

Université Cadi Ayyad
Faculté des Sciences et Techniques
Marrakech



Département des Sciences de la Terre

Laboratoire de Géorressources-Unité
associée au CNRST (URAC42)
Département des Sciences de la Terre
Faculté des Sciences et Techniques
Guéliz
Université Cadi Ayyad



Mémoire de Stage de Fin d'Etudes

Master Sciences et Techniques Eau et Environnement



Apport de la modélisation hydrologique dans la caractérisation de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau au niveau du bassin versant de l'Oued El Abid (Haut Atlas Central, Maroc)

Par :

El Mahdi EL KHALKI

Sous la direction de :

L. HANICH – Professeur à la FSTG de Marrakech
Y. TRAMBLAY – Chargé de la recherche à l'IRD Montpellier
A. BOUDHAR – Professeur à la FST de Béni Mellal

Soutenu le 15 juin 2015 devant la commission d'examen composée de :

L. HANICH – Encadrant interne
Y. TRAMBLAY – Encadrant externe
A. BOUDHAR – Encadrant externe
N. LAFTOUHI - Examineur
M.M. SAIDI – Président

2014/2015

Dédicace :

C'est avec un grand honneur que je dédie ce travail aux personnes les plus chères au monde mes chers parents que Dieu les protège, en témoignage de ma profonde affection. Qu'ils sachent que ce travail est en partie le fruit de leur soutien ; je leur suis très reconnaissant. Rien n'aurait été possible sans eux, cette réussite est donc un peu la mienne, mais surtout beaucoup la leur. Leur fierté à mon égard aujourd'hui est pour moi la meilleure des récompenses. Aucun remerciement ne serait être suffisant, également à mes sœurs Lamya et Chaïmaâ.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce présent travail.

Mes sincères remerciements vont à Monsieur **Lahoucine HANICH** professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech, mon encadrant interne, pour son assistance perpétuelle, son appui, ses judicieux conseils, sa confiance et aussi sa sympathie qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.

Un merci tout particulier à Monsieur **Yves TRAMBLAY** chercheur à l'IRD de Montpellier, encadrant externe, qui m'a fait bénéficier de son savoir, ses opinions, ses conseils, ses explications et ses critiques qui ont alimenté et enrichi ce travail.

Je remercie chaleureusement Monsieur **Abdelghani BOUDHAR** professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Béni Mellal, encadrant externe, pour la proposition du sujet, pour ses conseils, sa lecture et ses remarques et surtout pour la confiance qu'il m'a gracieusement accordée.

Les remerciements vont aussi à Monsieur **Bouchaib HAKKANI**, chef du service hydrologie de surface à l'Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia, Béni Mellal, pour m'avoir communiqué toutes les données nécessaires pour mener à bien ce travail.

J'exprime mes reconnaissances envers Monsieur **Yahia EL KHALKI** professeur à la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines de Béni Mellal qui a eu la gentillesse de lire, proposer des idées et corriger ce travail.

Aussi je remercie tous mes professeurs de la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech du département des Sciences de la Terre de m'avoir formé au cours de mon cursus universitaire.

Je ne saurai terminer sans exprimer mes remerciements les plus fidèles à mes chers parents pour leur soutien, leur patience et leur contribution de loin ou de près dans la réalisation de ce travail.

Et sans oublier à la fin tous mes proches et mes amis de la promotion du master « Eau et Environnement », qui m'ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce projet de fin d'études.

Un grand Merci à toutes et à tous.

Table des matières

TABLE DES MATIERES	5
RESUME	10
ABSTRACT	11
INTRODUCTION	12
CHAPITRE I : PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE L'OUED EL ABID (BVOA) ET DONNEES DISPONIBLES	13
I- PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	13
I – 1 : <i>Relief</i>	13
I – 2 : <i>La géologie</i>	16
II - DONNEES HYDROMETRIQUES DISPONIBLES	18
II-1 : <i>Variation temporelle des précipitations</i>	18
II – 2 : <i>Les données « pluie » issues des satellites</i>	20
II – 3 : <i>Variation de la neige</i>	20
II – 4 : <i>Variation temporelle des débits</i>	21
II – 5 : <i>Variation temporelle des Températures</i>	23
CHAPITRE II : METHODOLOGIE ET TRAITEMENT DES DONNEES	25
I - LES MODELES UTILISES	25
I – 1 : <i>Le modèle GR2M</i>	25
I – 2 : <i>Modèle Thornthwaite</i>	26
I – 3 : <i>Modèle d'Oudin : calcul de l'évapotranspiration potentielle</i>	28
I – 4 : <i>Modèle degrés jour</i>	28
II - CRITERE DE MESURE DE ROBUSTESSE	28
II – 1 : <i>Critère de Nash</i>	28
II – 2 : <i>Le bilan</i>	29
II - TRAITEMENT DES DONNEES HYDRO-CLIMATIQUES	29
II – 1 : <i>Corrélation pluie-débit</i>	29
II – 2 : <i>La pluie</i>	30
II – 3 : <i>La neige</i>	31
II – 4 : <i>Le débit</i>	32
II – 5 : <i>La température</i>	33
CHAPITRE III : APPLICATION DES MODELES HYDROLOGIQUES	35
I - APPLICATION DU MODELE GR2M	35
I – 1 : <i>Niveau du sous bassin versant d'Ait Ouchène</i>	35
I – 2 : <i>Niveau du sous bassin versant de Tillouguite</i>	37

I – 3 : Niveau du bassin versant de l'Oued El Abid-----	38
II - APPLICATION DU MODELE THORNTHTWAITE-----	39
II – 1 : Niveau du sous bassin d'Ait Ouchène-----	39
II – 2 : Niveau du sous bassin versant de Tillouguite-----	41
II – 3 : Niveau du Bassin versant d'Oued El Abid :-----	42
III– CALIBRATION ET VALIDATION-----	44
III – 1 : Modèle GR2M :-----	44
III– 2 : Modèle Thornthwaite :-----	45
IV- COMPARAISON DES DEUX MODELES-----	48
IV – 1 : Sous bassin versant d'Ait Ouchène-----	48
IV – 2 : Sous bassin versant de Tillouguite-----	48
IV – 3 : Bassin versant de l'Oued El Abid-----	48
CHAPITRE IV : PROJECTIONS CLIMATIQUES ET IMPACT SUR LES RESSOURCES	
EN EAU-----	49
I - MODELE ET SCENARIO CLIMATIQUE-----	49
I – 1- Modèle climatique global-----	49
I – 2 - Scénarios climatiques-----	50
II - SIMULATION REGIONALE DU CLIMAT-----	50
III - L'IMPACT DES CHANGEMENTS DES PROJECTIONS CLIMATIQUES SUR L'HYDROLOGIE-----	53
CONCLUSION-----	54
RÉFÉRENCES-----	55

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : SITUATION DU BASSIN DE L'OUED EL ABID PAR RAPPORT AU GRAND BASSIN DE L'OUED EL RBIA ET A L'ECHELLE DU MAROC ET LES DIFFERENTES TRANCHES D'ALTITUDE.....	14
FIGURE 2 : LA COURBE HYPOMETRIQUE DES TROIS BASSINS VERSANTS	15
FIGURE 3 : CARTE GEOLOGIQUE ET STRUCTURALE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED EL ABID (D'APRES BISSOUR R. ET AL, 2015).	17
FIGURE 4 : LA VARIATION DE LA PLUIE MOYENNE INTERANNUELLE AU NIVEAU DES QUATRE STATIONS DU BVOA	19
FIGURE 5: VARIATION DES PRECIPITATIONS MENSUELLES DES QUATRE STATIONS	20
FIGURE 6 : VARIATION INTERANNUELLE DE LA HAUTEUR DE LA NEIGE MOYENNE AU NIVEAU DE LA STATION DE TICHKI [2001 - 2010]	21
FIGURE 7 : VARIATION MOYENNE INTERANNUELLE DES DEBITS DES QUATRE STATIONS.....	22
FIGURE 8: DEBIT MOYEN MENSUEL DES QUATRE STATIONS	23
FIGURE 9 : VARIATION MOYENNE INTERANNUELLE DE LA TEMPERATURE DE LA STATION DE TILLOUGUITE ET DE TICHKI.....	24
FIGURE 10 : VARIATION MOYENNE MENSUELLE DE LA TEMPERATURE DE LA STATION DE TILLOUGUITE ET DE TICHKI.....	24
FIGURE 11 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DU MODELE GR2M	26
FIGURE 12: LA RELATION PLUIE-DEBIT AU NIVEAU DES STATIONS SITUÉES A L'EXUTOIRE DES DEUX SOUS BASSINS VERSANTS	29
FIGURE 13: COMPARAISON DES ENREGISTREMENTS SATELLITES DE PLUIE ET LES DEUX METHODES D'INTERPOLATION AU NIVEAU DE BVOA [2001 - 2010]	31
FIGURE 14: CONTRIBUTION DES SOUS BASSINS VERSANTS AUX APPORTS DU BARRAGE BIN EL OUIDANE.....	33
FIGURE 15: VARIATION DE LA TEMPERATURE MOYENNE MENSUELLE DE L'AIR EN FONCTION DE L'ALTITUDE	33
FIGURE 16 : CARTE DE TEMPERATURE MOYENNE (2001 – 2011) AU NIVEAU DU BASSIN VERSANT DE L'OUED EL ABID.....	34
FIGURE 17 : CALIBRATION DES DEBITS OBSERVES ET DES DEBITS SIMULES DU BASSIN VERSANT D'AIT OUCHENE.....	35
FIGURE 18: RESULTAT DE SIMULATION DE DEBIT AU BASSIN VERSANT D'AIT OUCHENE AVEC LA PARTIE NEIGE [1985-2011]	36
FIGURE 19: SIMULATION DES DEBITS A PARTIR DES PLUIES INTERPOLEES SUR LE BASSIN VERSANT DE TILLOUGUITE [1985 - 2011].....	37
FIGURE 20: SIMULATION DES DEBITS A PARTIR DES PLUIES INTERPOLEES DANS LE SOUS BASSIN VERSANT DE TILLOUGUITE [1985 - 2011]	38
FIGURE 21: SIMULATION DES DEBITS MOYENS MENSUELS AU NIVEAU DU BARRAGE "BASSIN DE L'OUED EL ABID" [1985 - 2011].....	38
FIGURE 22: SIMULATION DES DEBITS MOYENS MENSUELS AU NIVEAU DU SOUS BASSIN VERSANT D'AIT OUCHENE.....	39
FIGURE 23: SIMULATION DES DEBITS MOYENS MENSUELS AU NIVEAU DU BASSIN VERSANT D'AIT OUCHENE [1989 - 2010]	40

FIGURE 24: SIMULATION DES DEBITS MOYENS MENSUELS DU BASSIN VERSANT DE TILLOUGUITE....	41
FIGURE 25: SIMULATION DES DEBITS MOYENS MENSUELS AU NIVEAU DU BASSIN VERSANT DE TILLOUGUITE	42
FIGURE 26: SIMULATION DES DEBITS MOYENS MENSUELS AU NIVEAU DU BVOA	42
FIGURE 27: LE CYCLE SAISONIER DES PRECIPITATIONS, DE LA TEMPERATURE ET DE L'ETP	51
FIGURE 28: LA MOYENNE MENSUELLE DES PRECIPITATIONS AVEC LES SIMULATIONS DE RCM SUR LES 3 HORIZONS DE TEMPS	52
FIGURE 29: LES MOYENNES MENSUELLES DE L'ETP GENEREES PAR LES DEUX SCENARIOS D'EMISSION D'EFFET DE SERRE SUR LES TROIS HORIZONS DE TEMPS	52
FIGURE 30: LES MOYENNES MENSUELLES DE LA TEMPERATURE GENEREE PAR LES DEUX SCENARIOS D'EMISSION D'EFFET DE SERRE	53
FIGURE 31: SIMULATION DES DEBITS A PARTIR DES PRECIPITATIONS ET ETP PROJETES SUR LA PERIODE 2040 - 2060	53

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : CARACTERISATION MORPHOLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS-----	15
TABLEAU 2 : LES CARACTERISTIQUES DES STATIONS ET LEURS CHRONIQUES : -----	18
TABLEAU 3 : RECAPITULATIF DES DONNEES MENSUELLES DES QUATRE STATIONS : -----	20
TABLEAU 4 : RESULTAT DE CORRELATION PLUIE - DEBIT AU NIVEAU DES QUATRE STATION -----	30
TABLEAU 5 : MATRICE DE CORRELATION ENTRE LES DONNEES DES PLUIES MOYENNES MENSUELLES OBSERVEES, INTERPOLEES ET LES PLUIES SATELLITES A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT D'OUED EL ABID-----	30
TABLEAU 6: CONTRIBUTION DES DEUX SOUS BASSINS VERSANTS AUX APPORTS DU BARRAGE BIN EL OUIDANE -----	32
TABLEAU 7: CRITERES D'EFFICACITES DU MODELE GR2M-----	35
TABLEAU 8: CRITERES D'EFFICACITES DU MODELE GR2M AVEC DONNEES NEIGE-----	36
TABLEAU 9: PARAMETRES D'EFFICACITE DE LA SIMULATION -----	37
TABLEAU 10: PARAMETRES D'EFFICACITE DE LA SIMULATION-----	38
TABLEAU 11: PARAMETRES D'EFFICACITE DE LA SIMULATION : -----	39
TABLEAU 12: SIMULATION DES DEBITS DU SOUS BASSIN VERSANT D'AIT OUCHENE ET LES DIFFERENTS PARAMETRES OPTIMISES AUTOMATIQUEMENT-----	39
TABLEAU 13: SIMULATION DES DEBITS MOYENS MENSUELS AVEC DES PLUIES MODIFIEES AU NIVEAU DU BASSIN VERSANT D'AIT OUCHENE-----	40
TABLEAU 14 : LES PARAMETRES DE SIMULATION DES DEBITS, ET LES CRITERES D'OBJECTIFS -----	41
TABLEAU 15: LE RESULTAT DE SIMULATION DES DEBITS MOYENS MENSUELS ET LES PARAMETRES CALIBRES -----	42
TABLEAU 16: RESULTAT DE LA SIMULATION DES DEBITS AU NIVEAU DU BVOA -----	42
TABLEAU 17: RESULTAT DE L'APPLICATION DU MODELE THORNTHWAITE AVEC LES PARAMETRES PAR DEFAUT RECOMMANDES PAR LE MODELISATEUR AU NIVEAU DES TROIS BASSINS -----	43
TABLEAU 18 : RESULTAT DE CALIBRATION ET VALIDATION DES PARAMETRES DU MODELES GR2M AU NIVEAU DES TROIS BASSINS VERSANTS-----	44
TABLEAU 19: RESULTAT DE CALIBRATION ET VALIDATION DU MODELE THORNTHWAITE AU NIVEAU DES TROIS BASSINS-----	46
TABLEAU 20: RESULTAT DE CALIBRATION VALIDATION DES PARAMETRES DU MODELE THORNTHWAITE SUR LES DEUX BASSINS VERSANTS -----	47
TABLEAU 21: CORRELATION ENTRE LES DEBITS OBSERVES ET SIMULE DU MODELE THORNTHWAITE ET CEUX DU MODELE GR2M-----	48
TABLEAU 22: CORRELATION ENTRE LES DEBITS OBSERVES, SIMULES DU MODELE THORNTHWAITE ET CEUX DU MODELE GR2M -----	48
TABLEAU 23: CORRELATION ENTRE LES DEBITS OBSERVES, SIMULES DU MODELE THORNTHWAITE ET CEUX DU MODELE GR2M -----	48

Résumé

Les régions méditerranéennes sont considérées comme un milieu où les changements climatiques peuvent impacter les ressources naturelles en général et la ressource en eau en particulier. Mais vu la situation géographique du Maroc qui subit les influences sahariennes, ces changements peuvent avoir des impacts considérables sur son territoire qui dépend beaucoup de l'agriculture et surtout de la disponibilité des ressources en eau qui devient de plus en plus rare. C'est dans ce contexte marqué par l'irrégularité spatio-temporelle des précipitations que cette étude du Bassin versant de l'Oued El Abid vient apporter sa contribution pour caractériser et quantifier la ressource en eau. Ce travail de recherche fait appel à la modélisation pluie-débit via deux modèles : GR2M et Thornthwaite qui sont validés sur différentes périodes.

Nous avons testé et validé les projections de quatre modèles climatiques régionaux (RCM), d'une résolution de 12km, pour évaluer les changements climatiques au niveau du BVOA. Les simulations ont montré une diminution de -16 à -32% des débits selon le modèle utilisé. Nous avons montré aussi que les résultats obtenus sont cohérents avec ceux obtenus par différentes études à l'échelle nationale (-20% des précipitations, -30 à -57% des ressources en eau et +2°C en température) et à l'échelle de la méditerranée (-50% des ressources en eau).

Mots clés : Changements climatiques – Précipitations – températures – Evapotranspiration – Modèles hydrologiques – GR2M – Thornthwaite – Modèles climatiques – Bassin versant – Oued El Abid – Haut Atlas central – Maroc.

Abstract

The Mediterranean regions are considered as an environment where climate change can impact on natural resources generally and on the resource in water in particular. But the geographical situation of Morocco which undergoes the Saharan influences, these changes can have considerable impacts on his territory which depends many of the agriculture and especially the availability of the water resources which becomes more and rarer. It is in this context marked by the spatiotemporal irregularity of the precipitation that this study of the BVOA comes to make its contribution to characterize and quantify the resource in water. This research work calls on the modeling rain-flow via two models: GR2M and Thornthwaite who are validated over various periods

We tested and validated four regional climatic models (RCM), of a resolution of 12km, to estimate climate change at the level of the BVOA. The simulations showed a decrease from 16 to 32 % of the flows according to the used model. We also showed that the obtained results are coherent with those obtained by various studies on a national scale (-20 % of the precipitation, -30 in -57 % of water resources and +2°C in temperature) and on the scale of the Mediterranean (-50 % of water resources).

Key words: Climate change – Precipitations –temperature – Evapotranspiration – hydrologic models – GR2M – Thornthwaite – Climatic models – Watershed – Oued El Abid - Central High Atlas - Morocco

INTRODUCTION

Au cours du dernier siècle, l'accroissement des populations, le développement économique et les progrès des procédés industriels ont généré des émissions très importantes de gaz à effet de serre issus des combustibles fossiles, influençant d'une façon directe ou indirecte le climat actuel et les ressources naturelles.

Au Maroc, ce problème a une importance majeure et fait l'objet de plusieurs débats nationaux sur l'avenir de la ressource en eau, surtout que le Maroc dépend du secteur agricole comme pilier de son économie. Ce secteur va souffrir en premier du réchauffement climatique car il dépend essentiellement des eaux d'irrigation stockées au niveau des barrages ou drainer par des canaux d'irrigation, tel que le périmètre irrigué de Tadla qui dépend essentiellement des eaux du barrage de Bin El Ouidane. Ce dernier assure, non seulement l'irrigation, mais aussi l'alimentation en eau potable pour plusieurs villes et la production de l'électricité.

Cette problématique nous a amené à penser aux ressources en eau futures au niveau du bassin versant de l'oued El Abid (BVOA). Pour bien caractériser et quantifier cette ressource, deux modèles hydrologiques (pluie-débit) ont été testés et validés, à savoir GR2M (Mouelhi, 2006) et Thornthwaite (U.S. Geological Survey, 2007). Ces deux modèles vont être forcés par des données futures issues des scénarios climatiques projetées sur la zone d'étude.

L'objectif du présent travail est d'étudier la disponibilité des ressources en eau en lien avec les changements climatiques au niveau du BVOA afin d'aider les gestionnaires à mieux gérer les ressources en eau. Pour cela et durant le premier chapitre, une description de la zone d'étude sera traitée pour essayer d'identifier les différents facteurs et processus influençant le fonctionnement hydrologique de l'oued El Abid, à savoir, le relief et la géologie. Les données hydro-climatiques obtenues auprès de l'Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia seront analysées.

Le deuxième chapitre présentera les différents modèles utilisés (GR2M, Thornthwaite, Oudin...) au cours de ce travail ensuite le traitement des données à savoir l'interpolation et les calculs effectués sur les données pour qu'elles soient utilisables au niveau des modèles hydrologiques

Le troisième chapitre portera sur l'application des modèles pluie-débit et leurs validations sur différentes périodes.

Le quatrième chapitre décrira, la variabilité des précipitations, de la température et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) issues des modèles climatiques régionaux et les projections futures des débits via le forçage des modèles testés et validés par des données des scénarios climatiques projetés sur le BVOA.

