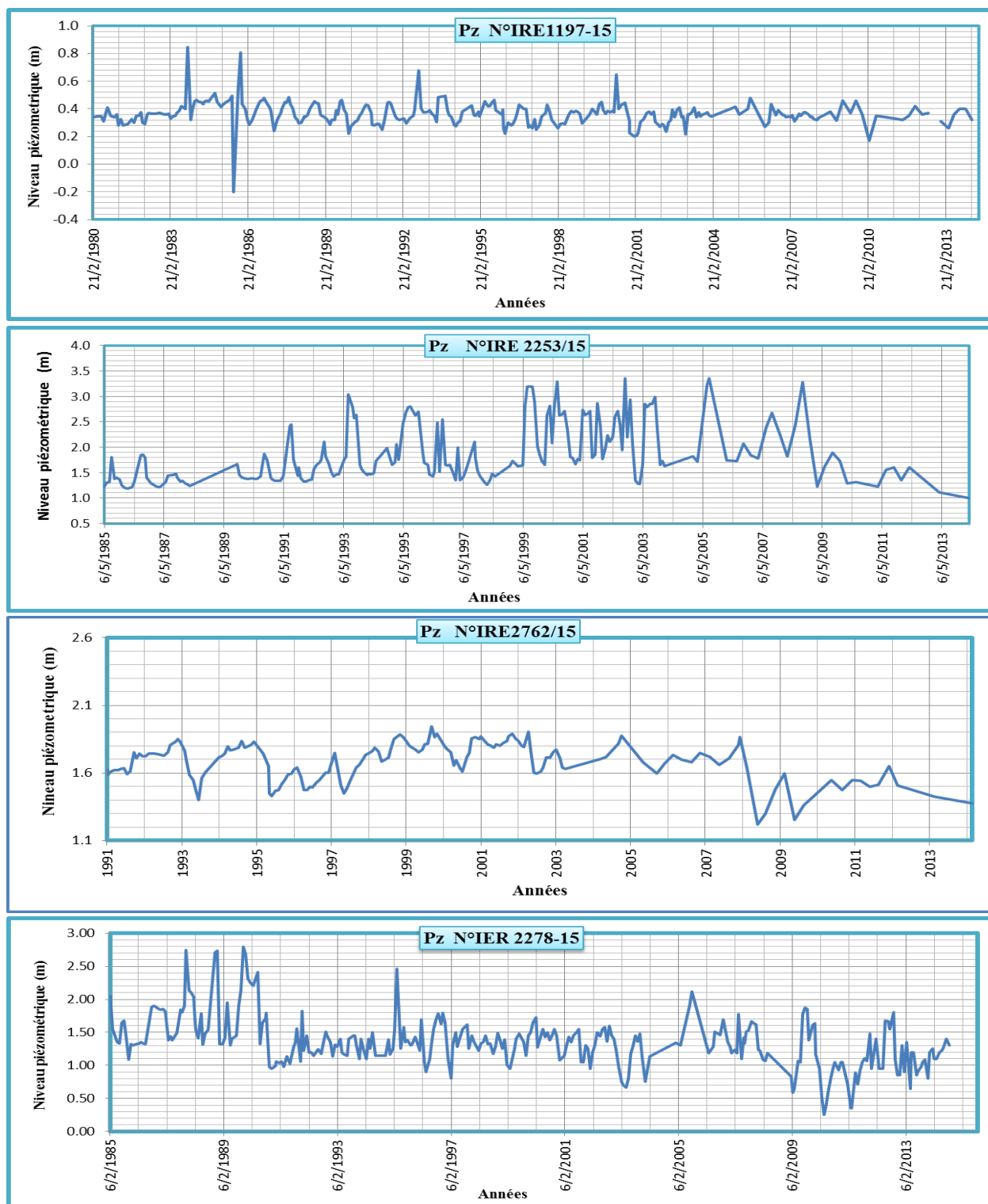


Figure 161: Résultats des quatre piézomètres dans la Plaine de Saïss durant la période 1980-2014

2.2. Évolution des précipitations et de la piézométrie

Le suivi simultané des variations pluviométriques et piézométriques respectivement des stations Fès-DRH et Ain Bittit et des piézomètres Pz1 et Pz2 sur une trentaine d'années a permis de connaître leurs évolution et relation spatio-temporelle (Figures 160, 161 et 162). Ces figures montrent l'influence du facteur pluie sur les fluctuations du niveau piézométrique de la nappe phréatique. L'effet des sécheresses

qu'a connu le Maroc durant les années 80 et 90 s'observe clairement sur les enregistrements des deux courbes.

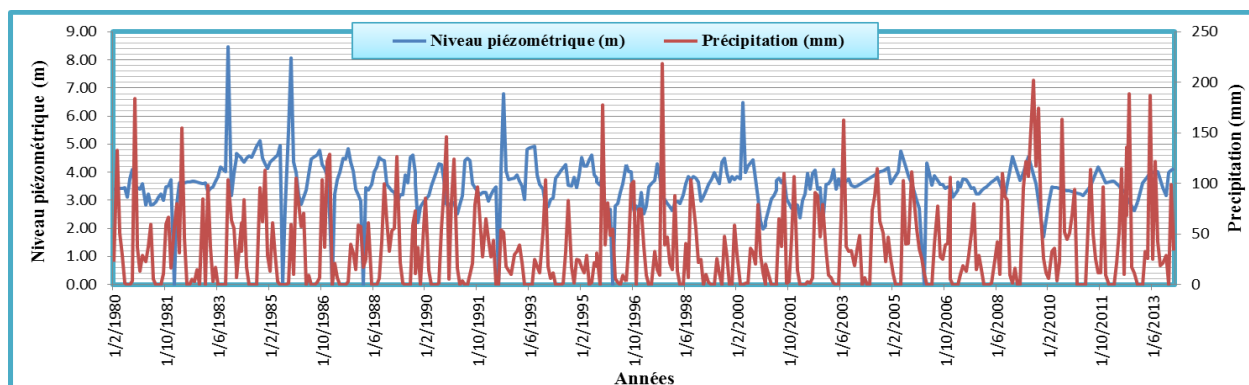


Figure 162: Corrélation entre les variations pluviométriques (station Fès-DRH) et les fluctuations piézométriques (Pz1) durant la période 1980-2014

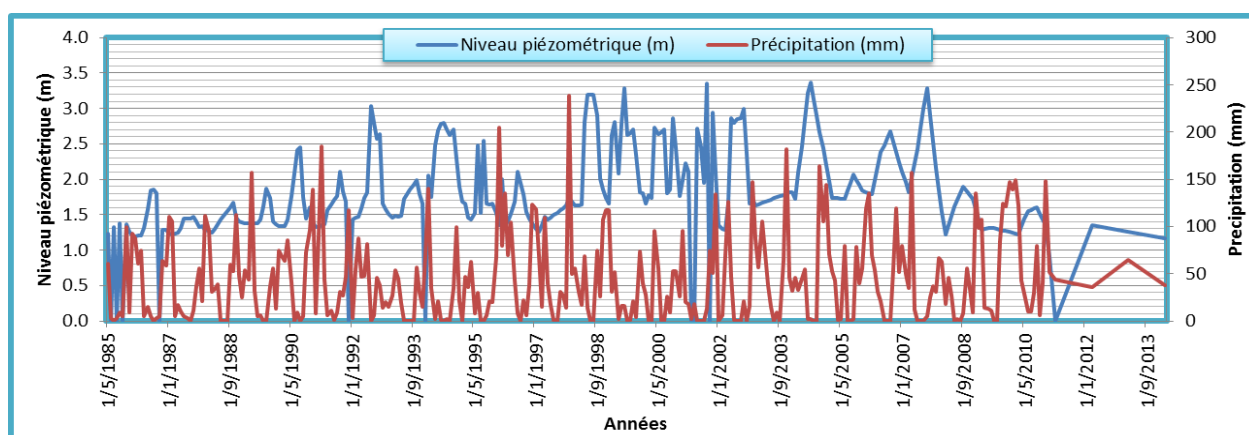


Figure 163: Corrélation entre les variations pluviométriques (station Ain Bittit) et les fluctuations piézométriques (Pz2) durant la période (1985/2014)

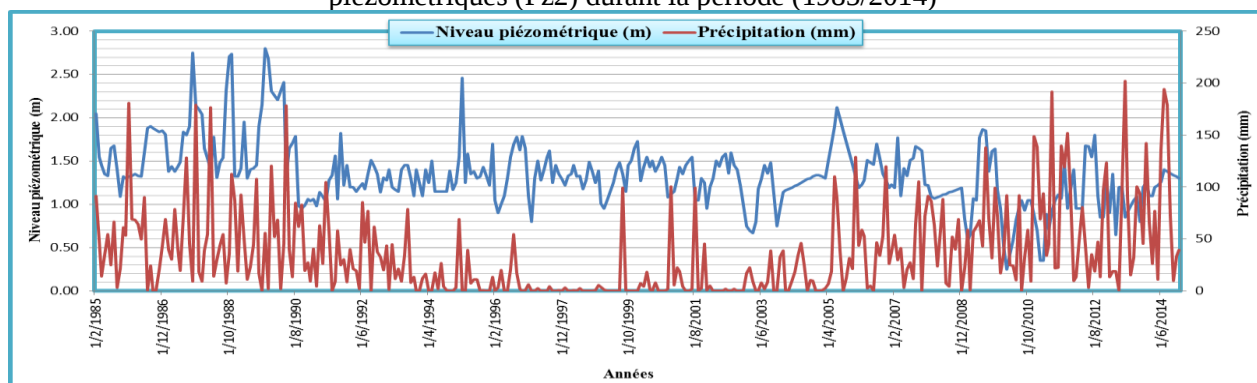


Figure 164: Corrélation entre les variations pluviométriques (station Fès-Saïss) et les fluctuations piézométriques (Pz4) durant la période (1985-2014)

D'après l'analyse, on peut distinguer en général une baisse du niveau piézométrique de la nappe durant les périodes sèches et le rôle important des pluies des années humides dans la compensation hydrique et la recharge de la nappe phréatique. Le temps de rabattement concerne généralement les périodes de mai à septembre où les précipitations se font plus faibles et le pompage est intensif. La nappe phréatique

superficielle à un niveau stable aux mois d'octobre -novembre où les valeurs des pluies connaissent leurs pics et le pompage devient moins.

Ainsi, les mêmes graphiques indiquent un décalage de réponse de niveau piézométrique de la nappe phréatique en terme de recharge via à vis des précipitations entre les deux secteurs (Fès-DRH et Ain Bittit), expliqué par le taux de pluviométrie plus élevé dans le secteur de Ain Bittit que dans celui de Fès-DRH, par la différence des coefficients de perméabilité des formations géologiques traversées par les eaux d'infiltration et par le forçage de pompage accentué plus dans la partie nord que dans la partie sud de la Plaine de Saïss.

3. Discussion et conclusion

L'étude des séries pluviométriques dans la Plaine de Saïss, l'un des secteurs les plus irrigués du bassin de Fès-Meknès, montre une variabilité et une irrégularité dans le temps et dans l'espace ; les mesures annuelles et mensuelles montrent que les cumuls les plus élevés sont enregistrés dans le secteur d'Ain Bittit au Sud-Ouest et les plus faibles au Nord-Est (Fès-DRH). En année humide, ces cumuls peuvent avoisiner 800 à 850 mm, tandis qu'en année sèche ils tournent autour de 110 à 250 mm.

Les estimations retirées illustrent clairement l'impact de la variabilité pluviométrique, conjuguée aux facteurs anthropiques, sur la nappe phréatique superficielle. Les dates de ruptures obtenues en 2008 (Ain Bittit) et 2009 (Fès-DRH) avec un bénéfice pluviométrique qui varie de 35% à 36 %, indiquent un changement du régime pluviométrique.

Une diminution importante du niveau statique apparaît dans les quatre piézomètres pour atteindre un niveau très bas en 2002/2003. La variation du niveau piézométrique est de l'ordre de 1,7 m/an au cours de la période 1980-2014. Cette baisse coïncide surtout avec les années pluviométriques déficitaires répétées entre 1980 et 2005 et avec des prélèvements importants. Un déséquilibre est provoqué dans le bilan prélèvement / recharge de la nappe superficielle.

Par conséquent, le risque de mettre en péril le devenir de cette importante source pour l'alimentation en eau potable, non seulement du point de vue quantitatif mais aussi qualitatif est à envisager. Au terme de cette investigation, il s'avère temps d'intervenir pour sauvegarder ce précieux patrimoine. Les responsables, les décideurs et les agences chargées, doivent engager encore plus d'efforts et le mettre parmi leurs premiers programmes tel le développement d'un modèle hydrodynamique du système hydrogéologique. Le but est d'actualiser l'évaluation des ressources exploitables de la Plaine de Saïss, tenant en compte l'évolution climatique et des scénarios de développement d'exploitation future des ressources en eau souterraines dans une approche de développement durable de toute la région.

II. Estimation de la recharge des eaux souterraines par SPI

Ce travail va permettre d'ajuster un modèle qui simule généralement la relation entre la sécheresse et la recharge des eaux souterraines par application d'un modèle récemment développé (Chibane & al., 2015) et l'indice (SPI) comme indicateur de sécheresse

1. Problématique de la recharge en zone semi- aride

1.1. Mécanismes de recharge

La recharge au sens large se définit comme tout flux d'eau s'écoulant à travers la zone racinaire, traversant la zone non saturée et arrive à la nappe phréatique souterraine, où il participe à son renouvellement (Freeze & Cherry, 1979). L'alimentation de ces nappes peut s'effectuer suivant trois mécanismes (Lerner & al., 1990). La recharge directe correspond à la part de la pluie qui échappe à l'évapotranspiration et au ruissellement pour atteindre la nappe par percolation verticale directe à travers la zone non saturée. La recharge indirecte se réalise par percolation latérale à travers les lits des cours d'eau.

La recharge localisée s'effectue par percolation à partir des volumes d'eau accumulés dans des dépressions topographiques.

Dans les zones semi-arides, les recharges indirectes et localisées restent le mécanisme dominant pour l'alimentation des nappes phréatiques (Bajjali, 2008). La figure 163 présente de façon simplifiée les différents mécanismes de recharge décrits précédemment (Lerner, 1997).

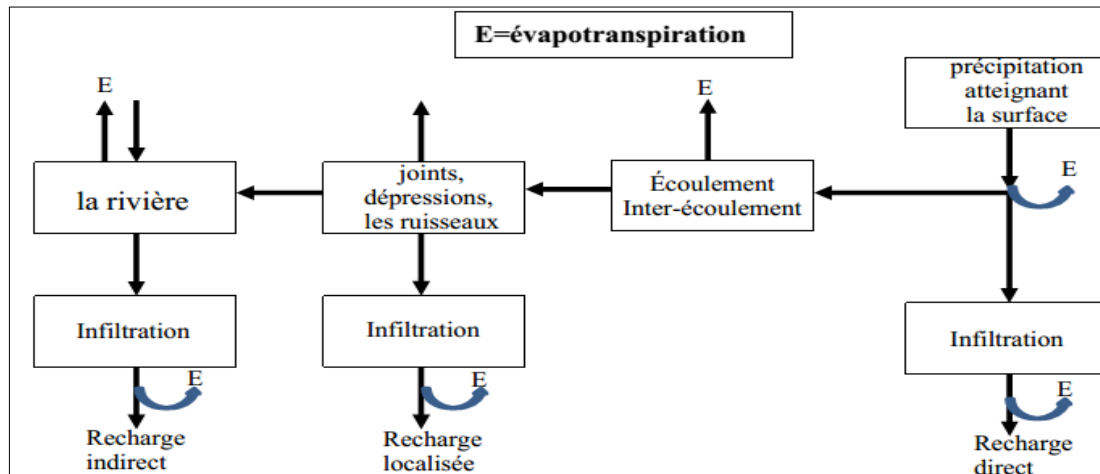


Figure 165: Mécanismes de recharge en zone semi-aride (Lerner, 1997)

1.2. Processus intervenant dans la recharge

En zone aride à semi-aride, la variabilité spatio-temporelle de la recharge et les différents processus liés à celle-ci, rendent difficile l'estimation précise du taux de renouvellement des nappes phréatiques (De Vries & Simmers, 2002). Les principaux processus intervenant sur la recharge sont relatifs à l'évapotranspiration, à l'humidification du sol et surtout aux phénomènes des flux ascendants (drainance) venant des aquifères plus profonds. Le rôle de la drainance ascendante est un phénomène très fréquent en zone aride, par conséquent, la recharge par percolation descendante est faible.

En zone semi-aride, le transfert d'eau par drainance ascendante est un processus supplémentaire difficilement appréhendé par les méthodes "classiques" d'hydrogéologie (Aranyossy & al., 1998). Ce phénomène de drainance est révélé par des nombreux travaux réalisés en zone sahélo-saharienne à partir des méthodes isotopiques. (Aranyossy & al. 1998) ont présenté des cas d'étude sur ce phénomène observé en Afrique du Nord (Algérie, Tunisie) et au Nord du Niger dans la plaine de l'Irhazer le long de la faille majeure d'Imouraren.

2. Identification de la relation entre SPI et la recharge des eaux souterraines

2.1.Méthodologie

Au cours des dernières décennies, plusieurs études d'estimation de recharge ont vu la lumière, rapportées dans la littérature scientifique. Des agences internationales et de nombreuses publications de réunions internationales (Bredenkamp & al., 1995) montrent la nécessité croissante de l'estimation de la recharge fiable (Simmers, 1997). Différentes méthodes de recharge des eaux souterraines ont été mises au point ; ces méthodes (mesure directe, méthodes du bilan hydrique, approches Darcien, techniques et méthodes empiriques traceur) ont été effectuées dont beaucoup d'entre elles ont rencontrés des problèmes, décrits par Simmers en 1997.

En revanche, dans les régions semi-arides, les études des estimations de recharge de l'équilibre régional de l'eau sont souvent de mauvaise qualité en raison de la limite des composantes appliquées. Le climat ne doit pas être le seul paramètre pour l'étude, mais aussi la géologie, la morphologie, l'état du sol et l'utilisation des terres doivent être impliqués dans les estimations de recharge. La variabilité de la recharge dans le temps et l'espace doit également être incluse dans les techniques de recharge d'estimation.

Le présent travail vise à mettre en relief une relation entre l'indice de sécheresse (SPI) et son influence sur l'alimentation des nappes souterraines, par un adéquat ajustement du modèle. Cette étude va permettre de caractériser le régime climatique de la Plaine de Saïss et son impact sur la durabilité de l'alimentation en eau souterraine contre les changements climatiques.

Les estimations des eaux souterraines de recharge sont essentielles dans toute analyse du système des eaux souterraines et pourraient fournir des informations précises pour une utilisation durable des ressources en eaux souterraines. Suite à un ajustement du modèle hydrologique proposé par (Chibane & al. (2015), la relation entre la recharge des eaux souterraines et l'effet de changement climatique, notamment la sécheresse, a été estimée à différentes échelles du temps, à base d'indice de précipitations standardisé (SPI).

A. Estimation de la recharge des eaux souterraines (GWR)

Le SPI présente des renseignements sur la sécheresse due aux précipitations sachant que l'augmentation des précipitations augmente le taux d'infiltration et de ruissellement d'une part, la diminution des précipitations, diminue la recharge des eaux souterraines et le ruissellement de surface d'autre part. Une classification de types de sécheresse a été attribuée aux valeurs de SPI.

Dans ce travail, la recharge des eaux souterraines est estimée en utilisant un nouveau modèle hydrologique proposé par Chibane & al. (2015). Le modèle a été présenté comme suite :

$$GWR_m = 0.135 \times \left(\frac{\varphi}{\alpha}\right) \times e^{0.01047 \times P} \quad (\text{Eq. 62})$$

GWR m : recharge naturelle des eaux souterraines exprimées en mm ;

P : moyenne des précipitations annuelles, α et β dépendent à coefficient de température (T).

Avec

$$\alpha = \frac{T^2+1}{T(T-12)} \quad (\text{Eq. 63}) \quad \text{et} \quad \varphi = \frac{\sqrt{T^2-1}}{T} \quad (\text{Eq. 64})$$

B. Estimation de ruissellement (Runoff)

Ce paramètre dépend de plusieurs facteurs tels que l'intensité des précipitations, caractéristiques du sol, la pente, la densité de végétation etc. L'écoulement dans la Plaine de Saïss a été estimé au moyen de la formule proposée dans des travaux récents et dérivée du modèle de Tixeront-Berkalof modifié par Romantchok en 1971. La formule du ruissellement est donnée par l'équation suivante

$$Runoff = (0.01.P)^{2.4} \quad (\text{Eq. 65})$$

Runoff : Ruissellement de surface donné en mm

P : Moyenne annuelle des précipitations indiquée en mm

2.2.Résultats et analyse

A. Modélisation des paramètres par régression

Deux modèles de régression sont proposés pour évaluer la recharge des eaux souterraines et le ruissellement en fonction des précipitations (figures 164 et 165).

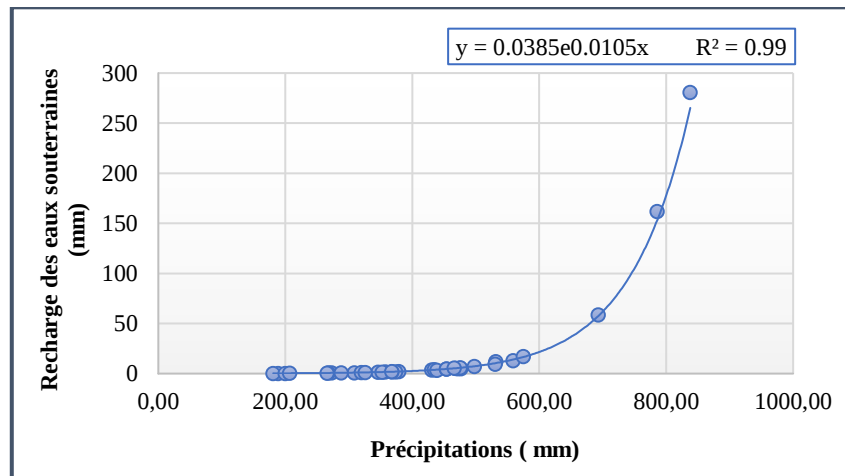


Figure 166: Variation du taux de la recharge des eaux souterraines en fonction des précipitations annuelles pour la période (1979-2014)

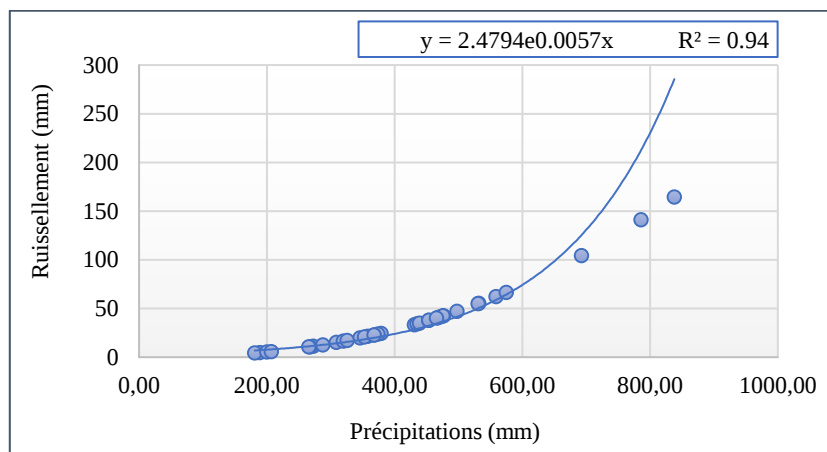


Figure 167: Variation du taux de ruissellement en fonction des précipitations annuelles pour la période (1979-2014)

L'analyse des deux courbes (Figures 164 et 165) indique un meilleur ajustement du modèle de régression, en fonction de précipitations, pour les deux cas (le ruissellement ($R^2=0,941$) et la recharge des eaux souterraines ($R^2=0,997$)).

B. Analyse graphique de SPI en fonction de la température et des précipitations

La représentation graphique des niveaux de sécheresse par rapport à la pluviométrie, à la température, au ruissellement, à l'indice SPI et au taux de GWR a permis présentation en courbes de contour 2D. Tout d'abord la courbe de niveau de SPI en fonction de la pluviométrie et de la température montre des valeurs SPI regroupées dans des classes différentes chaque classe décrivant les situations de sécheresse ou d'humidité entre (-1) et (+2) (Figure 166). La valeur SPI calculée pour la Plaine de Saïss, correspond aux précipitations annuelles moyennes pour une série de 34 ans.

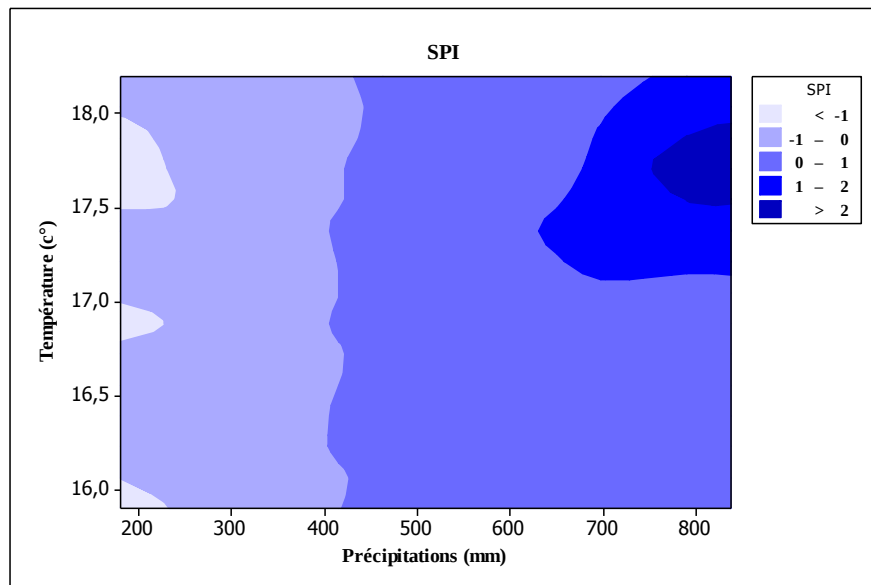


Figure 168: Variation des valeurs de (SPI) en fonction de la température et des précipitations

D'après la figure 168, les valeurs du SPI indiquent une sécheresse plus poussée avec une hausse des valeurs des températures et une baisse des précipitations et des conditions d'humidité présentées par des valeurs supérieures du SPI correspondant à des hautes températures et des précipitations élevées.

C. Ajustement de modèle de GWR en fonction de la température et SPI

La variation de GWR en fonction de SPI permis la mise en évidence d'un modèle optimal de régression qui donne la valeur de GWR en fonction de SPI (Figure 167).

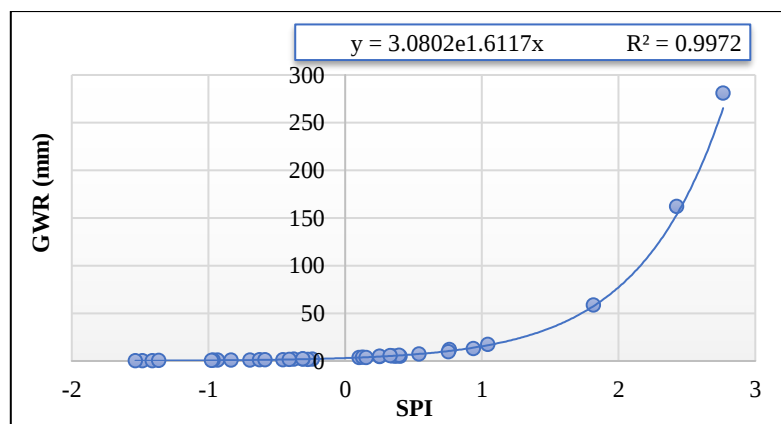


Figure 169: Variation des taux de recharge des eaux souterraines en fonction du SPI

L'équation d'ajustement du modèle a été donnée comme suit :

$$GWR = 3.080 \times e^{1.611 \times SPI} \quad (\text{Eq. 66})$$

L'analyse de la figure 167 montre que le taux de recharge des eaux souterraines varie en fonction des valeurs de SPI et par conséquent quand la valeur de SPI est négative, le ruissellement de surface en général est moins de 10 mm/an.

a. Variation des taux de recharge des eaux souterraines en fonction de SPI

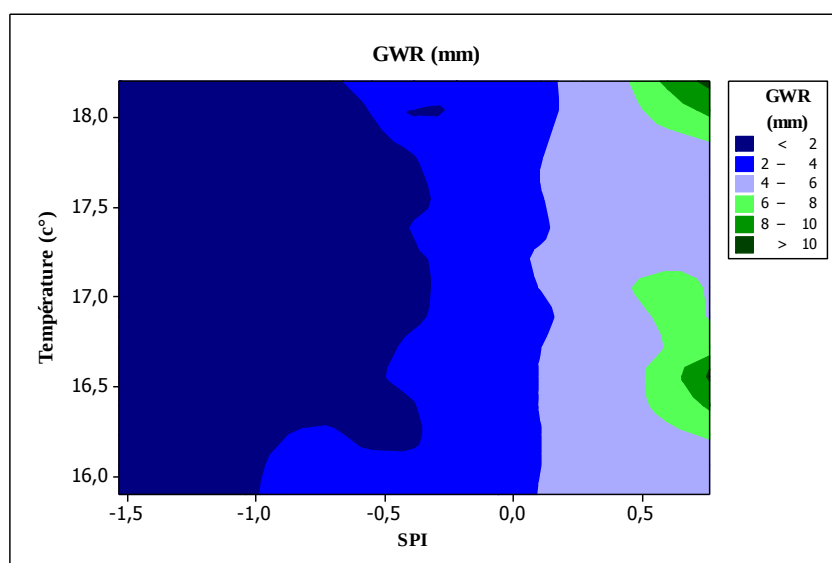


Figure 170: Variation des taux de recharge des eaux souterraines en fonction du SPI et la température

L'analyse des tracés de contour 2D montre les extrémités de GWR en fonction de SPI et de la température (figure 168). Il apparaît clairement que la GWR est moins de 2 mm/an pour une valeur de SPI située dans l'intervalle [-1 ; -1.7] qui correspond à la classe de sécheresse modérée. Néanmoins, la recharge des eaux souterraines est faible (entre 2 et 4 mm /année) lorsque des valeurs de SPI sont situées entre [-0.99 à 0] ce qui correspond à une sécheresse près de la normale. Une recharge moyenne des eaux souterraines (GWR) (entre 4 et 6 mm /année) coïncide avec une sécheresse normale à une humide moyenne dont les valeurs de SPI sont positives. Les informations extraites de ce tracé indiquent que la GWR est faible au cours de la période de sécheresse.

b. Variation des taux de recharge des eaux souterraines en fonction de SPI-3

L'analyse montre que la recharge des eaux souterraines est très faible (moins de 5 mm/an) pour une valeur de SPI égale ou inférieure à [0.25] qui correspond à une sécheresse normale à extrême (figure 169). Une recharge faible des eaux souterraines (GWR) (entre 5 et 15 mm /année) coïncide avec une sécheresse normale à une humidité forte dont les valeurs SPI sont entre 0.25 et 1,8.

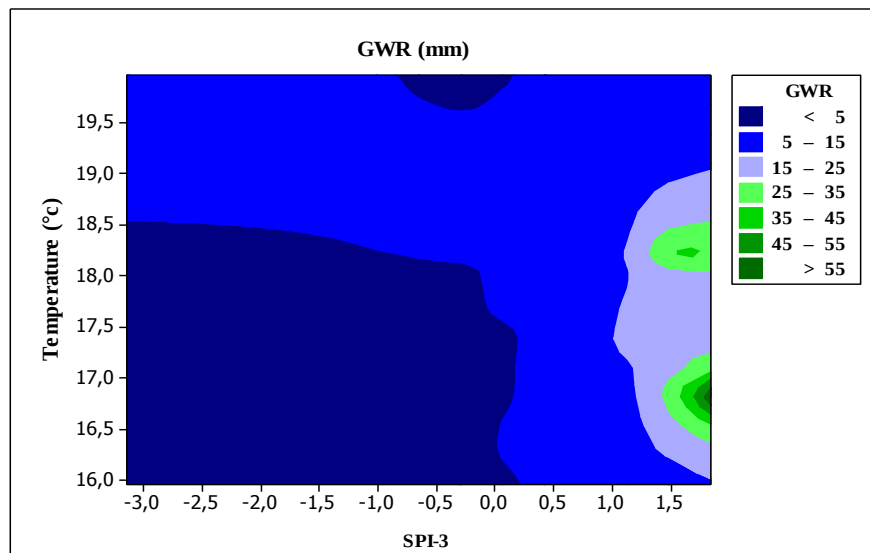


Figure 171: Variation des taux de recharge en fonction de SPI-3 et de la température

c. Variation des taux de recharge des eaux souterraines en fonction de SPI-6 et de la température

La Figure 170 montre une faible recharge des eaux souterraines (moins de 10 mm/an) pour une valeur de SPI égale ou inférieure à [0.75] qui correspond à une sécheresse normale à extrême. Cependant, une recharge moyenne des eaux souterraines (GWR) (entre 10 et 20 mm /année) coïncide avec une sécheresse normale à une humidité forte dont les valeurs de SPI sont entre 0.75 et 1,65.

