

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

**Impact des changements climatiques sur régime des cours d'eau
cas de l'Oued Mina (w. Relizane) .**

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 7-0004-12

APA Citation (APA توثيق):

**Saidi, Hayet (2012). Impact des changements climatiques sur régime des cours d'eau
cas de l'Oued Mina (w. Relizane)[Thèse de magister, ENSH].**

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بتثمين الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات بيداغوجية، مقالات الدوريات، كتب...) و بثه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE L'HYDRAULIQUE
ARBAOUI ABDELLAH

N° d'ordre :

Série :

MEMOIRE DE MAGISTER

OPTION : GENIE DE L'EAU

Présenté par :

SAIDI Hayet

Thème

**Impact des changements climatiques sur le régime des cours d'eau : cas de
l'Oued Mina (W.Relizane).**

Devant le jury composé de :

Président :	M	B. SALAH	Maitre de Conférence	E.N.S.H de Blida
Rapporteur :	M	M. MEDDI	Professeur	E.N.S.H de Blida
Examineur :	M	B. REMINI	Professeur	Université de Blida
Examineur :	M	G. MAHE	Directeur de recherche	IRD de France
Examineur :	M	O.KESBA KHODJET	Maitre de Conférence	E.N.S.H de Blida

Soutenu à l'E.N.S.H, le/..../2011

REMERCIEMENTS

Je remercie « Allah » de m'avoir donné la volonté et le courage pour réaliser ce travail d'initiation à la recherche

Je tiens à remercier chaleureusement mon promoteur, monsieur MEDDI Mohamed, professeur à l'ENSH, pour m'avoir encadré, je lui exprime ma reconnaissance pour ses précieux conseils qui m'ont guidé dans la réalisation de ce travail.

J'exprime toute ma gratitude à monsieur Mr SALAH Boualem pour l'honneur qu'il m'a fait d'avoir accepté de présider mon jury de soutenance.

Je tien également à remercier les membres de jury, Monsieur REMINI Boualem de l'Université de Blida, Monsieur KHODJET KESBA Omer de l'ENSH – Blida et Monsieur MAHE Gil pour le temps consacré à l'évaluation du présent document et d'avoir fait un long voyage pour assister à la soutenance, je lui exprime ma gratitude.

Je remercie également tout le personnel de l'agence nationale des ressources hydraulique (A.N.R.H) d'Alger et l'office National de la météorologie (O.N.M), pour avoir mis à ma disposition toutes les données pluviométriques, hydrométriques et climatologique utilisées dans cette étude.

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, à tous ceux qui m'ont encouragé, à tous ceux qui m'ont accordé leur confiance.

Hayet SAIDI

Dedicaces

Je dédie ce travail

- A mes parents qui m'ont permis d'améliorer la qualité de ce mémoire par leur encouragement et leur soutien moral, que dieu leur accorde la santé et le bonheur
- A mes sœurs
- A mon frère
- A mes amis

Hayet SAIDI

Résumé

Depuis le milieu du 19ème siècle, un certain réchauffement planétaire a été constaté. Ce réchauffement exceptionnel est en relation directe avec les émissions de gaz à effet de serre

Et qui peut produire un impact significatif sur le comportement hydrologique des cours d'eau, c'est que nous avons montré à travers ce travail.

Il existe un très grand nombre de modèles hydrologiques de la transformation pluie en débit, dans notre travail nous avons utilisé un modèle conceptuel de la famille "génie rural" (GR) nommé GR2M, qui fonctionne à deux paramètres de calage, à un pas de temps mensuel, il nous a donné des résultats satisfaisants pour la phase de calibration ainsi que de validation ce qui nous a motivé de l'utiliser pour étudier et analyser le comportement hydrologique de notre bassin au futur (aux horizons 2020 et 2050) et cela grâce aux prévisions météorologique (précipitation, température).

Notre travail représente un moyen d'alerte pour prendre les précautions nécessaires pour faire face aux changements climatiques, ainsi que les mesures d'adaptation.

Mots clés: réchauffement planétaire, modèles hydrologiques, GR2M, transformation pluie en débit, prévisions, météorologique, gaz à effet de serre

Abstract

Since the 19th century, a certain planetary rise in temperature has been remarked. This exceptional rise has a direct relationship with the emission of gas as green house effect. This phenomenon can produce a significant impact on the hydraulical comport of the water flow, and this what we are going to study through this work.

