

Master Spécialisé Sciences de l'eau
ماستر متخصص في علوم الماء

Mémoire de Stage de Fin d'Etudes

Modélisation hydrologique et hydraulique et impact des
changements climatiques sur une zone de
de montagne en climat semi-aride : cas des sous bassins
versants d'Amizmiz et N'fis (Maroc)

Par :

EL GOUMI Said

Sous la direction de :

Etablissement

Pr. SAIDI Mohamed El Mehdi Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech

Soutenu le 6 Octobre 2017 devant le Jury composé de :

NOM et Prénom

Etablissement

Pr. HANICH Lahoucine

Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech

Pr. LAFTOUHI Nour-Eddine

Faculté des Sciences Semlalia Marrakech

Pr. SAIDI Mohamed El Mehdi

Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech

“C’est plus difficile d’étudier les astres infiniment éloignés que celui des rivières qui coulent à mes pieds.”

Galilée (1564-1614)

Avant-propos

Fiche représentative du mémoire	
Nom et Prénom de l'auteur	
<i>EL GOUMI Said</i>	
Intitulé du travail	
Modélisation hydrologique et hydraulique et impact des changements climatiques sur une zone de montagne en climat semi-aride : cas des sous bassins versants d'Amizmiz et N'fis (Maroc)	
Spécialité	
Hydrologie	
Encadrant	
<i>Dr. SAIDI Mohamed El Mehdi Professeur d'Enseignement Supérieur Laboratoire Géosciences et environnement, Faculté des Sciences et techniques, Université Cadi Ayyad. Marrakech</i>	
Période de réalisation des travaux	
<i>Mars 2017 - Septembre 2017</i>	

Remerciements

Difficile de résumer ici, en seulement quelques mots, la gratitude que j'éprouve pour toutes les personnes qui m'ont accompagnée, guidée et soutenue durant ces mois. Je garderai un très bon souvenir de cette période de ma vie qui aura été particulièrement enrichissante tant sur le plan professionnel qu'humain. Le mémoire et les nombreux échanges m'auront permis de découvrir un domaine d'étude passionnant et stimulant que j'espère continuer d'explorer à l'avenir, mais aussi de me découvrir un peu plus, de mûrir et de prendre confiance en moi.

Je ne pourrais débiter autrement qu'en remerciant mon encadrant, SAIDI Mohamed El Mehdi, qui m'a fait confiance, Merci à vous pour m'avoir aiguillée et donné ma chance. Merci pour votre grande disponibilité, votre diplomatie, votre écoute et votre efficacité qui m'ont permis de garder le cap et de ne jamais me décourager ! vos grandes qualités humaines et scientifiques m'auront permis de mener à bien ce projet sereinement et pour tout cela, je vous suis grandement reconnaissant.

Mes plus vifs remerciements s'adressent à notre responsable de formation Pr. Nour-Eddine LAFTOUHI pour son suivi attentif et ses conseils avisés.

Ma famille a joué aussi un rôle important, parce que tout va toujours mieux après un bon repas en famille ! Mes parents bien sûr, qui me soutiennent dans tout ce que j'entreprends et qui, par leur soutien, font en sorte que je n'ai pas peur de me lancer dans des aventures abracadabrantes.

La famille, les proches sans qui bien sur rien n'est possible, merci à vous (maman, tu ne sais toujours pas ce que j'ai fait ces six derniers mois mais ce rapport devrait t'aider à comprendre).

Merci également à mes amis qui ont su me changer les idées, me faire lever le pied et le coude et me ramener de la plage dans ces moments difficiles de rédaction de mémoire.

Le reste du manuscrit sera plus jubilatoire car il parlera d'hydrologie et qu'après tout... l'eau, C'est la vie.

A ma mère

Résumé

La modélisation a une place centrale dans l'hydrologie moderne. Les modèles pluie-débit ont, à de nombreuses reprises, prouvé leur efficacité. En effet, la simulation des débits est indispensable à de nombreux secteurs économiques et pour la sécurité civile.

L'objectif de ce travail est d'essayer d'étudier la zone d'Amizmiz en appliquant deux modèles hydrologique et hydraulique afin de pouvoir simuler le comportement de ces bassins de montagne.

Cette recherche présente une tentative pour la modélisation hydrologique selon une approche temporelle, il s'est avéré que le pas du temps annuel présente des bons résultats que le pas mensuel, la qualité des simulations se dégrade vers un pas de temps plus fin.

Deux modèles de la famille GR développée au CEMAGREF ont été appliqués aux trois sous bassins versants de N'fis en climat semi-aride de montagne, les résultats présentés par différents critères d'ajustement sont peu satisfaisants sur les trois bassins.

L'analyse fréquentielle des débits maximums de la station de Sidi Hsain en aval du bassin versant Amizmiz a pu montrer que cette série de débits s'ajuste selon un loi Log-Normal, ces débits seront les entrées du modèle HEC-RAS selon plusieurs périodes de retour, l'approche de modélisation hydraulique a détecté que des surfaces agricoles réduites situés sur la rive droite de l'oued Amizmiz seront inondées pour une période de retour de 200 ans.

Le bassin versant de N'fis sera pris comme un exemple d'étude pour étudier les impacts hydrologiques due aux changements climatiques, en utilisant le modèle hydrologique GR2M-neige avec des scénarios simulés par les modèles climatiques régionaux RCM.

De manière générale, cette étude montre l'intérêt d'utilisation des données observées et les données issues des modèles climatiques peut présenter des résultats plus précis et de qualité. Le forçage du modèle hydrologique GR2M-neige à partir des scénarios climatiques considérés révèle que les écoulements devraient continuer à diminuer d'ici la fin du 21^{ème} siècle dans le bassin versant N'fis.

Mots clés : Modélisation, GR1A, GR2M, Changements climatiques, N'fis, HEC-RAS, pluie-débit, Ressource en eau, Simulation

Abstract

The modelling has a central place in the modern hydrology. The models of rainfall-ranoff proved, on numerous occasions, their efficiency. In fact, the simulation of the flows is essential to numerous branches of industry and for the civil safety.

The objective of this work is to try to study the area of Amizmiz by applying hydrological and hydraulic models to be able to feign the behaviour of this mountain catchement. This research presents an attempt for the hydrological modelling according to an approach temporal, it has proved that the step of the annual time presents good results than the monthly step,

The quality of the simulations degrades towards a step of finer time. Two models of the family GR developed in the CEMAGREF were wall lamp in three under pond hillsides of made in mountain semi-arid climate, the results presented by various criteria of adjustment are unsatisfactory on three catchments.

The frequential analysis of the maximum flows of the station of Sidi Hsain in downstream of the watershed Amizmiz was able to show that this series of flow fits according to one law Log-Normal, these flows will be the entered of the model HEC-RAS according to several periods of return, the approach of hydraulic modelling has to detect that reduced agricultural surfaces situated on the right bank of the wadi Amizmiz will be flooded according to a period of return of 200 years.

The watershed of N fis will be taken as an example of study to study the hydrological impacts due to climate change, by using the hydrological model GR2M-SNOW with scenarios feigned by the regional climatic models RCM. In a general way, this study shows the interest of use of the observed data and the data stemming from climatic models can present more precise and quality results. The forcing of the hydrological model GR2M-SNOW from the considered climatic scenarios reveal that the flows should keep decreasing by the end of the 21^{ème} century in N'fis catchment.

Keywords: modelling, GR1A, GR2M, climate change, N fis, HEC-RAS, rainfall-ranoff, water resources, Simulation

Sommaire

Avant-propos.....	III
Remerciements	IV
Résumé	VI
Abstract.....	VII
Sommaire	VIII
Liste des figures.....	XI
Liste des tableaux.....	XIV
Acronymes	XV
Introduction générale.....	1
Chapitre 1.....	4
Chapitre 1 : Généralités sur la modélisation pluie-débit	5
1.1. Introduction.....	5
1.2. Qu'est-ce qu'un modèle	5
1.3. Typologie des modèles	5
1.4. Modélisation pluie-débit	6
1.4.1. Définition et structure générale d'un modèle pluie-débit	6
1.4.2. Intérêts de la modélisation pluie-débit.....	7
1.4.3. Principes et problèmes généraux en modélisation pluie-débit.....	7
1.5. Critères d'évaluation d'un modèle	8
1.6. Modèles utilisés dans ce travail	10
Chapitre 2.....	11
Chapitre 2 : Contexte de la zone d'étude	12
2.1. Introduction.....	12
2.2. Contexte géographique et géologique de la zone d'étude	12
2.2.1 Contexte géographique	12
2.2.2. Contexte géologique.....	17
2.3. Caractéristiques physiographiques.....	17
Chapitre 3.....	27
Chapitre 3 : Présentation et analyse des données.....	28
3.1. Introduction.....	28
3.2. Les caractéristiques climatiques	28
3.3. Données hydroclimatiques	29
3.3.1 Pluies (P) :	29

3.3.2. Débits(Q):	34
3.3.3. Température (T) et évapotranspiration potentielle (ETP):.....	37
3.4. Les modèles climatiques (MEDCORDEX).....	41
3.5. Analyse fréquentielle :.....	43
3.6. Les crues	48
3.7. Conclusion	50
Chapitre 4.....	51
Chapitre 4 : Modélisation hydrologique	52
4.1. Introduction.....	52
4.2. Présentation des modèles GR.....	52
4.3. Modèle GR1A.....	53
4.3.1. Présentation du modèle GR1A	53
4.3.2. Critère mathématique d'optimisation du modèle GR1A(critère de Nash-Sutcliffe) ...	54
4.3.3 Calage et validation du modèle GR1A.....	55
4.3.4. Résultats et discussion :.....	57
4.4. Modèle GR2M	58
4.4.1. Présentation du modèle GR2M	58
4.4.2. Optimisation des paramètres	59
4.4.3. Calibration et validation du modèle GR2M-neige.....	60
4.4.5. Résultats et discussion.....	65
4.5. Conclusion	67
Chapitre 5.....	68
Chapitre 5 : Modélisation hydraulique	69
5.1. Introduction.....	69
5.2. Présentation de HEC-RAS et HEC-GeoRas.....	69
5.3. Conditions du calcul et équations mises en jeu	70
5.4. Définition de la géométrie du cours d'eau.....	71
5.5. Conditions limites et conditions initiales	73
5.6. Calibration du modèle HEC-RAS	73
5.7. Résultats et discussion.....	75
5.8. Conclusion	77
Chapitre 6.....	78
Chapitre 6 : Impact hydrologique due aux changements climatiques	79
6.1. Introduction.....	79
6.2. L'évaluation des simulations RCM sur la période de référence	79
6.3. Changement projeté sur les températures et les précipitations	82

6.3.1. Scénarios climatiques	82
6.3.2. Projections pour les précipitations	83
6.3.3. Projections pour les températures	83
6.3.4. Projections futures sur les débits.....	83
6.4. Conclusion	86
Contraintes rencontrées lors de ce travail	87
Recommandations sur le plan scientifique.....	87
Conclusion générale	88
Références bibliographiques	89

Liste des figures

Figure 1 : Synthèse de l'approche méthodologique utilisée dans ce travail.....	3
Figure 2 : Classification des modèles proposée par Singh (1995).....	6
Figure 3 : Représentation du fonctionnement d'un modèle hydrologique (Mathevet 2005)	7
Figure 4 : Localisation géographique des 3 bassins versants de la zone d'étude	13
Figure 5 : Localisation géographique de la zone d'étude (Google Earth)	14
Figure 6 : Carte géologique du bassin versant d'Amizmiz (extraite de la carte géologique d'Amizmiz 1/100 000).....	15
Figure 7 : Carte géologique des sous bassins versants de N'fis (extraite de la carte géologique de Marrakech 1/500 000)	16
Figure 8 : Rectangle équivalent du sous bassin versant d'Amizmiz.....	18
Figure 9 : Courbe Hypsométrique du bassin versant d'Amizmiz	19
Figure 10 : Carte hypsométrique des sous bassins versant de N'Fis, Amizmiz, Imin El Hammam et Iguir N'Kouris.....	20
Figure 11 : Carte des pentes des sous bassins versant de N'Fis, Amizmiz, Imin El Hammam et Iguir N'Kouris.....	21
Figure 12 : Classification de Strahler, (a) Amizmiz (b) Imin El Hammam (c) Iguir N'Kouris.....	22
Figure 13 : Carte d'occupation du sol, (Amizmiz , Imin El Hammam et Iguir N'Kouris (Juillet 2016)	24
Figure 14 : Carte d'NDVI, Amizmiz ,Imin El Hammam et Iguir N'Kouris (Juillet 2016)	26
Figure 15 : Localisation des différents stations et barrages implantés au niveau du bassin versant N'fis	29
Figure 16 : Pluies mensuelles interannuelles calculées à la station Sidi Hsain 1998-2014.....	30
Figure 17 : Pluies mensuelles interannuelles calculées à la station Imin El Hammam 1969-2009.....	30
Figure 18 : Pluies mensuelles interannuelles calculées à la station Iguir N'Kouris 1974-2009.....	31
Figure 19 : Pluies moyennes saisonnières calculées aux trois stations du sous bassin versant de N'fis	31
Figure 20 : Anomalies mensuelles standardisés de la pluviométrie dans le bassin versant d'Amizmiz entre 1998 et 2014.....	32
Figure 21 : Anomalies mensuelles standardisés de la pluviométrie dans le bassin versant d'Imin El Hammam entre 1969-2009	33
Figure 22 : Anomalies mensuelles standardisés de la pluviométrie dans le bassin versant d'Iguir N'Kouris entre 1974-2009	33
Figure 23 : Transformée en ondelettes continues de la pluviométrie mensuelle à certaines stations en niveau du bassin N'fis.....	34
Figure 24 : Débits mensuelles interannuelles calculées aux trois stations du sous bassin versant de N'fis	34
Figure 25 : Les débits moyens saisonniers calculés aux trois stations du sous bassin versant de N'fis..	35
Figure 26 : Transformées en ondelettes continues du débit mensuel à des stations hydrologiques sélectionnées	36
Figure 27 : Corrélation entre les précipitations et les débits moyens annuels au niveau des trois sous bassins versants : (a) Station Sidi Hsain, (b) Station Imin El Hammam, (c) Station Iguir N'Kouris	36
Figure 28 : Températures mensuelles moyennes calculées à la station Armed sur la période 2003- 2015	38
Figure 29 : ETP mensuelle moyenne selon trois formules.....	40
Figure 30 : Comparaison de l'ETP calculé par 3 formules, Oudin et al., (2005), Hargreave, et Samani (1985) et FAO/Penman-Monteith (Allen et al., 1998) pour la période 2003-2015.....	41

Figure 31 : Exemple du modèle climatique global (GCM) IPSL-CM5 à 280 km et du modèle climatique régional (RCM) WRF à 50 km (Flaounas et al., 2013).....	42
Figure 32 : Ajustement à la loi ((a) Lognormal, (b) Gamma, (c) Exponentiel, (d) Gumbel Gumbel – probabilité de non dépassement avec intervalles de confiance à 95% - Station Sidi Hsain	45
Figure 33 : Ajustement à la loi ((a) Lognormal, (b) Gamma, (c) Exponentiel, (d) Gumbel Gumbel – probabilité de non dépassement avec intervalles de confiance à 95% - Station Imin El Hammam.....	46
Figure 34 : Ajustement à la loi ((a) Lognormal, (b) Gamma, (c) Exponentiel, (d) Gumbel Gumbel – probabilité de non dépassement avec intervalles de confiance à 95% - Station Iguir N’Kouris	47
Figure 35 : Hydrogramme de la crue du 28-10-1999 au niveau de la station Imine El Hammam.....	48
Figure 36 : Hydrogramme de la crue du 02-11-1987 au niveau de la station Iguir N’Kouris	48
Figure 37 : Hydrogramme de la crue du 22-08-1991 au niveau de la station Sidi hsain	49
Figure 38 : Méthode de calage et contrôle double échantillon.....	55
Figure 39 : Calibration et validation du modèle GR1A – Bassin Amizmiz	55
Figure 40 : Calibration et validation du modèle GR1A – Bassin Imin El Hammam.....	56
Figure 41 : Calibration et validation du modèle GR1A – Bassin Iguir N’Kouris	57
Figure 42 : Schéma de la structure du modèle GR2M	59
Figure 43 : Schéma représentatif des échantillonnages utilisés pour la calibration et validation du modèle GR2M-neige (Marchane, 2015)	60
Figure 44 : Calibration et validation du modèle GR2M neige – bassin Amizmiz.....	61
Figure 45 : Calibration et validation du modèle GR2M neige – bassin imine El Hammam	62
Figure 46 : Calibration et validation du modèle GR2M neige – bassin Iguir N’Kouris.....	63
Figure 47 : Variation des débits mensuels simulés obtenu avec le modèle calibré et les débits observés sur chaque période et la validation sur les différentes périodes cas du sous bassin Amizmiz	64
Figure 48 : Variation des débits mensuels simulés obtenu avec le modèle calibré et les débits observés sur chaque période et la validation sur les différentes périodes cas du sous bassin Imine El Hammam.....	64
Figure 49 : Variation des débits mensuels simulés obtenu avec le modèle calibré et les débits observés sur chaque période et la validation sur les différentes périodes cas du sous bassin Iguir N’Kouris.....	65
Figure 50 : Méthodologie de modélisation de HEC-RAS (Khattak et al., 2014).....	70
Figure 51 : Exemples de sections transversale du cours d’eau réalisés selon plusieurs périodes de retour	72
Figure 52 : Situation géographique de la zone d’étude et les différents profils sur Oued Amizmiz	72
Figure 53 : Vue 3D du tronçon principale en période de retour de 200 ans.....	75
Figure 54 : Coupe en travers du cours d’eau principal pour les périodes de retour de (10,100 et 200 ans).....	76
Figure 55 : Carte de la plaine d’inondation pour (T20-T100-T200).....	76
Figure 56 : Carte d’aléa de la zone d’étude	77
Figure 57: Variation des précipitations observées et celles simulées par les modèles climatiques régionaux RCMs disponible sur la période d’évaluation (EVAL) et la période historique (HIST) pour le bassin versant N’fis	80
Figure 58 : Variation des températures observées et celles simulées par les modèles climatiques régionaux RCMs disponible sur la période d’évaluation (EVAL) et la période historique (HIST) pour le bassin versant N’fis	81
Figure 59 : Les différent RCP avec leur extension jusqu’en 2100 et le forçage radiatif entre 1850 et 2000 (Source : http://www.universcience.fr).....	82
Figure 60 : Schéma explicatif de la méthode « Delta change » (Ho et al., 2012).....	84

Figure 61 : Simulations hydrologiques des débits de l’oued N’fis, sur la période de projection à partir de données obtenues grâce aux RCMs après perturbation.....85

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques géométriques des bassins versants.....	18
Tableau 2 : Indice de compacité	19
Tableau 3 : Caractéristiques physiographiques des trois sous bassins versants.....	23
Tableau 4 : coordonnées des stations hydroclimatiques	29
Tableau 5 : Valeurs de l'indice SPI	32
Tableau 6 : Simulations disponibles à 12 km de résolution (grille MED11)	42
Tableau 7 : Récapitulatif des résultats des ajustements pour les 4 lois les mieux adaptées – Station Sidi Hsain	44
Tableau 8 : Récapitulatif des résultats des ajustements pour les 4 lois les mieux adaptées – Station Imin El Hammam	44
Tableau 9 : Récapitulatif des résultats des ajustements pour les 4 lois les mieux adaptées – Station Iguir N’Kouris.....	44
Tableau 10 : Valeurs des débits fréquents pour les quatre lois (Exponentiel, Gamma, Gumbel et Log Normale) – Station : Sidi Hsain.....	45
Tableau 11: Valeurs des débits fréquents pour les quatre lois (Exponentiel, Gamma, Gumbel et Log Normale) – Station : Imin El Hammam.....	46
Tableau 12 : Valeurs des débits fréquents pour les quatre lois (Exponentiel, Gamma, Gumbel et Log Normale) – Station : Iguir N’Kouris.....	47
Tableau 13 : caractéristiques des crues au niveau de trois stations (ABHT).....	49
Tableau 14 : Critère de NSE – Bassin versant Amizmiz	58
Tableau 15 : Critère de NSE – Bassin versant Imin El Hammam	58
Tableau 16 : Critère de NSE – Bassin versant Iguir N’Kouris	58
Tableau 17 : Paramètres du modèle GR2M-neige sur les périodes de calibration et les valeurs de KGE, NSE, BIAS et RMSE obtenus pour le sous bassin Amizmiz	65
Tableau 18 : Paramètres du modèle GR2M-neige sur les périodes de calibration et les valeurs de KGE, NSE, BIAS et RMSE obtenus pour le sous bassin Imin El Hammam.....	66
Tableau 19 : Paramètres du modèle GR2M-neige sur les périodes de calibration et les valeurs de KGE, NSE, BIAS et RMSE obtenus pour le sous bassin Iguir N’Kouris	66
Tableau 20: Reference tables for Manning's n values for Channels (http://www.fsl.orst.edu)	74
Tableau 21 : Caractéristiques principales des différents scénarios (http://www.universcience.fr)	82
Tableau 22 : Signal de changement des précipitations pour chacun des modèles et scénarios climatiques pour le bassin versant N’fis	83
Tableau 23 : Signal de changement des températures pour chacun des modèles et scénarios climatiques pour bassin versant N’fis.....	83
Tableau 24 : Signal de changement des débits pour le bassin versant N’fis et selon les deux scénarios climatiques	85

Acronymes

ABHT	Agence du B assin H ydraulique du T ensift
CEMAGREF	Centre National du M achinisme Agricole du G énie Rural, des E aux et des F orêts
CLM	Castilla-La M ancha
CMCC	Centro Euro- M editerraneo sui C ambiamenti C limatici
CNRM	National Centre for M eteorological R esearch
GCM	G lobal C limate M odel
GIEC	Groupe d'experts I ntergouvernemental sur l' E volution du C limat
GR1A	G énie Rural à un p aramètre A nnuel
GR2M	G énie Rural à deux paramètres M ensuelles
GR4J	G énie Rural à un quatre paramètres J ournalières
HEC-RAS	H ydrologic E ngineering C enter - R iver A nalysis S ystem
Hyfran	H ydrology F requency A nalysis
IPSL	Institut P ierre S imone L aplace
IRSTEA	Institut National de R echerche en S ciences et T echnologies pour l' E nvironnement et l' A griculture
Matlab	M atrix L aboratory
MEDCORDEX	M EDiterranean C oordinated R egional C limate D ownscaling E Xperiment
MNT	M odèle N umérique de T errain
NDVI	N ormalized D ifference V egetation I ndex
NSE	N ash– S utcliffe model E fficiency coefficient
RCM	R egional C limate M odel
RCP	R epresentative C oncentration P athway
SMH	S aint- M artin-d' H ères
SPI	S tandardized P recipitation I ndex
TREMA	T éledétection et R essources en E au en M éditerranée semi- A ride

Introduction générale

"Si la terre avait la grosseur d'une orange, d'une grosse orange, toute l'eau du monde ne serait représentée, sur cette orange, que par une minuscule goutte d'eau" (Paul - Émile Victor). Cette goutte qui est à l'origine de toute la vie sur notre planète se fait de plus en plus rare, de plus en plus chère et représente un souci majeur pour la plupart des pays du monde principalement dans les régions où cette ressource est limitée (Abourida, 2007).

Depuis son indépendance en 1956, le Maroc s'est engagé dans la voie de la maîtrise des ressources en eaux ; a réussi à bâtir un modèle efficient de la gestion de l'eau, et pour assurer la permanence de la fourniture d'eau que sont réalisés 128 grands barrages (capacité de stockage d'environ 17.2 milliards de m³), 9 agences qui gèrent les bassins vitaux du Maroc. Par ailleurs, ces ressources en eau sont limitées, vis-à-vis de l'augmentation continue des besoins, due à l'évolution rapide de la population, du développement industriel et à l'extension de l'agriculture irriguées.

Le bassin versant de Tensift qui s'allonge sur une superficie de 20500 Km², connaît une pénurie des ressources en eau résultante de la forte consommation d'eau due aux développement urbain et agricole aussi l'impact du changement climatique, les périodes sèches, la variation spatio-temporelle des précipitations et la hausse des températures. Ces changements globaux influencent les régimes pluviométriques du bassin versant.

D'où vient l'intérêt de la modélisation hydrologique et surtout le modélisation Pluit-Débit qui pourra être un outil puissant pour étudier le comportement des bassins versants afin de pouvoir aboutir à des simulations des débits futures en se basant sur les données météorologiques historiques et des prévisions à long terme qui seront utiles pour la gestion intégrée des ressources en eau.

Modélisation Pluie-Débit

Les modèles hydrologiques globaux permettent de simuler la transformation de la pluie en débit sur des bassins naturels, avec de nombreuses applications pratiques dans le domaine de la gestion de la ressource en eau. La modélisation des bassins versants affectés par les couverts neigeux est problématique, accumulations de neige et les retards à l'écoulement qui en résultent sont négligés, de sorte que les sorties des modèles sont biaisées dès lors que la température passe en dessous de zéro degré. Des modèles spécifiques existent. Malheureusement ils ne sont pas bien adaptés aux bassins où la neige est épisodique.

Les problèmes peuvent se poser en tout point d'un réseau hydrographique. Pour y répondre l'hydrologue doit disposer des données permettant la paramétrisation de modèles pertinents. Malheureusement, il ne dispose pas toujours des données d'une station de mesure des écoulements sur le point hydrographique auquel il s'intéresse. Le plus souvent, cependant, l'hydrologue dispose de données de pluie qui sont généralement beaucoup plus abondantes et mieux distribuées spatialement que les séries de débit. C'est la raison qui nous pousse naturellement à nous intéresser aux modèles pluie-débit : ils nous permettent de reconstituer ou de compléter des séries de débit à partir des séries de pluie (Makhlouf, 1994).

Modélisation hydraulique

Les modèles hydrauliques utilisent les équations de l'hydraulique (Barré de Saint-Venant, ...) et des outils mathématiques ou empiriques pour réaliser la propagation de débits le long d'un cours d'eau : on mesure le débit en un point A et on en déduit au sein du modèle, le débit en un point B, situé à l'aval. Ce sont donc des modèles de type débit-débit. Ils sont extrêmement utilisés dans le cas de ruptures de barrage. Ces modèles sont aussi très utilisés pour quantifier les impacts de la présence de réservoirs ou de systèmes de réservoirs dans l'atténuation de la propagation d'une onde de crue (Garcia-Navarro et Zorraquino, 1993) ainsi que pour visualiser le trajet d'une lâchure de barrage importante (Garcia-Navarro *et al.*, 1999).

Changements climatiques et impact sur l'hydrologie de montagne

Le dernier rapport du Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) datant de 2013 projette une augmentation moyenne des températures allant de 2 à 3°C autour du bassin méditerranéen à l'horizon 2050. Cette augmentation serait conjuguée à une diminution des précipitations de l'ordre de 20% à 30% dans cette zone (Giorgi et Lionello 2008). Ainsi ces changements projetés à l'échelle régionale amènent à s'intéresser aux impacts à l'échelle locale, comme celle des bassins versants.

L'approche la plus connue pour les études d'impacts hydrologiques dues aux changements climatiques est d'utiliser des modèles hydrologiques forcés par les sorties (précipitations, température ...) provenant des modèles climatiques désagrégés à échelle du bassin versant (Etchevers *et al.*, 2002; Fowler *et al.*, 2007; Chiew *et al.*, 2009; Senatore *et al.*, 2011; Ruelland *et al.*, 2012).

La nouvelle génération de simulations de modèles climatiques régionaux dédiés à la région méditerranéenne, tels que ceux fournis par l'initiative Med-CORDEX (www.medcordex.eu, Ruti *et al.*, 2013; Herrmann *et al.*, 2011) vise à augmenter la fiabilité des informations sur le climat régional passé et avenir et à comprendre les processus qui sont responsables de la variabilité et de l'évolution du climat méditerranéen. Les impacts du changement climatique sur l'hydrologie des bassins versants méditerranéens ont été évalués principalement pour des bassins versants situés en France (Quintana Seguí *et al.*, 2010), en Espagne (Majone *et al.*, 2012), en Italie (Senatore *et al.*, 2011), mais aussi dans le nord du Maroc (Tramblay *et al.*, 2013) et à l'échelle de la Méditerranée (Sanchez-Gomez *et al.*, 2009; Dubois *et al.*, 2012; Milano *et al.*, 2012, 2013).

Ce rapport présentera succinctement les principaux enjeux et problèmes de la modélisation des sous-bassins versant de N'fis et d'Amizmiz, ainsi que les données et les outils qui ont été utilisés. Les résultats des simulations effectuées seront ensuite exposés.

Objectif et organisation du manuscrit :

Les objectifs du présent travail sont : (1) étudier le comportement des sous-bassins versants d'Amizmiz et N'fis en milieu semi-aride montagnard à travers la modélisation pluie-débit qui peut reproduire à l'échelle du bassin versant les débits (dont la connaissance peut être nécessaire pour la construction d'un ouvrage hydraulique, l'approvisionnement en eau potable d'une ville...) à partir de la mesure ou de la simulation des pluies. (2) Comprendre le comportement hydrologique travers des modèle hydrologiques conceptuels les modèles GR développé par le CEMAGREF à différents pas de temps. (3) Détecter les zones inondables du bassin versant d'Amizmiz via une modélisation hydraulique par HEC-RAS à différents périodes de retour. (4) Evaluer l'impact des changements climatiques sur les débits du bassin versant N'fis.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons suivi une approche méthodologique (figure 1) basée sur l'analyse et le traitement des données issus des stations météorologiques qui sont les entrées des

modèles pluie-débit, ainsi que leurs sorties vont servir à l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur le bassin versant N°fis.

Le manuscrit comprend six chapitres distincts :

- Le premier chapitre présente une revue bibliographique concernant la modélisation hydrologique et hydraulique, la typologie des modèles, les intérêts de la modélisation pluie-débit.
- Le deuxième chapitre est consacré à la description de la région d'étude, le contexte hydroclimatique, géologique et socio-économique de la zone.
- Le troisième chapitre présente les différents jeux de données qui ont été collectés et utilisés au cours de ce travail, cette partie est conçu aussi aux traitements et analyses fréquentielles de ces données.
- Le quatrième chapitre expose les résultats des simulations après l'optimisation des modèles pluie-débit à différents pas du temps (Annuel, mensuel).
- Le cinquième chapitre est consacré à la modélisation hydraulique, la cartographie des zones inondables et les simulations des débits pour des périodes de retour de (5, 10, 20, 50 et 100 ans).
- Le dernier chapitre présente une évaluation de l'impact des changements climatiques sur les débits du bassin versant N°fis.

A la fin de ce mémoire, nous concluons ce travail en proposant des perspectives.

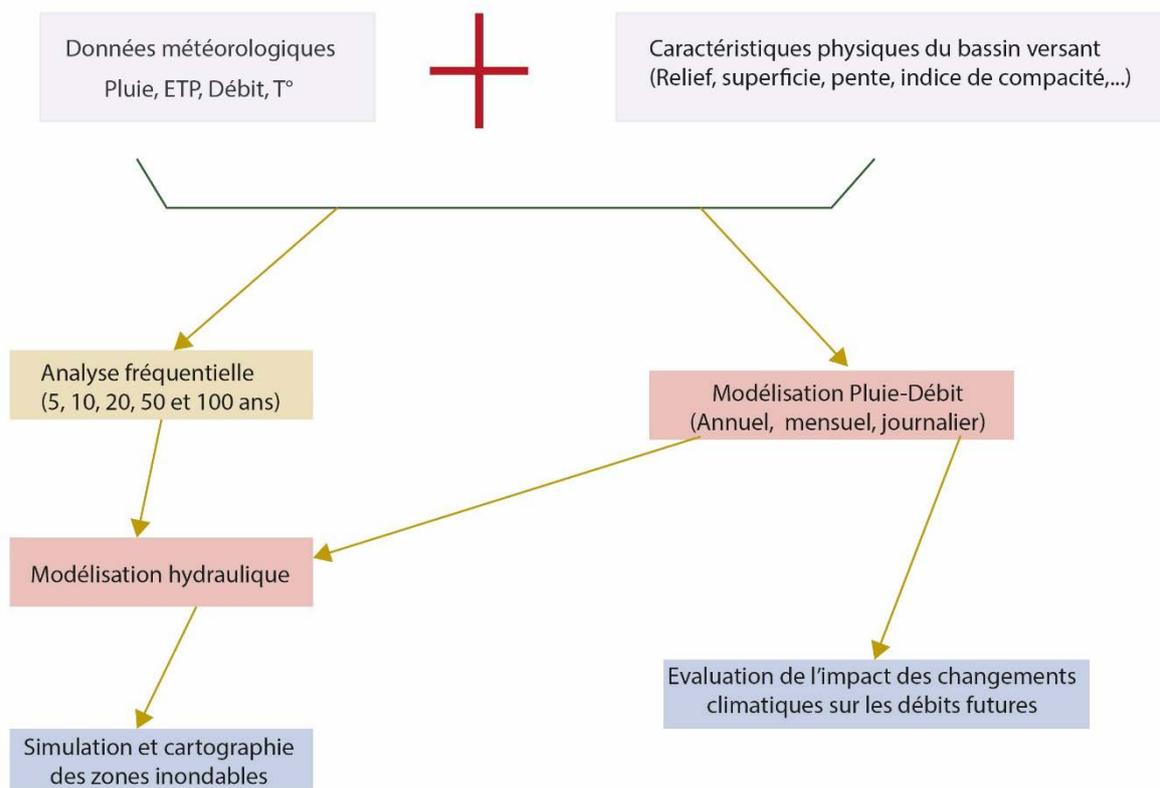


Figure 1 : Synthèse de l'approche méthodologique utilisée dans ce travail

Chapitre 1

Chapitre 1 : Généralités sur la modélisation pluie-débit

1.1. Introduction

Du point de vue du “modéliste”, parler de transformation pluie-débit c’est parler presque de toute l’hydrologie. L’idée de transformer les pluies (P) en débits (Q) par un modèle simulant la réalité d’un bassin est ancienne. Mais à partir des années soixante, on voit se développer davantage la recherche sur la science hydrologique visant à mieux concerner le mécanisme de la genèse des écoulements avec le développement des moyens de calcul.

La modélisation a une place centrale dans l’hydrologie moderne. Les modèles pluie-débit ont, à de nombreuses reprises, prouvé leur efficacité. En effet, la simulation des débits est indispensable à de nombreux secteurs économiques et pour la sécurité civile.

1.2. Qu’est-ce qu’un modèle

Le dictionnaire français d’hydrologie de surface (Roche, 1986) définit le modèle comme une « représentation concrète ou abstraite d’une réalité physique, économique, sociale ou autre, élaborée dans le but de simuler son fonctionnement, ou tout au moins son comportement, afin d’en tirer toute conséquence concernant l’estimation de ses paramètres, son évolution, les prévisions de son exploitation, etc En ce sens, par exemple, une loi de distribution statistique est un modèle ». Le modèle est nécessairement réductionniste de la complexité naturelle. Il est une image de la réalité, modélisé par oubli de nombreuses propriétés jugées non pertinentes pour les questions posées (Roche, 1988).

1.3. Typologie des modèles

Plusieurs auteurs ont proposé une classification des modèles hydrologiques (Singh, 1995 ; Ambroise, 1999). A titre d’exemple, Singh (1995) a proposé trois critères pour classer les modèles hydrologiques qui sont : la description des processus, l’échelle spatio-temporelle et la méthode utilisée pour résoudre les équations. Selon la description des processus, on peut avoir plusieurs niveaux de classification : modèle global ou distribué (figure 2) déterministe ou stochastique. Refsgaard et Storm (1995) classent les modèles hydrologiques en trois catégories : les modèles empiriques, les modèles conceptuels et les modèles distribués à base physique. D’après Refsgaard, les modèles hydrologiques peuvent être classés selon la description des processus physiques en tant que conceptuels ou physiques et selon la description spatiale des processus au niveau du bassin versant en tant que globaux ou distribués. En raison de l’ambiguïté de certains critères (notion de conceptuel ou physique) une certaine confusion règne encore sur l’appartenance de tel ou tel modèle à une famille donnée. (Chocat, 1997) propose, quant à lui, de classer les modèles hydrologiques par type d’utilisation (modèles cognitifs, modèles prévisionnels, modèles décisionnels et modèles normatifs) et par type d’approche

(physique/analogique/symbolique, axiomatique/heuristique, déterministe/probabiliste (stochastique), microscopique (réductionniste)/ macroscopique (holistique, conceptuelle), empirique/théorique et spéculative/pragmatique).

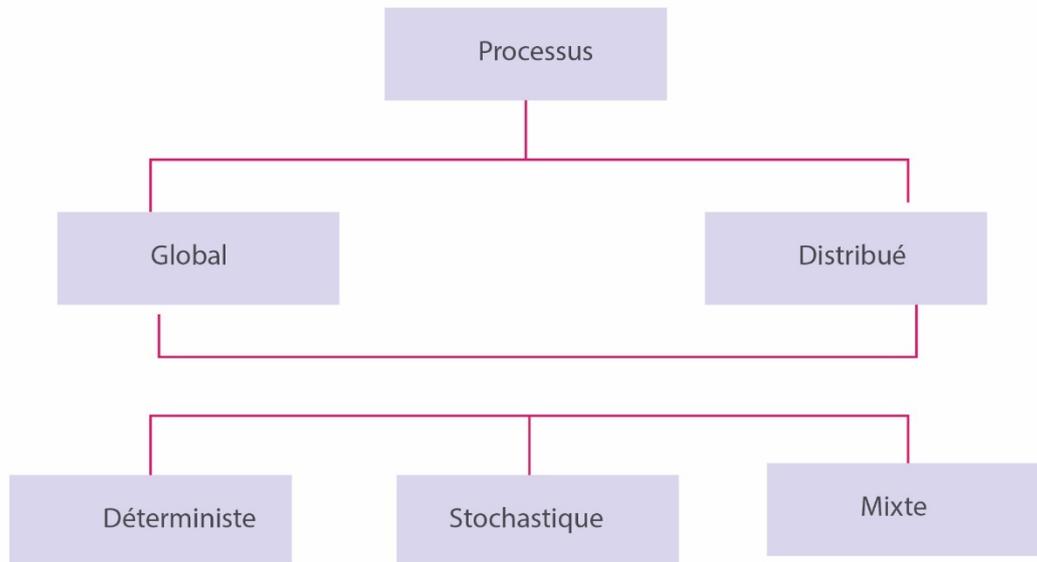


Figure 2 : Classification des modèles proposée par Singh (1995)

1.4. Modélisation pluie-débit

1.4.1. Définition et structure générale d'un modèle pluie-débit

Un modèle est une représentation simplifiée d'un système complexe. En hydrologie le système étudié est le bassin versant. Les modèles pluie-débit y figurent la transformation de la pluie en débit à des fins scientifiques et/ou opérationnelles. Tout modèle est caractérisé par ses variables d'entrée, sa structure (ensemble des compartiments du système étudié et relations qui les lient) et ses variables de sortie. Dans le cas d'un modèle pluie-débit, les entrées sont toujours les données de précipitations puis, selon la complexité du modèle, des données d'évapotranspiration potentielle (ETP), de température, de nature des sols, de végétation, de topographie, d'altitude... Le débit à l'exutoire du bassin versant constitue la sortie du modèle qui intéresse l'hydrologue opérationnel. Le modèle est parfois capable d'en produire d'autres : cartes d'humidité des sols, flux de polluants....

Un très important effort de recherche associé à l'accroissement des capacités informatiques a permis le développement au cours des 30 dernières années d'un grand nombre de modèles pluie-débit.