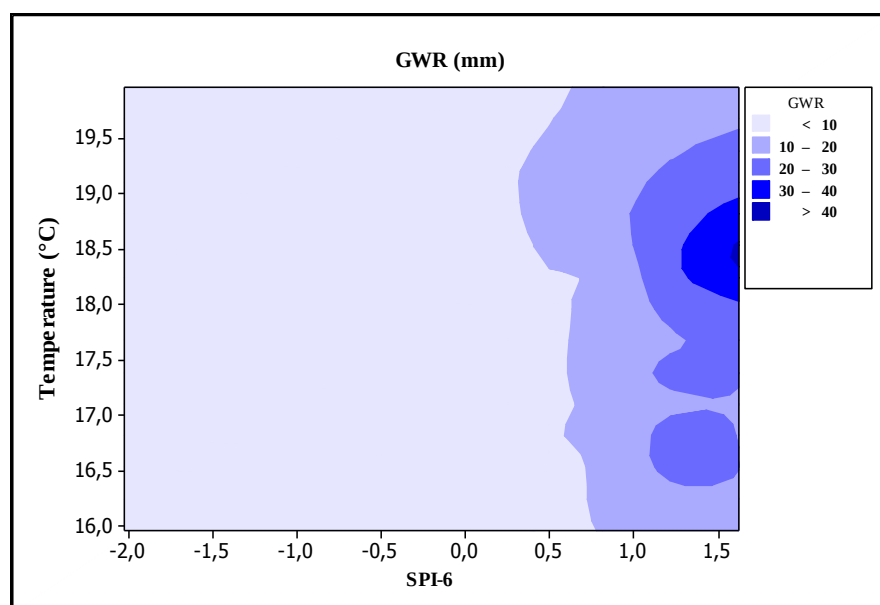


Figure 172: Variation des taux de recharge des eaux souterraines en fonction de SPI-6 et de la température

d. Variation des taux de recharge des eaux souterraines en fonction de SPI-12 et de la température

Le tracé des taux de recharge (Figure 171) indique une recharge faible des eaux souterraines (GWR) (moins de 15 mm /année) ce qui correspond à une sécheresse normale à extrême dont les valeurs SPI sont inférieures à 1,9.

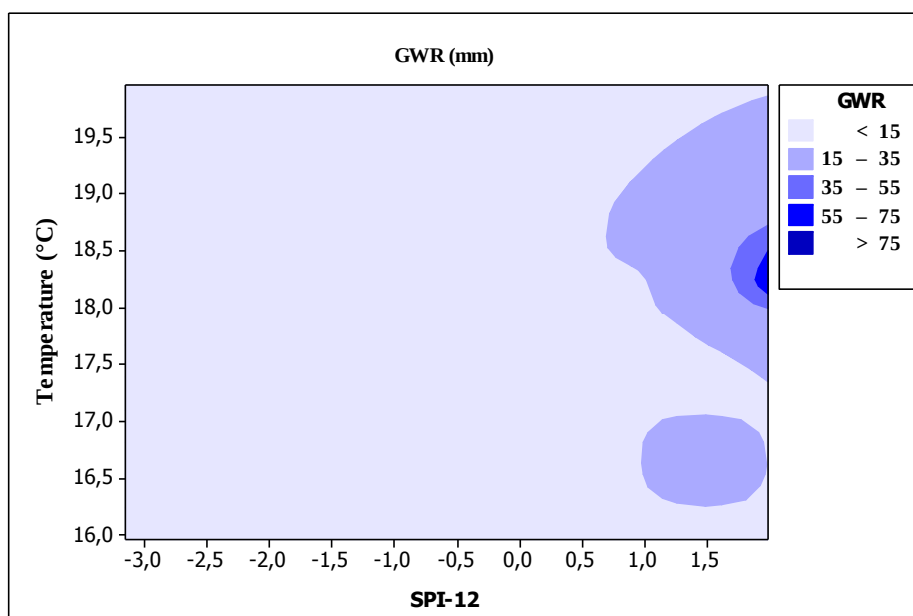


Figure 173: Variation des taux de recharge des eaux souterraines en fonction de SPI-12 et de la température

D. Ajustement de modèle de runoff en fonction de SPI et de la température

La représentation de ruissellement de surface en fonction des valeurs de SPI, a montré un tracé d'un modèle de régression qui donne la valeur de ruissellement en fonction de SPI.

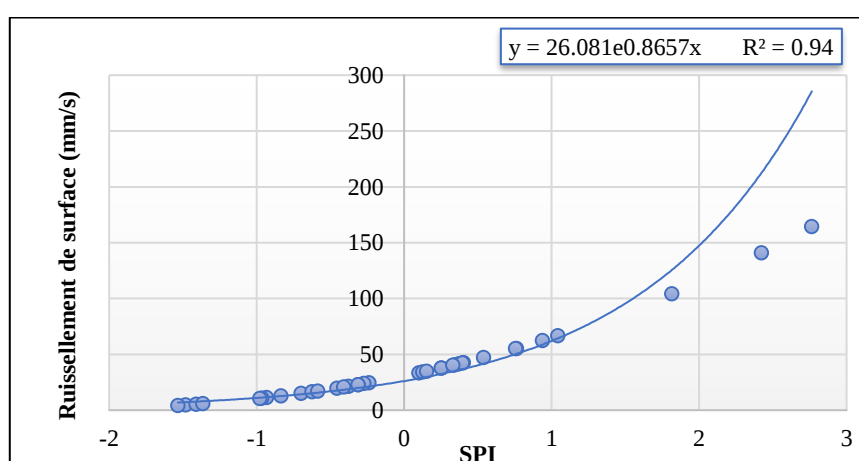


Figure 174 : Variation du ruissellement en fonction de SPI

Ce modèle qui décrit le ruissellement en fonction de SPI a été ajusté par l'équation suivante :

$$Runoff = 26.08 \times e^{0.865 \times SPI} \quad (\text{Eq. 67})$$

L'analyse de la figure montre que le taux de ruissellement de surface varie en fonction des valeurs de SPI (figure 172). Lorsque la valeur SPI est négative, le ruissellement de surface en général est de moins de 30 mm/an. L'étude de cette relation a été estimée à différentes échelles de temps SPI 1, SPI 6 et SPI 12.

a. Variation des taux de ruissellement de surface en fonction de SPI-1 et de la température

L'analyse des tracés de contour 2D (Figure 173) montre les gammes de ruissellement en fonction de SPI et la température. Il apparaît clairement que le taux de ruissellement de surface est inférieur à 10 mm/an lorsqu'une valeur de SPI située dans l'intervalle [-1 ; -1.5] ce qui correspond à la classe de sécheresse modérée. Cependant, le taux de ruissellement de surface est faible (entre 2 et 4 mm /année) lorsque des valeurs SPI sont situées plus ou moins entre [-1.99 à -1.35] ce qui correspond à une sécheresse modérée à grave.

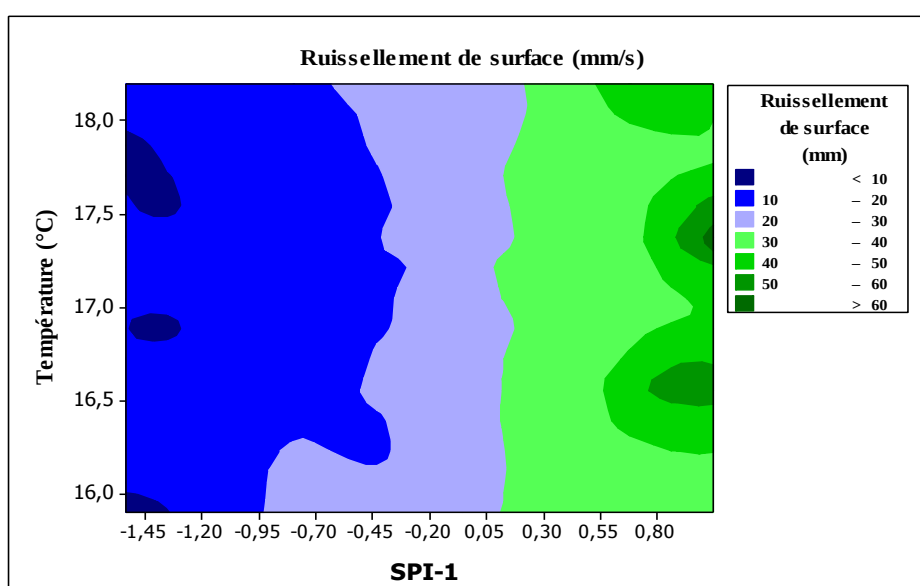


Figure 175: Variation des taux de ruissellement de surface en fonction de SPI-1 et la température

Un taux de ruissellement faible des eaux de surface (entre 10 et 20 mm /année) correspond à une sécheresse normale à moyennement modérée lorsque les valeurs de SPI se rangent dans l'intervalle -0.95 et -1.35. Notamment le ruissellement moyen des eaux de surface (entre 20 et 30 mm /année) convient à la classe normale à moyennement humide lorsque les valeurs SPI se rangent dans l'intervalle -0.95 et 1. Les renseignements extraits de ces tracés indiquent que le taux de ruissellement de surface est lié à l'effet de sécheresse, soi-disant il devient faible avec une sécheresse de plus en plus poussée.

b. Variation des taux de ruissellement de surface en fonction de SPI-3 et de la température

Les gammes de ruissellement en fonction de SPI et la température montrent que le taux de ruissellement de surface est inférieur à 20 mm/an lorsqu'une valeur de SPI située dans l'intervalle [-2,25 ; -1,25], ce qui correspond à une sécheresse grave à extrême (Figure 174). Cependant le taux de ruissellement de surface est de taille faible à moyenne (entre 20 et 40 mm /année) lorsque des valeurs SPI sont situées plus ou moins dans les intervalles [-0.75 à 0.99] et [-3.2 ; -2,25] ce qui correspond respectivement à une sécheresse normale et une sécheresse extrême. Un taux de ruissellement moyen des eaux de surface (entre

40 et 60 mm /année) correspond à une sécheresse normale à humide dont les valeurs de SPI se rangent dans l'intervalle 0,99 et 1,8.

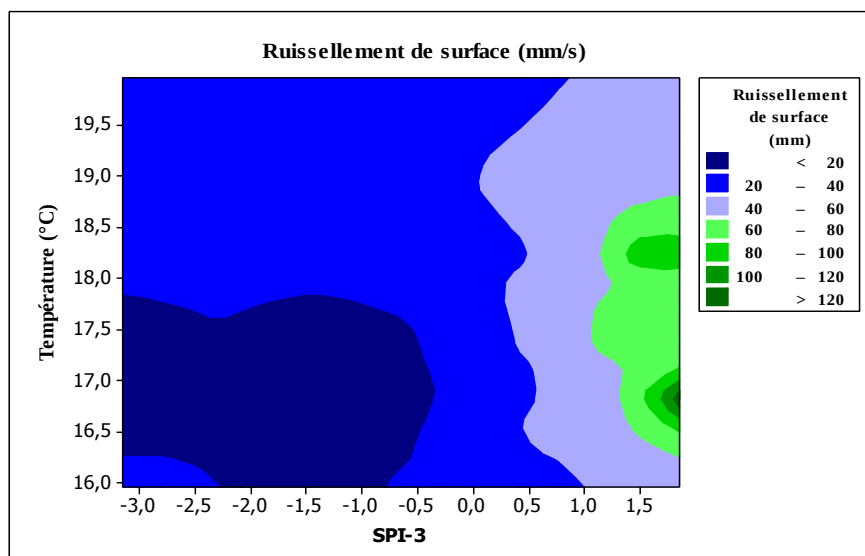


Figure 176 : Variation des taux de ruissellement de surface en fonction de SPI-3 et la température

c. Variation des taux de ruissellement de surface en fonction de SPI-6 et de la température

L'analyse des tracés de contour (Figure 175) montre que le taux de ruissellement de surface est inférieur à 20 mm/an lorsqu'une valeur de SPI se situe dans l'intervalle $[-2 ; -0,3]$, ce qui correspond à une sécheresse normale à extrême. Egalement, le taux de ruissellement de surface est faible à moyen (entre 20 et 40 mm /année) lorsque les valeurs de SPI sont situées plus ou moins entre $[-0,3 \text{ à } 0,6]$, ce qui correspond à une sécheresse normale ou près de la normale.

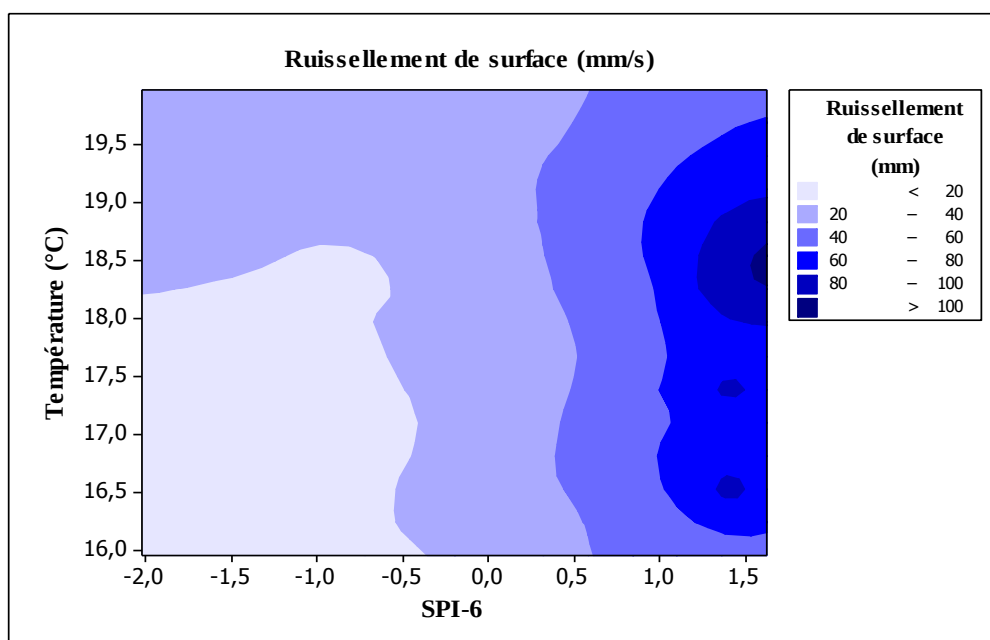


Figure 177: Variation des taux de ruissellement de surface en fonction du SPI-6 et la température

Lorsque le ruissellement moyen des eaux de surface est entre 40 et 60 mm /année, il coïncide avec la classe de sécheresse normale à humide dont les valeurs de SPI se rangent dans l'intervalle [0,6 ; 1,7].

d. Variation des taux de ruissellement de surface en fonction de SPI-12 et la température

Le tracé de contour sur la Figure 176 montre que lorsque le taux de ruissellement de surface est faible, inférieur à 20 mm/an, la valeur de SPI se situe dans l'intervalle [-1,1], ce qui correspond à la classe de sécheresse normale à modérée. Toutefois, le taux de ruissellement de surface est moyen à faible (entre 20 et 40 mm /année) lorsque des valeurs de SPI sont situées plus ou moins entre [-0,4 ; 0,4] ce qui correspond à une sécheresse normale. Un taux de ruissellement moyen des eaux de surface (entre 40 et 60 mm /année) correspond à une sécheresse normale à humide dont les valeurs de SPI se rangent dans l'intervalle 0,4 et 1,9.

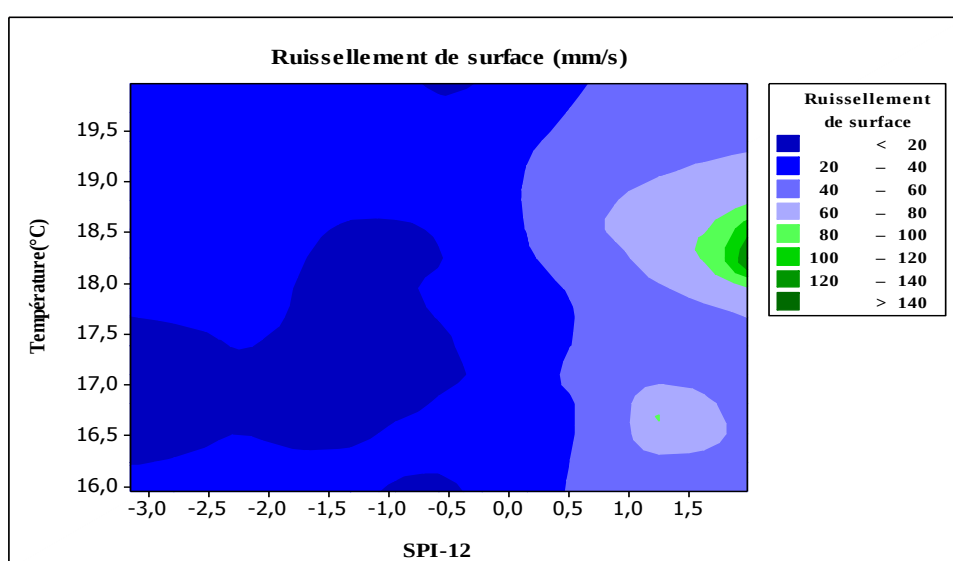


Figure 178: Variation des taux de ruissellement de surface en fonction du SPI-12 et la température

2.3.Discussion et conclusion

Le faible écoulement de surface est un résultat de faibles précipitations à l'échelle annuelle, les augmentations de la température de l'air va surgir l'évapotranspiration et diminuer le ruissellement de surface. Ce présent travail a permis d'établir et d'ajuster un modèle mathématique général qui décrit clairement la relation entre l'effet de la sécheresse et la recharge des eaux souterraines, ceci pour mieux comprendre le phénomène de la recharge de l'aquifère superficiel en zone semi-aride. L'indice normalisé des précipitations (SPI) et les autres paramètres (recharge des eaux souterraines et les eaux de ruissellement de surface), ont été utilisés pour une représentation graphique de contours en 2D, afin de donner une description claire des variations observées, de la GWR et ruissellement à différentes échelles de temps annuel, en fonction de la température moyenne annuelle et SPI. Le travail démontre que la GWR faible lorsque l'indice SPI est inférieur à (+0.99) et sont élevés lorsque SPI est plus de (+1). Les résultats obtenus dans cette étude sont en conformité avec les caractéristiques de la zone semi-aride, où appartient notre zone d'étude. Ceux-ci peuvent être un outil pertinent aux administrateurs et responsables pour mieux gérer les phénomènes de sécheresse, basée sur différents fondements scientifiques, également un véritable outil pour comprendre et gérer durablement les ressources en eau souterraine face aux différents scénarios de changement climatique.

Chapitre 2

Modélisation Hydrodynamique des eaux souterraines

Une des caractéristiques les plus importantes des modèles RNA est leur capacité d'adaptation aux changements récurrents et de repérer des modèles dans un système naturel complexe. La prédiction du niveau d'eau souterraine joue un rôle important dans la gestion des ressources en eau. Quatre architectures différentes des réseaux neuronaux ont été testées pour la prévision du niveau des eaux souterraines au niveau de la Plaine de Saïss et dont les résultats ont été comparés à l'aide des mesures statistiques tel que le coefficient de détermination R^2 et RMSE. Sachant que les réseaux de neurones ont également été précédemment appliqués avec succès dans la prédiction du niveau des eaux souterraines dans d'autres régions (Coulibaly & al., 2001). Dans cette partie, différentes architectures RNA ont été évaluées afin de parvenir à des conceptions en termes d'efficacité de cette technique pour prédire le niveau des eaux souterraines dans les zones à climat semi-aride à aride telle que la Plaine de Saïss.

I. Évaluation des performances des différents réseaux de neurones

Une bonne conception de l'architecture des réseaux de neurones artificiels (RNA) peut fournir un outil robuste pour la modélisation et la prévision des ressources en eau. Les performances de différents réseaux de neurones, destinés pour la prévision du niveau des eaux souterraines, sont évaluées afin d'identifier une architecture RNA optimale qui permet de simuler la tendance à la baisse du niveau des eaux souterraines et de fournir des prédictions acceptables jusqu'à 3 mois à venir. La Plaine de Saïss a été choisie parce que ses ressources en eaux souterraines ont été fortement exploitées au cours des dernières années et le niveau des eaux souterraines est menacé d'une diminution remarquable. Les différentes architectures RNA ont été évaluées afin de parvenir à des conceptions en termes d'efficacité de cette technique pour prédire le niveau des eaux souterraines dans une zone à climat semi-aride à aride telle que la Plaine de Saïss.

1. Apprentissage avec différentes architectures RNA

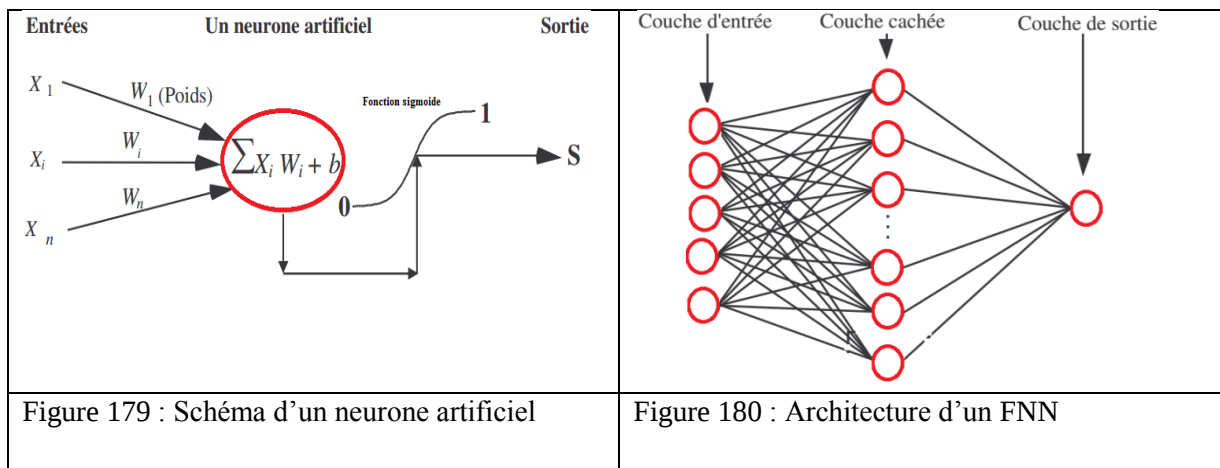
Sept différents types d'architectures de réseau et des algorithmes d'apprentissage sont étudiés et comparés en termes d'efficacité et précision. Néanmoins, trois types de réseaux neuronaux, décrits ci-dessous, sont utilisés afin d'identifier celui qui donne les meilleurs résultats pour prédire les valeurs moyennes du niveau des eaux souterraines pour un pas de temps mensuel.

1.1 Réseau neuronal anticipatrice (Feedforward neural network) (FNN)

Les Feedforward neural network, ont été appliqués avec succès dans de différents problèmes depuis l'avènement de l'algorithme d'apprentissage de rétropropagation d'erreur (Ioannis & al., 2005). L'algorithme de rétro-propagation ajuste les poids basés sur l'idée de minimiser le taux d'erreurs. Les fonctions de transfert, généralement la fonction sigmoïde, permettent à l'algorithme de rétro-propagation pour ajuster les poids à travers de multiples couches cachées. La figure 178 montre un réseau de neurones de Feedforward network entièrement connecté avec une couche cachée constituée de trois nœuds, cinq neurones d'entrée et une sortie. Le nœud est la clé de l'apprentissage du réseau de neurones.

Le signal d'entrée se propage à travers le réseau dans une direction vers l'avant, couche par couche. Leur principal avantage est la facilité de manipuler et de l'approche des cartes d'entrée / sortie (Hornik & al., 1989). Les principaux inconvénients sont leur formation lente et nécessité de beaucoup de données d'apprentissage (Ioannis & al., 2005).

L'algorithme de rétro-propagation propage les modifications apportées aux poids par l'intermédiaire du réseau de neurones en changeant les coefficients de pondération d'un nœud individuel à la fois. A chaque itération, la différence entre la sortie du réseau de neurones et de la réponse souhaitée est calculée. La dérivation de l'algorithme de rétro-propagation, qui tente de minimiser la place d'erreurs, est présentée par (Rumelhart & McClelland, 1986).

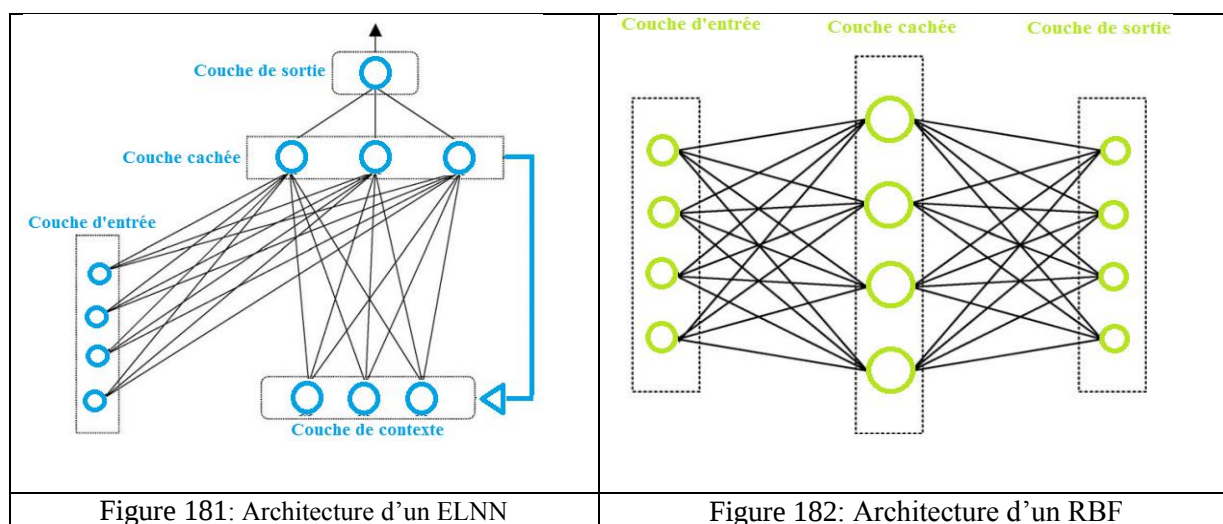


1.2 Réseau de neurones d'Elman (Elman Neural Network) (ELNN)

ELNN ou Récurrent neural network (RNN) est un modèle neuronal récurrent typique employé dans de nombreuses études (Elman, 1990) [29]. La rétroaction fait ELNNs capable d'apprendre, de reconnaître et de générer des schémas temporels, ainsi que celles de l'espace. La structure typique d'un ELNN est représentée dans la figure 179. Dans ce réseau, les neurones dans les couches cachées et de sortie sont envoyés à travers une couche tampon, dite couche de contexte. Celle-ci est interconnectée avec la couche cachée et joue le rôle de la mémoire du réseau. Ces réseaux récurrents peuvent avoir une mémoire infinie et trouver ainsi des relations à travers le temps, ainsi que par le biais de l'espace d'entrée instantanée (Haykin, 1999).

1.3 Réseau de fonction de base radiale (Radial basis fonction network) (RBF)

Les RBF sont des réseaux hybrides non linéaires contenant typiquement une seule couche cachée de nœuds de calcul. Cette couche utilise des fonctions de transfert gaussiennes, plutôt que les fonctions sigmoïdes standards employées par un FNN.



La figure 180 montre l'architecture d'un RBF constituée d'une couche cachée de quatre nœuds, quatre entrées et quatre sorties. Les centres et les largeurs des gaussiennes sont définies par des règles d'apprentissage non supervisé, et l'apprentissage supervisé est appliqué à la couche de sortie (Haykin, 1999). Réseaux de fonctions de base radiales ont tendance à apprendre beaucoup plus rapide qu'un FNN.

2. Apprentissage avec différents algorithmes

Trois algorithmes différents sont utilisés pour identifier celui qui forme le réseau neuronal le plus efficace.

2.1. Descente graduelle avec retour de vitesse adaptatif et taux d'apprentissage adaptatif (Gradient descent with momentum and adaptive learning rate backpropagation) (GDX)

Cette méthode utilise la rétropropagation pour calculer les dérivés de la fonction de baisse des performances par rapport aux poids et biais des variables du réseau (Ioannis & al., 2005). Chaque variable est ajustée en fonction de la descente de gradient avec élan (**GDX**). Pour chaque étape d'optimisation, si la performance diminue, le taux d'apprentissage est augmenté. Ceci est probablement la façon la plus simple et la plus courante de former un réseau (Haykin, 1999).

2.2. Levenberg-Marquardt (LM)

La méthode de Levenberg-Marquardt est une modification de l'algorithme classique de Newton pour trouver une solution optimale au problème de minimisation (Ioannis & al., 2005). Il utilise une approximation de la matrice Hessien pour la mise à jour de poids comme suite :

$$x_{k+1} = x_k - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e \quad (\text{Eq. 68})$$

Où x poids du réseau neuronal, J la matrice jacobienne des critères de performance à minimiser, μ un scalaire qui contrôle le processus d'apprentissage et e le vecteur d'erreur résiduelle. Lorsque le scalaire μ est égal à zéro, l'équation. (1) est juste la méthode de Newton, en utilisant la matrice Hessien approximative (Ioannis & al., 2005). Lorsque μ est grand, l'équation. (1) devient un gradient descente avec une petite taille de pas. La méthode de Newton est plus rapide et plus précise à proximité d'un minimum d'erreur, de sorte que le but est de se déplacer vers la méthode de Newton aussi rapidement que possible.

Levenberg-Marquardt a de grandes exigences en matière de calcul et de mémoire, et donc il ne peut être utilisé dans les petits réseaux (Maier & Dandy, 1998). Néanmoins, de nombreux chercheurs ont réussi à l'utiliser (Ancil & al., 2004 ; Coulibaly & al., 2000 ; Coulibaly & al, 2001a, b, c, Maier et Dandy, 1998 ; Maier et Dandy, 2000 ; Toth & al., 2000). L'algorithme de Levenberg-Marquardt est souvent caractérisé comme plus stable et efficace. En outre, à la fois (Coulibaly & al., 2000 ; Toth & al., 2000) soulignent qu'il est plus rapide et moins facilement piégés dans des minima locaux que d'autres algorithmes d'optimisation.

2.3. Bayésien régularisation (BR)

La régularisation bayésienne est un algorithme qui détermine automatiquement des valeurs optimales pour les paramètres de la fonction objectif. Dans l'approche utilisée, les poids et les biais du réseau sont supposées être des variables aléatoires avec des distributions spécifiques. Afin d'estimer les paramètres de régularisation, qui sont liés aux écarts inconnus, des techniques statistiques sont utilisées. L'avantage de cet algorithme est que quelle que soit la taille du réseau, la fonction ne sera pas trop montée. La régularisation bayésienne a été effectivement utilisé dans la littérature (Ancil & al., 2004 ; Coulibaly & al, 2001a, b, c ; Porter & al., 2000).

3. Architecture de réseau

Plusieurs aspects de l'architecture des réseaux de neurones qui se concentrent sur la prédiction de variables associées à l'hydrologie sont couverts par (Maier & Dandy, 2000). La structure du réseau est déterminée par essai et erreur. La taille de l'entrée et de la couche cachée du réseau varie en fonction de l'horizon de

prédiction, alors que la couche de sortie à un seul nœud. Le nombre de nœuds dans la couche cachée et les critères d'arrêt sont optimisés en vue d'obtention d'une sortie plus précise et exacte. Enfin, la fonction d'activation de la couche cachée est définie sur une fonction tangente sigmoïde hyperbolique prouvé par essais et erreurs pour être le meilleur dans la représentation de la non-linéarité du système naturel modélisé. Il est à noter qu'il n'y a pas de méthode directe pour sélectionner le nombre de nœuds cachés pour un modèle RNA pour un problème donné. Ainsi, l'approche d'essai-erreur commune reste la méthode la plus largement utilisée.

3.1. Méthodologie

Sur la base des paramètres pertinents, deux groupes de données d'entrée ont été sélectionnés pour tous les réseaux : (G1) les précipitations, la température, et le niveau des eaux souterraines et (G2) les précipitations, l'évaporation, le ruissellement, et le niveau des eaux souterraines.

Les paramètres de 5 mois précédents de précipitations, le niveau des eaux souterraines, de la température ont été utilisées comme données d'entrée des modèles. Tous les réseaux ont été formés pour une période de dix ans des données (1980-2011) et calibrés pour une période de 18 mois (d'avril 2011 à septembre 2012). Les réseaux ont été vérifiés en fonction des observations du niveau des eaux souterraines dans 2 puits situés dans la Plaine de Saïss pour une autre période de 29 mois (à partir de septembre 2012 à février 2014). Les résultats ont montré que les réseaux de neurones artificiels peuvent être utilisés avec succès pour prévoir les niveaux d'eau souterraine.

Tous les essais et les résultats sont issus des essais sur environnement Matlab R2015 (Matlab, 2015). Au moyen d'essais et d'erreurs, un réseau optimal et la configuration des paramètres pour les trois réseaux ont été dérivés. Pendant l'étalonnage, les valeurs corrélées mieux avec tous les réseaux où ceux d'une fenêtre mobile de 5 mois à travers la série de données. Pour chaque paramètre d'entrée de 5 mois des données historiques ont été utilisés dans le réseau. Par conséquent, en plus de x_t que la valeur d'un paramètre donné au temps présent, sa valeur au temps $t - 1$, $t - 2$, $t - 3$ et $t - 4$ ont été également examiné. Ainsi, la couche d'entrée dans l'ensemble des réseaux est composée de 20 nœuds d'entrée. La sortie des réseaux était prédiction du niveau des eaux souterraines à l'étape de temps $t + 1$.

Le nombre de couches cachées pour FNN et ELNN a été optimisé en 2. Ce nombre de couches s'est avéré être à la fois efficace et adéquat pour gérer la plutôt petite quantité de données dans notre étude. Le nombre de nœuds cachés pour RBNN a été déterminé automatiquement 20. D'autres paramètres du réseau ont été ajustés afin de minimiser la fonction d'erreur du réseau lors de l'apprentissage et de calibrage (calculé par le RMSE). Le nombre d'époques ou des aliments de chaque réseau, le taux et les algorithmes d'apprentissage et la propagation des ELNN ont été optimisées aussi. La nécessité de l'ajustement de ces paramètres réside dans le risque de surentraînement du réseau.