There is a very great number of hydraulical models of the rain transformation into flow, in our work we used a conceptual model of “rural engineering” (RG) family named GR2M, which functions with two parameters of calibration and a step of monthly time, it gives us satisfied results related to the calibration as well as validation, which motivates us to use for studying and analyzing the hydrological comport of our basin in the future and this thanks to the meteorological predictions(precipitation, temperature).

Our work represents an alert means to take the necessary precautions in order to face the climatic changes as well as the adaptation measures.

Keywords: planetary rise, hydraulical models, GR2M, rain transformation into flow, meteorological predictions, gas as green house effect.

ملخص

منذ منتصف القرن التاسع عشر ة لوحظ نوعا ما ارتفاع في درجة حرارة الأرض هذا الأخير له علاقة بانبعاث الغازات المسببة للاحتباس الحراري الذي يمكن أن يحدث أثر محسوس على السلوك الهيدرولوجي للمجري المائية و هذا ما تطرقنا إليه في دراستنا هذه

يوجد عدد معتبر من النماذج الهيدرولوجية لتحويلات الأمطار إلى منسوب في عملنا هذا استعملنا نموذج تصوري من عائلة الهندسة الريفية (GR) المسمى GR2M الذي يعمل بمعلمتي إسناد و بخطوة وقتية شهرية, ولقد أعطانا هذا النموذج نتائج مرضية بالنسبة لمرحلة الإسناد و التثبيت وهذا ما حفزنا لاستعماله من أجل دراسة و تحليل السلوك الهيدرولوجي مستقبلا لحوضنا و ذلك بفضل التنبؤات الجوية (التساقطات, درجة الحرارة)

يمثل عملنا هذا وسلة تحذير من أجل أخذ الاحتياطات اللازمة من أجل مواجهة التغيرات المناخية وكذا إجراءات التأقلم.

الكلمات الجوهرية : ارتفاع في درجة حرارة الأرض, النماذج الهيدرولوجية, GR2M, تحولات الأمطار إلى منسوب, التنبؤات الجوية, الغازات المسببة للاحتباس الحراري

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	1
Chapitre I: Aperçu général sur les changements climatiques et leur impact sur les ressources en eau	
I.1 Introduction.....	3
I.2. L'effet de serre comme phénomène naturel	3
I.3. Les principaux gaz à effet de serre.....	4
I.4. Les cause de changements climatiques.....	5
I. I.4. 1. L'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre.....	5
I.4.2. La déforestation.....	6
I.5. Les changements hydrologiques suite au changement climatique.....	7
a- Les précipitations.....	7
b- L'évaporation.....	7
c- L'humidité du sol.....	8
d- Les nappes d'eau souterraines.....	8
e- Les rivières et fleuves.....	9
f -Les lacs.....	9
g- La qualité de l'eau.....	9
h- Les glaciers.....	9
i- Evénements extrêmes.....	10
I.6. Modélisation du climat.....	11
I.6 .1. Modèles climatiques planétaires.....	11
I.6.2. Modèles climatiques régionaux.....	11
I.7.Options d'adaptation	16
Conclusion	17
Chapitre II: Intérêt de la modélisation dans les sciences hydrologiques	
II.1 Introduction.....	18
II.2 Bassin versant et bilan hydrologique.....	18
II.3 La genèse de ruissellement.....	19
II.4 Définition du modèle hydrologique.....	20
II.5 Définition de la modélisation pluie-débit.....	21
II.6 Objectif de la modélisation pluie débit.....	22
II.7 Historique d'apparition des modèles hydrologiques.....	22