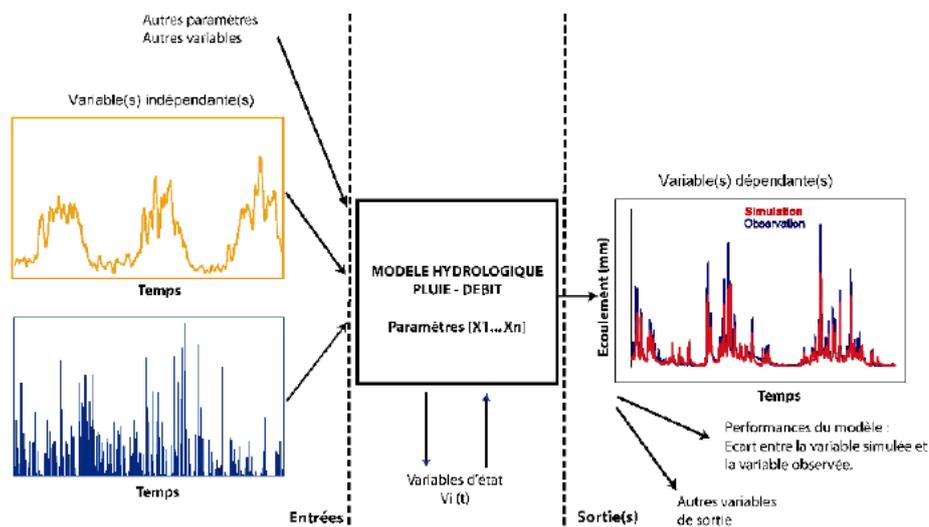


Figure 3 : Représentation du fonctionnement d'un modèle hydrologique (Mathevet, 2005)

1.4.2. Intérêts de la modélisation pluie-débit

Connaître le débit des rivières est, c'est une évidence, de première importance pour la gestion de la ressource en eau et la maîtrise du risque hydrologique. La modélisation pluie-débit constitue un substitut efficace à des mesures de débit fastidieuses, quand elles sont possibles. Les applications des modèles pluie-débit sont multiples : simulations de crues à court terme, prévision d'étiages, prédétermination des crues et dimensionnement d'ouvrages, mise en évidence de la non stationnarité du comportement hydrologique sous l'effet du changement climatique ou de l'évolution de l'occupation du sol... De plus les modèles pluie-débit permettent d'allonger les délais de prévision par rapport aux modèles débit-débit.

1.4.3. Principes et problèmes généraux en modélisation pluie-débit

La modélisation pluie-débit est une discipline très conceptuelle. De nombreux auteurs se sont donc attachés à réfléchir sur la façon dont elle devait être abordée et ont ainsi dégagé un certain nombre de principes autour desquels un consensus s'est progressivement installé.

- Efficacité d'un modèle pluie-débit.

Il est très difficile de définir ce qu'est l'efficacité d'un modèle pluie-débit et de l'évaluer de façon satisfaisante (Rango et Martinec 1994; Perrin *et al.* ; 2001). Il est généralement admis que l'efficacité d'un modèle consiste uniquement en sa capacité à reproduire les débits mesurés en phase de contrôle, évaluée par le critère de Nash. Cela est justifiable d'un point de vue opérationnel mais moins d'un point de vue scientifique puisque les modèles pluie-débit ont prouvé en de maintes occasions leur capacité à obtenir de bons résultats en attribuant des valeurs physiquement incorrectes aux différents paramètres, voire même à s'accommoder de données d'entrée présentant un biais systématique (Liden et Harlin 2000; Andréassian *et al.* ;2001).

- Robustesse du modèle

Les modèles sont jugés sur leur capacité à fournir en phase de contrôle des résultats assez peu différents des résultats de calage.

- Principe de parcimonie

Les modèles pluie-débit usuels possèdent de deux à plusieurs dizaines de paramètres. De nombreuses études ont récemment établi que la plupart du temps une augmentation du nombre de paramètres ne rendait pas le modèle plus efficace (Perrin, 2000) tout en augmentant considérablement les temps de calcul et/ou en rendant le modèle moins opérationnel et surtout moins robuste (Beven, 1989). De plus, deux des principaux problèmes de la modélisation hydrologique se trouvent accrus par un grand nombre de paramètres. Le surcalage survient lorsque le modèle s'adapte trop spécifiquement à une série temporelle donnée diminuant ainsi ses performances en phase de contrôle. L'équifinalité réside dans la capacité du modèle à trouver différents optimums équivalents dans l'espace des paramètres durant la phase de calage (les erreurs sur les différents paramètres se compensent), de sorte qu'il est ensuite impossible de comprendre pourquoi le modèle est performant (Liden et Harlin 2000). De nombreux auteurs pensent donc maintenant qu'il faut chercher à limiter le nombre de paramètres, mais cela reste souvent un vœux pieu.

- Cas des bassins versants non jaugés

Les bassins versants non jaugés constituent un des problèmes critiques de la modélisation hydrologique puisqu'il est impossible de procéder à l'ajustement du modèle par calage/contrôle. Pour utiliser malgré tout des modèles pluie-débit sur ces bassins, un important effort de recherche a été mené : Il est tentant de chercher à attribuer un sous-bassement physique aux différents paramètres de façon à pouvoir les fixer a priori. Cela n'est pas toujours possible, même dans le cas des modèles à réservoirs (Makhlouf, 1994). De même une extrapolation régionale des valeurs des paramètres est parfois possible mais reste souvent hasardeuse (Micovic et Quick 1999).

1.5. Critères d'évaluation d'un modèle

Pour analyser la performance d'un modèle, plusieurs critères d'évaluation ont été développés. Ils peuvent être utilisés aussi bien en calibration qu'en validation. Une simple analyse visuelle des résultats d'une simulation n'est pas une évaluation objective du modèle. En effet, l'oeil humain n'est pas capable de voir toutes les différences qui peuvent exister entre deux courbes d'allure générale similaire. Ainsi, nous avons besoin de nous doter de critères objectifs (dénommés aussi fonctions objectives) pour comparer les simulations aux observations et pour hiérarchiser des simulations qui « ont l'air » équivalentes. Plusieurs critères objectifs mathématiques existent pour quantifier la distance entre les observations et la simulation.

Les principaux critères objectifs utilisés en hydrologie sont :

- le critère de Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970) ou efficience E (Équation 1-1) :

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - sim_i)^2}{\sum_{i=1}^n (obs_i - \overline{obs})^2} \quad \text{Équation 1-1}$$

Où sim_i est la variable simulée, obs_i est la variable observée, \overline{obs} est la moyenne des

Observations et n le nombre d'observations. Ce critère quantifie la fraction de la variance observée qui est prise en compte par le modèle. Il prend des valeurs entre $-\infty$ et 1. Plus l'efficacité est proche de 1, plus l'accord est meilleur entre la modélisation et l'observation. Notons qu'une efficacité négative signifie que les valeurs simulées conduisent à de moins bons résultats.

Ce critère présente tout de même l'inconvénient de donner beaucoup de poids aux valeurs moyennes. Nous pourrions alors utiliser la même formulation sur le logarithme de la variable (si celle-ci ne prend pas de valeur nulle) ou sur la racine de la variable afin d'augmenter le poids des valeurs faibles. Par exemple, dans le cas d'une application sur le débit, pour représenter correctement les pics de crues, on utilise l'efficacité classique. Dans le cas où on s'intéresse plutôt au débit d'étiage, on utilisera de préférence l'efficacité sur les logarithmes ou sur les racines afin de diminuer le poids des fortes valeurs de débit.

La mesure de l'erreur quadratique moyenne (*RMSE*) est aussi un critère souvent utilisé pour mesurer l'écart entre la simulation et l'observation, en donnant notamment une idée de la dispersion entre les deux (Équation 1-2). Plus elle sera faible et plus l'écart entre la simulation et les observations sera faible.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (sim_i - obs_i)^2}{n}} \quad \text{Équation 1-2}$$

De la même façon qu'avec l'efficacité, ce critère peut être utilisé sur les logarithmes ou les racines des variables puisque ce critère a tendance à donner beaucoup de poids à la bonne représentation des fortes valeurs et donc à biaiser par exemple la simulation des récessions de crues (Boyle *et al.*, 2000).

En s'appuyant sur la corrélation entre la série simulée et la série observée, nous pourrions aussi chercher à maximiser le coefficient de détermination R^2 (Équation 1-3):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n ((sim_i - \overline{sim})(obs_i - \overline{obs}))^2}{\sum_{i=1}^n (sim_i - \overline{sim})^2 \sum_{i=1}^n (obs_i - \overline{obs})^2} \quad \text{Équation 1-3}$$

Des bonnes valeurs d'efficacité ou d'erreur quadratique n'attestent pas de l'absence d'une erreur systématique. Pour s'affranchir de cela, il est possible d'utiliser le critère de biais « B » qui permet de mesurer la tendance du modèle à sous-estimer ou surestimer les observations (Équation 1-4). Comme pour l'erreur quadratique ce critère devra être minimisé.

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n (sim_i - obs_i)}{n} \quad \text{Équation 1-4}$$

Pour les mêmes raisons, (Anderton *et al.*, 2002a) proposent d'utiliser le rapport V des volumes écoulés simulés et observés pour estimer l'erreur sur le débit que l'on cherchera à rendre le plus proche de 1 possible (Équation 1-5) :

$$V = \frac{\sum_{t=1}^T Q_s^t}{\sum_{t=1}^T Q_o^t}$$

Équation 1-5

Où $_{ts}Q$ est le débit simulé à un temps t et $_{ot}Q$ est le débit observé pour ce même temps t .

Tous ces critères sont utilisables à différents pas de temps. Aussi une validation multicritères peut-elle être faite par exemple sur les débits horaires, journaliers et décadaires, à l'aide du même critère mais utilisé pour chaque pas de temps. A priori, plus le temps d'intégration est long, meilleure est la simulation. L'efficacité sur les débits décadaires devrait donc être meilleure que l'efficacité sur les débits horaires.

L'utilisation de plusieurs critères objectifs ne résout pas complètement le problème de détermination des jeux de paramètres optimum. En premier lieu, même si nous utilisons plusieurs critères, il va être difficile de définir lequel est le plus important. Avec une détermination fine des paramètres, il vient toujours un moment où l'un des critères est amélioré au détriment d'un autre. Comment choisir ? Ensuite, les paramètres peuvent varier quelquefois dans des gammes importantes.

En phase de calage, des méthodes automatiques ont été développées pour explorer plus largement les gammes de valeur des paramètres. L'avantage principal de ces méthodes automatiques est de pouvoir considérer l'ensemble des critères et donc de trouver un équilibre entre les différents objectifs de représentation des composantes hydrologiques du bassin versant. Par contre, dans un contexte d'équifinalité (Ce phénomène peut être engendré lorsque des jeux de paramètres significativement différents conduisent aux mêmes résultats de simulation), elles ne permettent pas d'accéder à la modélisation optimale, mais à un ensemble de jeux de paramètres conduisant à des simulations équivalentes. Les deux méthodes les plus connues sont la méthode multi-objectifs (Yapo *et al.*, 1998) et la méthode GLUE (Generalised Likelihood Uncertainty Estimation) (Beven *et Binley*, 1992).

1.6. Modèles utilisés dans ce travail

Dans ce travail, on se limite à l'étude de deux types de modèles conceptuels :

Le premier modèle appartient à la famille des modèles GR (Génie Rural) développé au CEMAGREF, qui sont des modèles conceptuels hydrologiques à différents pas du temps (Annuel et mensuel) qui simulent les débits à partir de deux variables d'entrée l'évapotranspiration potentiel et la pluie.

Le deuxième modèle c'est HEC-RAS conçu à la modélisation hydraulique des rivières en se basant sur plusieurs données d'entrée comme la géométrie du cours d'eau, les débits, la longueur des sections transversales de la rivière, les conditions initiales et aux limites du cours d'eau.

Chapitre 2

Chapitre 2 : Contexte de la zone d'étude

2.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation du cadre hydroclimatique, géographique, et géologique, et les différentes caractéristiques physiographiques (Superficie, périmètre, pente, relief, rectangle équivalent, ...) des trois bassins versants étudiés (Amizmiz , N'fis(Imine El Hammam) et N'fis(Iguir N'Kouris),..

2.2. Contexte géographique et géologique de la zone d'étude

2.2.1 Contexte géographique

La zone d'étude (figure 4) se compose de trois sous bassins versant qu'appartiennent au bassin versant N'fis qui est un bassin atlasique qui se situe près de la région de Marrakech, il couvre une superficie de 1288 km². Il occupe 5,2% de cette superficie et il est situé entre 8°37'53'',7°52'53'' à l'Ouest du Maroc et entre 30°52'42'' et 31°37'42'' au Nord (Saad et al., 2009).

- ✚ Bassin versant d'Amizmiz : est un sous bassin montagnard qui se situe au Sud-Est de la ville de Marrakech à 55 Kilomètres, entre la longitude 8°16'8.649"W et la latitude 31°7'36.852"N, cette entité appartient à la chaîne montagneuse du Haut Atlas de Marrakech orientée Sud-Ouest / Nord-Est, c'est le massif le plus élevé de l'Afrique. Il se localise également sur la rive gauche du bassin versant N'fis.
- ✚ Bassin versant N'fis (Imine El Hammam) : ce bassin se situe entre la longitude 8°7'26.006"W et la latitude 31°2'42.309"N, c'est un sous bassin montagnard qui se situe au Sud-Ouest de Marrakech, il se localise sur la rive droite du bassin versant N'fis.
- ✚ Bassin versant N'fis (Iguir N'Kouris) : appartient au bassin versant N'Fis à la station d'imin El Hammm entre la longitude 8°9'19.792"W et la latitude 30°59'48.228"N, c'est un bassin montagnard.

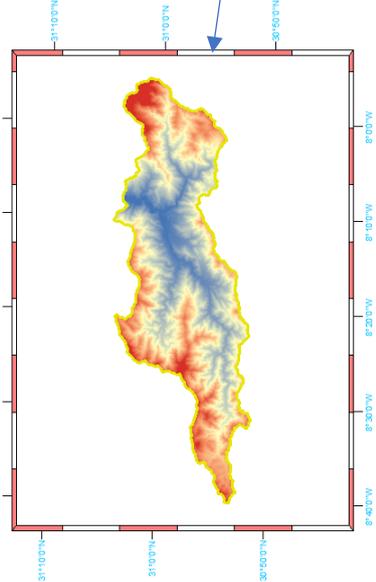
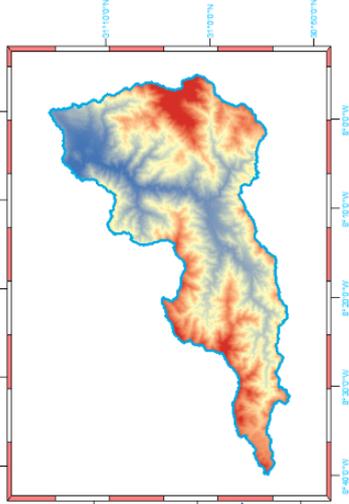
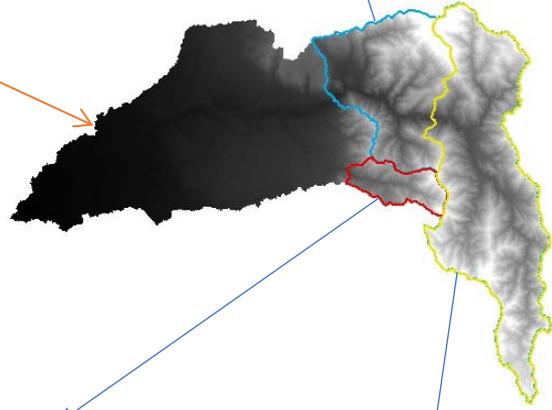
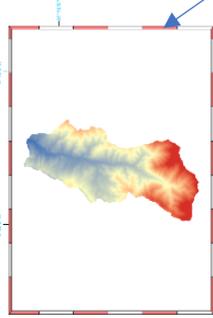
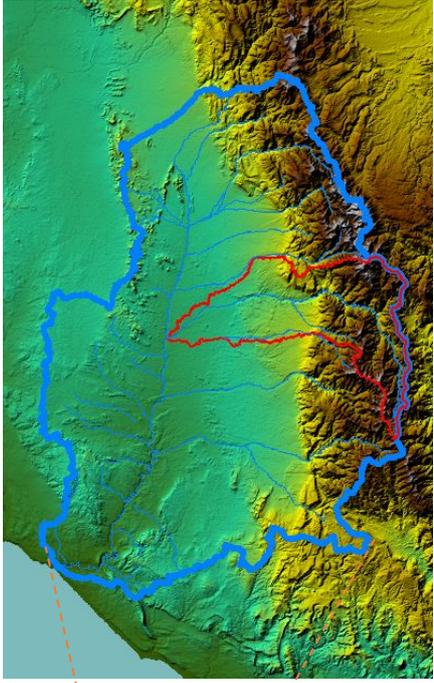


Figure 4 : Localisation géographique des 3 bassins versants de la zone d'étude

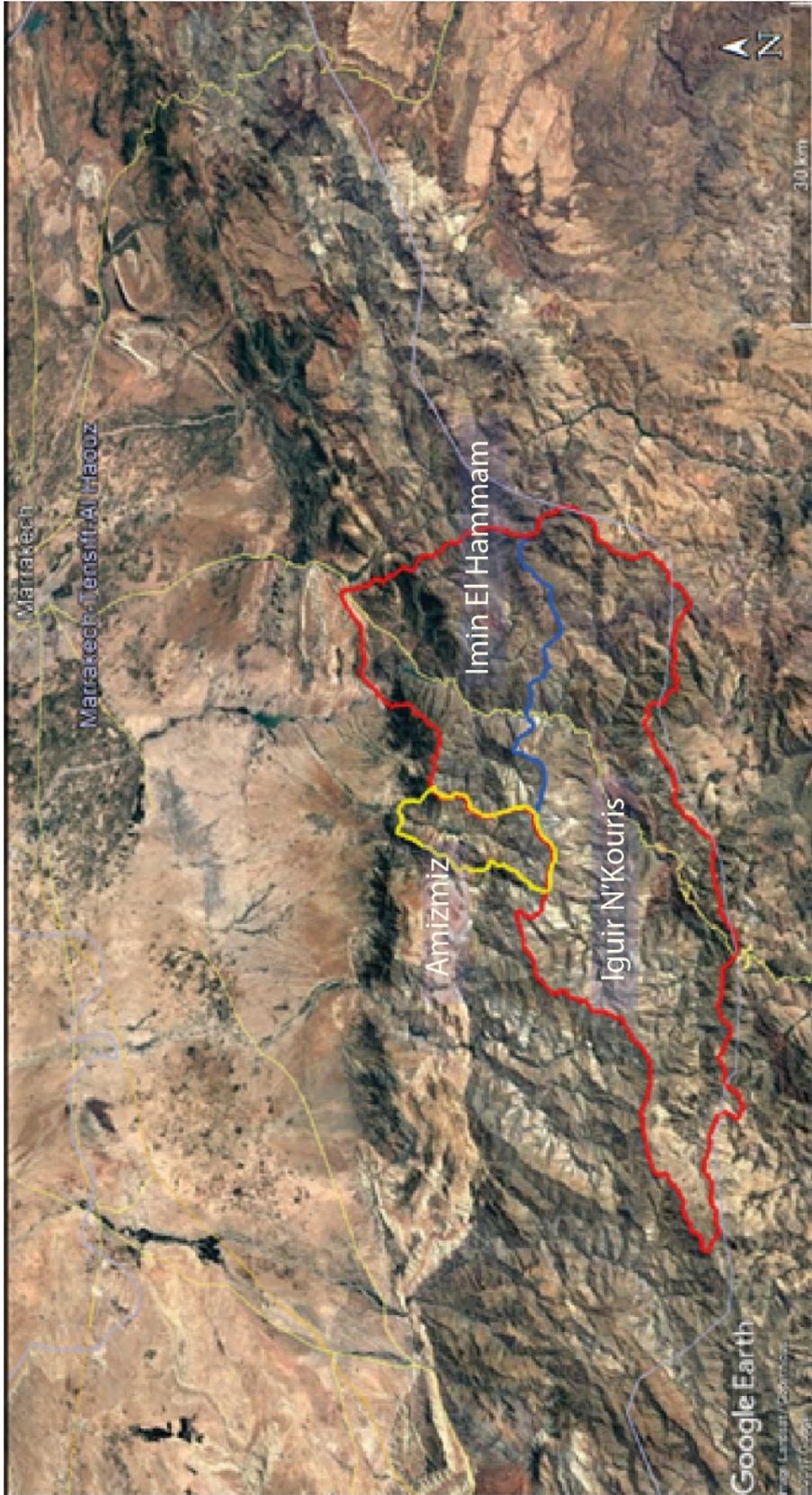


Figure 5 : Localisation géographique de la zone d'étude (Google Earth)

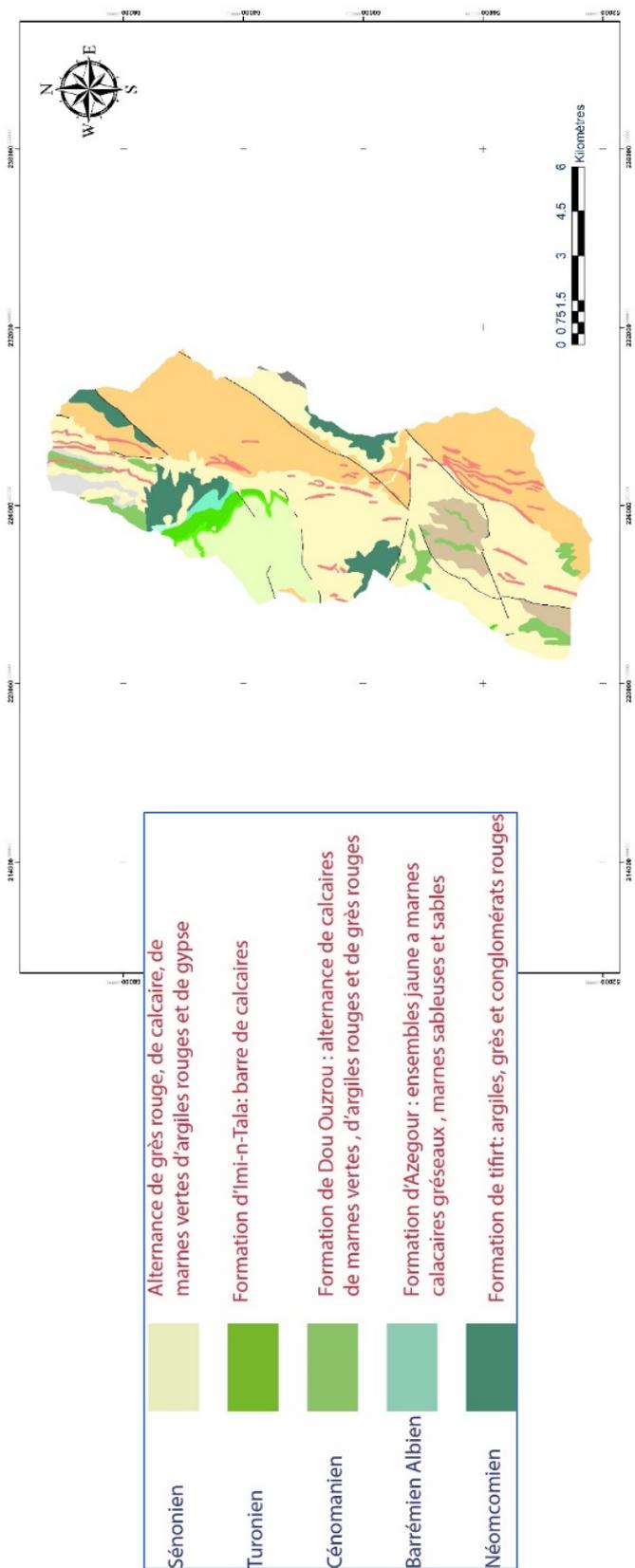


Figure 6 : Carte géologique du bassin versant d'Amizmiz (extraite de la carte géologique d'Amizmiz 1/100 000)

La région d'Amizmiz fait partie du Massif Ancien du Haut Atlas (MAHA) dit aussi le Haut Atlas de Marrakech. Le secteur d'Amizmiz montre une série lithostratigraphique allant du Paléozoïque au Tertiaire. Le Paléozoïque est représenté par des terrains sédimentaires métamorphisés et déformés d'âge cambrien et ordovicien, et des terrains magmatiques représentés principalement par le granite d'âge hercynien. Le Mésozoïque est représenté, quant à lui, par des terrains sédimentaires d'âge allant probablement du Portlandien (sommel du Jurassique) jusqu'au Crétacé supérieur. Cette série repose en discordance sur les terrains paléozoïques (granite et schiste). Les terrains d'âge éocène qui reposent en discordance sur le Crétacé représentent le Tertiaire dans cette région.

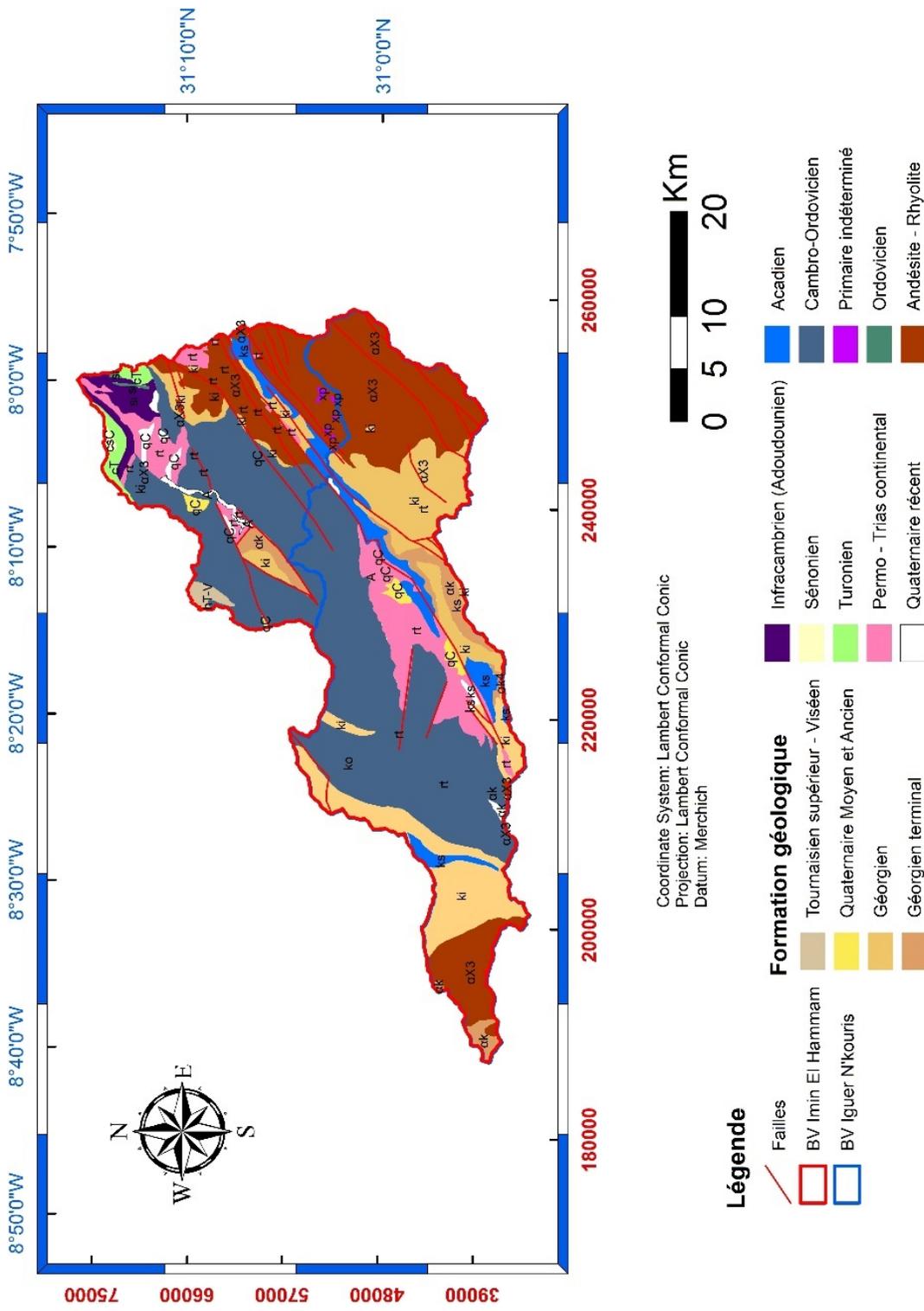


Figure 7 : Carte géologique des sous bassins versants de N'fis (extraite de la carte géologique de Marrakech 1/500 000)

2.2.2. Contexte géologique

Le bassin versant du N'fis se compose essentiellement d'un socle primaire affecté par l'orogénèse hercynienne dont la couverture est d'âge secondaire et tertiaire. Il se divise en deux parties :

- ❖ Domaine de la chaîne atlasique qui se compose de chaînes intercontinentales longues et étroites à formations mésozoïques qui reposent sur le socle hercynien ou précambrien.
- ❖ Plaine du Haouz qui est un bassin de sédimentation dans lequel se sont accumulées au Néogène et au Quaternaire des formations détritiques continentales et fluviales issues du démantèlement de la chaîne atlasique.

La morphologie du bassin versant du N'fis est due non seulement aux événements tectoniques mais aussi à la nature lithologique hétérogène, il se compose des formations suivantes :

La plus grande partie du bassin et plus particulièrement la partie montagneuse est constituée essentiellement de schistes et de calcaires d'âge Primaire. Cette partie est aussi constituée par des petites formations permo-triasique caractérisées par la dominance de grès et d'argiles.

Au Sud-est ainsi qu'au Sud-ouest du bassin, on remarque l'abondance de grands massifs granitiques, tandis qu'au Nord de ce bassin, on note l'existence des formations de plaine d'âge Tertiaire et Quaternaire, et inclut les formations secondaires marno-calcaires localisées en partie importante au Nord-est et en petite partie au Nord-ouest du bassin.

On peut dire que le bassin versant du N'fis est essentiellement schisteux, le reste est réparti entre les grès permo-triasiques au niveau des cuvettes, des calcaires et le granite qui domine le plateau de Tichka.

De point de vue pédologique, le N'fis est caractérisé par la dominance des terrains imperméables avec une répartition de 20 % de sols perméable, 9 % de sols semi- perméable et 71 % de sols imperméable (El Wahidi, 2004).

2.3. Caractéristiques physiographiques

L'analyse de la physiographie et de la géomorphologie d'un bassin versant constitue un élément indispensable pour la compréhension de son fonctionnement hydrologique. Ces caractéristiques ont une importance majeure car elles interviennent, et souvent d'une façon combinée, dans les modalités de l'écoulement superficiel. Les caractéristiques physiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage (Boudhar, 2009).

Les principales caractéristiques physiographiques utilisées dans cette étude sont extraites à partir d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) de 30m de résolution.

La surface : Correspond à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux. La surface (A) du bassin versant, exprimée en km², peut être déterminée à l'aide d'un planimètre ou mieux par les techniques de la digitalisation.

Le périmètre : Il représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant, il est exprimé en km. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus

élevés. Il n'influence pas l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. Le périmètre peut être mesuré à l'aide d'un curvimètre ou automatiquement par des logiciels.

Bassin versant	Station	Superficie (Km2)	Périmètre (km)
N'fis	Imin El Hammam	1270	200
N'fis	Iguir N'kouris	848	172.5
Amizmiz	Sidi Hsain	105	45

Tableau 1 : Caractéristiques géométriques des bassin versants

Le rectangle équivalent : Le Rectangle équivalent est une représentation géométrique du contour du bassin versant transformé en rectangle. Celui-ci est tracé à partir de la longueur et de la largeur du bassin. Les courbes de niveau y sont parallèles et sont tracées en respectant les répartitions hypsométriques. Ce rectangle est conçu pour pouvoir comparer les bassins versants du point de vue morphologique.

$$L = KG \frac{\sqrt{A}}{1.12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{KG}\right)^2}\right)^2 \quad \text{Équation 2.1}$$

$$l = KG \frac{\sqrt{A}}{1.12} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{KG}\right)^2}\right)^2 \quad \text{Équation 2.2}$$

L longueur du rectangle équivalent en km	21.56 Km
l largeur du rectangle équivalent en km	4.79 Km

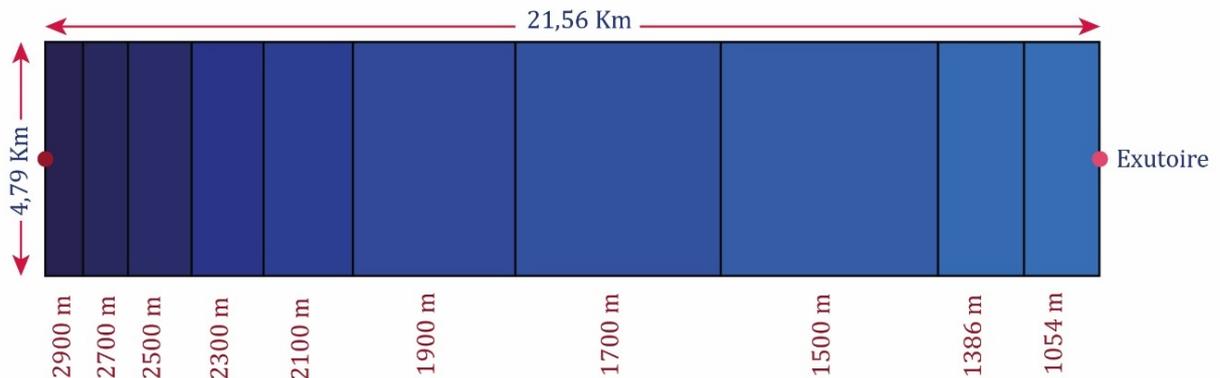


Figure 8 : Rectangle équivalent du sous bassin versant d'Amizmiz

Indice de compacité (KG): Il existe différents indices morphologiques permettant de caractériser le milieu, mais aussi de comparer les bassins versants entre eux. Citons à titre d'exemple l'indice de compacité de Gravelius (1914) KG, défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface.

le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface :

$$K_G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}} \approx 0.28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{Équation 2.3}$$

Avec :

KG est l'indice de compacité de Gravelius,

A : surface du bassin versant [km²],

P : périmètre du bassin [km].

Cet indice se détermine à partir d'une carte topographique en mesurant le périmètre du bassin versant et sa surface. Il est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée.

Bassin versant	Station	Indice de compacité (KG)
N'Fis	Imin El Hammam	1.57
N'Fis	Iguir N'kouris	1.67
Amizmiz	Sidi Hsain	1.23

Tableau 2 : Indice de compacité

L'hypsométrie : en général, on ne s'intéresse pas à l'altitude moyenne mais plutôt à la dispersion des altitudes. L'étude statistique permet de tracer la "courbe hypsométrique". Cette courbe donne la surface S (en km² ou en % de la surface totale) où les altitudes sont supérieures à une cote h donnée. Cette courbe est établie en planimétrant pour différentes altitudes les surfaces situées au-dessus de la courbe de niveau correspondante. Cette méthode est précise mais fastidieuse. Une autre consiste à échantillonner les altitudes selon un maillage carré. On admet alors que l'altitude au centre d'une maille est égale à l'altitude moyenne de la maille. Bien souvent, on définit la "dénivelée D" comme étant la différence de cote entre H5 % et H95 % : $D = H5 \% - H95 \%$

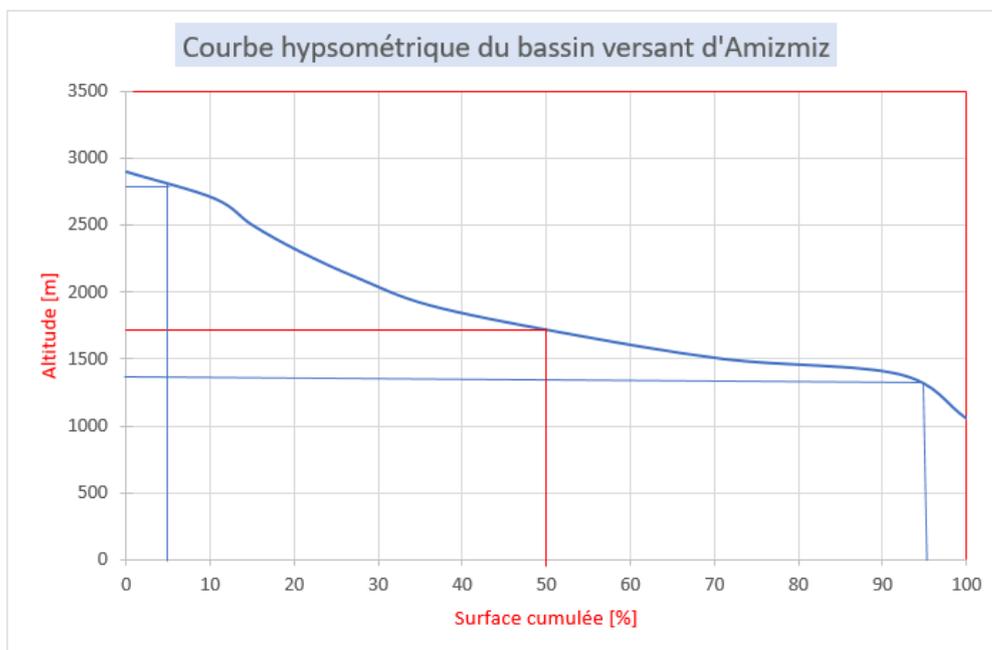


Figure 9 : Courbe Hypsométrique du bassin versant d'Amizmiz

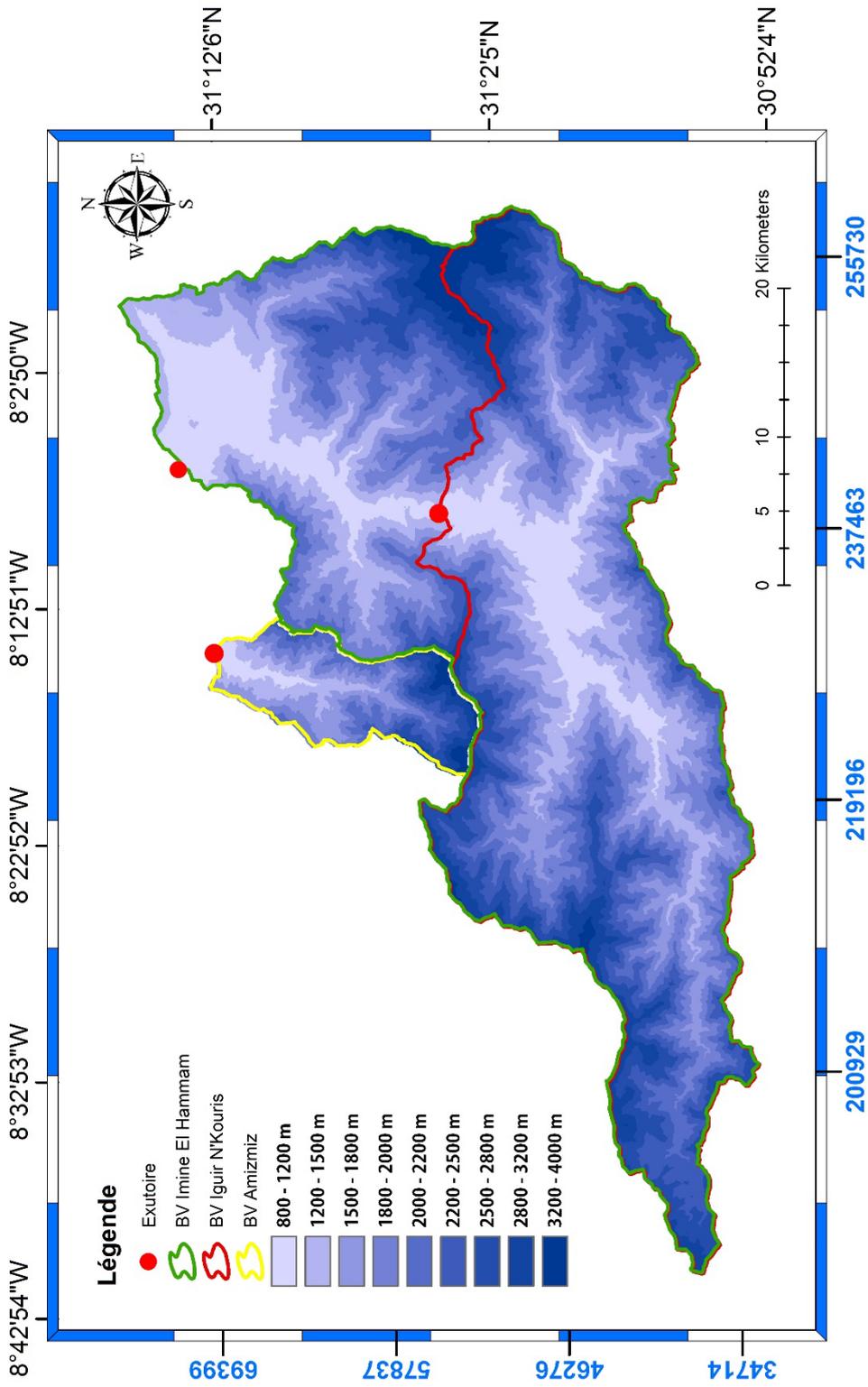


Figure 10 : Carte hypsométrique des sous bassins versant de N'Fis, Amizmiz, Imin El Hammam et Iguir N'Kouris

La figure 10 présente les différentes cartes hypsométriques des trois bassins versants de N'fis, en fait ces cartes illustrent la variation spatiale des tranches d'altitudes en fonction des superficies pour chaque bassin versant. Les tranches d'altitudes qui varient entre 2000 m et 3300 m sont les plus dominantes puisque ceux sont des bassins atlasiques qui se localisent en montagne.