3.2. Résultats

Les tableaux 69 et 70 illustrent les résultats des tests pour chaque configuration du réseau. Comme prévu, l'efficacité de toute méthode désintègre que la période de prévision augmente. La méthode la plus efficace est celui dont l'efficacité se désintègre avec un rythme plus lent et en même temps la fonction inconnue explique mieux. La meilleure performance pour le problème donné a été atteinte par le réseau de Feedforward formé avec l'algorithme de Levenberg-Marquardt et la seconde meilleure par le réseau de neurones récurrent formé avec le même algorithme.

Le tableau 69 montre que les meilleurs résultats pour G1 et G2 sont obtenus par FNN et ELNN justifié par leurs petites valeurs de RMSE et les valeurs supérieures de R^2 par rapport aux autres réseaux. Ces résultats reflètent la grande capacité de FNN et ELNN à modéliser les variations du niveau de l'eau souterraine avec plus de précision. Même scénario des réseaux pour les deux ensembles de données G1 et G2 peut être expliqué par

une forte corrélation entre l'évaporation et la température dans la Plaine de Saïss. Ceci se voit clairement dans la figure 181, où la même variation temporelle des deux paramètres est représentée.

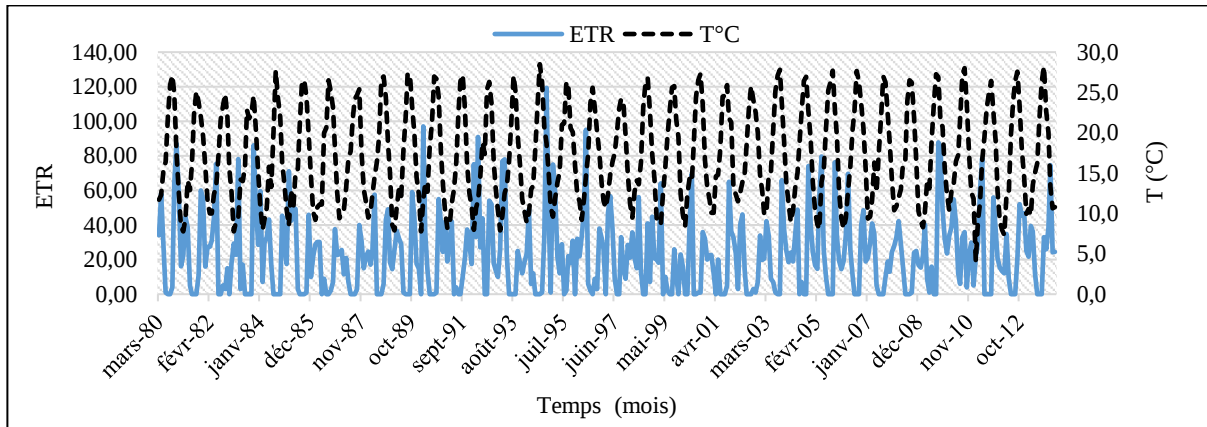
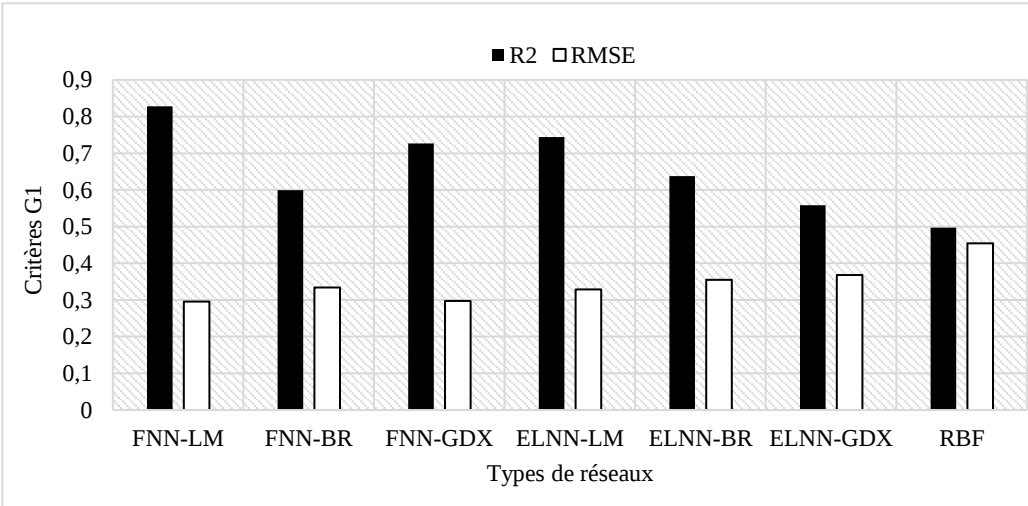
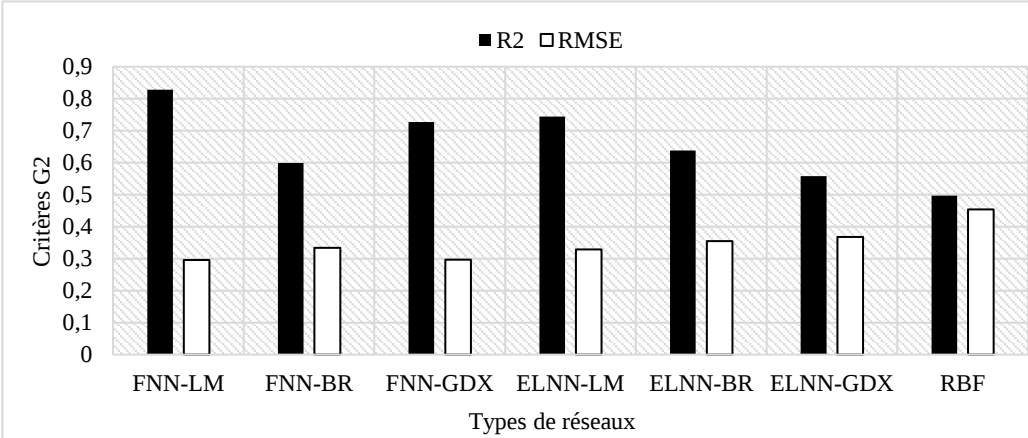


Figure 183: Variation des températures et évapotranspiration au cours de la période 1980-2014

Le tableau 69 montre les résidus saisonniers pour 18 mois pour les sept réseaux. En général, FNN et ELNN sont restés toujours les meilleurs réseaux avec leurs bonnes performances, indiquées par les résidus minimaux par rapport à d'autres réseaux (Tableau 69). On peut conclure que la meilleure performance globale du problème traité a été atteinte avec succès par FNN en premier ordre et la seconde meilleure par ELNN.

Tableau 73 : R2 et RMSE de sept réseaux-algorithmes utilisés pour les deux ensembles G2

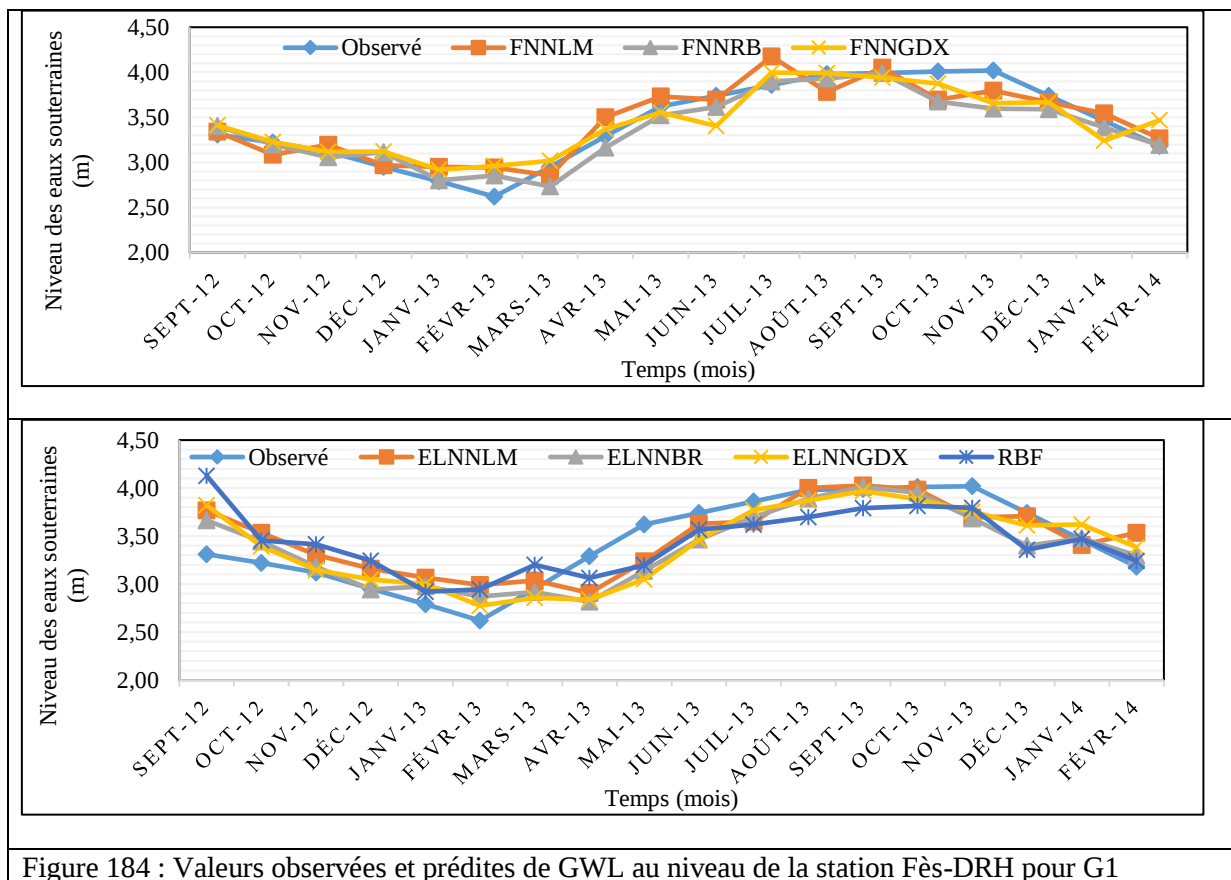
Critères (G1)	Réseaux-algorithmes						
	FNN-LM	FNN-BR	FNN-GDX	ELNN-LM	ELNN-BR	ELNN-GDX	RBF
R2	0,828	0,599	0,727	0,744	0,638	0,558	0,497
RMSE	0,296	0,334	0,297	0,329	0,355	0,368	0,454
Représentation graphique des valeurs de R ² et RMSE							
	■ R2 □ RMSE Types de réseaux						
Critères (G2)	Réseaux-algorithmes						
	FNN-LM	FNN-BR	FNN-GDX	ELNN-LM	ELNN-BR	ELNN-GDX	RBF
R2	0,814	0,642	0,689	0,814	0,717	0,670	0,614
RMSE	0,285	0,316	0,316	0,321	0,315	0,372	0,426
Représentation graphique des valeurs de R2 et RMSE							
	■ R2 □ RMSE Types de réseaux						

Apparemment, en raison de la nature du problème, FNN et ELNN prédit les variations du niveau des eaux souterraines de façon plus efficace. Des résultats similaires ont été observés par (Rakhshandehroo & al., 2012).

Comme on peut le voir dans le tableau 69, les valeurs RMSE pour FNN et ELNN sont environ moins de la moitié du RMSE pour d'autres réseaux. R^2 pour ces réseaux est également plus de 17% plus élevé que pour les autres réseaux R^2 . Il a été conclu que, par rapport à d'autres réseaux, FNN et ELNN vont probablement donner de meilleurs résultats pour les autres Plaines aussi, une fois de manière satisfaisante formés et calibrés.

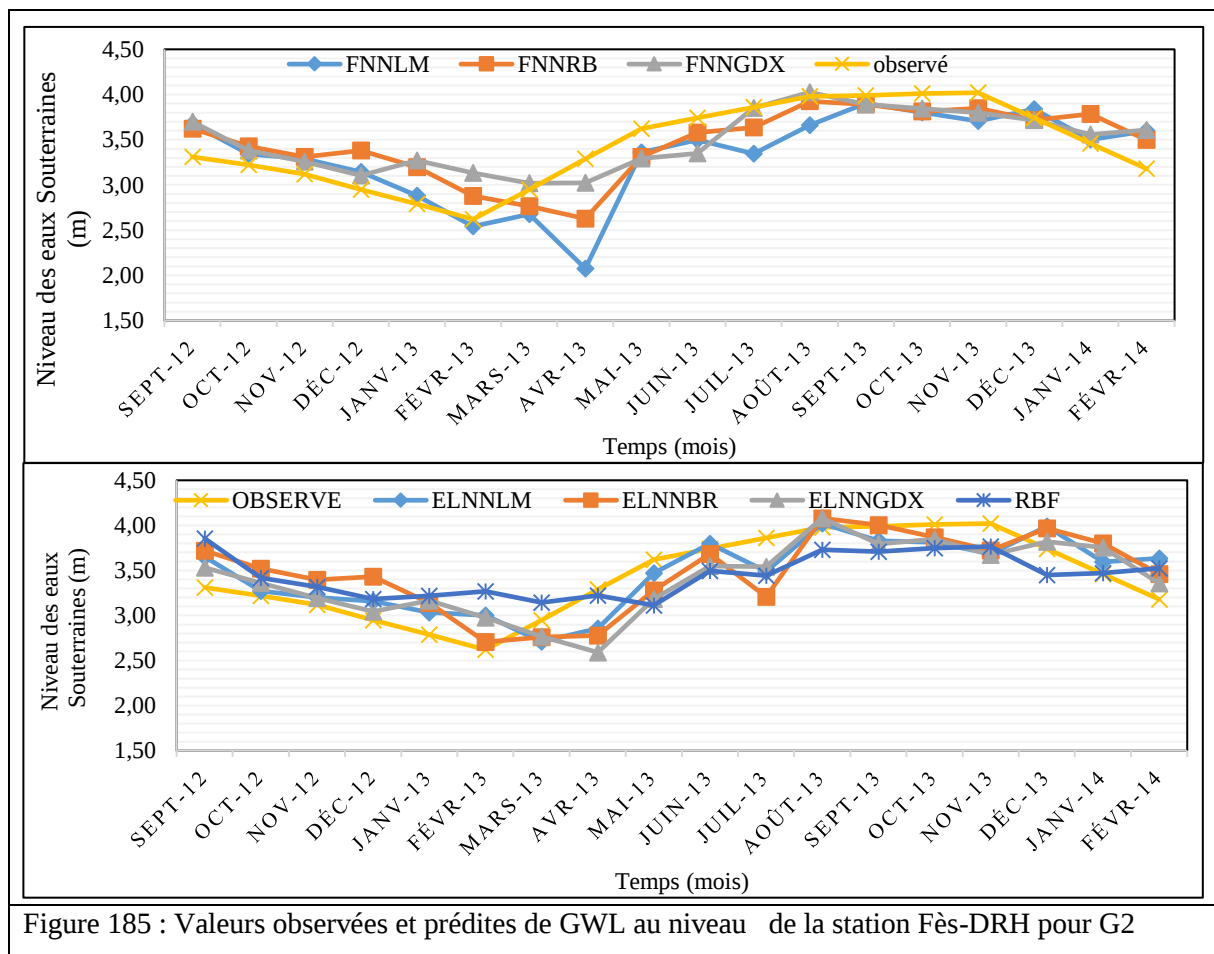
Tableau 74 : Résidus saisonniers (m) pour chacune des sept combinaisons RNA-algorithme

Temps	Réseaux-algorithmes						
	FNN-LM	FNN-BR	FNN-GDX	ELNN-LM	ELNN-BR	ELNN-GDX	RBF
janv-13	0,16	0,01	0,13	0,12	0,03	0,05	-0,03
févr-13	0,32	0,23	0,34	0,20	0,08	-0,01	0,15
janv-14	0,08	-0,07	-0,22	-0,33	-0,26	-0,12	-0,27
févr-14	0,09	0,01	0,29	0,08	-0,16	-0,08	-0,22
Temps	Réseaux-algorithmes						
	FNN-LM	FNN-BR	FNN-GDX	ELNN-LM	ELNN-BR	ELNN-GDX	RBF
janv-13	0,09	0,41	0,48	0,25	0,35	0,37	0,43
févr-13	-0,08	0,26	0,51	0,38	0,09	0,36	0,65
janv-14	0,04	0,32	0,10	0,14	0,34	0,29	0,01
févr-14	0,42	0,32	0,43	0,45	0,28	0,18	0,34

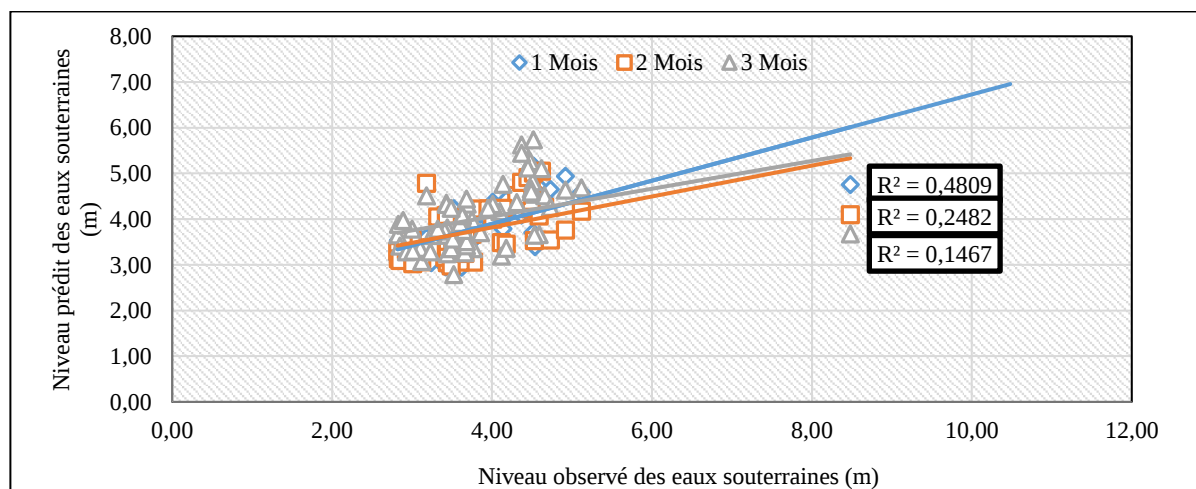


Le tableau 70 indique que même si le réseau FNN formé avec l'algorithme GDX semble mieux à expliquer le changement de niveau des eaux souterraines, ses résultats décalés rendent la méthode inadaptée pour

le problème. Le réseau le plus inadapté était un réseau neuronal récurrent formé avec l'algorithme de régularisation bayésienne. Cela confirme que ELNN nécessite des algorithmes d'apprentissage plus complexes (Coulibaly & al., 2001a, b, c). Le reste des réseaux relativement bien, mais avait tendance à simuler l'ensemble de données observées.



De plus, tous les réseaux sont bien performés pendant 1 mois d'avance de prévision (Figure 183). Étant donné que le problème donné vise à prédire le niveau d'un aquifère face à l'épuisement, les modèles surestimés ne sont pas d'un intérêt particulier.



Ainsi, les techniques les plus prometteuses semblent être ceux qui utilisent le réseau de neurones, formés avec l'algorithme de Levenberg-Marquardt qui sous-estime une partie du niveau des eaux souterraines au cours de la saison sèche. La signification physique de ce résultat est que la structure de ce modèle permet à ses poids d'ajuster les valeurs qui représentent les tendances du système naturel. Afin de valider le modèle une prévision de 18 mois en avance est faite et comparée aux valeurs observées.

La figure 182 montre que le meilleur du 6 sur un total de 7 combinaisons prédit le niveau des eaux souterraines pour cette période de 18 mois. En outre, la figure 183 montre une comparaison des niveaux des eaux souterraines observées et calculées pour les prévisions de 1 à 18 mois à venir par le réseau le plus performant FNN-LM. Les différents résultats du modèle montrent relativement une bonne prédiction de l'évolution du niveau des eaux souterraines, mais le modèle de prédiction diminue légèrement avec l'augmentation de l'horizon de la prévision.

3.3. Discussion

Sept architectures différentes de réseaux de neurones ont été utilisées pour prévoir la profondeur dans les eaux souterraines au niveau de la Plaine de Saïss. Les valeurs mensuelles des profondeurs des eaux souterraines observées dans 2 piézomètres d'observation ont été utilisées pour former, calibrer et tester les réseaux dans une période de 34 ans.

Dans cette partie, un essai d'identifier la configuration la plus stable et efficace des réseaux de neurones pour prédire le niveau des eaux souterraines est tenté dans la Plaine de Saïss. Les eaux souterraines dans la région sont menacées depuis les années 1980 en raison d'une forte exploitation due à l'irrigation intensive.

Les résultats ont montré que les réseaux ont prédit la profondeur des eaux souterraines dans les 2 piézomètres d'observation avec succès avec une erreur quadratique moyenne (RMSE) plus petite.

Les sept configurations différentes de RNA testées en termes de résultats optimaux pour un écart de prédiction de 29 mois. Toutefois, la comparaison des réseaux avec des architectures différentes ont montré que la meilleure performance globale a été réalisée par le réseau FNN-LM avec un RMSE de 0.285 à 0.296 et R^2 de 0.814 à 0.828 et le deuxième meilleur par ELNN-LM avec un RMSE de 0.321 à 0.329 et R^2 de 0.744 à 0.814.

D'après les résultats de l'étude, on peut aussi en déduire que l'algorithme de Levenberg-Marquardt est plus approprié pour ce problème d'après les bons résultats de ELNN effectuée également avec ce même algorithme. En outre, la combinaison de deux ou plusieurs méthodes de prédiction devrait également être prise en considération, comme dans notre cas, la méthode FNN-LM a eu tendance à sous-estimer l'événement alors que le reste des méthodes les surestimée.

Il a été conclu que, une fois les réseaux sont suffisamment formés et calibrés, FNN et ELNN vont probablement donner de meilleurs résultats en matière de prévision du niveau de l'eau souterraine dans d'autres Plaines.

En général, les résultats de l'étude de cas sont satisfaisants et démontrent que les réseaux neuronaux peuvent être un outil de prédiction utile dans le domaine de gestion des eaux souterraines.

II. Prédiction du niveau des eaux souterraines

La gestion durable des ressources en eau souterraine en conjonction avec les eaux de surface dans un bassin hydrographique est très importante pour assurer la durabilité d'un Bassin de ressources en eau de surface et en eau souterraine (Mohanty & al., 2010).

Une prévision fiable des Niveaux des eaux souterraines est un paramètre essentiel de la planification et de la mise en œuvre de la gestion intégrée des ressources en eau souterraine et de surface dans un bassin hydrographique (Mohanty & al, 2010). Des évaluations précises des niveaux de l'eau souterraine permettent aux gestionnaires de l'eau, les ingénieurs et les divers intervenants pour : (i) d'élaborer de meilleures stratégies pour éviter ou réduire les effets néfastes comme la perte par pompage des puits d'alimentation en eau dans le secteur

résidentiel(Prinos & al., 2002) ; (ii) développer une meilleure compréhension de la dynamique et des facteurs sous-jacents qui influent sur les niveaux des eaux souterraines; et (iii) Équilibrer les besoins des zones urbaines, agricoles, industrielles et autres demandes et analyser les avantages et les coûts de la conservation de l'eau (Adamowski & Chan, 2011).

Adamowski et Chan en 2011 ont élaboré un modèle de réseau de neurones d'ondelettes pour prédire le niveau des eaux souterraines au Québec à Canada. Ces études ont toutes montré que le DWT- RNA-PMC modèles dépassé les autres modèles (telles que la régression linéaire multiple et régulières de réseaux neuronaux artificiels) qui ont été étudiés pour des applications de prévision hydrologique.

Cette partie de l'étude tente à développer une nouvelle méthode de prévision très précise de niveau des eaux souterraines, notamment la nappe phréatique superficielle, basée sur des données météorologiques au niveau des deux stations Fès-DRH et Ain Bittit dans la Plaine de Saïss pour différentes échelles temps de prédiction (1, 2 et 3 mois). C'est une optique pour céder aux gestionnaires de l'eau, des outils fiables et plus efficaces en matière de gestion des eaux souterraines et les aider à résoudre certains des problèmes décrits ci-dessus.

1. Méthodologie

1.1. Méthode de transformé en ondelette

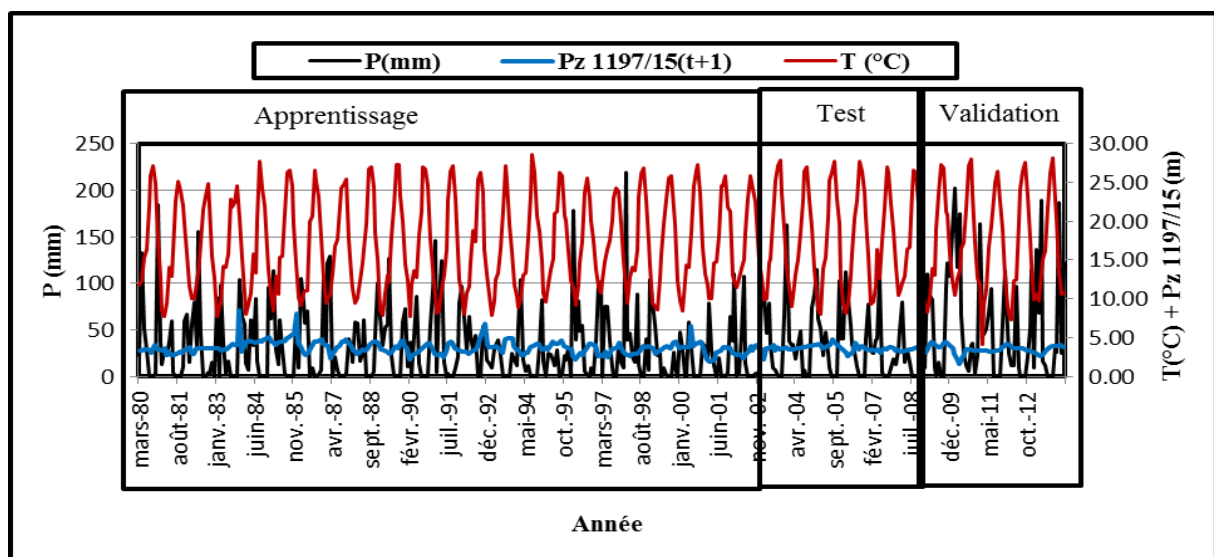


Figure 187: Répartition des données destinées pour l'apprentissage et le calage des modèles

1.2. Conception du modèle

La base de données utilisée a été scindée aléatoirement en deux parties, l'une pour le calage des modèles (RLM, RNA-PMC et DWT-RNA-PMC) et l'identification des paramètres qui représentent 70 % de la taille totale de la base de données et l'autre pour le test (15%) et la validation (15 %) du modèle. Les critères de performance sont calculés aussi bien en mode de calage qu'en mode de validation. Dans le cas de notre étude, les variables sont de nature météorologique, caractérisées par des valeurs différentes, ce qui amène à les normaliser afin de ramener la plage des valeurs entre -1 et 1. La valeur donnée par le modèle de sortie est un nombre réel pouvant prendre toutes les valeurs comprises dans l'intervalle [0,1].

La première étape de la conception du modèle était de choisir les variables d'entrée. Pour cela, quatre modèles ont été construits et testés (Tableau 71), le modèle Mod4 (Figure 185) a été retenu vis à vis ses performances préliminaires.

Tableau 75 : Modèles évalués pour la prédiction du niveau des eaux souterraines

Modèle	Variables d'entrées	Variable prédit
Mod1	$[P(t), T(t), \text{GWL}(t)] ; [P(t-1), T(t-1), \text{GWL}(t-1)] ;$	$\text{GWL}(t+T)$
Mod2	$[P(t), T(t), \text{GWL}(t)] ; [P(t-1), T(t-1), \text{GWL}(t-1)] ; [P(t-2), T(t-2), \text{GWL}(t-2)] ;$	$\text{GWL}(t+T)$
Mod3	$[P(t), T(t), \text{GWL}(t)] ; [P(t-1), T(t-1), \text{GWL}(t-1)] ; [P(t-2), T(t-2), \text{GWL}(t-2)] ; [P(t-3), T(t-3), \text{GWL}(t-3)] ;$	$\text{GWL}(t+T)$
Mod4	$[P(t), T(t), \text{GWL}(t)] ; [P(t-1), T(t-1), \text{GWL}(t-1)] ; [P(t-2), T(t-2), \text{GWL}(t-2)] ; [P(t-3), T(t-3), \text{GWL}(t-3)] ; [P(t-4), T(t-4), \text{GWL}(t-4)] .$	$\text{GWL}(t+T)$

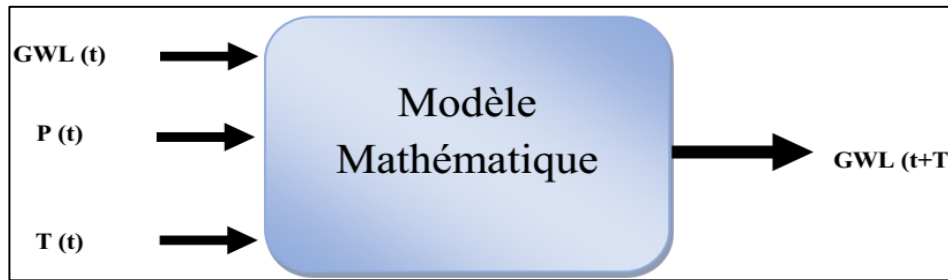


Figure 188: Schéma du modèle mathématique adopté pour la prédiction du GWL

1.3. Comparaison des performances du modèle

La performance des différents modèles de prévision peut être évaluée en termes de qualité d'ajustement une fois chacun des structures de modèle est étalonné à l'aide de l'apprentissage ou de l'ensemble de données de validation et les données expérimentales. Le coefficient de détermination (R^2), Nash-Sutcliffe modèle coefficient d'efficacité (E) et la racine carrée moyenne erreur (RMSE) ont été utilisés dans cette étude.

1.4. Collecte des données

Les modèles de RNA-PMC et DWT-RNA-PMC dans cette étude ont été élaborées à l'aide de variables hydrologiques et météorologiques. Plus précisément, les données utilisées dans cette étude se composaient de précipitations totales mensuelles (mm), la température moyenne mensuelle ($^{\circ}\text{C}$), et les niveaux moyens mensuels des eaux souterraines (mm).

1.5. *Elaboration des modèles*

A. *Etapes de l'approche adoptée*

La démarche générale impliquée pour l'élaboration du modèle DWT-RNA-PMC est représentée ci-dessous (Figure 187).

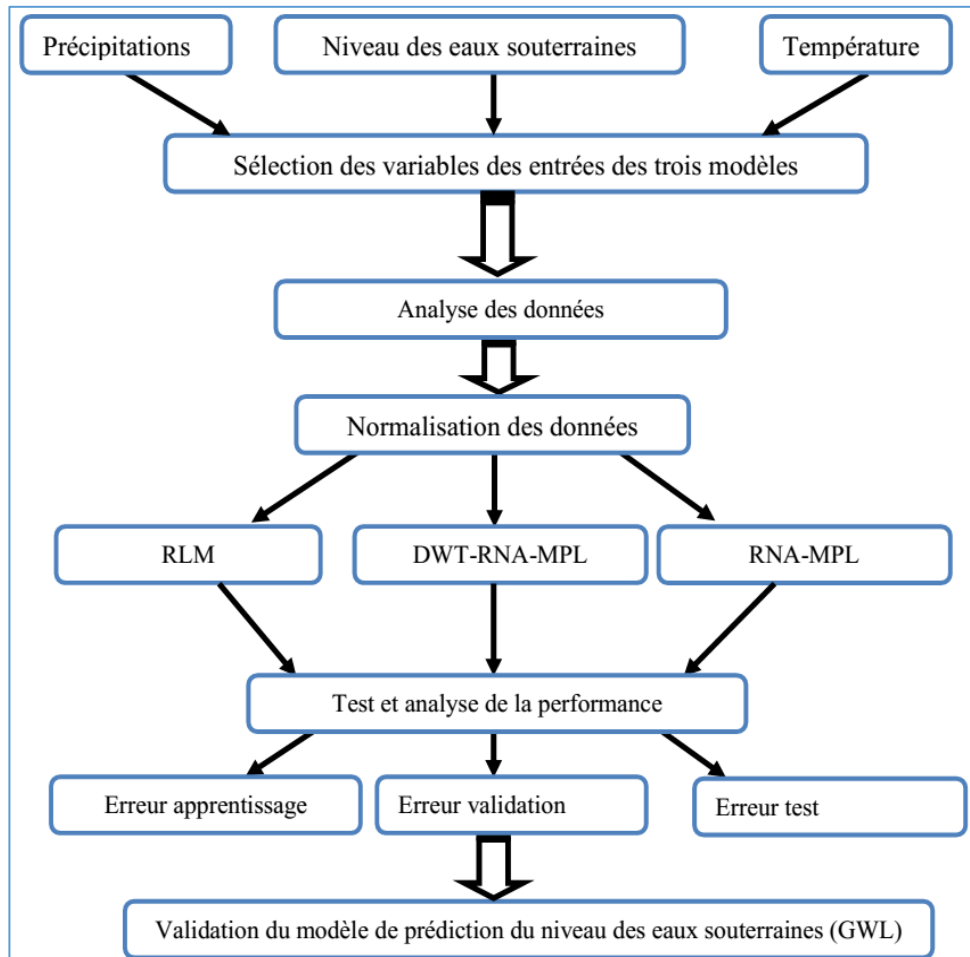


Figure 189: Différentes étapes de l'élaboration du modèle DWT- RNA-PMC

B. *Modèle des réseaux de neurones artificiels (RNA-PMC)*

Les modèles d'RNA-PMC ont été formés et évalués sur la base de différentes combinaisons de séries chronologiques et du nombre de neurones dans la couche cachée du modèle. Les paramètres d'entrée se composaient de diverses combinaisons de variables physiques suivantes : la température moyenne mensuelle (T), le total mensuel de précipitation (P), et la moyenne mensuelle de l'eau souterraine (GWL) (Figure 188).