II.8 Classification des modèles pluie-débit.....	23
II.8.1 Les modèles "boite-noire" (blackbox).....	24
II.8.2 Les modèles « à réservoir », conceptuels ou empiriques.....	28
II.8.3 Modèles fondés sur la physique.....	30
II.9 Choix du modèle.....	30
II.10 Mise en oeuvre des modèles.....	31
Conclusion.....	31
Chapitre III : Synthèse bibliographique de modèles hydrologiques conceptuels	
III.1 Introduction.....	32
III.2 Quelques modèles conceptuels au pas de temps mensuel.....	32
III.2.1 Modèle ABCD (Thomas, 1981).....	32
III.2.2 Modèle de Vandewiele et al. (1991).....	34
III.2.3 Modèle de Gardner (Bhaskar, 1999).....	35
III.2.4 Modèle de Guo (2002).....	36
III.2.5 Modèles ‘Cemagref Antony’ ou ‘GR’.....	37
III.2.5.1 Architecture des modèles ‘GR’.....	40
a- Modèle GR2 (Edijatno et Michel, 1989).....	40
b- modèle de prévision d’étéage GR3 (Michel, 1989).....	41
c- Modèl GR3M.....	42
d- Modèle GR2M (Makhlouf, 1994).....	43
III.2.5.2 Récapitulatif des modèles ‘GR’.....	45
III.3 Choix du modèle.....	47
III.4 Choix de la fonction de critère.....	50
Conclusion.....	51
Chapitre IV : Présentation des caractéristiques du bassin d’étude	
IV.1 Présentation de la région d’étude.....	52
IV.1 .1 Caractéristiques Générales du Bassin Versant de l’oued Mina.....	52
IV.1 .1.1 Situation Géographique.....	52
IV.1 .1.2 Géologie.....	54
IV.1 .1.3 La végétation.....	56
IV.1 .1.4 La topographie.....	59
IV.1 .1.5 Le climat.....	59

IV.1 .1.6 La température.....	59
IV.1 .1.7 Humidité relative.....	61
IV.2 Hydrographie et hydrologie du bassin versant de l'oued mina.....	61
IV.2 .1 Présentation des stations hydrométriques.....	63
IV.2 .2 Morphométrie des sous bassins au droit des stations hydrométriques.....	63
IV.2 .2.1 Caractéristiques de forme.....	63
IV.2 .2.2 Caractéristiques topographiques.....	63
IV.2 .2.3 Caractéristiques hydrographique.....	65
Conclusion.....	69
Chapitre V : Application du modèle GR2M et l'étude de tendance des écoulements	
V.1 Introduction.....	70
V-2 Homogénéisation des données.....	70
V.3 Les données du modèle.....	71
V.3.1 Les données pluviométriques.....	71
V.3. 2 L'évapotranspiration potentielle.....	72
V.3. 3 Les données hydrométriques.....	73
V.4 Méthodologie de modélisation.....	73
V.4.1 Le calage.....	73
V.4.2 La validation.....	73
V.4.3 Optimisation des paramètres de calage du modèle.....	74
V.4.4 Initialisation du système et la période de mise en route.....	74
V.5 Etude comparative et choix de la série de référence.....	75
V.5.1 Comparaison des débits saisonniers entre la période de référence (1960-1990) et l'horizon 2020.....	78
V.5.2 Comparaison des débits saisonniers entre la période de référence (1960-1990) et l'horizon 2050.....	79
V.5.3 Comparaison des débits saisonniers entre la période de référence (1970-2000) et l'horizon 2020.....	81
V.5.4 Comparaison des débits saisonniers entre la période de référence (1970-2000) et l'horizon 2050.....	82
V.5.5 Comparaison des projections de débits saisonniers entre deux périodes de référence à l'horizon 2020.....	84

V.5.6 Comparaison des projections de débits saisonniers entre deux périodes de référence à l'horizon 2050.....	84
V.6 Résultats du calage et la validation du modèle GR2M.....	88
V.7 Discussion des résultats du calage et de la validation.....	91
V.7.1 Résultats du calage.....	91
V.7.2 Résultats de la validation.....	91
V.8 Résultats et interprétation.....	92
V.8.1 Comparaison des débits saisonniers entre la période de référence et l'horizon 2020.....	92
V.8.2 Comparaison des débits saisonniers entre la période de référence et l'horizon 2050.....	95
V.9 Discussion régionale.....	98
Conclusion.....	99
conclusion générale.....	100