La pente : La pente des cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin et donc le temps de concentration. Elle influence sur l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. En effet, la pente peut se traduire par l'infiltration de l'eau (pour des pentes faibles) ou au contraire un ruissellement de nature torrentielle (pour des pentes fortes) suivant la lithologie des roches rencontrées.

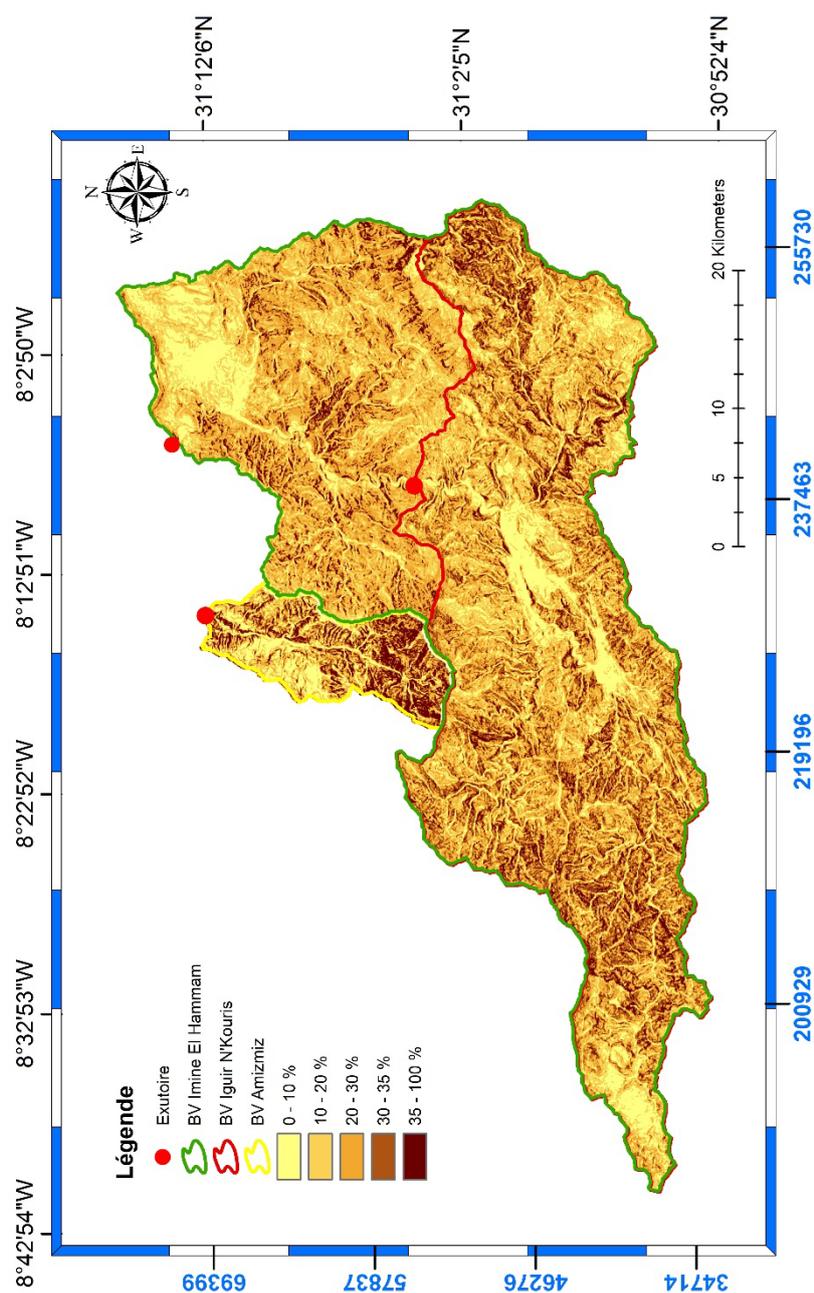


Figure 11 : Carte des pentes des sous bassins versant de N'Fis, Amizmiz, Imin El Hammam et Iguir N'Kouris

La figure 11 présente les cartes des pentes pour les trois bassins de la région d'étude, en général on note également une pente moyenne forte, donc les bassins sont caractérisés par une vitesse d'écoulement plus élevée, qui va favoriser l'érosion et le glissement de terrains surtout lors des précipitations intenses.

La classe des pentes majoritaire fluctue entre 50% et 100% se sont en gros des pentes fortes a moyennes.

Réseau hydrographique : Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Le réseau hydrographique est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin. Le réseau hydrographique peut prendre une multitude de formes.

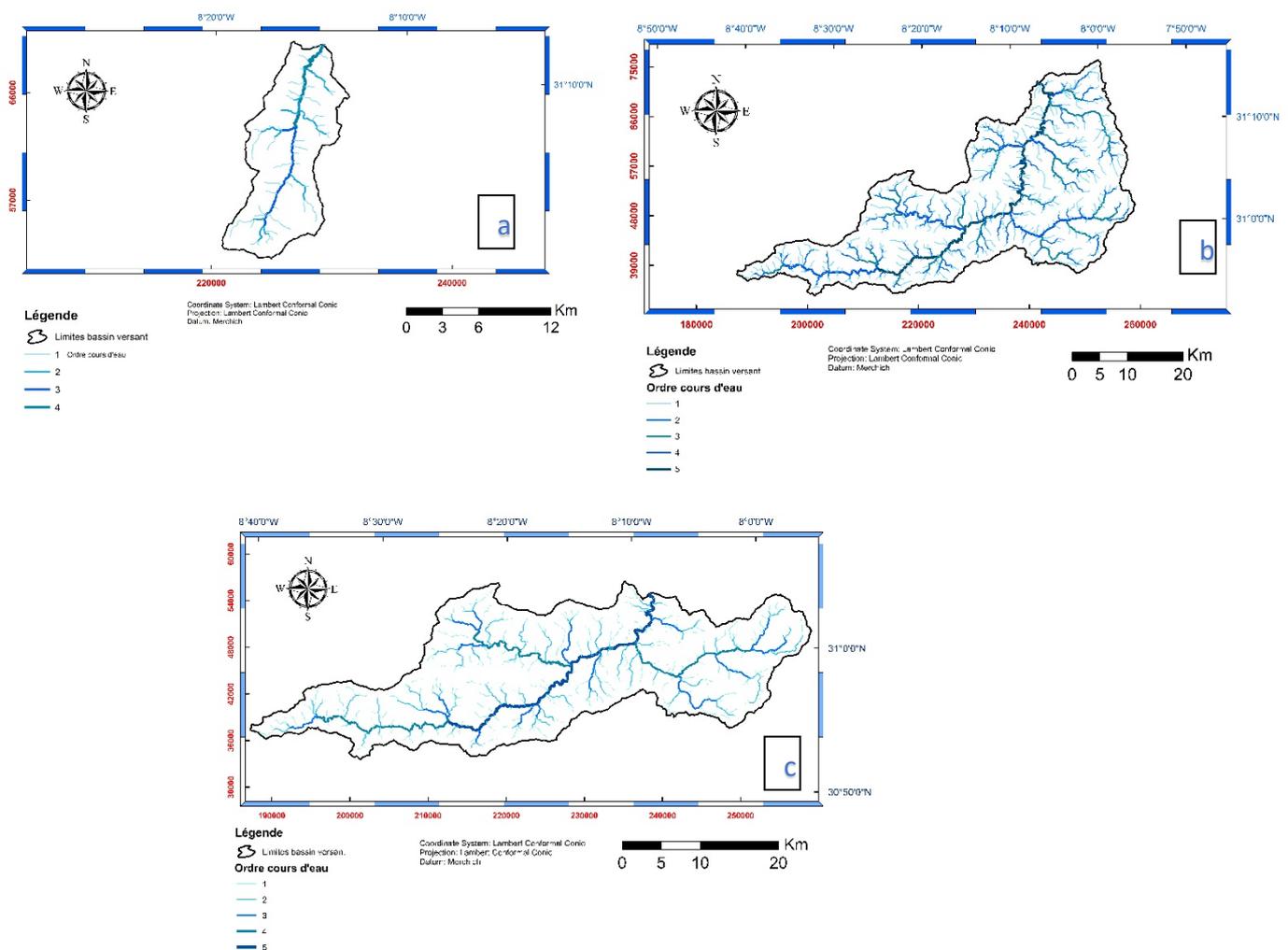


Figure 12 : Classification de Strahler, (a) Amizmiz (b) Imin El Hammam (c) Iguir N'Kouris

La figure 12 illustre la ramification du réseau hydrographique pour chacun des bassins versants, on remarque que ce réseau est bien développé au niveau de Imin El Hammam alors qu'il est moins développé au niveau du bassin versant d' Amizmiz. On peut dire que la ramification du réseau dépend de plusieurs facteurs tels que la pente, le relief, le climat ...

La classification est facilitée par un système de numérotation des tronçons de cours d'eau (rivière principale et affluents). L'ordre des cours d'eau est donc une classification qui reflète la ramification du

cours d'eau. La codification des cours d'eau est également utilisée pour la codification des stations de mesures, permettant ainsi un traitement automatisé des données. Il existe plusieurs types de classifications des tronçons des cours d'eau, dont la classification de Strahler (1957) qui est la plus utilisée.

Temps de concentration : Les caractéristiques physiographiques précédentes permettent de calculer le temps de concentration de l'eau écoulee dans le bassin versant par la relation suivante (Équation 2.4) :

$$TC = \frac{(4 \times \sqrt{S} + 1.5 \times L)}{(0.8 \times \sqrt{H_{moy} - H_{min}})} \quad \text{Équation 2.4}$$

Avec: **TC** : temps de concentration en heure

S : surface du bassin versant en km²

L : longueur du rectangle équivalent en km

H_{moy} : altitude moyenne du bassin versant en m

H_{min} : altitude de l'exutoire en m

Le temps de concentration représente le temps maximal nécessaire au ruissellement en provenance du point le plus lointain du bassin pour atteindre l'exutoire. Ce temps de concentration est très important pour l'alerte d'un risque de crue dans un bassin versant.

Le tableau ci-dessous (Tableau 3) synthétise les caractéristiques physiographiques des trois sous bassins versants atlasiques.

Les bassins versants des oueds N'fis, Imin El Hammam et Iguir N'Kouris avec des altitudes moyenne au-dessus de 2000 m et des pentes importantes (pente moyenne de l'ordre de 20 %) laissant présager une forte érosion et un relief très accentué. Les précipitations devraient être solides sur les hautes altitudes impliquant un écoulement plus important lors de la fonte des neiges.

Bassin versant	Station	Superficie (Km2)	Périmètre (km)	Indice de compacité (KG)
N'Fis	Imin El Hammam	1270	200	1.57
N'Fis	Iguir N'kouris	848	172.5	1.67
Amizmiz	Sidi Hsain	105	45	1.23

Bassin versant	Station	Pente moyenne	Temps de concentration	Longueur du talweg principal (km)
N'Fis	Imin El Hammam	0.025	8 heures 30 mn	82
N'Fis	Iguir N'kouris	0.032	3 heures 40 mn	58
Amizmiz	Sidi Hsain	0.058	3 heures 30 mn	25

Tableau 3 : Caractéristiques physiographiques des trois sous bassins versants

Occupation du sol : 3 cartes d'occupation du sol ont été élaboré à partir d'une image satellitaire sentinel-2 du mois de juillet 2016, ces images récentes ont une haute résolution qui peut atteindre 10m pour certaines bandes, cette image sont issues et corrigés par des masques de nuages du Pôle Thématique Surfaces Continentales Theia (<https://theia.cnes.fr>) a pour vocation de faciliter l'usage des images issues de l'observation des surfaces continentales depuis l'espace. Theia met à disposition de la communauté scientifique et des politiques publiques une vaste panoplie d'images à différentes échelles, des méthodes et des services.

Ces cartes sont réalisées à l'aide de Erdas Imagine par une classification supervisée.

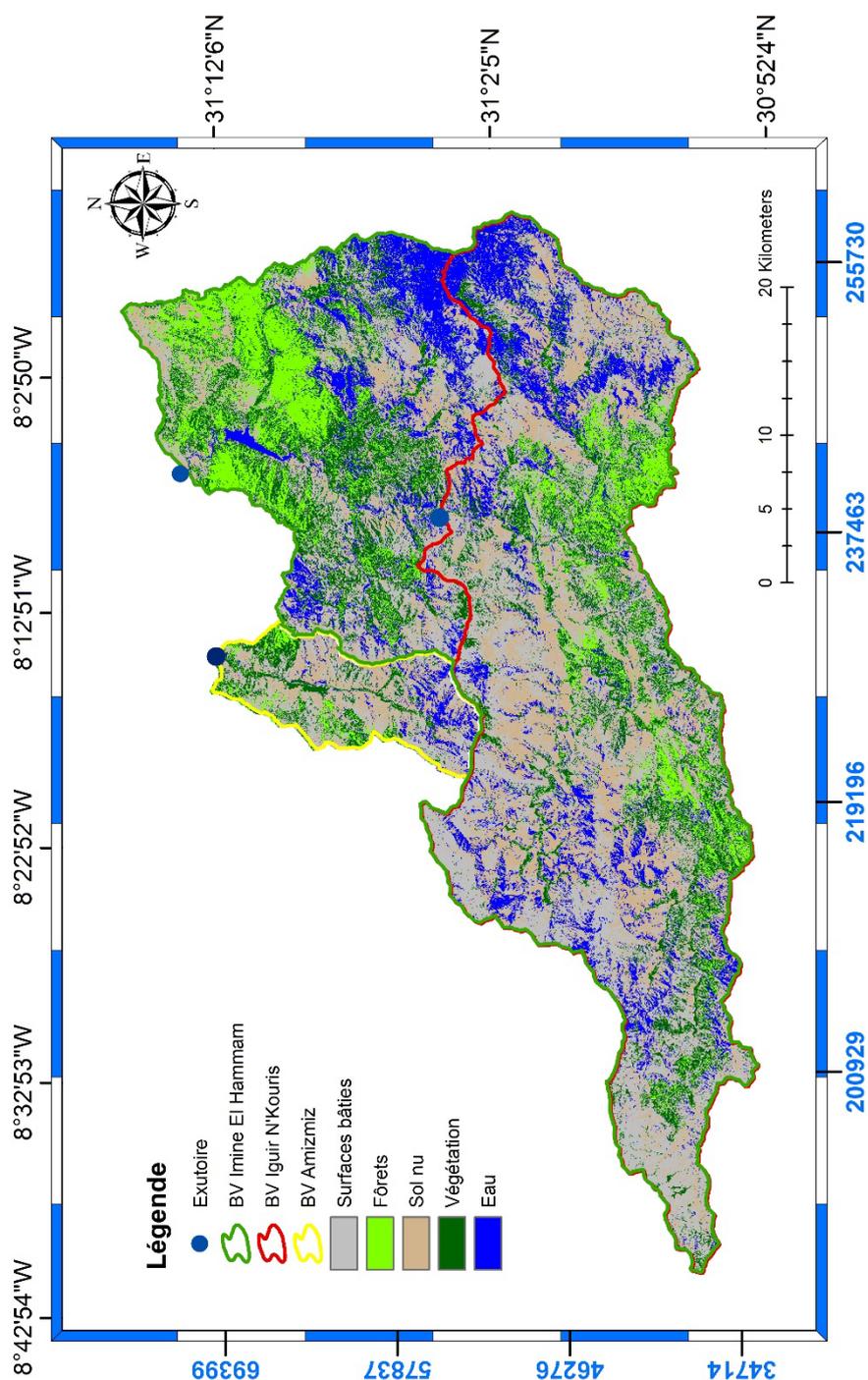


Figure 13 : Carte d'occupation du sol, (Amizmiz , Imin El Hammam et Iguir N'Kouris (Juillet 2016)

Les cartes d'occupation du sol illustrés par la (Figure 13), présente la localisation de la végétation au près du cours d'eau, la végétation permanente aux sommets des montagnes et les zones humides, les rivières, les cours d'eau et les barrages installés dans cette région, cette occupation ne donne aussi la répartition des surfaces bâties.

L'indice normalisé de végétation :

Un couvert végétal réfléchit une partie du rayonnement qu'il reçoit. Il est possible de mesurer la quantité de rayon qui est réfléchié ; c'est la réflectance du couvert. Pour mesurer l'activité physiologique des plantes, un indice de végétation (NDVI) est largement utilisé. Cet indice, s'appelle en Anglais "Normalized Difference Vegetation Index NDVI", est exprimé par:

$$NDVI = \frac{\rho_{IR} - \rho_R}{\rho_{IR} + \rho_R} \quad \text{Équation, 2.5}$$

Avec ρ_R et ρ_{IR} sont les réflectances dans le rouge et le proche infrarouge respectivement. Le NDVI est corrélé à la quantité de matière en végétation et à la vigueur des plantes. Les feuilles vertes ont des réflectances plus importantes dans le proche infrarouge que dans le domaine visible. Les feuilles en état de stress, déficit hydrique ou malades, deviennent plus jaunes et reflètent significativement moins dans le domaine de l'infrarouge.

Les réflectances ρ_R et ρ_{IR} sont mesurés par Satellite et conduisent à l'établissement des cartes de NDVI. Les NDVI avec des valeurs proches de zéro indiquent un sol nu ($NDVI=0.14$) et en présence de végétation l'indice varie de 0,2 à 0,9 (végétation verte et dense).

Le NDVI est également directement lié :

- au LAI (Indice de surface foliaire, voir après) utilisé dans les modèles de croissance et de prévision de rendement.
- à la biomasse verte pour tous les types de végétation.
- à l'activité photosynthétique de la végétation (Carte d'évapotranspiration potentielle et carte de besoins en eau des cultures).
- à la couverture du terrain (établissement de cartes d'occupation du sol).

Au niveau des trois bassins versants on peut remarquer que les valeurs de l'NDVI sont maximales près des surfaces humides, des lacs, des barrages alors que qu'elles sont moyennes au niveau des sommets des montagnes où existe la végétation permanente, la figure 14 nous donne une idée sur la répartition de cet indice qui peut nous servir à détecter les surfaces irriguées, qui va par la suite nous permettre de d'estimer l'évapotranspiration.

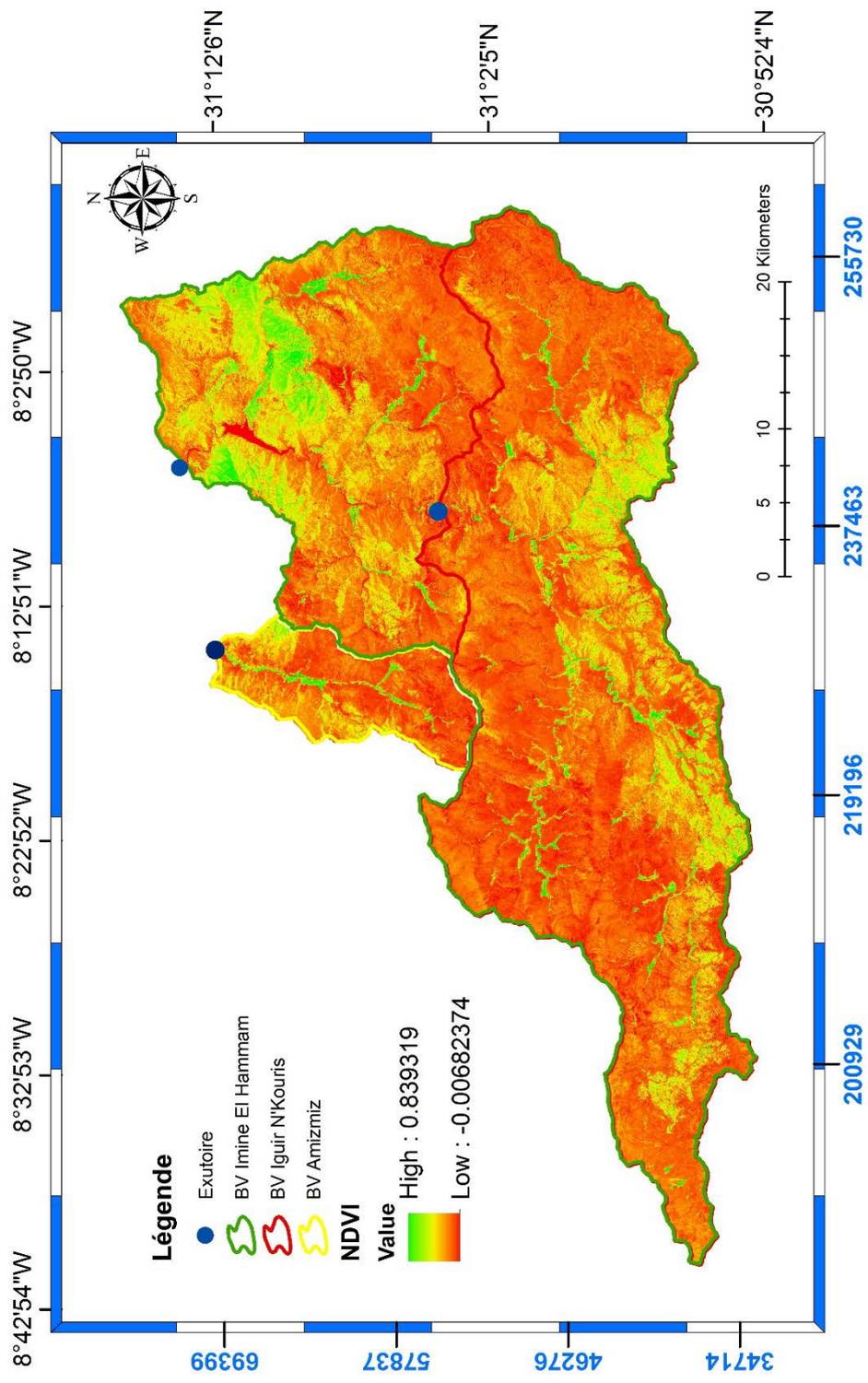


Figure 14 : Carte d'NDVI, Amizmiz, Imin El Hammam et Iguir N'Kouris (Juillet 2016)

Chapitre 3

Chapitre 3 : Présentation et analyse des données

3.1. Introduction

Ce troisième chapitre présente l'ensemble des données utilisées dans cette étude, ces données qui vont servir comme entrée des modèles hydrologiques, ces données sont la pluie (P), les débits (Q) mesurés au niveau de trois stations réparties sur les trois bassins versants de la zone d'étude, la température (T) et l'évapotranspiration potentielle (ETP) mesurée en montagne selon trois méthodes (Oudin, FAO et Hargraves).

Les données de débits et pluies sont fournis par l'agence du bassin hydraulique, les séries d'ETP de la station Armed sont fournis par LMI TREMA.

Les chroniques des débits et pluies diffèrent d'une station à l'autre, on a des mesures de température récents qui commencent en 2003.

On traitera ces données selon le pas du temps (Annuel, Mensuel), différentes analyses seront appliquées à ces données (Corrélation pluie-débit), analyse par ondelette, indice standardisé de précipitation (SPI)).

Ce chapitre va également illustrer les données issues des sorties des modèles climatiques (MEDCORDEX) <https://www.medcordex.eu/>

Les données de débits (Q) de la station de Sidi Hsain situé en aval du bassin versant Amizmiz, les débits (Q) vont subir des analyses fréquentielles selon plusieurs périodes de retour.

3.2. Les caractéristiques climatiques

Le climat est semi-aride influencé par le courant froid des Canaries dans la zone côtière. Les précipitations sont en général faibles et caractérisées par une grande variabilité spatio-temporelle. La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 250 mm à Marrakech et peut atteindre 700 mm sur les sommets du Haut Atlas. Les températures moyennes mensuelles varient entre 17°C et 20°C. Les mois les plus chauds sont généralement Juillet et Août avec 25°C à 29°C sur l'Atlas et la plaine de Haouz et 19°C à 24°C dans les zones côtières. Le mois le plus froid est Janvier avec 12°C sur l'Atlas et la plaine du Haouz et 13 à 14,5°C dans les zones côtières (ABHT, 2002). L'évaporation moyenne annuelle varie de 1800 mm sur le versant atlasique à 2600 mm dans la plaine du Haouz. Elle est minimale pendant les mois de décembre et janvier tandis que la maximale intervient pendant les mois d'été. Près de 50% de l'évaporation potentielle totale est enregistrée durant les quatre mois de juin à septembre (Boudhar, 2009).

3.3. Données hydroclimatiques

Bassin versant	Station	N° IRE	Date de mise en service	Longitude	Latitude	Données	Période
N'Fis	Imin El Hammam	1566/53	01-03-1969	-8.11	31.22	Pluie - Débit	1969-2009
N'Fis	Iguir N'kouris	510/62	24-03-1974	-8.14	31.06	Pluie - Débit	1974-2009
Amiz	Sidi Hsain	2431/53	05-11-1990	-8.24	31.19	Pluie - Débit	1998-2014

Tableau 4 : coordonnées des station hydroclimatiques

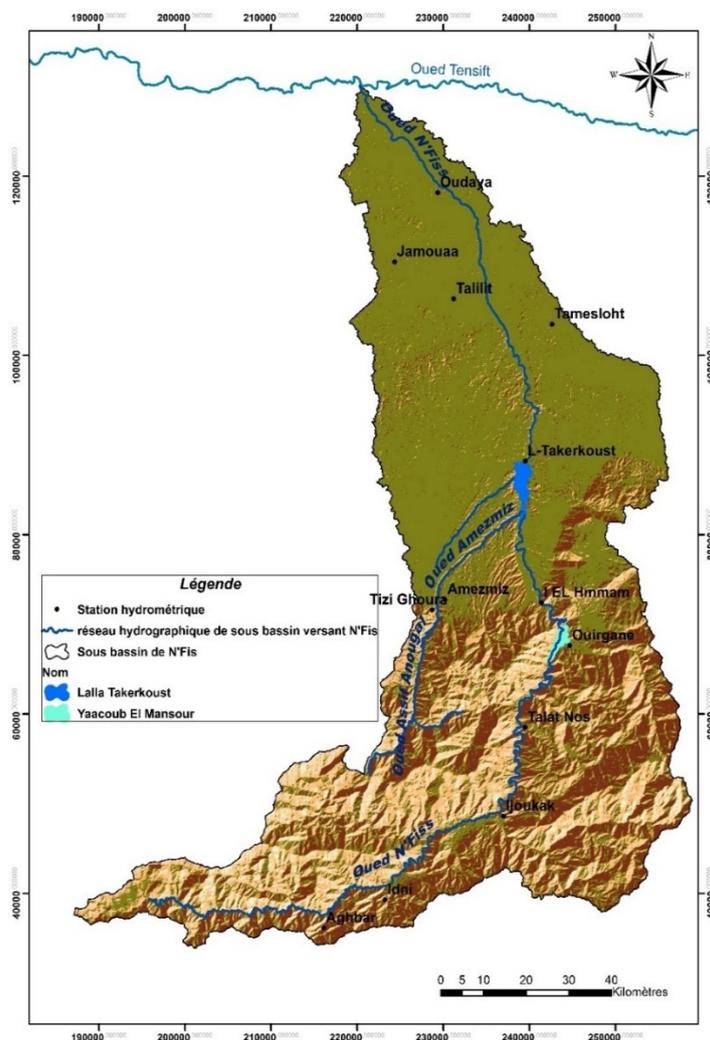


Figure 15 : Localisation des différents stations et barrages implantés au niveau du bassin versant N'fis

3.3.1 Pluies (P) :

Sur le N'fis, les données de pluviométrie sont acquises à l'aide de pluviomètres localisés dans 3 stations réparties sur 3 bassins versants. On dispose de chronique de pluie journalière sur 3 bassins versants. On présentera ces chroniques de pluie d'après le calcul de la moyenne mensuelle interannuelle qui synthétise la variation temporelle au cours des années au niveau de ces stations.

Les figures 16,17 et 18 présentent les précipitations mensuelles moyennes calculées aux 3 stations du sous bassin versant de N'fis et Amizmiz sur la période de disponibilité des données, Sidi Hsain (1998-2014) , Imin El Hammam (1969-2009) et Iguir N'Kouris (1974-2009). La moyenne mensuelle des précipitations varie de 23 mm (station Iguir N'Kouris) jusqu'à environ 70 mm au niveau de la station Sidi Hsain. Les précipitations maximales dépassent 30 mm sur l'ensemble des stations étudiées. En général les mois de février et mars sont les mois les plus humides et les mois de juin et juillet sont les plus secs avec des précipitations mensuelles qui n'atteignent que 10 mm au niveau de la station Iguir N'Kouris.

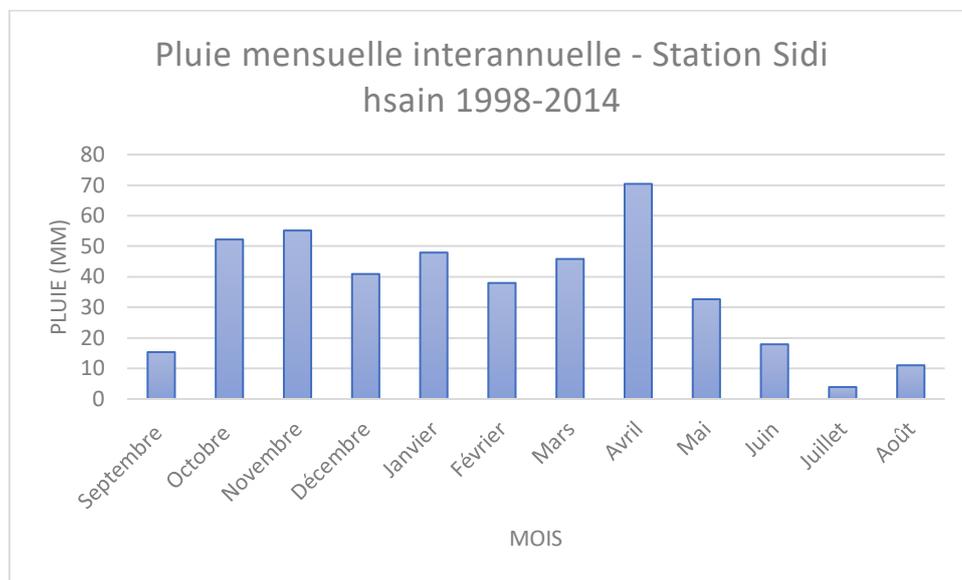


Figure 16 : Pluies mensuelles interannuelles calculées à la station Sidi Hsain 1998-2014

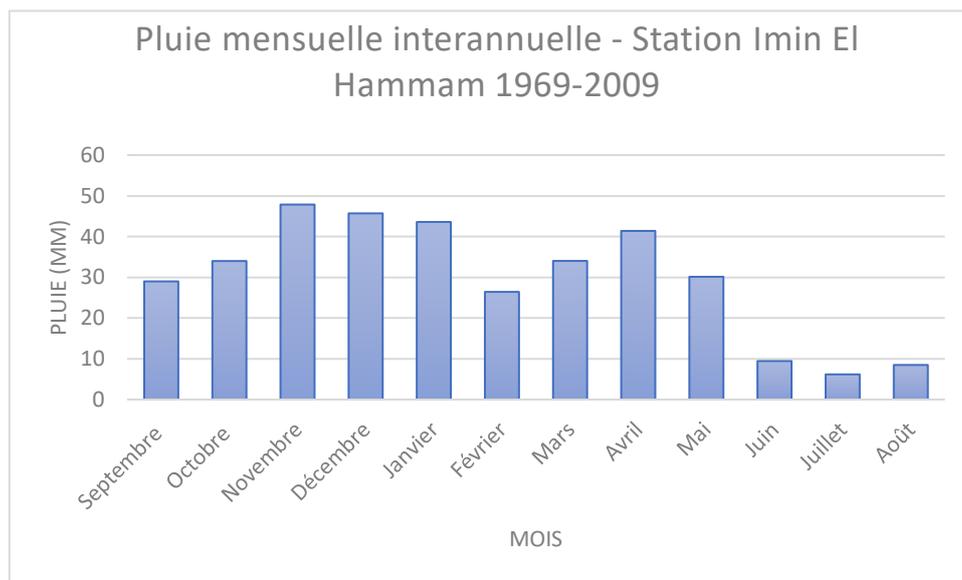


Figure 17 : Pluies mensuelles interannuelles calculées à la station Imin El Hammam 1969-2009

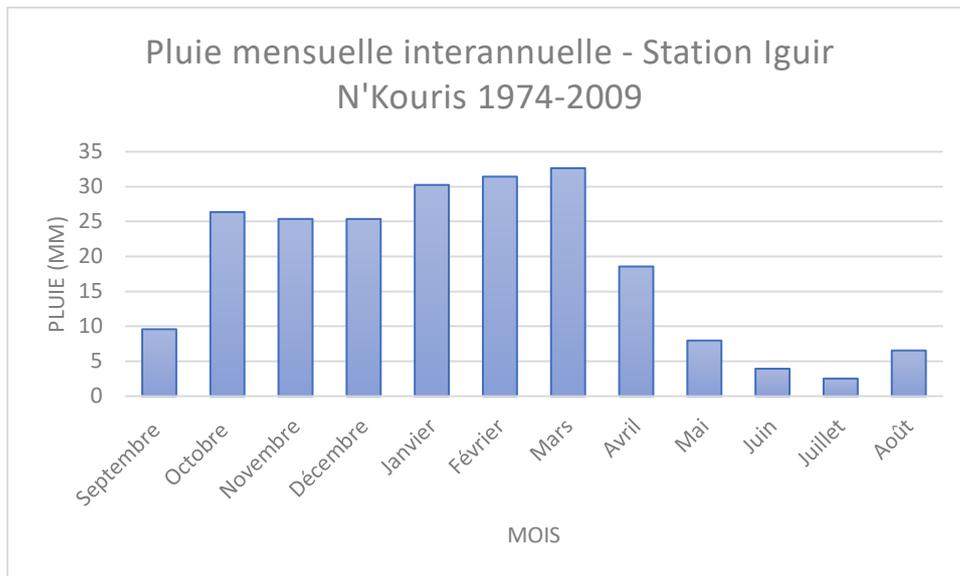


Figure 18 : Pluies mensuelles interannuelles calculées à la station Iguir N’Kouris 1974-2009

Les pluies saisonnières (figure 19) ont été calculées à partir des données de pluies moyennes mensuelles. La valeur de chaque saison est la somme de pluies moyennes de ses mois. La répartition saisonnière de pluie au niveau de toutes les stations représente presque les mêmes variations, les pluies sont plus abondantes en hiver et faible en l’été, sauf dans la station Imin El Hmamm où les pluies sont plus abondantes en printemps elle atteint 132.67 mm. La saison la plus sèche est l’été avec des moyennes de pluies de 6.36 à 20.39 mm.

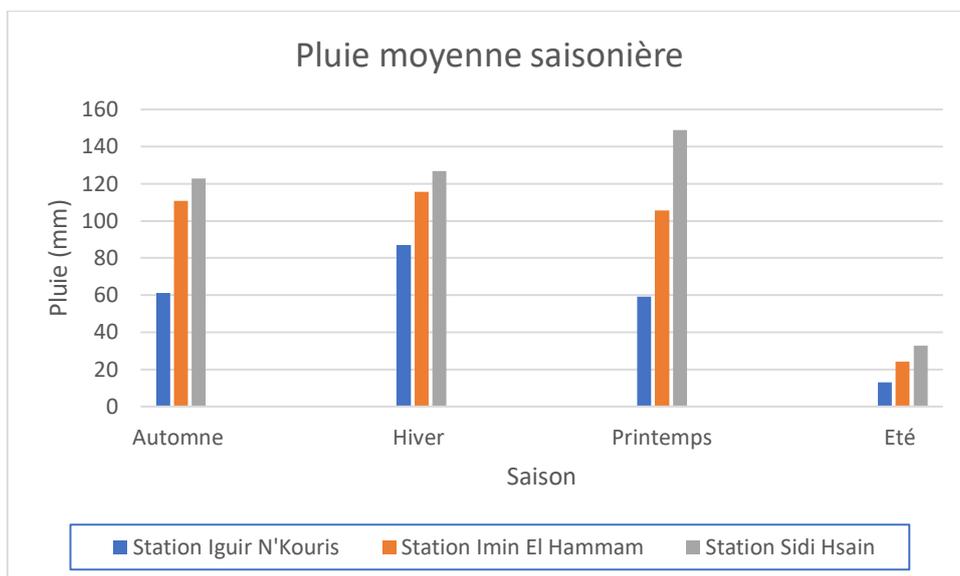


Figure 19 : Pluies moyennes saisonnières calculées aux trois stations du sous bassin versant de N’fis

L’indice SPI (McKee *et al.*, 1993, 1995) est un indice à la fois puissant, souple d’utilisation et simple à calculer. Les données sur les précipitations constituent en fait le seul paramètre requis. En outre, l’indice SPI se révèle tout aussi efficace pour analyser les périodes ou cycles humides que les périodes ou cycles secs.

Pour calculer l’indice SPI, il faut disposer idéalement de relevés mensuels s’étalant sur au moins 20 à 30 ans, mais de préférence sur 50 à 60 ans, voire plus, ce qui constitue la période optimale (Guttman,

1994). Il est possible d'exécuter le programme si de telles séries présentent des données manquantes, mais le degré de confiance à accorder aux résultats s'en trouve alors affecté en fonction de la distribution des données manquantes par rapport à la durée de la période de relevés.

(McKee *et al.*, 1993) ont utilisé le système de classification présenté dans le tableau des valeurs de l'indice SPI figurant ci-après (tableau 5) pour définir l'intensité des épisodes de sécheresse en fonction de la valeur de l'indice. Ils ont aussi défini les critères d'un épisode de sécheresse pour une échelle de temps quelle qu'elle soit. Une sécheresse sévit quand l'indice présente de façon continue une valeur négative de -1,0 ou moins et se termine lorsque l'indice devient positif. Par conséquent, on distingue pour chaque épisode de sécheresse une durée, avec un commencement et une fin, et une intensité pour chaque mois durant lequel l'épisode se poursuit. Pour obtenir ce que l'on peut appeler la «magnitude» de la sécheresse, il suffit d'ajouter toutes les valeurs de l'indice pour l'ensemble des mois sur lesquels porte l'épisode.

2,0 et plus	Extrêmement humide
de 1,5 à 1,99	Très humide
de 1,0 à 1,49	Modérément humide
de -0,99 à 0,99	Proche de la normale
de -1,0 à -1,49	Modérément sec
de -1,5 à -1,99	Très sec
-2 et moins	Extrêmement sec

Tableau 5 : Valeurs de l'indice SPI

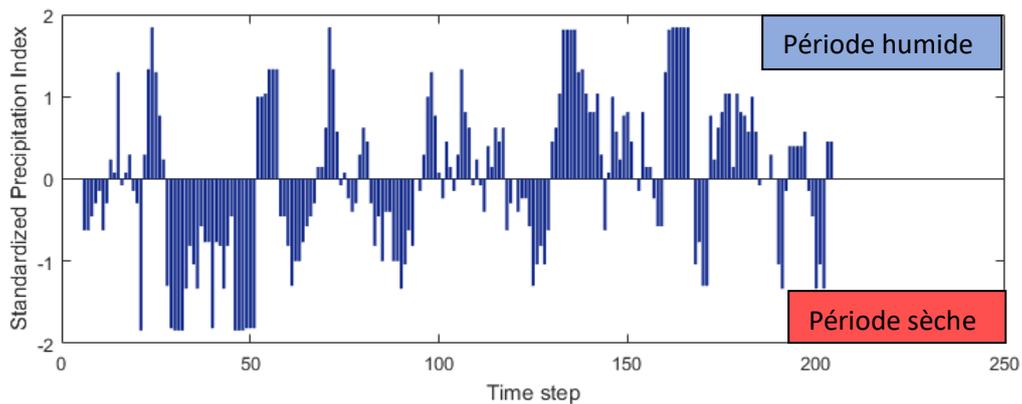


Figure 20 : Anomalies mensuelles standardisées de la pluviométrie dans le bassin versant d'Amizmiz entre 1998 et 2014

Les précipitations annuelles standardisées durant la période entre 1998 et 2014 présente une alternance entre les périodes sèches et humides, les épisodes sèches sont abondants que les épisodes humides, on remarque une forte variation de SPI au cours des années.