Diverses combinaisons de ces variables du mois courant (t), à partir de 1 mois avant (t-1), de 2 mois avant (t-2), de 3 mois avant (t-3) et de 4 mois avant (t-4) ont été testés. Les modèles ont ensuite été comparés à l'aide de mesures statistiques de la qualité de l'ajustement décrit précédemment.

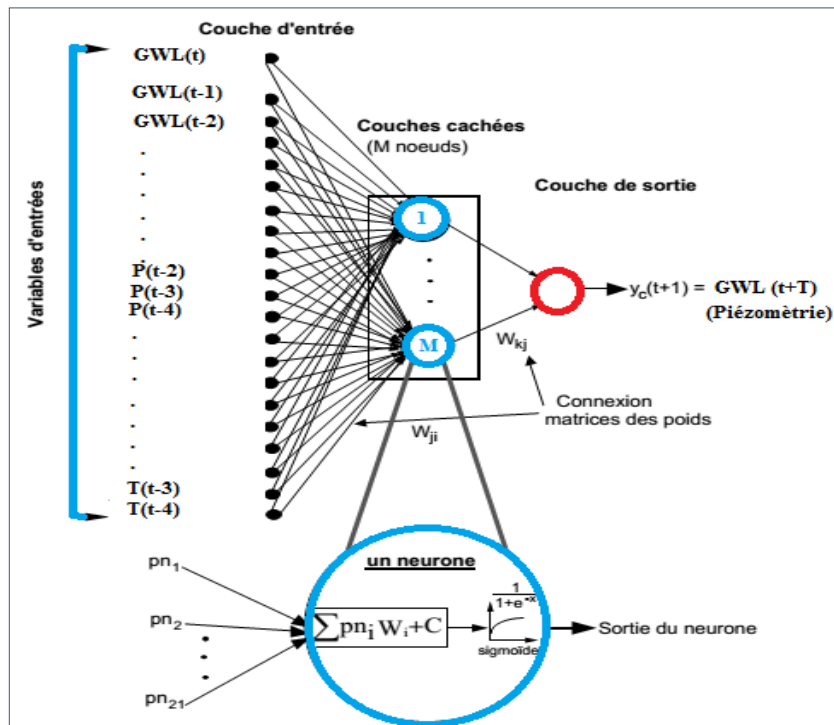


Figure 190: Architecture simplifiée du modèle RNA-PMC retenu pour la prédiction du GWL

Pour les modèles RNA-PMC, la série de données ont été divisées en une série d'apprentissage (de novembre 2002 à juin 2008), une partie de validation (juillet 2008 à février 2009), et une autre partie pour le test du modèle (mars 2009 à octobre 2009).

C. Modèle DWT- RNA-PMC

Comme cela a déjà été mentionné, la DWT a été utilisé dans cette étude car il nécessite moins d'effort de calcul que le CWT. L'un des avantages de la méthode DWT-RNA-PMC, comparativement à la méthode d'RNA-PMC est sa capacité à identifier les composants de données dans une série temporelle comme composants irrégulière avec multi-niveau de décomposition en ondelettes (Adamowski & Sun, 2010).

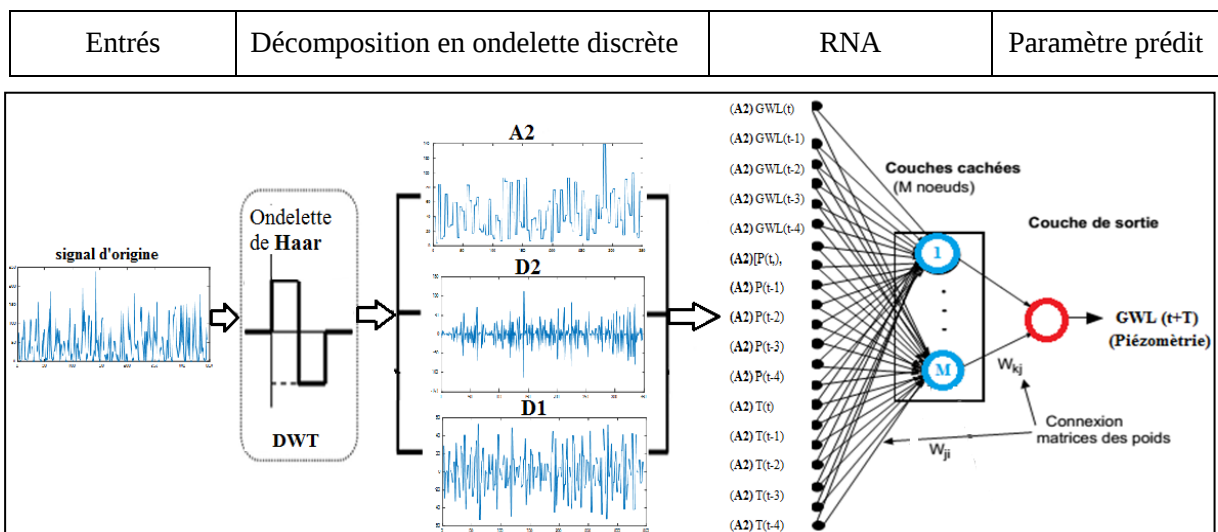


Figure 191: Architecture du modèle DWT- RNA-PMC 3 sélectionné pour la prévision de GWL

D. Décomposition en Ondelettes

Dans le modèle proposé DWT- RNA-PMC, les variables de la base de données pour chacune des stations pluviométriques et les deux piézomètres ont été décomposés en sous-série d'approximations et de détails (DWS). Le processus se compose d'un certain nombre d'étapes successives de filtrage. Les séries originales de la base de données sont d'abord décomposées en une approximation et signal de détail d'accompagnement. Le processus de décomposition est ensuite itéré, avec des signaux d'approximation successifs étant décomposés à son tour.

En conséquence, Les séries originales de la base de données sont décomposées en plusieurs composants de faible résolution. Lors de la réalisation d'analyses ondelettes, le nombre de niveaux de décomposition qui est approprié pour les données doit être choisi. Une méthode couramment utilisée pour déterminer le nombre de niveaux de décomposition est basée sur la longueur du signal (Christensen, 2004) et est donnée par $L = \text{int} [\log (N)]$, où L est le niveau de décomposition et N est la longueur du signal.

Tableau 76 : Différents combinaisons de modèles DWT-RNA-PMC testés pour la prédiction de GWL

Modèles testés	Variables d'entrée	élément prédit
DWT-RNA-PMC1	(D2)[P(t), T(t), GWL(t)] ;(A2)[P(t), T(t), GWL(t)] ; (D2) [P(t-1), T(t-1), GWL(t-1)] ;(A2) [P(t-1), T(t-1), GWL(t-1)] ; (D2) [P(t-2), T(t-2), GWL(t-2)] ;(A2) [P(t-2), T(t-2), GWL(t-2)] ; (D2) [P(t-3), T(t-3), GWL(t-3)] ;(A2) [P(t-3), T(t-3), GWL(t-3)] ; (D2) [P(t-4), T(t-4), GWL(t-4)] ;(A2) [P(t-4), T(t-4), GWL(t-4)]	GWL(t+T)
DWT-RNA-PMC2	(D2)[P(t), T(t), GWL(t)] ;(A2)[P(t), T(t), GWL(t)] ; (D2) [P(t-1), T(t-1), GWL(t-1)] ;(A2) [P(t-1), T(t-1), GWL(t-1)] ; (D2) [P(t-2), T(t-2), GWL(t-2)] ;(A2) [P(t-2), T(t-2), GWL(t-2)] ; (D2) [P(t-3), T(t-3), GWL(t-3)] ;(A2) [P(t-3), T(t-3), GWL(t-3)] ; (D2) [P(t-4), T(t-4), GWL(t-4)] ;(A2) [P(t-4), T(t-4), GWL(t-4)] ; (D1)[P(t), T(t), GWL(t)] ; (D1) [P(t-1), T(t-1), GWL(t-1)] ; (D1) [P(t-2), T(t-2), GWL(t-2)] ;(D1) [P(t-3), T(t-3), GWL(t-3)] ; (D1) [P(t-4), T(t-4), GWL(t-4)] ;	GWL(t+T)
DWT-RNA-PMC3	(A2)[P(t), T(t), GWL(t)] ; (A2) [P(t-1), T(t-1), GWL(t-1)] ; (A2) [P(t-2), T(t-2), GWL(t-2)] ; (A2) [P(t-3), T(t-3), GWL(t-3)] ; (A2) [P(t-4), T(t-4), GWL(t-4)]	GWL(t+T)

Certains modèles DWT-RNA-PMC ont été évalués (tableau 72). Le modèle DWT-RNA-PMC 3 a été retenu pour ses performances préliminaires.

L'apprentissage prévue dans cette étude comprise entre 370 et 433 échantillons (échantillons variaient selon le nombre d'entrées pour chaque station météorologique). Ainsi, le taux de décomposition a été sélectionné en tant que $L = 2$. Tel que discuté dans la section précédemment le "a trous" algorithme d'ondelette avec un filtre passe-bas Haar a été utilisé pour créer quatre ensembles de sous-série d'ondelettes. Ces trois sous-séries comprennent une composante à basse fréquence (l'approximation) utilisée pour découvrir la tendance de chaque signal et deux composantes de fréquence élevée (les détails) utilisé pour découvrir la périodicité du signal.

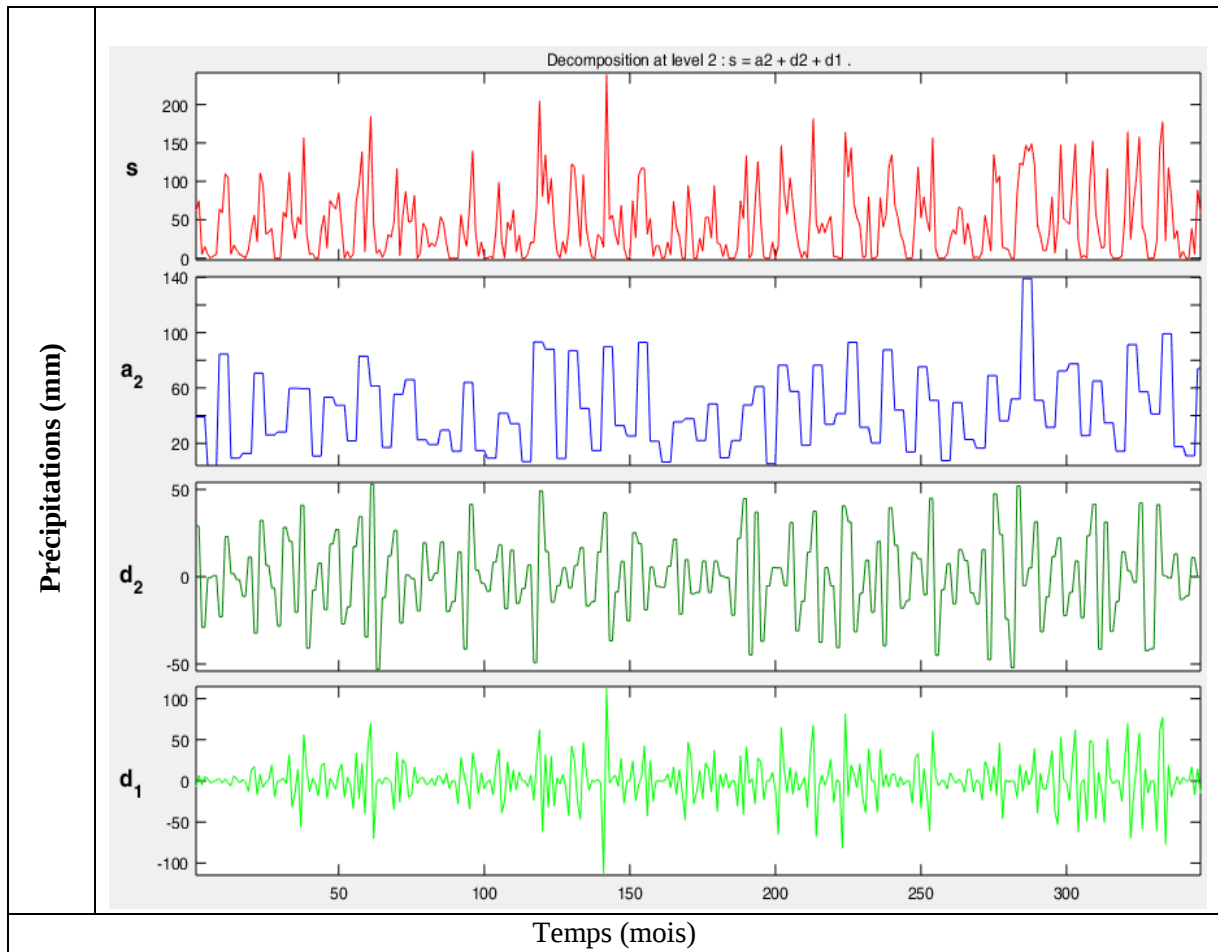


Figure 192: Décomposition en ondelette de la série des précipitations de la station Ain Bittit en 2 niveaux

Tous les sous-séries décomposés ont été ajoutées ensemble pour générer une série de temps et utilisé comme entrée pour le modèle DWT- RNA-PMC. Utilisation de la somme de toutes les sous-séries ou sous-série qui présentaient les plus fortes corrélations avec la série chronologique d'origine.

Dans ce travail, DW1 et DW2, ainsi que la série approximative, ont été additionnées et utilisés comme intrants dans les modèles RNA-PMC. Pour le Modèle DWT-RNA-PMC, l'RNA-PMC réseaux qui ont été mis au point consistait en une couche d'entrée, une seule couche cachée, et l'un couche de sortie comprenant un nœud correspondant au niveau de l'eau souterraine. Les nœuds d'entrée se composait de diverses combinaisons des variables suivantes : la somme de série DW (et la série approximative) de la température moyenne, les précipitations totales, et la moyenne du niveau de l'eau souterraine (du mois courant, par rapport au mois précédent, allant de 2 mois avant, de 3 mois avant et de 4 mois auparavant). Comme avec la Force régulière l'arrêt RNA-PMCs, chaque modèle a été testé sur une base d'essai et d'erreur pour déterminer le nombre optimal de neurones de la couche cachée basée sur différentes combinaisons de variables dans la couche d'entrée du modèle et le nombre de neurones dans la couche cachée du modèle.

1.6. Comparaison avec le modèle de régression linéaire multiple (RLM)

Pour évaluer la performance du modèle du DWT-RNA-PMC, une comparaison avec d'autres modèles plus classiques essentiellement le modèle de la régression linéaire multiple (RLM) a été utilisé. L'application de

ce modèle a été faite sur les mêmes jeux de données utilisés dans la méthode neuronale pour les deux phases de modélisation.

Le modèle RLM est une généralisation du modèle de régression simple lorsque les variables explicatives sont en nombre fini. Elle consiste à rechercher une équation linéaire reliant la variable à modéliser (variable à expliquer ou endogène) à la matrice d'entrées ou (variables explicatives ou exogènes).

Le modèles MLR spécifique a été élaboré en utilisant des variables (précipitation totales mensuelles, température moyenne mensuelles et les niveaux des eaux souterraines) comme variables indépendantes, et les niveaux des eaux souterraines dans les deux sites d'étude comme variables dépendantes. Au total, 70% des données, couvrant la période 1980-2014 a été utilisé pour l'apprentissage et 30% des données ont été utilisé pour le test et la validation.

Pour la première étape de modélisation, l'ensemble des données utilisées pendant l'apprentissage et le test du modèle RNA-PMC est retenu pour l'application de la régression linéaire multiple. Les résultats de cette démarche sont représentés dans les figures 191 et 192.

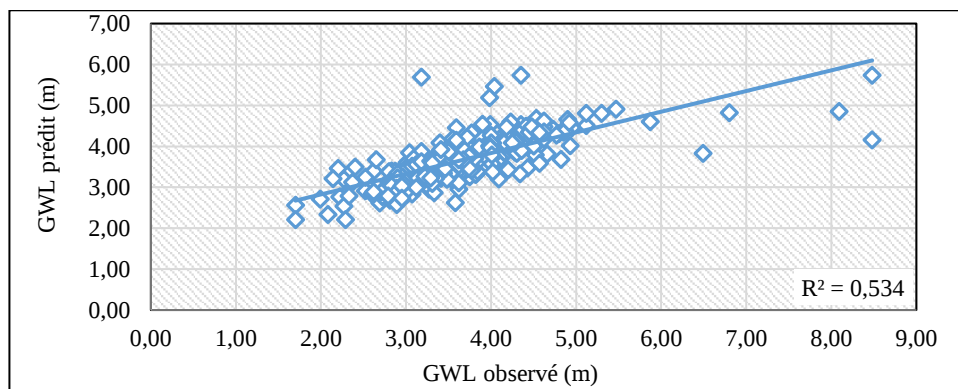


Figure 193: Comparaison des valeurs observées et prédites par le modèle de RLM au site de Fès-DRH

Pour la deuxième étape de modélisation, les variables indépendantes sont : $[P(t), T(t), GWL(t)]$; $[P(t-1), T(t-1), GWL(t-1)]$; $[P(t-2), T(t-2), GWL(t-2)]$; $[P(t-3), T(t-3), GWL(t-3)]$; $[P(t-4), T(t-4), GWL(t-4)]$, la variable dépendante est $GWL(t+1)$. La figure 192 montre les résultats obtenus par le modèle de régression linéaire multiple (RLM).

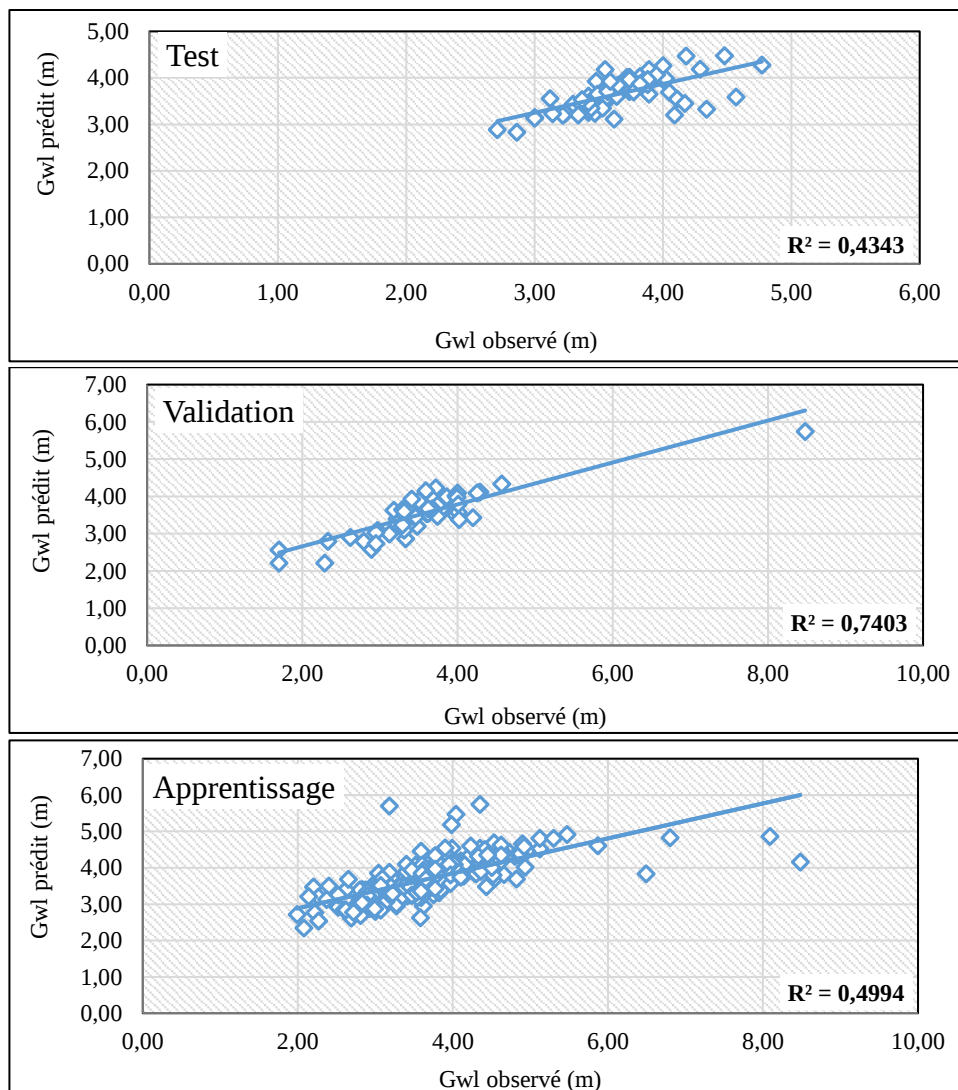


Figure 194: Comparaison des valeurs observées et simulées par le modèle RLM au site de Fès-DRH

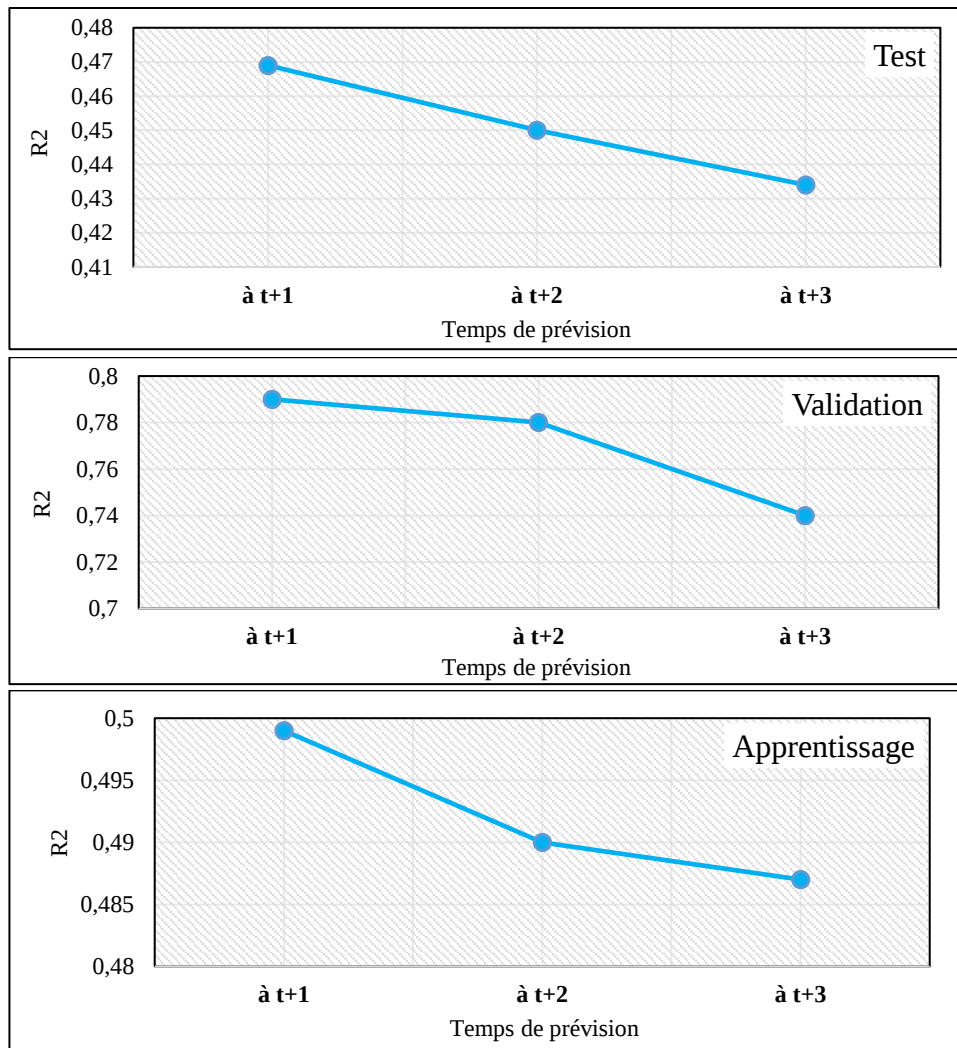


Figure 195: Variation du coefficient de détermination R^2 en fonction du temps de prévision

De nombreuses prévisions ont été effectuées afin de déterminer les horizons de ces prévisions par le modèle du RLM.

La figure 194 montre la comparaison entre les GWL prédits et observés pour la phase de validation pour des périodes de prévisions successives à t+2, à t+3 et à t+4. En augmentant le temps de prévision (t+2, t+3 à t+4), on assiste à une diminution du coefficient de détermination R^2 entre les valeurs observées et celles estimées et à une augmentation des erreurs MAE et RMSE. En conséquence, On note une dispersion du nuage de points autour de la courbe ce qui indique une diminution de la corrélation entre les valeurs du GWL prédit et celles observés. Le modèle devient divergeant par accumulation des erreurs de prévisions en allongeant le temps de prévision.

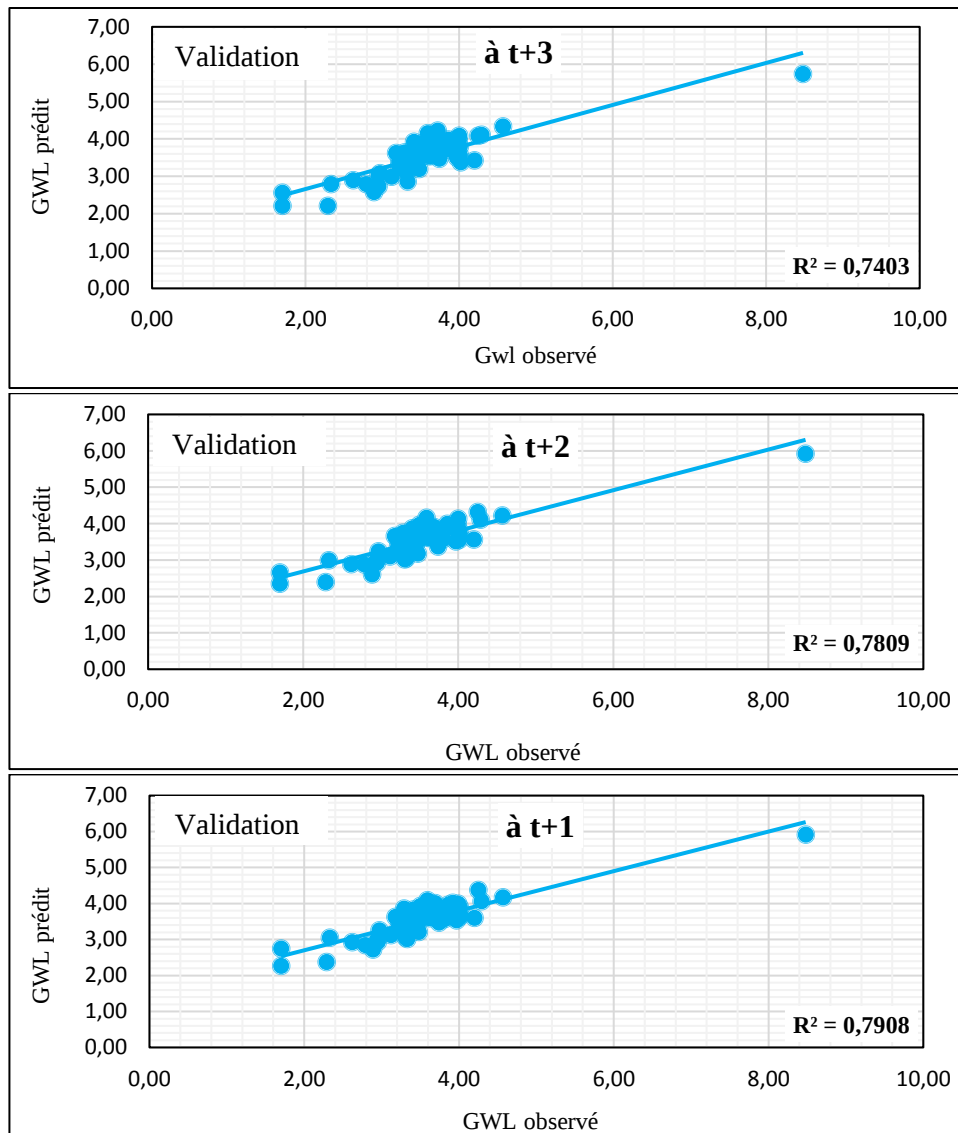


Figure 196: Comparaison entre les GWL prédites et observés par RLM à différentes échelles de temps de la station Fès-DRH

2. Résultats et discussion

Pour les deux sites d'étude (Fès-DRH et Ain Bittit) les modèles DWT- RNA-PMC ont prouvés leurs meilleures performances avec des résultats plus précis et exactes pour la prévision du niveau des eaux souterraines que les modèles RNA-PMC et les modèles RLM pendant les différentes échelles de temps :1 mois (Tableau 73), 2 mois (Tableau 74) et 3mois (Tableau 75). Les meilleurs modèles DWT- RNA-PMC étaient en fonction des variables tels que (la précipitation totale, la température et le niveau des eaux souterraines en moyenne) du mois en cours, le mois précédent 2, 3, et 4 mois d'avant.

Les meilleurs modèles DWT-RNA-PMC pour les deux sites d'étude ont eu 10 neurones dans la couche cachée. Pour les deux sites d'étude, le meilleur modèle RNA avait les mêmes variables que le meilleur modèle DWT-RNA-PMC pour les deux sites. Les meilleurs modèles pour RNA et RLM pour les deux sites ont respectivement eu 10 et 15 neurones dans la couche cachée.

Pour les deux sites d'étude les résultats indiquent que la performance des modèles testés diminue en augmentant dans l'échelle du temps de 1mois à 3mois.

Toutefois, les meilleurs modèles DWT- RNA-PMC pour les sites Fès-DRH et Ain Bittit pour 1 mois de prévision avaient un RMSE de test de 0,04 et 0,275 respectivement (Tableau 73), et étaient supérieurs au meilleur modèle RNA et le modèle RLM, qui avait une RMSE de test de 0,309 m et 0,321 pour le site Fès-DRH et 0.338 et 0.374 pour le site Ain Bittit. Alors que les meilleurs modèles DWT- RNA-PMC pour les sites Fès-DRH et Ain Bittit pour 3 mois de prévision avaient un RMSE de test de 0,083 et 0,15 respectivement (Tableau 75), et étaient supérieurs au meilleur modèle RNA et le modèle RLM, qui avait une RMSE de test de 0,754 m et 0,85 pour le site Fès-DRH et 0.336 et 0.394 pour le site Ain Bittit. Les valeurs de RMSE inférieures indiquent que le meilleur modèle DWT- RNA-PMC avait les plus petits écarts entre les niveaux des eaux souterraines prévus et les niveaux des eaux souterraines observés pour les deux stations.