CHAPITRE I : PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE L'OUED EL ABID (BVOA) ET DONNEES DISPONIBLES

Au cours de ce chapitre, on va présenter tout d'abord la zone d'étude, ses caractéristiques topographiques et géologiques. Ensuite, les données hydro-climatiques seront aussi analysées et commentées. Cela va nous donner une idée sur les facteurs qui sont susceptible d'influencer le fonctionnement hydrologique du BVOA. Cependant, l'objectif final de ce travail est d'étudier le bilan et le devenir des ressources en eau au niveau du BVOA, afin d'aider les gestionnaires à mieux gérer les ressources en eau dans un contexte hydro-climatique marqué par l'irrégularité spatio-temporelle. Pour atteindre nos objectifs deux modèles hydrologiques différents au pas de temps mensuel ont été testés et validés. Pour cela, nous avons collecté les données de 11 stations hydro-climatiques ; mais nous avons utilisé uniquement les données de 4 stations situées à l'intérieur du bassin versant pour avoir une meilleure représentativité des conditions climatiques dudit bassin.

I- Présentation de la zone d'étude

Le BVOA est un sous bassin de l'oued Oum Er Rbia (30600 km²). L'Oued El Abid est le tributaire le plus important de l'Oum Er Rbia, avec un débit moyen annuel de 32 m³/sec., un débit moyen maximum de 77 m³/sec. Un débit moyen minimum de 10 m³/sec (Atlas régional région Tadla Azilal Maroc, 2015). Le régime de ce cours d'eau fait alterner des crues brutales et des étiages soutenus par les eaux issues des hydrosystèmes karstiques du Haut Atlas central.

Le barrage de Bin El Ouidane (Figure 1), mis en service en 1953 sur l'oued El Abid, assure plusieurs fonctions :

- Irrigation de plus de 69500 Ha de la plaine de Tadla, périmètre de Béni Moussa, en rive gauche de l'oued Oum Er Rbia,
- Production d'énergie électrique,(2/3 de la production nationale)
- Alimentation en eau potable pour plusieurs villes marocaines à savoir la ville de Marrakech alimentée par le canal de la Rocade, Casablanca, Berrchid...
- Et actuellement la fonction touristique (sport nautique, pêche, randonnée...etc)

Ce barrage a une capacité totale de stockage de 1500 millions de m³ pour un bassin versant de 6400 km². Il est considéré comme le barrage le plus important au Maroc.

I – 1 : Relief

Le relief du bassin versant de l'oued El Abid est marqué par trois formes de relief, à savoir, les massifs montagneux, les plateaux et les dépressions :

Les plateaux : le plus caractéristique est celui d'Ait Abdi qui se situe sur une tranche altitudinale qui varie de 2200 à 3000m. Sa caractéristique vient d'un développement remarquable d'une morphologie karstique qualifiée de « karst en vagues » (Couvreur, 1978 et Perritaz, 1995). Le deuxième plateau qui marque également le BVOEA est le plateau des lacs, Isly et Tislit, à Imilchil. Ce plateau est dominé par Jbel Bab n'Ouayad.

Au Sud-Ouest, le plateau d'Aït M'hamed (ou d'Azilal), qui est en fait un synclinal à fond plat où prédominent les calcaires du Dogger. Ce plateau s'élève à des altitudes qui varient entre 1700 et 2600 m et se marque par une morphologie de canyon surtout dans la zone de Wabzaza à Aït M'Hamed.

Quant à la montagne, elle se présente comme des massifs très escarpés et entaillés par de véritables gorges, constituant ainsi des vallées très profondes. Parmi les bassins où la montagne est présente, on trouve le sous bassin versant de l'Assif Ahansal qui comporte des massifs élevés qui culminent à 3677 m au jbel Azourki, les massifs de Tizzal (3050m), de l'Irhil n'Ait Ouariat (2923m), et du jbel Aioui (3360m). Les massifs du jbel Mourik (3300 m), les crêtes d'Idroute, du chito, Ijberten (2700 m) et Jbel Issoual (2800 m) forment une barrière élevée et compacte qui marque le paysage de cette partie du Haut Atlas central.

Les plateaux et les massifs montagneux sont les zones du bassin qui reçoivent la plus importante couverture neigeuse qui peut durer jusqu'à 3 mois (Couvreur, 1978).

Quant aux dépressions et cuvettes, elles s'étendent essentiellement le long des oueds et prennent parfois la forme de vallées évasées marquées par une agriculture irriguée. Ces dépressions correspondent parfaitement aux synclinaux, comme le synclinal d'Ouaouizight où se trouve le barrage de Bin El-Ouidane, et celui de Ben Charou.

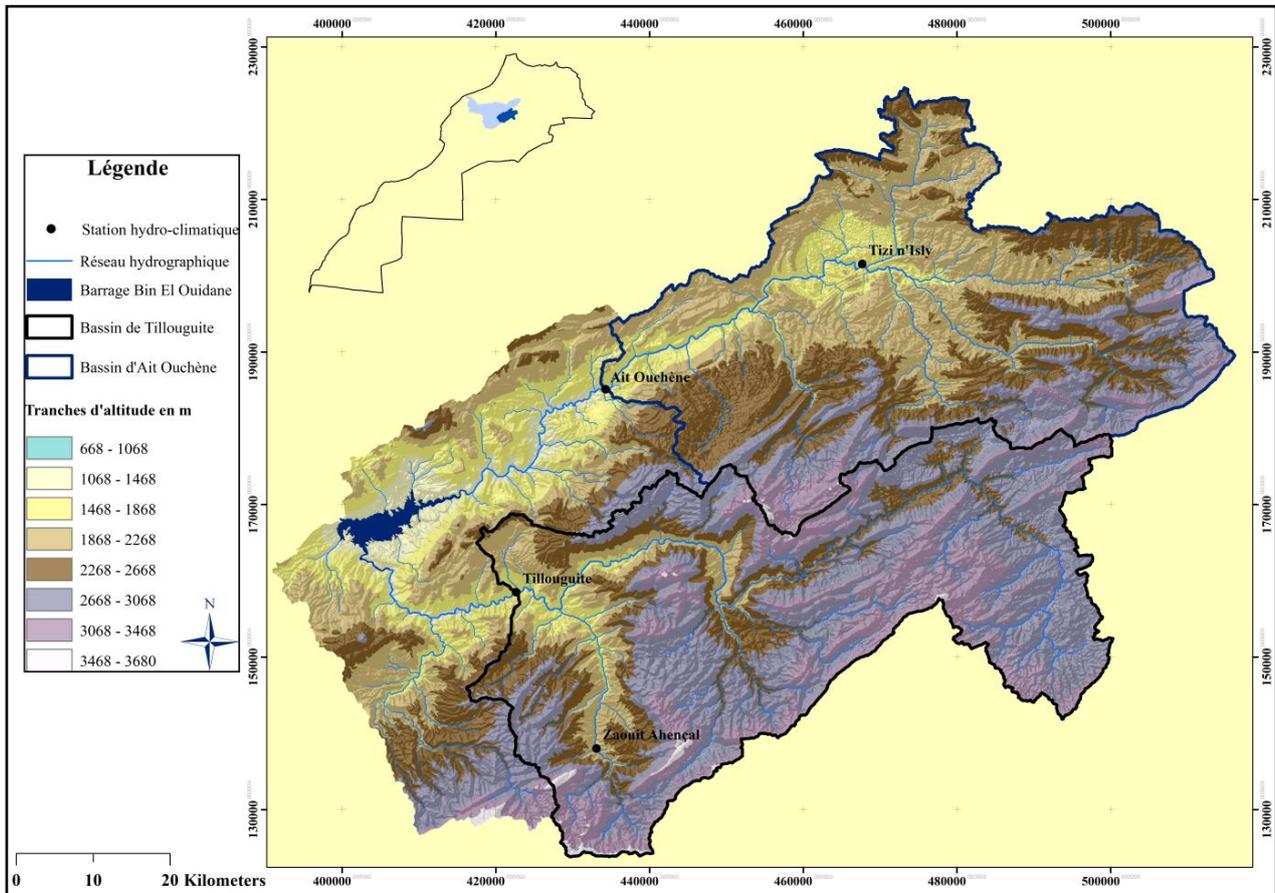


Figure 1 : Situation du bassin de l'Oued El Abid par rapport au grand bassin de l'Oum Er Rbia et à l'échelle du Maroc et les différentes tranches d'altitude

Le bassin versant d'Oued El Abid est composé de deux principaux sous bassins à savoir, le sous bassin d'Ait Ouchène et celui de Tillouguite (Tableau 1).

Tableau 1 : Caractérisation morphologique des bassins versants

<i>Bassin versant</i>	Surface (km²)	Périmètre (km)	Altitude min	Altitude max	Altitude moyenne	Oued principal
Oued El Abid	6520	515	668	3680	2021	Oued El Abid
Ait Ouchène	2450	322	961	3235	1945	Ait ouchène
Tillouguite	2500	350	1067	3427	2350	Ahençal

Les deux sous bassins versants ont pratiquement la même surface et couvrent 76% de la surface totale du bassin versant. Vu l'importance de ces deux sous bassins en termes de superficie, nous sommes obligés de les prendre en considération pour la modélisation pluie-débit (Figure 1).

Il ressort de la Figure 1 que le sous bassin de Tillouguite possède des tranches altitudinales élevées où prédominent les tranches supérieures à 2200m. Par contre, le sous bassin d'Aït Ouchène se caractérise dans l'ensemble par des tranches d'altitudes assez modestes.

Dans les études hydrologiques la connaissance de l'hypsométrie du bassin versant est un élément élément fondamental, car les caractères du climat et le fonctionnement hydrologique sont influencés par l'altitude.

Figure 2 nous permet de voir comment se répartissent les altitudes en fonction de leur surface et aussi d'identifier les tranches les plus dominantes et les plus représentatives au niveau du bassin. Le sous bassin versant de Tillouguite a une altitude de 3000m considérée comme dominante, pour le sous bassin versant d'Ait Ouchène, l'altitude dominante est 2600m et le bassin versant de l'Oued El Abid, l'altitude dominante est 3400m.

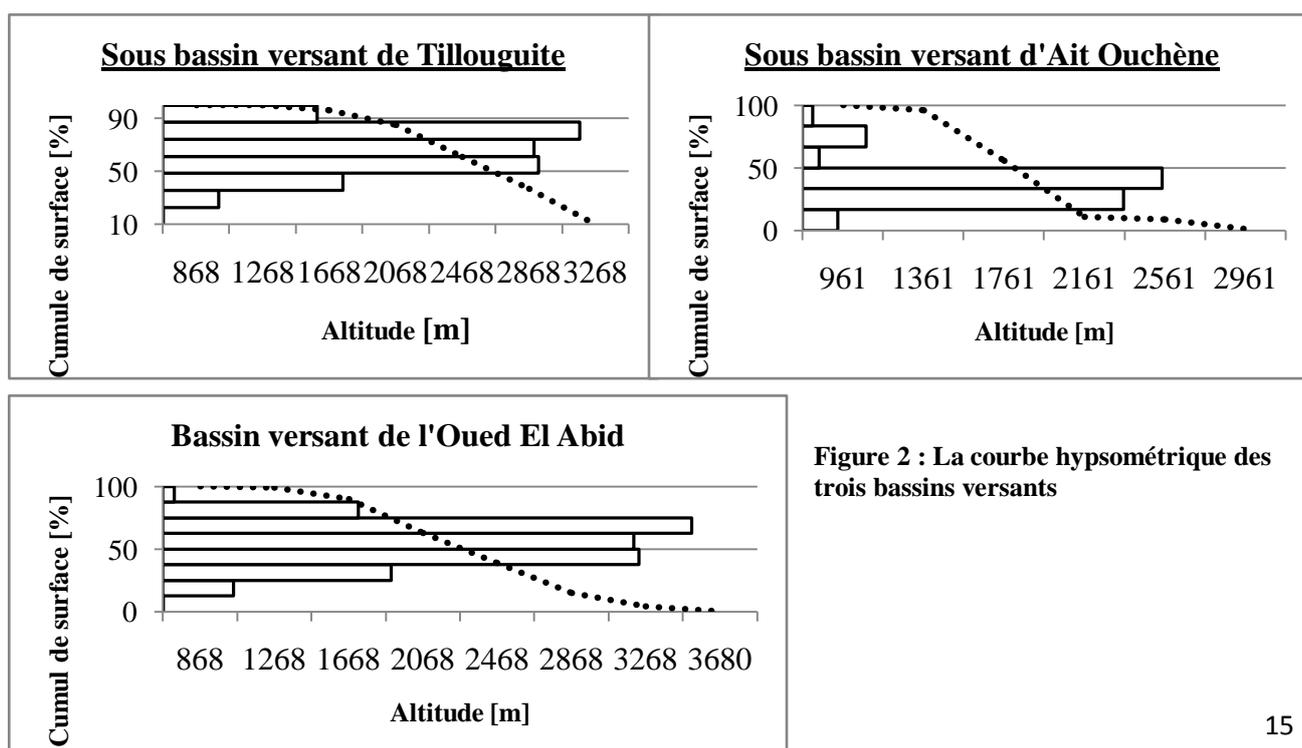


Figure 2 : La courbe hypsométrique des trois bassins versants

I – 2 : La géologie

Le Trias est constitué essentiellement d'argile rose riche en sel et de basaltes doléritiques. Il affleure au centre et au sud du bassin et il est toujours marqué par des failles importantes qui sont à l'origine de son affleurement (figure 3).

Le Jurassique constitue le système qui couvre la quasi-totalité du bassin versant. La masse carbonatée (calcaires et dolomies du Lias inférieur) affleure largement dans le BVOE et joue un rôle important dans le développement des formes karstiques et constitue en même temps l'aquifère principal qui soutient les oueds en période d'étiage.

La série de Lias moyen et supérieur est constituée essentiellement d'une alternance de roches calcaires, marnes et calcaires marneux. Puis une nouvelle série de calcaires et marnes avec du grès appartenant à l'Aalénien supérieur et Dogger (Dogger Marin). Signalons de même, la présence de coulées basaltiques interstratifiées du Jurassique et assez épaisses dans les « couches rouge ». D'autres roches intrusives magmatiques et des sills (gabbros, dolérites, etc...) se trouvent surtout dans la série carbonatée bajocienne. Enfin notons qu'au Jurassique moyen la mer se retire de l'Atlas, pour n'y revenir qu'à l'Aptien. Elle n'atteint le domaine étudié qu'au Cénommanien (Bahzad, 1985).

Le crétacé, d'extension réduite, offre une série classique à trois termes : grès et marnes rouges (Crétacé inférieur) – marnes bariolées (cénommanien) – calcaire (Turonien) et s'achève par des formations continentales rouges du Crétacé supérieur (Combe, 1977).

Le Quaternaire, quant à lui, il est représenté par des formations continentales, conglomérats, éboulis et alluvions qu'on trouve le long des vallées et sur les versants.

D'un point de vue tectonique, le BVOE fait partie de la chaîne atlasique (Haut Atlas central) où le style alpin est le plus dominant : une alternance de plis jurassiens assez réguliers, fréquemment rompus par des failles. La structure générale est marquée par un ensemble d'anticlinaux allongés, aigus, dissymétriques succédant aux synclinaux très larges à allures de cuvettes.

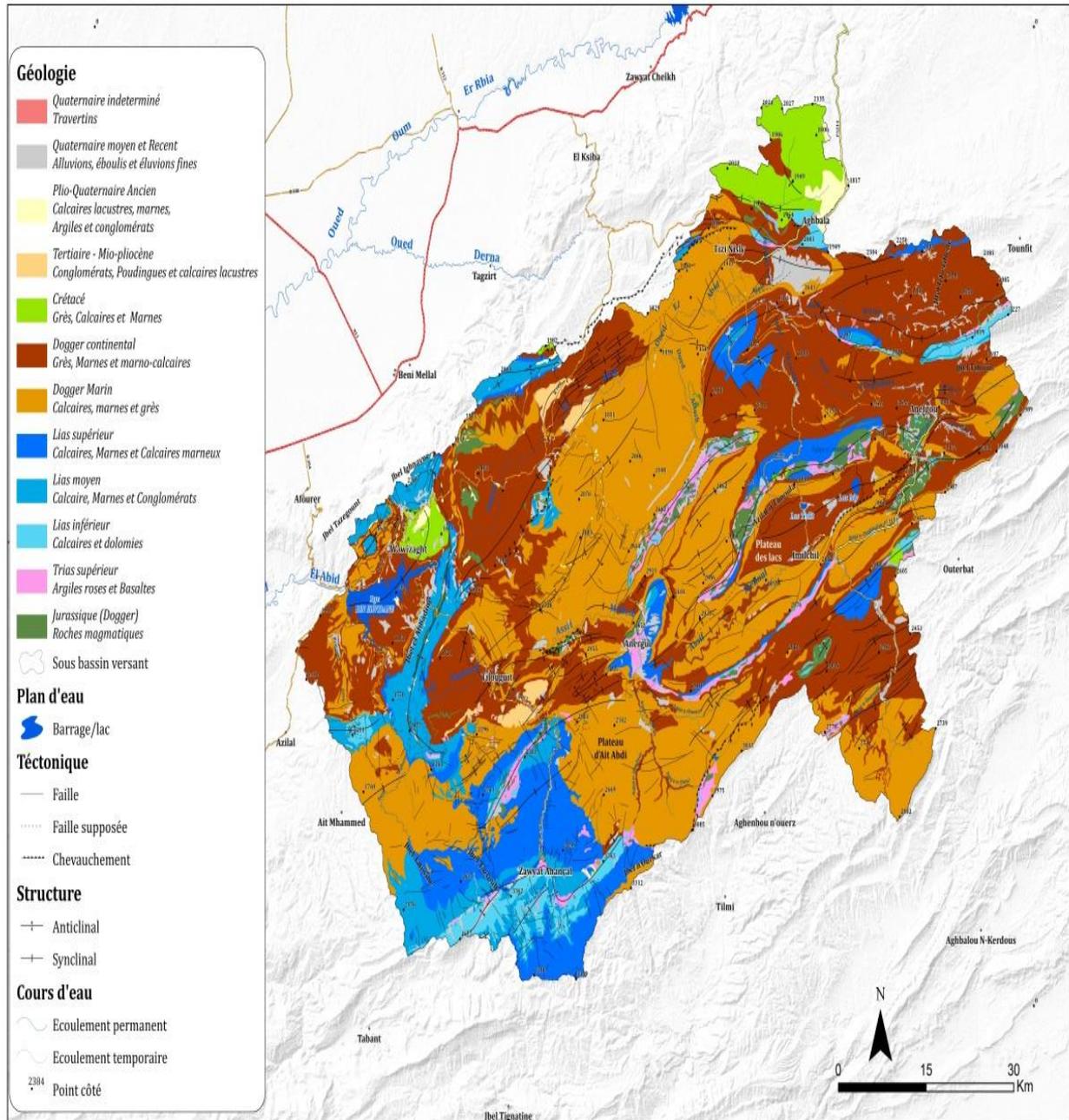


Figure 3 : carte géologique et structurale du bassin versant de l'Oued El Abid (d'après Bissour R. et al, 2015).

, On peut noter que la nature lithologique du BVOA est marquée par des roches perméables (51%) constituées essentiellement de la masse carbonatée, karstifiée et fracturée. Ce qui constitue un facteur important à prendre en considération dans l'analyse et la modélisation pluie-débit puisque la part importante des pluies sera infiltrée et alimentera les aquifères karstiques du bassin.

II - Données hydrométriques disponibles

La modélisation hydrologique nécessite des données d'entrées, observées au niveau des stations hydro-climatiques situées dans la zone d'étude. Les stations hydro-climatiques (Figure 1) enregistrent les pluies, les débits, la température et les apports du barrage de Bin El Ouidane sur une chronique de 36 ans.

Tableau 2 : Les caractéristiques des stations et leurs chroniques :

Station	X	Y	Z	Paramètre mesuré	Chronique
Aït Ouchène	434300	185100	1070	Pluie	12/1975 – 08/2014
				Débit	09/1975- 08/2011
ZaouiteAhançal	433100	138000	1595	Pluie	08/1985 – 08/2014
				Débit	08/1976 – 08/2011
Tillouguit	422670	158490	1049	Pluie	12/1979 – 08/2014
				Débit	09/1977 – 08/2011
				T°	08/1989 – 05/2014
Tizi N'Isly	467680	201520	1350	Pluie	07/1975 – 08/2014
				Débit	09/1975 – 08/2011
Tichki	414103	105244	3250	Pluie	04/2001 – 2010
				hauteur de la neige	04/2001 – 2010
				T°	04/2001 – 2010

II-1 : Variation temporelle des précipitations

L'étude de la variation des précipitations à différentes échelles de temps nous permet de bien analyser nos données afin de mieux comprendre cette variation et d'en tirer les tendances des pluies.

Les données collectées auprès de l'Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia connaissent des valeurs manquantes au niveau de la pluie. Pour les utiliser correctement, on a procédé au comblement desdites données, mais on s'est heurté à un problème car avec une pluie irrégulière au niveau de la montagne, on est obligé de les transformer en « NaN » (Not A Number) pour que le système ne considère pas la donnée manquante comme zéro.