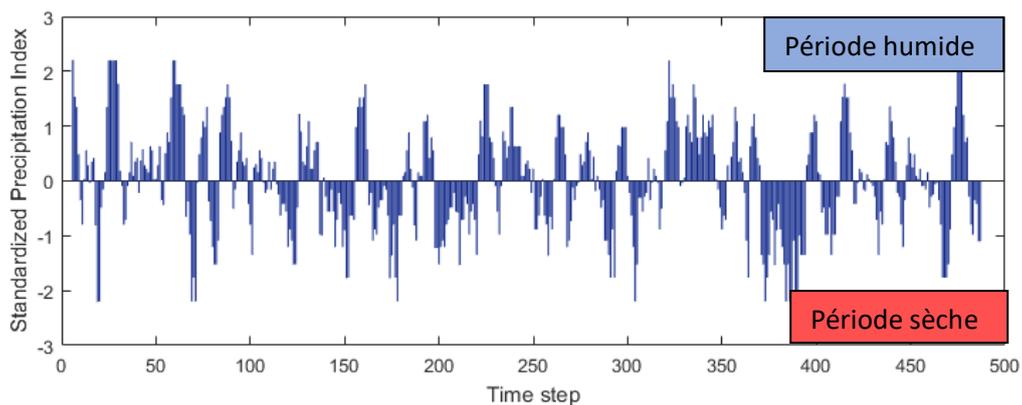


Figure 21 : Anomalies mensuelles standardisés de la pluviométrie dans le bassin versant d’Imin El Hammam entre 1969-2009

La figure 21 montre une fine variation de SPI, on peut constater que cet indice présente dans cette série une grande variabilité qui caractérisent des courtes périodes.

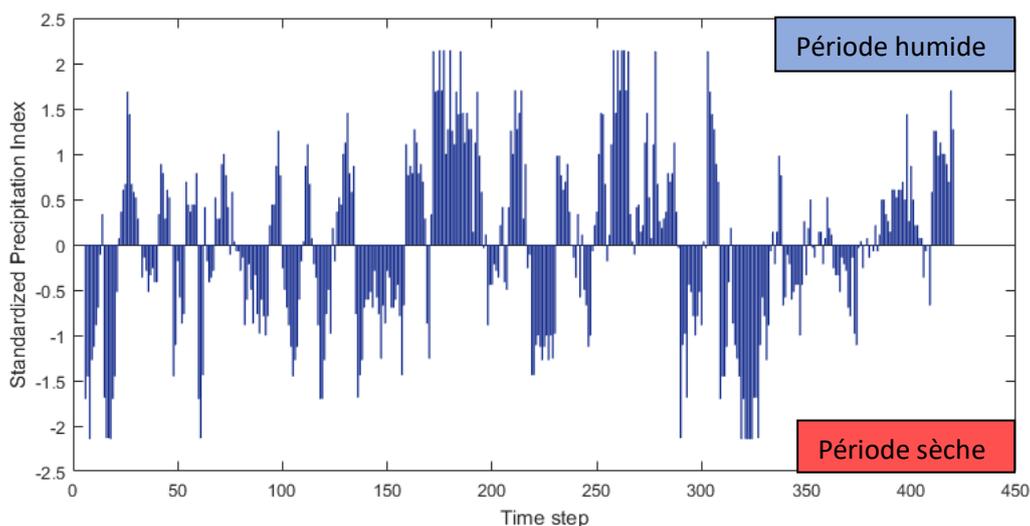


Figure 22 : Anomalies mensuelles standardisés de la pluviométrie dans le bassin versant d’Iguir N’Kouris entre 1974-2009

Cette figure illustre la variation de l’indice standardisé de précipitation durant 35 ans, on remarque une alternance entre des courtes périodes humides et sèches, alors qu’au cours de la chronique il y a une période très humide, alors que le dernier épisode est sec.

Variation des précipitations à partir de l’analyse des ondelettes :

L’analyse par ondelettes des précipitations des données montre plusieurs bandes d’énergie des échelles annuelles à interannuelles (2-3 ans et 8-12 ans) (figure 23). La bande de 2 à 3 ans n’a été détectée dans le bassin versant de N’fis pour la première moitié des années 1990. Le bassin de N’fis se caractérise

par des discontinuités au milieu des années 1980 et 2000.

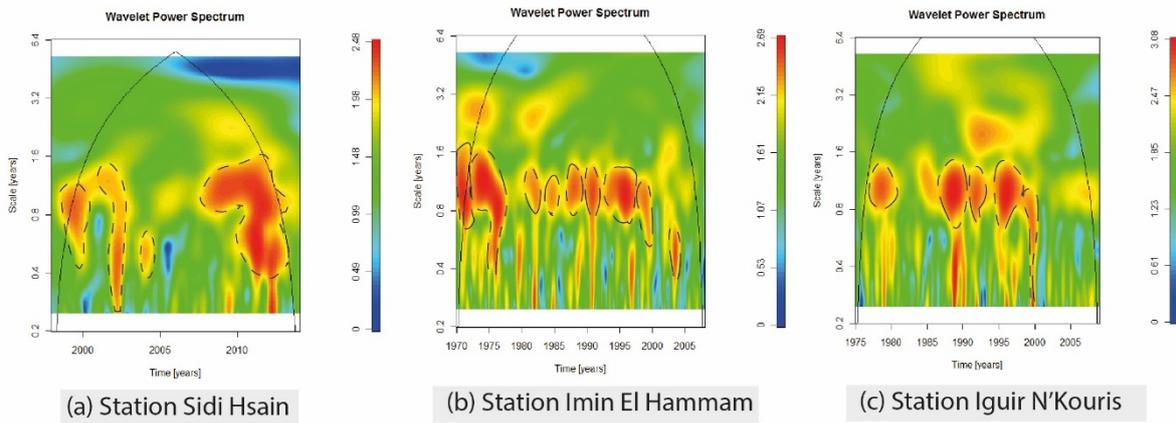


Figure 23 : Transformée en ondelettes continues de la pluviométrie mensuelle à certaines stations en niveau du bassin N'fis

3.3.2. Débits(Q):

Les mesures de débits de l'oued N'fis à la station Sidi Hsain (1998-2014), Iguir N'Kouris (1974–2009) et Imin El Hammam (1969-2009) ont été utilisés pour le bassin versant du N'fis.

L'analyse de la répartition mensuelle des débits enregistrés aux stations hydrométriques permis de bien caractériser le régime hydrologique du bassin versant de N'fis, puisque les stations sont bien réparties mais leur nombre est de faible densité, la station Imin El Hammam dans le piedmont et la station Iguir N'Kouris se trouve dans la partie montagneuse du bassin ainsi que la station Sidi Hsain se localise sur la rive gauche du bassin versant N'fis.

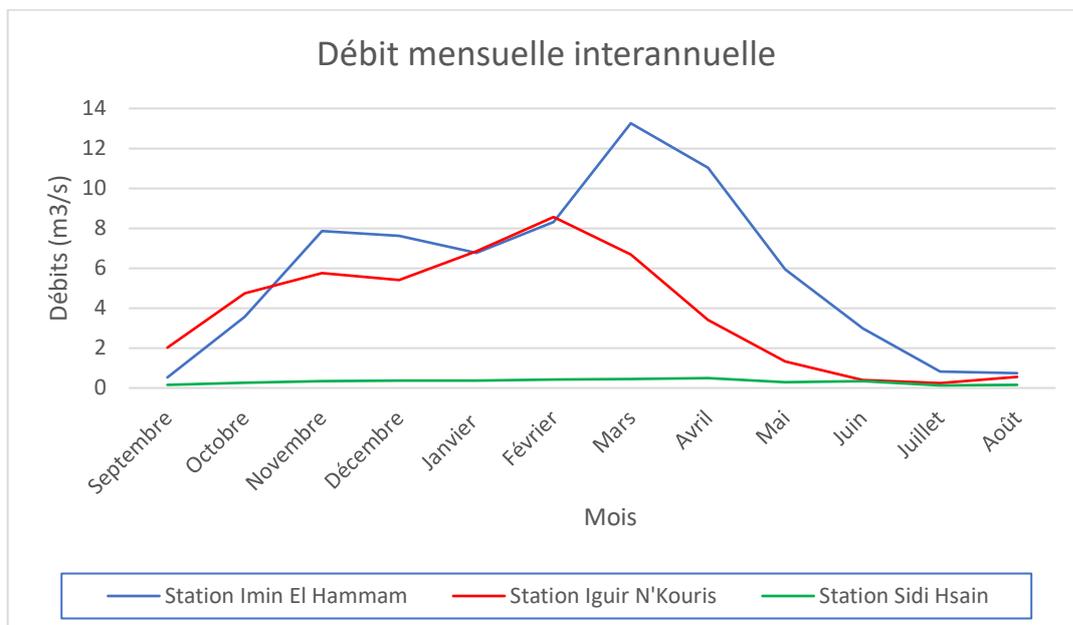


Figure 24 : Débits mensuelles interannuelles calculées aux trois stations du sous bassin versant de N'fis

L'analyse des débits mensuelles interannuelles (Figure 24) des trois stations montre qu'au niveau des stations Imine El Hammam et Iguir N'Kouris il y a un respect du cycle annuel c'est-à-dire débit moyennes en

septembre à décembre après de février à Mai on aura des débits de forte intensité due à la fonte de la neige, mais au niveau de la station de Sidi Hsain on remarque que les débits sont presque constant durant toute l'année hydrologique et ça présente une anomalie.

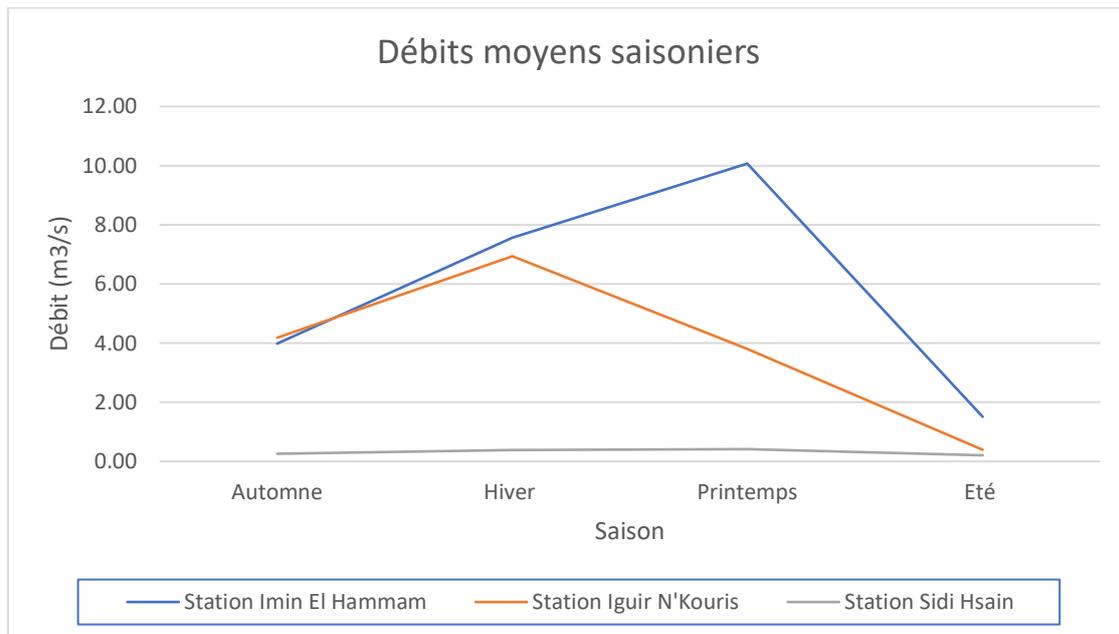


Figure 25 : Les débits moyens saisonniers calculés aux trois stations du sous bassin versant de N'fis

La distribution saisonnière des débits (Figure 25) dans un cours d'eau est conditionnée par des facteurs climatiques et par les caractéristiques physiques du bassin versant. Le régime d'écoulement mensuel résume la variabilité du débit et sa distribution saisonnière. On se basant sur les données de débits moyens mensuels, nous avons calculé les débits moyens saisonniers pour la période 1974-1975 à 2009-2010. Au cours des mois d'automne (de septembre à novembre), les débits diminuent de façon graduelle, jusqu'au minimum qui survient pendant les mois d'été (de juin à août). La moyenne la plus basse a lieu au mois de juillet. Au printemps, les débits commencent à remonter pour donner le départ à un nouveau cycle de crues.

Pour le bassin N'fis, on déduit généralement trois discontinuités autour des années 1980, 1990 et 2000 selon les stations de précipitations. On peut voir des bandes d'énergie multiples sur le débit des spectres d'ondelettes (figure 26). Comme dans le cas des précipitations, les fréquences sont d'un an, de 2 à 4 ans et de 8 à 12 ans. Il y a aussi une bande de 4-8 ans moyennement forte qui est plus

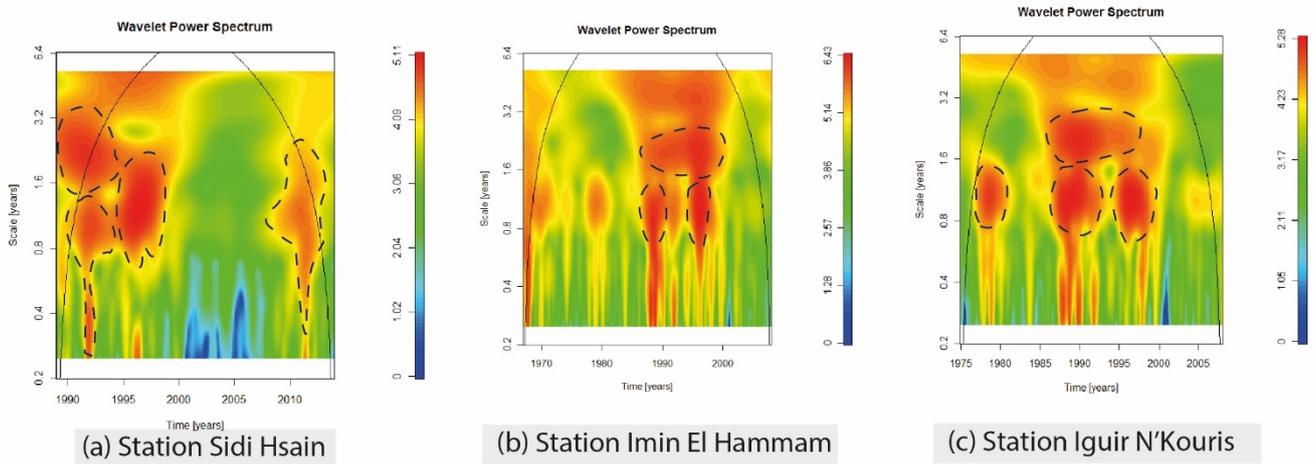


Figure 26 : Transformées en ondelettes continues du débit mensuel à des stations hydrologiques sélectionnées

Corrélation pluie-débit :

L'objectif de ce paragraphe est de mettre en évidence la corrélation entre les précipitations et les débits, pour cela, nous allons étudier les interactions entre la pluie et le débit à des pas de temps annuel.

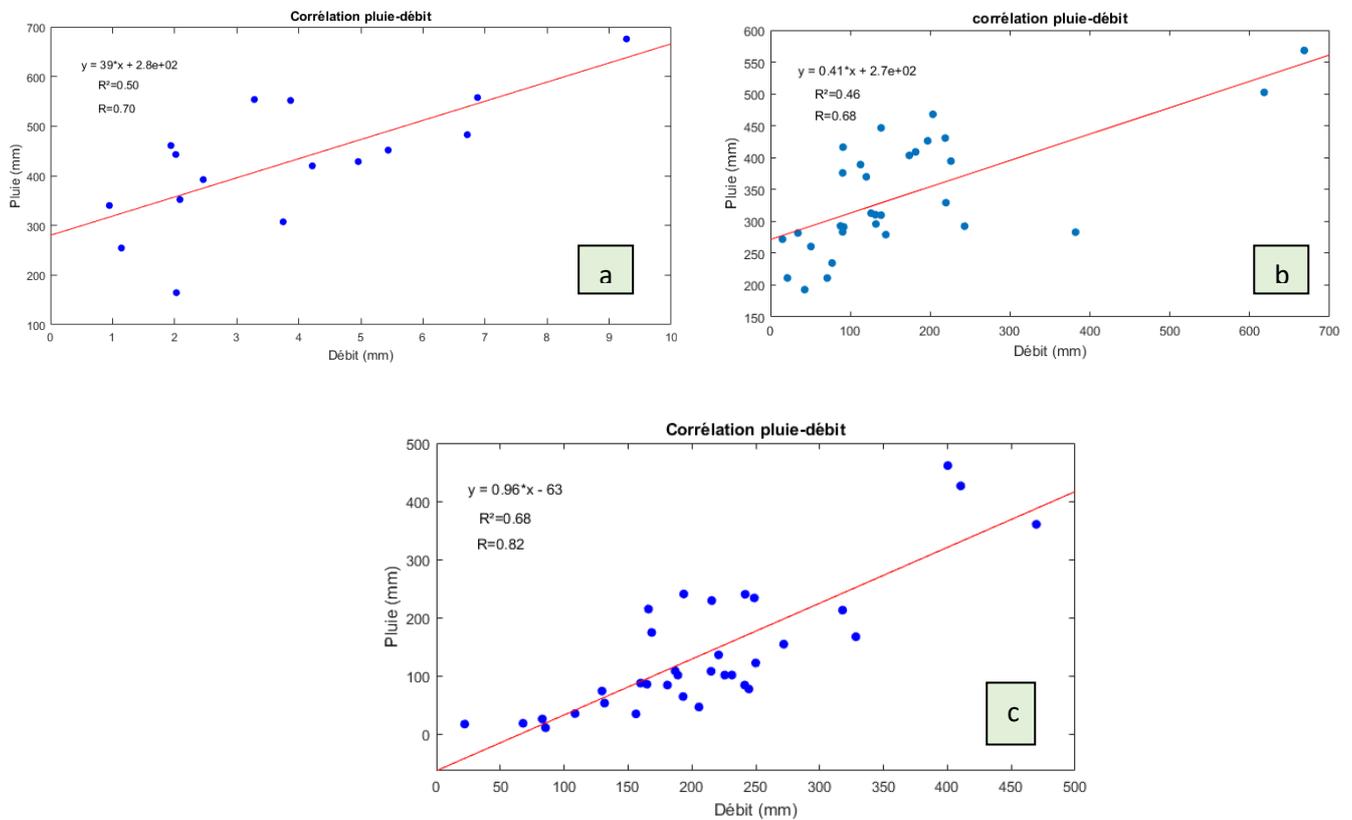


Figure 27 : Corrélation entre les précipitations et les débits moyens annuels au niveau des trois sous bassins versants : (a) Station Sidi Hsain, (b) Station Imin El Hammam, (c) Station Iguir N'Kouris

La figure 27 montre la relation pluie-débits annuels au niveau des exutoires de trois sous bassins versants étudiés. On remarque que les pluies et les débits sont plus corrélés dans les deux sous bassins de Sidi Hsain et Iguir N'Kouris et avec des coefficients de corrélation « R^2 » de 0.7 et 0.82, respectivement. Ce coefficient est assez faible pour le bassin de Imin El Hammam ($R^2 < 0.2$). Ce décalage entre pluie et débits peut être expliqué par différents points. Le premier élément affectant cette relation est les pertes des eaux à l'intérieur de chaque bassin. Ces pertes sont liées essentiellement à l'évaporation directe et aux prélèvements des eaux par les petites cours d'eau nommés « seguia » destinée à l'irrigation. La quantité d'eau destinée à l'irrigation par des seguias peut atteindre plus de 80% des eaux mobilisées (Boudhar, 2009). Les sous bassin versant de N'fis connaissent plus de perte d'eau due à la grande superficie des surfaces irriguées par rapport aux autres sous bassins. Le second effet de décalage entre les pluies et les débits peut être lié aux stocks neigeux installés aux hautes altitudes.

3.3.3. Température (T) et évapotranspiration potentielle (ETP):

Les données journalières de température et d'évapotranspiration n'ont jamais été mesurées sur le bassin du N'fis. En revanche nous possédons ces informations sur le bassin versant du Rehraya qui fut l'objet d'une importante étude. Considérant le climat de ce bassin comme global et similaire à tous les bassins à proximité, nous allons appliquer ces informations climatiques au N'fis .

Les données de température et évapotranspiration sont fournis par le laboratoire international mixte TREMA de la station Armed localisée en amont du bassin versant Rheraya de la période allant de 2003 à 2015.

L'estimation de l'évapotranspiration en montagne reste une difficulté importante pour la modélisation hydrologique (Herrnegger et al., 2012). Dans cette étude on a utilisé la formule d'Oudin (Oudin et al., 2005) pour le calcul de l'évapotranspiration après la comparaison entre 3 formules Oudin, FAO et Hargraves.

Température (T) :

On dispose de la température minimale et maximale, on procédera au calcul de la moyenne mensuelle interannuel sur la période de 2003 à 2015.

La température moyenne mensuelle minimale varie de 0°C jusqu'à 10°, la température moyenne maximale varie de 10°C jusqu'à 25°C. En moyenne, les mois de Juillet et Août sont les plus chauds et les mois de Janvier et Décembre sont les plus froids (Figure 28).

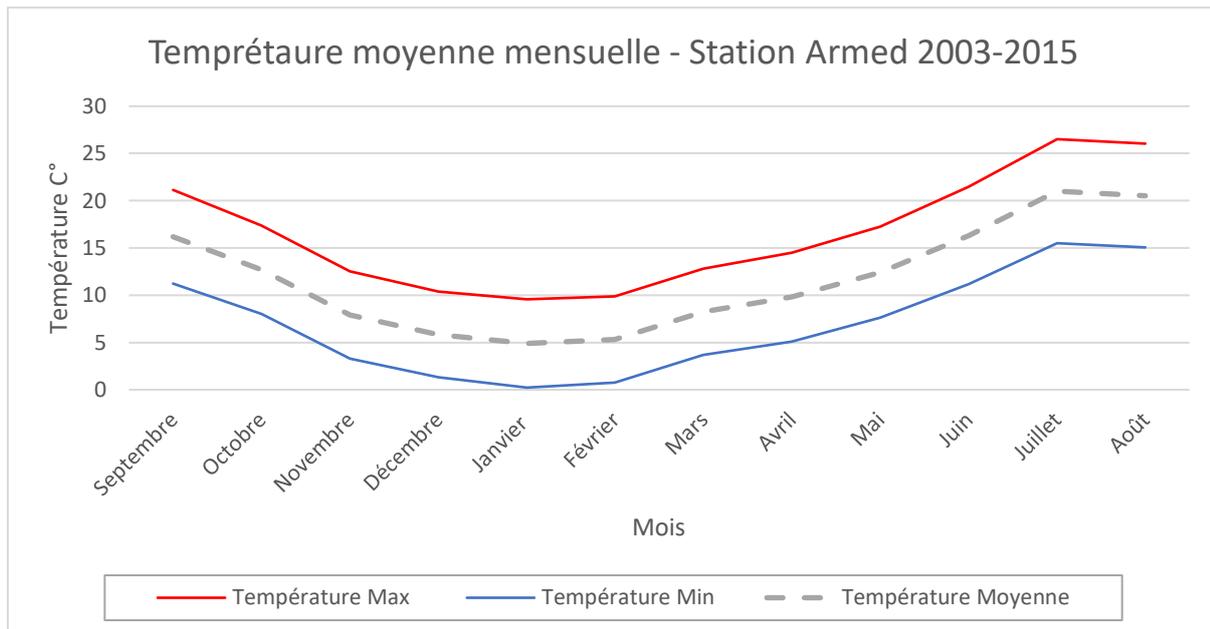


Figure 28 : Températures mensuelles moyennes calculées à la station Armed sur la période 2003-2015

Evapotranspiration potentielle (ETP) :

L'évapotranspiration potentielle n'est pratiquement jamais obtenue par une mesure directe mais par une formule (ou modèle) combinant plusieurs variables météorologiques. Le choix de la formule à utiliser et de la précision temporelle est laissé à l'utilisateur. En cela, l'entrée d'ETP diffère des autres entrées telles que la pluie et le débit. Bien entendu, le choix est souvent limité par les données climatiques disponibles sur le bassin versant. Le cas de figure idéal pour l'hydrologue serait d'être en possession de données climatiques complètes, au pas de temps le plus fin possible. La question est de savoir si le modèle a besoin de tant de précision. (Calder,1983), après avoir comparé plusieurs formules d'ETP comme entrées d'un modèle hydrique déclarait que « des formules d'ETP plus détaillées n'améliorent pas forcément les performances du modèle ».

En dehors des problèmes liés à la qualité des mesures météorologiques, l'utilisateur est donc confronté au choix du type de données d'ETP à utiliser au sein d'un modèle pluie-débit.

L'intérêt d'une entrée d'ETP pour la modélisation pluie-débit sera jugée au regard de la qualité des simulations de débit du modèle. Cette qualité recouvre notamment les aspects suivants (Michel, 1989) :

- ✚ Précision : qualité principale, qui permet d'obtenir les meilleures simulations de débits ;
- ✚ Généralité et robustesse : la formule est tout aussi valable pour les périodes sèches (permet de représenter les étiages) que pour les périodes humides (permet de représenter les crues) ;
- ✚ Parcimonie et simplicité : la détermination de l'ETP ne nécessite qu'un nombre limité et surtout justifié de données météorologiques ;
- ✚ Universalité : cette qualité concerne la possibilité d'utiliser la formule pour des bassins très différents.

Il y a plusieurs modèles pour l'estimation des valeurs de l'ETP, dans cette partie on va comparer trois méthodes.

L'estimation de l'évapotranspiration en montagne reste une difficulté importante pour la modélisation pluie-débit (Herrnegger *et al.* ; 2012). Pour réduire les incertitudes liées au calcul de l'ETP, une comparaison entre trois formules de calcul du cycle moyen (2003-2015) d'ETP a été faite.

✚ Oudin :

La formule élaborée par (Oudin *et al.* ; 2005) est la suivante :

$$ETP = \frac{R_e T + K_2}{\lambda_p K_1} \quad \text{Équation 3.1}$$

Si $T + K_2 > 0$

Si non $ETP = 0$

Où :

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm/jour) ;

R_e : de la latitude et du jour ;

T : Température journalière en °C ;

λ : Flux de chaleur latente (2.48 MJ/Kg) ;

ρ : Densité de l'eau (Kg/m³).

✚ Hargrave-Samani :

Hargreave, et Samani (1985) ont présenté un modèle estimant ETP qui demande seulement les données de températures moyennes, maximales et minimales. L'équation est dérivée de l'équation radiative de Hargreaves et intègre empiriquement la radiation solaire extraterrestre, ainsi que la différence des températures maximales et minimales. L'équation est la suivante :

$$ETP = 0.0023 R_a \sqrt{T_{max} - T_{min}} * [T + 17.8] \quad \text{Équation 3.2}$$

Où :

R_a = radiation extraterrestre (mm) qui est une fonction de la latitude et de la période de l'année ;

T = Température moyenne ;

T_{max} = Température maximale journalière (°C) ;

T_{min} = Température minimale journalière (°C).

✚ FAO/Penman-Monteith :

Lorsqu'un ne dispose que de données journalières on peut calculer l'évapotranspiration de référence à l'aide de la formule suivante, cette équation est celle de la FAO (1998).

Équation 3.3

$$ETP = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_{ste}}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

Où :

R_n = Rayonnement global en MJ/m²/j ou MJ/m²/h ;

G = Flux de chaleur dans le sol par conduction en MJ/m²/j ou MJ/m²/h ;

Δ et γ = Constantes en kPa/°C ;

T = Température e, °C ;

U₂ = Vitesse du vent à 2 mètres du sol en m/s ;

e_s = Pression de vapeur saturante en kPa ;

e_a = Pression de vapeur actuelle en kPa ;

C_{ste} = 900 pour un pas de temps journalier et 37 pour un pas de temps horaire ;

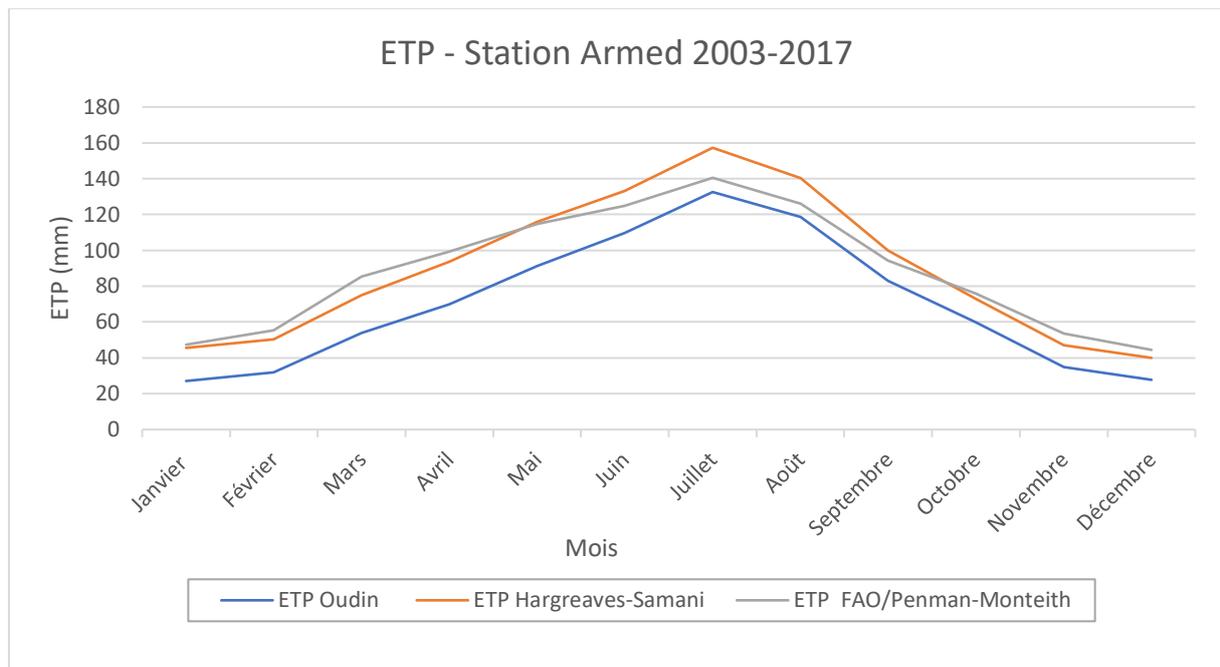


Figure 29 : ETP mensuelle moyenne selon trois formules

La figure 30 présente les corrélations entre les 3 formules de calcul de l'évapotranspiration, on remarque que les résultats sont comparables avec des coefficients de corrélation supérieure à 0.89,

notamment Hargreave et FAO (Er Raki *et al.*, 2010), Oudin sous-estime l'ETP par rapport aux deux autres formules (Figure 29).

Et comme mentionnée par Oudin (2004), le choix de modèle de l'ETP affecte peu les sorties du modèle hydrologique en termes de débit. Oudin a pu tirer cette conclusion sur la base de test de 27 formules différentes de calcul de l'ETP sur quatre modèles hydrologiques.

On remarque également que la formule de Penman-Monteith, malgré son utilisation courante en modélisation pluie-débit, ne conduit pas à des simulations plus performantes que d'autres modèles beaucoup plus simples (formule d'Oudin).

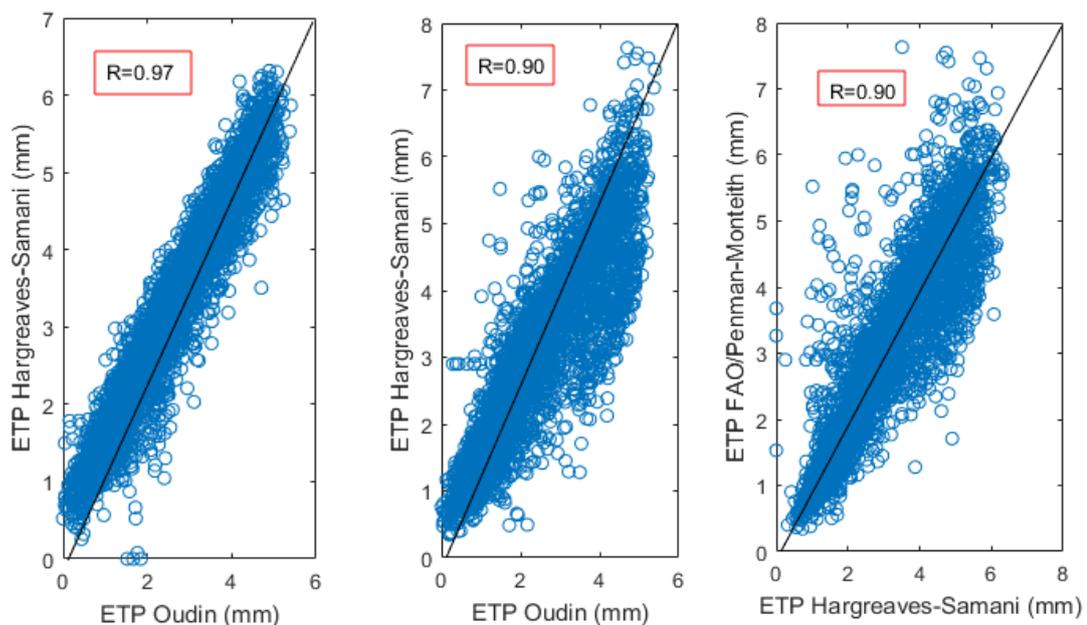


Figure 30 : Comparaison de l'ETP calculé par 3 formules, Oudin *et al.*, (2005), Hargreave, et Samani (1985) et FAO/Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) pour la période 2003-2015

3.4. Les modèles climatiques (MEDCORDEX)

La modélisation de l'impact des changements climatiques sur les écoulements de bassin de méso-échelle (de l'ordre de 1000 km²) nécessite une résolution fine afin de représenter les processus, notamment ceux reliés à l'orographie. En effet, les sorties des modèles climatiques globaux (appelés GCM) ne peuvent être utilisées directement, car leur résolution, de l'ordre de 200 à 300 km² par maille selon les modèles, est trop importante par rapport à la taille des bassins étudiés.

Une solution pour résoudre le problème de la taille de ces mailles est d'utiliser une méthode dite de désagrégation, qui a pour but de transposer les mailles de GCM à une échelle plus réduite, afin d'obtenir une résolution compatible à celle d'un bassin de 1000 km². On distingue les méthodes de désagrégation statistiques, basées sur des fonctions de transfert, et celles dynamiques, basées sur

l'utilisation de modèles climatiques régionaux (RCM). Un modèle climatique régional permet la désagrégation des sorties d'un GCM à une résolution de l'ordre de 50km à 1km (Figure 31).

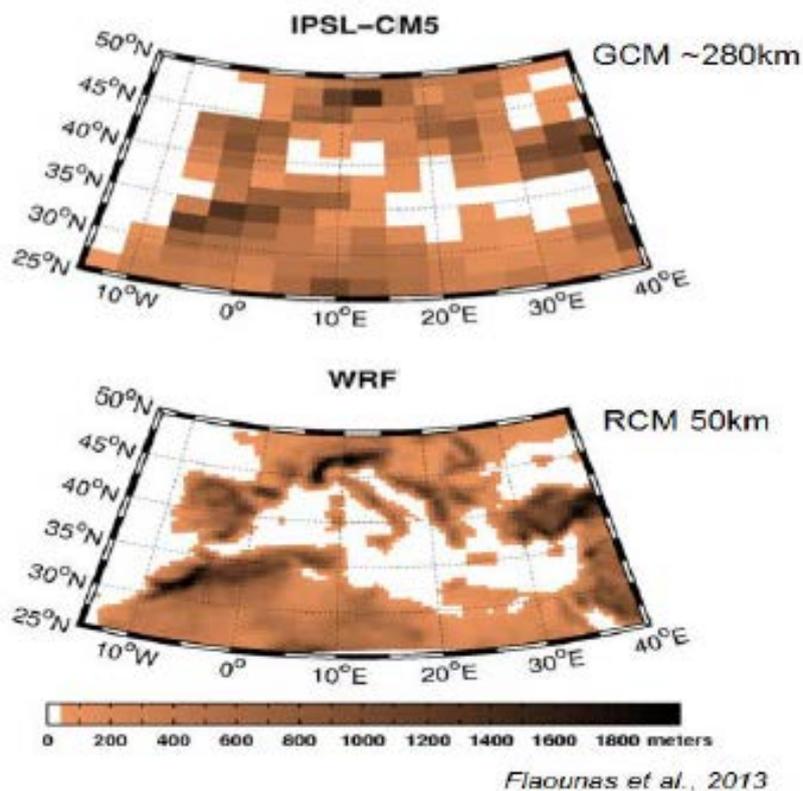


Figure 31 : Exemple du modèle climatique global (GCM) IPSL-CM5 à 280 km et du modèle climatique régional (RCM) WRF à 50 km (Flaounas et al., 2013)

Dans la présente étude, quatre simulations de RCM à 12 km ont été utilisées. Elles sont issues du projet Med-CORDEX (<http://www.medcordex.eu/>) qui vise à produire pour le bassin versant N'fis , un ensemble de simulations à différentes résolutions prenant en compte la spécificité du climat Méditerranéen (Tableau 6).

Modèle RCM	Résolution	EVAL	HIST	RCP4.5	RCP8.5
CLM	12 km	x	x	x	x
IPSL	12 km	x	x	x	x
KNMI	12 km	x	x	x	x
SMH	12 km		x	x	x

Tableau 6 : Simulations disponibles à 12 km de résolution (grille MED11)

Noms des simulations :

EVAL : simulations en période de contrôle, 1979-2005, avec les modèles RCM forcés par des réanalyses ERA-Interim (permet de valider les RCM avec la comparaison avec les données observées).

HIST : Simulations en période de contrôle (1950-2005, selon les modèles) avec les RCM forcés par les différents modèles climatiques globaux (GCM) indiqués dans les tables.

RCP4.5 / RCP8.5 : Simulations en période future (2005-2100) des RCM forcés par les différents GCM selon le scénario d'émission RCP4.5 ou RCP8.5.

3.5. Analyse fréquentielle :

Le traitement statistique de données hydrométriques est l'approche que privilégient généralement les hydrologues pour analyser le risque associé aux événements hydrologiques extrêmes.

Dans ce paragraphe on sera mené à traiter statistiquement les séries de débits pour les trois stations de la zone d'étude, La base de données ayant servie à cette étude contient des séries de débits journaliers. pour trouver les lois statistiques pour un meilleur ajustements de ces extrêmes . Cette étude sera réalisée à l'aide de l'outil statique HYFRAN.

Le logiciel HYFRAN-PLUS a été conçu pour l'analyse fréquentielle en hydrologie particulièrement pour les valeurs extrêmes. Ainsi pour l'analyse des crues, on s'intéresse au débit maximum annuel. Cependant il peut être utilisé pour n'importe quelle série de valeurs extrêmes dans d'autres domaines avec différents pas de temps, à conditions que les observations soient Indépendantes et Identiquement Distribuées (Hypothèses IID, cf 2.1.4 et Bobée et El Adlouni, 2015).