Liste des figures

Figure I-1 : L'effet de serre.....	3
Figure I-2 : Les émissions de gaz carbonique.....	5
Figure I-3 : Tendances des précipitations annuelles.....	13
Figure I-4 : Hausse de températures moyennes.....	14
Figure I-5 : Variation de ruissellement annuel (mm/an).....	15
Figure II-1 Cycle de l'eau.....	19
Figure II-2: Architecture du modèle RNA à trois couches.....	26
Figure III-1: Architecture du modèle ABCD (Thomas, 1981).....	33
Figure III-2: Architecture du modèle de Vandewiele et al. (1991).....	35
Figure III-3: Architecture du modèle de Gardner (Bhaskar, 1999).....	36
Figure III-4: Evolution des travaux des modèles 'GR'.....	39
Figure III-5: Architecture du modèle GR2 (Edijatno et Michel, 1989).....	40
Figure III-6: Architecture du modèle de prévision d'étiage GR3 (Michel, 1989).....	41
Figure III-7: Architecture du modèle GR3M issu des travaux Kabouya-Makhlouf-Michel...	42
Figure III-8: Architecture du modèle GR2M (Makhlouf, 1994).....	43
Figure III-9: Schéma conceptuel du modèle GR2M modifié (2002).....	48
Figure IV-1 : Situation du bassin versant de l'oued Mina.....	53
Figure IV-2 : températures enregistrées à la station de Frenda (°C).(1970/71-1999/00).....	60
Figure IV-3 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Mina.....	62
Figure IV-4 : Carte topographique du bassin versant de l'oued Mina.....	64
Figure IV-5 : Courbes hypsométriques et hystogrammes des fréquences des bassins versants.....	66
Figure IV-6 : Profil en long de l'oud Mina et ses affluents.....	67
Figure V-1 : Variabilité pluviométrique dans le Bas Cheliff et la Mina (période 1961- 1990).....	73
Figure V-2 : Variabilité pluviométrique dans le Bas Cheliff et la Mina (période 1961-1990) et projection pour les horizons 2025 et 2050 (Meddi et al., 2010).....	74
Figure V-3 : Variabilité des pluies et débits observée et simulée sur la période de calage (1960-1976) pour la station de l'Oued Al Abtal.....	76
Figure V-4 : Variabilité des pluies et débits observée et simulée sur la période de validation (1977-1990) pour la station de l'Oued Al Abtal.....	76

Figure V-5 : Variabilité des pluies et débits observée et simulée sur la période de calage (1970-1986) pour la station de l'Oued Al Abtal.....	77
Figure V-6 : Variabilité des pluies et débits observée et simulée sur la période de validation (1987-2000) pour la station de l'Oued Al Abtal.	
Figure V-7 : Tendence des écoulements à l'horizon 2020 (Station de l'Oued Al Abtal) par rapport à la période (1960-1990).....	78
Figure V-8 : Tendence des écoulements à l'horizon 2050 (Station de l'Oued Al Abtal) par rapport à la période (1960-1990).....	79
Figure V-9 : Tendence des écoulements à l'horizon 2020 (Station de l'Oued Al Abtal) par rapport à la période (1970-2000).....	81
Figure V-10 : Tendence des écoulements à l'horizon 2050 (Station de l'Oued Al Abtal) par rapport à la période (1970-2000).....	82
Figure V-11 : Variabilité des pluies et débits observée et simulée sur la période de calage (1970-1996) pour la station d'Ain Hamarra.....	89
Figure V-12 : Variabilité des pluies et débits observée et simulée sur la période de validation (1987-2000) pour la station d'Ain Hamarra.....	89
Figure V-13 : Variabilité des pluies et débits observée et simulée sur la période de calage (1970-1996) pour la station de Sidi AEK Djilali.....	90
Figure V-14 : Variabilité des pluies et débits observée et simulée sur la période de validation (1987-2000) pour la station de Sidi AEK Djilali.....	90
Figure V-15 : Tendence des écoulements à l'horizon 2020 (Station d'Ain Hamarra).....	93
Figure V-16 : Tendence des écoulements à l'horizon 2020 (Station de Sidi AEK Djilali).....	94
Figure V-17 : Tendence des écoulements à l'horizon 2050 (Station d'Ain Hamarra).....	96
Figure V-18 : Tendence des écoulements à l'horizon 2050 (Station de Sidi AEK Djilali).....	97