- Variation interannuelle

Les précipitations moyennes annuelles ont été obtenues par la somme des pluies moyennes mensuelles pour chaque station au niveau du BVOA.

La Figure 4 montre que l'année hydrologique 1995/1996 est la plus pluvieuse avec une moyenne annuelle de 730 mm par contre les années 1982/83, 1999/2000 et 2007/08 sont considérées comme des années sèches. On remarque que l'intervalle de temps qui sépare l'année sèche avec l'année humide devient de plus en plus court ; c'est-à-dire que le climat est devenu plus sec qu'avant.

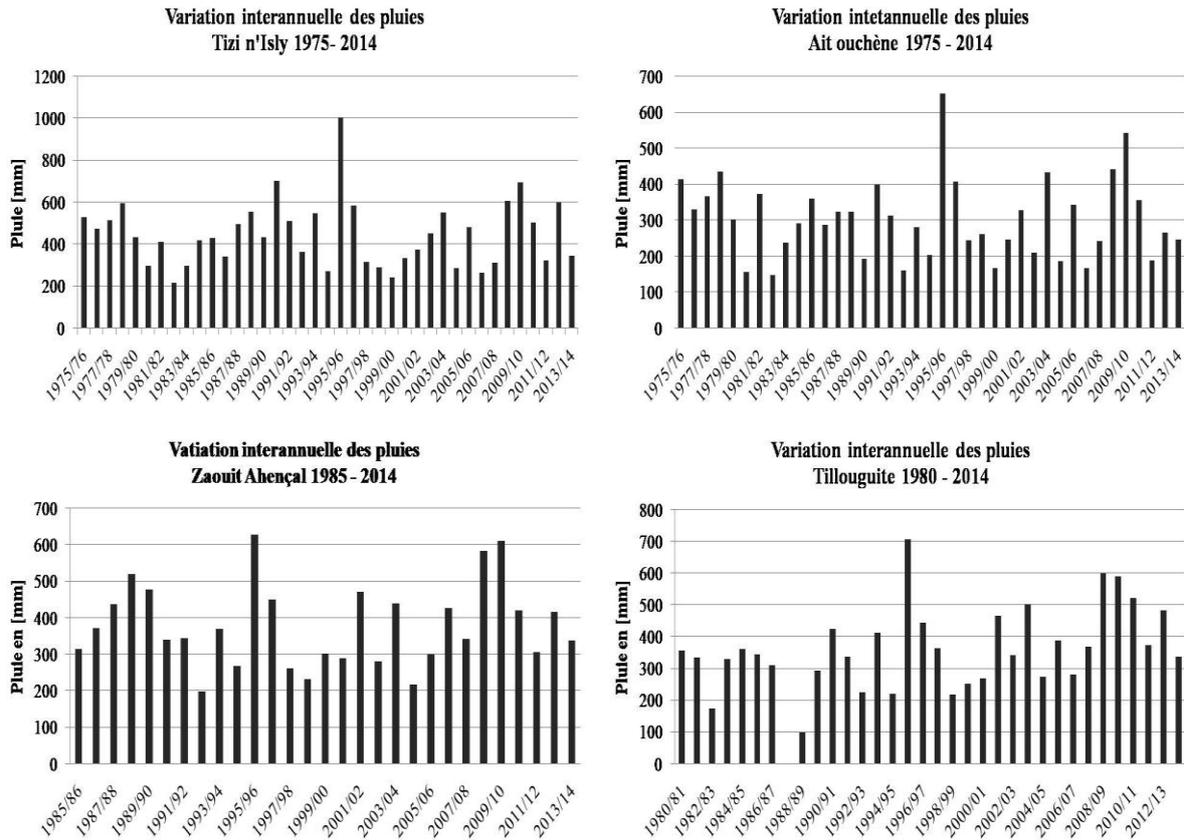


Figure 4 : La variation de la pluie moyenne interannuelle au niveau des quatre stations du BVOA

- Variation mensuelle

La variation mensuelle consiste à analyser la distribution de la pluie pendant l'année hydrologique en calculant la moyenne mensuelle pour toute la chronique qui s'étend sur 38 ans pour Ait Ouchène et Tizi n'Isly, 35 ans pour Tillouguite et 29 ans pour ZaouiteAhençal.

Les histogrammes (Figure 5) montrent un cycle commun entre les stations de Tizi n'Isly et Ait Ouchène avec un début d'arrosage au mois d'Octobre, un maximum au mois de Janvier et un minimum au mois de Juillet. Pour la station de ZaouiteAhençal, les pluies commencent du mois de Septembre jusqu'au mois de Juin, mais avec une diminution des quantités précipitées au niveau des mois de Décembre, Janvier et Février. Cette diminution est due aux précipitations solides. Quant à la station de Tillouguite, elle reçoit des précipitations importantes durant le mois de Novembre jusqu'au mois de Mai ; mais elles sont rares pendant le mois de Juin.

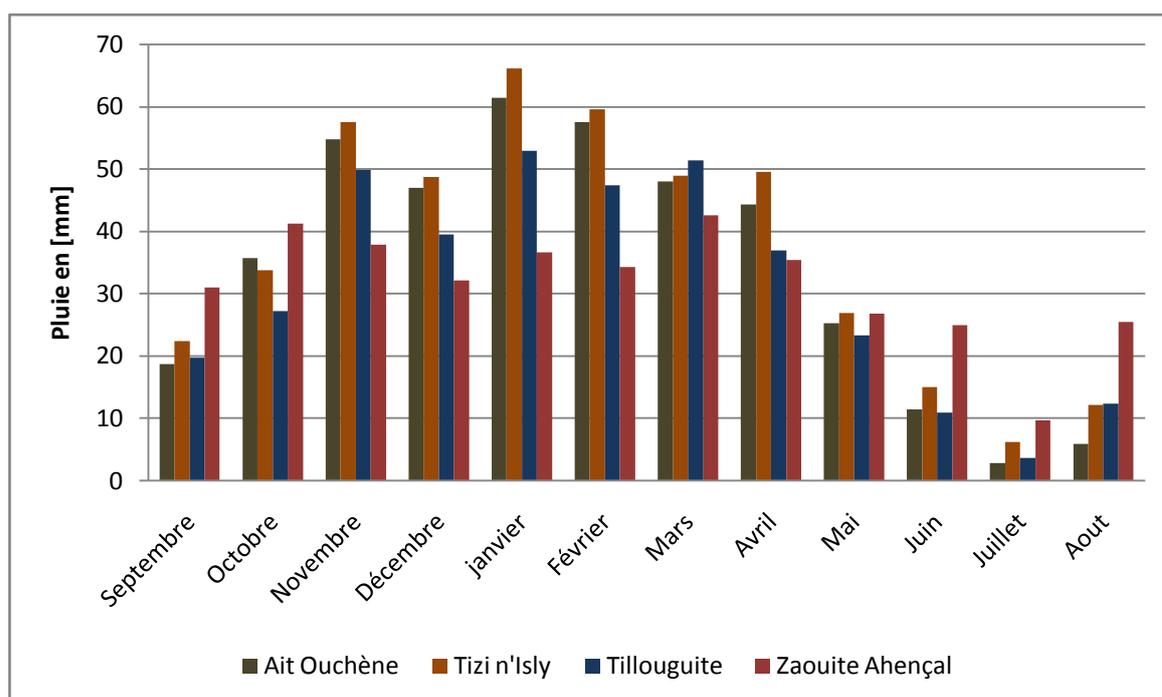


Figure 5: Variation des précipitations mensuelles des quatre stations

Tableau 3 : Récapitulatif des données mensuelles des quatre stations :

Station	Maximum (mm)	Moyenne (mm)
Ait Ouchène	196	35
Tizi n'Isly	333	38
Tillouguite	215	32
ZaouitAhençal	176	31.5

D'après le Tableau 3, on peut dire que la station de Tizi n'Isly reçoit plus de pluie que la station de ZaouitAhençal car la zone reçoit des précipitations neigeuses pendant l'hiver.

II – 2 : Les données « pluie » issues des satellites

On a fait recours aux différentes sources de données afin de comparer et bien analyser nos données surtout que les stations sont espacées entre eux. Parmi les produits satellitaires, les données TRMM7 (25km) et RFE2 (10km) qui couvrent une période assez importante de 1998 à 2013 pour les données de TRMM et de 2001 à 2012 pour RFE. (<http://trmm.gsfc.nasa.gov/>)

II – 3 : Variation de la neige

Le BVOA connaît des précipitations solides durant les mois de décembre jusqu'au mois d'Avril (Outaleb, 2013). Pour cela une estimation du couvert neigeux au niveau du bassin versant est nécessaire afin de connaître la contribution de la neige au débit.

Comme aucune station au niveau du bassin versant n'enregistre la profondeur de la neige ; on a utilisé les données de Tichki sur une période qui va de 2001 à 2011 et on les a interpolé au niveau de tout le bassin versant en se basant sur le gradient altitudinal de pluie (0.03mm/100m) (Boudhar et al, 2011), en appliquant le gradient sur les tranches d'altitudes inférieur à 2800m.

La Figure 6 montre que la hauteur de la neige au niveau de la station de Tichki, présente durant l'année 2008/2009 un véritable stock neigeux, contre l'année 2005/2006 qui a enregistré comme moyenne interannuelle une hauteur inférieure à 0.5m.

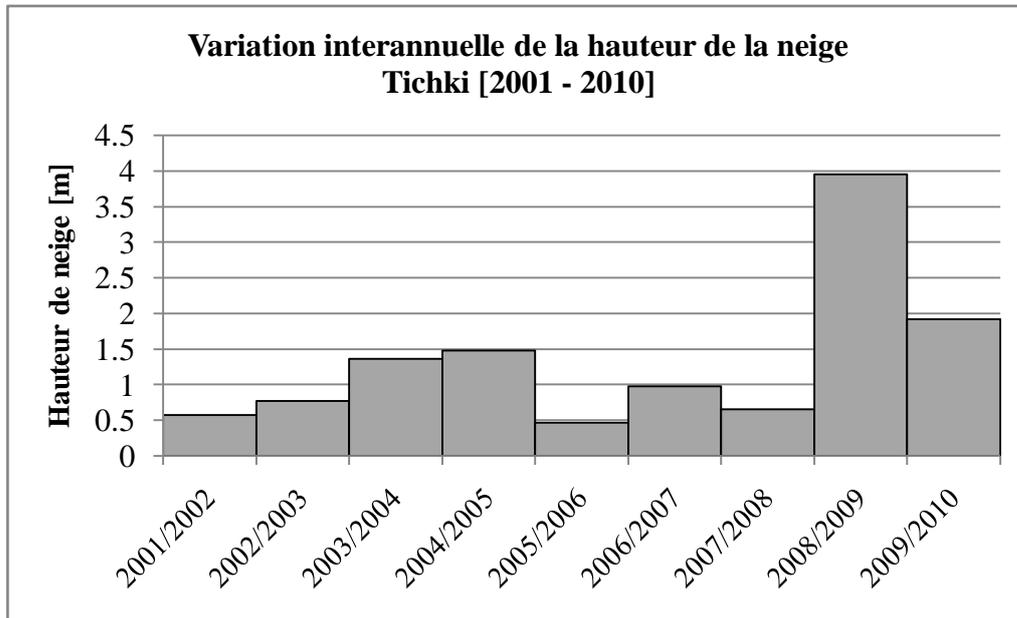


Figure 6 : Variation interannuelle de la hauteur de la neige moyenne au niveau de la station de Tichki [2001 - 2010]

II – 4 : Variation temporelle des débits

- Variation annuelle

Les données collectées auprès de l'Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia, couvrent une période de 1975-2011 (35ans) pour les stations d'Ait Ouchène et Tizi n'Isly, 1976 – 2011 pour la station de ZaouiteAhençal, et 1977 – 2011 pour la station de Tillouguite.

La Figure 7 montre la variation moyenne interannuelle des débits au niveau des quatre stations du BVOA, où on remarque une ressemblance pour la station d'Ait Ouchène et celle de Tizi n'Isly avec un maximum pendant l'année 1995/1996 et de 2008 à 2010 et un minimum pendant les années 1980/1985 qui coïncide avec la période de sécheresse qui a sévi dans tout le Maroc avec un débit moyen inférieur à 3m³/s.

Pour la station de ZaouiteAhençal, le débit moyen annuel est inférieur à 15m³/s avec un pic en 1990/1991 et un minimum en 1980/1985, 1996/1997 et 2004/2005. Quant à la station de Tillouguite, elle a enregistré les débits moyens annuels les plus importants des quatre stations avec 30m³/s en 1995/1996, pour les valeurs minima, les débits sont très faibles pour les années 1982/1984 et 2007/2008.

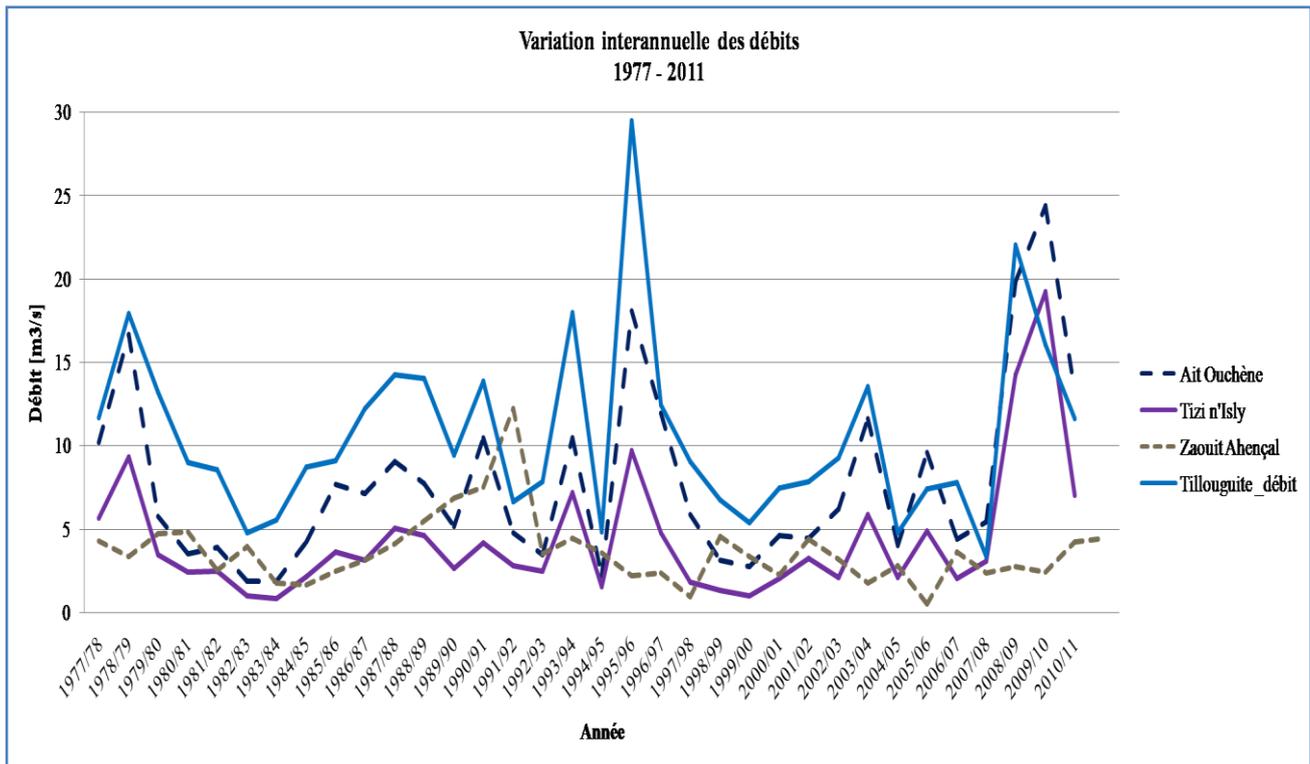


Figure 7 : Variation moyenne interannuelle des débits des quatre stations.

- Variation mensuelle

Le calcul de la moyenne des débits de chaque mois de chaque année nous donne une variation moyenne mensuelle des débits, qui nous permet de bien identifier les mois les plus productifs. L'analyse est effectuée sur les quatre stations, on remarque que les stations d'Ait Ouchène et de Tizi n'Isly ont la même réponse mais avec une intensité plus importante sur la station d'Ait Ouchène localisée à l'exutoire. Les maximums sont enregistrés pendant les mois de Février et Mars et un minimum en Août (Figure 8)

La station de ZaouiteAhençal marque des débits maximaux pendant le mois d'Avril avec $8\text{m}^3/\text{s}$, ce décalage est dû à la fonte de la neige au printemps. Les minimums s'enregistrent au mois de Juillet. La station de Tillouguite est considérée comme la station la plus productive avec un débit moyen mensuel maximal égal à $25\text{m}^3/\text{s}$ pendant les mois de Mars et Avril. Ce décalage par rapport aux deux autres stations est dû à la fonte de la neige.

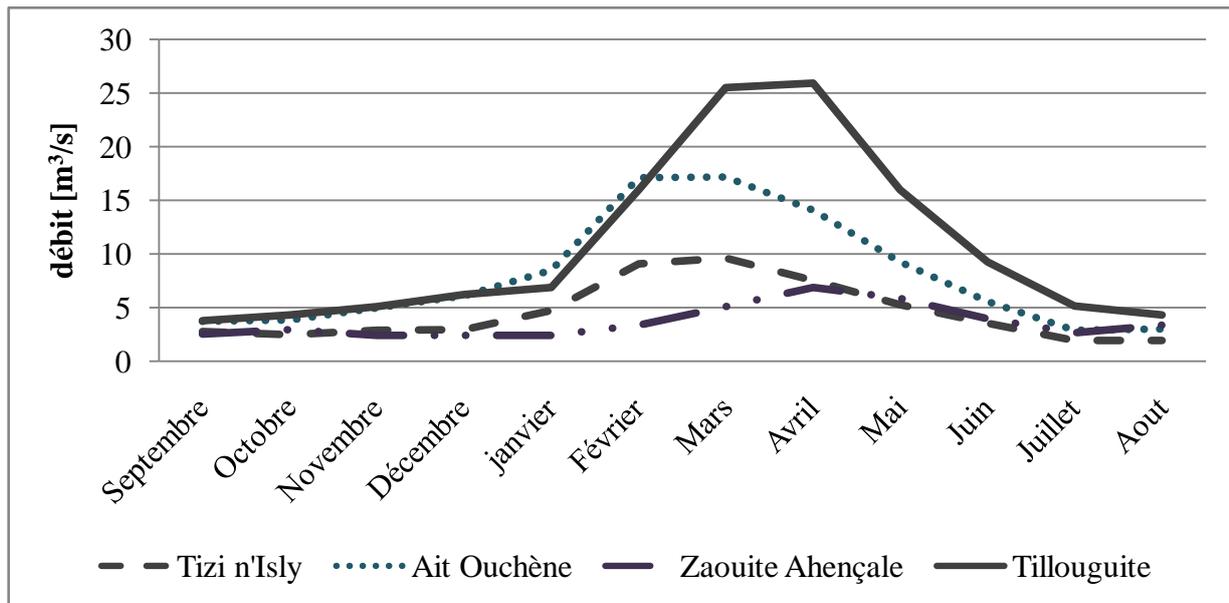


Figure 8: Débit moyen mensuel des quatre stations

II – 5 : Variation temporelle des Températures

L'étude de la variation de la température est essentielle au niveau d'un bassin versant surtout dans le cadre d'une modélisation hydrologique. On a recours à deux stations, Tillouguite et Tichki. La station de Tichki est localisée hors de notre bassin d'étude.

- Variation annuelle

La variation de la température au niveau des deux stations peut nous indiquer les années les plus chaudes et celles les plus froides.

La station de Tillouguite située au niveau de l'exutoire du sous bassin versant de Tillouguite couvre une période de 1989 – 2014. La température moyenne enregistrée durant cette période est de 16.5°C avec un maximum en 2005/2006 et 2010/2011 et avec une moyenne de 17.5°C. Concernant la station de Tichki, elle a enregistré une température moyenne durant 10 ans (2001 – 2011) de 6°C, avec un minimum de 3°C et un maximum de 11°C en 2010/2011.