Cet analyse permettra d'estimer le temps de retour pour les débits des trois stations. Cette prédiction repose sur la définition et la mise en œuvre d'un modèle fréquentiel qui est une équation décrivant le comportement statistique d'un processus par exemple dans ce paragraphe, on va utiliser les différentes lois (Gamma, Log normal, Gumbel, ..) ces modèles décrivant la probabilité d'apparition d'un événement de valeur donnée (débit). C'est à partir du choix de la loi de probabilité que dépendra la validité des résultats de l'analyse fréquentielle.

a. Indépendance et hétérogénéité des données

Nous avons soumis les séries de débits instantanés maximums journaliers enregistrés au niveau des stations (Sidi hsain , Imine El Hammam et Iguir N'Kouris) à une analyse fréquentielle en vérifiant d'abord les hypothèses suivantes :

✚ Test d'indépendance des observations (absence d'auto-corrélation) :

Pour vérifier si l'occurrence d'une observation n'est pas affectée par les observations précédentes. Cette hypothèse a été vérifiée par le test statistique de Wald-Wolforwitz.

✚ Test d'homogénéité : pour vérifier si l'échantillon fait bien, partie de la même population du fait que l'hétérogénéité d'un échantillon peut être du eaux erreurs les plus souvent rencontrées à savoir :

Le choix de la loi qui s'ajuste le mieux à la série des données se base sur des tests d'adéquations qui jugent la validité de la loi. Ces critères de choix se présentent comme suit :

Critère d'information Bayésien(BIC);

Critère d'information d' Akaike(AIK)

* le critère d' Akaike (AIC)

Le critère d'information d' Akaike mesure la qualité de l'ajustement d'un modèle statistique. Il a été développé par Hirotosugu Akaike en 1974. Dans le cas général, l'AIC est écrit comme suit :

$$AIC = -2\text{Log}(L) + 2k \quad \text{Équation 3.4}$$

Où L est la vraisemblance maximisée et k le nombre de paramètres libres dans le modèle.

Le meilleur modèle est celui possédant l'AIC le plus faible.

* le critère Bayésien (BIC)

En statistiques, le critère d'information bayésien (BIC) ou critère de Schwarz (1978) est un critère destiné à la sélection du meilleur modèle (parmi un ensemble de modèles) d'ajustement de séries de données. Il est basé sur la fonction de vraisemblance, et il est étroitement lié au critère d'Akaike (AIC).

La formule du BIC est :

$$\text{BIC} = -2\text{Log}(L) + k \times \log(n) \quad \text{Équation 3.5}$$

Où L représente la valeur maximisée de la fonction de vraisemblance pour le modèle estimé et n le nombre d'observations.

Modèle	Probabilité à priori	Probabilité à posteriori	BIC	AIC
Lognormal (Maximum Likelihood)	25	99.18	95.75	93.97
Gamma (Maximum Likelihood)	25	0.77	105.45	103.67
Exponential (Maximum Likelihood)	25	0.04	111.32	109.54
Gumbel (Maximum Likelihood)	25	0	130.55	128.76

Tableau 7 : Récapitulatif des résultats des ajustements pour les 4 lois les mieux adaptées – Station Sidi Hsain

Modèle	Probabilité à priori	Probabilité à posteriori	BIC	AIC
Lognormal (Maximum Likelihood)	25	74.49	459.78	456.45
Gamma (Maximum Likelihood)	25	22.14	462.20	458.88
Exponential (Maximum Likelihood)	25	3.37	465.97	462.64
Gumbel (Maximum Likelihood)	25	0	489.84	486.51

Tableau 8 : Récapitulatif des résultats des ajustements pour les 4 lois les mieux adaptées – Station Imin El Hammam

Modèle	Probabilité à priori	Probabilité à posteriori	BIC	AIC
Lognormal (Maximum Likelihood)	25	39.35	377.31	374.31
Gamma (Maximum Likelihood)	25	33.35	377.64	374.64
Exponential (Maximum Likelihood)	25	27.29	378.04	375.05
Gumbel (Maximum Likelihood)	25	0	395.25	392.26

Tableau 9 : Récapitulatif des résultats des ajustements pour les 4 lois les mieux adaptées – Station Iguir N'Kouris

Les ajustements sont effectués pour chacune des lois avec HYFRAN. La sélection de la loi la plus adéquate est effectuée en utilisant les critères AIC et BIC en plus du test graphique. Il en ressort que la loi Lognormal donne le meilleur résultat pour les trois stations. La loi lognormal est ainsi retenue pour modéliser la distribution des débits extrêmes de crue des trois stations.

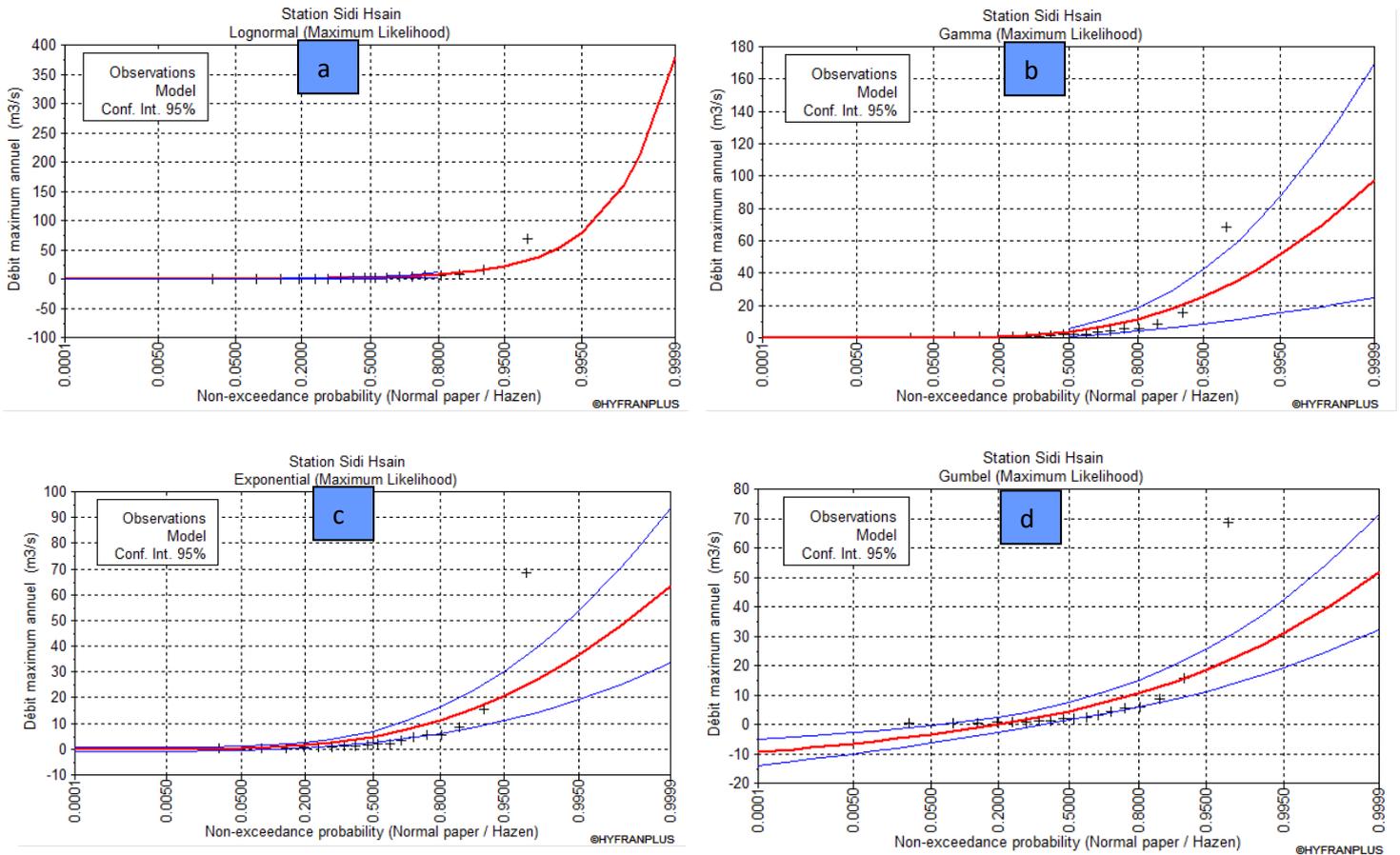


Figure 32 : Ajustement à la loi ((a) Lognormal, (b) Gamma, (c) Exponentiel, (d) Gumbel Gumbel – probabilité de non dépassement avec intervalles de confiance à 95% - Station Sidi Hsain

Loi testée	Loi Log normal	Loi Gamma	Loi Exponentiel	Loi Gumbel
Période de retour (an)	Q max m3/s	Q max m3/s	Q max m3/s	Q max m3/s
200	78	31	37	31
100	55	27	32	27
50	38	23	27	23
20	21	18	21	18
10	13	14	16	14
5	7	10	11	10

Tableau 10 : Valeurs des débits fréquents pour les quatre lois (Exponentiel, Gamma, Gumbel et Log Normale) – Station : Sidi Hsain

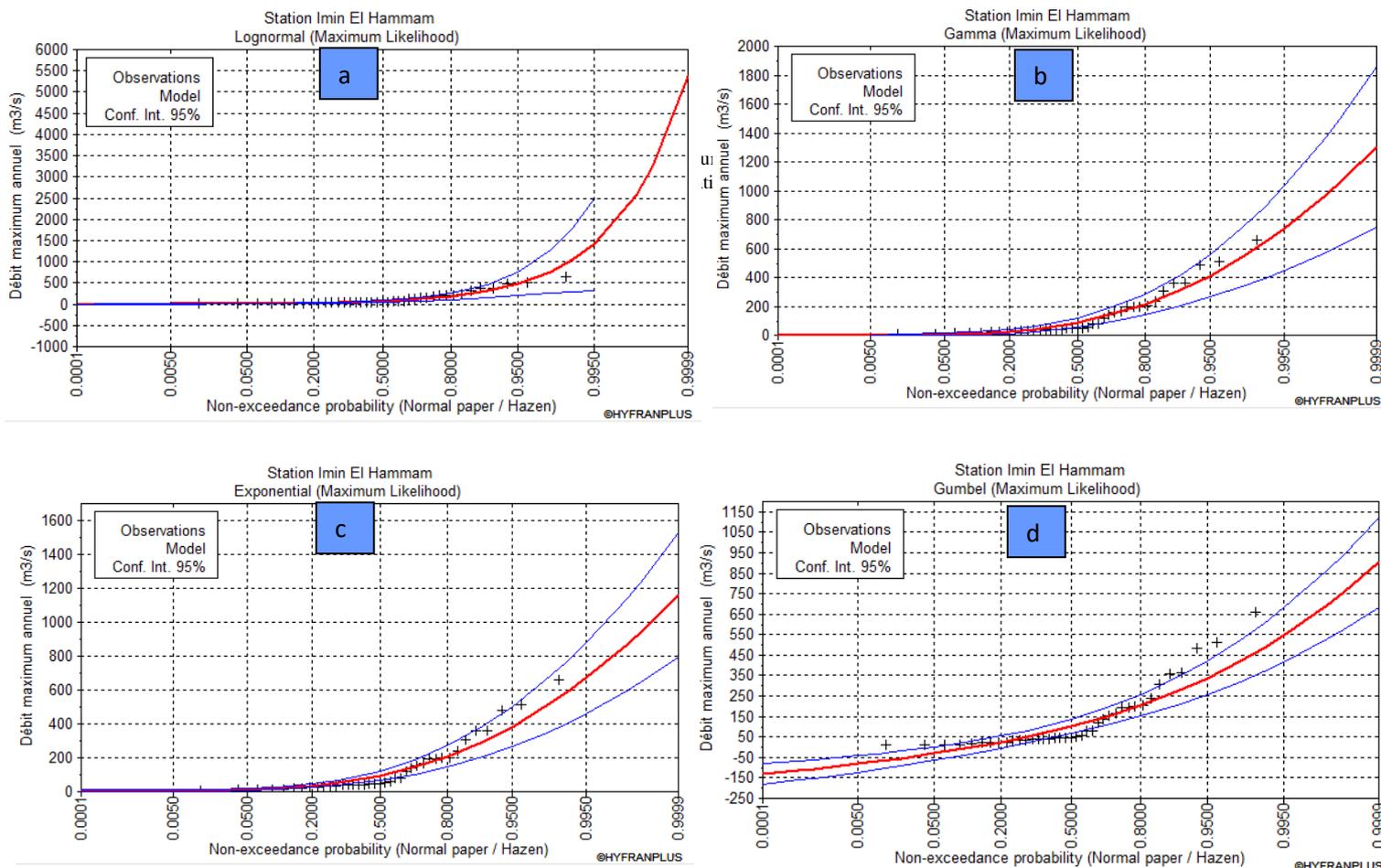


Figure 33 : Ajustement à la loi ((a) Lognormal, (b) Gamma, (c) Exponentiel, (d) Gumbel – probabilité de non dépassement avec intervalles de confiance à 95% - Station Imin El Hammam

Loi testée	Loi Lognormal	Loi Gamma	Loi Exponential	Loi Gumbel
Période de retour (an)	Q max m3/s	Q max m3/s	Q max m3/s	Q max m3/s
200	1400	740	670	550
100	1100	640	580	490
50	770	540	500	420
20	470	410	380	340
10	310	310	300	270
5	190	210	210	200

Tableau 11: Valeurs des débits fréquents pour les quatre lois (Exponentiel, Gamma, Gumbel et Log Normale) – Station : Imin El Hammam

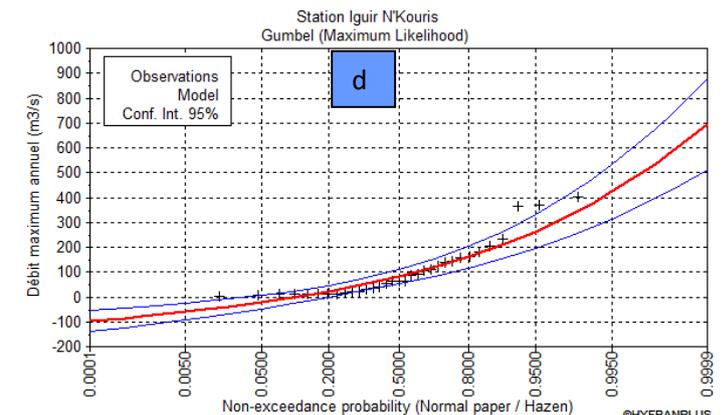
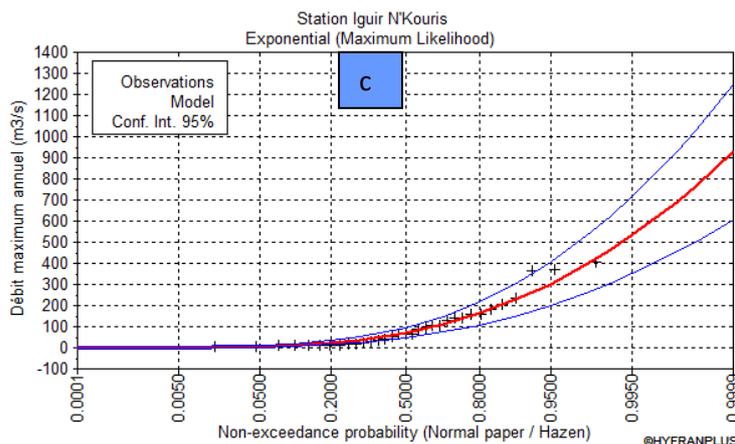
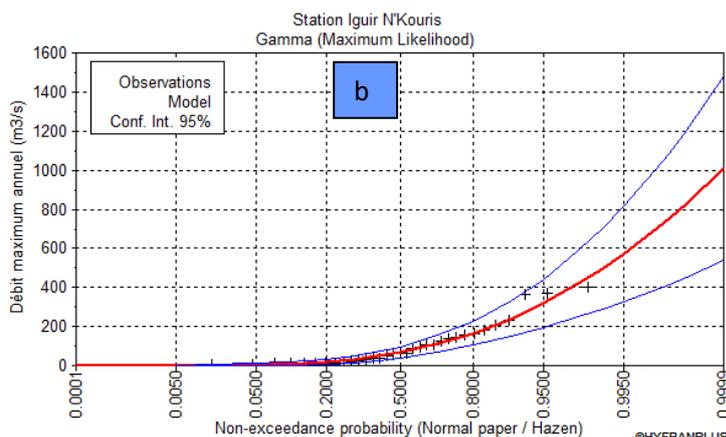
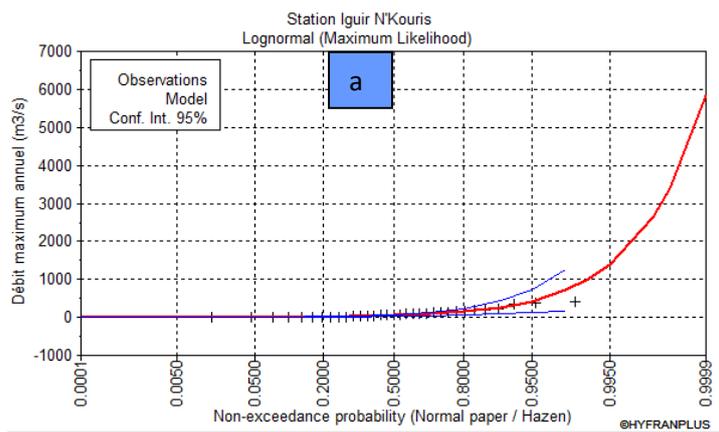


Figure 34 : Ajustement à la loi ((a) Lognormal, (b) Gamma, (c) Exponentiel, (d) Gumbel Gumbel – probabilité de non dépassement avec intervalles de confiance à 95% - Station Iguir N'Kouris

Loi testée	Loi Lognormal	Loi Gamma	Loi Exponential	Loi Gumbel
Période de retour (an)	Q max m3/s	Q max m3/s	Q max m3/s	Q max m3/s
200	1400	570	530	420
100	1000	500	460	380
50	720	420	390	330
20	430	320	300	260
10	270	240	230	210
5	150	170	160	160

Tableau 12 : Valeurs des débits fréquents pour les quatre lois (Exponentiel, Gamma, Gumbel et Log Normale) – Station : Iguir N'Kouris

3.6. Les crues

Les crues sont le plus souvent décrites par trois caractéristiques principales : la pointe, le volume et la durée. Durant les dernières décennies, on remarque un regain d'intérêt pour les recherches et les études des crues et des inondations. Cet intéressement peut s'expliquer par les préoccupations des milieux scientifiques et des décideurs face à la fréquence, de plus en plus élevée, de l'apparition des crues dévastatrices.

Dans cette partie du manuscrit on va présenter une crue majeure pour chaque station avec ses caractéristiques

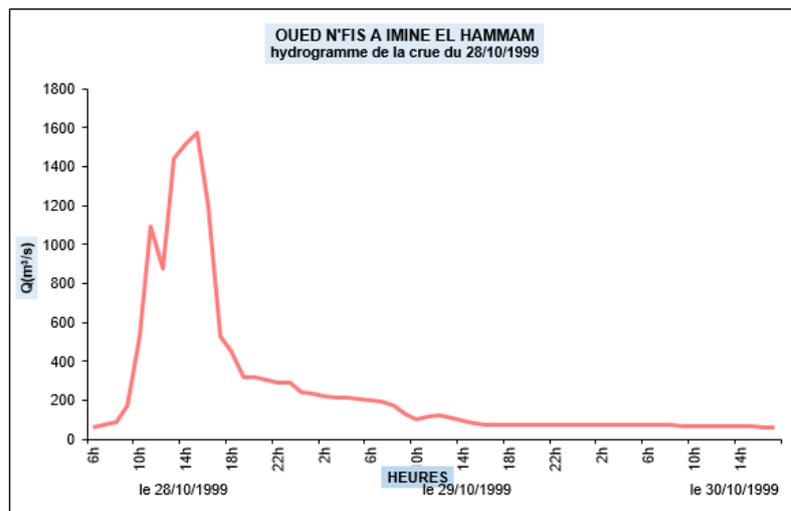


Figure 35 : Hydrogramme de la crue du 28-10-1999 au niveau de la station Imine El Hammam

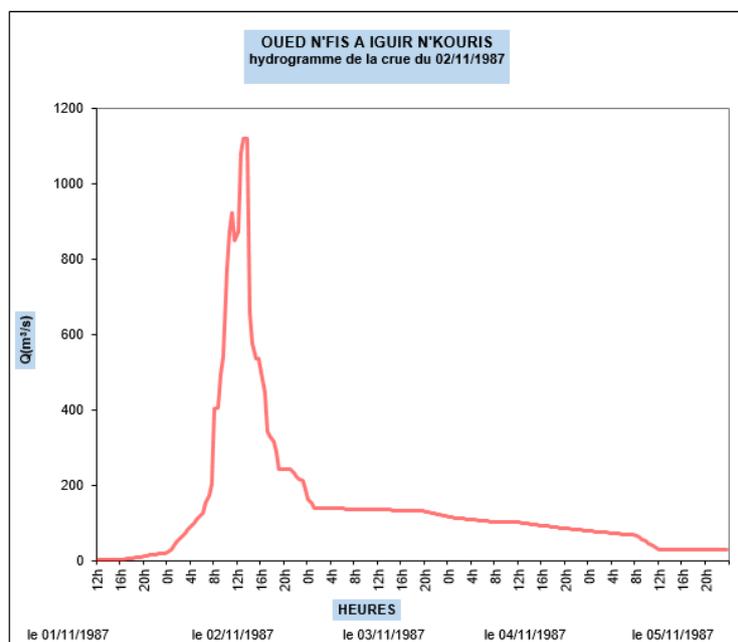


Figure 36 : Hydrogramme de la crue du 02-11-1987 au niveau de la station Iguir N'Kouris

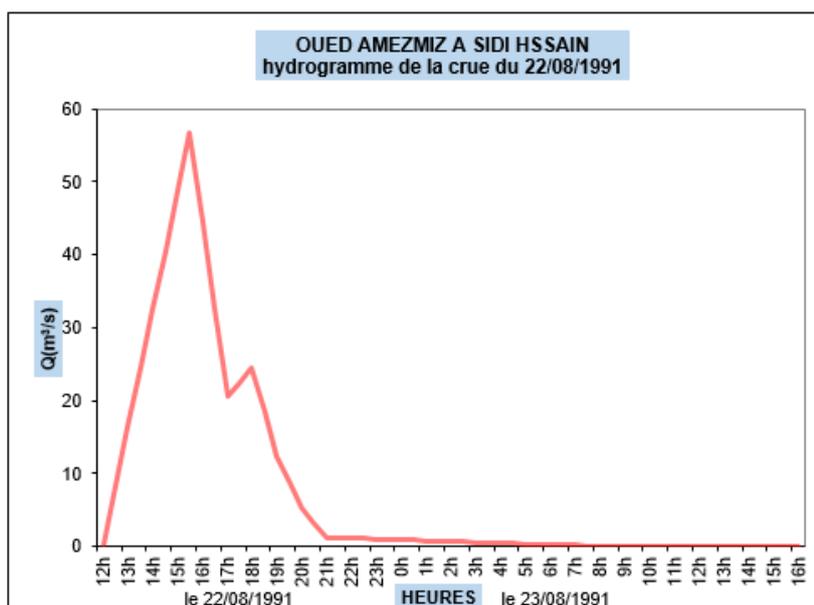


Figure 37 : Hydrogramme de la crue du 22-08-1991 au niveau de la station Sidi Hsain

Les figures ci-dessus présentent différents hydrogrammes de crue 3 stations, les crues de Imine El Hammam et Iguir N’Kours sont de forte intensité avec un débit de pointe entre 1100 m³/s et 1400 m³/s, ces débits peuvent causer des inondations dévastatrices, mais au niveau de la station de Sidi Hsain on remarque que le débit de pointe ne dépasse pas 60 m³/s.

CARACTERISTIQUES DE LA CRUE			
Station	IMINE EL HAMMAM	IGUIR N’KOURIS	SIDI HSSAIN
Date début	28/10/1999 à 6h	01/11/1987 à 16h30	22/08/1991 à 12h
Date fin	30/10/1999 à 17h	05/11/1987 à 12h	22/08/1991 à 21h
Débit de pointe (m ³ /s)	1575	1120	56.75
Débit max. moyen (m ³ /s)	208.2	152.824	23.984
Débit base avant (m ³ /s)	59.7	2.96	0.17
Débit base après (m ³ /s)	59.7	27	1.28
Volume 10 ⁶ m ³	43.5	50.065	0.734
Temps de base (heures)	58	91	8.5
Temps de montée (heures)	9	20.5	3.5
Coefficient de pointe	7.6	7.3	2.4

Tableau 13 : caractéristiques des crues au niveau de trois stations (ABHT)

Le tableau 13 présente les caractéristiques des crues au niveau de la station Sidi hsain, Imin El Hammam et Iguir N’Kouris tels que le débit de pointe, le temps de base et le coefficient de pointe, ces paramètres nous présente l’aspect quantitatif de la crue, la chose qui pourra nous aider à faire des simulations futures en terme de prévention.

3.7. Conclusion

Ce chapitre a été conçu pour présenter l'ensemble des données utilisées dans de cette étude, les différents traitements appliqués aux séries et chroniques de données hydroclimatiques, ainsi que les analyses fréquentielles appliqués aux débits extrêmes, on a aussi présenté les données des modèles climatiques qui vont servir à l'évaluation de l'impact du changement climatiques sur les ressources en eau du bassin versant N'fis au niveau du dernier chapitre de ce mémoire.

Chapitre 4

Chapitre 4 : Modélisation hydrologique

4.1. Introduction

Dans cette partie, nous allons présenter les modèles et la démarche d'optimisation des paramètres des modèles hydrologiques ainsi que les périodes de validation, et les différentes simulations des débits. Avant de procéder à la modélisation on présentera les modèles GR, leur apparition et la structure de ces modèles pluie-débit. De façon générale, on va juger le fonctionnement des modèles sur les trois bassins versants, on effectue des simulations sur différentes périodes, et on procède ensuite à des validations croisées. L'approche que nous allons adopter c'est la simulation à différents pas du temps pour voir la sensibilité des bassins versants et leur réponse envers les 2 modèles hydrologiques à différents pas du temps.

4.2. Présentation des modèles GR

La simulation du débit à l'exutoire d'un bassin versant est nécessaire voire indispensable pour de nombreuses applications d'ingénierie et de gestion de la ressource en eau, telles que le dimensionnement et la gestion d'ouvrages, la prévision des crues ou des étiages, la détection d'impact, etc. C'est pour répondre à ces questions que le Cemagref a commencé à développer au début des années 1980 des modèles hydrologiques (du Génie Rural – GR) permettant de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire (Michel, 1983). Au-delà de leur aspect pratique, ces modèles ont soulevé des questions essentielles sur la façon de représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant.

Bien que ces modèles soient parfois apparentés à des modèles conceptuels du fait de leur structure à réservoirs, ce sont en fait des modèles empiriques : leur construction s'est faite sur la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la structure permettant de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant (c'est-à-dire sa réponse aux pluies). Les idées suivantes se sont progressivement imposées au cours du développement de ces modèles pour permettre d'obtenir des modèles fiables et robustes (Mathevet, 2005) :

- Représentation globale du bassin versant,
- Approche empirique de développement sans recours a priori à la physique des écoulements,
- Augmentation progressive de la complexité de la structure du modèle en partant de structures simples,
- Justification de la complexité de la structure d'un modèle par ses performances,
- Recherche de structures de modèle générales (applicables à des bassins variés),
- Utilisation de larges échantillons de bassins versants pour tester les performances des modèles (voir par exemple (Andréassian *et al.*, 2006),

- Evaluation d'un modèle par comparaison à d'autres structures de modèle.

Comme tout modèle hydrologique, les modèles GR opèrent une triple globalisation (triple considération de moyenne) du système bassin versant: au niveau des processus : les modèles GR proposent des relations comportementales simples à l'échelle du bassin, mises au point empiriquement et sans liens directs avec la physique des processus à petite échelle et pouvant représenter une moyenne de plusieurs processus;

- au niveau de l'espace : les modèles GR sont globaux, c'est-à-dire que, tout en reconnaissant l'extraordinaire hétérogénéité de tout bassin versant, ils considèrent le bassin versant comme un tout. Les tentatives de distribution progressive n'ont, jusqu'à présent, pas abouti à des résultats intéressants. C'est le comportement de la moyenne spatiale qui est étudié en priorité;
- au niveau du temps : les modèles GR ont été développés pour des pas de temps de fonctionnement spécifiques : annuel (GR1A), mensuel (GR2M) et journalier (GR4J). Les différents modèles travaillent donc sur des moyennes temporelles. Notons que le développement d'un modèle au pas de temps horaire est en cours (Mathevet, 2005) et actuellement, le modèle journalier est appliqué au pas de temps horaire. Le modèle GR3H (horaire) utilisé dans certaines applications développées au Cemagref d'Aix-en-Provence (Fourmigué et Lavabre, 2005) correspond au modèle proposé par Edijatno (1991) au pas de temps journalier.

La spécificité du pas de temps, bien que souvent négligée, est importante, une même structure de modèle n'étant pas également performante à tous les pas de temps. Globalement, les structures sont d'autant plus simples que le pas de temps est long.

Les modèles Génie Rural sont programmées sur des feuilles Excel, des packages sous "R" et des scripts sous Matlab.

4.3. Modèle GR1A

4.3.1. Présentation du modèle GR1A

Introduction

Le modèle GR1A (modèle du Génie Rural à 1 paramètre Annuel) est un modèle pluie-débit global à un seul paramètre. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1990, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications d'évaluation et de gestion de la ressource en eau.

La principale version, que nous présentons ici, est celle proposée par Mouelhi (2003) et Mouelhi *et al.* (2006a).

Description mathématique

La structure du modèle est très simple puisqu'elle se résume à une simple équation, le débit Q_k de l'année k étant proportionnelle à la pluie P_k de la même année, avec un coefficient d'écoulement dépendant de P_k , de la pluie P_{k-1} de l'année $k-1$ et de l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne E . Le modèle s'écrit :

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{X.E} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\} \quad \text{Équation 4.1}$$

où X est l'unique paramètre du modèle. Cette formule dérive de la formule de Turc (1955), qui donne l'écoulement moyen interannuel. Une recherche systématique de la meilleure manière de prendre en compte l'état antérieur du système a montré que l'on devait se limiter à prendre en compte la pluie de l'année précédant l'année en cours. Le paramètre X traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique (par exemple échange avec des nappes profondes ou avec des bassins adjacents dans le cas d'une non-superposition des limites topographiques et géologiques) : si X est supérieur à 1, le système perd de l'eau et si X est plus petit que 1, le système en gagne, le tout exprimé en fraction de l'ETP.

✚ Paramètre

Le modèle ne comporte qu'un paramètre optimisable, le paramètre X adimensionnel, qui apparaît comme un coefficient modulateur de l'évapotranspiration potentielle. Sur un large échantillon de bassins versants, la médiane de X vaut 0.7 et un intervalle de confiance à 90% est donné par [0.13; 3.5].

4.3.2. Critère mathématique d'optimisation du modèle GR1A (critère de Nash-Sutcliffe)

Le choix final de modèle repose tout d'abord sur la performance. La cohérence n'intervient que si les performances des modèles en concurrence pour chaque pas de temps demeurent très proches. Le critère d'optimisation utilisé dans le cadre de notre étude est le critère de Nash-Sutcliffe (Eq. (4.2)) (Perrin *et al.*, 2003). Ce critère adimensionnel permet de juger la qualité de l'ajustement et facilite la comparaison des ajustements sur différents bassins dont les écoulements correspondent à des ordres de grandeur différents. Il est défini par l'équation 4.2 :

$$\text{Nash-Sutcliffe} = 100 \left[1 - \frac{\sum (Q_o^i - Q_c^i)^2}{\sum (Q_o^i - Q_m)^2} \right] \quad \text{Équation 4.2}$$

Ou : Q_o : débits annuels observés ; Q_c : débits annuels calculés ; Q_m : débit moyen observé sur l'ensemble de la période d'observation sans lacune.

La valeur du critère de Nash-Sutcliffe est comprise entre $-\infty$ et 100%. Le modèle est considéré comme performant quand les débits estimés se rapprochent des débits observés, c'est-à-dire quand la valeur du critère de Nash-Sutcliffe est proche de 100%. Ainsi, une performance supérieure ou égale à 60% peut être jugée satisfaisante (Perrin, 2000). Les performances en termes de critère Nash-Sutcliffe sont l'image de l'adéquation du modèle et du jeu de paramètres calés au bassin versant étudié.

4.3.3 Calage et validation du modèle GR1A

Pour bien appliquer le modèle GR1A aux trois bassins étudiés, il existe plusieurs tests de calage, pour bien simuler les débits de ces bassins on utilisera le jeu double échantillonnage vu les surfaces des bassins qui ne sont pas assez grandes ainsi que les périodes courtes des séries de données.

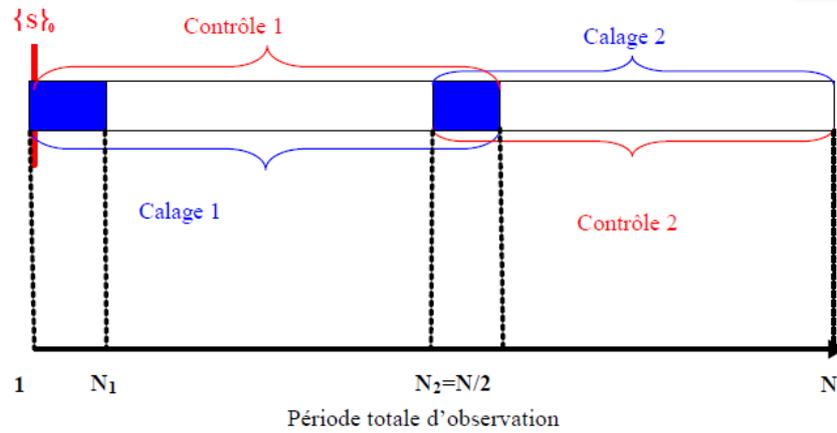


Figure 38 : Méthode de calage et contrôle double échantillon

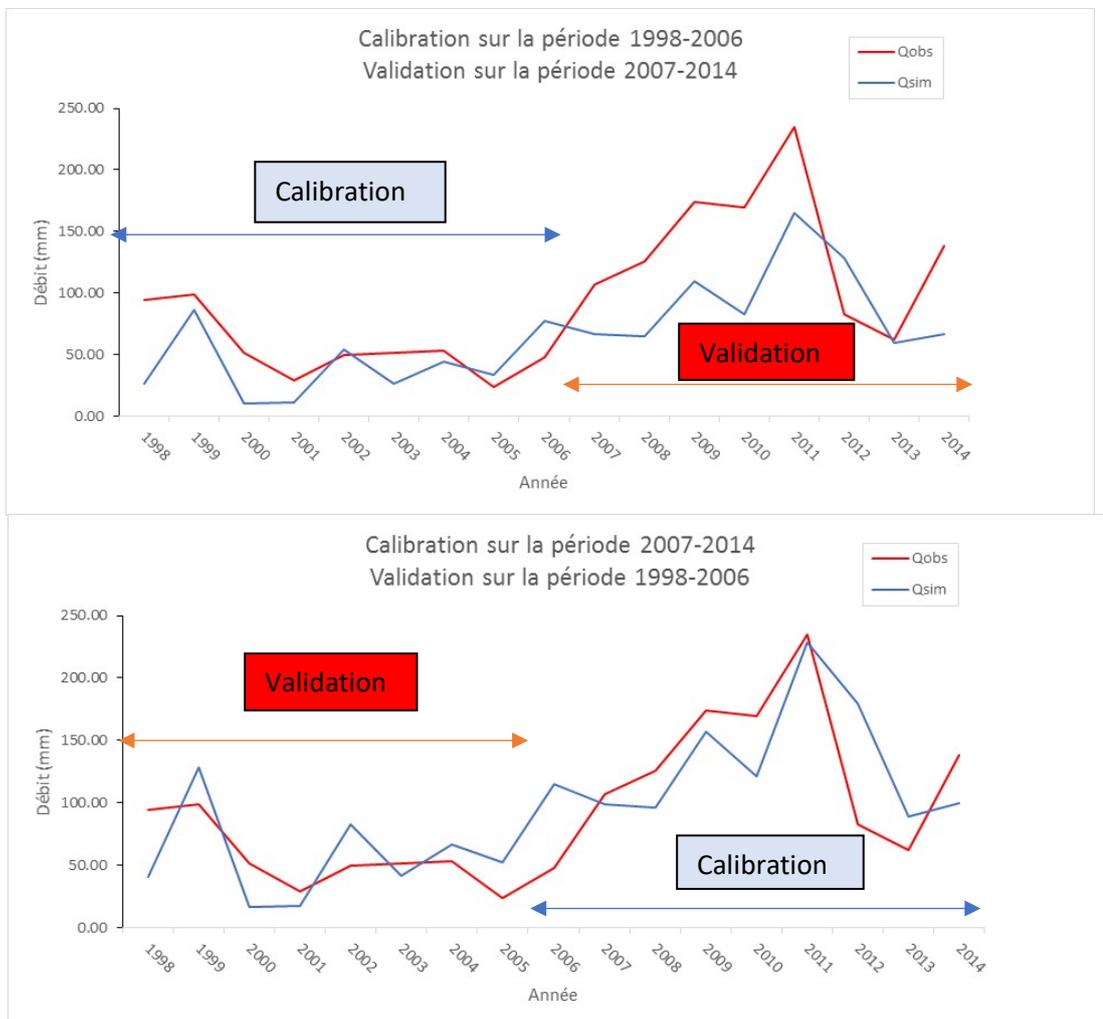


Figure 39 : Calibration et validation du modèle GR1A – Bassin Amizmiz

On dispose d'une série de données de 1998 à 2014 a un pas de temps annuel au niveau du sous bassin versant Amizmiz, on a appliqué le modèle GR1A selon la méthode du calibrage double échantillonnage, on remarque qu'au cours des périodes de calibration que les débits simulés sont proches des débits observés mais au cours des périodes de validation on constate que les débits observés sont surestimés ou sous-estimés.

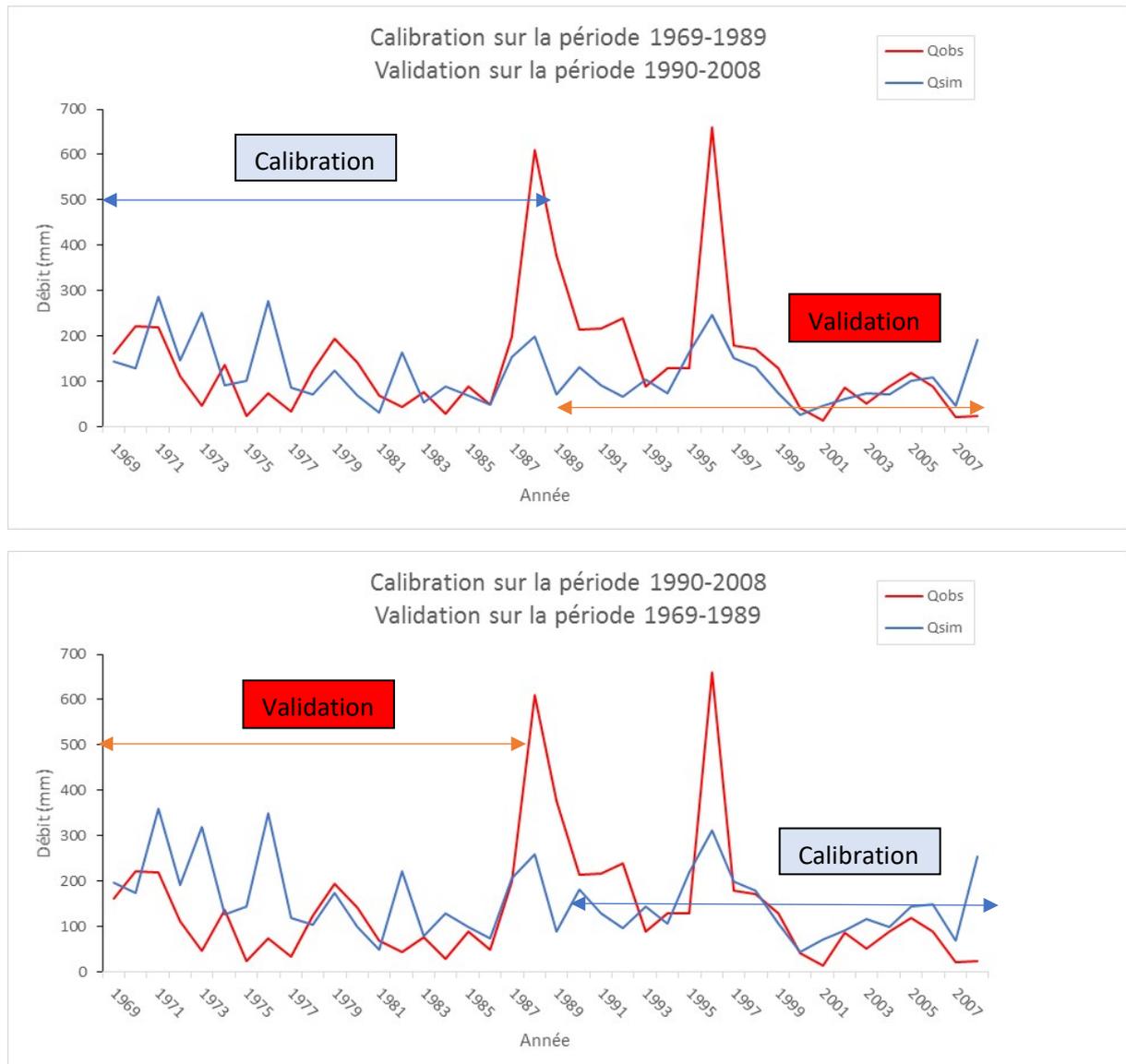


Figure 40 : Calibration et validation du modèle GR1A – Bassin Imin El Hammam

Au niveau du bassin versant Imin El Hammam, on a une série de données assez longue que les données du bassin d'Amizmiz, cette série est de 1969 à 2008, on a calibré sur la moitié de cette série puis on a validé sur l'autre moitié et inversement, la calibration présente des débits similaires aux débits observés alors que la validation n'est pas assez performante.