Liste des tableaux

Tableau III-1 : Récapitulatif des modèles 'GR'.....	46
Tableau III-2: Forme de fonctions critère.....	50
Tableau IV-1 : Les différentes formations lithologiques du bassin versant de la Mina.....	54
Tableau IV-2 : Les différentes cultures du bassin versant de l'oued Mina.....	57
Tableau IV-3 : Classes de pentes dans le bassin versant de l'oued Mina (Kouri, 1993).....	59
Tableau IV-4 : Températures enregistrées à la station de Frenda (°C).(1970/71-1999/00).....	60
Tableau IV-5 : Humidité relative (%) enregistrée de la station de Tiaret (1970-1995).....	61
Tableau IV-6 : Code, année de service et coordonnées Lambert des stations hydrométriques.....	63
Tableau IV-7 : Caractéristiques physiographiques des bassins versants de la Mina.....	68
Tableau V-1 : Valeurs de coefficient de correction $F(\lambda)$ du bassin versant de l'Oued Mina.....	72
Tableau V-2 : Paramètres optimisés du modèle GR2M pour les périodes 1960-1990 et 1970-2000.....	75
Tableau V-3: Débits moyens saisonniers de l'Oued Mina à la Station de l'Oued Al Abtal à l'horizon 2020 (scénario bas) par rapport à la période de référence (1960-1990).....	78
Tableau V-4: Débits moyens saisonniers de l'Oued Mina à la Station de l'Oued Al Abtal à L'horizon 2020 (scénario haut) par rapport à la période de référence (1960-1990).....	78
Tableau V-5: Débits moyens saisonniers de l'Oued Mina à la Station de l'Oued Al Abtal à l'horizon 2050 (scénario bas) par rapport à la période de référence (1960-1990).....	79
Tableau V-6: Débits moyens saisonniers de l'Oued Mina à la Station de l'Oued Al Abtal à L'horizon 2050 (scénario haut) par rapport à la période de référence (1960-1990).....	79
Tableau V-7: Débits moyens saisonniers de l'Oued Mina à la Station de l'Oued Al Abtal à l'horizon 2020 (scénario bas) par rapport à la période de référence (1970-2000).....	81
Tableau V-8: Débits moyens saisonniers de l'Oued Mina à la Station de l'Oued Al Abtal à l'horizon 2020 (scénario haut) par rapport à la période	

de référence (1970-2000).....	81
Tableau V-9: Débits moyens saisonniers de l'Oued Mina à la Station de l'Oued Al Abtal à l'horizon 2050 (scénario bas) par rapport à la période de référence (1970-2000).....	82
Tableau V-10 : Débits moyens saisonniers de l'Oued Mina à la Station de l'Oued Al Abtal à l'horizon 2050 (scénario haut) par rapport à la période de référence (1970-2000).....	82
Tableau V-11 : Réduction de débits saisonniers pour l'horizon 2020(scénario bas).....	84
Tableau V-12 : Réduction de débits saisonniers pour l'horizon 2020(scénario haut).....	84
Tableau V-13 : Réduction de débits saisonniers pour l'horizon 2050(scénario bas).....	84
Tableau V-14 : Réduction de débits saisonniers pour l'horizon 2050(scénario haut).....	85
Tableau V-15 : Précipitations saisonnières (mm) de la période (1960-1990).....	86
Tableau V-16 : Précipitations saisonnières (mm) de la période (1970-2000).....	87
Tableau V-17 : illustration des résultats de la procédure de calage-validation du modèle GR2M.....	88
Tableau V-18 : résultats d'application de critères de performance du modèle (calibration)...	91
Tableau V-19: résultats d'application de critères de performance du modèle (validation).....	91
Tableau V-20: Débits moyens saisonniers de l'Oued El Abd à la Station d'Ain Hamarra à l'horizon 2020 (scénario bas).....	93
Tableau V-21: Débits moyens saisonniers de l'Oued EL Abd à la Station d'Ain Hamarra à l'horizon 2020 (scénario haut).....	93
Tableau V-22: Débits moyens saisonniers de l'Oued El Haddad à la Station de Sidi AEK Djilali à l'horizon 2020 (scénario bas).....	94
Tableau V-23: Débits moyens saisonniers de l'Oued El Haddad à la Station de Sidi AEK Djilali à l'horizon 2020 (scénario haut)	94
Tableau V-24 : Débits moyens saisonniers de l'Oued El Abd à la Station d'Ain Hamarra à l'horizon 2050 (scénario bas)	95
Tableau V-25 : Débits moyens saisonniers de l'Oued El Abd à la Station d'Ain Hamarra à l'horizon 2050 (scénario haut)	95
Tableau V-26 : Débits moyens saisonniers de l'Oued El Haddad à la Station de Sidi AEK Djilali à l'horizon 2050 (scénario bas).....	96
Tableau V-27 : Débits moyens saisonniers de l'Oued El Haddad à la Station de Sidi AEK Djilali à l'horizon 2050 (scénario haut).....	97