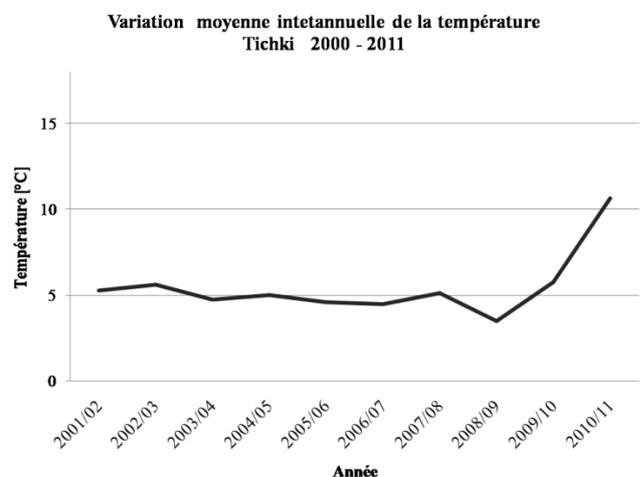
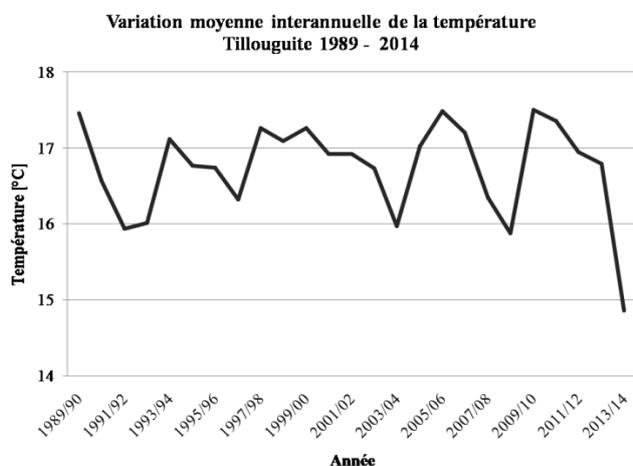


Figure 9 : Variation moyenne interannuelle de la température de la station de Tillouguite et de Tichki

- *Variation mensuelle*

La variation moyenne mensuelle de la température nous indique les mois les plus chauds et ceux les plus secs. La Figure 10 nous montre la variation de la température au niveau des deux stations.

Les températures moyennes mensuelles montrent un cycle typique du climat semi-aride, c'est-à-dire des températures élevées durant l'été et plus modérées en hiver. La même remarque pour la station de Tichki, mais avec des températures inférieure à 0°C en hiver.

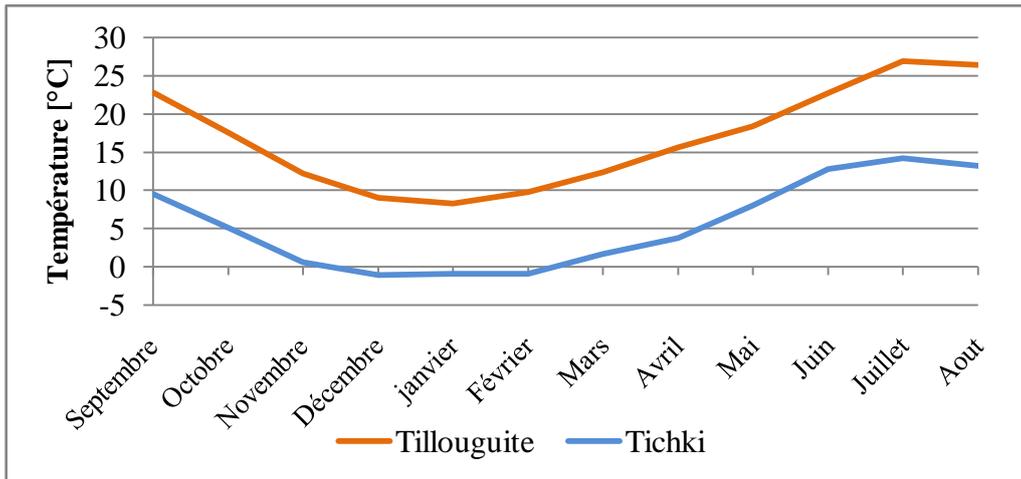


Figure 10 : Variation moyenne mensuelle de la température de la station de Tillouguite et de Tichki

CHAPITRE II : METHODOLOGIE ET TRAITEMENT DES DONNEES

Un modèle est une représentation mathématique d'un système complexe. Le système en hydrologie est le cycle de l'eau. Nous nous intéressons à simuler le débit à partir de la pluie en utilisant un modèle pluie-débit qui est une simplification des phénomènes naturels complexes, [Perrin, 2000].

L'objectif du modèle pluie-débit est de trouver un lien entre le débit observé et les phénomènes qui rentrent dans la formation de ce dernier (précipitations et évapotranspiration). C'est-à-dire les différents facteurs caractérisant le bassin versant et influençant le fonctionnement hydrologique du cours d'eau. Ceci dans le but par la suite de prédire les ressources en eau suite aux changements climatiques d'origine naturelles ou anthropiques.

I - Les modèles utilisés

I – 1 : Le modèle GR2M

Le modèle GR2M [modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuels] (Mouelhi, 2003 ; Mouelhi et al., 2005) est un modèle pluie – débit à deux paramètres. Considéré comme modèle conceptuel à réservoir vu qu'il comporte deux réservoirs : de production et de routage.

Pourquoi GR2M ?

L'étude de la ressource en eau dans un bassin versant contenant un barrage n'a pas besoin d'une étude au pas de temps fin et serré. Un pas de temps mensuel ou même annuel est largement suffisant pour le cas des grands réservoirs (Mouelhi, 2003).

- **Fonctionnement**

Le modèle GR2M nécessite la pluie et l'évapotranspiration potentielle (ETP) comme des données mensuelles d'entrée. Une partie de la pluie est stockée dans le sol [réservoir de production S] et l'autre partie va alimenter le réservoir de routage, R. Une quantité du réservoir de production doit être soustraite par le phénomène d'évapotranspiration potentielle, E1. Donc on aura une autre quantité au niveau du réservoir de production notée S' :

$$(1) S' = S - E1$$

La vidange du réservoir de production se fait par la percolation ce qui fait qu'une quantité P2 va être soustraite du réservoir S' et on aura une autre quantité S'' donc :

$$(2) S'' = S' - P2$$

La quantité percolée va contribuer à l'alimentation du réservoir de routage (R) donc :

$$(3) R' = P2 + P1$$

Avec P1 est la pluie ruisselée et P2 la pluie percolée.

Les paramètres du modèle GR2M sont optimisables:

X1 : Capacité de production (mm) comprise entre [140 – 2640]

X2 : Coefficient d'échange souterrain (adimensionnel) [0.21 – 1.31] (Charles Perrin, Claude Michel, Vazken Andréassian, 2007).

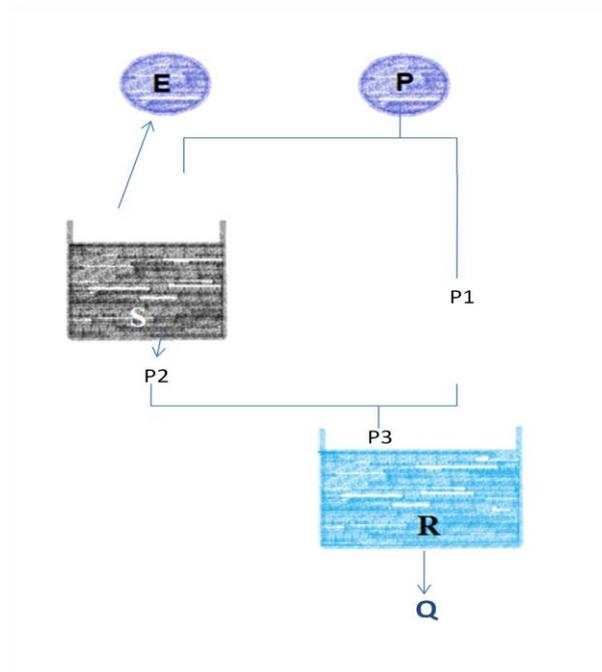


Figure 11 : Représentation graphique du modèle GR2M

I – 2 : Modèle Thornthwaite

Le modèle de Thornthwaite est un modèle utilisé surtout dans les bilans hydriques mensuels. Développé par US. Geological Survey, dans le but de traiter les différentes composantes du cycle hydrologique à savoir les précipitations, les débits, ETP... A la différence du modèle GR2M, il comporte un module neige.

- **Fonctionnement**

Pour faire tourner le modèle, il faut connaître les précipitations, la température et la latitude. Les précipitations regroupent la pluie et la neige en mm, et selon la température le modèle peut déterminer est ce qu'il s'agit de la neige ou de la pluie. Pour cela, il faut entrer les paramètres qui définissent la température d'enneigement et ceux de la pluie, ainsi que de spécifier certains paramètres nécessaire pour avoir une bonne simulation des débits. :

- Température de la pluie, définie par défaut par Wolock, 1999, et qui peut être changeable selon la zone d'étude. $T_{\text{pluie}} = 3.3^{\circ}\text{C}$
- Température de la neige, qui est en fonction de l'altitude : si elle est inférieure à 1000m ; $T_{\text{neige}} = -10^{\circ}\text{C}$, et si supérieure à 1000 m $T_{\text{neige}} = -1^{\circ}\text{C}$.

Le modèle calcule la proportion de la neige et de la pluie selon la température de la pluie ou celle de la neige. Les précipitations solides (la neige) sont calculées à l'aide de la formule suivante :

$$P_{\text{neige}} = P \times ([T_{\text{pluie}} - T] / [T_{\text{pluie}} - T_{\text{neige}}])$$

P_{neige} = Le stock de neige, c'est-à-dire la quantité de la neige précipitée.

$$P_{\text{pluie}} = P - P_{\text{neige}}$$

- Le ruissellement direct : c'est la proportion de la pluie qui ruisselle directement sans qu'elle passe par infiltration. Cette proportion est calculée à partir de la fraction de P_{pluie} , en la multipliant par un coefficient de drainage ($D_{\text{rofac}} = 5\%$) déterminé par Wolock et McCabe, 1999.

- La fonte de la neige :

C'est la fraction nivale ; elle est calculée à partir de la T_{moy} mensuelle et le maximum de degrés de la fonte qui est égale à 0.5 McCabe et Wolock,(1999).

$$SMF = [T - T_{\text{neige}}] / [T_{\text{pluie}} - T_{\text{neige}}]$$

Si $SMF >$ la fonte maximale donc la fonte maximale = SMF

$$SM = \text{Stock de neige} \times SMF$$

Une quantité de la pluie est infiltrée au niveau du sol. Cette quantité est : $SM + P_{\text{pluie}} = P_{\text{totale}}$

- Evapotranspiration potentielle (ETP) :

Elle définit les pertes d'eau du couvert végétal et qui représente la demande en eau relative à l'énergie.

L'ETP est estimée à partir de la température moyenne mensuelle ainsi que la latitude afin de déterminer la durée d'ensoleillement. ETP est calculée par la formule de Hamon 1961 utilisée dans les études des bilans hydriques.

$$ETP_{\text{Hamon}} = 13.97 \times d \times D^2 \times W_t$$

Où

d : nombre des jours du mois

D : La moyenne mensuelle du nombre d'heure des jours

W_t : La densité de la vapeur d'eau

$$W_t = [4.95 \times e^{0.0062 \times T}] / 100$$

T : Température moyenne mensuelle en (°C)

- La capacité de rétention du sol

Elle est généralement égale à 150 mm ; cette valeur est valable sur la plupart des sols, selon McCabe et Wolock(1999).

L'eau en excès devient un surplus qui va contribuer au ruissellement direct.

I – 3 : Modèle d'Oudin : calcul de l'évapotranspiration potentielle

L'ETP est un résultat d'un modèle et non pas une mesure (Oudin et al., 2005). L'équation qui est intégrée au niveau du modèle est la suivante :

$$ETP(j) = \frac{R_e}{\lambda \times \rho} \times \frac{T_a(j) + 5}{100} \quad \text{si } T_a(j) + 5 > 0 \\ = 0 \quad \text{sinon}$$

λ : la chaleur latente de vaporisation de l'eau (2.25 MJ/Kg)

ρ : La masse volumique de l'eau (103 Kg/m³)

R_e : Le rayonnement extraterrestre en (MJ/m²/j) calculé à partir de la latitude et du jour Julien

$T_a(j)$: La température (°C)

I – 4 : Modèle degrés jour

Le modèle degré jour a été utilisé pour l'estimation de l'équivalent en eau au niveau de la station de Tichki. On utilisera le même modèle afin d'estimer cette quantité au niveau du bassin d'étude. Pour cela, on a fait recours au modèle Degree Day développé par Martinec, 1985. Ce modèle accepte comme donnée d'entrée, la température, la hauteur de la neige et l'altitude.

Ce modèle fonctionne selon la température de la fonte de la neige sa densité et la température de l'air. Le modèle prend en considération le facteur de fonte qu'on a fixé à 5 et la valeur maximale de la densité de la neige. Ces trois paramètres sont pris en considération à telle sorte que le modèle calcul la lame d'eau écoulé en fonction du temps, sachant que la densité diffère d'un jour à l'autre ainsi que la l'âge de la neige.

II - Critère de mesure de robustesse

II – 1 : Critère de Nash

Pour exprimer la relation entre le débit simulé et le débit observé, on doit calculer le critère de Nash (Nash & Sutcliffe, 1970) :

$$NASH = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_c)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_m)^2} \right]$$

Q_o : Débit observé, Q_c = Débit calculé, Q_m : Débit moyen calculé et N : Le nombre d'observations.

Les valeurs de Nash sont comprises entre 0 et 1 ; et on considère que le résultat est logique à partir de 0.4.

II – 2 : Le bilan

Le bilan est un critère qui représente le biais relatif ; qui permet de voir si le modèle surestime ou sous-estime les débits. Il est le Q_{obs} par rapport au Q_c ; graphiquement, c'est l'écart entre les deux courbes.

II - Traitement des données hydro-climatiques

II – 1 : Corrélation pluie-débit

Ce paragraphe va porter sur la relation entre la pluie et le débit au niveau mensuel. Notre objectif d'une part est de bien comprendre les mécanismes de cette relation et de l'autre saisir la contribution de la neige aux débits.

On remarque d'après la Figure 12, qui représente la station d'Ait Ouchène, que la pluie contribue généralement à l'écoulement pendant les mois pluvieux par contre au niveau de la station de Tillouguite, on remarque que les périodes pluvieuses ne contribuent pas directement à l'écoulement, un décalage est remarqué. Ce décalage est du à la fois à la fonte de neige pendant les mois de printemps quand la température commence à augmenter et aux apports du karst qui restitue la pluie infiltrée.

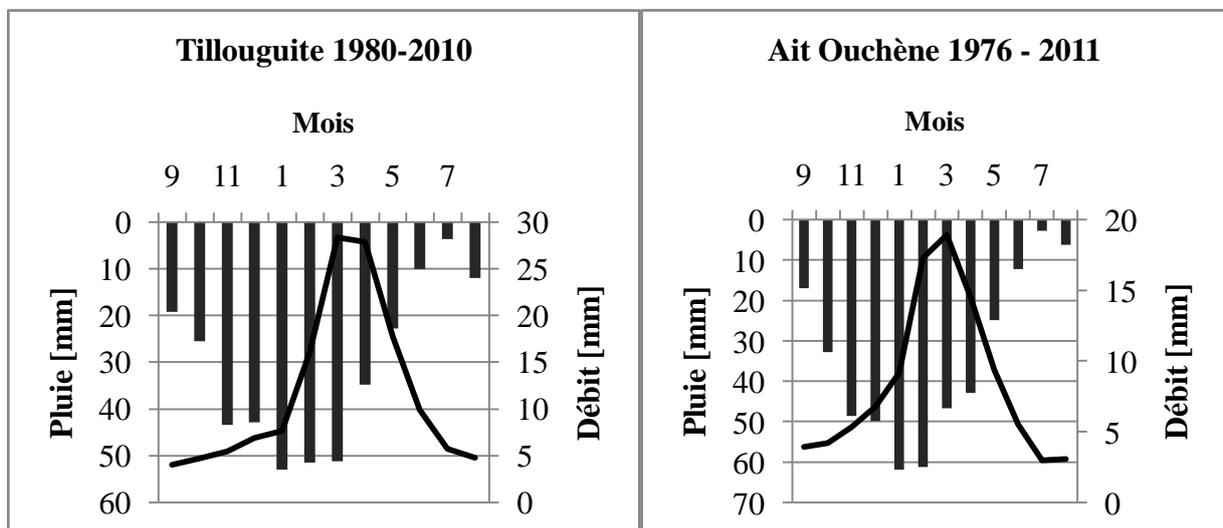


Figure 12: La relation pluie-débit au niveau des stations situées à l'exutoire des deux sous bassins versants

Afin de savoir la relation entre le débit et la pluie au niveau de chaque station on a procédé à une corrélation pluie-débit (Tableau 4)

Tableau 4 : Résultat de corrélation pluie - débit au niveau des quatre station

Bassin versant	Corrélation Pluie - débit
Ait Ouchène	0.65
Tillouguite	0.4

Ce tableau montre que la station d'Ait Ouchène montre une corrélation plus significatif (0.65) que la station de Tillouguite (0.40) cette différence se traduit par la contribution de la fonte de la neige au débit pendant le printemps.

II – 2 : La pluie

A partir des stations hydro-climatiques, on a pu interpoler les pluies pour les deux sous bassins versants et pour la totalité du bassin versant amont du barrage. Pour cela, deux méthodes ont été utilisées :

- Inverse distance (IDW : Inverse Distance Weighting) ; qui consiste à calculer des poids pour chaque station, en fonction de leur distance au bassin.
- Moyenne arithmétique des pluies des deux stations appartenant au même sous bassin versant.

L'interpolation s'effectue sur 3 échelles spatiales :

- Sous bassin versant d'Ait Ouchène
- Sous bassin versant d'Ahençal
- Bassin versant d'Oued El Abid, amont du barrage de Bin El Ouidane.

L'efficacité de l'interpolation est comparée aux données de pluie des satellites (TRMM, RFE) qui sont très bien corrélées aux pluies moyennes observées (Tableau 5).

Tableau 5 : Matrice de corrélation entre les données des pluies moyennes mensuelles observées, interpolées et les pluies satellites à l'échelle du bassin versant d'Oued El Abid

	<i>Pluie IDW</i>	<i>Pluie Obs</i>	<i>Pluie Sat RFE</i>	<i>Pluie SatTrmm</i>
<i>Pluie IDW</i>	1			
<i>Pluie Obs</i>	0.989	1		
<i>Pluie Sat RFE</i>	0.82	0.81	1	
<i>Pluie SatTrmm</i>	0.83	0.83	0.85	1

Cette corrélation a montré que les données de pluie observées et interpolées sur le bassin versant sont les mêmes que celles enregistrées par les deux satellites.

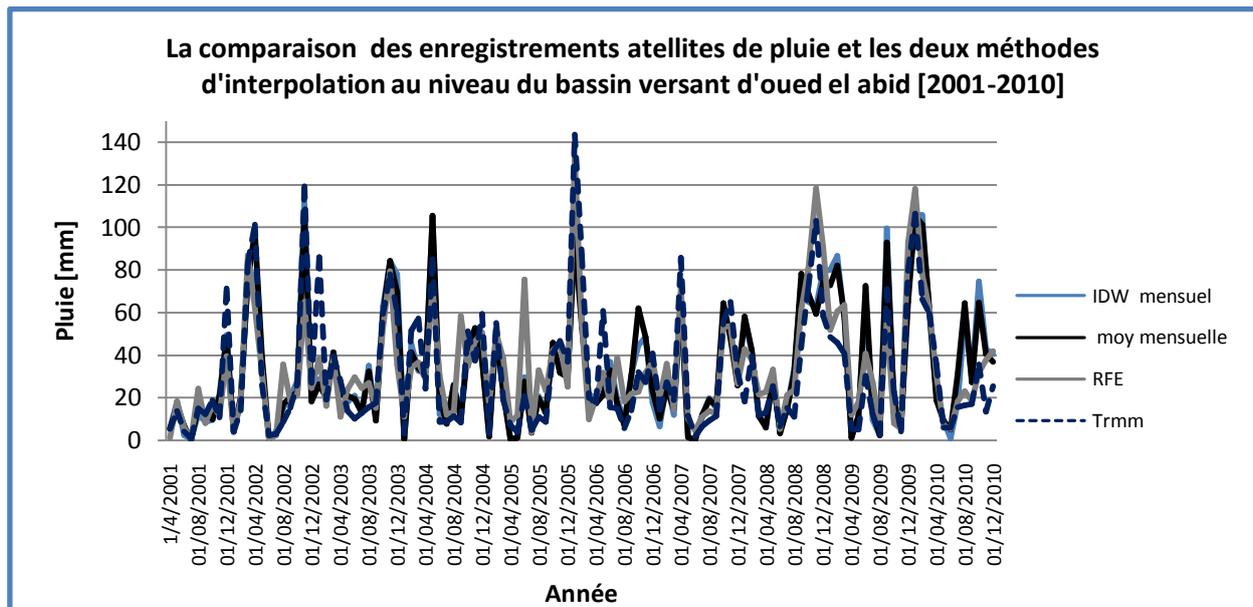


Figure 13: Comparaison des enregistrements satellites de pluie et les deux méthodes d'interpolation au niveau de BVOA [2001 - 2010]

II – 3 : La neige

- *La modélisation hydrologique : caractérisation difficile en présence du manteau neigeux*

Dans ce paragraphe, on va s'intéresser à la manière avec laquelle on va intégrer la neige dans notre modèle pluie-débit. Sachant que le couvert neigeux au niveau du BVOA peut couvrir 50% de la surface totale du bassin versant [Outaleb, 2013].