La procédure de calage a consisté à déterminer les paramètres optimisés à partir des différents critères de qualité en appliquant le calage inversé pour GR1A, La validation du modèle vise à vérifier si le modèle calé simule correctement des séries de données de référence, non utilisées lors du calage. La qualité du modèle se mesure autant à la valeur du critère d'ajustement, l'objectif est de chercher à améliorer les valeurs des critères d'ajustement, traduisant les performances des simulations.

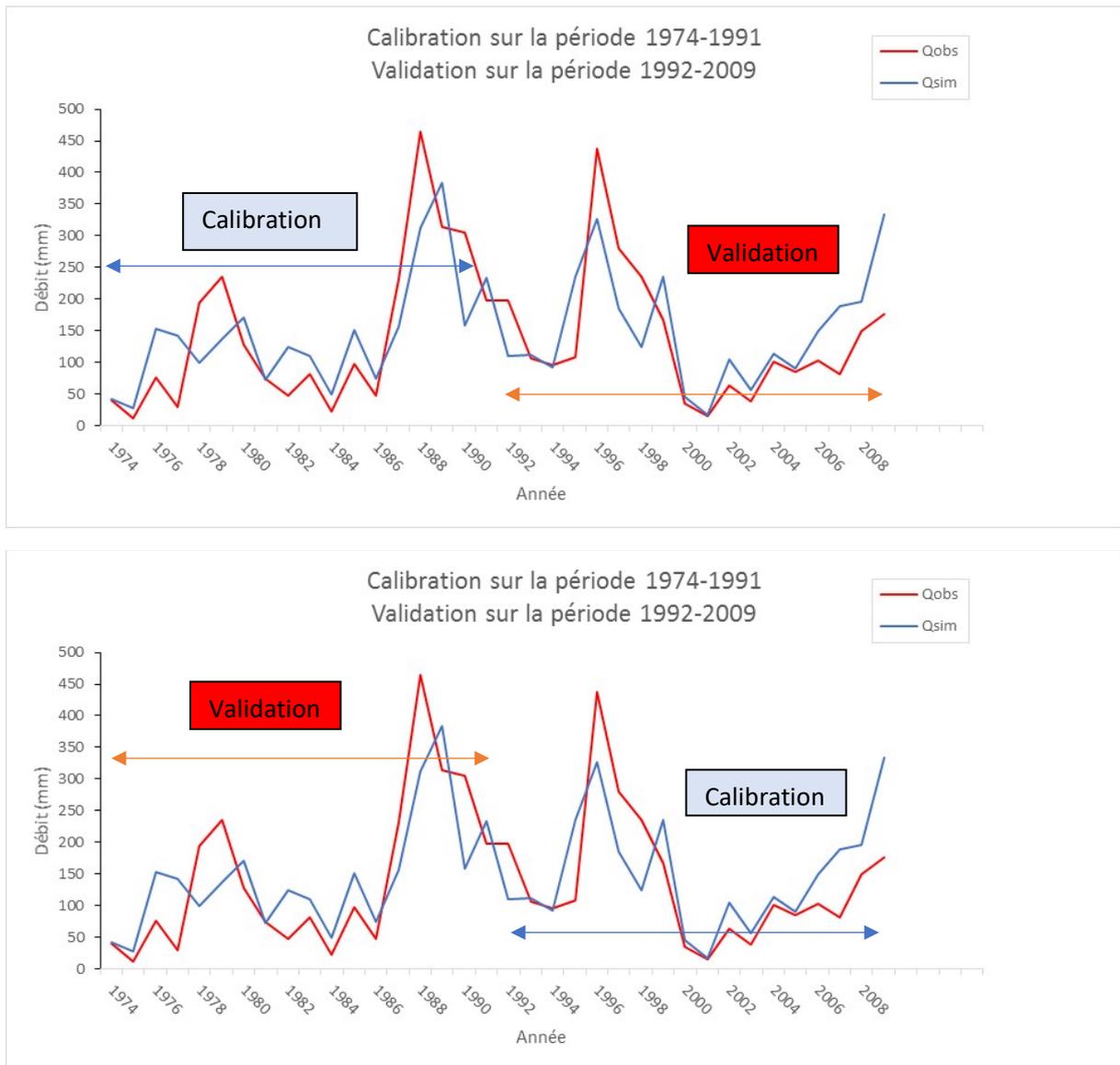


Figure 41 : Calibration et validation du modèle GR1A – Bassin Iguir N’Kouris

La modélisation du bassin versant Iguir N’Kouris sur la période de 1974-2009, présente des débits simulés proches des débits observés, au cours des deux périodes de calibration et validation ce qui reflète la performance et la robustesse du modèle GR1A et son application pour simuler les débits du bassin versant Iguir N’Kouris.

4.3.4. Résultats et discussion :

Ce paragraphe présentera les différents résultats du NSE critère d’ajustement pour les différents périodes de calage et validation au niveau des trois bassins versants.

	Calibration sur la période 1998-2005	Validation sur la période 2006-2014
NSE (%)	-11.33	-33.5
	Validation sur la période 1998-2005	Calibration sur la période 2006-2014
NSE (%)	-148.9	29.9

Tableau 14 : Critère de NSE – Bassin versant Amizmiz

	Calibration sur la période 1969-1989	Validation sur la période 1990-2009
NSE (%)	-7.6	27.4
	Validation sur la période 1969-1989	Calibration sur la période 1990-2009
NSE (%)	-18	37

Tableau 15 : Critère de NSE – Bassin versant Imine El Hammam

	Calibration sur la période 1974-1991	Validation sur la période 1992-2009
NSE (%)	58.5	54.6
	Validation sur la période 1974-1991	Calibration sur la période 1992-2009
NSE (%)	57.9	55.4

Tableau 16 : Critère de NSE – Bassin versant Iguir N’Kouris

Pour faciliter la comparaison, nous avons présenté l’évolution des paramètres et des critères de qualité en fonction des longueurs des phases de calages et validation.

Pour le GR1A, le calage est acceptable avec des critères de qualité moyens pour la bassin Iguir N’Kouris qui est de 55.4 à 58.5% pour les phases de calage alors qu’il est proche de 60% pour les phases de validation.

Pour le bassin Imine El Hamma le critère NSE qui est de 37% en période de calage sur les années 1990-2009, alors que sur la première moitié le NSE présente des valeurs très faibles.

Au niveau du bassin Amizmiz , le GR1A n’a pas pu reproduire le comportement des débits vu les mauvais résultats du critère d’ajustement, on peut dire que c’est du à la qualité des données, la surface dés bassin , et les débits faibles peut être influencés par des prélèvements latérales ou bien des pompes pour l’irrigation.

4.4. Modèle GR2M

4.4.1. Présentation du modèle GR2M

La particularité du modèle GR2M, développé par le CEMAGREF, réside dans sa simplicité : ce modèle conceptuel global fonctionne au pas de temps mensuel et ne comporte que 2 paramètres à caler (d’où l’appellation GR2M - GR pour Génie Rural, 2 pour nombre de paramètres à caler et M pour fonctionnement au pas de temps Mensuel).

Dans ce travail nous avons utilisé la nouvelle version du modèle GR2M (Mouelhi et al., 2006). 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 donc on aura :

$$S' = S - E1$$

La vidange du réservoir de production se fait par la percolation donc :

$$S'' = S' - P2$$

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

$$R' = P2 + P1$$

Les paramètres du modèle GR2M sont optimisables:

X_1 : Capacité de production (mm) comprise entre [140 – 2640] X_2 : Coefficient d'échange souterrain (adimensionnel) [0.21 – 1.31] (Charles Perrin, Claude Michel, VazkenAndréassian, 2007).

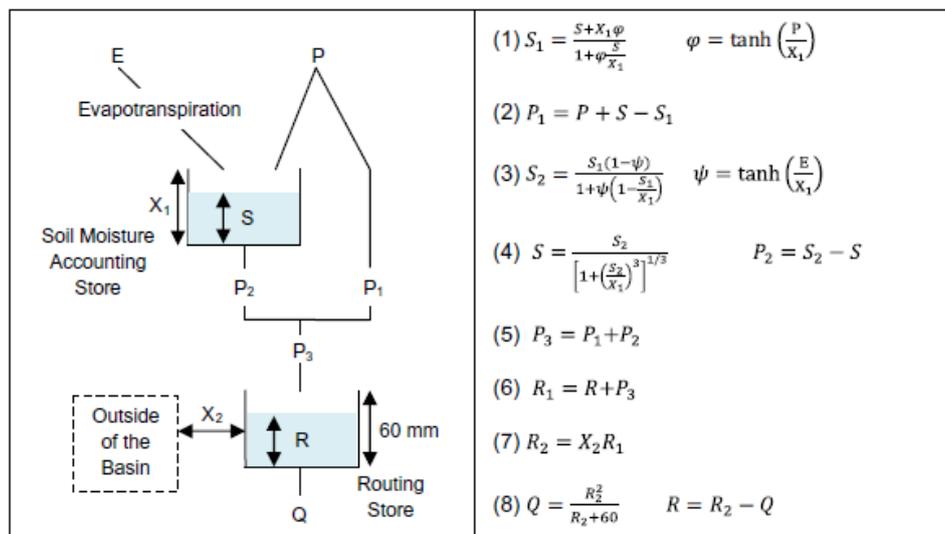


Figure 42 : Schéma de la structure du modèle GR2M

4.4.2. Optimisation des paramètres

Pour l'optimisation des paramètres du modèle, on utilise la méthode du Simplex (Nelder et Mead, 1965) sous Matlab, qui teste différentes solutions potentielles dans l'espace des paramètres. La méthode du simplexe repose sur la formation d'une forme géométrique à p+1 dimensions (appelée simplexe ; avec p le nombre de paramètres) dans l'espace des paramètres. On applique ensuite au simplexe plusieurs transformations géométriques dont la plupart consistent en une symétrie du point où la fonction coût est la plus élevée à travers la face opposée à ce point. Cette méthode présente l'avantage de ne faire appel qu'à des évaluations ponctuelles de la fonction à optimiser et non à ses dérivées.

L'optimisation (ou calage) des paramètres du modèle nécessite la définition d'une fonction quantifiant l'erreur du modèle, c'est-à-dire la distance entre les débits observés et ceux simulés. Le critère quantitatif utilisé pour mesurer la qualité des ajustements réalisés par le modèle est celui proposé par (Gupta *et al.*, 2009), appelé KGE dans l'usage courant en hydrologie, et défini de la manière suivante :

$$KGE = 1 - \sqrt{(\rho kge - 1)^2 + (\alpha kge - 1)^2 + (\beta kge - 1)^2} \quad \text{Équation 4.3}$$

Ce critère présente de nombreux avantages (Coron, 2013) :

- ✓ Le KGE a été construit sur une décomposition du critère NSE de Nash et Sutcliffe (1970), avec pour objectif de corriger certains défauts à travers un rééquilibrage des différentes composantes (notamment pour prendre en compte explicitement le biais)
- ✓ Le KGE est adimensionnel et sa formulation n'est pas liée à un modèle de référence comme c'est le cas pour le NSE qui compare les erreurs du modèle testé à celles d'un modèle naïf de variance nulle (c.-à-d. le modèle "moyenne").
- ✓ L'expression du KGE est centrée autour de trois variables adimensionnelles qui sont calculées sur toute la période de calage et traduisent divers aspects des performances d'un modèle : le critère de corrélation entre les débits simulés et observés (ρkge) ; le rapport des variances des débits simulés et observés (αkge) ; le biais moyen sur les débits modélisés (βkge).

4.4.3. Calibration et validation du modèle GR2M-neige

La performance du modèle GR2M-neige a été évaluée selon différentes approches de calibration/validation pour estimer l'incertitude sur ses paramètres. Les deux premières méthodes sont basées sur le principe de *split-sample test* (SST) et du *differential split-sample test* (DSST) (Klemes, 1986). Le SST est la méthode la plus couramment utilisée en hydrologie et consiste à diviser les données en deux échantillons, l'un de calibration et l'autre de validation. Le DSST consiste à séparer la période disponible en 2 sous-périodes indépendantes et présentant des caractéristiques climatiques différentes d'une période à l'autre, de caler le modèle sur la 1ère période et de le valider sur la 2ème, puis inversement. Enfin, une troisième méthode a été utilisée, celle de l'échantillonnage stratifié. Cette méthode consiste à scinder les séries chronologiques en années paires (Running1) et années impaires (Running2), ce qui permet de prendre en compte dans l'échantillonnage la possible existence d'une tendance dans les données (précipitations, température ou débits). Ces différents schémas de calage/validation suivants (Figure 43) ont été testés sur les bassin versant de N'fis.

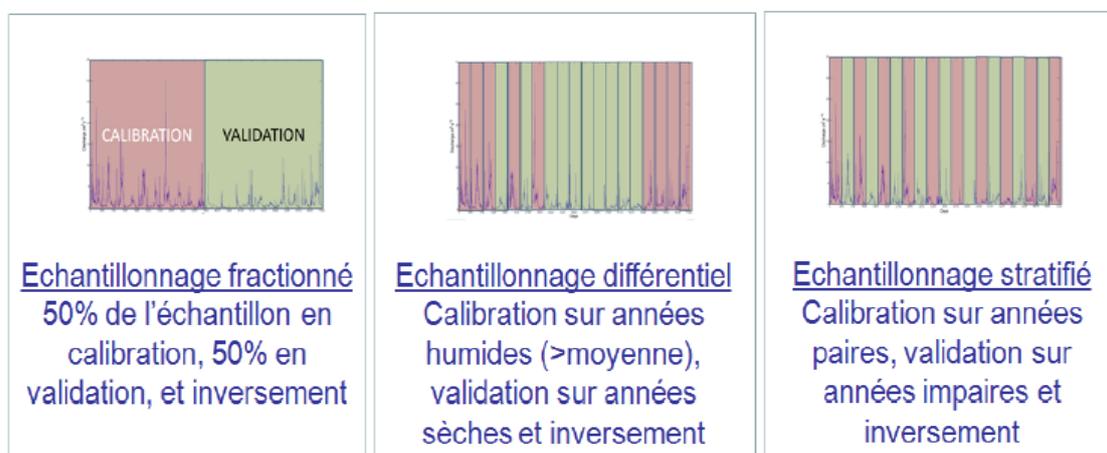


Figure 43 : Schéma représentatif des échantillonnages utilisés pour la calibration et validation du modèle GR2M-neige (Marchane, 2015)

On procède à une calibration en divisant la série de données en 2 périodes, on va calibrer sur la première période après on va inverser les périodes. Pour voir les performances des modèles sur les 2 phases. Ce test est le plus simple parmi les méthodes de calibration.

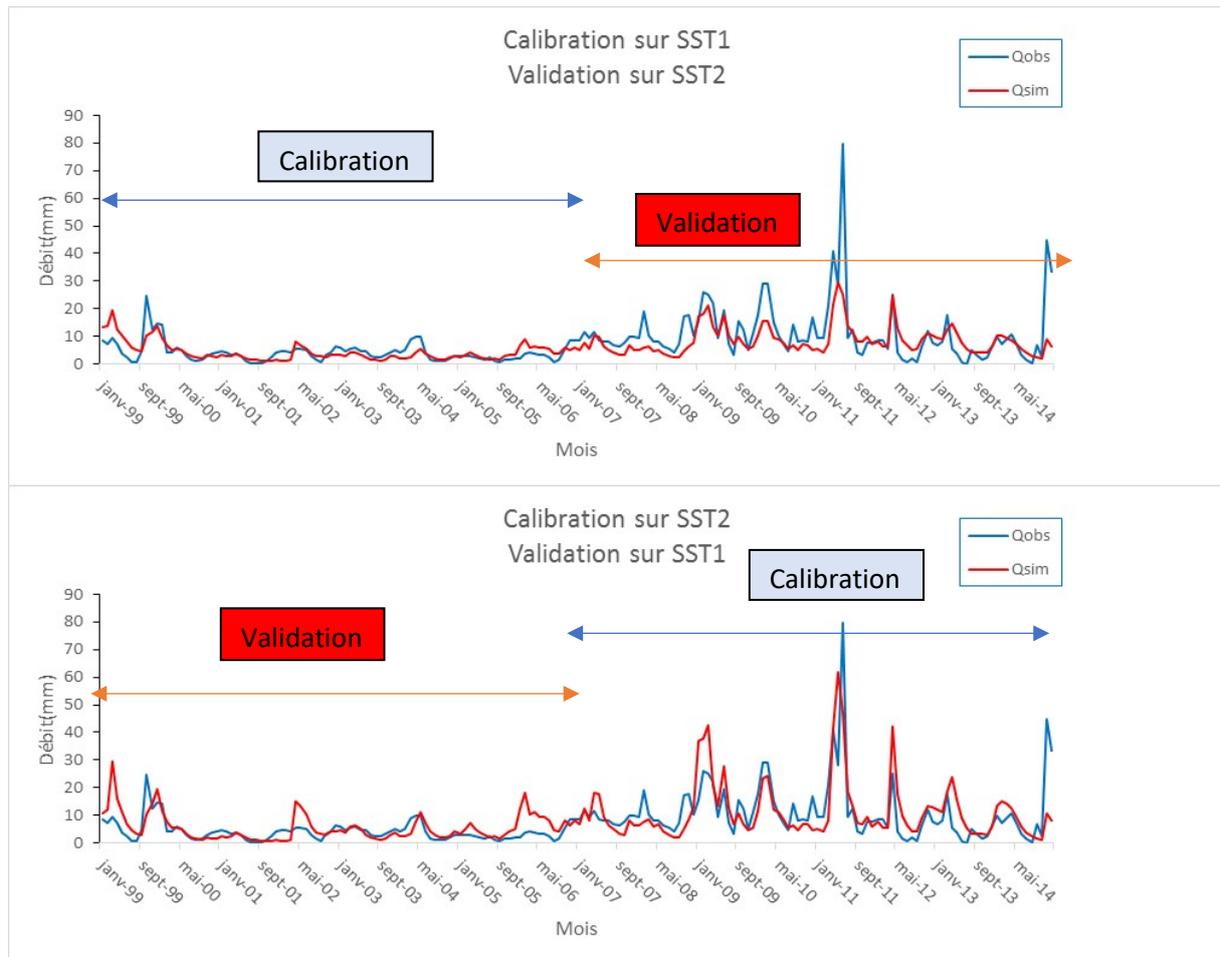


Figure 44 : Calibration et validation du modèle GR2M neige – bassin Amizmiz

La modélisation du bassin versant Amizmiz (Figure 44) présente des débits simulés qui sont similaires aux débits observés en phases de calibration sur toute la chronique, mais la qualité de simulation se dégrade en passant à la phase de validation.

Pour le bassin versant d'Imine El Hammam on trouve à peu près les mêmes résultats, les débits mensuels de 38 ans peuvent simuler bien le comportement de ce bassin, la surface de 1484 km², et on sait que ces modèles sont plus robustes sur des longues séries de données, on constate de la figure 44 que GR2M neige a pu reproduire des débits qui sont comparables aux débits observés en phase de validation et même en période de calage.

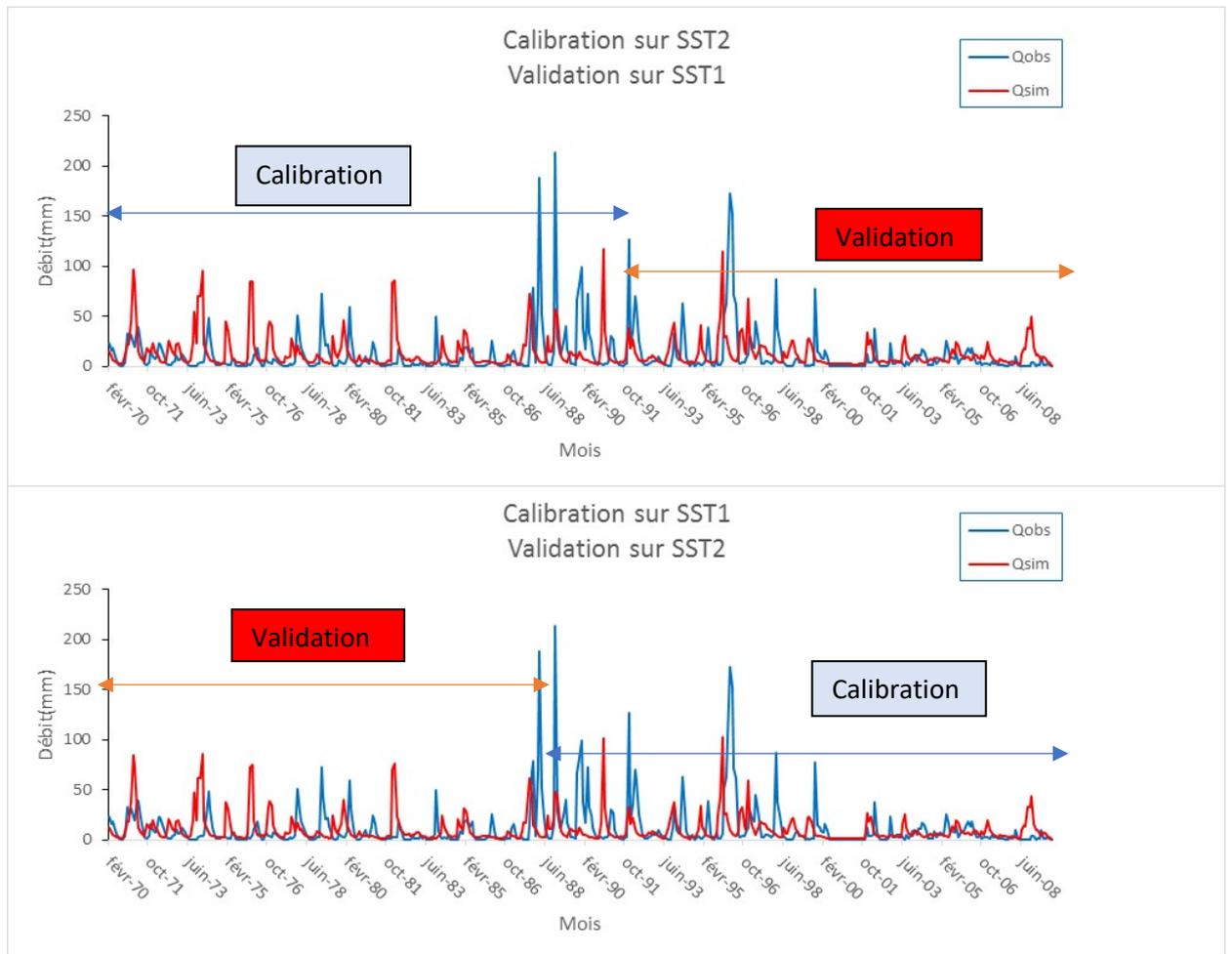


Figure 45 : Calibration et validation du modèle GR2M neige – bassin imine El Hammam

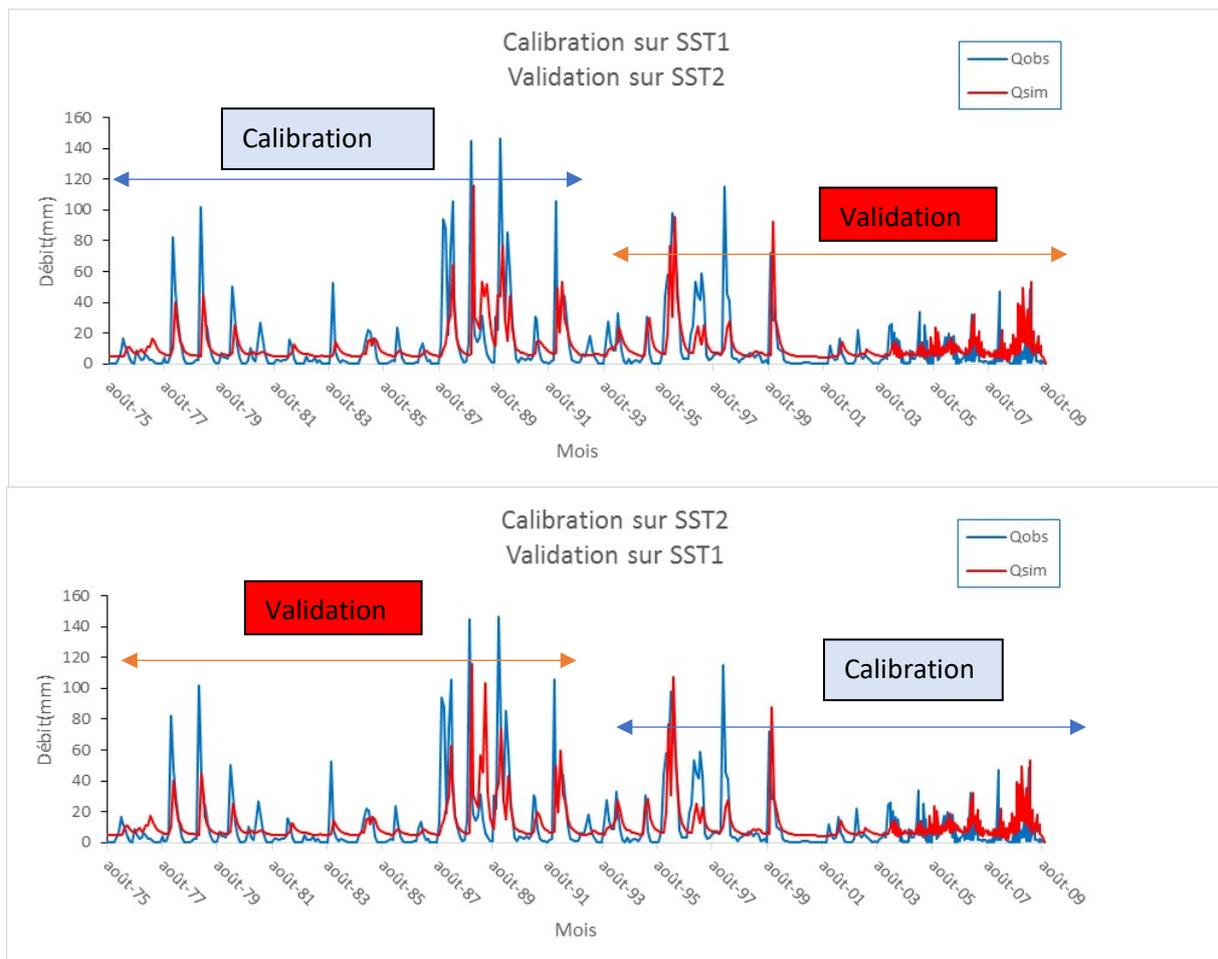


Figure 46 : Calibration et validation du modèle GR2M neige – bassin Iguir N’Kouris

La figure 46 présente la variation des débits mensuels simulés obtenu avec le modèle calibré et les débits observés sur la période 1969-2009 pour le sous bassin versant d’Iguir N’kouris, la lecture de ce graphique révèle que la simulation est peu satisfaisante.

Les débits mensuels simulés obtenus avec le modèle calibré sur chaque période. En général l’analyse des simulations hydrologiques montre que le modèle GR2M-neige conduit à une bonne reproduction de la forme des hydrogrammes mensuels observés, tant en période de calage qu’en période de validation. Les débits mensuels importants sont bien reproduits dans le temps même s’ils sont souvent sous-estimés.

Les graphes que nous allons représenter par la suite présentent les différentes méthodes de calibration appliquée aux trois bassin versants par le modèle GR2M neige.

Noms des méthodes de calibration :

Split Simple Test (SST) qui consiste à diviser les données en deux échantillons, l’un de calibration et l’autre de validation. Et inversement

Differential Split Simple Test (DSST) qui consiste séparer la période disponible en 2 sous-périodes indépendantes et présentant des caractéristiques climatiques différentes d’une période à l’autre, de caler le modèle sur la 1ère

Running Split Simple Test (RSST) qui consiste scinder les séries chronologiques en années paires (Running 1) et années impaires (Running 2)

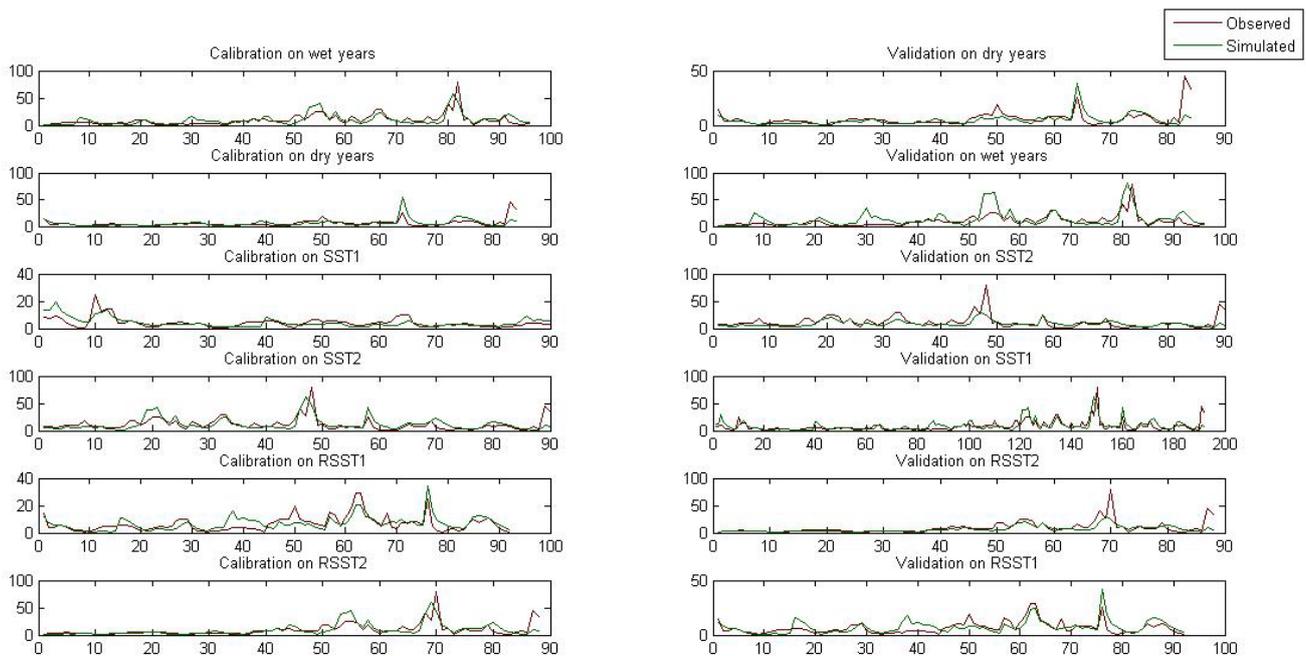


Figure 47 : Variation des débits mensuels simulés obtenu avec le modèle calibré et les débits observés sur chaque période et la validation sur les différentes périodes cas du sous bassin Amizim

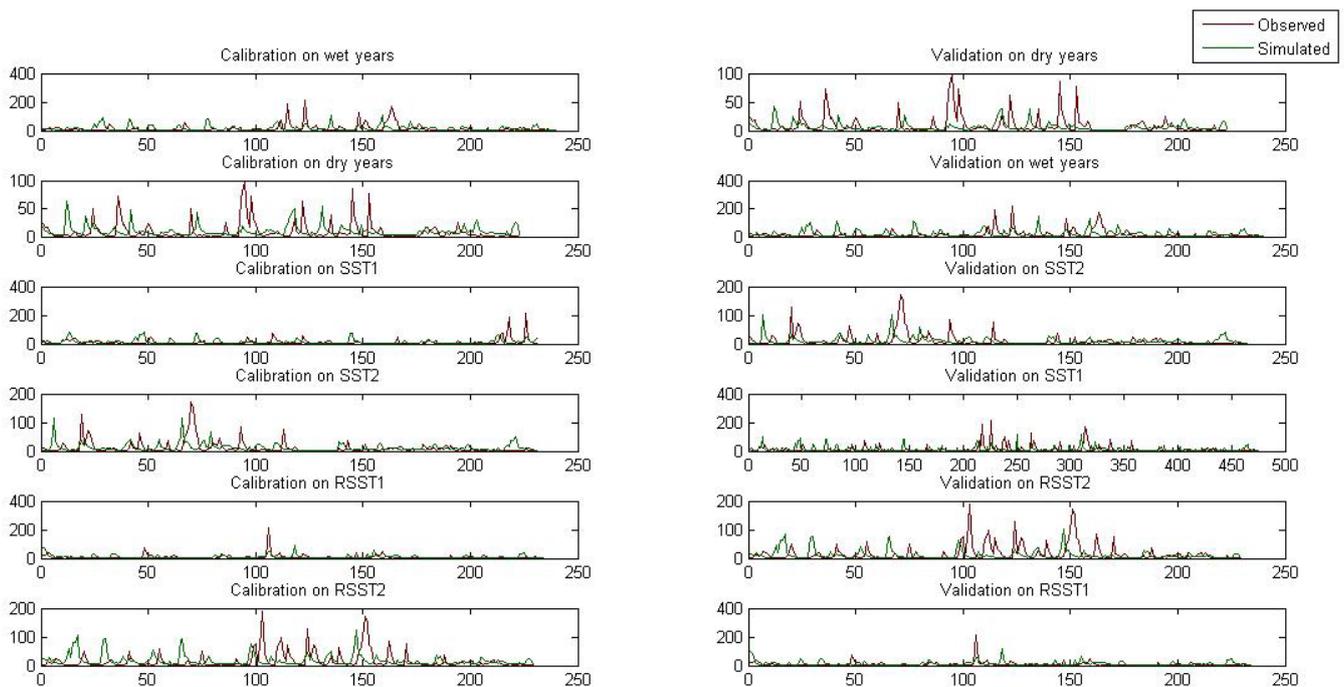


Figure 48 : Variation des débits mensuels simulés obtenu avec le modèle calibré et les débits observés sur chaque période et la validation sur les différentes périodes cas du sous bassin Imine El Hammam

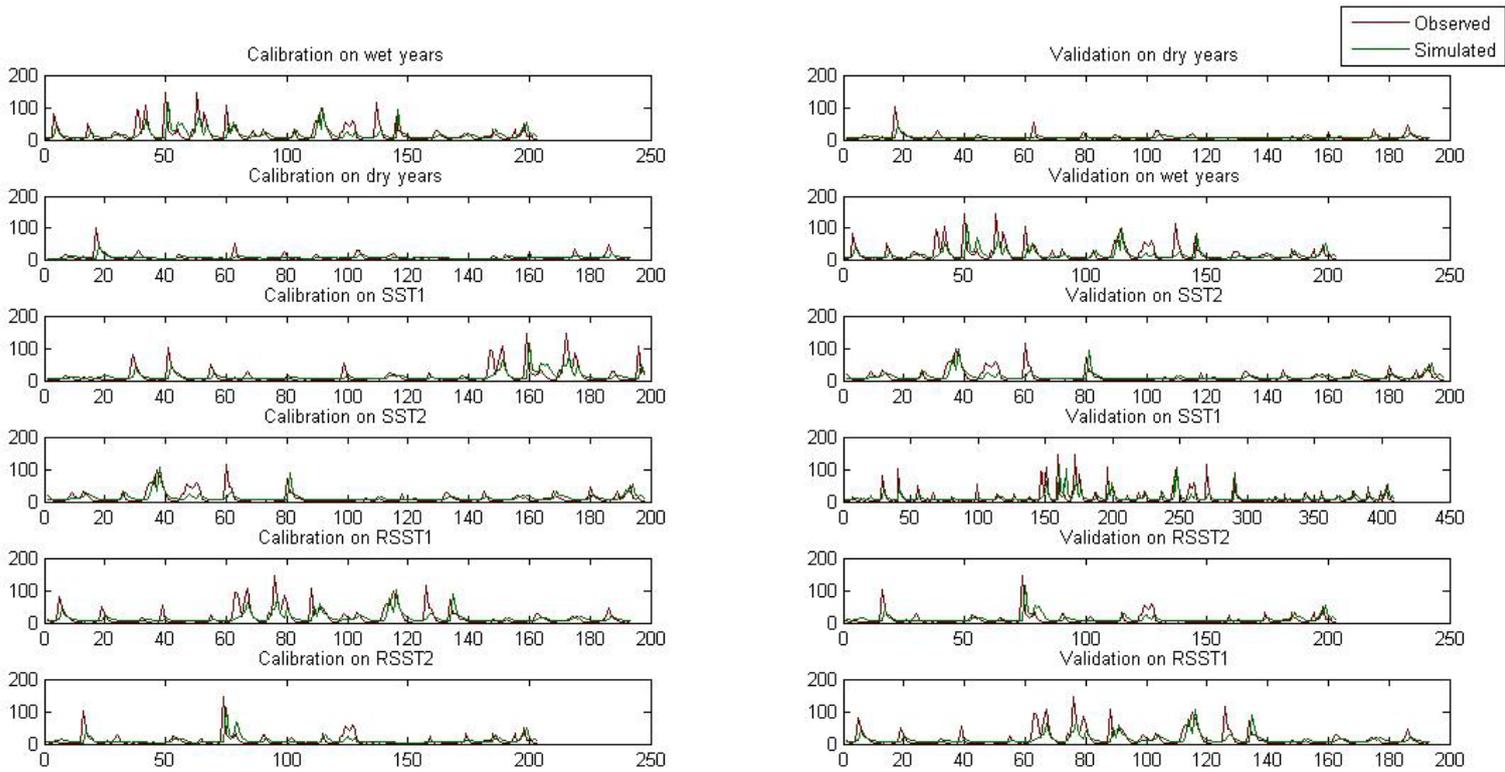


Figure 49 : Variation des débits mensuels simulés obtenu avec le modèle calibré et les débits observés sur chaque période et la validation sur les différentes périodes cas du sous bassin Iguir N’Kouris

4.4.5. Résultats et discussion

Le paragraphe ci-dessous présente les différents résultats de la modélisation des sous bassins (Amizmiz, Imine El Hammam et Iguir N’Kouris)

	X1	X2	X3	X4	X5	NSE	RMSE	BIAS	KGE
calibration sur années humides	913.499	0.856	0.001	-4.998	0.704	48.62	7.44	0.000	0.72
validation sur années sèches	913.499	0.856	0.001	-4.998	0.704	21.48	5.85	0.000	0.43
calibration sur années sèches	558.791	0.941	2.960	-0.715	0.536	4.66	6.45	0.000	0.52
validation sur années humides	558.791	0.941	2.960	-0.715	0.536	34.93	12.06	0.002	0.29
calibration sur SST1	2566.385	0.743	2.724	-4.429	0.500	32.93	9.24	0.000	0.65
validation sur sst2	2566.385	0.743	2.724	-4.429	0.500	53.44	4.44	0.001	0.33
calibration sur SST2	899.132	0.892	1.262	-0.754	0.752	26.21	3.08	0.000	0.60
validation sur sst1	899.132	0.892	1.262	-0.754	0.752	32.40	9.27	-0.001	0.31
calibration sur RSST1	1358.344	0.833	2.997	-1.516	0.540	27.16	4.80	0.000	0.64
validation sur rsst2	1358.344	0.833	2.997	-1.516	0.540	27.16	4.80	0.000	0.64
calibration sur rSST2	926.779	0.878	2.882	-4.996	0.539	43.06	4.24	0.000	0.66
validation sur rsst1	926.779	0.878	2.882	-4.996	0.539	41.32	8.72	-0.001	0.35

Tableau 17 : Paramètres du modèle GR2M-neige sur les périodes de calibration et les valeurs de KGE, NSE, BIAS et RMSE obtenus pour le sous bassin Amizmiz

	X1	X2	X3	X4	X5	NSE	RMSE	BIAS	KGE
calibration sur années humides	190.660	1.089	3.000	0.009	0.793	38.17	33.09	0.0008	-0.0442
validation sur années sèches	190.660	1.089	3.000	0.009	0.793	16.99	17.36	-0.0013	-0.1720
calibration sur années sèches	140.001	1.201	2.998	-0.194	0.615	33.55	18.55	0.0004	-0.0871
validation sur années humides	140.001	1.201	2.998	-0.194	0.615	72.90	37.02	0.0035	-0.1375
calibration sur SST1	214.319	1.077	2.992	0.010	0.731	33.73	25.89	0.0005	-0.0196
validation sur sst2	214.319	1.077	2.992	0.010	0.731	50.09	27.47	0.0018	0.0305
calibration sur SST2	202.483	1.155	3.000	0.010	0.900	34.55	26.06	0.0006	0.0657
validation sur sst1	202.483	1.155	3.000	0.010	0.900	25.13	25.01	-0.0007	-0.0508
calibration sur RSST1	201.854	1.005	0.000	-5.000	0.500	50.37	20.40	0.0025	-0.0475
validation sur rsst2	201.854	1.005	0.000	-5.000	0.500	50.37	20.40	0.0025	-0.0475
calibration sur rSST2	228.922	1.255	3.000	0.010	0.615	20.28	18.24	0.0004	0.1584
validation sur rsst1	228.922	1.255	3.000	0.010	0.615	34.52	32.46	-0.0021	-0.1389

Tableau 18 : Paramètres du modèle GR2M-neige sur les périodes de calibration et les valeurs de KGE, NSE, BIAS et RMSE obtenus pour le sous bassin Imine El Hammam

	X1	X2	X3	X4	X5	NSE	RMSE	BIAS	KGE
calibration sur années humides	140.000	1.310	3.000	0.010	0.500	10.23	25.00	-0.001	0.285
validation sur années sèches	140.000	1.310	3.000	0.010	0.500	10.96	10.19	0.001	0.067
calibration sur années sèches	140.000	1.275	3.000	-4.599	0.900	13.69	10.04	0.000	0.098
validation sur années humides	140.000	1.275	3.000	-4.599	0.900	8.38	25.26	-0.002	0.238
calibration sur SST1	140.000	1.310	3.000	0.010	0.500	22.81	15.40	0.000	0.436
validation sur sst2	140.000	1.310	3.000	0.010	0.500	8.03	23.38	0.000	0.247
calibration sur SST2	140.000	1.310	2.809	0.010	0.900	15.06	22.47	0.000	0.263
validation sur sst1	140.000	1.310	2.809	0.010	0.900	22.47	15.43	0.000	0.415
calibration sur RSST1	140.000	1.310	2.976	0.010	0.683	27.76	21.54	-0.001	0.353
validation sur rsst2	140.000	1.310	2.976	0.010	0.683	27.76	21.54	-0.001	0.353
calibration sur rSST2	140.000	1.271	3.000	-3.541	0.900	28.16	21.48	-0.001	0.350
validation sur rsst1	140.000	1.271	3.000	-3.541	0.900	13.16	16.95	0.001	0.187

Tableau 19 : Paramètres du modèle GR2M-neige sur les périodes de calibration et les valeurs de KGE, NSE, BIAS et RMSE obtenus pour le sous bassin Iguir N'Kouris

La calibration des paramètres du modèle GR2M-neige au niveau des sous bassins d'Amizmiz donne de bonnes valeurs de KGE (Tableau 19). En validation, les valeurs du KGE sont médiocres (varient entre 0.21 en validant sur la période 1 et 0.65 en validant sur les années humides).