Tableau 77 : Résultats des modèles RNA-PMC, DWT- RNA-PMC et RLM pour 1 mois au cours de la période 1980-2014

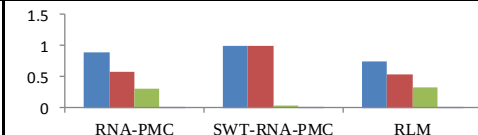
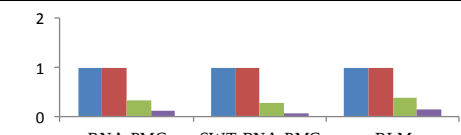
Echelle de temps	Station	Fès-DRH			Ain Bittit		
	Modèle	RNA-PMC	DWT-RNA-PMC	RLM	RNA-PMC	DWT-RNA-PMC	RLM
1 Mois	R2	0.889	0.999	0.743	0.996	0.998	0.795
	Nash	0.574	0.987	0.54	0.982	0.987	0.878
	RMSE	0.309	0.04	0.321	0.338	0.275	0.374
	MAE	0.012	0.004	0.019	0.114	0.075	0.14
Comparaison des performances entre les trois modèles	■ R2 ■ Nash ■ RMSE ■ MAE						

Tableau 78 : Résultats des modèles RNA-PMC, DWT- RNA-PMC et RLM pour 2 mois au cours de la période 1980-2014

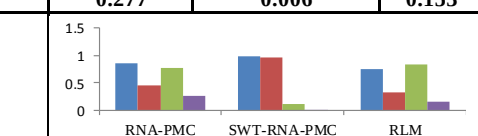
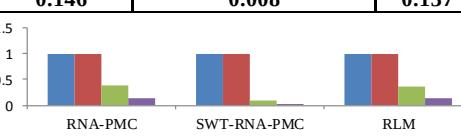
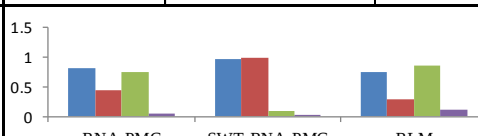
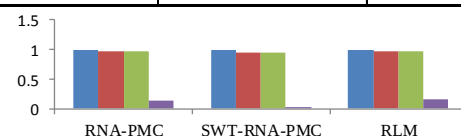
Echelle de temps	Station	Fès-DRH			Ain Bittit		
	Modèle	RNA-PMC	DWT-RNA-PMC	RLM	RNA-PMC	DWT-RNA-PMC	RLM
2 Mois	R2	0.851	0.981	0.759	0.995	0.996	0.895
	Nash	0.46	0.967	0.323	0.978	0.983	0.779
	RMSE	0.764	0.128	0.834	0.383	0.09	0.37
	MAE	0.277	0.006	0.153	0.146	0.008	0.137
Comparaison des performances entre les trois modèles	■ R2 ■ Nash ■ RMSE ■ MAE						

Tableau 79 : Résultats des modèles RNA-PMC, DWT- RNA-PMC et RLM pour 3 mois au cours de la période 1980-2014

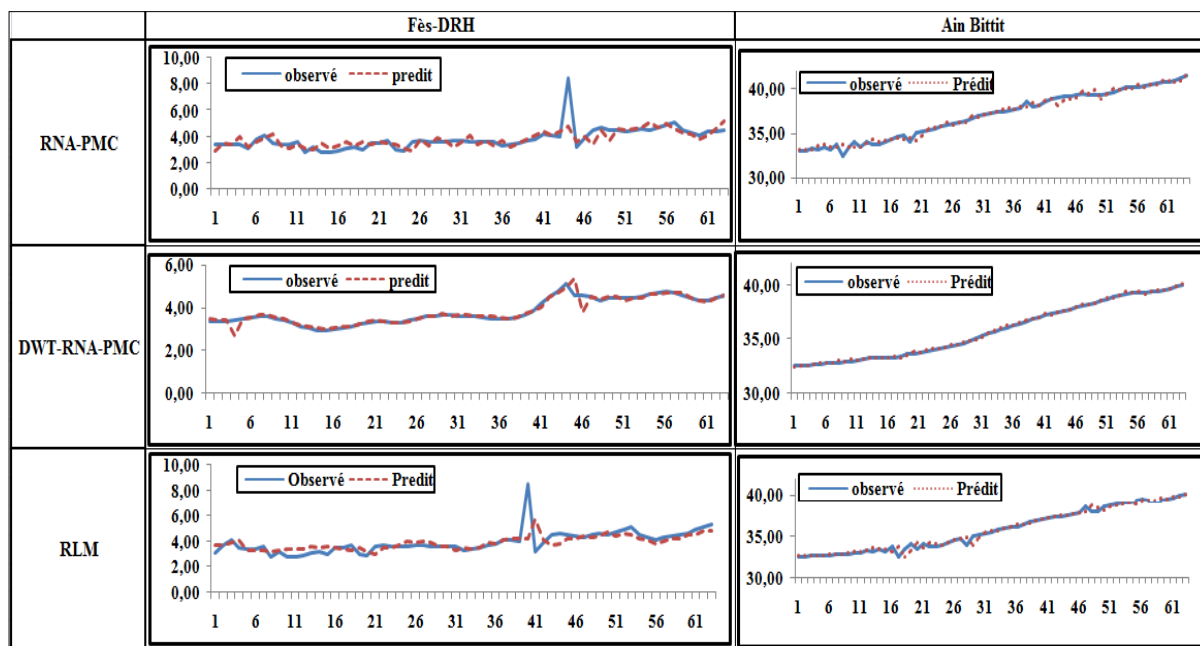
Echelle de temps	Station	Fès-DRH			Ain Bittit		
	Modèle	RNA-PMC	DWT-RNA-PMC	RLM	RNA-PMC	DWT-RNA-PMC	RLM
3 Mois	R2	0.812	0.969	0.739	0.985	0.989	0.884
	Nash	0.434	0.986	0.291	0.981	0.955	0.877
	RMSE	0.754	0.083	0.85	0.36	0.15	0.394
	MAE	0.044	0.005	0.124	0.129	0.022	0.155
Comparaison des performances entre les trois modèles	■ R2 ■ Nash ■ RMSE ■ MAE						

Les tableaux 73, 74 et 75 montrent la comparaison des coefficients de corrélation entre les valeurs observées et les valeurs estimées obtenus par les deux modèles de prévision RNA et RLM. Les coefficients de corrélation indiquent la meilleure performance et convergence du modèle de réseaux de neurones par rapport à la régression multiple. Cependant, les meilleurs modèles DWT- RNA-PMC pour les sites Fès-DRH et Ain Bittit pour 1 mois ont eu un test R2 de 0,999 et 0,998 respectivement (tableau 73), et étaient supérieurs au meilleur modèles RNA et RLM, qui eut un test R2 de 0,889 et de 0,743 pour le site Fès-DRH et 0,996 et 0,795 pour le site Ain Bittit. L'avantage du réseau neuronal est qu'à partir des variables exogènes on peut calculer plusieurs variables endogènes alors que la régression linéaire multiple ne permet de calculer qu'une seule variable endogène à la fois.

Les meilleurs modèles DWT- RNA-PMC pour 1 mois au niveau des deux sites Fès-DRH et Ain Bittit ont eu un test Nash de 0,987 et 0,987, respectivement (tableau 73), et étaient supérieurs au meilleur modèle RNA et le modèle RLM, qui a eu un test Nash de 0,574 et 0,54 pour le site Fès-DRH et 0,982 et 0,878 pour le site Ain Bittit. Alors que les meilleurs modèles DWT- RNA-PMC pour 3 mois au niveau des deux sites Fès-DRH et Ain Bittit ont eu un test Nash de 0,986 et 0,955, respectivement (tableau 75), et étaient supérieurs au meilleur modèle RNA et le modèle RLM, qui a eu un test Nash de 0,434 et 0,291 pour le site Fès-DRH et 0,981 et 0,877 pour le site Ain Bittit. Les valeurs de R^2 et Nash indiquent la supériorité du modèle DWT-RNA-PMC par rapport aux autres modèles.

Le tableau 76 illustre Comparaison des valeurs de GWL prédites et de GWL observées pour 1 mois d'avance au cours de la période d'essai au niveau des deux sites (Fès-DRH et Ain Bittit) pour les meilleurs modèles DWT-RNA-PMC, RNA-PMC et RLM respectivement. Ce tableau montre que le meilleur modèle RNA-PMC et le meilleur modèle RLM ont tendance à trop prévoir le niveau des eaux souterraines pour les deux stations. Toutefois, La modélisation par les réseaux de neurones artificiels indique une bonne corrélation entre les valeurs observées et les valeurs estimées. Il en découle aussi que le modèle de RNA possède un meilleur pouvoir prévisionnel en comparaison avec les modèles classiques tel que RLM. Tandis que le modèle DWT-RNA-PMC fournit des estimations les plus proches du niveau des eaux souterraines observé correspondant.

Tableau 80 : Comparaison des valeurs de GWL prédites et de GWL observées pour 1 mois d'avance



Les deux tableaux 77 et 78 présentent des diagrammes de dispersion (nuages de points) comparant les valeurs observées et prévues du niveau des eaux souterraines basés sur les modèles DWT-RNA-PMC, RNA-PMC et RLM pour 1 mois d'avance pendant la période de test sur les deux sites Fès-DRH et Ain Bittit.

Tableau 81 : Performances des modèles pour la prévision de GWL au niveau de Fès-DRH pour 1 mois

Stations	Modèles	Validation	Test
Fès-DRH	RNA-PMC		
	DWT-RNA-PMC		
	RLM		

Il est illustré clairement que le modèle DWT-RNA-PMC a des estimations moins dispersées et que les valeurs sont plus denses dans le voisinage de la ligne droite par rapport au modèle RNA-PMC et le modèle RLM. Dans l'ensemble, on peut conclure le meilleur modèle DWT-RNA-PMC sur les deux sites d'étude ont fourni des résultats de prévision plus précis que le meilleur modèle RNA-PMC et le meilleur modèle RLM pour la prévision du niveau des eaux souterraines avec un délai de 1 mois d'avance.

Tableau 82 : Performances des modèles pour la prévision de GWL au niveau de Ain Bittit pour 1 mois

Stations	Modèles	Validation	Test
Ain Bittit	RNA-PMC	Validation: R=0.73021	Test: R=0.76189
	DWT-RNA-PMC	Validation: R=0.99995	Test: R=0.9999
	RLM	Predicted vs. Observed Values X,Y: $y = -8,9245E-7 + 1*x$; $r = 0,7992$; $p = 0,0000$; $r^2 = 0,7984$ Dependent variable: Pz 2366/15(t+1)	

3. Conclusion

Dans cette partie, une nouvelle méthode basée sur le couplage de la transformé en ondelettes discrètes (DWT) et les réseaux de neurones artificiels (RNA-PMC) pour des applications de prévision du niveau des eaux souterraines a été proposé pour aider les gestionnaires à planifier et gérer l'approvisionnement en eau souterraine

d'une manière plus efficace et durable. Les modèles DWT-RNA-PMC ont été comparés à des modèles RNA-PMC réguliers et modèles classiques tel que RLM pour la prévision de niveau des eaux souterraines pour différentes échelles de temps 1,2 et 3mois au niveau de deux stations (Fès-DRH et Ain Bittit) dans la Plaine de Saïss.

Le choix judicieux du vecteur d'entrée et de la taille du réseau (ou nombre total de couches et de neurones dans la couche cachée du réseau) constituent des étapes difficiles dans la définition de l'architecture d'un RNA, mais le choix de la structure du réseau (type d'interconnexion entre les couches de neurones) reste plus facile à effectuer parce qu'il n'existe que deux formes principales de structure : la forme dite "Feedforward" et la forme récursive avec "feedback". On note aussi qu'il existe une limite dans le temps des prévisions (horizons). En effet, les erreurs de prévisions s'accumulent en augmentant le temps de prévision et par conséquent le modèle diverge. Cette divergence se traduit par une diminution du coefficient de corrélation obtenu entre les valeurs observées et calculées. Malgré ces difficultés, la modélisation par les réseaux de neurones artificiels a abouti à des résultats satisfaisants dans la prévision des phénomènes de sécheresse.

Les modèles hybride de DWT-RNA-PMC a été développé par la combinaison de deux méthodes, à savoir la transformée en ondelettes discrètes et les réseaux de neurones artificiels. L'utilisation de la transformée en ondelettes discrètes, les séries de données d'origine ont été décomposées en une série composante qui a effectué la plupart des informations, qui ont ensuite été utilisées dans la prévision par l'intermédiaire des réseaux de neurones artificiels. La transformée en ondelettes discrète a permis l'élimination de la plupart des données « bruyant » et l'extraction des signaux quasi-périodiques et périodiques dans la série originale de temps de données devienne facilite. Cette étude a révélé que le meilleur modèle DWT-RNA-PMC était nettement plus précis que le meilleur modèle RNA-PMC et le meilleur modèle RLM.

Les modèles DWT-RNA-PMC sont plus précises car les transformées en ondelettes fournissent des décompositions utiles de la série temporelle d'origine, et les données d'ondelette transformées améliore les performances du modèle de prévision RNA-PMC en analysant les informations utiles sur les différents niveaux de décomposition. Les résultats des prévisions précises pour les deux sites d'Ain Bittit et de Fès-DRH dans la Plaine de Saïss indiquent que la méthode DWT-RNA-PMC est une nouvelle méthode potentiellement très utile pour la prévision du niveau des eaux souterraines.

L'étude a montré que pour des périodes de prévisions successives, en augmentant le temps de prévision ($t+2$, $t+3$ à $t+4$), on assiste à une diminution du coefficient de détermination R^2 et coefficient de Nash entre les valeurs observées et celles estimées et à une augmentation des erreurs MAE et RMSE, ce qui indique une diminution de la corrélation entre les valeurs prédites et celles observées. Toutefois, le modèle devient divergeant par accumulation des erreurs de prévisions en allongeant le temps de prévision.

Ce type de modèle est représenté comme un moyen très puissant pour une gestion prévisionnelle des ressources en eau souterraines en régions semi-arides. D'un grand intérêt socio-économique, ce modèle DWT-RNA-PMC aide les décideurs à faire des bonnes prévisions essentiellement à court terme et à les appliquer à d'autres systèmes hydrologiques de climat semi-aride. Ces prévisions peuvent s'inscrire dans un projet d'aménagement permettant de prendre des précautions utiles par installation de barrages, de prévoir des transferts d'eau interbassins ou des recharges artificielles des nappes.

Chapitre 3

Localisation de zones de recharge induite à l'aide d'un système
d'information géographique (SIG)

L'extension rapide et le développement des zones irriguées dans la Plaine de Saïss reposent essentiellement sur les réserves d'eaux souterraines. De telle situation qui demande des interventions, parfois obligatoires pour protéger ces ressources et faire face au rabattement enregistré ces dernières années. L'objectif est de répondre aux grands enjeux socio-économiques comme un défi scientifique et un investissement pour l'avenir de la région. Il est donc nécessaire voire obligatoire d'avoir recours aux outils novateurs de recherche et d'aide à la décision. Il s'agit en fait de proposer les meilleurs sites convenables à l'emplacement des barrages souterrains ou lacs collinaires en vue d'améliorer la recharge artificielle et la préservation des réserves de la nappe phréatique superficielle de la Plaine de Saïss.

I. Barrages souterrains

Favoriser l'infiltration de l'eau au niveau des sites appropriés, injecter par des puits absorbants de l'eau pluviale et stocker l'eau dans des retenues ou des réservoirs tant souterrains que superficielles, sont des démarches bénéfiques qui réduisent les abattements et favorisent l'emménagement d'une ressource en eau très sollicitée (Joerin, 1998).

Les historiques piézométriques à travers le Maroc montrent le plus souvent des tendances baissières des niveaux des nappes, liées à l'effet combiné de la surexploitation et de la sécheresse (Joerin, 1998). Caractérisé par des phénomènes d'inondations enregistrées ces dernières années, le Maroc dispose de temps à autre de quantités d'eau importantes perdues suite au manque de gestion et absence des possibilités de stockage superficiel ou souterrain.

Dans un contexte climatique semi-aride, l'élaboration d'une base de données géographiques traitée par le système d'information géographique (SIG) qui vise à identifier des zones favorables en terme de perméabilité et d'infiltration. Les sites sélectionnés dans la Plaine de Saïss seront proposés pour des éventuelles constructions des barrages souterrains ou aménagement en lacs collinaires.

1. Concept et principe

Un barrage d'eau présente une solution promise pour une gestion durable des nappes souterraines, structure qui intercepte ou obstrue l'écoulement naturel des eaux souterraines et assure leur stockage (Thair, 2010), il entrave l'écoulement d'un aquifère et réduit la variation du niveau de la nappe phréatique. En fait, le principe de base de construction est de stocker les eaux souterraines dans des réservoirs souterrains.

En comparaison avec le stockage en surface, de nombreux avantages peuvent être signalés en termes de réservoirs souterrains :

- à la différence des barrages en surface les barrages souterrains n'impliquent pas de submersion de terre et n'entraînent donc pas de destructions et de problèmes sociaux ;
- dans les régions arides à semi-arides, les barrages souterrains assurent une forte réduction et limitation des pertes d'eau par évaporation ;
- les retenues d'eau souterraine sont également moins touchées par contamination biologique que l'eau de surface et donc d'une qualité largement meilleure ;
- par la création d'une retenue souterraine artificielle on pourrait aboutir à (Youbi, 2008) :
 - l'accroissement des ressources en eau souterraines.
 - la régulation inter saisonnière, interannuelle des ressources.
 - le relèvement et la stabilisation du niveau de la nappe phréatique.

2. Conditions de l'emplacement

L'emplacement de barrage souterrain exige trois conditions hydrogéologiques principales pour garantir un meilleur fonctionnement :

- présence de nappes phréatiques à écoulement significatif ;

- les meilleurs sites où les substrats sont constitués de formations poreuses, à forte perméabilité, aptes à constituer un réservoir ;
- présence de terrains peu perméables qui ferment le réservoir.

II. Matériel et méthode

Le premier de l'objectif de cette étude consiste à développer un système d'informations géographiques (SIG) lié à une base de données propre à la nappe phréatique superficielle de la Plaine de Saïss. En se référant aux données géologiques, hydrologiques, et hydrogéologiques numérisées et géoréférencées et des informations sur le régime d'exploitation des ressources en eau dans la Plaine de Saïss. Le deuxième point consiste à déterminer les zones les plus convenables à l'installation des réservoirs souterrains ou leur aménagement en lacs collinaires. L'outil SIG est le mieux approprié grâce à la richesse des opérations d'analyse spatiale qu'il peut permettre. Les étapes de travail peuvent être résumées comme suit :

- collecte des données concernant la Plaine de Saïss ;
- l'assemblage des cartes puis le découpage de chaque couche ;
- géoréférencement des cartes ;
- formation des données relatives des points d'eau disponibles ;
- la digitalisation des données géométriques ;
- la construction de la topologie ;
- la réalisation des liens entre les données géométriques et les tables attributaires.

Il s'agit en fait de rassembler les éléments d'informations en les classant comme indiqué sur le tableau suivant :

Tableau 83 : Éléments cartographiques de la base de données élaborée

Couches	Topologie	Contenus	Identificateurs	Données exploitées	Acquisition
Hydrographie	Lignes	Réseau hydrographique	Noms-oueds	Carte hydrographique de bassin Fès-Meknès (Chamayou et al, 1975)	Digitalisation
Topographie	Lignes	Courbes topographiques	Valeurs_ courbes	Carte topographique Fès-ouest au 1/50000	Digitalisation
Géologie de surface	Polygones	Lithologie-âge	Lithologie-âge	-Carte hydrogéologique de bassin Fès-Meknès -Carte géologique de bassin de Saïss	Digitalisation
Réseau routier	Lignes	Réseau routier	Destination	Carte topographique Fès-ouest au 1/50000	Digitalisation
Localité	Polygones	Villes-villages	Noms	Carte hydrographique bassin de Fès-Meknès	Digitalisation
Limite de la nappe phréatique	Lignes	Limite-Plaine de Saïss		(ABHS, 2006)	Digitalisation
Puits et forage	Points	Sites de pompages	N°IRE (Numéro d'Inventaire des Ressources en Eau)	(ABHS, 2006)	Numérisation

La démarche de l'étude est présentée dans la figure 195.

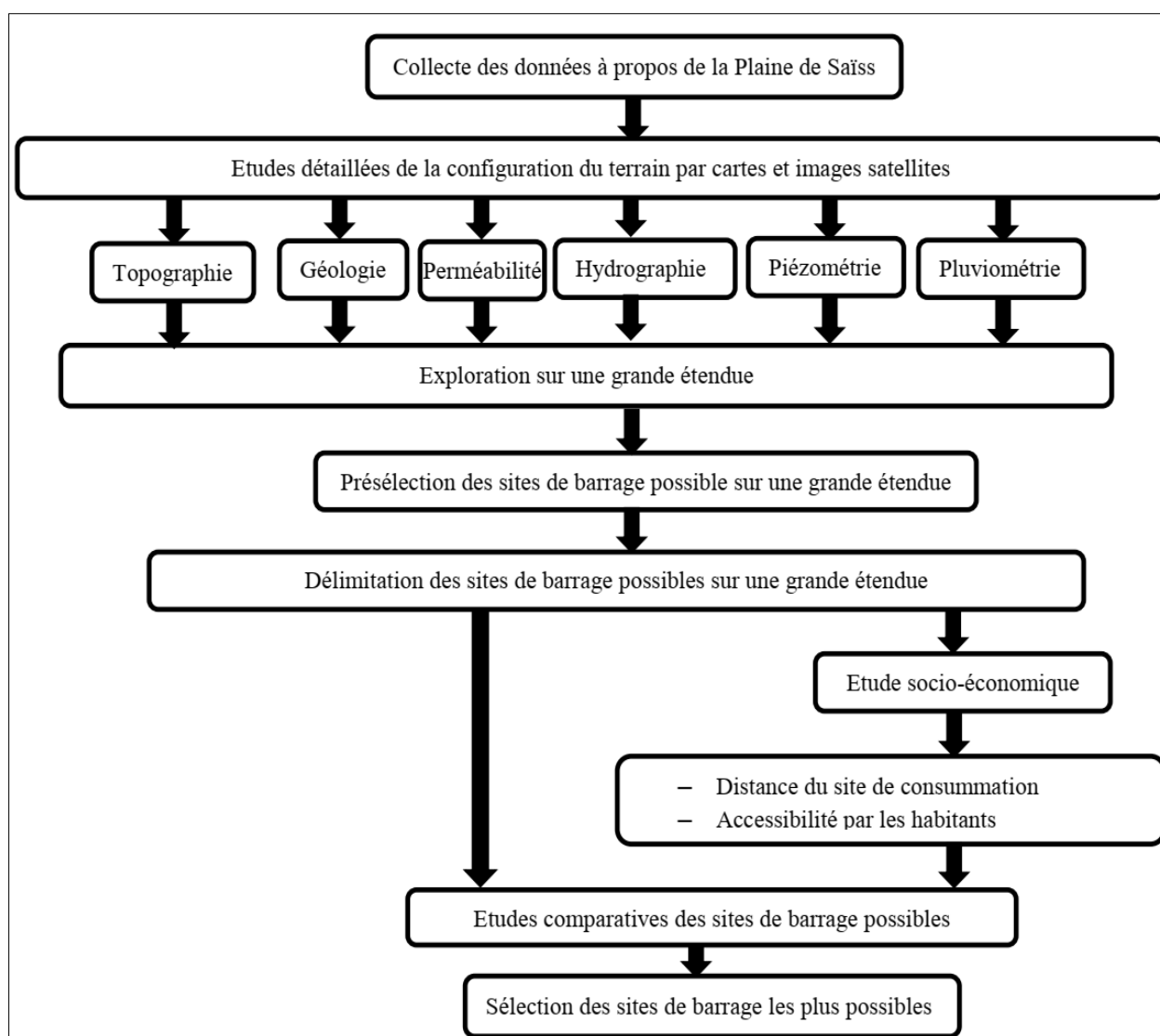


Figure 197 : Organigramme des études pour la localisation des sites du barrage souterrain

1. Traitement des données et résultats

La Plaine de Saïss fait partie du bassin de Fès-Meknès qui est, à son tour, un sous bassin du bassin versant de Sebou. Celui-ci est régi par plusieurs facteurs (climatiques, géologiques et géomorphologiques) influençant l'hydrologie et l'hydrogéologie de la Plaine de Saïss. Le régime pluviométrique de celle-ci montre une variabilité temporelle et spatiale (Figure 196).

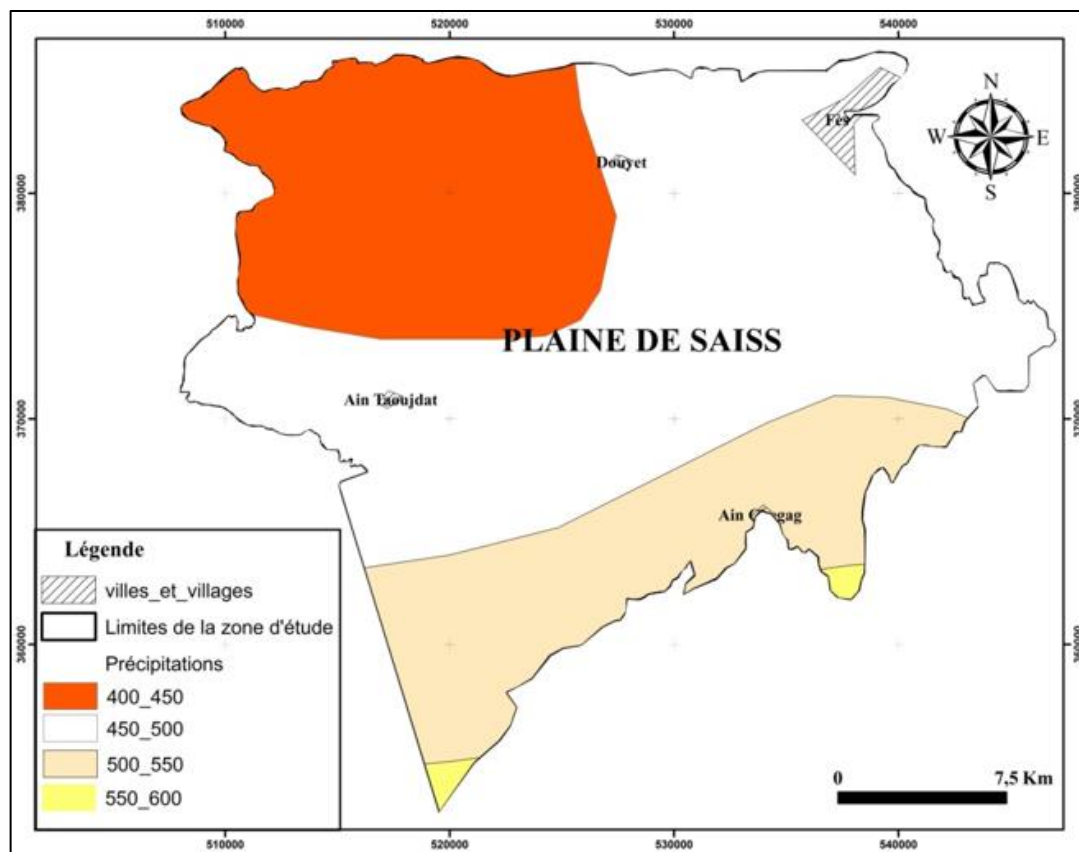


Figure 198 : Carte des isohyètes de la Plaine de Saïss (période 1978-2014)

Sachant qu'une augmentation du taux de précipitations s'effectue du Nord-Ouest vers le Sud-Est. La moyenne des précipitations interannuelles obtenues pour la station Fès-DRH est l'ordre de 490 mm/an.

1.1. Géologie de surface

Les formations géologiques affleurant aux surfaces de la Plaine de Saïss sont essentiellement plio-quaternaires représentées par des dépôts variés (grès, calcaires, travertins, coulées basaltiques, limons, croûtes calcaires, cônes de déjection et éboulis) (Figure 2). Les lits des oueds sont comblés par les alluvions et dépôts de déjections. Les plus fortes épaisseurs du Plio-quaternaire (70 à 100m) se rencontrent dans la partie orientale et les plus faibles épaisseurs (< à 20m) se localisent dans les parties Ouest et Sud-Est de la Plaine de Saïss.

1.2. Géomorphologie

Dans le détail, la Plaine de Saïss a une géomorphologie non uniforme avec des types des reliefs à savoir les zones basses et les zones hautes (**Smida & al, 2006**). La détermination des dépressions suggérées pour constituer un réservoir de stockage des eaux superficielles s'avère indispensable. D'où la nécessité d'élaborer un modèle numérique de terrain (MNT) procédant à la couverture topographique. En vue d'avoir une vue tridimensionnelle générale de la Plaine, l'MNT est converti par la suite en mode 3D (Figure 199).

1.3. Hydrographie

Le bassin où est localisée la Plaine de Saïss, est drainé par l'Oued Fès et les affluents sur la rive droite de l'Oued Mikkès tel que l'Oued N'ja (Figure 10). Le sens d'écoulement des Oueds est généralement du SSE vers NNW excepté, l'Oued N'ja qui a une direction générale N-S et l'Oued Fès qui coule de l'Ouest vers l'Est. Ces

deux derniers prennent naissance au niveau de la Plaine de Saïss et sont presque exclusivement alimentés par la pluie (ABHS, 2006). Parmi les principaux oueds qui drainent la zone, l'Oued Fès qui prend naissance de Ras El Ma, draine la nappe jusqu'à la sortie de la **Plaine** de Saïss et l'Oued N'ja qui traverse le milieu de la Plaine de Saïss (Chamayou et al, 1975).

1.4. Hydrogéologie

Il existe deux principales formations aquifères dans la région : les calcaires liasiques et les calcaires lacustres quaternaires (ABHS, 2006). Dans la Plaine de Saïss, Les calcaires quaternaires forment une aquifère dont le niveau piézométrique dépend fortement de la pluviométrie, la recharge et la topographie. Les deux nappes phréatiques de la région assurent en majeure partie l'alimentation en eau de la ville de Fès et l'irrigation des campagnes avoisinantes. Le Lias forme un aquifère profond captif, artésien, qui jaillit dans certains secteurs avec des charges de plus de 150 m au-dessus du sol. Cette nappe peut communiquer directement avec la nappe superficielle par des flexures, ou indirectement par drainance. Sachant que la nappe phréatique superficielle dans les calcaires lacustres constitue le réservoir le plus accessible.

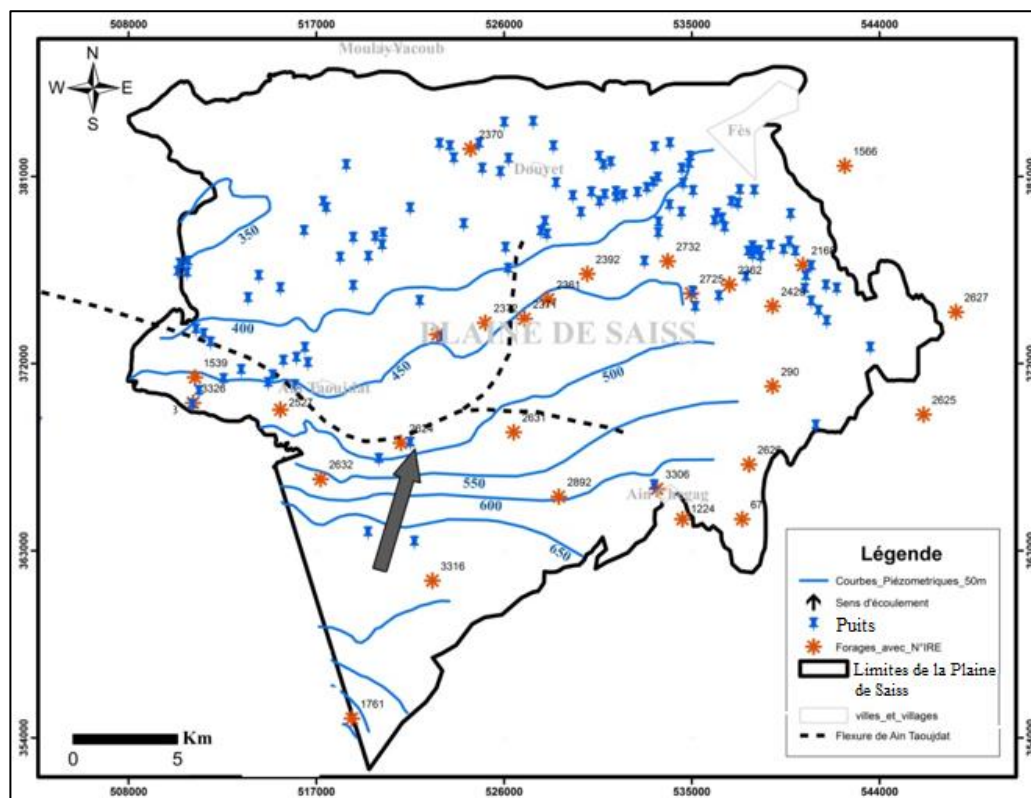


Figure 199: Piézométrie de la nappe phréatique et distribution des points d'eau dans la Plaine de Saïss

En vue de suivre l'évolution et la diffusion des points d'eau (puits et forages) à travers la Plaine de Saïss, la projection des différents points d'eau est reportée sur la carte de la figure 197. La carte confirme une forte concentration des puits est observée dans la partie Nord et Nord-Est de la Plaine de Saïss, ce qui a facilité la réalisation de la carte piézométrique.

III. Résultats et interprétation

1. Élaboration de support unique

Le but est d'obtenir de nouvelles informations qui se traduisent par la représentation des divers résultats par fusion sur un seul support afin de pouvoir effectuer une analyse globale (Figure 198). A partir de ces données hydrogéologiques (nappes superficielles menacées), hydrologiques (densité du réseau hydrographique), géologiques (formations géologiques et leur perméabilité) et morphologiques (zones de reliefs qui peuvent servir de cuvettes de rétention des eaux de surface), le travail consiste en fait à localiser des zones de forte perméabilité et qui peuvent être qualifiées comme des meilleures zones de stockages des cours d'eau de surface.

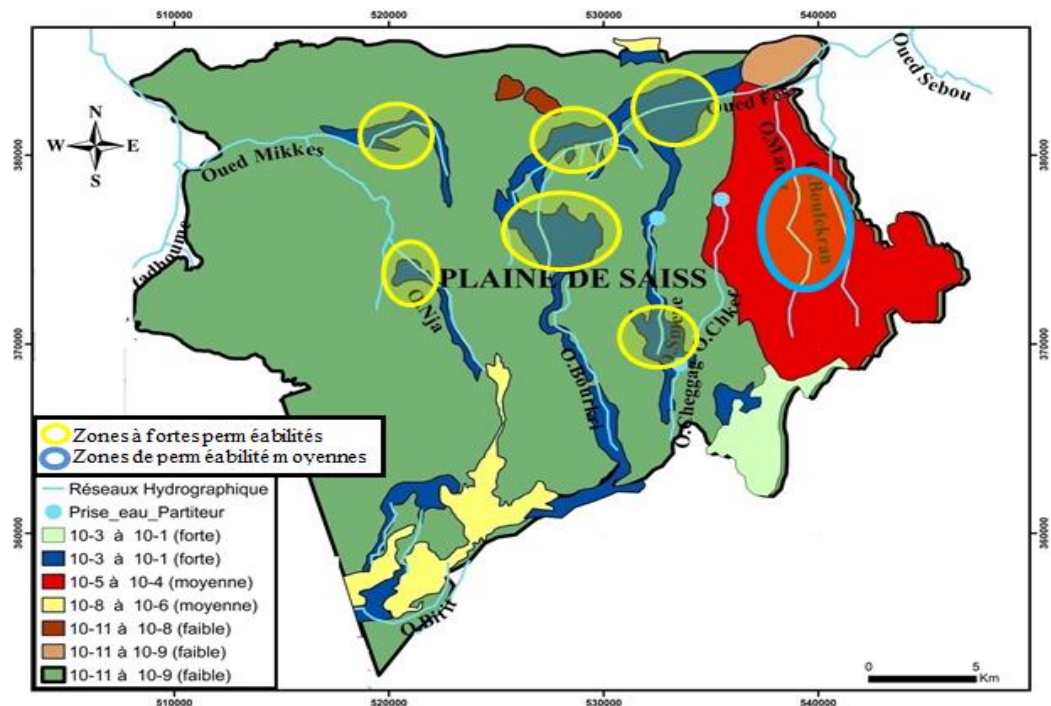
2. Réalisation de carte de Perméabilité

La carte de Perméabilité constitue le point axial pour le bon choix du site de l'emplacement d'un réservoir d'eau souterrain (Figure 198), cette tâche demande l'utilisation de la carte géologique en apportant à chaque faciès lithologique, figurant sur la carte, son coefficient de perméabilité (Tableau 80).