Le comportement de la neige est lié à la température. Lorsque celle-ci diminue l'eau s'accumule dans le sol sous forme de neige. Pendant le printemps (augmentation de la température) l'eau est libérée à cause de la fonte de la neige dont une grande partie subit la sublimation qui peut atteindre les 44% de la quantité précipitée. Ce pourcentage a été observé dans le bassin versant de M'goun, Haut Atlas marocain (O. Schulz et C. de Jong, 2004). Ceci favorise un décalage entre la formation et la fonte de la neige dans la contribution de l'écoulement.

Notre modèle, GR2M, ne possède pas un module neige. Sachant que la neige est une précipitation solide, donc on va la transformer en liquide par le modèle Degrés Jour qui fait calculer le SWE [Snow Water Equivalent] en tenant compte seulement de la neige fraîche. C'est-à-dire, on calcule la différence de la hauteur de la neige. La valeur positive sera multipliée par la densité de la neige fraîche qui est entre 150 kg/m³ et 350 kg/m³ comme densité maximale [Boudhar, 2011]. Cette densité tient compte de l'altitude et de la température du jour.

Les entrées du modèle Degré Jour sont : la température et la hauteur de la neige (m).

- *Données de neige observées :*

La seule source des hauteurs de la neige est la station de Tichki (3250m) qui se trouve hors du BVOA. On a considéré que la quantité précipitée à partir de 2800m sera la même que celle de Tichki. Sachant que la station de Tichki se localise au niveau du bassin versant de M'goun orienté vers le Sud, donc recevant moins de précipitations et plus exposé au climat chaud que notre bassin d'étude qui est exposé au Nord Ouest. La soustraction du pourcentage de la sublimation sera donc moins importante.

La répartition de la quantité de l'équivalent en eau de neige est basée sur le pourcentage de surface qu'occupe chaque tranche d'altitude dans le bassin versant.

II – 4 : Le débit

Pour le traitement des débits, on a transformé les débits (m3/s) observés au niveau des stations hydrométriques en (mm) par la relation suivante :

$$Q = (V*86.4)/S$$

Q : débit en mm

V : débit en m³ /s

S : surface du bassin versant en Km²

Cette conversion des débits en hauteur va nous servir dans la comparaison des débits simulés et ceux observés.

+ La contribution des débits des deux sous bassins versant aux apports du barrage :

Cette partie va nous renseigner d'abord sur la quantité d'eau apportée par chaque bassin aux apports du barrage, et ensuite sur l'influence des aquifères karstiques (formations carbonatées) sur l'écoulement superficiel.

La série de donnée qu'on a traitée est de 1977 à 2011 pour les trois bassins. Le résultat (Tableau 6) montre que les deux sous bassins versants contribuent à hauteur de 81% des apports du barrage. Les 20% qui restent sont proviennent des surfaces que les deux sous bassins versants ne couvrent pas et probablement par prélèvement karstique sur d'autres bassins limitrophes via des communications hydrologiques souterraines qui caractérisent les hydrosystèmes karstiques.

Tableau 6: Contribution des deux sous bassins versants aux apports du barrage Bin El Ouidane

	Chronique	Apport Mm³	Pourcentage %
BV Ait Ouchène	09/1977 - 08/2011	8671.51	34.94
BV Tillouguite	09/1977 - 08/2011	11406.46	45.96
Total	-	20077.97	81
Barrage Bin El Ouidane	09/1977 - 08/2011	24815.2	100
Surplus : apports via d'autres bassins		4737.23	19

La variation de la contribution des sous bassins versants à l'alimentation du barrage

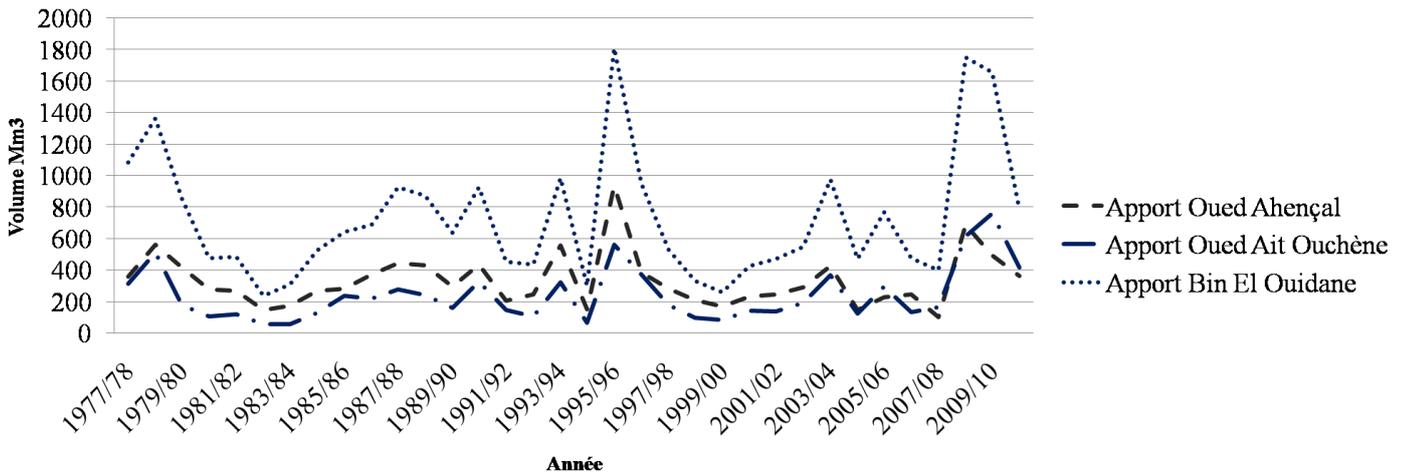


Figure 14: Contribution des sous bassins versants aux apports du barrage Bin El Ouidane

II – 5 : La température

Les données observées de la température au niveau du BVOA sont quasiment absentes, on possède uniquement les données de la station de Tillouguite (1100m) et de la station de Tichki (3285 m) qui se situe hors du bassin d'étude.

Avec une interpolation basée sur le gradient thermique, on a pu interpoler la température à partir de la station de Tillouguite sur l'ensemble du bassin versant. Pour la validation des résultats, on doit les comparer avec ceux enregistrés à Tichki. Le gradient thermique choisi est de l'ordre de 0.56°C/100m. Ce gradient est plus proche à la valeur trouvée par International Civil Aviation Organization : 0.65°C/100m.

L'interpolation de la température est calculée par l'équation suivante :

$$T = T(\text{référence}) + (\text{Gradient} \times (\text{Altitude de référence} - \text{Altitude où la température est calculée})) \quad (2).$$

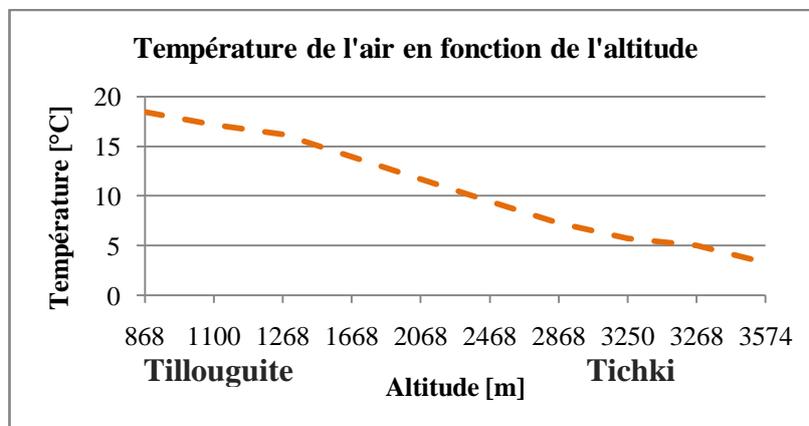


Figure 15: Variation de la température moyenne mensuelle de l'air en fonction de l'altitude

La variation de la température au niveau du BVOA montre une bonne corrélation avec l'altitude et donne une courbe plus proche à celle obtenue au niveau du bassin versant de Rheraya où la température de l'air connaît une faible diminution à partir de 3000m [Boudhar et al., 2011].

Après avoir tracé la relation entre l'altitude et la température, on a intégré l'équation du graphique au niveau de la carte MNT d'une résolution de 30m pour avoir la valeur de la température moyenne au niveau de chaque pixel figure ci-dessous.

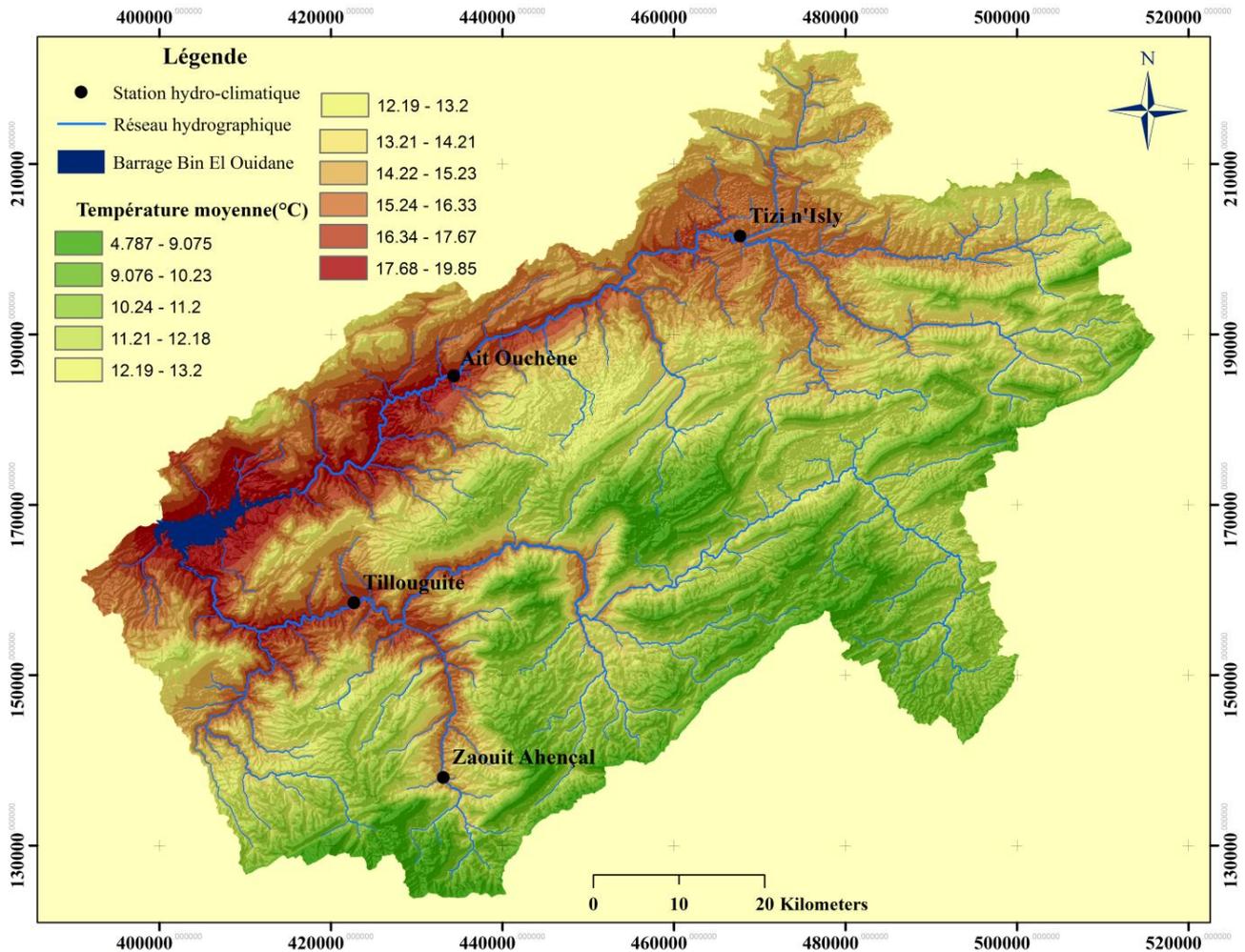


Figure 16 : Carte de température moyenne (2001 – 2011) au niveau du bassin versant de l'Oued El Abid

CHAPITRE III : APPLICATION DES MODELES HYDROLOGIQUES

Au niveau de ce chapitre, on va voir la réponse des deux modèles vis-à-vis les données traitées. Cette application est faite au niveau de trois bassins versant, Ait Ouchène, Tillouguite et Oued El Abid, sur la même période de temps [1985 – 2011]. Le modèle GR2M est utilisé sous Excel, on optimise automatiquement les paramètres afin d'avoir un critère de Nash supérieur à 0.4. Quant au modèle Thornthwaite est tourné sous MATLAB.

I - Application du modèle GR2M

I – 1 : Niveau du sous bassin versant d'Ait Ouchène

L'application de GR2M au niveau du sous bassin versant d'Ait Ouchène a été réalisée en se basant sur deux entrées de données : la première avec des pluies brutes ; la deuxième avec la pluie plus l'équivalent en eau de neige.

- *Pluies brutes*

On a pris une série de données de septembre 1985 jusqu'à Aout 2011.

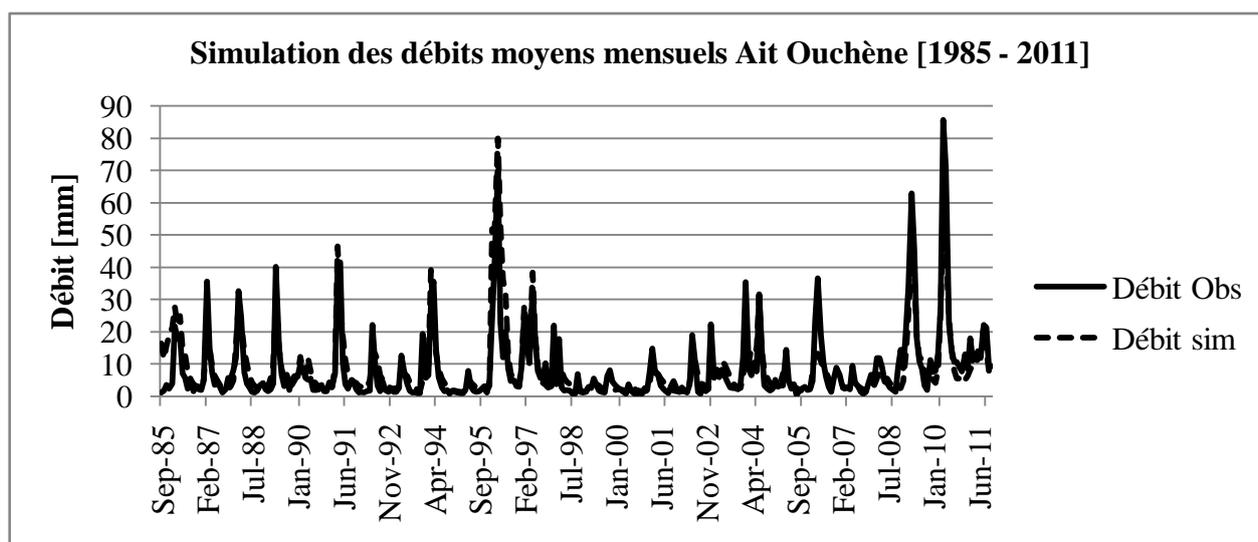


Figure 17 : Calibration des débits observés et des débits simulés du bassin versant d'Ait Ouchène

La lecture de ce graphe révèle que la simulation est satisfaisante avec un bon facteur de Nash (Tableau 7). On peut poser la question suivante : comment le modèle a pu simuler le débit sans prendre en considération la partie neige ? La réponse est que la quantité de neige est soit conservée au niveau souterrain soit sa contribution est discontinuée.

Tableau 7: Critères d'efficacités du modèle GR2M

Bassin	Superficie (km ²)	X1 (mm)	X1 réel (mm)	X2 (-)	Nash	Bilan
Ait Ouchène	2400	6.47	647	1.10	0.755	0.979

D'après ce tableau et la Figure 17, on note que le modèle GR2M a bien simulé le débit à partir des pluies interpolées sur le bassin versant d'Ait Ouchène et l'ETP.

Les résultats obtenus montrent que la simulation a sous-estimé le débit simulé (bilan = 0.979 < 1). Cette sous-estimation s'observe au niveau des forts débits que la Figure 1 met bien en évidence ; le débit observé est plus important que le débit simulé. Cependant, au niveau des périodes des étiages le débit simulé est pratiquement le même que le débit calculé.

- Pluie modifiée

Dans cette partie on va voir la réponse du modèle à la pluie modifiée qui intègre la partie neige.

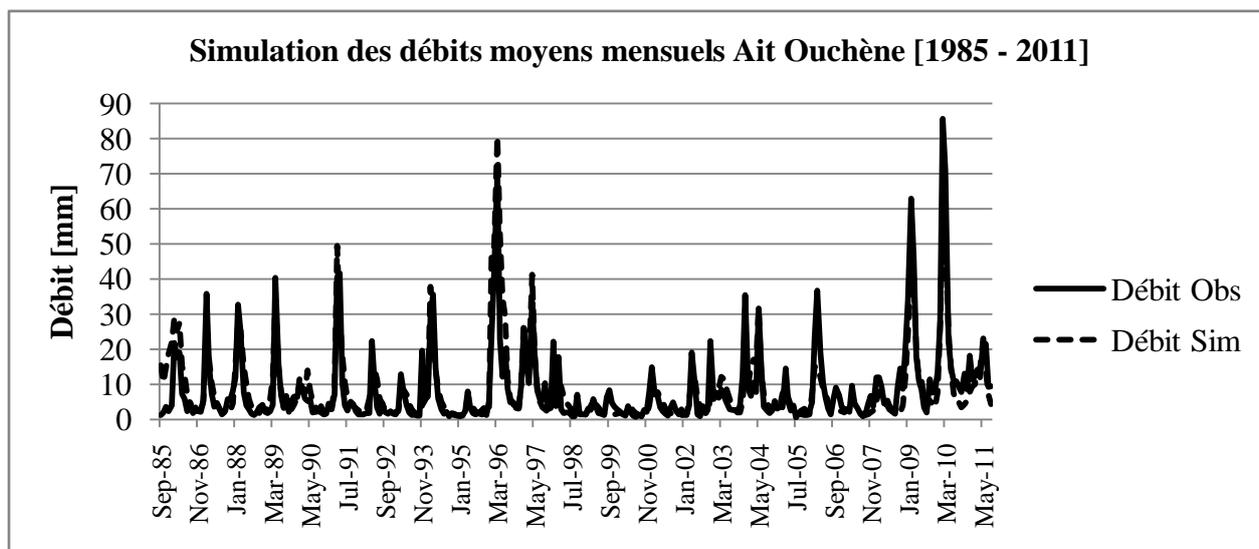


Figure 18: Résultat de simulation de débit au bassin versant d'Ait Ouchène avec la partie neige [1985-2011]

Tableau 8: Critères d'efficacités du modèle GR2M avec données neige

Bassin	Superficie (km ²)	X1 (mm)	X1 réel (mm)	X2 (-)	Nash	Bilan
Ait Ouchène	2400	6.57	712.06	1.03	0.759	0.956

L'interpolation de la lame d'eau écoulee au niveau du bassin versant d'Ait Ouchène présente des erreurs. Le facteur de Nash indique une faible amélioration que la simulation sans neige, et une sous-estimation.

I – 2 : Niveau du sous bassin versant de Tillouguite

- Pluie brute

Au niveau du bassin versant de Tillouguite, on remarque que les résultats sont bons et satisfaisants. Le facteur de Nash est de l'ordre de 0.696, avec un bilan de 1.03 qui est supérieur à 1 ; donc on constate une surestimation du débit surtout lors des périodes des étiages (Figure 19).