La performance du modèle GR2M-neige est globalement peu satisfaisante, en se référant au critère KGE. Généralement les résultats obtenus sont stables pour la calibration et la validation quelle que soit la période choisie, sauf Imine El Hammam où les résultats sont moins bons vu que la composante nivale est moins importante sur ces sous bassins.

Paramètres du modèle GR2M neige :

- **X1 : Capacité de production (mm)**
- **X2 : Paramètres d'échange (mm)**
- **X3 : Température de pluie (°C)**

- **X4 : Température de neige (°C)**
- **X5 : Max de fonte (mm)**

4.5. Conclusion

Notre approche de modélisation hydrologique repose sur l'utilisation de deux modèles conceptuels de la même famille à pas de temps différent (annuel et mensuel), ces modèles hydrologiques nécessitent peu de données d'entrée mais une calibration de ses paramètres est nécessaire.

On a utilisé quatre critères (NSE, KGE, BIAS et RMSE) pour évaluer les performances du modèle GR2M neige en application sur trois bassins versants (Amizmiz, Imine El Hammam et Iguir N'Kouris), les résultats de cette modélisation révèlent que les valeurs de ces critères sont médiocres pour les bassins Imine El Hammam et Sidi Hsain alors qu'ils sont bons pour le bassin versant Iguir N'kouris .

Chapitre 5

Chapitre 5 : Modélisation hydraulique

5.1. Introduction

L'inondation est le premier risque naturel en termes de nombre personnes concernées dans le monde (www.prim.net). Afin de lutter contre ce risque, un nombre important d'études est mené chaque année dans le cadre de la détermination de l'inondabilité d'un territoire au préalable à son aménagement éventuel ou de la quantification de l'impact d'un projet. (Finaud-Guyot, 2009) L'ingénierie moderne fait généralement appel à des codes de calcul permettant la modélisation des écoulements afin de simuler le comportement hydraulique d'un cours d'eau, notamment en période de crue.

Dans cette étude on va s'intéresser à la modélisation des écoulements de l'Oued Amizmiz au niveau de la ville Amizmiz, on utilisera comme code de calcul HEC-RAS, ce code de calcul simulera le comportement des écoulements afin de pouvoir cartographier les surfaces inondables.

5.2. Présentation de HEC-RAS et HEC-GeoRas

Le code de calcul HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) est un logiciel d'hydraulique fluvial en une dimension développé au Hydrologic Engineering Center du US Army Corps of Engineers. Ce logiciel permet d'effectuer des calculs d'écoulement à surface libre filaire permanent, transitoire ou critique. Ce modèle hydraulique nécessite la résolution des lois physiques des écoulements, la connaissance de la géométrie du cours d'eau et de ses caractéristiques de rugosité et du débit d'écoulement.

HEC-GeoRAS est un ensemble de procédures, d'outils et d'utilitaires pour le traitement des données géo spatiales dans Arc GIS à l'aide d'une interface utilisateur graphique. L'interface permet la préparation de données géométriques pour l'importation dans HEC-RAS et traite les résultats de simulation exportés à partir de HEC-RAS. Pour créer le fichier d'importation, l'utilisateur doit disposer d'un modèle de terrain numérique (MNT) actuel du système fluvial dans le format Arc Info TIN (Les réseaux triangulés irréguliers). L'utilisateur crée une série de thèmes de ligne pertinents pour le développement de données géométriques pour HEC-RAS. Les thèmes créés sont le centre de flux, les lignes de flux, les chaînes de canaux principaux et les sections.

L'objectif de ce chapitre et de cartographier les zones inondables du bassin d' Amizmiz en se basant sur les simulations résultantes de HEC-RAS, HEC-RAS utilise comme données d'entrée les débits de retour estimés par analyses fréquentielles, se sont les débits maximums annuels de la station de Sidi Hsain, un modèle numérique de terrain approprié à la zone d'étude de résolution de 30 mètres, les coefficients de Manning -Strickler avec lequel le modèle sera calibré.

Une démarche (Figure 50) a été adoptée pour modéliser cette zone, qui combine plusieurs paramètres, outils et données.

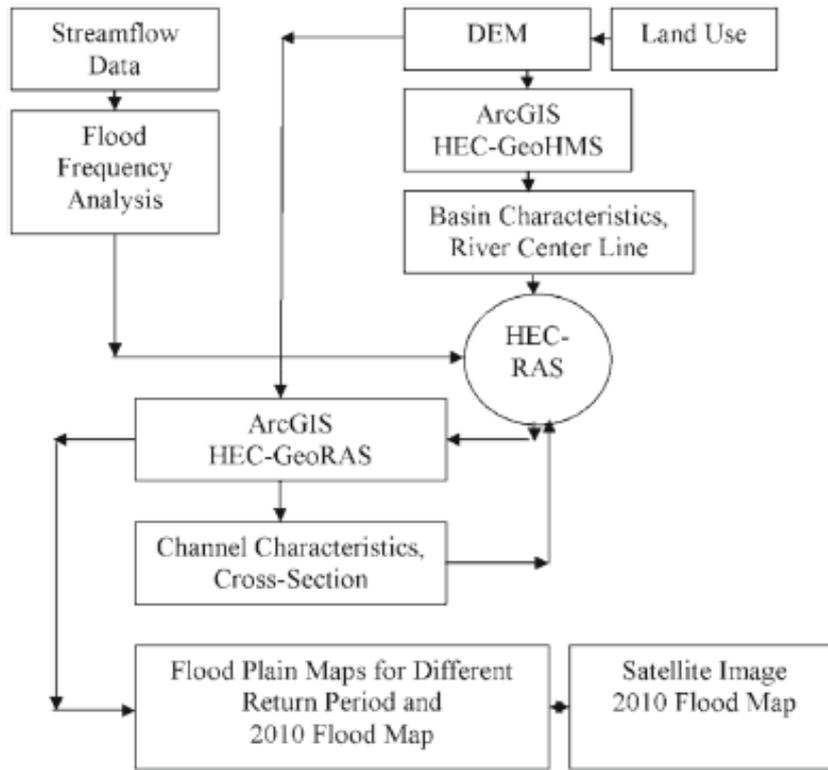


Figure 50 : Méthodologie de modélisation de HEC-RAS (Khattak et al., 2014)

5.3. Conditions du calcul et équations mises en jeu

Dans notre cas d'étude, nous utilisons le noyau de calcul non-permanent. HEC-RAS résout numériquement les lois physiques qui gouvernent les écoulements fluviaux non-permanents en une dimension . Il s'agit des équations de Saint-Venant :

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} - q_1 = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} = -g \cos \alpha \frac{\partial h}{\partial x} + g \sin \alpha - S_f \end{cases} \quad \text{Équation 5.1.}$$

avec S la section du cours d'eau, t le temps, x la distance le long du canal, U la vitesse de l'écoulement, q_1 les apports latéraux par unité de longueur, g l'accélération gravitationnelle, α la pente du cours d'eau, h le tirant d'eau, S_f les forces de frottement déterminés par l'équation de Manning :

$$S_f = g \frac{Q|Q|n^2}{2.208R_H^{4/3} S^2} \quad \text{Équation 5.2.}$$

avec R_H le rayon hydraulique, Q le débit et n le coefficient de Manning. Ces équations sont discrétisées par la méthode des différences finies. Le schéma de discrétisation utilisé est un schéma

implicite de Priesmann. Dans ce schéma, les dérivées spatiales et les valeurs des fonctions sont calculées en un point intérieur ($n+\theta$) et au point ($n+1$) si n est l'indice de discrétisation temporel. Ce type de schéma permet de prendre en compte l'information d'une partie de notre système hydraulique en tout point de la discrétisation. Ce schéma est inconditionnellement stable pour

$0.5 < \theta < 1$, conditionnellement stable pour $\theta = 0.5$ et instable pour $\theta < 0.5$

En pratique, d'autres facteurs peuvent aussi contribuer à la non-stabilité des calculs tels que des changements brusques dans la géométrie du cours en plus des contraintes de discrétisations. C'est pourquoi nous nous sommes avant tout assurés de la robustesse et précision des calculs de notre modélisation d'Amizmiz par différents tests en variant les discrétisations spatiales et temporelles.

5.4. Définition de la géométrie du cours d'eau

Les réseaux de cours d'eau sont organisés en biefs séparés par des connections où s'opèrent les additions et séparations de débits. Les données relatives à chaque section sont : les profils en travers, les coefficients de rugosité, pertes de charge et la distance à la section suivante.

Dans notre cas nous modélisons la plaine d'Amizmiz sur 2 km. Nous avons les données de 16 profils en travers entre. Entre deux profils successifs, nous extrapolons les profils afin d'obtenir une discrétisation spatiale suffisante pour assurer la précision des calculs. L'extrapolation a été réalisée par un module du logiciel HECRAS.

La visualisation de ces profils extrapolés permet de s'assurer qu'ils sont valables. Les coefficients de rugosité (coefficient de Strickler ou Manning) seront déterminés par un calage avec les débits observés. Amizmiz contient un seuil de franchissement c'est un pont qui obstrue l'écoulement et induit des pertes de charge. Cependant, nous ne disposons pas des données de géométrie et emplacement de ce seuil pour pouvoir les prendre en compte. Il conviendra donc de se rappeler lors de nos simulations que notre modèle hydraulique ne contient pas ce seuil, ce qui peut conduire à des caractéristiques du cours d'eau disproportionnées.

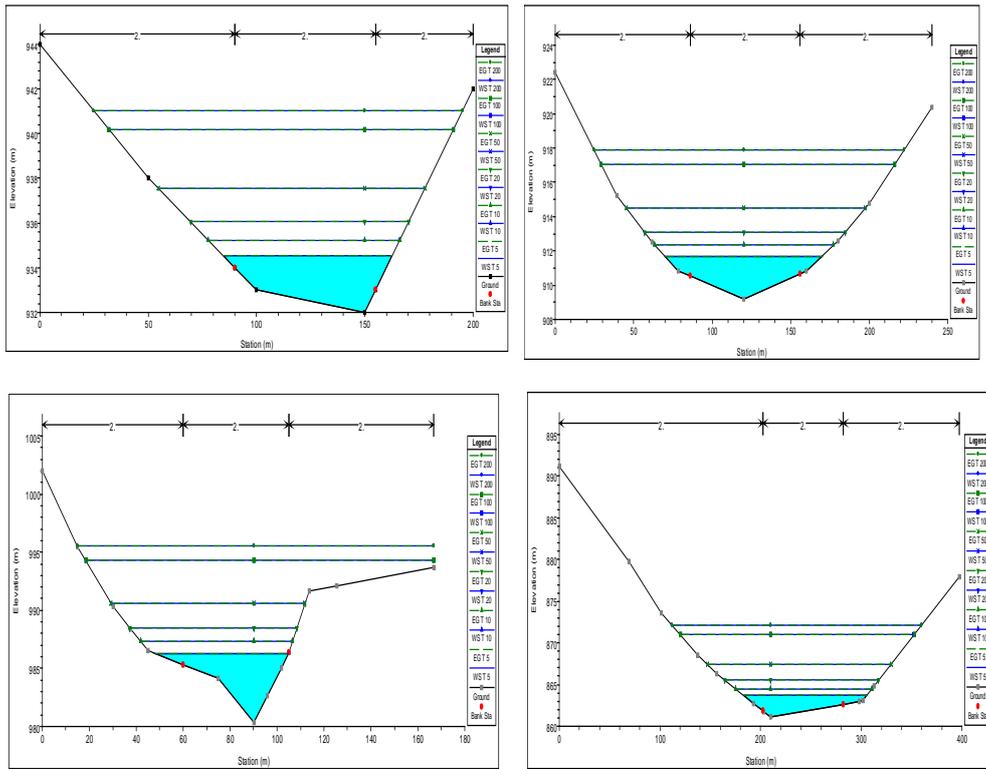


Figure 51 : Exemples de sections transversale du cours d'eau réalisés selon plusieurs périodes de retour

La figure 51 présente les sections transversales du cours d'eau Amizmiz, et les hauteurs d'eau pour les différentes périodes de retour dans chaque section en fonction des élévations par rapport à la largeur de section.

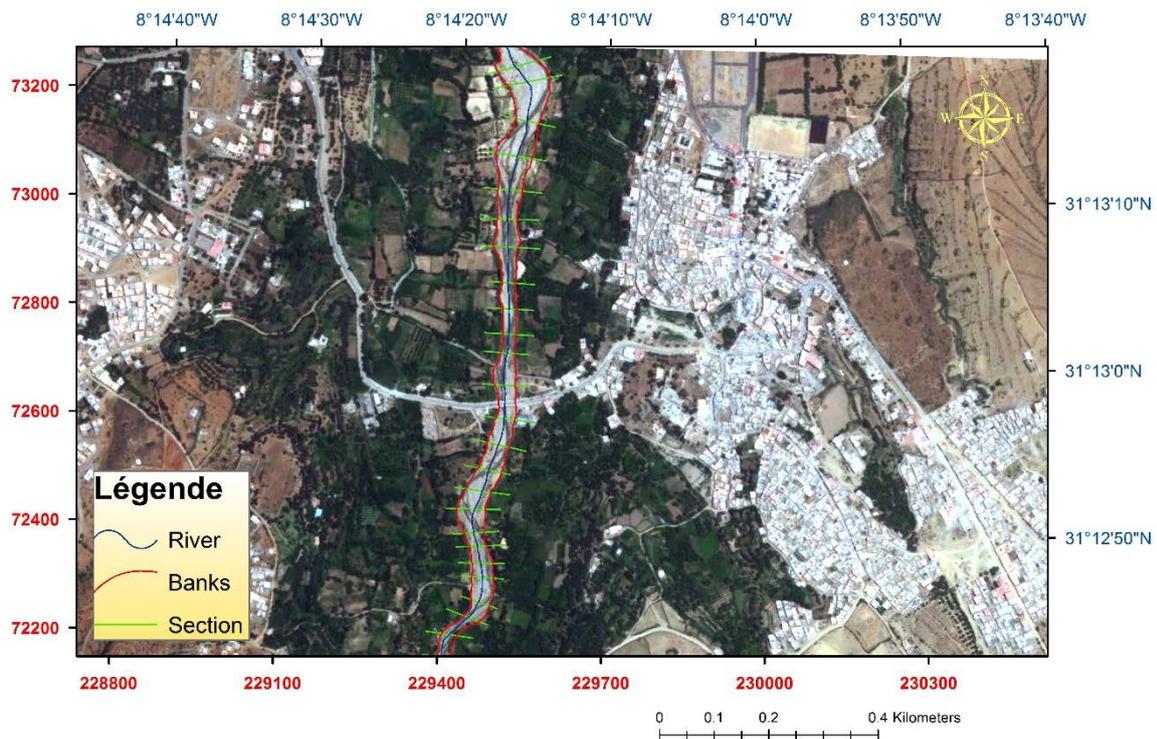


Figure 52 : Situation géographique de la zone d'étude et les différents profils sur Oued Amizmiz

La carte ci-dessus montre les différents profils réalisés le long de la rivière d'Amizmiz pour procéder à la modélisation hydraulique.

5.5. Conditions limites et conditions initiales

Les conditions limites et initiales sont parfois délicates pour ce genre de modélisation puisqu'elles peuvent conduire à des instabilités. En général, il faut éviter les discontinuités (changements brusques des hauteurs d'eau, débits...). Dans notre cas nous réalisons une modélisation du tronçon Amizmiz .

- La condition limite amont d'Amizmiz (station hydrométrique de l'amont d'Amizmiz) qui représente le débit observé au cours du temps.

- La condition limite aval est une hauteur d'eau. Le problème est que nous cherchons à simuler l'hydraulique de l'aval d'Amizmiz, nous ne disposons donc pas de ces données.

- Enfin nous avons deux conditions limites le long de l'oued Amizmiz. Il s'agit des hydrogrammes des apports latéraux des sous-bassins d'apports diffus. Ces hydrogrammes sont calculés sur chacun par le modèle hydrologique pluie-débit GR2M en réponse aux précipitations observées.

5.6. Calibration du modèle HEC-RAS

La calibration du modèle HEC-RAS se base sur des données observées des crues, les débits de pointes ainsi que les l'élévation des seuils émergés lors de la crue et les coefficients de Manning Strickler.

HEC-RAS est par la suite capable d'ajuster la valeur du coefficient de seuil dans le cas où le seuil devient partiellement noyé, en fonction de la hauteur aval. Le logiciel est de plus capable, en cas de seuil complètement noyé (ou "effacé"), d'opter pour une méthode de calcul basée sur l'énergie plutôt que sur une équation de seuil.

Le coefficient de Strickler sera quant à lui pris à une valeur standard avant d'être ajusté ; il y a de toute façon peu d'information sur la composition granulométrique du lit et des berges pour délimiter une valeur de Strickler de départ.

Manning's n for Channels (Chow, 1959).

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
Natural streams - minor streams (top width at floodstage < 100 ft)			
1. Main Channels			
a. clean, straight, full stage, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
b. same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
c. clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
d. same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
e. same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
f. same as "d" with more stones	0.045	0.050	0.060
g. sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
h. very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stand of timber and underbrush	0.075	0.100	0.150
2. Mountain streams, no vegetation in channel, banks usually steep, trees and brush along banks submerged at high stages			
a. bottom: gravels, cobbles, and few boulders	0.030	0.040	0.050
b. bottom: cobbles with large boulders	0.040	0.050	0.070
3. Floodplains			
a. Pasture, no brush			
1. short grass	0.025	0.030	0.035
2. high grass	0.030	0.035	0.050
b. Cultivated areas			
1. no crop	0.020	0.030	0.040
2. mature row crops	0.025	0.035	0.045
3. mature field crops	0.030	0.040	0.050
c. Brush			
1. scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.070
2. light brush and trees, in winter	0.035	0.050	0.060
3. light brush and trees, in summer	0.040	0.060	0.080
4. medium to dense brush, in winter	0.045	0.070	0.110
5. medium to dense brush, in summer	0.070	0.100	0.160
d. Trees			
1. dense willows, summer, straight	0.110	0.150	0.200
2. cleared land with tree stumps, no sprouts	0.030	0.040	0.050
3. same as above, but with heavy growth of sprouts	0.050	0.060	0.080
4. heavy stand of timber, a few down trees, little undergrowth, flood stage below branches	0.080	0.100	0.120
5. same as 4. with flood stage reaching branches	0.100	0.120	0.160

Tableau 20: Reference tables for Manning's n values for Channels (<http://www.fsl.orst.edu>)

5.7. Résultats et discussion

Ce paragraphe va révéler l'ensemble des résultats obtenus après simulation et modélisation hydraulique du cours d'eau principale de la ville d'Amizmiz .

Les résultats calculés sur HEC-RAS donnent une vision globale sur les différents paramètres d'écoulements d'un cours d'eau.

La figure 53 illustre les différents hauteurs d'eau après simulations pour une période de retour de 200 ans , cette figure nous présente aussi les sections transversales réparties le long de la rivière Amizmiz, on peut constater que les hauteurs d'eau n'atteint pas une hauteur qui peut entrainer des risques.

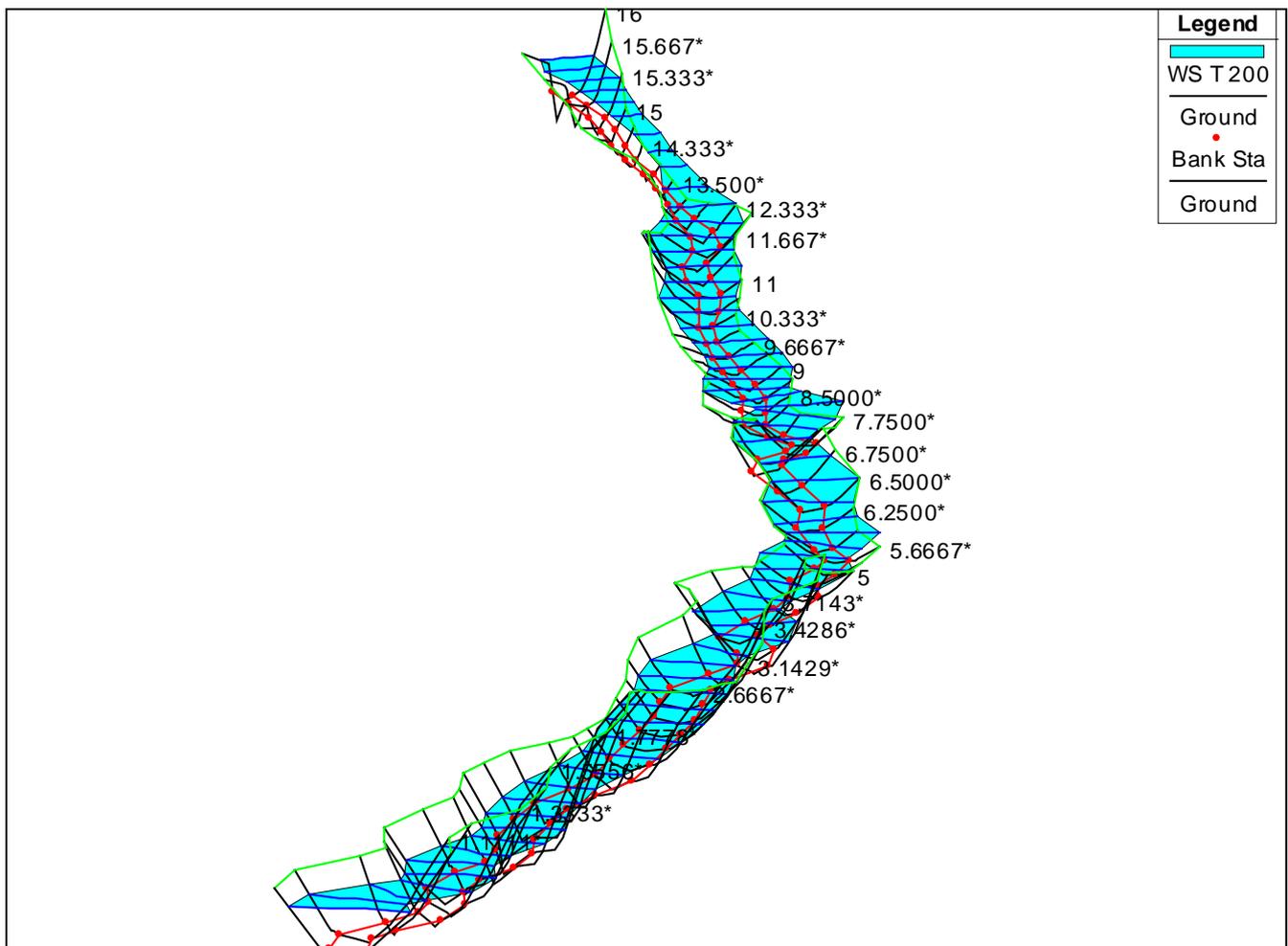


Figure 53 : Vue 3D du tronçon principale en période de retour de 200 ans

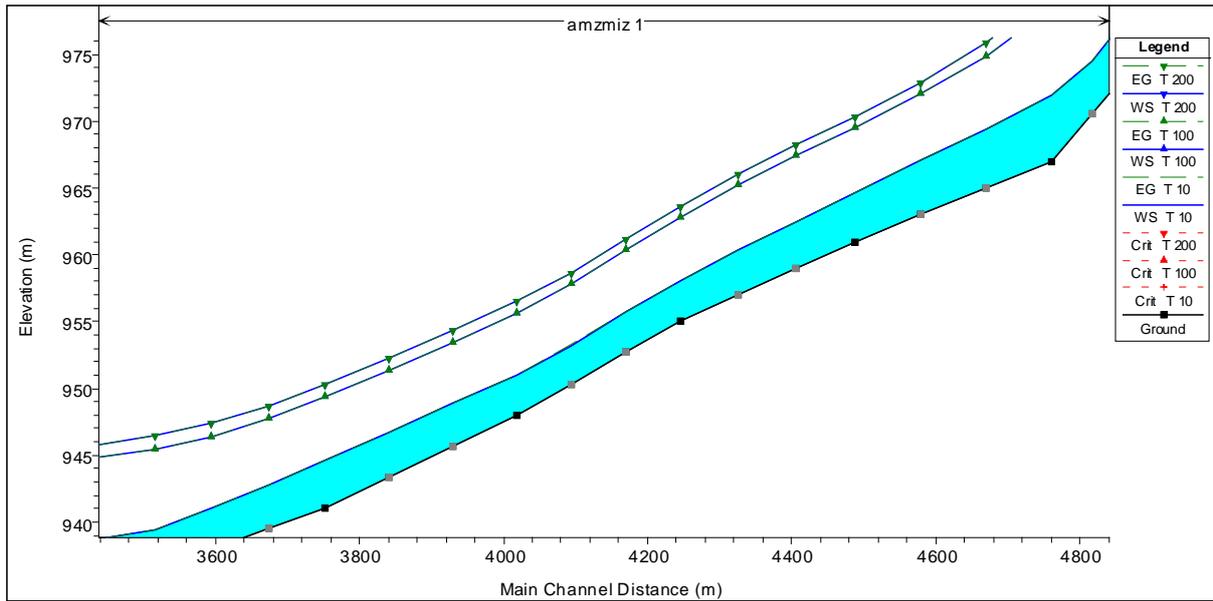


Figure 54 : Coupe en travers du cours d'eau principal pour les périodes de retour de (10,100 et 200 ans)

La figure ci-dessus présente le profil en long du tronçon étudié avec les hauteurs d'eau des différentes périodes de retour (Q10, Q100 Q200). Le profil en long montre les hauteurs d'eau des différentes périodes de retour en fonction des élévations en (m) par rapport à la distance moyenne du cours d'eau.

Après avoir obtenu une carte du cours d'eau en 1D sur HEC-RAS on peut aussi visualiser les résultats de la propagation des crues pour différentes périodes de retour. Pour cela, les résultats de la simulation hydraulique sont exploités par Arc Gis pour créer les cartes de la plaine d'inondation et aussi les limites de la plaine d'inondation pour différentes périodes de retour (Q20, Q100, Q200).

Une carte de limite de la plaine d'inondation est présentée ci-après (figure 55)

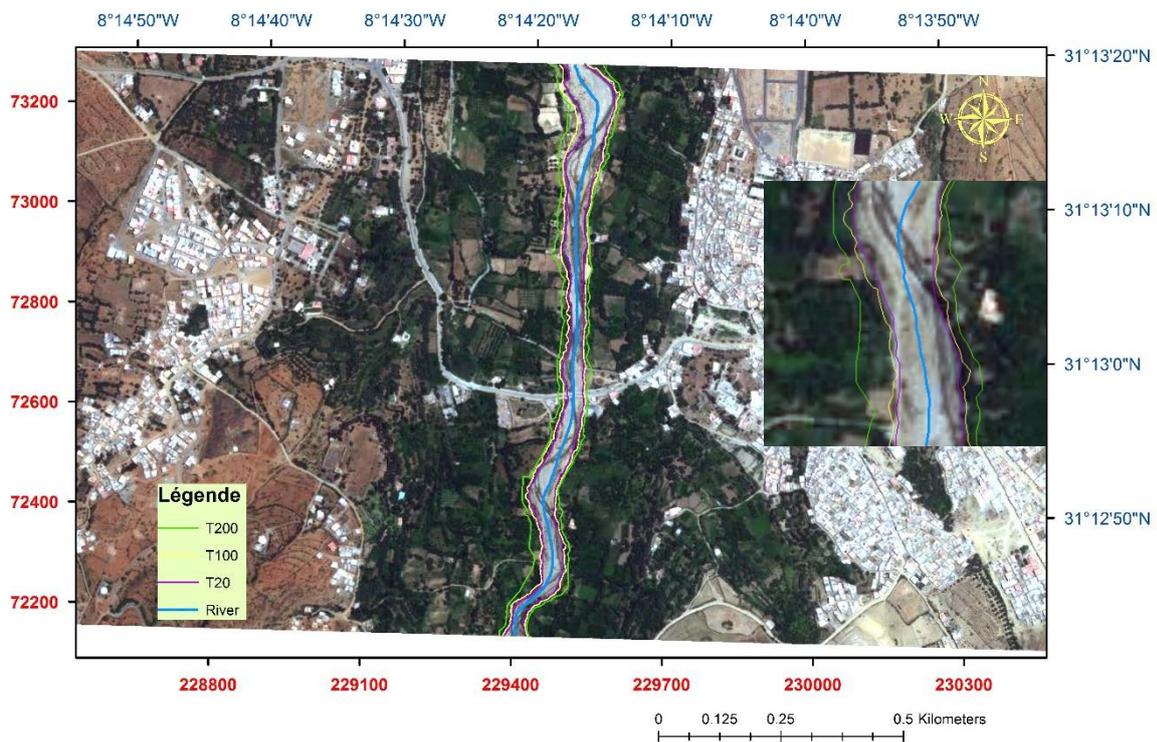


Figure 55 : Carte de la plaine d'inondation pour (T20-T100-T200)

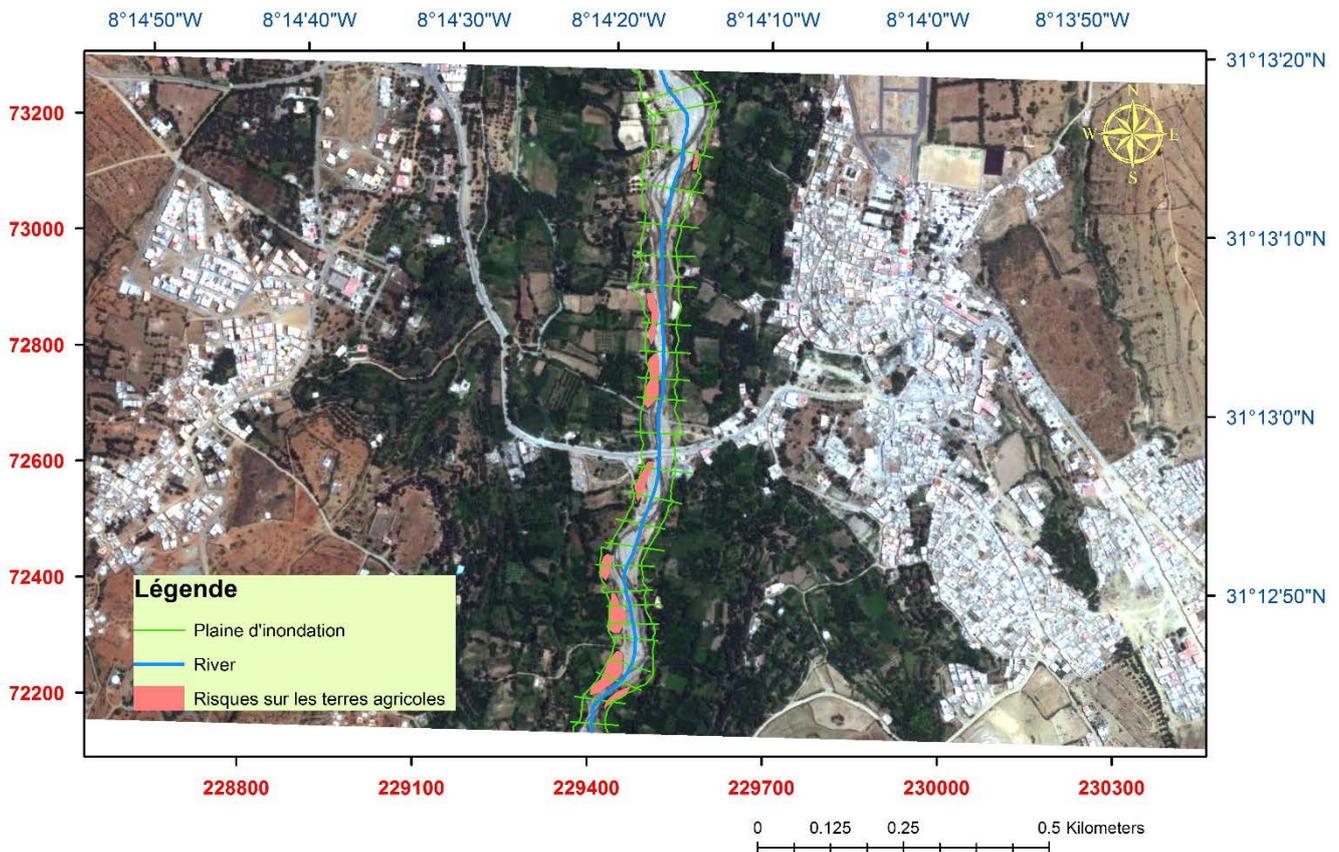


Figure 56 : Carte d'aléa de la zone d'étude

Suite à la carte de propagation des crues, une carte d'aléa sur a été tracée pour montrer les zones menacées par la crue au niveau du tronçon simulé. Les superficies de ces zones sont réduites, réparties sur la rive gauche de la plaine d'inondation, en général se sont des surfaces irriguées, et les inondations sont loin de toucher les surfaces bâties, on peut expliquer ça par les débits faible de ce cours d'eau qui ne dépassent pas 60 m³/s. et le faible enneigement en amont de cours d'eau.

5.8. Conclusion

A la fin de ce chapitre on peut constater que la ville d'Amizmiz , on peut pas la considérer comme une ville inondable vu les résultats de simulations obtenus avec les débits journaliers, mais il faut prendre ces résultats avec une grand précaution vu la non disponibilité de toutes les données d'entrée et la précision d'un levé topographique et surtout les débits maximum instantanés.

Il faut critiquer la précision du modèle numérique de terrain sur lequel s'appuie Hec-Ras pour générer la tâche, qui diffère parfois jusqu'à 80 cm des levés topographiques. Il a été de plus nécessaire de prolonger les profils implémentés sous HEC-RAS afin de couvrir l'intégralité du lit majeur en se basant sur le MNT, malgré des doutes sur la cohérence entre les deux séries de données (levé topographique et MNT). Compte tenu de ces observations, on conclut sur la nécessité d'affiner et de valider les données topographiques afin d'assurer une fiabilité des résultats

Chapitre 6

Chapitre 6 : Impact hydrologique due aux changements climatiques

6.1. Introduction

Dans de chapitre nous nous commencerons par l'évaluation des scénarios climatiques ainsi que les résultats relatifs à la désagrégation des températures et précipitations.

Après on va présenter l'impact du changement climatique notamment l'impact d'augmentations futurs des températures selon les scénarios (RCP 4.5 et RCP 8.5 au milieu et à la fin de ce siècle) sur les ressources en eau du bassin versant N'fis.

On va apporter une évaluation de la qualité des simulations brutes des modèles climatique régionaux de la base de données de MEDCORDEX, ainsi que les résultats de désagrégation spatiale avec un pas de temps journalier.

6.2. L'évaluation des simulations RCM sur la période de référence

L'évaluation du cycle saisonnier des scénarios climatiques consiste à faire une comparaison des simulations et les observations sur la période de référence 1989-2005.

La figure 57 représente le cycle saisonnier moyen des précipitations pour l'ensemble des modèles utilisés dans MEDCORDEX sur la période historique (hist 1989-2005) et la période d'évaluation (eval 1989-2005)

On remarque que pour la période historique tous les modèles reproduisent relativement bien le cycle annuel moyen avec une saison des pluies centrées sur les mois d'octobre à mars et un creux en été. La seule exception est le modèle CNRM44 qui surestime notablement les pluies d'été. Concernant les simulations historiques (dont les simulations ont été forcées par des réanalyses), on constate une sous-estimation des précipitations hivernales au cœur de l'hiver pour l'ensemble des modèles à part le modèle CMCC44. En début de la saison agricole (Octobre-Décembre). Le comportement est beaucoup plus contrasté entre les différents modèles. Pour la période d'évaluation les modèles reproduisent bien l'allure générale de la courbe des précipitations observées avec la même exception du modèle du CNRM, La sous-estimation des précipitations est plus systématique que pour les simulations forcées sur l'ensemble de la saison des pluies. Le biais moyen reste cependant moins important sur les mois d'été, lorsque les précipitations sont moins importantes.