Tableau 84 : perméabilité et coefficient d'infiltration de certaines roches (Banton & Bangoy, 1987)

Roche	Perméabilité log (m/s)	Coefficient d'infiltration	Infiltration
Graviers	-3 à 0	6	Forte
Alluvion des oueds	-3 à 0		
Grès	-5 à -4	4	Moyenne
Conglomérats	-5 à -4		
Sables	-7 à -4		
Sable limoneux	-8 à -4		
Limons	-9 à -5		
Limon argileux	-11 à -8		
Sable argileux	-8 à -5		
Basaltes	-8 à -6		
Marnes	-10 à -8		
Argiles sableuses	-10 à -6		
Calcaires	-11 à -9	2	Faible
Encroûtements	-11 à -9		
Dolomies	-11 à -9		
Gypses	-12 à -10	1	Très faible
Argiles	-12 à -9		

La carte de perméabilité est transformée en suite en trois dimensions (3D) en vue de déterminer à la fois la forme des reliefs et la perméabilité des terrains affleurants.



D'après la figure 199, les sites formés de sables et les lits des oueds sont les plus favorisés à proposer vue leur forte perméabilité et donc une grande infiltration des eaux de surface et bonne alimentation des réservoirs souterrains. En second choix, viennent les sites formés de grès, limons et sables, avec une moyenne infiltration et en troisième choix viennent les sites formés de calcaire avec une faible infiltration. Les sites d'argiles restent inaptes au choix avec une très faible perméabilité voire imperméables

IV. Discussion

La grande capacité de GIS (Geographical Information System) pour l'analyse des données spatiales facilite notamment, en intégrant des couches d'information et la sélection du meilleur site pour la construction de barrages souterrains. Dans la présente étude, les sites appropriés ont été spécifiés après avoir examiné les recherches effectuées précédemment et modifié les informations de base employant des techniques SIG. Comme il existe des facteurs de géologie, topographie, météorologie et socio-économie contribuant à la localisation de ces projets, leur importance est variable. L'évaluation de ces facteurs en utilisant des méthodes traditionnelles est impraticable et prend beaucoup de temps, ce qui n'est pas économiquement abordable. Le système d'information géographique et les méthodes de prise de décision ont donc été synchronisés afin de déterminer le rôle de chaque facteur en fonction de leur influence sur la sélection du site de construction du barrage, qui pose le problème de décision de diverses dimensions. Dans la plupart des études similaires, la performance de ce logiciel a été approuvée. En localisant les sites appropriés pour la construction de barrages souterrains, les principaux critères de l'arbre de décision dans cette étude comprennent (Géologie, porosité effective et perméabilité du substrat rocheux, hydrographie, pluviométrie et topographie) ont été pris en compte.

V. Conclusion

La présente étude a révélé l'existence de deux zones moyenne perméabilité et quatre autres à forte perméabilités douées d'une hydrographie importante et une moyenne des précipitations interannuelles propice. Ces dernières zones présentent le bon choix et propositions pour un emplacement des réservoirs souterrains ou bien leur aménagement sous forme de cuvettes de stockage superficielles suite à leurs morphologie favorable. La tâche effectuée Estime en fait à fournir une base de connaissance pour l'information, de l'aide à la décision et la planification et s'adresse tant aux professionnels de l'aménagement du territoire qu'aux acteurs économiques et aux gestionnaires de l'environnement. En effet pour une bonne affinité du travail et à base des résultats de la photo identification et la configuration du terrain, une étude géophysique (sondage électrique) et nécessaire sur les sites retenus. A partir de ses résultats, des profils de résistivité vont être établis pour déterminer la structure détaillée du terrain.

**CONCLUSION GENERALE
ET
PERSPECTIVE**

Au terme de ce travail, mené sur la Plaine de Saïss (Nord du Maroc), il a été essayé de dégager les grands traits sur les extrêmes pluviométriques, notamment la sécheresse météorologique, du point de vue effets négatifs sur la piézométrie de la nappe phréatique superficielle. Objectif a fait appel à des bases de données climatologiques en utilisant de nombreux outils statistiques et des techniques de l'intelligence artificielle. L'étude s'est basée sur l'analyse des séries de mesure des trois stations pluviométriques (Fès-DRH, Ain Bittit et Fès-Saïss) couvrant d'une manière plus au moins uniforme la plus grande superficie de la Plaine de Saïss. Toutefois, Les résultats obtenus par une analyse succincte des paramètres climatiques tels que les précipitations moyennes mensuelles et moyennes annuelles, les températures moyennes mensuelles et moyennes annuelles, l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'évapotranspiration réelle (ETR) et le bilan hydrique ont permis de mettre en évidence les irrégularités des pluies avec leurs variations spatiales et temporelles comme suite :

- l'étude pluviométrique a montré de fortes fluctuations à dominante sèche dont les plus remarquables par intensité, durée et fréquence marquant les années de 1978 jusqu'au 1995. Généralement les moyennes des pluies dans les trois stations sont du même ordre de grandeur. L'excédent au niveau de la station Ain Bittit est légèrement supérieur par rapport aux stations Fès-DRH et Fès-Saïss. Le mois de novembre est le plus humide alors que le mois de juillet est le plus sec ;

- les températures moyennes annuelles varient en fonction de l'altitude. L'amplitude de variation entre les températures maximales et minimales moyennes varie de 9.5 °C et 18 °C. Le mois de janvier est le plus froid alors que le mois d'août est le plus chaud, des tendances générales à la hausse des températures extrêmes et à la baisse des événements froids au cours des saisons chaudes et froides sont observées

- l'évapotranspiration potentielle l'ETP est importante du mois de juillet jusqu'au mois d'août, avec des valeurs atteignant 129.2 mm au mois d'août, ce qui produit un déficit agricole, rendant ainsi nécessaire l'irrigation pour les zones cultivées ;

- l'évapotranspiration réelle (ETR) est estimée à 443.44 mm, mobilisant 51.1 % des précipitations. Par conséquent, un excédent de 48.9% va participer à l'alimentation des nappes d'eau souterraines ainsi que l'écoulement superficiel.

D'une manière générale, la réponse pluviométrique (notamment l'indice SPI) à l'Oscillation Nord-Atlantique montre que la période de forte sécheresse correspond à des indices ONA positifs de forte intensité. Toutefois, une majeure partie de ces irrégularités pluviométriques est expliquée par le phénomène d'Oscillation Nord Atlantique dont l'indice (l'ONA) montre des corrélations négatives avec les périodes humides et qui tendent surtout à prendre des valeurs positives avec les périodes sèches. Les épisodes secs ont atteint leur paroxysme en 1995 avec une sécheresse de type sévère pour les trois stations étudiées. Les variations annuelles de l'indice SPI des précipitations au cours de la période d'étude ont montré que les épisodes de 1982, 1984, 1989, 1992, 1994, 1995, 1999, 2000, 2007 et 2010 présentent les années sèches de la période 1979-2014. La plupart de ces années sèches coïncident avec des valeurs positives de ONA. Durant la phase positive de ONA, les précipitations se trouvent alors réduites sur le Maroc comme sur le Sud de l'Europe. Avec un calcul simple, 50% à 70% de ces épisodes secs coïncident avec la phase positive du mode ONA. Cependant, l'aléa climatique qui a affecté la Plaine de Saïss jusqu'à présent s'est manifestée par des sécheresses modérées à fortes et non par des sécheresses extrêmes. Toutefois la station Ain Bittit semble la plus affectée.

En effet, l'utilisation des différents indices tels que SPI, RDI, CMI et WSVI, pour le suivi spatio-temporel de la sécheresse météorologique a montré que la Plaine de Saïss a été affectée par des périodes sèches pendant la période 1978-79 à 2013-14. Les sécheresses les plus remarquables par leur intensité, leur durée et leur fréquence ont été observées durant la période 1978-1995. Ces épisodes secs ont atteint leur paroxysme en 1995 avec une sécheresse de type sévère, en trois stations étudiées. Néanmoins, l'aléa climatique, qui a affecté la Plaine de Saïss, s'est jusqu'à présent manifesté par un enregistrement des sécheresses modérées à fortes et non par des sécheresses extrêmes. Les sécheresses modérées sont largement dominantes avec 56,9 % des cas. Toutefois, l'apport comparatif de ces indices sur des échelles de temps de 3, 6, 9 et 12 mois présentent un comportement globalement similaire et montrent des meilleures corrélations où $r > 0.9$ et des bons résultats notamment à l'échelle de 12-mois. De plus, le WSVI correspond mieux à des échelles de temps plus grandes telles que 9 ou 12 mois, ce qui

suggère qu'il peut être utilisé comme un indicateur de conditions météorologiques à long terme. Les bonnes corrélations entre le WSVI et le SPI indiquent que la précipitation est le facteur dominant dans le calcul de WSVI. Les résultats obtenus par ces indices ont confirmé les tendances observées des cumuls pluviométriques.

Le travail a porté également sur l'apport de la télédétection dans l'évaluation et le suivi de la sécheresse dans la Plaine de Saïss entre 1987 et 2017 grâce à l'application des indices et méthodes notamment la technique « change detection », les indices de l'eau (NDWI), du sol (NDSI) et de la végétation (NDVI). Les résultats montrent une régression globale des surfaces de l'eau dans la Plaine de Saïss d'environ 10% dans les dernières 30 années et une diminution des surfaces du sol dans la Plaine de l'ordre de 89.4 % en 1987 et environ 39.14% après 30 ans. Cependant, les cartes multi-temporelles de NDVI montrent une évolution globale importante de la superficie recouverte par la végétation, environ 14% de la surface de la plaine entre 1987 et 2017. Ces variations spatio-temporelles de l'occupation du sol remarquées, semblent normales et corrélées aux variations des taux pluviaux annuels. Les années à forte pluviométrie montrent une forte augmentation des superficies végétales, mais dans le cas des années sèches, une faible régression se marque. Cela s'explique par l'irrigation moderne avec des méthodes efficaces à différents stades et étapes de cultures (irrigation, fertilisant, récolte, ...etc.). Cette augmentation des surfaces végétales et la diminution des ressources en eau posent un problème et augmentent la pression sur les ressources hydriques de la Plaine de Saïss. Cependant, la présente étude a montré également les possibilités d'analyser la dynamique du couvert végétal et de mettre l'accent sur les principaux facteurs qui en sont responsables, ce qui nécessite une meilleure prise en charge de ces problèmes face à la sécheresse.

Il a été ajusté un modèle mathématique général qui décrit clairement la relation entre l'effet de la sécheresse et la recharge des eaux de la nappe phréatique superficielle en zone semi-aride notamment la Plaine de Saïss. Les résultats démontrent globalement que le niveau des eaux souterraines est faible lorsque l'indice SPI est inférieur à (+0.99) et est élevé lorsque SPI est supérieur à (+1). Le travail démontre que la recharge est faible lorsque l'indice SPI est inférieur à (+0.99) et sont élevés lorsque SPI est supérieur à (+1). Ces résultats sont en conformité avec les caractéristiques des zones semi-arides. Ceux-ci peuvent être un outil pertinent aux administrateurs et responsables pour mieux comprendre et gérer durablement les ressources en eau souterraine face aux différents scénarios de la sécheresse.

Étant donné les effets négatifs de la sécheresse météorologique, des modèles de prédiction et simulation de ce phénomène ont été élaborés à différentes échelles de temps en utilisant des techniques d'intelligence artificielle. Cependant, dans un premier volet, le système d'inférence neuro-floue adaptatif (ANFIS) a été proposé comme outil alternatif de prévision de la sécheresse météorologique aux autres méthodes. En général, les résultats indiquent que les modèles WA-ANFIS ont eu les meilleures prévisions par rapport aux autres modèles. De plus, les prévisions du modèle WA-ANFIS semblent être plus efficaces pour prévoir les valeurs extrêmes de SPI, qu'elles soient sévères ou fortes. Par ailleurs, les résultats prévus pour SPI-12 sont meilleurs que ceux prévus pour SPI-3 dans presque tous les cas. Ceci est probablement dû aux faibles niveaux d'autocorrélation des ensembles de données de SPI-3 par rapport à SPI-12.

Dans un deuxième volet destiné à prédire le niveau des eaux souterraines pour différentes échelles de temps 1, 2 et 3 mois au niveau de la Plaine de Saïss, les résultats ont montré que les modèles DWT-RNA-PMC donnent les meilleurs résultats par rapport aux autres modèles. En fait, généralement les modèles hybrides basés sur le couplage de la transformée en ondelettes discrètes (WA-modèle) sont les plus précis. Ces résultats sont probablement dû au fait que la décomposition en ondelettes peut capter facilement les caractéristiques non stationnaires des données. Il peut être expliqué par le fait que les transformées en ondelettes fournissent des décompositions utiles de la série temporelle d'origine et les données d'ondelettes transformées améliorent les performances du modèle de prévision en analysant les informations utiles sur les différents niveaux de décomposition. Ce qui indique que la méthode DWT est une nouvelle méthode potentiellement très efficace pour la prévision de la sécheresse météorologique. Toutefois, l'étude a montré que pour des périodes de prévisions successives, tout en augmentant le temps de prévision de (t+2), (t+3) à (t+4), apparaissent une diminution du coefficient de détermination R^2 et coefficient de Nash et une augmentation des erreurs MAE et RMSE.

L'étude a révélé aussi l'existence de deux zones de moyenne perméabilité et quatre autres à forte perméabilité douées d'une hydrographie importante et une moyenne des précipitations interannuelles propice. Ces dernières zones présentent les bons choix et propositions pour un emplacement des réservoirs souterrains ou bien leur aménagement sous forme de cuvettes de stockage superficiel suite à leur morphologie favorable. La tâche effectuée montre la grande capacité de GIS (Geographical Information System) pour l'analyse des données spatiales en intégrant différentes couches d'information

D'un grand intérêt socio-économique, ces modèles aident les décideurs à faire des bonnes prévisions et à les appliquer à d'autres systèmes hydrologiques dans le cadre d'un projet d'aménagement permettant la recharge artificielle des nappes phréatiques.

Au terme de ce travail, quelques recommandations peuvent être proposées en vue d'élucider certains problèmes qui ont été observés, à préciser les incertitudes résultant de l'étude actuelle et à proposer des interventions en conséquence : installer un réseau de piézomètres dotées de paramètres et matériels hydroclimatique sophistiqués à travers la nappe pour bien contrôler les fluctuations du niveau piézométrique de la nappe phréatique superficielle et pour éviter les lacunes et les ruptures durant les observations et prendre les mesures appropriées. Cependant, des études géologiques, géophysiques et hydrogéologiques approfondies sont recommandées pour améliorer la recharge artificielle.

En terme de perspectives, l'étude de la sécheresse par les indices RDI, SPI et WSVI en incluant d'autres stations de mesure et les méthodes d'intelligence artificielle doivent être appliquées à d'autres régions semblables pour tester la performance de ces indices.

Finalement, le suivi de la sécheresse a pour but l'alerte précoce, l'élaboration d'une stratégie nationale d'adaptation à la sécheresse devenue une priorité, compte tenu du caractère structurel de cet aléa climatique. Néanmoins, la participation effective de tous les acteurs potentiels, notamment les usagers et les décideurs est devenue indispensable pour une gestion intégrée optimale des ressources face aux dangers du phénomène de sécheresse

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- [1].**ABHS., (2006).** Débat Nationale sur l'eau. Rapport. 48p.
- [2].**Adamowski, J & Chan, H.F., (2011).** A wavelet neural network conjunction model for groundwater level forecasting. *Journal of Hydrology* 407: 28-40.
- [3].**Adamowski, J & Sun, K., (2010).** Development of a coupled wavelet transform and neural network method for flow forecasting of non-perennial rivers in semi-arid watersheds. *Journal of Hydrology* 390: 85-91.
- [4].**Adams, R.M., Rosenzweig, R.M. Peart, J.T. Ritchie, B.A & McCarl, J.D., (1990).** "Global Climate Change and U.S Agriculture", *Nature*, 345, pp 219-223.
- [5].**Adour Garonne, (2002).** Agence de l'eau Adour Garonne, France.
- [6].**Ahmamou, M., (1987).** Etude sédimentologique des calcaires lacustres saïssiens (Plio-Quaternaire) du bassin de Fès Meknès (MAROC). Thèse 3^{ème} cycle, Aix Marseille III, 178p.
- [7].**Ahmamou, M & Chalouan, A., (1988).** Distension synsédimentaire Plio-Quaternaire et rotations antihoraires des contraintes au Quaternaires anciens sur la bordure Nord du Bassin de saïss (maroc). *Bull. Inst. Scient., Rabat*, n° 12, 19-26.
- [8].**Ahmamou, M., (2002).** Evolution et dynamique sédimentaire des carbonates fluvio-lacustres plio-quaternaires dans le Saïss de Fès (Maroc). Thèse d'Etat, Université Mohammed V, Rabat, 253p.
- [9].**Aït Brahim, L & Chotin, p., (1984).** Mise en évidence d'un changement de direction de compression dans l'avant pays rifain au cours du tertiaire et de quaternaire. *Bull. Sec. Géol. France*, (7), t. 26, N°4 pp. 681-691.
- [10].**Aït Brahim, L., (1983).** Étude de la déformation du néogène à l'actuel sur la bordure sud-rifaine dans le contexte du rapprochement de plaques Afrique – Europe. Thèse 3^{ème} cycle, Rabat, 178p.
- [11].**Aït Brahim, L., (1991).** Tectonique cassante et état de contrainte récente au nord du Maroc. Contribution à l'étude du risque sismo-tectonique, Thèse de doct. Es Sci. Rabat, 223p.
- [12].**Akhtari, R., Morid, S., Mahdian, M. H., & Smakhtin, V. (2009).** Assessment of areal interpolation methods for spatial analysis of SPI and EDI drought indices. *Int. J. Climatol*; 29, 135–145
- [13].**Allen, R., Pereira, L.S., Raes, D & Smith, M., (1998).** Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper No 56*, Rome
- [14].**Amigues, J. P., Debaeke, P., Itier, B., Lemaire, G., Seguin, B., Tardieu, F., & Thomas, A. (2006).** Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France), 72 p.
- [15].**Amraoui, F., (2005).** Contribution à la connaissance des aquifères karstiques du liais de la plaine du Saïss et du Causse moyen Atlasique Tabulaire (Maroc). 249p.
- [16].**Anctil, F & Lauzon, N. (2004).** "Generalization for neural networks through data sampling and training procedures", with applications to streamflow predictions, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 8, pp. 940-958.
- [17].**Aranyossy, J. F., Njitchoua, R., & Zuppi, G. M. (1998).** L'apport des isotopes de l'environnement à l'étude de la recharge et de la dynamique des aquifères Publi. *Symposium international*, Paris, 1er et 2 juin 1995, pp 39-54.
- [18].**Zarch, M. A. A., Malekinezhad, H., Mobin, M. H., Dastorani, M. T., & Kousari, M. R. (2011).** Drought Monitoring by Reconnaissance Drought Index (RDI) in Iran. *Water Resour Manag.* 25(13). 3485-3504.
- [19].**ASCE., (2000b).** Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology Artificial neural networks in hydrology, II: hydrologie applications. / *Hydrol. Engng ASCE* 5 (2), 124-137.
- [20].**Babuska R., & Verbruggen H. B. (1995).** A New Identification Method for Linguistic Fuzzy Models, *Proc of FU IEEE'95*, Yokohama, Japan, pp 905-912.
- [21].**Bacanli, U. G., Firat, M., & Dikbas, F. (2009).** Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for drought forecasting. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 23(8): 1143-1154.
- [22].**Bagnouls, F & Gaussen, H. (1953).** Saison sèche et indice xérothermique. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Toulouse* 88 : 193-239.
- [23].**Bagnouls, F & Gaussen, H. (1957).** Les climats biologiques et leur classification. *Annales de Géographie* 66(355): 193-220.
- [24].**Bajjali, W. (2008).** Evaluation of groundwater in a three-aquifer system in Ramtha area, Jordan: recharge mechanisms, hydraulic relationship and geochemical evolution. *Hydrogeology Journal* 16, pp 1193–1205.
- [25].**Banton O, Bangoy ML. (1987).** Hydrogéologie, multi science environnementale des eaux souterraines. Paris : Association des universités partiellement ou entièrement de langue française (Aupelf).

- [26].**Barnston, A.G & Livezey, R.E. (1987).** Classification, la saisonnalité et la persistance de la circulation atmosphérique de basse fréquence lun. *Wea. Rev.* 115, 1083-1126.
- [27].**Barron, O. V., Crosbie, R. S., Charles, S. P., Dawes, W. R., Ali, R., Evans, W. R & Mpelasoka, F. (2011).** Climate change impact on groundwater resources in Australia. *Natl. Water Comm.* 222
- [28].**Bellon J. L., (1997).** "La pollution agricole en Bretagne : sites à risque", *Mappemonde*, 45: 1-5.
- [29].**Bellouin, N., Rae, J., Jones, A., Johnson, C., Haywood, J., & Boucher, O. (2011).** Aerosol forcing in the Climate Model Intercomparison Project (CMIP5) simulations by HadGEM2-ES and the role of ammonium nitrate. *J. Geophys. Res.* 116, D20206.
- [30].**Benaabidate L & Cholli M., (2011).** Groundwater Stress and Vulnerability to Pollution of Saïss Basin Superficial Aquifer, Morocco. Fifteenth International Water Technology Conference, IWTC-15, Alexandria, Egypt, 2011.
- [31].**Benaabidate, L. (2000).** Caractérisation hydrologique du bassin versant de Sebou : hydrogéologie, qualité des eaux et géochimie des eaux thermales. Thèse Doc. Es-sc., Facult des Sciences et Techniques, Fs, 1973.
- [32].**Berner, R., (1999).** A new look at the long-term carbon cycle. *GSA Today* 9, 1–6
- [33].**Blaney, H.F & Criddle, W.D., (1950).** Determining water requirements in irrigated areas from climatologically and irrigation data. *USDA (SCS)*, vol. 96, 48p.
- [34].**Bonn, F & Rochon, G. (1992) .** Précis de Télédétection – Vol 1 : Principes et méthodes, 3.2 Signatures spectrales, Presses Univ. Quebec/AUPELF, Sillery (PQ, CAN), 485 pp.
- [35].**Bonneaud, S. (1994).** Methodes de detection des ruptures dans les series chronologiques Projet de fin d'études, Institut des sciences de l'ingénieur de Montpellier, France.
- [36].**Bouchon-Meunier B. (1995).** La logique floue et ses applications, Addison-Wesley, SA, France,
- [37].**Boumir, K. (1990).** Paléoenvironnements de dépôt et transformations post-sédimentaires des sables fauves du bassin du saïs (Maroc) (Doctoral dissertation, Nancy 1).
- [38].**Bredenkamp, D. B., Botha, L. J., Van Tonder, G. J., & Van Rensburg, H. J. (1995).** Manual on quantitative estimation of groundwater recharge and aquifer storativity. WRC Report TT 73/95, WRC, Pretoria, South Africa, 407 pp
- [39].**Bromley, J., Taylor, C & Gash, J., (2002).** Comment on "Long-term rise in a Sahelian watertable: the Continental Terminal in South-West Niger" by Leduc, C., Favreau, G., Schroeter, P., 2001. *J. Hydrol.*, 243, 43-54. *J. Hydrol.*, 255(1-4), 260-262.
- [40].**Brouwer, C & Heibloem M., (1986).** Irrigation Water Management: Irrigation Water Needs, Training manual No. 3, FAO, Rome.
- [41].**Brown, D. G. & Duh, J.D., (2004).** Spatial simulation for translating from land use to land cover. *International Journal of Geographical Information Science*, vol.18, n°1, pp.35-60.
- [42].**Buishand T.A., (1982).** Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *J. Hydrol.* 58, 11-27.
- [43].**Buishand T.A., (1984).** Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *J. Hydrol.* 58, 51-69.
- [44].**Byun, H.R & Wilhite, D. (1999).** Objective quantification of drought severity and duration, *J. Climate*, 12, 2747–2756,
- [45].**Cacciamani, C., Morgillo, A., Marchesi, S., & Pavan, V. (2007).** Monitoring and Forecasting Drought on a Regional Scale: Emilia-Romagna Region. *Water Science and Technology Library* 62(1): 29-48
- [46].**Cancelliere, A., Di Mauro, G., Bonaccorso, B., & Rossi, G. (2007).** Stochastic Forecasting of Drought Indices - Methods and Tools for Drought Analysis and Management. Springer
- [47].**Cantat, O., (2004).** Analyse critique sur les tendances pluviométriques au 20ème siècle en Basse-Normandie : Réflexions sur la fiabilité des données et le changement climatique. *Annales de l'Association Internationale de Climatologie*, Vol I, 11, p. 13-31.
- [48].**Caruso, G., Rapoport, H.F & Gucci R., (2013)** Long-term evaluation of yield components of young olive trees during thicket of fruit production under different irrigation regimes, *Irrig. Sci.* 31, pp : 37-47.
- [49].**Chamayou, J., Combe, M., Genetier, B., & Leclerc, C. (1975).** Le bassin de Meknès-Fès, Ressource en eau du Maroc, 41-71.
- [50].**Chaouche, A., (1988).** Structure de la saison des pluies en Afrique soudano-sahélienne. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 263 p
- [51].**Chekroun, S., (2009).** Commande neuro-floue sans capteur De vitesse d'une machine asynchrone Triphasée. Thèse de doctorat, ENSET d'Oran.

- [52].**Cheng-Jian, L. (2006).** Temperature control using neurofuzzy controllers with compensatory operations and wavelet neural networks. *Journal of Intelligent Fuzzy Systems*, pp. 145-157.
- [53].**Chibane, B., & Ali-Rahmani, S. E. (2015).** Hydrological based model to estimate groundwater recharge, real evapotranspiration and runoff in semi-arid area, *LARHYSS J N23: Issue 23, ISSN:1112-3680*
- [54].**Chokmani, K., Ouarda, T. B., Hamilton, S., Ghedira, M. H., & Gingras, H. (2008).** Comparaison of ice-affected streamflow estimates computed using artificial neural networks and multiple regression techniques. *Journal of Hydrology* 349, 383-396.
- [55].**Christensen, O. B. & J. Christensen, (2004).** Intensification of extreme european summer precipitation in a warmer climate, *Global and Planetray Change*, 44, 107–117.
- [56].**Cimen, M., (2008).** Estimation of daily suspended sediments using support vector machines. *Hydrol. Sci. J.* 53 (3), 656–666.
- [57].**Cirac, P. (1987).** Le bassin sud-rifain occidental au néogène supérieur. Evolution géodynamique sédimentaire et de la paléogéographie au cours d'une phase de comblement. Thèse 287 p. Université Bordeaux 1, France.
- [58].**Clifton, C., Evans, R., Hayes, S., Hirji, R., Puz, G., & Pizarro, C. (2010).**Water and climate change. Impacts on groundwater resources and adaptation options.
- [59].**CLIMSEC, (2011).** Projet ClimSec : Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol, 1-72
- [60].**Colo, G., (1961).** Contribution à l'étude du Jurassique du Moyen Atlas septentrional. Notes et mémoires du service géologique du Maroc, n° 139, 226 p.961
- [61].**Combe M., Genetier B & Leclerc C., (1975).** Le bassin de Méknès-Fès. Ressources en eau du Maroc. Tome 2 plaines et bassins du Maroc Atlasique. Éditions du service géologique du Maroc. p 41 à 71.
- [62].**Côte, M. (1998).** Des oasis malades de trop d'eau, *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 9(2), 123-130.
- [63].**Coudrain R A., Pratz, B., Jusserand, C., Quintanilla, J., & Cahuaya, D. (1997).** Bilan et évaporation d'un aquifère en zone aride, Altiplano central bolivien. *IAHS Publ. no. 244*, pp 53-61.
- [64].**Coulibaly, P., Anctil, F & Bobee, B. (2000).** Daily reservoir inflow v forecasting using artificial neural networks with stopped trainingvapproach. *Journal of Hydrology* 230: 244–257.CPC, 2002
- [65].**Coulibaly, P., Bobée, B., & Anctil, F. (2001).** Improving extreme hydrologic events forecasting using a new criterion for artificial neural network selection. *Hydrol. Process.* 15, 1533-1536.
- [66].**Cubasch, U., Wuebbles, D., Chen, D., Facchini, M. C., Frame, D., Mahowald, N., & Winther, J. G. (2013).** Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1-158.
- [67].**Cubero, R.G., (1991).** Neural Networks for Water Demand Time Series Forecasting. In: *Artificial Neural Networks, Proceedings of the international Workshop IWANN'91*, A. Prieto Ed., SpringerVerlag, Germany, pp. 453-460
- [68].**Dagnelie P. (1975) :** Analyse statistique à plusieurs variables. Les presses agronomiques de Gembloux.
- [69].**Daliakopoulos, I. N., Coulibaly, P., & Tsanis, I. K. (2005).** “Groundwater level forecasting using artificial neural network”, *J. Hydrol.* Vol. 309, pp.229–240.
- [70].**Daws Dawson, C.W & Wilby, R.L., (1998).** An artificial neural network approach to rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, 43 (1), pp. 47-66.
- [71].**Dawson, C.W. & Wilby, R.L., (2000).** A comparison of artificial neural networks used for rainfallrunoff modelling. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 3, pp. 529-540.
- [72].**De Vries, J.J., Simmers, I., (2002).** Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeol. J.*, 10(1), 5-17.
- [73].**Doesken, N.J., (1991).** Développement d'un indice de l'approvisionnement en eau de surface pour l'ouest des États-Unis. *Climatologie* Nombre 91-3, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- [74].**Doorenbos J & Pruitt (1977)** Crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 24. Food and Agriculture Organisation, Rome
- [75].**Dos Santos G. (2001).** Classification automatique à partir de photographies aériennes. Rapport de Maîtrise, Université de Pau, 70 p.
- [76].**Dragoni & Sukhija, (2008).** Climate Change and Groundwater: A Short Review. *Geological Society Special Publication*, pp. 1–12.
- [77].**Driouech, F., Déqué, M., & Sánchez-Gómez, E. (2010).** Weather regimes—Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation. *Glob Planet Change*.2010.03.004.

- [78].**Duminil. T., (2007).** Exploitation de données de télédétection en vue d'étudier la mise en place de l'écotourisme dans la région de Andavadoaka (Madagascar). Rapport de stage deuxième année SUPAGRO, Montpellier, 19 p.
- [79].**Duckstein, L., (1995).** Fuzzy rule-based modelling with applications to geophysical, biological and engineering systems. CRC press, p 232.
- [80].**Easterling D.R., (2000):** Climate extremes: observation, modelling and impacts. *Science* 289:2068-2074.
- [81].**Easterling, D. R., (1997)** Maximum and Minimum Temperature Trends for the Globe. *Science* 277:364-367.
- [82].**Edossa, D. C., Babel, M. S., & Gupta, A. D. (2010).** Drought Analysis on the Awash River Basin, Ethiopia. *Water Resource Management* 24: 1441-1460
- [83].**El Ibrahim A & Baali A. (2017).** Application of Neural Modeling and the SPI Index for the Prediction of Weather Drought in the Saïss Plain (Northern Morocco) *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, Vol.10, No.5, 1-10,
- [84].**El ibrahimi A & BAALI A. (2018).** Groundwater Level Predicted in the Saïss Plain (Northern Morocco) using Artificial Intelligence Techniques. *International Journal of Ecology & Development™*, 2018, vol. 33, no 1, p. 125-137.
- [85].**El ibrahimi A., Baali A., Couscous A & El kamel T. (2015).** Etude de l'impact des variations pluviométriques sur les fluctuations piézométriques des nappes phréatiques superficielles en zone semi-aride (cas de la plaine de Saïss, nord du maroc). *European Scientific Journal*, esj, 2015, vol. 11, no 27
- [86].**El Ibrahim. A & Baali A. (2017).** Comparative Study of the Three Models (ANN-PMC),(DWT-ANN-PMC) and (MLR) for Prediction of the Groundwater Level of the Surface Water Table in the Saïss Plain (North of Morocco) *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, Vol.10, No.5, 220-230,
- [87].**El msaddaq K, (2004).** Synthèse hydrogéologique dans la plaine de Saïss : secteur Fès – Mém. DESA, Géologie Appliquée, faculté des sciences Dhar el mehrez, Fès ,99p.
- [88].**El Tabach, E., Lancelot, L., Shahrour, I., Maillot, H., & Najjar, Y. (2005).** Estimation de la migration d'une pollution accidentelle en utilisant les réseaux de neurons artificiels. XVIIe Congrès Français de Mécanique (CFM), Université de Technologie de Troyes, 29 août-2 septembre 2005, accepté le 30/03/2005.
- [89].**Elagib, N.A & Elhag, M.M., (2011).** Major climate indicators of ongoing drought in Sudan. *Journal of Hydrology* 409 (3e4), 612-625
- [90].**ELMAN, J.L. (1990).** "Finding Structure in Time". *Cognitive Science* 14: pages 179-211
- [91].**Eltamaly A., Iolah A.I & Basem M.B., (2010).** Fuzzy Controller for Three Phases Induction Motor Drives, Conference IEEE.
- [92].**Er-Raki, S., Chehbouni, A., Khabba, S., Simonneaux, V., Jarlan, L., Ouldbba, A & Allen, R. (2010).** Assessment of reference évapotranspiration methods in semi-arid regions: can weather forecast data be used as alternate of ground meteorological parameters? *Journal of Arid Environments* 74 (12), 1587e1596.
- [93].**Essahlaoui, A. (2000).** Contribution à la reconnaissance des formations aquifères dans le Bassin de Meknès-Fès (Maroc), Prospection géoélectrique, étude hydrogéologique et inventaire des ressources en eau. Thèse 258p. Université Mohammed VI, Rabat, Maroc.
- [94].**Fakhreddine K., (2004).** Soft Computing and Intelligent Systems Desig. Edition Wesley
- [95].**FAO/IIASA, (2000).** CD-ROM: Global Agro-Ecological Zones, UN Food and Agriculture Organization, Rome, Italy, and International Institute for Applied Systems Analysis Laxenburg, Austria.
- [96].**FAO/UNESCO, (1974-1981).**CD-ROM: Soil Map of the World, Ten volumes, UN Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- [97].**Farajalla, N & Ziade, R., (2010).** Drought frequency under a changing climate in the Eastern Mediterranean: the Beka'a valley, Lebanon. *Geophys. Res. Abstr.* 12, EGU2010e11653.
- [98].**Fassi, D. (1999).** Les formations superficielles de Saïss de Fès et de Meknès des temps géologiques à l'utilisation actuelles des sols. Thèse 527p. Notes et Mém. Serv. Géol. n° 389. Rabat, Maroc.
- [99].**Fassi. (1993).** Les formations superficielles du Saïs de Fès de Fès et de Meknès du temps Géologique à l'utilisation actuel des sols. Thèse de doctorat d'état. Université de bordeaux I. 2T, 480p
- [100].**Faugères, J. C. (1978).** Les Rides sud-rifaines : Evolution sédimentaire et structurale d'un bassin atlantico mesogéen de la marge africaine.
- [101].**Feng Mei, L. (2012).** Suivi des changements des utilisations/occupations du sol en milieu urbain par imagerie satellitale de résolution spatiale moyenne : Le cas de la région métropolitaine de Montréal.