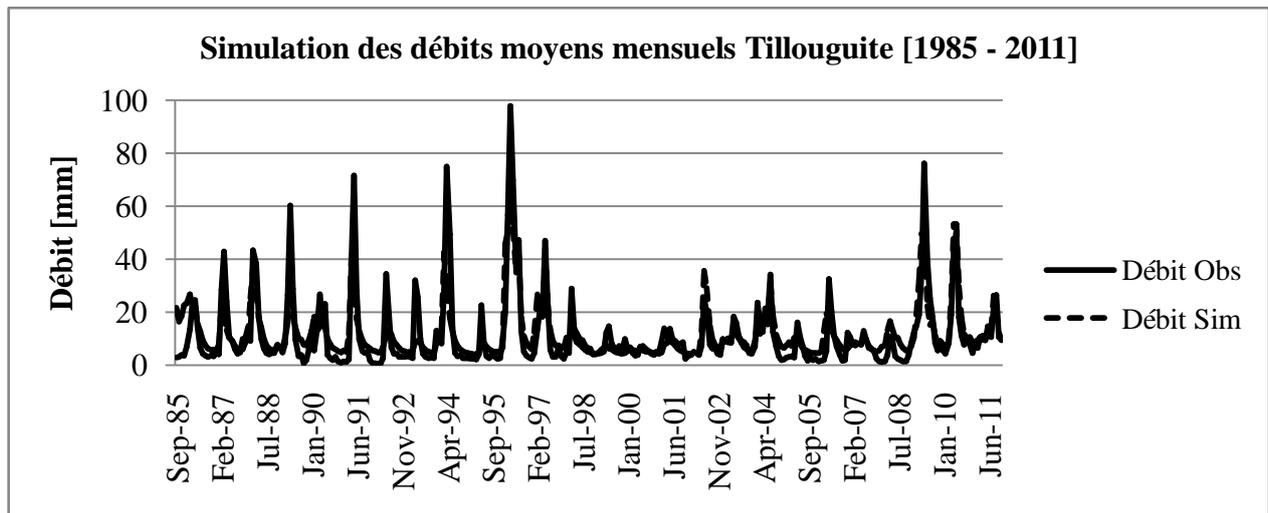


Figure 19: Simulation des débits à partir des pluies interpolées sur le bassin versant de Tillouguite [1985 - 2011]

Tableau 9: Paramètres d'efficacité de la simulation

Bassin	Superficie (km ²)	X1 (mm)	X1 réel (mm)	X2 (-)	Nash	Bilan
Tillouguite	2409.959087	6.20	492.41	1.27	0.696	1.03

- Pluie modifiée

On remarque que les résultats sont bons mais moins importants que les résultats avec de la pluie brute. Le facteur de Nash est de l'ordre de 0.55, avec un bilan de 0.98 qui est inférieure à 1 ; donc on constate une sous-estimation du débit au niveau des pics (Figure 20).

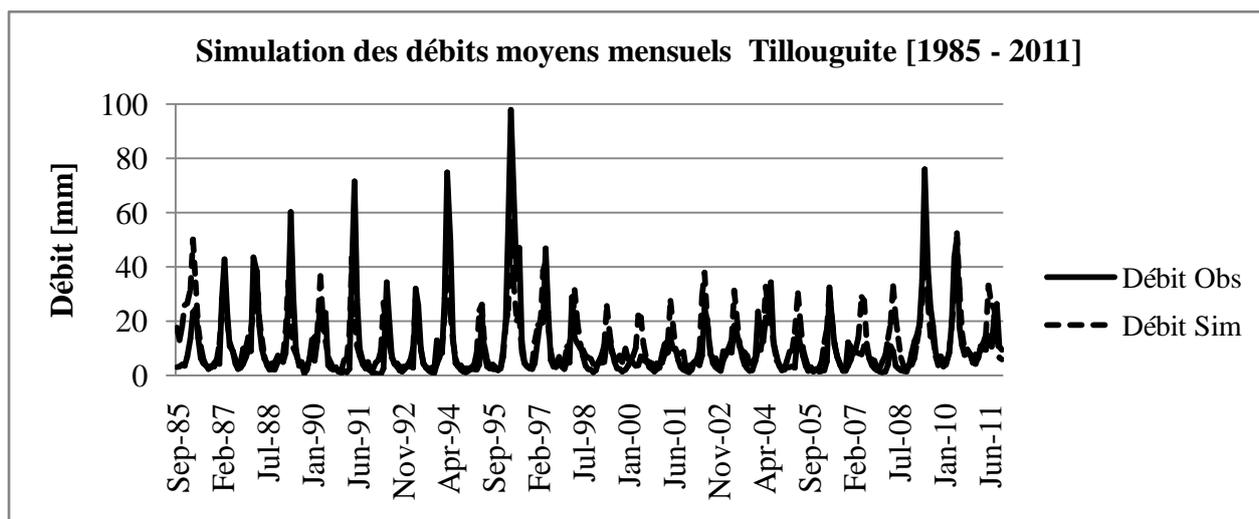


Figure 20: Simulation des débits à partir des pluies interpolées dans le sous bassin versant de Tillouguite [1985 - 2011]

Tableau 10: Paramètres d'efficacité de la simulation

Bassin	Superficie (km ²)	X1 (mm)	X1 réel (mm)	X2 (-)	Nash	Bilan
Tillouguite	2409.959087	7.77	2375.39	0.57	0.554	0.981

I – 3 : Niveau du bassin versant de l'Oued El Abid

L'application de GR2M au niveau du BVOA est basée sur la pluie et l'ETP interpolées au niveau de l'ensemble du bassin versant.

- *Pluie brute*

D'après la lecture du graphe et du Tableau 11, on peut dire que la simulation des débits est bonne au niveau de tout le bassin versant de l'Oued El Abid. Le Nash est de 0.822 sans pluie modifié.

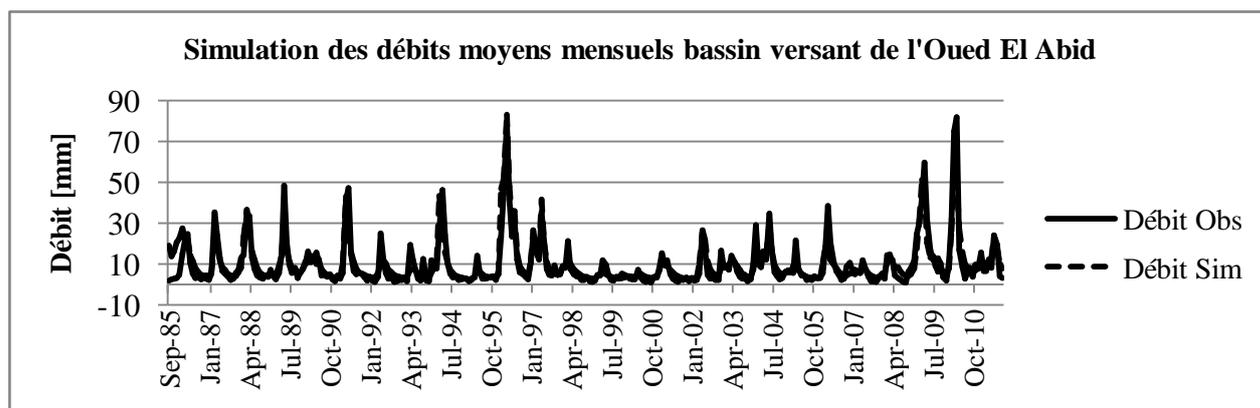


Figure 21: Simulation des débits moyens mensuels au niveau du barrage "bassin de l'Oued El Abid" [1985 - 2011]

Tableau 11: Paramètres d'efficacité de la simulation :

Bassin	Superficie (km ²)	X1 (mm)	X1 réel (mm)	X2 (-)	Nash	Bilan
Oued El Abid	6500	626	520	1.19	0.822	1.024

II - Application du modèle Thornthwaite

L'application du modèle de Thornthwaite a été faite par deux entrées de données, une avec la pluie brute et l'autre avec une pluie modifiée où on a intégré la proportion de l'équivalent en eau de neige. Ainsi on a testé notre modèle par les paramètres par défauts que le modélisateur a testé sur différents bassins versants.

II – 1 : Niveau du sous bassin d'Ait Ouchène

- *Pluie brute*

Les données d'entrées sont des pluies brutes, c'est-à-dire on n'a pas intégré la proportion de la neige dans le modèle, ceci est fait juste pour voir la réponse du modèle vis-à-vis de la pluie.

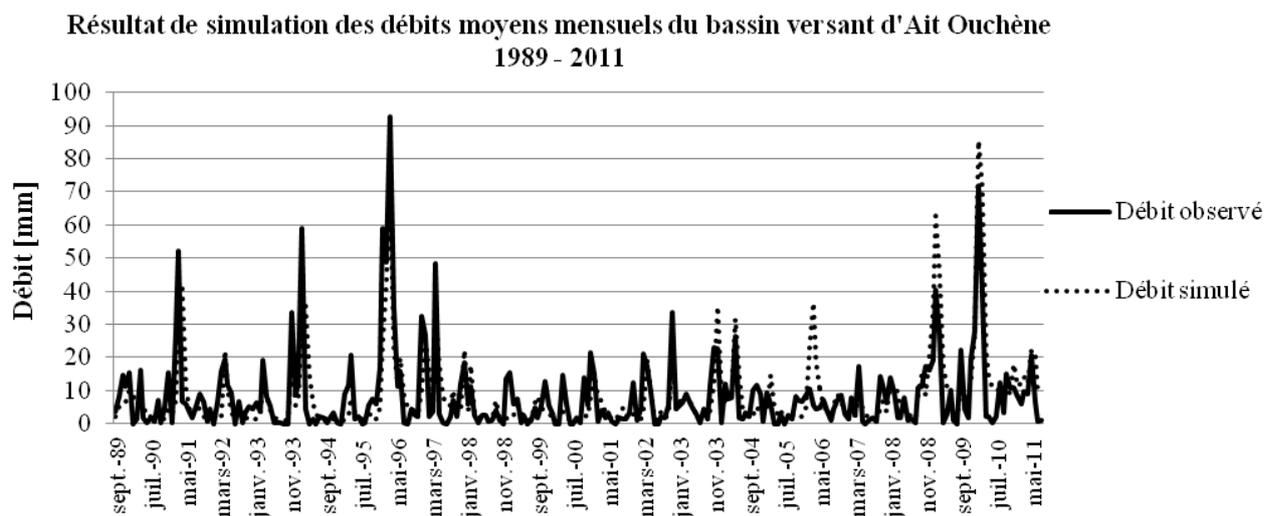


Figure 22: Simulation des débits moyens mensuels au niveau du sous bassin versant d'Ait Ouchène

Tableau 12: Simulation des débits du sous bassin versant d'Ait Ouchène et les différents paramètres optimisés automatiquement

RF	DRF	SMSC	Temprain	Tempsnow	maxmelt	Nash	R ²
0,713	0,203	240,935	3,083	-0,827	0,766	0,500	0,758

En lisant les résultats de la simulation, on note que le Nash est moins important qu'avec le modèle GR2M, même avec un coefficient de corrélation de 0.758. La Figure 22 montre que les débits sont bien simulés de 1989 jusqu'à 2003 ; par contre de 2003 à 2011, on remarque une sous-estimation des débits.

- Pluie modifiée

Les données d'entrées sont des pluies modifiées, c'est-à-dire que l'on a intégré la partie neige dans la pluie.

On remarque que le Nash a diminué de 0.5 à 0.45 même si on a modifié les précipitations en les rendant plus réalistes, le coefficient de corrélation s'est amélioré de 0.75 à 0.78.

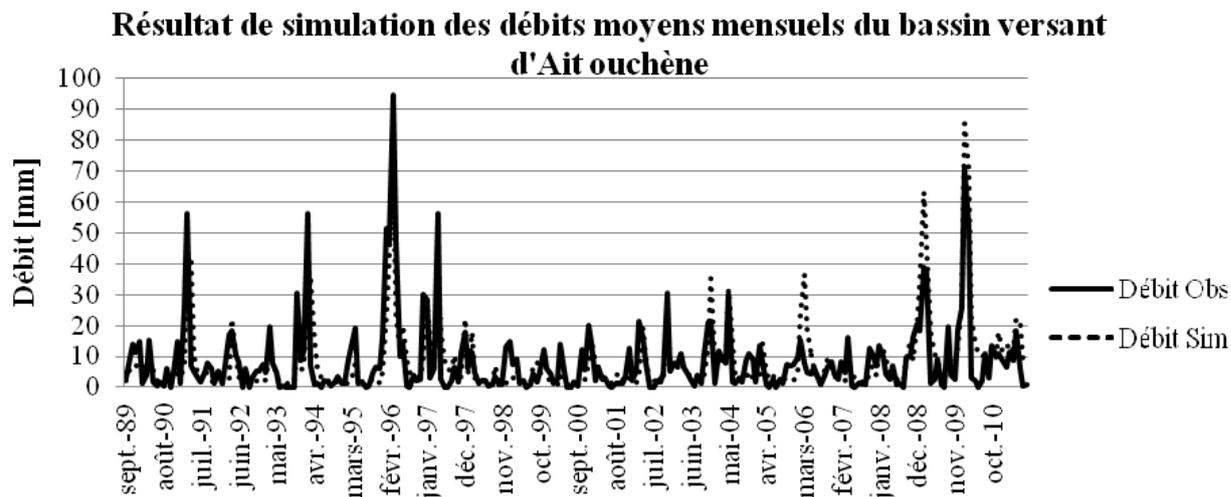


Figure 23: Simulation des débits moyens mensuels au niveau du bassin versant d'Ait Ouchène [1989 - 2010]

Tableau 13: Simulation des débits moyens mensuels avec des pluies modifiées au niveau du bassin versant d'Ait Ouchène

RF	DRF	SMSC	Temprain	Tempsnow	maxmelt	Nash	R ²
0,58	0,18	276,02	1,84	-0,48	0,92	0,45	0,78

II – 2 : Niveau du sous bassin versant de Tillouguite

- *Pluie brute*

La lecture du

Tableau 14 et du Figure 24 nous révèle que le modèle a bien simulé le débit même avec une pluie brute. Ce qui explique que la quantité de la neige précipitée au niveau du sous bassin versant n'est pas vraiment importante et qui ne modifie pas vraiment le débit.

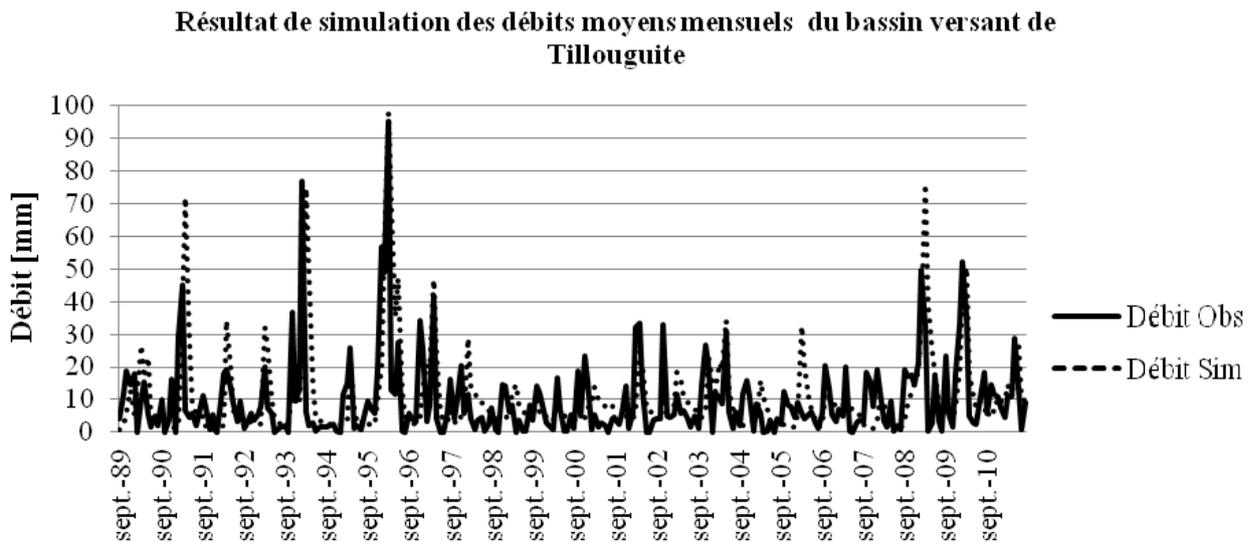


Figure 24: Simulation des débits moyens mensuels du bassin versant de Tillouguite

Tableau 14 : Les paramètres de simulation des débits, et les critères d'objectifs

RF	DRF	SMSC	Temprain	Tempsnow	maxmelt	Nash	R ²
1,00	0,27	146,96	3,34	-0,16	0,50	0,847	0,53

- *Pluie modifiée :*

On note que le débit simulé au niveau du bassin versant de Tillouguite a montré un facteur de Nash moins important que celui simulé avec des pluies brutes. Cela peut être expliqué par le fait que la quantité de la neige au niveau du bassin versant de Tillouguite n'est pas vraiment importante pour qu'elle modifie le débit ou parce que les précipitations reçues par le bassin s'infiltrèrent via les fissures et les formes karstiques de surface qui sont très développées dans le bassin de Tillouguite. Cela explique aussi le déphasage qu'on a pu observer au niveau de la relation entre la pluie et le débit (Figure 25).

Résultat de la simulation des débits moyens mensuels du bassin versant de Tillouguite

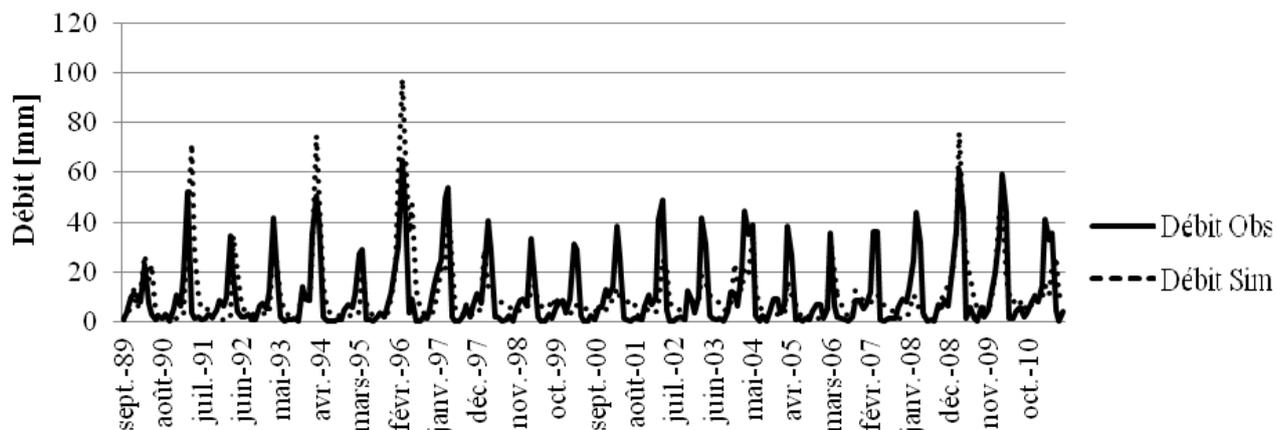


Figure 25: Simulation des débits moyens mensuels au niveau du bassin versant de Tillouguite

Tableau 15: Le résultat de simulation des débits moyens mensuels et les paramètres calibrés

RF	DRF	SMSC	Temprain	Tempsnow	maxmelt	Nash	R ²
0,0942	0,0804	643,1186	4,2511	-0,0048	0,4647	0,7316	0,64

II – 3 : Niveau du Bassin versant d’Oued El Abid :

- *Pluie brute* :

La figure ci-dessous nous présente la bonne simulation du débit par le modèle Thornthwaite au niveau de BVOA avec un critère de Nash de 0.65 et un R² = 0.69.

Résultat de la simulation des débits dans le bassin versant d’Oued El Abid

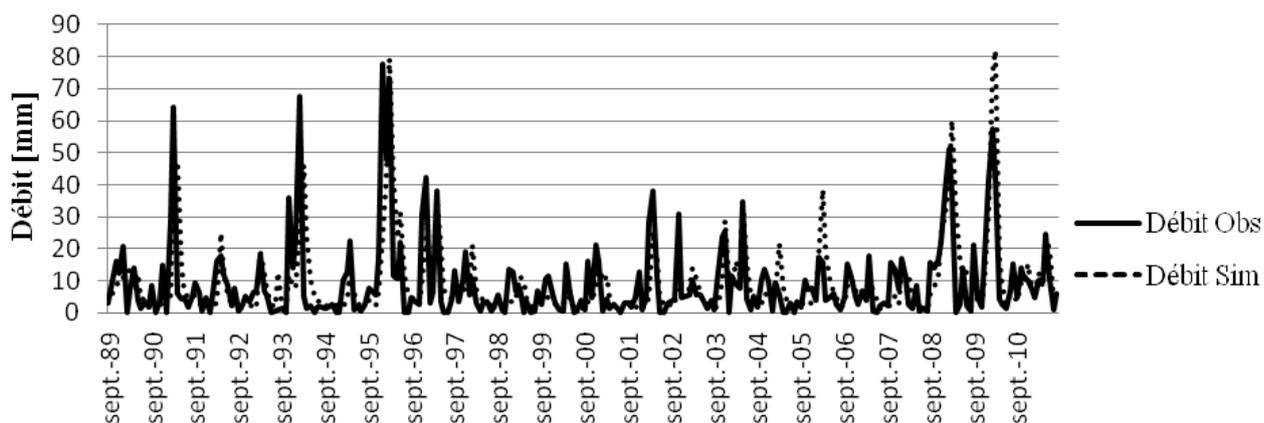


Figure 26: Simulation des débits moyens mensuels au niveau du BVOA

Tableau 16: Résultat de la simulation des débits au niveau du BVOA

RF	DRF	SMSC	Temprain	Tempsnow	maxmelt	Nash	R ²
0,3264	0,2330	84,6489	2,7269	-0,0015	1,0000	0,6478	0,6890

- Application du modèle Thornthwaite sous les paramètres par défauts :

Le résultat de la calibration par les paramètres par défaut que le modélisateur du modèle Thornthwaite a spécifié est présenté dans le tableau ci dessous.