Introduction générale

Introduction générale

En tant qu'élément de base indispensable à la vie, l'eau demeure dans son devenir et ses effets, un sujet de questionnement de première importance. Cette ressource vitale devient de plus en plus rare dans le monde entier. En effet, son inégale répartition, la croissance démographique, aux quelles s'ajoutent l'effet de pollution des ressources en eau et les graves sécheresses ont rendu le problème d'eau très crucial ces dernières décennies. Plusieurs pays se sont lancés dès lors à la recherche de nouvelles sources innovatrices. Pour palier à cette menace.

L'étude de la science de l'eau nécessite la connaissance et la maîtrise du cycle de l'eau. Pour établir le cycle hydrologique, il faut connaître les formes d'existence de l'eau dans la nature : océans, rivières, lacs mais également glaciers, sols, air, eaux, souterraines. Il faut également quantifier les volumes et les flux d'eau.

Le changement climatique est devenu un enjeu important depuis une vingtaine d'années pour plusieurs raisons. La première vient du fait que les pays industrialisés se préoccupent plus en plus de qualité de vie, ce qui a diminué le seuil de tolérance aux calamités naturelles. Par ailleurs, les progrès scientifiques qui mettent en évidence des évolutions à court et moyen terme. En fin les premières études lancées il a une vingtaine d'années étaient vraiment alarmiste. Elles ont produit une forte médiatisation de domaine

Le premier groupe d'experts internationaux sur l'évolution du climat (GIEC) établit en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale et le programme des nations unies pour l'environnement (PNUE) a posé les premiers fondements scientifiques de cette nouvelle discipline. Le GIEC a montré que les gaz à effet de serre, principalement le gaz carbonique, issu de la combustion du charbon et de pétrole étaient les acteurs du réchauffement constaté sur la planète, ce fut la première démonstration de l'effet de comportement humain sur notre écosystème, cette augmentation de la température de l'air provoquerait des conséquences pouvant se traduire par une pression sur nos ressources vivants, ce que nous allons montrer à travers cette étude (Jean Michel Tanguy, 2004).

Le développement de l'informatique et des études sur les systèmes complexes naturels (à l'image des bassins versants), ont provoqué ces dernières décennies, une prolifération de modèles mathématiques en hydrologie, qui aident à comprendre, gérer et réduire la complexité des différents phénomènes hydrologiques.

La transformation des pluies incidentes en débits à l'exutoire d'un bassin, représente le processus le plus complexe à modéliser. Deux types de modèles sont couramment utilisés pour conceptualiser cette relation pluie-débit: les modèles conceptuels et les modèles "boîte noire", des modèles conceptuels (modèles à réservoirs et empiriques) ont longtemps été une référence opérationnelle pour les hydrologues pour transformer la pluie en débit, nous nous intéressons dans cette étude au modèle conceptuel GR2M développé au Cemagref (Makhlouf et Michel, 1994 Mouelhi, 2003) à cause de sa robustesse et peu consommatrice en données.

Notre thèse est structurée en cinq parties

- le premier chapitre intitulé « Aperçu général sur les changements climatiques et leur impact sur les ressources en eau » présente les causes de changements climatiques et les changements hydrologiques qui s'en suivent ainsi que les Options d'adaptation.

- Le second chapitre intitulé « Intérêt de la modélisation dans les sciences hydrologiques » illustre l'objectif de la modélisation pluie débit et La stratégie adoptée lors de la sélection d'un modèle hydrologique.

- le troisième chapitre intitulé « Synthèse bibliographique de modèles hydrologiques conceptuels » dans lequel nous avons présenté quelques modèles conceptuels au pas de temps mensuel,

Notre choix a été porté sur modèle GR2M à deux paramètres dans sa nouvelle version modifiée conceptualisée.

- le quatrième chapitre intitulé « Présentation des caractéristiques du bassin d'étude » présente en détail la région d'étude (caractéristiques morphologiques du bassin versant, l'hypsométrie, le régime des précipitations et le régime d'écoulement.

- le quatrième chapitre intitulé « Application du modèle GR2M » dans ce chapitre nous avons effectué la calibration de notre modèle et l'optimisation de ses deux paramètres ainsi que sa validation et grâce aux prévisions climatiques nous avons pu analyser le comportement hydrologique du bassin devant les changements climatiques.