- [102].**Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., & Helkowski, J. H. (2005).** Global consequences of land use. *science*, 309(5734), 570-574.
- [103].**Fowler, H.J., Blenkinsop, S. & Tebaldi, C. (2007).** Linking climate change modelling to impact studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatololgy*, 27, DOI: 10.1002/joc.1556, 1547-1578
- [104].**Freeze R. A & Cherry J. A., (1979).** Groundwater. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [105].**French, M. N., Krajewski, W. F., & Cuykendall, R. R. (1992).** Rainfall forecasting in space and time using a neural network. *J. Hydrol.*; 137: 1-31.
- [106].**Fröhlich, C., (2006).** Solar irradiance variability since 1978. *Space Sci. Rev.* 1–13.
- [107].**Funahashi K. (1989).** On the approximate realization of continuous mappings by neural networks. *Neural Networks* 2, 183-214.
- [108].**Gao B. (1996),** anormalized difference water index for remote sensing of vegetation liquide water from space, *remote sensing of the environment*, 257-266 pp.
- [109].**Gerber, R.E & Howard, K., (2000).** Recharge through a regional till aquitard: Three-dimensional flow model water balance approach. *Ground Water* 38, 410–422.
- [110].**Gibbs, W.J & Maher, J.V. (1967).** Rainfall Deciles as Drought Indicators. *Bureau of Meteorology Bull.* 48. Commonwealth of Australia, Melbourne, Australia.
- [111].**GIEC, (2007).** Bilan des changements climatiques - Quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat - GIEC, Genève, Suisse, pp : 103.
- [112].**Girard M. C & Girard, C. (1989).** Télédétection appliquée, zones tempérées etintertropicales. (2 ed.), Paris, Masson, 260 p.
- [113].**Girard M.C& Girard C.M., (1999).** Traitement des données de télédétection. Dunod, Paris,529 p. + CD-ROM.
- [114].**Gocic M, Trajkovic S (2013)** Analysis of precipitation and drought data in Serbia over the period 1980-2010. *J Hydrol* 494 :32–42
- [115].**Gond, V., Bartholomé, E., Ouattara, F., Nonguierma, A., & Bado, L. (2004).** Surveillance et cartographie des plans d'eau et des zones humides et inondables en régions arides avec l'instrument VEGETATION embarqué sur SPOT-4
- [116].**Goni, I. B., Travi, Y., & Edmunds, W. M. (2005).** Estimating groundwater recharge from modelling unsaturated zone chloride profiles in the Nigerian sector of the Chad Basin, *J. Min. Geol.*, 41: 123-130.
- [117].**GOUAIDIA, L., (2006) :** Impact des activités agricoles et de la nature de la couche vadose sur l'évolution des nitrates dans la plaine de Meskiana (NE Algérie).-*Le journal de l'IGME (Institut de Géologie et Minéralogie de l'Espagne)*,numéro spécial n°17.pages 37-46.
- [118].**GOUAIDIA, L. (2008).** Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des parametres physico–chimiques des eaux d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de Meskiana nord-est Algérien. *Badji Mokhtar-Annaba University, Algeria.*
- [119].**Hagan, R. M., Haise, H. R & Edminster, T. W., (1967).** (Eds.), *Irrigation of agricultural lands*, Agronomy Monograph 11, American Society of Agronomy, Madison WI, USA, pp. 771-784.
- [120].**Hargreaves GH & Samani ZA., (1982)** Estimating potential evapotranspiration. *J Irrig Drain Div* 108(3):225–230
- [121].**Hargreaves, G.H & Allen, R.G., (2003).** History and evaluation of Hargreaves évapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 129 (1), 53e63.
- [122].**Hargreaves, G.H & Samani, Z.A., (1985).** Reference crop evapotranspiration from temperature. *Trans. ASAE* 1 (2), 96-99.
- [123].**Hayes, M.J., (2004).** A self-calibrating palmer drought severity index. *Journal of Climate* 17, 2335–2351.
- [124].**Haykin S. (1999).** *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, N.J., 2nd edition, 842p.
- [125].**Hecht-Nielsen, R., (1990).** *Neuro-computing*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA. Solution for a distributed hydrological model and applications, pp. 89-93.
- [126].**Heim, R. (2002).** A review of the twentieth-century drought indices used in the United States, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 83, 1149–1165,
- [127].**Hess T., (2010).** Estimating Green Water Footprints in a Temperate Environment, *Water* 2:3 351-362.
- [128].**Hopfield J. J. & D. W. (1985).** Tank, “neural computation of decisions in optimization problems,” *Biological cybernetics*, vol. 52, no. 3, pp. 141–152.

- [129].**Hornik, K., Stinchcombe, M., & White, H. (1989).** Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks* 2:359– 366
- [130].**Hsu, K.L, Gupta, H. V. & Sorooshian, S. (1997).** Application of a recurrent neural network to rainfall-runoff modeling. *Proc., Aesthetics in the constructed Envir., ASCE, New York*, 68-73.
- [131].**Hubert, P & Carbonnel, J.P., (1993).** Segmentation des séries annuelles de débits de grands fleuves africains. *Bull. De liaison du CIEH* 92, 3-10.
- [132].**Hubert, P., Carbonnel, J. P., & Chaouche, A. (1989).** Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits d’Afrique de l’Ouest. *J. Hydrol.* 110, 349-367.
- [133].**Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Ottersen, G., & Visbeck, M. (2003).** An overview of the North Atlantic Oscillation. In: *The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact*, Geophys. Monogr, vol. 134. Am. Geophys. Union, pp. 1–36.
- [134].**Hurrell J.W & Van Loon H., (1997):** Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation, *Clim. Change*, 36, 301-326.
- [135].**Hurrell, J.W. (1995):.** Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation, *Science, New Series*, 269, No. 5224, pp: 676-679.
- [136].**IMAGINE, Erdas. Huntsville, (2013).**AL: Intergraph Geospatial Inference System Controller for a Hybrid Electric Vehicle Power Train System, *IEEE International Conference on Control and Automation*, pp. 404-409.
- [137].**Daliakopoulos, I. N., Coulibaly, P., & Tsanis, I. K. (2005).** Groundwater level forecasting using artificial neural networks. *Journal of Hydrology* 309 (2005) 229–240
- [138].**IPCC (2013)** Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- [139].**IPCC, (2007):** The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- [140].**Isaaks & Srivastava, (1989),** An Introduction to Applied Geostatistics, Oxford University Press, 592 p.
- [141].**Jang R., R. Jang, (1992).** Neuro-fuzzy modeling: architecture, analyses and applications, PhD thesis, Dep. of Electrical Engineering and computer Science, University of California, Berkeley,
- [142].**Jang, J.-S.R., (1993).** ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *Syst. Man Cybern. IEEE Trans.* 23, 665e68
- [143].**Jarlon, L. (2015).** Télédétection spatiale en éco-hydrologie, cours du master spécialisé sciences de l’eau, Faculté des Sciences Semalalia, Marrakech.
- [144].**Joerin F., (1998) :** Décider sur le territoire. Proposition d’une approche par utilisation de SIG et de méthodes d’analyse multicritère. Thèse N°1755.EPFL, Lausanne.
- [145].**Kadi D., (1995) :** Contribution à l’étude de la sécheresse sur le littoral algérien par le biais de traitement des données pluviométriques et la simulation, Thèse de Magister, Ecole nationale polytechnique d’Alger.
- [146]. **Karl, T. R., Jones, P. D., Knight, R. W., Kukla, G., Plummer, N., Razuvayev, V & Peterson, T. C. (1993).** A new perspective on recent global warming: asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74(6), 1007-1024.
- [147].**Kamgang, V., Beyala, K., Ekodeck, G. E., Vincens, A., Boulange, B., & Dubois, M. A. (2004).** Argument pédologique de l’évolution de la mosaïque forêt/savane dans le sud-est du Cameroun, *Science et changements planétaires / Sécheresse*, Vol. 15, N° 2, avril-mai-juin, Note de recherche, 181 5.
- [148].**Kavzoglu Kavzoglu T & Mather PM (2003)** The use of back-propagating artificial neural networks in land cover classification. *Int J Remote Sens* 24:4907–4938
- [149].**Kelly, B. F., Timms, W. A., Andersen, M. S., McCallum, A. M., Blakers, R. S., Smith, R., ... & Acworth, R. I. (2014).** Aquifer heterogeneity and response time: the challenge for groundwater management *Crop Pasture Sci.* 1141– 1154.
- [150].**Kemmouche, A., Mering, C., & Sansal, B. (2008).** Cartographie de la densité du couvert ligneux dans les zones arides et semi-arides à l’aide de l’imagerie satellitaire. *Article scientifique. Sécheresse* 2008 ; 19 (2) : 129-35.
- [151].**Kenafi, J., (2002).** Évolution structurale méso-cénozoïque des rides pré-rifaines (Maroc) : halocinèse, géométrie et reconstitution géodynamique, apport de données de sismique réflexion et de forages pétrolier. Thèse d’Uni. Ibn Tofail, Kénitra, 350p.

- [152].**Kenafi, J., Toto, E., Dakki, M., & Asebriy, L. (2001).** Evolution structurale des rides préifaines (Maroc). Région de Meknès : influence de la distensions mésozoïque sur les chevauchements miocènes, apports de données de réflexion et de forages. *Africa geoscience Review*, vol. 8, 3, 337-350.
- [153].**Keskin, M. E., Terzi, O., Taylan, E. D., & KÜÇÜKYAMAN, D. (2009).** Meteorological drought analysis using data- driven models for the lakes district, turkey. *Hydrol Sci* 56(6):1114–1124
- [154].**Keskin ME, Terzi O, Taylan D (2004)** Fuzzy logic model approaches to daily pan evaporation estimation: in western Turkey. *Hydrol Sci* 49 :1001–1010
- [155].**Khalidi A., (2005)** : Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien " Monts de Tlemcen - Saida ». Thèse de doctorat d'état, Géographie et Aménagement du Territoire, Université d'Oran, Mai 2005.
- [156].**Khalili, D., Farnoud, T., Jamshidi, H., Kamgar-Haghighi, A. A., & Zand-Parsa, S. (2011).** Comparability analyses of the SPI and RDI meteorological drought indices in different climatic zones. *Water Resour. Manag.* 25 (6), 1737-1757.
- [157].**Kharroubi. O. (2013).** Prévision des crues par modèle de réseau de neurones artificiels : application au bassin versant de l'Eure, Thèse de doctorat, LILLE 1, France.
- [158].**KHOMSI K., (2014).** Variabilité hydroclimatique dans les bassins versants du Bouregreg et du Tensift au Maroc : moyennes, extrêmes et projections climatiques. Thèse de doctorat en climatologie, Univ. Mohammed V, Fac. Sci.Rabat, 218p.
- [159].**Khoualdia, W., Djebbar, Y., & Hammar, Y. (2014).** Caractérisation de la variabilité climatique « cas du bassin versant de Medjerda » Nord- Est de l'Algérie. *Rev. Sci. Technol., Synthèse* 29 : 6-23 (2014)
- [160].**Khronostat., (1998).** Logiciel d'analyse statistique de séries chronologiques. ORSTOM Ed. Paris. <http://www.hydrosciences.org>.
- [161].**Kinzelbach, W., Aeschbach, W., Alberich, C., Goni, I. B., Beyerle, U., Brunner, P & Zoellmann, K. (2002).** A survey of methods for groundwater recharge in arid and semi-arid regions. Early Warning and Assessment Report Series. UNEP/DEWA/RS.02-2. 101
- [162].**Kisi, O., Cimen, M., (2009).** Evapotranspiration modelling using support vector machines. *Hydrological Science Journal* 54 (5): 918-928. Taylor and Francis Ltd.
- [163].**Knippertz, P., Christoph, M., & Speth, P. (2003).** Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates. *Meteorol Atmos Phys* 83: 67–88
- [164].**Koffi, J., Konin, C., Adoh, M., Coulibaly, I., Kramoh, E., N'guetta, R & Safou, M., (2007).** Optimization of Multi-layers Perceptrons models with algorithms of first and second order. Application to the modelling of rainfall-runoff relation in Bandama Blanc catchment (north of Ivory Coast). *European Journal of Scientific Research*, vol. 17, n°3, pp.13-328.
- [165].**Kueppers, L. M., Snyder, M. A., Sloan, L. C., Cayan, D., Jin, J., Kanamaru, H & Weare, B. (2008).** "Seasonal temperature responses to land-use change in the western United States", *Global and Planetary Change*, 60(3-4): 250-264.
- [166].**Karthikeyan, L., Kumar, D. N., Graillot, D., & Gaur, S. (2013).** Prediction of ground water levels in the uplands of a tropical coastal riparian wetland using artificial neural networks. *Water resources management*, 27(3), 871-883.
- [167].**Labat, D., Ababou, R., Mangin, A. (1999).** Wavelet analysis in Karstic hydrology 2nd Part: rainfall–runoff cross wavelet analysis. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Series IIA Earth and Planetary Science* 329: 881 887
- [168].**LABORDE J.P. (2009).** Eléments d'hydrologie de surface, cours. Université de Nice SophiaAntipolis, 191p. Disponible sur : http://hydrologie.org/BIB/manuels/Labode_2009.pdf
- [169].**Lachtermacher, G., & Fuller, J.D., (1994).** Backpropagation in hydrological time series forecasting. In : K. W. Hipel, A.I. MacLeod, U.S. Panu & V. P. Singh (eds), *Stochastic and statistical methods in hydrology and environmental engineering*, Vol. 3, Time series analysis in hydrology and environmental engineering : 229-242.
- [170].**Lallahem, S., Mania, J., Hani, A., & Najjar, Y. (2005).** On the Use of Neural Networks for evaluate groundwater levels in fractured media. Note soumise au J of Hydrology.
- [171].**Leblanc, M. J., Favreau, G., Massuel, S., Tweed, S. O., Loireau, M., & Cappelaere, B. (2008).** Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Global Planet Change*, 61, 135- 150
- [172].**Lecerf, R. (2008).** Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par la télédétection moyenne résolution (application à la Bretagne). Thèse Doctorat. L'Université de Rennes 2, France.

- [173].**Lee, A. F. S. & Heghinian, S. M. (1977)** A shift of the mean level in a sequence of fin dependent normal random variables- A Bayesian approach. *Technometrics* 19(4), 503-506.
- [174].**Lerner, D.N., (1997)**. Groundwater recharge. In “Geochemical processes, weathering and groundwater recharge in catchments”, Saether et de Caritat (eds.), Balkema, Rotterdam, pp 109-150.
- [175].**Lerner, D. N., Issar, A. S., & Simmers, I. (1990)**. Groundwater Recharge: a guide to understanding and Estimating Natural Recharge. International Contribution to Hydrogeology, 8. International Association of Hydrogeologists. Verlag Heinz Heise.
- [176].**Limin P., Woo P.Y. (2002)**, Neural fuzzy control system for robotic manipulators. *IEEE*, pp. 53-63.
- [177].**Lionello, P., Malanotte Rizzoli, P & Boscolo, R. (2006a)**. The Mediterranean climate: an overview of the main characteristics and issues, In: (eds) *Mediterranean Climate Variability*, Amsterdam, Elsevier, 1-25.
- [178].**Lippmann, R.P., (1987)**. An Introduction to Computing with Neural Nets. *IEEE ASSP Magazine*, April 1987, 4 (2), 4-22.
- [179].**Liu J., Savenije H.H.G., Xu J. (2003)**. Forecast of water demand in Weinan City in China using WDF-ANN model. *Physics and Chemistry of the Earth* 28, 219-224.
- [180].**Livezey R. E. & Mo, K. C., (1986)**: Tropical-extratropical geopotential height teleconnections during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, 114, 2488-2515.
- [181].**Lopez-Urrea, R., de Santa Olalla, F. M., Fabeiro, C., & Moratalla, A. (2006)**. An evaluation of two hourly reference evapotranspiration equations for semiarid conditions. *Agricultural Water Management* 86 (3), 277-282.
- [182]. **Emberger L. (1971)**, Travaux de Botanique et d'Écologie : choisis et présentés par les soins d'un groupe de ses amis et élèves à l'occasion de son jubilé scientifique, publié avec le concours du Centre National de la Recherche Scientifique
- [183].**Lubès H., (1994)**. Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par applications de tests statistiques - Etude bibliographique. Rapport n° 3 Programme ICCARE, ORSTOM Montpellier, 21p.
- [184].**Montgomery, D. R., & Gran, K. B. (2001)**. Downstream variations in the width of bedrock channels. *Water Resour. Res.* 37, 1841–1846
- [185].**M. A. A. Zarch et al, (2011)** Drought Monitoring by Reconnaissance Drought Index (RDI) in Iran, *Water Resour Manage* (2011) 25:3485–3504.
- [186].**Maate, A., De porta, N. S., & Martín-Algarra, A. (1993)**. Données paléontologiques nouvelles sur le Carnien des séries rouges des Maghrébides (Ghomarides et Dorsale calcaire du Rif septentrional, Maroc), *C. R. Acad. Sci. Paris* 316 II 137–143.
- [187].**Mac Donald & Partners, (1990)**. Etablissement et mise au point du modèle de gestion des nappes du bassin de Fès-Méknès. Département de coopération technique pour le développement. Nations Unis. Rapport DRPE.
- [188].**Maier, H.R. & Dandy, G.C. (1996)**. The use of artificial neural networks for the prediction of water quality parameters, (32): 1013-1022.
- [189].**Maier, H.R. & Dandy, G.C. (1997)**. Determining inputs for neural network models of multivariate time series, (12) :353-368.
- [190].**Maier, H.R. & Dandy, G.C. (2000a)**. Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and applications. *Environmental Modelling and Software*, (15): 101-124.
- [191].**Mamdani, E. (1977)**. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic systems. *Fuzzy Sets Sys.*, 26, 1182-1191.
- [192].**Marc Robin, (2002)**. La télédétection : des satellites aux systèmes géographiques, 57 : 2 – 7p.
- [193].**Margat J. & Zebidi H., (1991)**. Pour des statistiques internationales fiables et cohérentes. VIIème congrès mondial des ressources en eau. Rabat, Maroc, 13-18 mai 1991.
- [194].**Margat J., Taltasse P., (1952)**. Hydrogéologie du Maroc : Bassin lacustre de Fès-Méknès. Notes et mémoires du service géologique du Maroc, n°97 : 128-141.
- [195].**Martin J., (1981)**. Le Moyen Atlas central : étude Géomorphologique. Notes et mémoires du service géologique N° 258 bis. 445 p
- [196].**Math Works Inc. (2001)** MATLAB V R2009a, Apple Hill Drive, Natick, Massachusetts, USA
- [197].**McClean, C & Cherrill, A., (1995)**. An investigation of uncertainty in field habitat mapping and the implications for detecting land cover change. *Landscape Ecology*, 10(1): 5-21.

- [198].**McCulloch, W.S. & Pitts, W., (1943).** A logical Calculus of the Ideas Imminent in Nervous Activity. Bulletin of Mathematical Biophysics, 5: pp. 115-133
- [199].**Feeters, S.K. (1996)** The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. International Journal of Remote Sensing, 17, 1425-1432.
- [200].**McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993).** “The relationship of drought frequency and duration to time scales,” in Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, pp. 179–184, Anaheim, Calif, USA.
- [201].**Meddi H. & Meddi M., (2009).** Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l’Algérie. Sécheresse, vol 20, p. 57-67
- [202].**Meddi m. & hubert p. (2003).** Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l’Algérie. Hydrology of the Mediterranean and semiarid Regions. IAHS publication N° 278.
- [203].**Mehdaoui, R., Mili, E. M., & Seghir, A. (2018).** Caractérisation à l’aide du SPI de la Sécheresse climatique dans le bassin versant de Ziz (Sud-Est, Maroc). European Scientific Journal, ESJ, 14(21), 177.
- [204].**Mellah R. & Guermah S., (2015).** Compensatory neural fuzzy control for two wheels electric vehicle drive. IJEHV, pp. 189-207.
- [205].**Mellah R., (2006),** Contribution de la commande adaptative, Application a la robotique.Thèse de doctorat, Université Houari Boumediene
- [206].**Mishra, A. K. & Desai V. R. (2006).** Drought forecasting using feed-forward recursive neural network. Ecological Modelling 198(1-2): 127-138.
- [207].**Misiti, M. (2000).** Wavelet Toolbox: For Use with MATLAB. MathWorks, 941 pp.
- [208].**Mohanty S. Mohanty, K. Madan, A. Jha, K. & Kumar, P. (2010).** “Artificial neural network modeling for groundwater level forecasting in a river island of eastern India”, Water Resources Management, Vol. 24, No. 9, pp.1845–1865.
- [209].**Morel J.L., (1989).** Etats de contrainte et cinématique de la chaîne rifaine (Maroc) du Tortonien à l'Actuel. Géodyn. Acta, n° 3-4, p.283-294.
- [210].**Morid, S., Smakhtin, V., & Moghaddasi, M. (2006).** Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. International Journal of Climatology 26(7): 971-985.
- [211].**Morlet J (1984)** Decompositions of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. SIAM J Math Anal 15:723–736
- [212].**Najjar, Y. & Zhang, X., (2000).** Characterizing the 3D Stress-Strain Behavior of sandy Soils: A Neuro-Mechanistic Approach. ASCE Geotechnical Special Publication No. 96, Filz, G. and Griffiths, D. (Editors): pp. 43-57.
- [213].**Najjar, Y. M., Basheer, I. A., & Hajmeer, M. N. (1997).** Computational neural networks for predictive microbiology: Methodology. International Journal of Food Microbiology 34, pp. 27-49.
- [214].**Nakoula y. (1997).** Apprentissage des modèles linguistiques flous par jeu de règles pondérées. Thèse de Doctorat, Université de Savoie, France, 155 p
- [215].**Nash j.e & Sutcliffe j.v., (1970).** River flow forecasting through conceptual models. Part 1 - A discussion of principes. J ofhydrology, 10, 282-290.
- [216].**NDMC, (1996).** National Drought Mitigation Center. Consulté en ligne : [http:// www. Drought.unl.edu /enigma / indices.htm](http://www.Drought.unl.edu/enigma/indices.htm), 1998.
- [217].**Nkemdirim L, Weber L. (1999).** Comparison between the droughts of the 1930s and the 1980s in the southern prairies of Canada. Journal of Climate 12(8): 2434–2450
- [218].**Omari L., (2005).** Contribution à l’étude d’un écosystème a Artemesia herba alba dans le Sud- Oranais ; Diagnose phytoécologique et cartographique par télédétection spatiale. Mémoire de magister, Université USTHB, écologie et environnement, 152 p+Annexes.
- [219].**Organisation Météorologique Mondiale, (1996)** Programme des applications météorologiques de l'OMM 1996-2005 - Quatrième plan à long terme de l'OMM, partie II, volume 4.
- [220].**Organisation Météorologique Mondiale, (2011)** ([http:// www. wmo. int/pages /mediacentre /press_releases/gcs _ 2011_fr.html](http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/gcs_2011_fr.html))
- [221].**Organisation Météorologique Mondiale -WMO., (2000).** Detecting trend and other changes in hydrological data. In: Kundzewicz ZW, Robson A, eds. World Climate Programme Data and Monitoring. WCDMP-45. WMO/TD-n° 1013. Genève.
- [222].**Organisation météorologique mondiale (OMM), (2012)** : Guide d’utilisation de l’indice normalisé de précipitations (M. Svoboda, M. Hayes et D. Wood) (OMM-N° 1090), Genève.

- [223].**Osman A. E. A. (2008)**: Groundwater discharge mechanism in semi-arid regions and the role of evapotranspiration. *Hydrol. Process.* 22, pp. 2993–3009.
- [224].**Osorio, J., Molina, A., Ponce, P., & Romero, D. (2011)**. A supervised adaptive neuro-fuzzy inference system controller for a hybrid electric vehicle's power train system. In *Control and Automation (ICCA), 2011 9th IEEE International Conference on* (pp. 404-409)
- [225].**Oussar Y., (1998)**, Réseaux d'ondelettes et réseaux de neurones pour la modélisation statique et dynamique de processus. Thèse de doctorat, Université de Paris VI.
- [226].**Palmer, W. (1965)**. Meteorological drought. Tech. Rep., Vol.45, U.S. Weather Bureau, Washington, D.C., p. 58
- [227].**Parrella, F. (2007)**. Online Support Vector Regression. Master Thesis, University of GenoaParry, 1989;
- [228].**Pascal, R., Boiteau, L., & Commeyras, A. (2005)**. From the prebiotic synthesis of α -amino acids towards a primitive translation apparatus for the synthesis of peptides. *Top Curr Chem* 259:69–122
- [229].**Patwardhan A.S. et al, (1990)**. Effective Rainfall Estimation Methods, *J. Irrig. Drain. Eng.* 116:2 (1990) 182-193
- [230].**Penman h.L., (1948)** – Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London A* (194), S. p 120-145.
- [231].**Penman-Monteith, J. L. (1965)**. "Evaporation and Environment." In: *The state and movement of water in living organism*. 19th Symp. Soc. Exptl. Biol. P. 205-234.
- [232].**Pereira AR, Pruitt WO (2004)** Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. *Agric Water Manag* 66(3):251–257.
- [233].**Pettitt A.N., (1979)**. A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist.* 28(2), 126-135
- [234].**Piechowiak S. (2004)**. Intelligence Artificielle et diagnostic. In *Techniques De L'ingénieur* (Ed.), Collection des Techniques de l'Ingénieur, Techniques de l'Ingénieur, Paris, 1-20.
- [235].**PNUD, (1992)**. Évaluation hydrologique de l'Afrique sub-saharienne. Pays de l'Afrique de l'Ouest. Rapport de pays : Côte d'Ivoire. Projet RAF/87/030. Mott Mac Donald International, BCEOM, SOGREAH, ORSTOM.
- [236].**Porter, D. W., Gibbs, B. P., Jones, W. F., Huyakorn, P. S., Hamm, L. L., & Flach, G. P. (2000)**. Data fusion modeling for groundwater systems. *J. Contaminant Hydrol.* 42, 303–335.
- [237].**Prinos, S.T., Lietz, A.C., Irvin, R.B., (2002)**. Design of a real-time groundwater level monitoring network and portrayal of hydrologic data in southern Floria. US Geological Survey Report 01-4275.
- [238].**Puech C., (1995)**. Spatialisation et Eaux. Approche spatialisée de l'hydrologie. DEA national d'hydrologie, Laboratoire Commun de télédétection CEMENGREFENGREF, Montpellier. France
- [239].**Rajae, T., Nourani, V., Zounemat-Kermani, M., & Kisi, O. (2010)**. River suspended sediment load prediction: application of ANN and wavelet conjunction model. *J Hydrol Eng* 16:613–627
- [240].**Rakhshandehroo, G. R., Vaghefi, M., & Aghbolaghi, M. A. (2012)**. "Forecasting Groundwater Level in Shiraz Plain Using Artificial Neural Networks," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 37(7), pp. 1871-1883,
- [241].**Rao Raghuveer M. & Bopardikar S. (1998)**. Wavelet transforms: introduction to theory and applications. Addison-Wesley ISBN 0, vol. 201, p. 63463.
- [242].**Ravi, S., Manekar, V. L., Christian, R. A., & Mistry, N. J. (2013)**. Estimation of Reconnaissance Drought Index (RDI) for Bhavnagar District, Gujarat, India *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering* Vol:7, No:7, 2013.
- [243].**Rebetez, M. (2001)**. Changes in daily and nightly day-to-day temperature variability during the twentieth century for two stations in Switzerland. *Theoretical and Applied Climatology*, 69(1-2), 13-21.
- [244].**Riad, S., (2003)**. Modélisation de la relation pluie-débit par les réseaux de neurones artificiels (RNA ou ANN) : Application a un bassin versant en zone semi-aride (Maroc). Colloque international sur l'Hydrologie des régions méditerranéennes et semi-arides. Montpellier, France.
- [245].**Richard, Y., Camberlin, P., Fauchereau, N., & Mulenga, H. (2002)**. « El Nino-la Nina : cohérence intrasaisonnière de la variabilité pluviométrique interannuelle en Afrique du Sud », *Espace géographique*, vol. 1, 63-72.
- [246].**Risbey, J. S., Pook, M. J., McIntosh, P. C., Wheeler, M. C., & Hendon, H. H. (2009)**. "Scale, context, and decision making in agricultural adaptation to climate variability and change", *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 4(2): 137-165.
- [247].**Roche, M., (1963)**. Hydrologie de surface. Gauthier-Villars Editeur-Paris, 429 p., 204 fig.

- [248].**Rogers, J.C., (1984).** The association between the North Atlantic Oscillation and the Southern Oscillation in the Northern Hemisphere. *Mon. Weather Rev.* 112, 1999–2015.
- [249].**Rognon P., (1996).** Sécheresse et aridité : leur impact sur la désertification au Maghreb, *Sécheresse* (Paris), vol. 7, no 4, pp. 287-297.
- [250].**Rossi, G., Benedini, M., Tsakiris, G., & Giakoumakis, S. (1992).** On regional drought estimation and analysis. *Water Resources Management*: 6:249-277 Rouse et al, 1973
- [251].**Ruddiman, W., (2008).** *Earth's Climate: Past and Future*, 2nd edn. ed. New York.
- [252].**Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986).** Learning internal representations by back propagation error. *Nature*, 323: pp. 533-536.
- [253].**Rumelhart D.E. & McClelland J.L. (1986)** The PDP Research Group. *Parallel distributed processing: explorations in the microstructure of cognition*, vol 1. MIT Press, Cambridge
- [254].**Scanlon, B. R., Jolly, I., Sophocleous, M., & Zhang, L. (2007).** Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality. *Water Resour. Res.*, 43(3).
- [255].**Sebbar, A., Badri, W., Fougrach, H., Hsaine, M., & Saloui, A. (2011).** Etude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004), article, *sécheresse* vol. 22, n° 3. p. 139-48. .
- [256].**Sebbar, A., HSAINE, M., Fougrach, H., & Badri, W. (2012).** Etude des variations climatiques de la région centre du Maroc, 25eme colloque de l'association internationale de climatologie, Grenoble 2012. p.709-714.
- [257].**Sebbar A., (2013).** Etude de la variabilité et de l'évolution de la pluviométrie au Maroc (1935-2005) : Réactualisation de la carte des précipitations. Thèse de Doctorat en Bioclimatologie, Univ. Hassan II, Fac. Sci. Ben M'sik, Casablanca, 186 p.
- [258].**Sendide, O., (2002).** Etude qualitative des eaux de la nappe phréatique du bassin de Fès - Meknés, caractérisation, évaluation, modélisation mathématique et moyen de protection. Thèse de Doctorat. Université Tunis, Tunisie.
- [259].**Shafer B. & Dezman L., (1982).** Développement d'un approvisionnement en eau de surface Index (SWSI) pour évaluer la gravité de la sécheresse dans les zones de ruissellement du manteau neigeux. Dans *Actes de la Conférence Ouest de neige*, pp 164-
- [260].**Singh, V., & Strupczewski, W., (2007).** Editorial. *Journal of Hydrologic Engineering* 12, 345.
- [261].**Siou L. K. (2011).** Modélisation des crues de bassins karstiques par réseaux de neurones. Cas du bassin du Lez (France). Thèse de doctorat. Université de Montpellier II. 230 p.
- [262].**Sivakumar, B., Jayawardena, A. W., & Fernando, T. M. K. G. (2002).** River flow forecasting: use of phase-space reconstruction and artificial neural networks approaches, *Journal of Hydrology*, Volume 265, Issues 1-4, 30 August, pp. 225-245.
- [263].**Smith M., (1988).** *Manual for CROPWAT version 5.2.* FAO, Rome, Italy. 45p
- [264].**Smida H. (2003).** Apports des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) pour l'étude et la gestion des ressources en eau: Application pour la nappe de Chaffar – Sfax. Mémoire de DEA, Faculté des sciences de Sfax, (FSS), Tunisie.
- [265]. **Smida H,et al. (2006).** Identification de zones de recharge induite d'aquifères à l'aide d'un Système d'information géographique: cas de la nappe de Chaffar (Sud-Est tunisien). *Sécheresse*; 17 (3) : 433-42.
- [266].**Sönmez, F. K., KÖmÜscÜ, A. Ü., Erkan, A., & Turgu, E. (2005).** An analysis of spatial and temporal dimension of drought vulnerability in Turkey using the standardized precipitation index. *Nat Hazards* 35:243–264
- [267].**SouleyYéro, K., (2008) :** L'évolution de l'occupation des sols à l'échelle des bassins versants de Wankama et Tondi Kiboro : Conséquences sur les débits ; Mémoire de DEA, université Abdou Moumouni de Niamey, 80 p.
- [268].**Soubeyroux, J. M., Vidal, J. P., Najac, J., & Kitova, N. (2011).** *Projet ClimSec Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol. Rapport final du projet.* Direction de la climatologie de Météo France.
- [269].**Stour, L., & Agoumi, A. (2008).** Sécheresse climatique au Maroc durant les dernières décennies. *Hydroécologie appliquée*, 16, 215-232.
- [270].**Strahler, A. N., (1964).** Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In Chow, V.T. (ed.) *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York. pp 439-476.
- [271].**Strzepek, K., Yates, D., (1997).** Climate change impacts on the hydrologic resources of Europe: a simplified continental scale analysis. *Climatic Change* 36 (1), 79e92.