Tableau 17: Résultat de l'application du modèle Thornthwaite avec les paramètres par défaut recommandés par le modélisateur au niveau des trois bassins

Bassin versant	Type de donnée	Nash
Ait Ouchène	Pluie brute	0.7557
	Pluie modifiée	0.8645
Tillouguite	Pluie brute	0.9428
	Pluie modifiée	-
Oued El Abid	Pluie brute	0.6525

D'après le Tableau 17, on peut dire que les paramètres recommandés par le modélisateur donnent de bons résultats, sans calibration du modèle. En comparant les valeurs de Nash de chaque bassin, on note que les paramètres recommandés donnent de bonne valeur de critère de Nash pour les trois bassins mais avec des pluies brutes par contre en pluie modifiée seule le sous bassin versant d'Ait Ouchène qui montre un critère de Nash significatif.

III– Calibration et validation

III – 1 : Modèle GR2M :

Les modèles conceptuels nécessitent une validation afin de vérifier que les paramètres du modèle peuvent fonctionner sur une période différente de la période de calibration.

Le choix de la période de calage et de validation a été choisi arbitrairement. Pour notre cas, on a pris la moitié de la série que l'on a validé sur l'autre moitié et inversement. Les périodes de calage et de validation pour le modèle GR2M sont respectivement 1985 – 1998 et 1998 – 2011.

Pour notre étude, on a deux types d'entrée de précipitations ; l'une est brute et l'autre modifiée où on a ajouté l'équivalent en eau de neige vu que le bassin versant connaît des précipitations neigeuses.

Tableau 18 : Résultat de calibration et validation des paramètres du modèles GR2M au niveau des trois bassins versants

	Pluie Brute						Pluie Modifiée			
	GR2M						GR2M			
	Ait Ouchène		Tillouguite		Oued El Abid		Ait Ouchène		Tillouguite	
Période de calage	85 - 98	98 - 11	85 - 98	98 - 11	85 - 98	98 - 11	85 - 98	98 - 11	85 - 98	98 - 11
X1	6.59	6.05	6.16	6.33	6.35	6.02	6.67	6.11	7.58	8.02
X1 réel (mm)	727	424	473	559	575	413	787.24	451.54	1958	3043
X2	1.05	1.12	1.3	1.24	1.18	1.17	0.97	1.04	0.62	0.52
Nash	0.753	0.878	0.695	0.729	0.833	0.837	0.776	0.863	0.62	0.53
Bilan	0.951	1.001	1.055	1.018	1.011	1.037	0.931	0.968	0.99	0.97
Nash Validation	0.216	0.691	0.654	0.642	0.749	0.797	0.68	0.267	0.14	0.47
Bilan Validation	1.433	0.671	0.87	1.26	1.108	0.949	0.651	1.37	1.34	0.71

La calibration des paramètres au niveau des trois bassins versants donnent de bonnes valeurs de critères de Nash soit en pluie brute ou modifiée avec une sous-estimation et surestimation moins importante des débits simulés (0.75 et 0.88, 0.7 et 0.73 et 0.83 et 0.84 respectivement pour Ait Ouchène, Tillouguite et Oued El Abid en pluie brute). Les Nash pour les précipitations modifiées sont moins importants vu que l'estimation de la neige peut faire partie de cette diminution (0.77 et 0.86, 0.62 et 0.53 respectivement pour Ait Ouchène et Tillouguite).

La validation des paramètres calibrés pour les pluies brutes révèle un bon critère de Nash pour les bassins de l'Oued El Abid et de Tillouguite, qui sont respectivement 0.8 et 0.75, 0.65 et 0.64. Concernant le bassin d'Ait Ouchène, la période de validation de 85 – 98 montre un faible critère de Nash qui est de l'ordre de 0.21 dont les paramètres sont calibrés sur la période de 98-11 où on remarque d'après la valeur du bilan de validation qui est de 1.43. C'est-à-dire que le modèle a surestimé le débit ; cela peut être expliqué par le fait que l'on n'a pas assez de précipitations et que le modèle essaye de surestimer le débit surtout qu'il est calibré sur une période assez humide. Concernant la validation par les données de pluie modifiée, on note que la valeur du critère de Nash est faible à cause d'une estimation probablement moins correcte de la neige.

D'après la calibration et la validation des paramètres au niveau de notre bassin versant tout entier, on peut conclure que le modèle fonctionne bien avec des critères de Nash autour de 0.8, ce qui nous permet d'utiliser ce modèle pour simuler les débits.

III- 2 : Modèle Thornthwaite :

Après avoir calibré et validé le modèle GR2M qui a montré sa fiabilité à l'échelle du BVOA, on doit tester les six paramètres du modèle Thornthwaite sur la période de 1989 – 2011 en tenant la moitié de cette série pour la calibration et l'autre moitié pour la validation et inversement.

On aura deux types de données de précipitation, une avec des précipitations brutes et l'autre avec des pluies modifiées. On a deux résultats de calibration-validation des paramètres : la première avec des paramètres non modifiés et l'autre en laissant les températures de la neige et de la pluie qui sont proposées par le modélisateur.

- *Pluie brute* :

Tableau 19: Résultat de calibration et validation du modèle Thornthwaite au niveau des trois bassins

Période de calage	Thornthwaite						Température de pluie et de la neige fixée					
	Ait Ouchène		Tillouguite		Oued El Abid		Ait Ouchène		Tillouguite		Oued El Abid	
	89-00	00-11	89-00	00-11	89-00	00-11	89-00	00-11	89-00	00-11	89-00	00-11
RF	0.46	0.38	1.00	0.35	0.72	0.44	0.46	0.38	1.00	0.35	0.72	0.44
DRF	0.17	0.21	0.30	0.25	0.25	0.22	0.17	0.21	0.30	0.25	0.25	0.22
SMSC	263.66	107.73	139.26	68.25	176.50	72.54	263.66	107.73	139.26	68.25	176.50	72.54
TempRain	2.08	2.69	5.00	3.30	1.93	3.14	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30
TempSnow	-0.01	0.00	-0.35	-0.06	0.00	-0.01	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
MaxMelt	0.68	1.00	0.37	0.70	0.69	0.69	0.68	1.00	0.37	0.70	0.69	0.69
Nash	0.49	0.32	0.78	0.92	0.68	0.46	0.49	0.32	0.85	0.94	0.68	0.46
Nash Validation	-	0.46	0.93	0.97	-	0.55	-	0.45	0.63	-	-	0.55

(-): Valeur de Nash non significative

La calibration des paramètres au niveau des trois bassins versants donnent de bonnes valeurs de critères de Nash même en fixant les paramètres de Tpluie et Tneige, à l'exception du bassin d'Ait Ouchène où les valeurs des critères de Nash sont faibles surtout pendant la période de 2000 – 2011 (0.5 et 0.32, 0.8 et 0.92 et 0.7 et 0.46 respectivement pour Ait Ouchène, Tillouguite et Oued El Abid). Les Nash pour la calibration par les températures fixées sont plus importants surtout pour les deux bassins versant de Tillouguite et de l'Oued El Abid (0.5 et 0.32, 0.85 et 0.94 et 0.7 et 0.46 respectivement pour Ait Ouchène, Tillouguite et Oued El Abid).

La validation des paramètres calibrés révèle un bon critère de Nash pour le bassin de Tillouguite 0.93 et 0.97. Par contre les autres bassins les paramètres de calibration n'ont pas été tous validés de manière satisfaisante sur les deux périodes.

- *Les pluies modifiées :*

Tableau 20: Résultat de calibration validation des paramètres du modèle Thornthwaite sur les deux bassins versants

Période de calage	Thornthwaite							
	Température non fixée				Température fixée			
	Ait Ouchène		Tillouguite		Ait Ouchène		Tillouguite	
	89-00	00-11	89-00	00-11	89-00	00-11	89-00	00-11
RF	0.35	0.30	0.13	0.06	0.35	0.30	0.13	0.06
DRF	0.15	0.17	0.07	0.10	0.15	0.17	0.07	0.10
SMSC	296.29	113.15	598.95	1007.03	296.29	113.15	598.95	1007.03
TempRain	2.05	2.81	3.68	4.76	3.3	3.3	3.3	3.3
TempSnow	-0.17	-0.14	0.00	-0.02	-1	-1	-1	-1
MaxMelt	0.41	1.00	0.31	0.43	0.41	1	0.30	0.43
Nash	0.47	0.29	0.66	0.67	0.46	0.29	0.66	0.67
Nash validation	-	0.408	0.63	-	-	0.41	0.63	-

(-): Valeur de Nash non significative

La calibration des paramètres au niveau des bassins versants donnent de bonnes valeurs de critères de Nash surtout pour le bassin versant de Tillouguite même en température de pluie et de neige fixée qui sont 0.66 et 0.67. Contrairement au bassin d'Ait Ouchène où les valeurs des critères de Nash sont médiocres 0.47 et 0.29. La validation des paramètres calibrés donne des résultats moins importants pour les deux bassins contrairement aux résultats des pluies brutes.

Après le test du modèle Thornthwaite, on a trouvé qu'il fonctionne très bien au niveau du bassin versant de Tillouguite seulement ; mais avec des pluies brutes, la méthode d'estimation de la neige peut influencer le bon fonctionnement du modèle.

IV- Comparaison des deux modèles

Cette partie va nous permettre de distinguer le modèle le plus performant à simuler les débits sur toute la période 1985 – 2011 dans les différents bassins versants.

IV – 1 : Sous bassin versant d'Ait Ouchène

Tableau 21: Corrélation entre les débits observés et simulé du modèle Thornthwaite et ceux du modèle GR2M

	<i>Observé</i>	<i>Thornthwaite</i>	<i>GR2M</i>
Observé	1		
Thornthwaite	0,78	1	
GR2M	0,86	0,81	1

Le Tableau 21 montre que le débit simulé par le modèle GR2M est le plus proche au débit observé que celui simulé par le modèle Thornthwaite. Par contre les deux modèles simulent pratiquement le même débit avec un $R = 0.81$

IV – 2 : Sous bassin versant de Tillouguite

Tableau 22: Corrélation entre les débits observés, simulés du modèle Thornthwaite et ceux du modèle GR2M

	<i>Observé</i>	<i>Thornthwaite</i>	<i>GR2M</i>
Observé	1		
Thornthwaite	0,53	1	
GR2M	0,84	0,72	1

Il ressort du Tableau 22 que le débit simulé par Thornthwaite révèle un $r=0.53$ qui est moins bon que celui de GR2M qui est égale à 0.84.

IV – 3 : Bassin versant de l'Oued El Abid

Tableau 23: Corrélation entre les débits observés, simulés du modèle Thornthwaite et ceux du modèle GR2M

	<i>Observé</i>	<i>Thornthwaite</i>	<i>GR2M</i>
Observé	1		
Thornthwaite	0,69	1	
GR2M	0,90507	0,75	1

Le tableau montre une forte corrélation entre les débits produits par GR2M contrairement aux débits simulés par Thornthwaite.

CHAPITRE IV : PROJECTIONS CLIMATIQUES ET IMPACT SUR LES RESSOURCES EN EAU

Dans ce chapitre, on va traiter et discuter l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau. La méthode consiste à faire tourner le modèle hydrologique avec des scénarios climatiques (Tramblay et al., 2013). La planète va connaître une augmentation de la moyenne des températures, la fonte massive de la neige, élévation du niveau de la mer... qui auront des conséquences hydrologiques potentiellement importantes (GIEEC, 2007). Plusieurs études ont confirmé un changement important, une diminution des ressources en eau de -30% à -50% à l'horizon de 2050 (Milano et al., 2013), avec une augmentation de la température moyenne annuelle de 3° à 5°C d'ici 2080 (Somot et al., 2008) au niveau de la méditerranée. A l'échelle de l'Afrique du Nord, il y aurait une augmentation de la température de 2 à 3°C et une diminution des précipitations de 20% d'ici 2050 (Schilling et al., 2012). Ce travail est une première étude pionnière sur les projections climatiques appliquée au niveau du BVOA qui est considéré comme un bassin clé de l'économie nationale. Cette étude va contribuer à la connaissance de la ressource en eau et aidera par conséquent les gestionnaires à prendre des décisions futures en termes de gestion et de reconquêtes des systèmes aquatiques à l'échelle du grand bassin versant de l'oued Oum Er Rbia.

L'étude de l'impact du réchauffement climatique sur les ressources en eau nécessite différentes étapes :

- une simulation des conditions climatiques via à un modèle climatique global qui fonctionne selon des scénarios climatiques décrivant les conditions futures du climat.
- Génération de scénarios climatiques, en modifiant les données observées selon les changements projetés par les modèles climatiques.
- Transformer les projections climatiques en débits en utilisant le modèle hydrologique déjà calibré et validé.

I - Modèle et scénario climatique

Un modèle climatique est un outil utilisé pour simuler le climat. Il est fondé sur des équations mathématiques. Il représente le système climatique en faisant entrer les données de l'atmosphère, de l'hydrosphère, de la cryosphère et leurs interactions (GIEEC, 2007).

Les simulations se font à l'échelle planétaire avec un modèle climatique global (Global Circulation Model GCM), qui peut servir à forcer un modèle climatique régional (Regional Climatic Model RCM) avec une résolution plus fine. Ces simulations génèrent un climat futur en se basant sur différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre qui sont introduits au niveau du modèle climatique.

I – 1- Modèle climatique global

Les modèles climatiques globaux représentent le climat en se basant sur plusieurs processus physiques qui interagissent avec l'atmosphère. La résolution de ces modèles est très

grossière et peut atteindre 250km/maille. Ce qui rend difficile son utilisation dans les différentes études d'impacts au niveau d'un bassin versant moyen ou petits. Le recours à une résolution plus fine est nécessaire en utilisant une méthode de descente d'échelle (Downscaling) pour diminuer la résolution spatiale des modèles climatiques globaux.

+ Descente d'échelle.

La méthode de descente d'échelle vise à diminuer la résolution spatiale des modèles climatiques globaux afin d'être utilisable au niveau des bassins. La descente d'échelle peut être réalisée par deux méthodes :

- La méthode dynamique : elle consiste à utiliser un modèle climatique régional forcé par les conditions initiales et aux limites issues des modèles climatiques globaux.
- La méthode statistique : différentes approches existent :
 - Méthode des anomalies/ perturbation : prend en compte les variations moyennes simulées par le modèle du climat.
 - Méthode quantile-quantile : Prend en compte les variations moyennes ainsi que leurs distributions.
 - Méthode type de temps : Prend les caractéristiques des grandes échelles qui sont bien reproduites par les modèles de climat.

I – 2 - Scénarios climatiques

Les émissions de gaz à effet de serre et les aérosols sont utilisés au niveau des modèles climatiques afin de réaliser les projections climatiques jusqu'à 2100. Dans notre étude, on a utilisé les scénarios issus du 5ème rapport du GIEEC RCP (Representative Concentration Pathways (en W/m²)) qui simulent le forçage radiatif, dont on peut distinguer 4 types de RCPs :

- RCP 4.5 : La variation de la radiation est 4.5 W/m² avec une concentration en GES de 660ppm en CO₂,
- RCP 8.5 : La variation de la radiation est 8.5 W/m² avec une concentration en GES de 1379 ppm en CO₂.

II - Simulation régionale du climat

On a choisi un modèle régional (RCA4.5, fourni par l'institut SMHI), forcé par des réanalyses (ECMWF) et deux modèles globaux de climat (MPI et ECEARTH) avec une résolution de 12km sous deux scénarios d'émission RCP 4.5, considéré comme optimiste et RCP 8.5, considéré comme pessimiste. Les simulations incluent les précipitations, les températures, et l'Evapotranspiration potentielle, calculée à partir de la formule de Penman-FAO utilisant les variables internes du modèle : radiation, vent, humidité et température.

La figure n°22 montre les moyennes mensuelles des précipitations reproduites par les modèles RCMs, on voit que tous les modèles surestiment les précipitations par rapport aux précipitations observées. Ce qui donne un ordre de grandeur de la sous-estimation des précipitations observées dans le bassin à cause des précipitations neigeuses manquantes. Par contre le cycle annuel est plutôt bien reproduit par les modèles RCMs. Pour la température, le cycle est bien reproduit avec les deux modèles avec une sous-estimation du modèle SMH-

ECEARTH. Les changements sur l'ETP semblent assez faibles et un peu plus que les précipitations, ce qui indiquerait que la hausse de la température n'est pas forcément liée à une hausse de l'ETP.

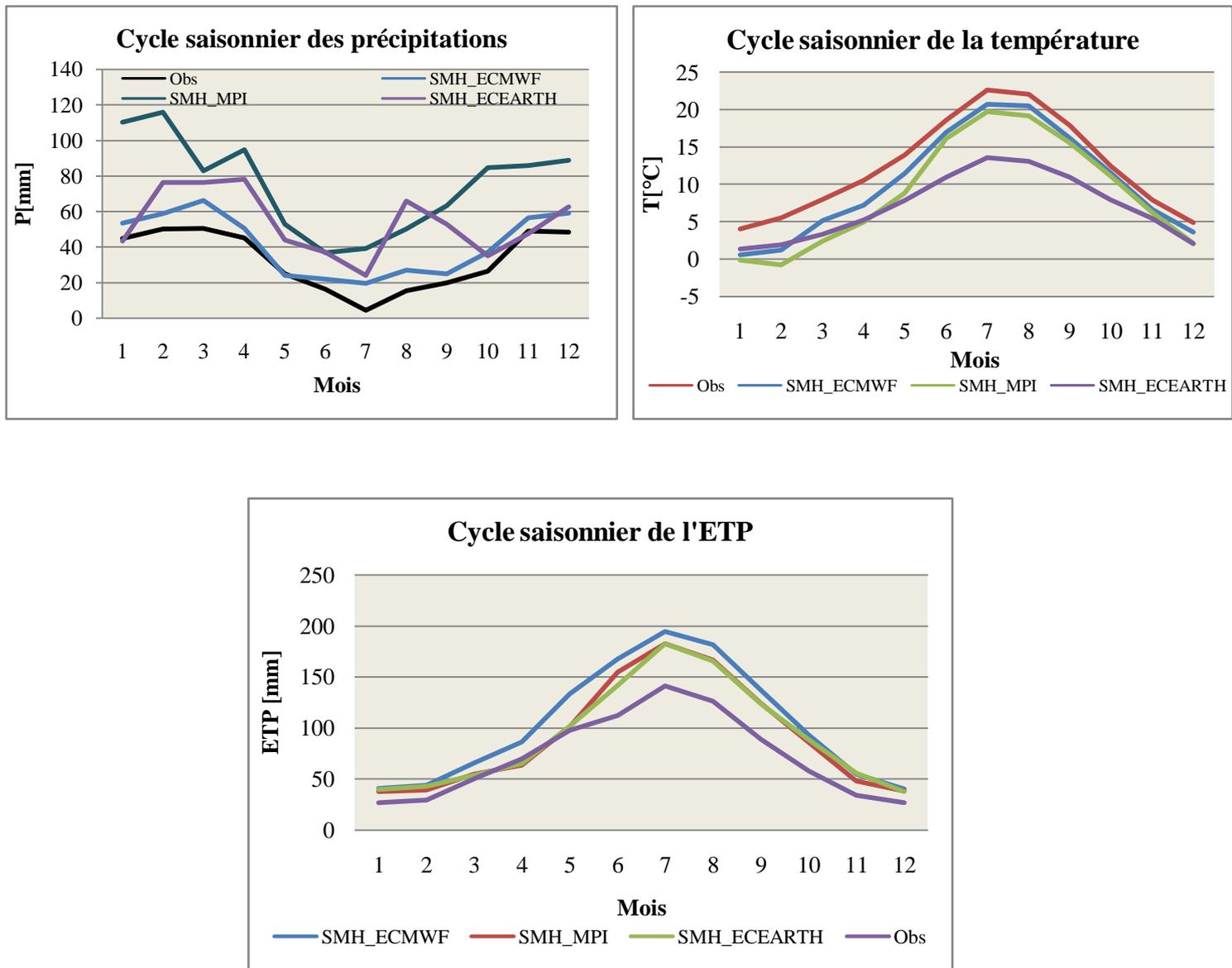


Figure 27: Le cycle saisonnier des précipitations, de la température et de l'ETP

- Les changements relatifs projetés

On a projeté 4 combinaisons RCM/GCM, sur 3 périodes à savoir 1985 – 2005 comme période historique, 2045 – 2065 le futur proche et 2070 – 2090 le futur lointain. Une baisse des précipitations est prévue au niveau du BVOA avec un pourcentage de -22% d'ici 2065 et -24% d'ici 2090 (Figure 28). Dans ce même contexte hydro-climatique au nord du Maroc, Trambly et al., 2014, a trouvé que les précipitations vont diminuer de 20% au Nord du Maroc. Quant à García-Ruiz et al., 2011, au niveau de la méditerranée, a trouvé que les précipitations vont diminuer de 15%. En fin, Schilling et al., 2012, a montré que les précipitations vont diminuer de 20% au niveau de l'Afrique du Nord. Toutes ces études, y compris celle-ci, confirment presque la même tendance de diminution des précipitations au niveau du bassin méditerranéen, de 15 à 20%.