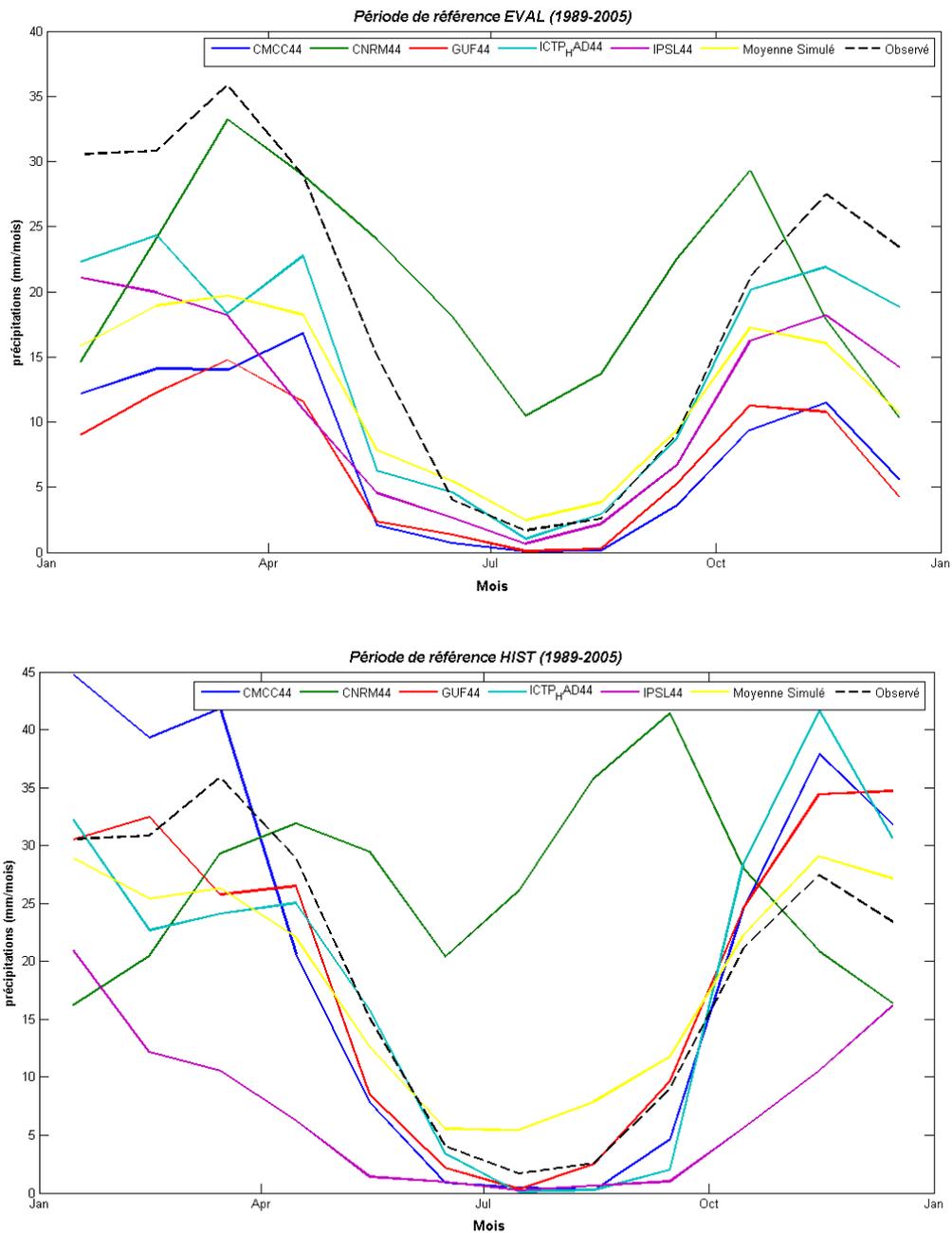


Figure 57 : Variation des précipitations observées et celles simulées par les modèles climatiques régionaux RCMs disponibles sur la période d'évaluation (EVAL) et la période historique (HIST) pour le bassin versant N'fis

On remarque que tous les modèles reproduisent bien l'allure générale de la courbe des températures observées pour les deux périodes (historique et d'évaluation). On remarque que tous les modèles sous-estiment la température observée sauf le model IPSL44 qui surestime à la fois les températures minimales, maximales et moyennes.

On observe également que la moyenne des simulations de tous les modèles aussi sous-estime les observations, durant toute l'année avec un biais moins important sur les mois d'été, lorsque les températures sont plus importantes.

Cette sous-estimation des températures peut être liée essentiellement à la résolution spatiale. En effet les modèles estiment la température avec une résolution de 50 Km qui peut couvrir des surfaces non représentatives (montagnes) à celle des mesures.

Il est alors nécessaire de procéder à des descentes d'échelle pour éliminer le biais entre les observations et les simulations, qui est l'objectif de la deuxième partie de cette section.

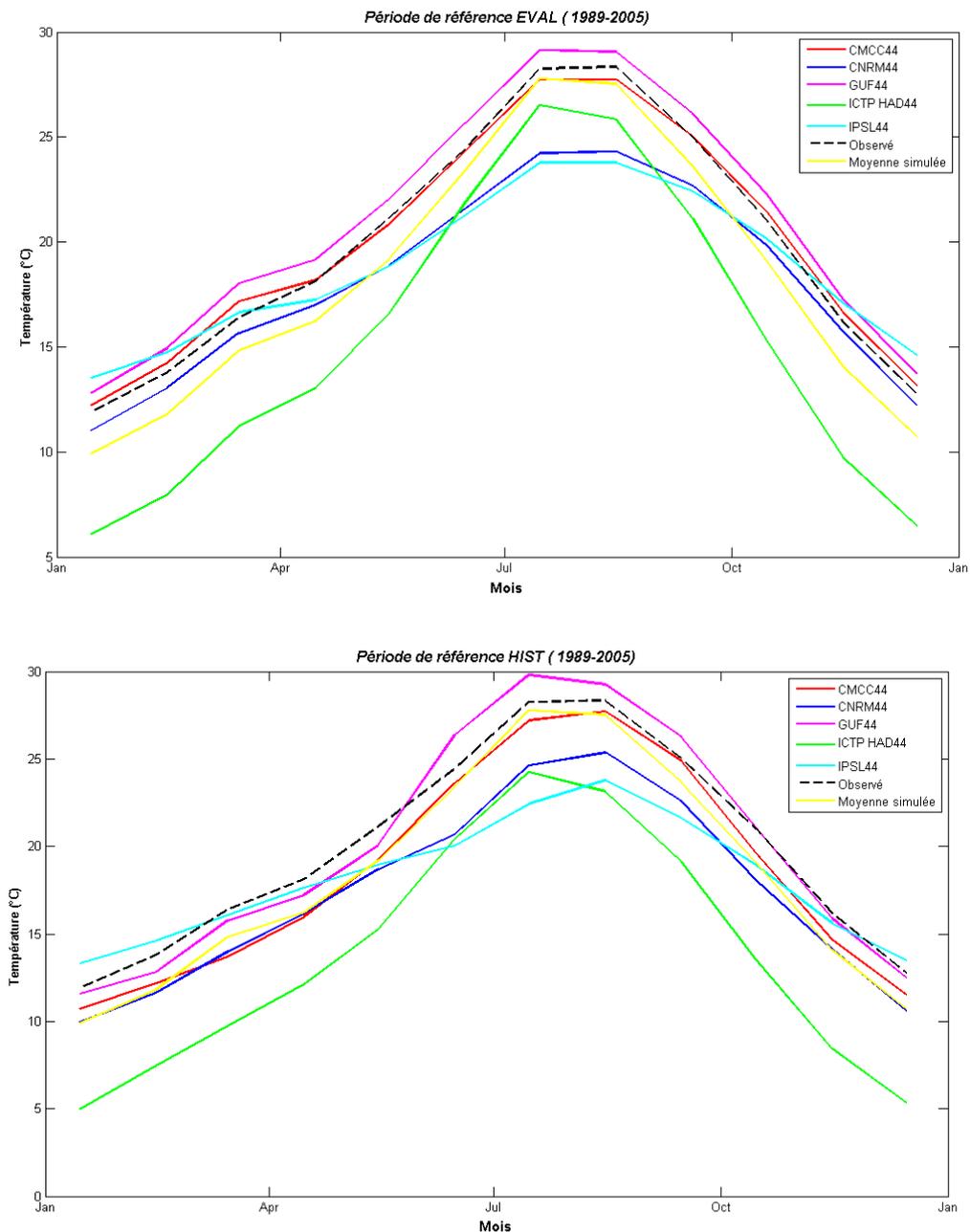


Figure 58 : Variation des températures observées et celles simulées par les modèles climatiques régionaux RCMs disponibles sur la période d'évaluation (EVAL) et la période historique (HIST) pour le bassin versant N'fis

6.3. Changement projeté sur les températures et les précipitations

6.3.1. Scénarios climatiques

Les scénarios de l'évolution des différents composants atmosphériques jouant un rôle moteur dans les changements climatiques. Les RCPs (Representative Concentration Pathways) sont des scénarios sur le pouvoir radiatif (pouvoir chauffant de l'atmosphère) des différents composants atmosphériques. Les RCPs sont utilisés par les climatologues pour faire des scénarios climatiques, décrivant la température, les précipitations, et autres variables climatiques. (Marchane,2015) Il existe 4 RCPs dont les caractéristiques principales sont visibles dans le tableau 21 et la figure 59.

Nom du scénario	Forçage radiatif atteint en 2100 (actuel : 2.1 W/m ²)	Concentration équivalente CO ₂ en 2100 (actuel : 442 ppmv)
RCP 8.5	8.5 W/m ²	1370 ppmv
RCP 6	6 W/m ²	850 ppmv
RCP 4.5	4.5 W/m ²	650 ppmv
RCP 2.6	2.6 W/m ²	490 ppmv

Tableau 21 : Caractéristiques principales des différents scénarios (<http://www.universcience.fr>)

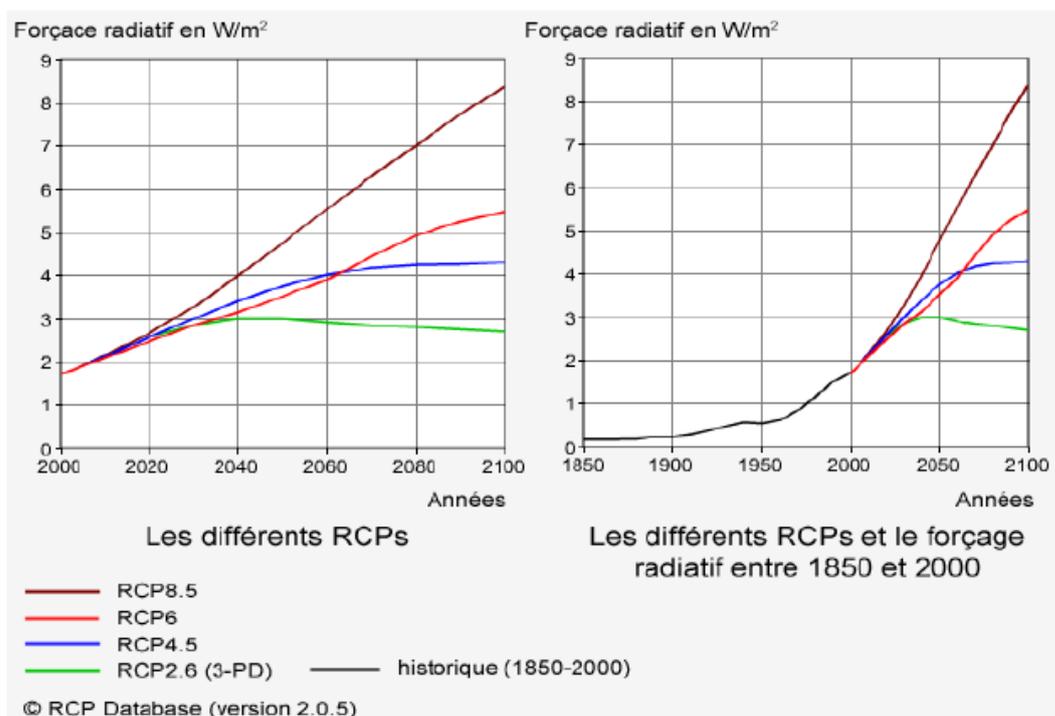


Figure 59 : Les différents RCP avec leur extension jusqu'en 2100 et le forçage radiatif entre 1850 et 2000 (Source : <http://www.universcience.fr>)

L'objectif de cette partie est d'étudier l'évolution future des précipitations et de la température au niveau du bassin versant N'fis, avec les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, entre la période historique 1989-2005 et la période de projection 2040-2056. Cette dernière a été choisie pour commencer 35 ans après la fin des données observées, pour montrer les changements prévus pour le moyen terme.

6.3.2. Projections pour les précipitations

Le tableau 22 présente le signal de changement climatique pour chaque modèle, en valeur relative pour les précipitations (%) entre les périodes 1989-2005 et 2040-2056. Les résultats obtenus montrent que l'ensemble des simulations présentent une diminution des précipitations. Cette diminution des précipitations notamment durant les mois d'hiver peut avoir un impact critique sur les ressources en eau. En moyenne pour le N'fis, les changements projetés sur les précipitations sont de -16% pour le scénario RCP 4.5 et de -26% pour le scénario RCP8.5.

		SMH	CLM	IPSL	KNML
N'fis	RCP4.5	-10%	-21%	-30%	-10%
	RCP8.5	-17%	-29%	-40%	-14%

Tableau 22 : Signal de changement des précipitations pour chacun des modèles et scénarios climatiques pour le bassin versant N'fis

6.3.3. Projections pour les températures

Le Tableau 23 présente le signal de changement climatique pour chaque modèle, en valeur absolue pour les températures entre les périodes 1989-2005 et 2040-2056. On remarque que les deux scénarios suggèrent une augmentation relativement importante de la température. En moyenne pour le N'fis, les changements projetés sur les températures sont de +1.6°C pour le scénario RCP 4.5 et de +2.2°C pour le scénario RCP8.5.

		SMH	CLM	IPSL	KNML
N'fis	RCP4.5	+1.7	+1.9	+1.7	+1.5
	RCP8.5	+1.9	+3.1	+2.7	+2.4

Tableau 23 : Signal de changement des températures pour chacun des modèles et scénarios climatiques pour bassin versant N'fis

6.3.4. Projections futures sur les débits

Perturbation des séries climatiques observées par les simulations RCMs

Ce paragraphe concerne l'évaluation des simulations RCMs, les écarts entre les conditions climatiques simulées par les RCMs sur la période 1989-2005 et celles réellement observées durant la période historique peuvent être importantes. Ce constat nous permet difficilement d'utiliser directement les scénarios climatiques régionaux dans le modèle GR2M- neige. Différentes approches plus ou moins complexes de correction des sorties de modèles climatiques existent, qui sont détaillées dans (Déqué,2007) et (Boé,2007) par exemple. Néanmoins, en contexte semi-aride il a été montré par (Maraun,2012), (Driouech *et al.* 2010) et (Tramblay *et al.* 2013) que les méthodes couramment appliquées comme la correction quantile-quantile n'étaient pas robustes (Marchane,2015) Pour cette raison nous avons choisi la méthode du « delta change » (Figure 60) (appelée également méthode des

perturbations) qui consiste à appliquer aux observations le changement climatique moyen simulé entre les périodes 1989-2005 et 2040-2056.

La température mensuelle observée (T_{X_o}) sera ajustée en ajoutant la différence de la température mensuelle prévue par le modèle de climat (RCM) entre l'horizon 2056 et la période de référence pour obtenir la température mensuelle à l'horizon 2056 ($T_{X'o}$).

$$T_{X'o} = (T_{X'm} - T_{X_m}) + T_{X_o} \quad \text{Équation 6.1.}$$

Les précipitations mensuelles ajustées ($P_{X'o}$) sont obtenues en multipliant le rapport entre précipitations mensuelles prévues par le modèle de climat (RCM) et les précipitations de la période de référence par les précipitations mensuelles observées (P_{X_o}).

$$P_{X'o} = (P_{X'm} / P_{X_m}) * P_{X_o} \quad \text{Équation 6.2.}$$

Cette méthode, qui est à la fois simple et robuste, est la plus largement appliquée dans l'évaluation de l'impact du changement climatique (PrudHomme *et al*, 2002; Wilby et Harris, 2006; Minville *et al*, 2008; Dobler *et al*, 2010).

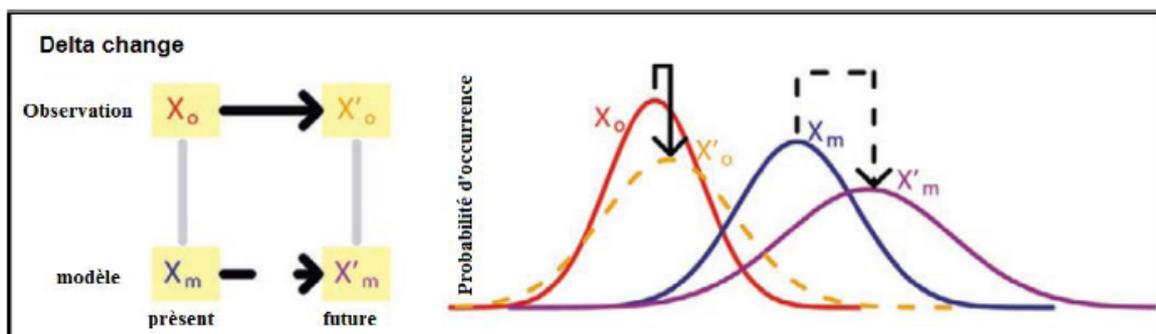


Figure 60 : Schéma explicatif de la méthode « Delta change » (Ho *et al*, 2012)

Projections futures sur les débits

Une première simulation dite « Historique » a été effectuée à partir des données observées sur la période 1989-2005. Les précipitations observées et l'ETP Oudin en climat présent ont été utilisés en entrée du modèle GR2M pour produire 6 simulations, chacune utilisant un jeu de paramètres différent obtenu lors des différents exercices de calibration/validation. Les débits mensuels simulés avec les 6 jeux de paramètres ont été moyennés afin de produire une seule simulation au pas de temps mensuel, en climat présent, reflétant l'incertitude sur les paramètres du modèle. Cette simulation de référence sera par la suite comparée aux projections futures pour évaluer les changements possibles sur les débits mensuels. (Marchane, 2015)

On constate pour l'ensemble des scénarios étudiés une augmentation systématique des températures dans la région. Ces augmentations se situent entre 1°C et 6 °C respectivement pour le scénario le plus optimiste au milieu du siècle et pour le scénario le plus pessimiste en fin du siècle. De manière générale, ces augmentations sont logiquement plus importantes pour les horizons les plus lointains et pour le scénario le plus pessimiste.

Pour le scénario RCP 4.5 (204-2056) on remarque une augmentation de la température maximale comprise entre 1 et 2 °C, le maximum d'augmentation est situé en début d'été (Juin) alors que le minimum a lieu en octobre. De même l'augmentation pour RCP 4.5 (2081-2100) est comprise entre 1.5 et 3 °C avec un maximum en été au mois de Juin et un minimum au mois d'octobre. L'augmentation moyenne estimée est de 2.1 °C.

Pour le scénario RCP 8.5 (2041-2060), on remarque aussi une augmentation de température maximale de 1.5 à 3 °C avec un maximum en été au mois de juin avec un comportement similaire à RCP 4.5 fin du siècle. Pour le scénario RCP 8.5 (2081-2060) l'augmentation de température maximale est comprise entre 4.5 et 6 °C avec un maximum en été au mois de juin e

En ce qui concerne la température, il est clair que la température minimale, contrairement à la température maximale a un cycle saisonnier assez marqué avec une augmentation beaucoup plus forte qui correspond au cycle phénologique du blé (Novembre à Avril). Pour l'ensemble des scénarios étudiés une augmentation systématique des températures entre 1°C et 6 °C est prévue.

Néanmoins des tests préliminaires ont montré que ce sont principalement les précipitations qui influencent les débits, une hausse de l'ETP n'aurait qu'un impact très faible sur les écoulements. (Marchane,2015)

La figure 61 présente les changements relatifs des débits mensuels moyens simulés entre les périodes 1989-2005 et 2040-2056 pour l'ensemble des modèles RCMs, pour les deux scénarios RCPs. En général la majorité des scénarios climatiques présentent à une forte baisse projetée des débits printaniers (Mars-Mai).

	RCP 4.5	RCP 8.5
N'fis	-37%	-71%

Tableau 24 : Signal de changement des débits pour le bassin versant N'fis et selon les deux scénarios climatiques

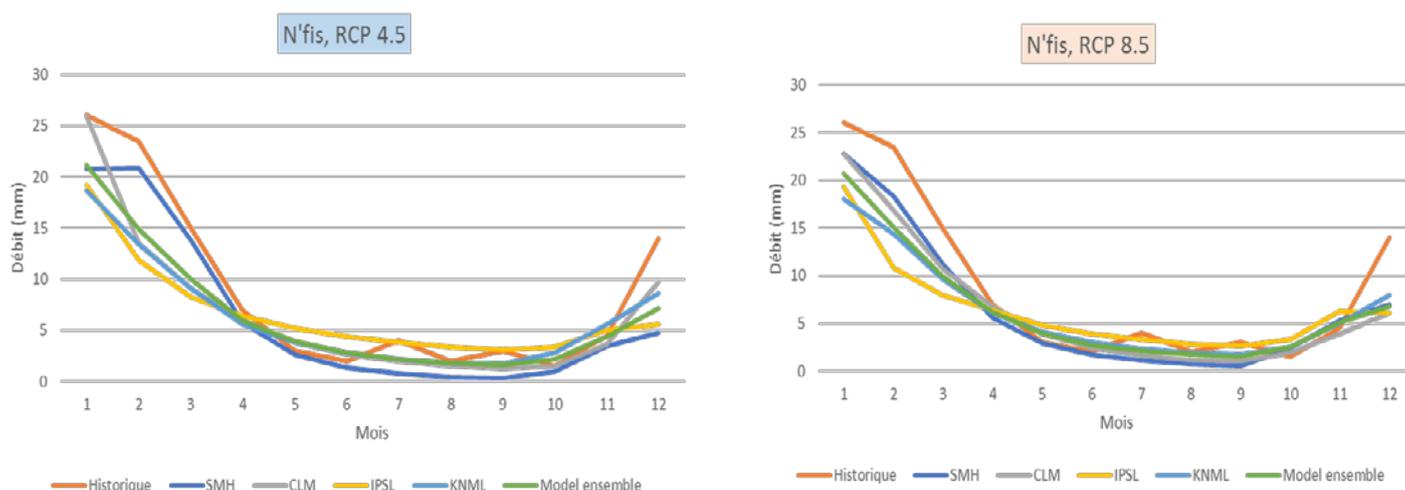


Figure 61 : Simulations hydrologiques des débits de l'oued N'fis, sur la période de projection à partir de données obtenues grâce aux RCMs après perturbation

En considérant les projections issues de chacun des modèles RCM (Figure 61) on observe une forte incertitude entre les différents modèles, même si en moyenne tous s'accordent sur une baisse des débits. Quelques modèles RCMs suggèrent une augmentation des débits mensuels pour certaines saisons, comme par exemple le modèle climatique SMH et CLM en été sous le scénario RCP4.5. La diminution suggérée par le scénario RCP8.5 est plus importante que celle du premier scénario (RCP4.5) surtout au printemps et en automne tandis qu'en été et en hiver les tendances à la baisse sont de moindre amplitude.

Ces résultats indiquent que la disponibilité de la ressource en eau de surface devrait continuer à décroître d'ici la fin du 21^{ème} siècle, avec des périodes d'étiages plus longues et plus sévères. (Marchane, 2015)

6.4. Conclusion

L'évaluation des changements climatiques par les modèles régionaux de climat (RCM) présente une hausse de la température au niveau du cycle saisonnier avec une baisse des précipitations pour les deux scénarios RCP4.5 (optimiste) et RCP8.5 (pessimiste), les prévisions des ressources en eau liées aux variations des débits révèlent une diminution des eaux de surface, cette diminution est due à la hausse des températures et à la baisse des précipitations.

Contraintes rencontrées lors de ce travail

- ✚ Mauvaise qualité de données hydroclimatiques (Il était très important avant de se lancer dans une première modélisation pluie-débit de bien connaître la qualité des données principales d'entrée afin de mieux pouvoir critiquer les résultats obtenus ;
- ✚ Disponibilité des lacunes au niveau des chroniques ;
- ✚ Représentativité du réseau de mesure (densité faible des stations) ;
- ✚ Absence des données d'enneigement ;
- ✚ Données de la température issue d'une seule station ;
- ✚ Les instruments de mesure biaisent la mesure de la précipitation ;
- ✚ Absence de profil topographique pour une simulation hydraulique précise ;
- ✚ Séries de débits perturbés par les prélèvements.

Tout scientifique sait que des résultats ne sont pleinement exploitables que s'ils sont associés à une barre d'erreur.

Recommandations sur le plan scientifique

- ✚ Utilisation des pluies satellitaires pour une modélisation pluie-débit plus fiable ;
- ✚ Disposition des séries de données qui s'étalent sur des périodes plus longues ;
- ✚ Couplage entre modèle hydrologique et hydraulique pour une étude plus précise pour le comportement du bassin versant (Les modèles alliant hydraulique et hydrologie sont assez nombreux dans la littérature) ;
- ✚ Programmation d'un modèle hydrologique marocain qui s'adapte le mieux aux conditions climatiques marocains ;
- ✚ Création d'une base de données climatique accessible en ligne pour les chercheurs en hydrologie de l'université ;
- ✚ Développer un système de prise de décision (SAD) pour une meilleure gestion des ressources en eau qui va combiner entre l'hydrologie, l'hydraulique, la télédétection, SIG et Hydrogéologie.

Conclusion générale

Cette étude a pour objectif d'étudier le comportement des trois sous bassins versants de N'fis dans un contexte montagnard semi-aride, et voir l'applicabilité des modèles génie rural selon différents pas du temps (annuel et mensuel) aux données des sous bassins de N'fis, ensuite essayer de simuler le cours d'eau principal de la ville Amizmiz et cartographier les inondations, à la fin de ce manuscrit on va révéler l'impact du changement climatiques sur les ressources hydriques de bassin versant N'fis avec des données des modèles climatique RCM et selon différents scénario climatiques RCP4.5 et RCP8.5.

En phase de simulation, nous sommes arrivés à différentes conclusions :

La modélisation pluie-débit des sous bassin de n'fis avec le modèle GR1A a donné des bons résultats avec un NSE de calibration qui de 60% , cette valeur va se dégrader en phase de validation 51 %, mais les résultats de modélisation des débits du sous bassin Amizmiz par le modèle GR2M neige sont peu satisfaisante mais au niveau des bassins versants Iguir N'Kouris et Imine El Hammam on a abouti à des valeurs de NSE qui sont satisfaisante. L'ensemble des résultats montre que le modèle n'est pas assez robuste, De manière générale pour accroître la confiance en un modèle, il faut le tester sur le maximum de données possibles, En résumé, la modélisation est difficile du fait de la faible quantité de données fiables et de la grande variabilité des événements hydrologiques. Ainsi, même le modèle le plus performant ne réussira jamais à reproduire parfaitement la réalité (Bergström, 1991).

Les résultats ne sont pas franchement meilleurs et sont toujours fortement liés aux périodes étudiées et aux phénomènes climatiques qui les caractérisent.

La modélisation, hydraulique de la rivière d'Amizmiz en se basant sur différents périodes de retour selon les débits ajustés au loi Log-Normal , cette simulation du modèle HEC-RAS à révéler qu'il y aura pas de risques d'inondation sur la ville d'Amizmiz , sauf sur la rive gauche que certain terres agricoles peuvent être inondées pour une période de retour de 200 ans.

Au niveau de la dernière partie du mémoire l'étude d'impact des changements climatiques a montré que l'évaluation des précipitations simulées par les RCMs montre une forte sous-estimation, mais une bonne reproduction du cycle pour les températures. Au niveau du bassin versant de N'fis les projections des 4 RCMs selon les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 montrent une hausse des températures (+1.8°, +2.2°) conjointement à une baisse des précipitations totales (-16%, 26%). Les prévisions des débits (2040-2056) présentent une forte diminution prévue du ruissellement de surface (-48%, -63%), liée à la diminution des précipitations et l'augmentation de la température.

Cette étude est loin d'être achevée et les résultats présentés ne sont pas définitifs. Un important travail doit être mené pour l'amélioration des simulations.

Références bibliographiques

- Abourida A. (2007), Approche hydrogéologique de la nappe du Haouz (Maroc) par télédétection, isotopie, SIG et modélisation. Thèse de doctorat, faculté des Sciences Semlalia-Marrakech.
- Ambroise, B., (1999). La Dynamique du Cycle de l'Eau dans un Bassin Versant. -Processus, Facteurs, Modèles-. *H*G*A, 200 pp.
- Anderton, S., Latron, J. and Gallart, F., (2002a). Sensitivity analysis and multi response, multicriteria evaluation of a physically based distributed model. *Hydrological Processes*, 16: 333-353.
- Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., Usart-sanchez, I. and Lavabre, J., 2001. Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models. *Journal of Hydrology*, 250: 206-223.
- Andréassian, V., Hall, A., Chahinian, N., and Schaake, J. 2006: Introduction and Synthesis: Why should hydrologists work on a large number of basin data sets?, in: IAHS Publication no. 307, Large sample basin experiments for hydrological model parameterization: Results of the Model Parameter Experiment – MOPEX, Paris, 1–5, 2006
- Bergström, S., 1991. Principles and Confidence in Hydrological Modelling. *Nordic hydrology*, 22: 123-136.
- Beven, K., Binley, A. (1992) the future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes* 6, 279-298.
- Beven, K. J. and O'Connell, P. E. (1985). General report on water balance computation techniques. In: *New Approaches in Water Balance Computations*. IAHS Pubn. No. 148, 41-46.
- Beven, K., 1989. Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, 105: 157-172.
- Beven, K. J. (2001). On hypothesis testing in hydrology. *Hydrological Processes*, 15: 1655–1657.
- Bobée B. et S. El Adlouni (2015). *Éléments d'Analyse Fréquentielle*. Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-ETE). En cours de révision.
- Boé J., 2007, Changement global et cycle hydrologique: Une étude de régionalisation sur la France. Mémoire de thèse. Université Paul Sabatier, 253 p, Toulouse.
- Boudhar.A, 2009, Télédétection du manteau neigeux et modélisation de la contribution des eaux de fonte des neiges aux débits des Oueds du Haut Atlas de Marrakech, Thèse de doctorat, Université Cadi Ayyad (Faculté des Sciences et Techniques Marrakech), 230p.
- Boyle, D.P., Gupta, H.V. and Sorooshian, S., (2000). Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research*, 36(12): 3663-3674.

- Chiew, F. H. S., Teng, J., Vaze, J., Post, D. A., Perraud, J.M., Krono, D. G. C., and Viney, N.R. 2009: Estimating climate change impact on runoff across southeast Australia: Method, results, and implications of the modelling method, *Water Resources*, 45, W10414, doi:10.1029/2008WR007338.
- Chocat, B., (1997). *Encyclopedie de l'hydrologie urbaine.* , Tec et Doc Lavoisier Publishers, Paris, France 1136 pp.
- Coron, L. 2013: Les modèles hydrologiques conceptuels sont-ils robustes face à un climat en évolution ? Diagnostic sur un échantillon de bassins versants français et australiens. *Ecology, environment.* AgroParisTech, France.
- Déqué M., 2007: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Glob. Plan. Change*, 57, 16-26, doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.11.030.
- Dobler, C., Stötter, J., Schöberl, F., 2010: Assessment of climate change impacts on the hydrology of the Lech Valley in northern Alps. *Journal of Water and Climate Change* 1 (3), 207–218
- Driouech, F., Déqué, M., and Sánchez-Gómez, E., 2010: Weather regimes-Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation, *Global Planet. Change*, 72, 1–10.
- Dubois, C., Somot, S., Calmanti, S., Carillo, A., Déqué, M., Dell'Aquila, A., Elizalde-Arellano, A., Gualdi, S., Jacob, D., Lheveder, B., Li, L., Oddo, P., Sannino, G., Scoccimarro, E., and Sevault, F. : Future projections of the surface heat and water budgets of the Mediterranean sea in an ensemble of coupled atmosphere-ocean regional climate models, *Clim. Dynam.*, 39, 1859-1884, doi:10.1007/s00382-011-1261-4, 2012.
- EL WAHIDI F., 2004. Le cyprès de l'Atlas, in « Les espèces de cyprès », publication supmed, l'Italie ; division de Recherches et d'Exploitations Forestieres; Centre régional de la recherche forestière, Marrakech, Maroc, Edizioni Centro Promozione Pubblicità-Firenze.19p.
- Er-Raki. S., Chehbouni, A., Khabba, S., Simonneaux, V., Jarlan, L., Ouldbha, A., Rodriguez, J.C., Allen, R.G., 2010 : Assessment of reference evapotranspiration methods in semi-arid regions : can weather forecast data be used as alternate of ground meteorological parameters? *J. Arid Environ.* 74, 1587-1596.
- Etchevers, P., Golaz, C., Habets, F., and Noilhan, J. 2002: Impact of a climate change on the Rhone river catchment hydrology, *J. Geophys. Res.*, 107, ACL 6-1-ACL 6-18, doi:10.1029/2001JD000490
- Finaud-Guyot . P., 2009 : Modélisation macroscopique des inondations fluviales et urbaines - Prise en compte des écoulements directionnels et des échanges lit majeur - lit mineur, These Université de Montpellier II.
- Fourmigué, P. et Lavabre, J., 2005. Prévion de crues avec le modèle conceptuel pluie-débit GR3H. *Revue des Sciences de l'Eau* 18(1), 87-102.
- Garcia-Navarro, P., Fras, A. et Villanueva, I., 1999. Dam-break flow simulation : some results for one-dimensional models of real cases. *Journal of Hydrology*, **216**: 227-247.
- Garcia-Navarro, P. et Zorraquino, V., 1993. Numerical modeling of flood propagation through system of reservoirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, **119** (n°3): 380-389.
- Giorgi, F. and Lionello, P. 2008 : climate change projections for the Mediterranean region, *global Planet. Change*, 63-90-104.

- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K. and Martinez, G.F. 2009: Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2): 80-91.
- Guttman, N.B., 1994: On the sensitivity of sample L moments to sample size. *Journal of Climate*, 7(6):1026–1029.
- Herrmann, M., Somot, S., Calmanti, S., Dubois, C., and Sevault, F. 2011: Representation of spatial and temporal variability of daily wind speed and of intense wind events over the Mediterranean Sea using dynamical downscaling: impact of the regional climate model configuration, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 1983-2001, doi:10.5194/nhess-11-1983-2011.
- Herrnegger, M., H.-P. Nachtnebel, et T. Haiden, 2012: Evapotranspiration in high alpine catchments - an important part of the water balance !, *Hydrology Research*, 43(4), 460–475, doi :10.2166/nh.2012.132.
- Klemeš, V. 1986: Operational testing of hydrological simulation models, *Hydrol. Sci. J.*, 31, 13–24.
- Majone, B., Bovolo, C. I., Bellin, A., Blenkinsop, S., and Fowler, H. J. 2012: Modeling the impacts of future climate change on water resources for the Gallego river basin (Spain), *Water Resour. Res.*, 48, W01512, doi:10.1029/2011WR010985.
- Makhlouf, Z., 1994. Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 426 pp.
- Maraun, D. 2012: Nonstationarities of regional climate model biases in European seasonal mean temperature and precipitation sums, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L06706, doi:10.1029/2012GL051210.
- Marchane, A. 2015 : Outils spatiaux pour le suivi de la dynamique de la neige sur l'Atlas marocain : changement climatique et ressources en eau, Thèse de doctorat, Université Cadi Ayyad (Faculté des Sciences et Techniques Marrakech), 103p.
- Mathevet, T., 2005. Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire ? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris), Cemagref (Antony), France, 463 pp.
- McKee, T.B., N.J. Doesken et J. Kleist, 1993: The relationship of drought frequency and duration to time scale. In: *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, California, du 17 au 22 janvier 1993. Boston, American Meteorological Society, 179–184.
- Michel, C., 1983. Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ? *La Houille Blanche*(1), 39-44.
- Michel, C. (1989). Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux, *Cemagref, Antony*.
- Milano, M., Ruelland, D., Fernandez, S., Dezetter, A., Fabre, J., and Servat, E. 2012: Facing global changes in the Mediterranean basin: How could the current water stress evolve by the mediumterm?, *C. R. Geosci.*, 344, 432–440.
- Minville, M., Brissette, F., and Leconte, R. 2008: Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed, *J. Hydrol.*, 358, 70–83.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C. et Andreassian, V., 2006a. Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited. *Journal of Hydrology* 328, 283-296, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.12.022.

- Nash, J.E. & Sutcliffe, J.V. 1970: River flow forecasting through conceptual models, a discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282–290.
- Nelder, J. A., & Mead, R. 1965. A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*, 7, 308–313.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andreassian, V., Anctil, F. & 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(1-4), 290
- Perrin, C., Michel, C. et Andréassian, V., 2001. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology* 242(3-4), 275-301.
- Perrin, C., Michel, C., and Andréassian, V. 2003: Improvement of a parsimonious model for stream flow simulation, *J. Hydrol.*, 279, 275–289.
- Perrin, C., 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, INPG (Grenoble) / Cemagref (Antony), 530 pp.
- Prudhomme, C., Reynard, N., and Crooks, S. 2002: Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now?, *Hydrol. Process.*, 16, 1137–1150.
- Quintana Seguí, P., Ribes, A., Martin, E., Habets, F., and Boé, J. 2010: Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins, *J. Hydrol.*, 383, 111–124.
- Ruelland, D., Ardoin-Bardin, S., Collet, L. & Roucou, P. 2012: Simulating future trends in hydrological regime of a large Sudano-Sahelian catchment under climate change. *J. Hydrol.*, 424–425, 207–216.
- Ruti, P., Somot, S., Dubois, C., Calmanti, S., Ahrens, B., Alias, A., Aznar, R., Bartholy, J., Bastin, S., Béranger, K., Brauch, J., Calvet, J.-C., Carillo, A., Decharme, B., Dell’Aquila, A., Djurdjevic, V., Drobinski, P., Elizalde-Arellano, A., Gaertner, M., Galan, P., Gallardo, C., Giorgi, F., Gualdi, S., Harzallah, A., Herrmann, M., Jacob, D., Khodayar, S., Krichak, S., Lebeaupin, C., L’Heveder, B., Li, L., Liguro, G., Lionello, P., Onol, B., Rajkovic, B., San-nino, G., and Sevault, F. submitted, 2013: MED-CORDEX initiative for Mediterranean Climate studies, *B. Am. Meteorol. Soc.*
- A. Saad, N. Laftouhi, K. Taj-Eddine. Mise en évidence de l’impact des changements climatiques sur les ressources en eaux souterraines à l’échelle du bassin versant : cas du bassin versant N’fis (Haouz-Marrakech Maroc) [en ligne]. 2014, p.18.
- Sanchez-Gomez, E., Somot, S., and Mariotti, A. 2009: Future changes in the Mediterranean water budget projected by an ensemble of Regional Climate Models, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L21401, doi:10.1029/2009GL040120.
- Senatore, A., Mendicino, G., Smiatek, G., and Kunstmann, H. 2011: Regional climate change projections and hydrological impact analysis for a Mediterranean basin in Southern Italy, *J. Hydrol.*, 399, 70–92.
- Singh, V.P., (1995). Computer models of watershed hydrology. *Water resources publications*, 809846.
- 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 of the ALADIN-Climate model in Morocco. *Hydrology and Earth System Sciences* 17, 3721-3739.

Wilby, R. L. and Harris, I. 2006: A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK, *Water Resour. Res.*, 42, W02419, doi:10.1029/2005WR004065.

Yapo, P.O., Gupta, H.V. and Sorooshian, S., (1998). Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 204: 83-97.