- [272].**Sudheer, K.P., Gosain, A.K. & Ramasastri, K.S., (2002).** A data-driven algorithm for constructing artificial neural network rainfall-runoff models. *Hydrol. Process.* 16, 1325-1330.
- [273].**Sutherland, D. E. R. (1991).** Immunosuppression for clinical pancreas transplantation. *Clinical transplantation*, 5(6), 549-553.
- [274].**Takagi T. & Sugeno M. (1985).** Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control. *IEEE Trans. Sys. Man Cyber.*, 15, 16-132.
- [275].**Takeuchi W., Yasuoka Y., (2004).** Development of normalized vegetation, soil and water indices derived from satellite remote sensing data (in Japanese). *Jpn Soc Photogrammetry Remote Sensing* 43(6):7–19. 114 pp
- [276].**Taltasse, P. (1953).** Recherche géologiques et hydrogéologiques dans le bassin lacustre de Fès-Meknès. Notes et Mémoire, n° 115, 300 p. Service de géologie. Rabat, Maroc
- [277].**Tarhouni, M., Belgacem, A. O., Neffati, M., & Chaieb, M. (2007).** Dynamique des groupements végétaux dans une aire protégée de Tunisie méridionale. *Cahiers Agriculture*, 16 (1), 7.
- [278].**Termier H., (1936).** Carte géologique provisoire du Maroc central, 1/200 000. Notice explicative. Note et mémoires du service géologique du Maroc, n°24 bis, 743 p.
- [279].**Thair M. Al-Taiee. (2010).** Groundwater Dams, a Promise Option for Sustainable Development of Water Resources in Arid and Semi-Arid Regions -, second international conference Outils et technologies appliqués à la Gestion Intégrée des Ressources en Eau. Agadir, Maroc.
- [280].**Thorntwaite, C. W., (1948).** An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 38, 55–94.
- [281].**Tigkas D, Vangelis H & Tsakiris G (2012).** Drought and climatic change impact on streamflow in small watersheds. *Sci Total Environ* 440:33–41
- [282].**Tigkas, D., Christelis, V & Tsakiris, G., (2016).** Comparative study of evolutionary algorithms for the automatic calibration of the Medbasin-D conceptual hydrological model. *Environ. Process.* 3 (3), 629e644.
- [283].**Tigkas, D., Vangelis, H & Tsakiris, G., (2015).** DrinC: a software for drought analysis based on drought indices. *Earth Sci. Inf.* 8 (3), 697e709.
- [284].**Tixeront, J., Berkaloﬀ, E., Caine, A., & Mauduech, E. (1951).** Bilan d'eau des massifs calcaires en Tunisie. Gaz des captages de Tumis et de Bizerte. IAHS, Assemblée de Bruxelles.
- [285].**Toth E., Brath A. & Montanari A.** "Comparison of short-term rainfall prediction models for real-time flood forecasting," *J. Hydrol.*, vol. 239, no. 1–4, pp. 132–147, Dec. 2000.
- [286].**Trajkovic & Kolakovic, (2009).** *Water Resour Manage* (2009) 23: 3057.
- [287].**Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M., & Parsons, D. B. (2003).** The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 84: 1205-1217.
- [288].**Trigo I., Bigg G., & Davies T. (2002).** Climatology of cyclogenesis mechanisms in the Mediterranean. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 130, 549 – 569.
- [289].**Tsakiris, G., Pangalou, D. & Vangelis, H. (2007).** Regional drought assessment based on the reconnaissance drought index (RDI). *Water Resource Management*. 21:821-833
- [290].**Tsakiris, G & Vangelis, H. (2005).** Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*. 9/10: 3-11.
- [291].**Tsakiris, G., Vangelis, H. (2004).** Towards a Drought Watch System based on spatial SPI. *Water Resources Management* 18 (1): 1-12.
- [292].**Tsiourtis, N. X. (2001).** Drought management plans for the Mediterranean region. Report of the Water Development Department. Nicosia.
- [293].**Tucker, C. J., (1979).** Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of the Environment*, 8, 127–150.
- [294].**Turc L., (1954).** Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations, l'évapotranspiration. *Ann. Agron.* 5, p. 491 596.
- [295].**UVED., (2008).** ENVCAL - Suivi de l'environnement par télédétection, Cours en ligne. Université Paris I, Panthéon Sorbonne
- [296].**Uvo, C.B., Tölle, U & Berndtsson, R., (2000).** Forecasting discharge in Amazonia using neural networks. *Int. J. Climatol.* 20, pp. 1495-1507.
- [297].**Van Beers & van Beers WCM, Kleijnen JPC (2004).** Kriging interpolation in simulation: a survey. In: Ingalls RG, Rossetti
- [298].**Van Lanen et Peters, (2000).** Definition, effects and assessment of groundwater droughts. In *Drought and drought mitigation in Europe* (pp. 49-61). Springer, Dordrecht.

- [299].**Van Loon, H., & Rogers, J. C. (1978).** The seesaw in winter temperatures between Greenland and northern Europe. Part I: General description. *Monthly Weather Review*, 106(3), 296-310
- [300].**Van Vliet, (2007).** The Volatility Effect: Lower Risk Without Lower Return *Journal of Portfolio Management*, pp. 102-113.
- [301].**Vangelis H, Tigkas D & Tsakiris G (2013)** The effect of PET method on Reconnaissance Drought Index (RDI) calculation. *J Arid Environ* 88 :130–140
- [302].**VANNIER O., BRAUD I. (2012).** Calcul d'une évapotranspiration de référence spatialisée pour la modélisation hydrologique à partir des données de la réanalyse SAFRAN de Météo-France : Note de travail du plateau SOMME d'Environnement. Rapport technique, 23p.
- [303].**Vannitsem, S., & Demaree, G. (1991).** Détection et modélisation des sécheresses au Sahel. *Hydrologie continentale*, 6(2), 155-171
- [304].**Ventura, F., Spano, D., Duce, P., & Snyder, R. L. (1999).** An evaluation of common evapotranspiration equations. *Irrigation Science* 18 (4), 163–170.
- [305].**Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010).** A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.
- [306].**Walker, G. Bliss, (1932).** *World Weather V. Memoirs Royal Meteorological Society*, 4, 53-84.
- [307].**Wallace, J. M., & Gutzler, D. S. (1981).** Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Monthly Weather Review*, 109(4), 784-812.
- [308].**Wang, G., Eltahir, E. A. B., Foley, J. A., Pollard, D., & Levis, S. (2004).** Decadal variability of rainfall in the Sahel: results from the coupled GENESIS-IBIS atmosphere-biosphere model. *Climate Dynamics. Clim. Dynam.*, 22, 625–637.
- [309].**Watson, R. T., Zinyowera, M. C., Moss, R. H., & Dokken, D. J. (1998).** The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability. - Intergovernmental panel in Climate Change (IPCC), Working Group II, Special Report, November 1997. Consulté en ligne: <http://www.grida.no/climate/ipcc/>.
- [310].**Weitz, A. (2013).** Application de la dendrochronologie à l'archéologie du bâti et du sous-sol.
- [311].**Wilby, R.L & Harris, I., (2006).** A framework for assessing uncertainties in climate change: low-flow scenarios for the river thames, UK. *Water Resour. Res.* 42, W02419.
- [312].**Wilhite D. A., (2000).** "Drought as a natural hazard: concepts and definitions," in *Drought: A Global Assessment*, D. A. Wilhite and O. Vanyarkho, Eds., Routledge, New York, NY, USA.
- [313].**Wilhite, D. A & M. H. Glantz, (1985):** Understanding the drought phenomenon: The role of definitions, *Water International*, 10, 111-120.
- [314].**Willeke, G., (1994).** L'Atlas national sécheresse. Institut pour les ressources en eau Rapport 94-NDS-4, US Army Corps of Engineers.
- [315].**Xu, C.Y., Singh, V.P., (2001).** Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes* 15, 305-319.
- [316].**Yergeau M., (1989).** Agriculture, désertification, conservation des sols. Télédétection et Sécheresse. Éd. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris © P. 75-81.
- [317].**Yoder, R.E., Odhiambo, L.O., Wright, W.C., (2005).** Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration *Engineering in Agriculture* 21 (2), 197e202.
- [318].**Youbi I. (2008).** Barrages souterrains comme solution pour empêcher la vidange naturelle des nappes en climat aride cas du sud- est marocain. *Revue HTE*, n°140, pp 97-99.
- [319].**YVES G P. (1999).** Algorithmes d'apprentissage pour systèmes d'inférence floue, Hermes Science Publications, France,
- [320].**Zaier, I., Shu, C., Ouarda, T. B. M. J., Seidou, O., & Chebana, F. (2010).** Estimation of ice thickness on lakes using artificial neural network ensembles", *J. Hydrol.*, Vol.383, No.3–4, pp: 330–340.
- [321].**Zeineddine, N., Benoit, L & Imen, T., (2013).** Changements climatiques au Maghreb : vers des conditions plus humides et plus chaudes sur le littoral algérien ? *Géographie Physique et Environnement*, Vol. 7, p. 307-323.
- [322].**Zizi, M., (1996).** Triassic-jurassic extensional systems and their Neogene reactivation in northern Morocco (the rides pré-rifaines and basin Guercif). Ph. D. Thesis, Rice University, Houston.
- [323].**Web reference:**
<http://modis.gsfc.nasa.gov>
<http://Glovis.gov.ma>
http://Landsathandbook.gsfc.nasa.gov/data_prod/prog_sect11_3.html

ANNEXES

Annexe I

Productions scientifiques

1. Publications

- [1]. *Étude de l'impact des variations pluviométriques sur les fluctuations piézométriques des nappes phréatiques superficielles en zone semi-aride : cas de la Plaine de Saïss (nord du Maroc)* A. **El ibrahimi**, A. Baali, A. Couscous, T. El Kamel. *European Scientific Journal*. Edition vol.11, No.27 Septembre 2015 Page No.64-80.
- [2]. *Suitable location sites for the construction of underground dams or hill lakes by the contribution of GIS: application to the plain of Saïss (North, Morocco)* **A. El ibrahimi**, A. Baali, A. Couscous, T. El kamel, B. Boudad. *International Journal of Engineering Technology and Computer Research (IJETCR)* Volume 3; Issue 2; March-April; 2015, Page No. 225-233
- [3]. *Etude de la sécheresse météorologique : Caractérisation et identification par indices SPI et CMI sous climat semi-aride, cas de la Plaine de Saïss (Nord du Maroc)* **A. El ibrahimi**, Abdennasser BAALI, Amine COUSCOUS & Touria EL KAMEL. *Notes et Mémoires du service géologique du Maroc*
- [4]. *Application of Neural Modeling and the SPI Index for the Prediction of Weather Drought in the Saïss Plain (Northern Morocco)* **A. El ibrahimi**, Abdennasser BAALI. *International Journal of Intelligent Engineering & Systems (IJIES)* Volume 10; Issue 5; July-August-2017; Page No. 1-10.
- [5]. *Comparative study of the three models (ANN-PMC), (DWT-ANN-PMC) and (MLR) for prediction of the groundwater level of the surface water table in the Saïss Plain (North of Morocco)* **A. El ibrahimi**, Abdennasser BAALI, Amine Couscous, Touria El kamel, Nadia Hamdani. *International Journal of Intelligent Engineering & Systems (IJIES)* Volume 10; Issue 5; 2017; Page No. 220-230.
- [6]. *Application of Several Artificial Intelligence Models for Forecasting Meteorological Drought Using the Standardized Precipitation Index in the Saïss Plain (Northern Morocco)*. **A. El ibrahimi**, Abdennasser BAALI, *International Journal of Intelligent Engineering & Systems (IJIES)* Volume 11; Issue 1; July, 2018; Page No. 267-275.
- [7]. *Groundwater level Predicted in the Saïss plain (northern Morocco) using artificial Intelligence techniques* **A. El ibrahimi**, Abdennasser BAALI. *International Journal of Ecology & Development (IJED)*; Volume 33, Issue No. 1; Int. J. Ecol. Dev.; 2018; Page No. 125-137.

2. Communications

1. *Etude préliminaire sur les différentes possibilités d'alimentation de la nappe phréatique superficielle : solution pérenne pour préserver les eaux souterraines, Application à la Plaine de Saïss (Nord, Maroc)* **A. El ibrahimi**, A. Baali, A. Couscous, T. El Kamel. 22^{ème} Colloque International des Bassins Sédimentaires Fès les 18, 19 et 20 décembre 2015
2. *Étude de la sècheresse météorologique : Caractérisation et identification par des indices sous climat de type semi-aride, (Cas de la Plaine de Saïss, Nord du Maroc)* **A. El ibrahimi**, A. Baali, A. Couscous, T. El Kamel. 22^{ème} Colloque International des Bassins Sédimentaires Fès les 18, 19 et 20 décembre 2015
3. *Étude de l'impact des variations pluviométriques sur les fluctuations piézométriques des nappes phréatiques superficielles en zone semi-aride : cas de la Plaine de Saïss (nord du Maroc)* **A. El ibrahimi**, A. Baali, A.

Couscous, T. El Kamel. Colloque international : Application des technologies géospatiales en Géosciences, Faculté Polydisciplinaire de Taza (Maroc), les 21-22 Octobre 2015.

4. Localisation des sites convenables a la construction des barrages souterrains ou lacs collinaires par l'apport d'un SIG : solution pérenne pour préserver les eaux souterraines, Application à la Plaine de Saïss (Nord, MAROC) (orale). A. El ibrahimi, A. Baali, A. Couscous, T. El Kamel. Application des technologies géospatiales en Géosciences, Faculté Polydisciplinaire de Taza (Maroc), les 21-22 Octobre 2015.
5. Étude préliminaire de la gestion et la réutilisation des eaux pluviales et usées dans la ville de Fès A. Couscous, A. El ibrahimi, A. Baali, A. Couscous, T. El Kamel. 22 ème Colloque International des Bassins Sédimentaires Fès les 18, 19 et 20 décembre 2015
6. Étude de la capacité de production sédimentaire du bassin versant du Haut Sebou en amont de la retenue du barrage Allal Al Fassi (Maroc) ». T. El Kamel, A. Baali, A. Couscous, A. El ibrahimi. 22 ème Colloque International des Bassins Sédimentaires Fès les 18, 19 et 20 décembre 2015
7. Contribution des outils SIG à la gestion durable des ressources en eau souterraine dans une région semi-aride Application à la Plaine de Saïss (Nord, MAROC) A. El ibrahimi, A. Baali, A. Couscous, T. El Kamel. 1er Séminaire National, sous le thème : « Disponibilités des données sur l'eau pour les scientifiques, entre enjeux & défis » 28 Novembre. 2015 A la Faculté des Sciences de Rabat
8. Impact des fluctuations climatiques sur la quantité des réserves d'eaux souterraines d'une zone semi-aride : cas de la Plaine de Saïss (nord-Maroc) A. El ibrahimi, A. Baali, A. Couscous, T. El Kamel. 1er Séminaire National, sous le thème : « Disponibilités des données sur l'eau pour les scientifiques, entre enjeux & défis » 28 Novembre. 2015 A la Faculté des Sciences de Rabat
9. Localisation des sites convenables a la construction des barrages souterrains ou lacs collinaires par l'apport d'un SIG : solution pérenne pour préserver les eaux souterraines, Application à la Plaine de Saïss (Nord, MAROC) (par affiche) A. El ibrahimi, A. Baali, A. Couscous, T. El Kamel. Les 1ères Journées Jeunes Chercheurs en Géosciences 2015 Laboratoire de Géologie appliquée, Géomatique & Environnement Faculté des Sciences Ben M'Sik - Université Hassan II de Casablanca, le 20-21 Mars 2015 - Bouznika, MAROC
10. Développement d'un modèle non linéaire basée sur ondelette-ANFIS pour la prévision de la sécheresse météorologiques pour différentes échelles de temps (étude de cas, la Plaine de Saïss MAROC) A. El ibrahimi, A. Baali. La 3ème édition des journées scientifiques nationales du 01 au 03 Mars 2017 à Agadir.
11. Apport de la méthode d'ETP pour le suivi de la sécheresse dans les régions aride à semi-arides (étude de cas, la Plaine de Saïss MAROC) A. El ibrahimi, A. Baali. La 3ème édition des journées scientifiques nationales du 01 au 03 Mars 2017 à Agadir.
12. Comparaison de l'indice de reconnaissance de sécheresse (RDI) et de l'indice de précipitation standardisé (SPI) pour la surveillance de la sécheresse dans les régions arides semi-arides : Cas de la Plaine de Saïss (Nord du Maroc) A. El ibrahimi, A. Baali. La 3ème édition des journées scientifiques nationales du 01 au 03 Mars 2017 à Agadir.
13. Détection de la sécheresse pluviométrique Cas de la Plaine de Saïss (Nord du Maroc) A. El ibrahimi, A. Baali. La 4ème journée d'étude sur la lagune de Nador au 30 Avril 2017 à Nador.

14. Suivi et analyse des séquences de la sécheresse météorologique dans un climat aride à semi-aride, application à la Plaine de Saïss (Nord, Maroc). A. El ibrahimi, A. Baali. 3èmes journées de l'environnement et l'impact de la pollution sur la population et le réchauffement climatiques, 23 Mai à Kénitra.
15. Contribution à l'étude de la sécheresse pluviométrique à l'aide des réseaux de neurones artificiels (RNA). A. El ibrahimi, A. Baali. 3èmes journées de l'environnement et l'impact de la pollution sur la population et le réchauffement climatiques, 23 Mai à Kénitra.
16. Analyse de déficit pluviométrique et son impact sur les réserves d'eaux souterraines d'une région semi-aride : Cas de la Plaine de Saïss (Nord du Maroc) A. El ibrahimi, A. Baali, A. Couscous, T. El Kamel. Le 1ier séminaire national, faculté des sciences Rabat, le 28 novembre 2015.
17. Vers un modèle d'alerte précoce face aux effets de la sécheresse, Cas de la Plaine de Saïss (Nord du Maroc) A. El ibrahimi, A. Baali, A. Couscous, T. El Kamel. Le 1iere rencontre nationale des jeunes géologues, faculté des sciences El Jadida, le 27 et 28 Mai 2016.
18. Prévission de la sécheresse météorologique à l'aide des réseaux de neurones artificiels (RNA), Cas de la Plaine de Saïss (Nord du Maroc) A. El ibrahimi, A. Baali, A. Couscous, T. El Kamel. Le 1iere rencontre nationale des jeunes géologues, faculté des sciences El Jadida, le 27 et 28 Mai 2016.
19. Communication par affiche... A. El ibrahimi, A. Baali, A. Couscous, T. El Kamel. Le 1ireforum des doctorants PR2E, Pôle de recherche eau et environnement, le 23 Novembre 2015 à la faculté des sciences et technique Fès.
20. Application of neural modeling (ANN) and SPI to predict meteorological drought in the plain of Saïss (Northern, Morocco) A. El ibrahimi, A. Baali. The 1rst international colloquium on information technology theory and application, le 18 février 2016, faculté des sciences Moulay Smail Meknès.
21. Modeling of permeability in a semi-arid region in the choice of the best sites suitable for the placement of artificial underground tanks: application to the Saïss Plain (Northern, Morocco) A. El ibrahimi, A. Baali. The international conference "WEEC 2016" 1-4 june 2016 Marrakech, Morocco.
22. Influence of climatic conditions on groundwater resources in semi-arid zone, if the Saïss Plain (Northern, Morocco) A. El ibrahimi, A. Baali. The international conference "WEEC 2016" 1-4 June 2016 Marrakech, Morocco.
23. Simulation de la recharge des eaux souterraines par utilisation de l'indice de sècheresse (SPI) sous un climat semi-aride, application à la Plaine de Saïss (Nord, Maroc). A. El ibrahimi, A. Baali. 5ème colloque international du réseau "Eaux & Climats" FST-Fès, 12-13 Octobre 2016.
24. Analyse et surveillance des eaux d'une nappe phréatique superficielle face aux changements climatique, cas de la Plaine de Saïss (Nord, Maroc). A. El ibrahimi, A. Baali. 5ème colloque international du réseau "Eaux & Climats" FST-Fès, 12-13 Octobre 2016.
25. Modélisation des interactions entre la recharge des eaux souterraines et la sécheresse sous un climat semi-aride, application à la Plaine de Saïss (Nord, Maroc). A. El ibrahimi, A. Baali. Les 2èmes Journées Jeunes Chercheurs en Géosciences 2017 Laboratoire de Géologie appliquée, Géomatique & Environnement Faculté des Sciences Ben M'Sik - Université Hassan II de Casablanca, le 21-22 Avril 2017 - Bouznika, MAROC.

26. *Essai d'une approche connexionniste pour lutter contre la sécheresse météorologique, cas de la Plaine de Saïss (Nord, Maroc).* **A. El ibrahimi**, A. Baali. Les 2èmes Journées Jeunes Chercheurs en Géosciences 2017 Laboratoire de Géologie appliquée, Géomatique & Environnement Faculté des Sciences Ben M'Sik - Université Hassan II de Casablanca, le 21-22 Avril 2017 - Bouznika, MAROC.
27. *La prédiction du niveau des eaux souterraines de la nappe phréatique superficielle ; étude comparative des trois modèles (RNA-PMC), (DWT-RNA-PMC) et (RLM).* **A. El ibrahimi**, A. Baali. Les 2èmes Journées Jeunes Chercheurs en Géosciences 2017 Laboratoire de Géologie appliquée, Géomatique & Environnement Faculté des Sciences Ben M'Sik - Université Hassan II de Casablanca, le 21-22 Avril 2017 - Bouznika, MAROC.
28. *Analyse des données sur les précipitations et la sécheresse sur la période 1979-2014 : cas de Plaine de Saïss (Nord du Maroc).* **A. El ibrahimi**, A. Baali. La 3ème Édition des Journées Doctorales Sciences et Techniques, la faculté des sciences et techniques Errachidia, le 11-12 et 13 Mai 2017, MAROC.
29. *Estimation de l'indice de sècheresse de reconnaissance (RDI) pour la Plaine de Saïss (Nord du Maroc)* **A. El ibrahimi**, A. Baali. La 3ème Édition des Journées Doctorales Sciences et Techniques, la faculté des sciences et techniques Errachidia, le 11-12 et 13 Mai 2017, MAROC.
30. *Application du système d'inférence floue pour la prédiction de la piézométrie dans la Plaine de Saïss (Maroc).* **A. El ibrahimi**, A. Baali. La 2eme édition de la journée scientifique « Géosciences et Management Environnemental » Le 23 mai 2017 à l'Ecole Supérieure de Technologie de Salé, MAROC.
31. *Apport de l'approche statistique pour l'identification des fluctuations des réserves des eaux souterraines face à la sécheresse climatique, cas de la plaine de Saïss (Maroc)* **A. El ibrahimi**, A. Baali. La 2eme édition de la journée scientifique « Géosciences et Management Environnemental » Le 23 mai 2017 à l'Ecole Supérieure de Technologie de Salé, MAROC.
32. *Développement et évaluation d'un indice de sécheresse par application de quatre méthodes ETP dans la plaine de Saïss (Maroc).* **A. El ibrahimi**, A. Baali. La 2eme édition de la journée scientifique « Géosciences et Management Environnemental » Le 23 mai 2017 à l'Ecole Supérieure de Technologie de Salé, MAROC.
33. *Evaluation du potentiel de la décomposition des ondelettes et des techniques d'intelligence artificielle pour la prévision du niveau des eaux souterraines, cas de la Plaine de Saïss (Nord, Maroc).* **A. El ibrahimi**, A. Baali. La 6ème Edition du Congrès International « Eaux, Déchets et Environnement » EDE6 Les 12, 13 et 14 Décembre 2017 à la FST de Béni Mellal, Maroc
34. *Évaluation de l'effet des précipitations effectives pour le calcul des indices de sécheresses dans la Plaine de Saïss (Maroc).* **A. El ibrahimi**, A. Baali. La 2ème Edition des Journées Géologiques du Maroc 2018, les 8et 9 Mai 2018 au Ministère de l'Energie, des Mines et du Développement Durable Rabat, Maroc

Annexe II

Caractéristiques physiographiques

1. Indices de forme

L'idée la plus simple est de comparer le bassin étudié à un bassin de forme standard. C'est ainsi que Gravelius (1861-1938), professeur à l'Université de Dresde (Allemagne), a proposé en 1914 le coefficient de compacité ("compactness coefficient") défini comme le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface (Roche, 1963).

➤ *Surface*

Exprimée en km², elle correspond à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux dans un bassin versant. La surface (S) d'un bassin versant, peut être déterminée à l'aide des techniques de la digitalisation.

➤ *Périmètre*

Exprimé en km, le périmètre (P) représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant, il peut être mesuré à l'aide des logiciels.

2. Indice de compacité de Gravelius

L'indice de compacité (K_G) renseigne sur la forme du bassin versant qui a une grande influence sur l'écoulement global du cours d'eau et surtout sur l'allure des hydrogrammes à l'exutoire du bassin, résultant d'une pluie donnée. Il est établi en comparant le périmètre du bassin à celui d'un cercle qui aurait la même surface. Il s'exprime par la formule suivante (Roche, 1963) :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Où :

K_G : Indice de compacité de Gravelius ;

P : Périmètre stylisé en km du bassin versant, mesuré au curvimètre en estompant les irrégularités de la limite réelle qui n'ont aucune influence sur les écoulements ;

A : Superficie du bassin versant en km².

Cet indice se détermine à partir d'une carte topographique en mesurant le périmètre du bassin versant et sa surface. Il est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongé. Un bassin versant circulaire est mieux drainé qu'un bassin allongé.

3. Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius correspond à une transformation purement géométrique du bassin versant. Il prend alors une forme rectangulaire tout en gardant la même superficie, le même périmètre, le même indice de compacité et donc par conséquent la même répartition hypsométrique. Dans ce cas, les courbes de niveau deviennent parallèles aux côtés du rectangle équivalent. La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau. Plus un rectangle équivalent est allongé moins il sera drainé. Les dimensions du rectangle équivalent sont déterminées par les formules suivantes (Roche, 1963) :

La longueur L :

$$L = \frac{K_G \sqrt{A}}{1,12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right) \quad (\text{Eq. 69})$$

La largeur l :

$$l = \frac{A}{L} \quad (\text{Eq. 70})$$

Avec :

K_G : Indice de compacité de Gravelius ;
 A : Superficie du bassin versant en km^2 ;
 L : Longueur du rectangle équivalent en km ;
 l : Largeur du rectangle équivalent en km.

Le tracé des droites de niveau du rectangle équivalent découle directement de la répartition hypsométrique cumulée.

4. Longueur du cours d'eau principal

La longueur du cours d'eau principal (LOG) est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a un embranchement et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant. Cette distance parcourue est exprimée en km. Si les deux segments à l'embranchement sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface. Autrement dit, c'est la distance mesurée le long du cours d'eau principal depuis l'exutoire jusqu'à la ligne des partages des eaux d'un bassin versant.

5. Pente moyenne

C'est une caractéristique importante des bassins versants qui renseigne sur la topographie. Elle influence sur l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. En effet, plus la pente est forte, plus la durée de concentration des eaux de ruissellement dans les affluents et le cours principal est faible. Les pentes fortes à très fortes peuvent produire des écoulements de nature torrentielle qui sont à l'origine des crues dévastatrices (Roche, 1963). Une valeur approchée de la pente moyenne est alors donnée par la relation suivante :

$$S = \frac{l}{A} \sum Di \quad (\text{Eq. 71})$$

Avec :

S : Pente moyenne du bassin versant en % ;
 l : Largeur du rectangle équivalent en km ;
 Di : Différence de niveau entre deux courbes de niveau consécutives ;
 A : Surface élémentaire en km^2 .

Pour le calcul de cette pente moyenne, on ne tient pas compte de la forme de la courbe hypsométrique. Cette dernière correspond à la superficie entre les courbes de niveau en fonction des altitudes correspondantes. Elle donne une idée sur la pente et l'allure du relief.

6. Densité de drainage

La densité de drainage est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant. Elle correspond pour un bassin versant donné, de superficie A à la longueur totale des cours d'eau d'ordre quelconque sur la superficie totale A . La densité de drainage (D_d) est exprimée en km/km^2 ou en km^{-1} . Elle est donc :

$$D_d = \frac{\sum Li}{A} \quad (\text{Eq. 72})$$

Avec :

Li : Longueur totale des cours d'eau en km
 A : Superficie du bassin versant en km^2 .

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques topographiques du bassin versant et dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et anthropiques.

Annexe III

Evaluation des performances des modèles pour SP-3

Méthode	Données de Validation pour SP-3											
	ANN											
	Stations	Fès-DRH						Ain Bittit				
	Apprentissage		Validation		Test		Apprentissage		Validation		Test	
Modèles	r	RMSE	r	RMSE	r	RMSE	r	RMSE	r	RMSE	r	RMSE
Mod1	6.867	5.45	6.827	3.97	6.992	3.51	6.655	5.38	7.081	4.217	6.992	5.34
Mod2	7.098	4.65	6.603	3.94	7.910	4.33	6.769	5.324	7.320	3.756	7.043	4.98
Mod3	7.168	4.23	7.528	4.03	7.210	5.58	7.110	4.894	7.713	3.14	7.316	4.64
Mod4	7.420	3.74	7.436	5.22	7.001	5.53	7.097	4.749	7.828	4.01	7.798	4.04
Mod5	7.709	3.50	7.992	3.62	7.225	5.79	7.195	4.17	6.946	5.88	8.214	5.41
Mod6	7.382	4.51	6.799	5.26	5.982	7.06	7.874	3.85	6.239	6.20	5.240	5.91
Mod7	4.489	7.39	4.52	7.22	4.781	6.91	4.373	8.10	4.883	6.09	4.440	7.47
Mod8	4.721	6.85	4.249	7.20	4.842	8.347	5.036	7.01	3.416	8.37	4.188	8.68
Mod9	4.558	7.35	5.679	5.283	5.826	7.02	4.070	7.99	5.535	6.69	5.596	7.27
Mod10	4.614	7.295	5.832	6.69	5.367	6.33	5.444	6.80	3.355	9.65	3.743	7.51
Mod11	5.138	6.60	4.838	7.458	6.151	6.321	4.681	7.59	5.723	8.37	5.129	7.31
Mod12	4.634	7.37	4.985	7.104	4.450	9.99	5.040	7.42	3.655	8.87	4.163	6.74
Mod13	7.215	4.49	7.085	4.438	7.030	4.383	7.365	4.440	6.821	4.586	7.125	4.916
Mod14	7.065	4.52	7.401	4.229	7.722	3.325	7.452	4.518	7.150	4.198	6.895	4.269
Mod15	7.715	3.61	7.301	4.904	7.879	3.403	7.746	3.949	7.896	3.080	7.765	3.956
Mod16	7.509	4.128	7.018	4.480	7.498	3.652	7.412	4.600	6.774	4.892	7.256	4.217
Mod17	8.043	3.140	8.091	3.974	7.527	3.917	7.947	3.734	7.595	3.969	8.132	2.687
Mod18	7.560	3.880	7.751	4.113	7.333	4.526	7.539	4.446	6.356	6.158	7.056	3.753
Mod19	7.476	4.202	7.511	3.809	7.995	3.621	8.189	3.370	7.555	4.466	6.761	5.352
Mod20	7.343	4.352	7.170	4.650	7.244	3.893	7.809	3.824	6.972	4.726	7.172	4.779

Annexe IV

Avantages et inconvénients des modèles utilisés

(Jalalkamali & al., 2014)

Méthodes	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
ANN	Nécessitant une formation statistique moins formelle, ayant la capacité de détecter implicitement des relations non linéaires complexes entre des variables dépendantes et indépendantes, ayant la capacité de détecter toutes les interactions possibles entre les variables prédictives et d'avoir accès à de multiples algorithmes d'apprentissage	Être d'une nature « boîte noire », un coût informatique plus élevé, la tendance à l'ajustement excessif, et la nature empirique du développement du modèle
ANFIS	Il existe un besoin d'adaptabilité ou d'algorithmes d'apprentissage pour produire des sorties, tandis qu'une combinaison de systèmes ANN-MLP et flou, appelée système Neural-Fuzzy, est capable d'éliminer les problèmes de base dans la conception de systèmes flous (générer un ensemble de règles floues if-then), En utilisant la capacité d'apprentissage d'une ANN-MLP pour la génération automatique de règles if-then et l'optimisation des paramètres	ANFIS est sensible au nombre initial de règles floues (nombre de grappes), la complexité du calcul se développe à mesure que le nombre de règles floues augmente
SVM	D'abord, il a un paramètre de régularisation, ce qui rend l'utilisateur conscient d'éviter le trop-ajustement. Deuxièmement, il utilise le truc du noyau, de sorte qu'il peut être construit connaissances spécialisées sur le problème grâce à l'ingénierie du noyau. Troisièmement, une SVM est définie par un problème d'optimisation convexe (pas de minima local), pour lequel il existe des méthodes efficaces. Quatrièmement, il s'agit d'une approximation d'une limite sur le taux d'erreur d'essai, et il ya un corpus substantiel de la théorie derrière elle, ce qui suggère que c'est une bonne idée	La plus grande limitation de l'approche du vecteur support réside dans le choix du noyau. La deuxième limite concerne la vitesse et la taille, tant au stade d'apprentissage que du test. Bien que les SVM aient une bonne performance de généralisation, elles peuvent être significativement lentes dans la phase de test