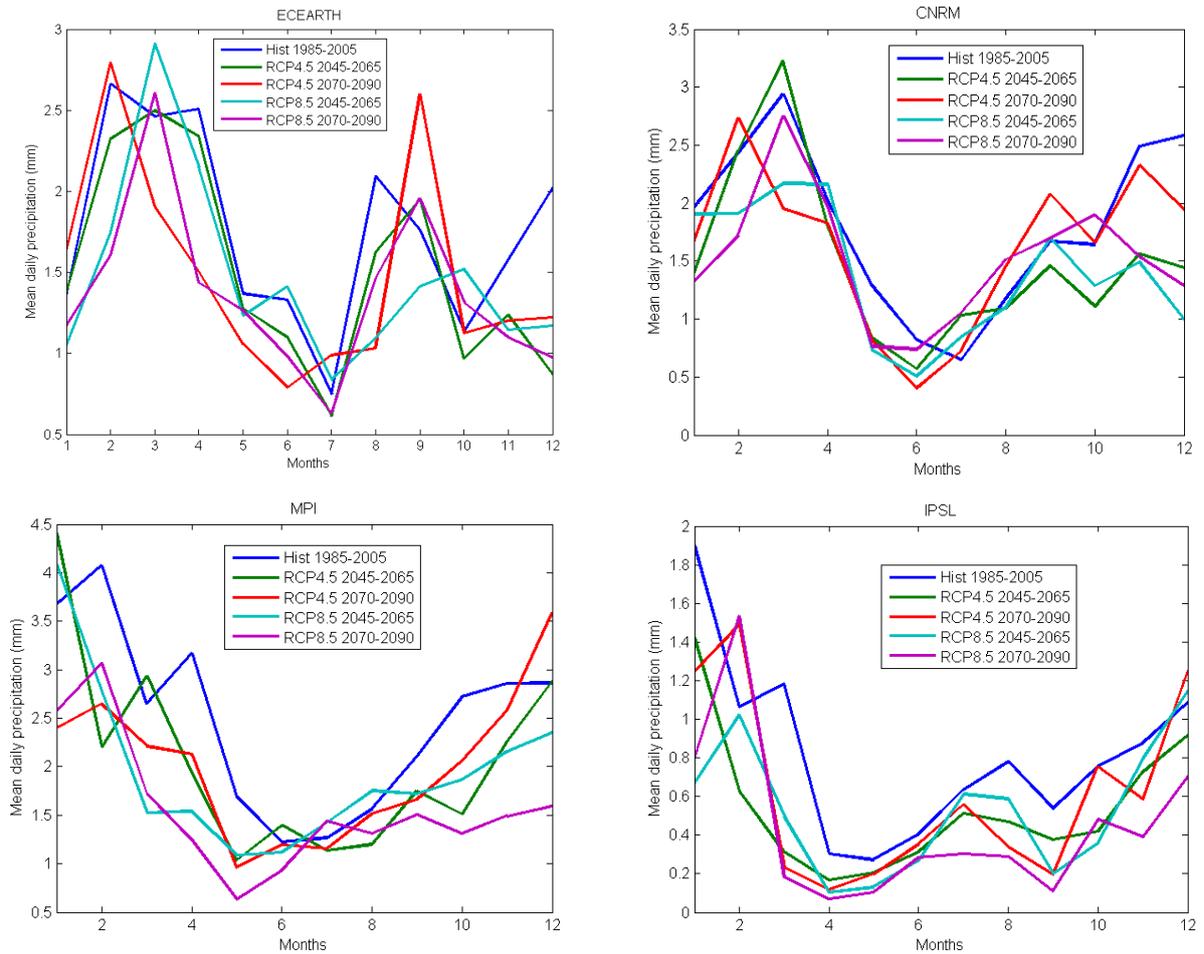


Figure 28: La moyenne mensuelle des précipitations avec les simulations de RCM sur les 3 horizons de temps

Les projections des températures indiquent une hausse de la moyenne annuelle de 2°C qui est tout à fait cohérent avec l'étude réalisée au niveau du Maroc (Trambly et al., 2014) ainsi qu'au niveau de l'Afrique du Nord (Schilling et al., 2012) **Figure 30**. Cette hausse de température entraîne également la hausse de l'ETP d'une façon directe. Cette augmentation est estimée de 15% (Figure 29).

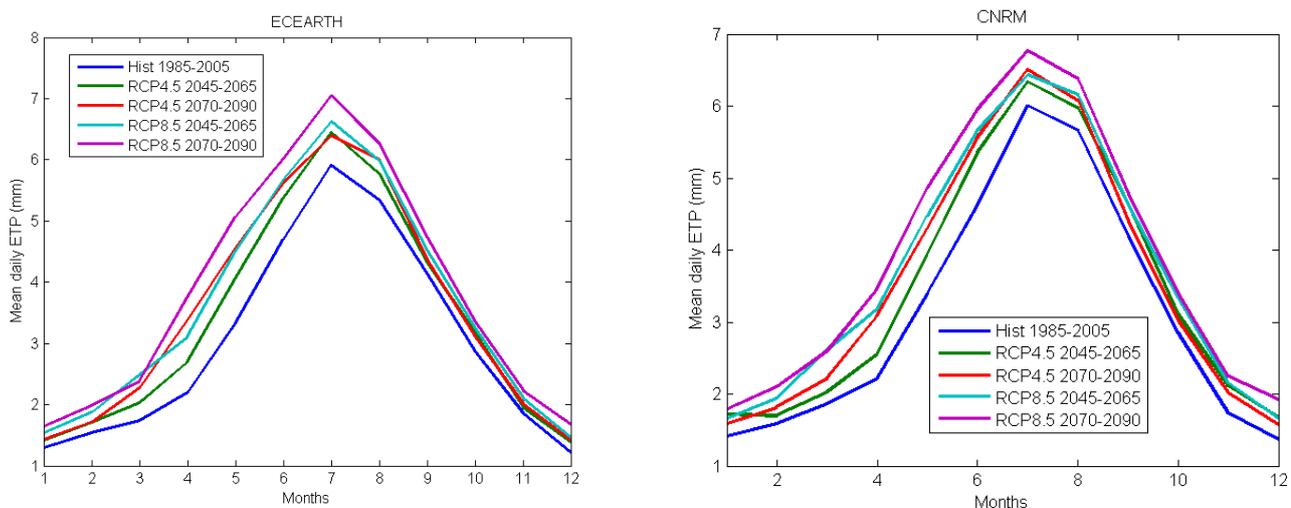


Figure 29: Les moyennes mensuelles de l'ETP générées par les deux scénarios d'émission d'effet de serre sur les trois horizons de temps

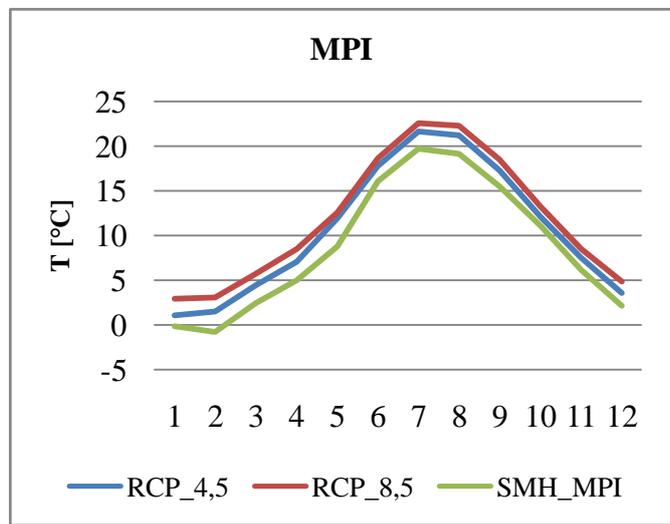
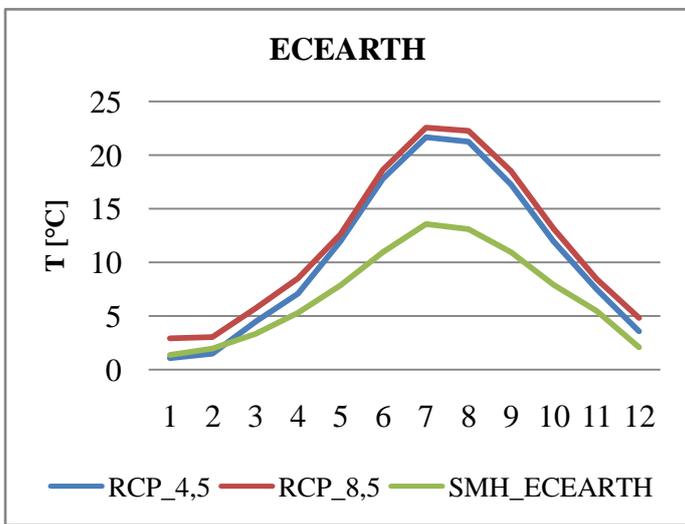


Figure 30: Les moyennes mensuelles de la température générée par les deux scénarios d'émission d'effet de serre

III - L'impact des changements des projections climatiques sur l'hydrologie

Pour étudier l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau au niveau du BVOA, on est censé d'alimenter notre modèle hydrologique par les résultats de projection climatique à savoir les précipitations et l'évapotranspiration afin d'avoir le débit futur.

Le modèle utilisé dans cette partie est le modèle GR2M, ce choix était pris par la performance de ce modèle au niveau de notre bassin versant, Dans le chapitre précédent, on a pu appliquer sur le bassin d'étude le modèle hydrologique GR2M, qui a reproduit fidèlement les débits observés.

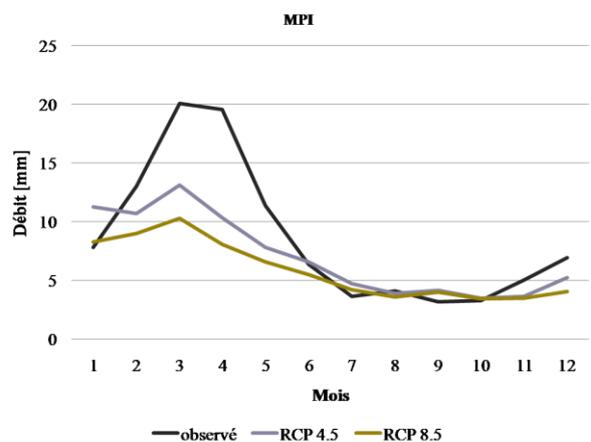
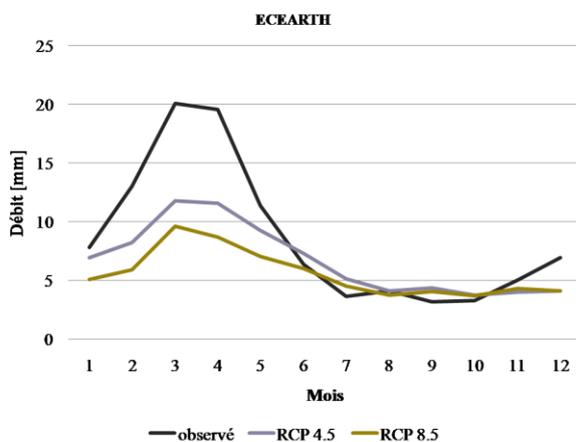


Figure 31: Simulation des débits à partir des précipitations et ETP projetés sur la période 2040 - 2060

D'après la Figure 31, on note que les débits vont connaître une diminution importante surtout au cours de deux saisons, à savoir l'hiver et le printemps. Les différents scénarios annoncent une diminution très importante des débits pendant les périodes les plus productives à savoir l'hiver et le printemps avec -16% et -23% sous ECEARTH et -18% et -32% sous MPI. La moyenne des changements projetés sur les débits indique une baisse de -22% des ressources en eau, ce qui confirme les résultats des autres études, soit au niveau national (Tramblay et al, 2013, Tramblay et al., 2014, Milano et al., 2013) soit au niveau du bassin méditerranéen (Schilling et al., 2012).

Conclusion

Les impacts des changements climatiques sur les différentes ressources naturelles sont maintenant des sujets d'actualité au Maroc. La question de la disponibilité de la ressource en eau en qualité et en quantité devient de plus en plus inquiétante. La présente étude avait donc pour but d'éclaircir et de prévoir l'avenir de cette ressource au niveau du BVOA.

La modélisation hydrologique nous a permis de simuler le débit au niveau du BVOA ainsi qu'au niveau de ses deux sous bassins versants. Les paramètres du modèle hydrologique GR2M au pas de temps mensuel n'ont pas montré une grande variabilité au niveau de la calibration et la validation au niveau du BVOA. La pertinence des résultats obtenus au pas de temps mensuel nous a permis également de bien caractériser la ressource en termes de gestion et d'aménagement. Par contre le modèle Thornthwaite n'a pas montré une performance importante pour qu'il soit utilisé pour des fins de gestion et d'aménagement de la ressource en eau.

La différence des changements de précipitations projetées est de -22% sur la période de 2040 – 2060 et -24% sur la période de 2070 – 2090. Les changements climatiques par les scénarios 4.5 et 8.5 indiquent une diminution des ressources en eau de -16 à -23% sous ECEARTH et -18 à -32% sous MPI d'ici 2060. Quant aux températures, elles vont connaître une augmentation de l'ordre de 2°C d'ici 2060. Les résultats obtenus sont cohérents avec ceux obtenus par différentes études à l'échelle nationale (-20% des précipitations, -30 à -57% des ressources en eau et +2°C en température) et à l'échelle de la méditerranée (-50% des ressources en eau) (Tramblay et al., 2014 et Milano et al., 2013). Il est important de souligner que chaque simulation des débits futurs ne tient pas en compte les différents changements ou modifications que l'occupation du sol peut subir via l'action de l'homme. Car ils peuvent avoir un effet très important sur la relation pluie-débit et l'évapotranspiration potentielle au niveau du BVOA.

Le BVOA est un bassin qui nécessite plusieurs études avec des pas de temps plus fins et un test par différents modèles hydrologiques afin d'identifier et de valider un modèle plus adapté aux changements des conditions climatiques et peut également servir à long terme pour être forcé par les données issues des scénarios climatiques.

Il est souhaitable d'appliquer les techniques utilisées dans ce projet de fin d'étude, à l'ensemble du grand bassin versant de l'Oued Oum Er Rbia.

Les changements projetés peuvent avoir un impact négatif sur les ressources en eau dans la zone, objet de ce travail. Ce qui nécessite des études approfondies pour essayer de voir quelles méthodes d'approche à adopter pour garantir une gestion intégrée des ressources en eau au niveau du barrage Bin El Ouidane telles que :

- Offrir des quantités suffisantes pour le périmètre irrigué de Tadla, qui vont satisfaire les besoins de la plante.
- rationaliser le transfert de l'eau par le canal de la Rocade.

Références

- Bahzad.H, (1985) : *Recherches hydrologiques et hydrochimiques sur quelques karsts Méditerranéens : Liban, Syrie, Maroc, Publications de l'Université Libanaise, Section des études géographiques, Beyrouth, 691 p.*
- Bissour R., El Khalki Y., ElGhachi M., Reddad H., HAFID A. et Idali M.(2015) : *Paramètres physiographiques du bassin versant de l'oued El Abid (Haut Atlas central, Maroc): caractérisation, apports des SIG et impacts sur le barrage de Bin El Ouidane. Revue de la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Béni Mellal, sous presse.*
- Boudhar, A., Duchemin, B., Hanich, L., Boulet, G., and Chehbouni,A.(2011): *Spatial distribution of the air temperature in mountainous areas using satellite thermal infra-red data, C. R. Geosci., 343, 32–42.*
- Combe.M, (1977) : *Haut Atlas calcaire, in Ressources en eau du Maroc, Tome 3, domaines Atlasique et sud atlasique, Editions du Service Géologique du Maroc, Rabat.*
- Couvreur G. (1988) : *Essai sur l'évolution morphologique du Haut Atlas central calcaire (Maroc)». Notes et Mémoires du service géologique N°318. Rabat. 391 p.*
- Gregory J. McCabe and Steven L. Markstrom, (2007): *A Monthly Water-Balance Model Driven By a Graphical User Interface, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 12 p.*
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), (2007): *Climate change (2007): the physical science basis. Contribution to Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.*
- José M. García-Ruiz, J. Ignacio López-Moreno, Sergio M. Vicente-Serrano, Teodoro Lasanta-Martínez, Santiago Beguería (2011): *Mediterranean water resources in a global change scenario, Earth-Science Reviews 105, 121–139.*
- Martinec, J. (1985): *Snowmelt runoff models for operational forecasts. Nordic Hydrol. 16, 129–136.*
- Milano.M , Ruelland.D , Fernandez.S, Dezetter.D , Fabre.J , Servat.E , JeanMarie Fritsch , Ardoin-Bardin.S & Thivet.G (2013): *Current state of Mediterranean water resources and future trends under climatic and anthropogenic changes, Hydrological Sciences Journal, 58:3, 498-518.*
- Mouelhi, S. (2003) : *Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier, thèse de doctorat, ENGREF, Paris, Cemagref, Antony, France, 323 p.*
- Mouelhi.S,(2006) : *Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier, thèse de doctorat, Ecole nationale du génie rural des eaux et des forêts, France, 323 p.*

- NASH, J. E. et SUTCLIFFE, J. V. (1970): *River flow forecasting through conceptual models. Part I-A discussion of principles. J. Hydrol. 10, 282-290.*
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., and Loumagne, C. (2005): *Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? Part 2 – Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling, J. Hydrol., 303, 290–306.*
- Outaleb.K. (2013), *Etude de la relation entre l'enneigement et les paramètres hydrométéorologiques en montagne du Haut Atlas à l'aide des données MODIS (Application sur le bassin versant d'Oued El Abid), mémoire de Master, Université HASSAN II, Faculté des Sciences Ain Chock, 89 p.*
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. (2001) *Does a large number of parameters enhance model performance ? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. J. Hydrol. 242 (3- 4), 275- 301.*
- Perritaz L. (1995) : *Contribution à l'étude géomorphologique et hydrogéologique d'un karst perché en domaine méditerranéen: le plateau des Ait Abdi (Haut-Atlas central Maroc), thèse de doctorat, Université de Fribourg, Suisse, 178 p.*
- Schilling, J., Freier, K. P., Hertig, E., and Scheffran, J. (2012): *Climatechange, vulnerability and adaptation in North Africa with focuson Morocco, Agriculture, Ecosyst. Environ., 156, 12–26.*
- Schulz, O et De Jong. C, (2004):*Snow and sublimation: Field experiments and modeling in the high Atlas Mountains of Morocco, Hydrology and Earth System Sciences, 8(6), 1076 – 1089.*
- Somot, S. Lucas.M, Sevault.F, Déqué.M, Crépon.M., (2008):*21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled atmosphere–ocean regional climate model.Global Planetary Change, 63, 112–126.*
- Taïbi AN., El KhalkiY., El HannaniH. (2015): *Atlas régional, région Tadla Azilal Maroc, 91 p (téléchargeable sur le site www.flshbm.ma).*
- Tramblay, Y., Ruelland, D., Somot, S., Bouaicha, R. & Servat, E. (2013): *High-resolution Med-CORDEX regional climate model simulations for hydrological impact studies: a first evaluation in Morocco. Hydrol. Earth Syst. Sci. 17, 3721–3739.*
- Tramblay.Y, Ruelland.D, Bouaicha.R & Servat. E, (2014): *Projected climate change impacts on water resources in northern Morocco with an ensemble of regional climate models.Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions Proceedings of FRIEND-Water, 250 – 255.*
- Wolock David M., McCabe Gregory J. (1999) : *Explaining spatial variability in mean annual runoff in the conterminous United States, 12p.*