Chapitre I

Aperçu général sur les changements climatiques et leur
impact sur les ressources en eau

I.1 Introduction

Le terme « changements climatiques » se réfère à des changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables (GIEC, 2007).

Depuis le début de la Révolution Industrielle, l'impact des activités humaines sur l'environnement est devenu de plus en plus important, altérant l'équilibre climatique et ayant ainsi des effets sur la température et les précipitations. Les conséquences de ces changements climatiques se manifestent par des pics de température, des sécheresses, des inondations ainsi qu'une élévation du niveau de la mer. Aujourd'hui, les changements climatiques sont considérés comme l'une des plus grandes menaces sur l'environnement et le bien-être humain

I.2. L'effet de serre comme phénomène naturel

Dans l'atmosphère (qui entoure la Terre) on retrouve une couche de gaz : les gaz à effet de serre. Cette couche de gaz agit comme les fenêtres d'une serre et capte la chaleur du soleil. Les rayons du soleil traversent cette couche de gaz et s'en vont réchauffer la surface de la Terre. La surface de la Terre, ainsi réchauffée, réémet des radiations vers l'atmosphère. Toutefois, la couche de gaz à effet de serre absorbe une grande quantité de ces radiations, les empêchant de retourner dans l'espace. Ceci augmente la température à la surface de la Terre en assurant une température moyenne globale de 15 oC. (Pruneau et al. 2004).



Figure I-1 : L'effet de serre (Source : Environnement Canada)

I.3. Les principaux gaz à effet de serre

- Les vapeurs d'eau (H₂O) proviennent de la respiration, la transpiration et l'évaporation. Elle ne reste que quelques jours dans l'atmosphère.
- Le dioxyde de carbone (CO₂) est également un produit de la respiration des animaux, de celle des plantes et aussi de la combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole . . .). Le CO₂ a une durée de vie de 100 ans dans l'atmosphère.
- Le méthane (CH₄) provient des marécages, des rizières, de la digestion des animaux, de la décomposition des ordures, ou est produit par les termites. Il est 21 fois plus efficace que le CO₂ pour capter la chaleur. Le volume de ce gaz a augmenté de 11 % depuis 1978. Il a une durée de vie d'environ 14 ans.
- les chlorofluorocarbures (CFC) proviennent des agents réfrigérants et des bombes aérosol. Ces gaz détruisent la couche d'ozone et contribuent beaucoup à l'effet de serre. Leur durée de vie est d'environ 1000 ans. Ils sont 10 000 fois plus efficaces que le CO₂ pour capter la chaleur, La concentration des chlorofluorocarbures a été réduite grâce au protocole de Montréal signé en 1987 : Partout où leur utilisation n'était pas indispensable il a fallu les remplacer par d'autres gaz. Mais, d'après une étude récente, les nouveaux gaz utilisés ne détruiraient plus la couche d'ozone mais contribueraient encore plus à l'effet de serre.
- Le dioxyde d'azote (N₂O) (encore appelé oxyde nitreux ou protoxyde d'azote) est en grande partie le résultat de l'agriculture utilisant les engrais azotés. Sa durée de vie est de 120 ans et il est 310 fois plus efficace que le CO₂ pour capter la chaleur.
- Les HFC (hydrofluorocarbures) sont produits par la climatisation. Ils polluent 1300 fois plus vite que le CO₂.



Figure I-2 : Les émissions de gaz carbonique (source : GIEC, 2007)

I.4. Les causes de changements climatiques

Les changements climatiques sont dus à un renforcement de l'effet de serre naturel, par les activités humaines, ce qui a pour conséquence d'augmenter sensiblement la température sur terre. Deux causes principales sont à pointer.

I.4. 1. L'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre

La recherche scientifique a montré qu'il n'y a jamais eu autant de concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère depuis 800.000 ans. Depuis la révolution industrielle, l'utilisation des ressources fossiles (pétrole, gaz, charbon) comme source d'énergie a explosé, provoquant l'augmentation des rejets de CO₂. Par ailleurs, les activités agricoles -élevages, engrais, rizières et industrielles rejettent du méthane (CH₄) et de l'oxyde nitreux (N₂O). De plus. L'ensemble de ces rejets provoque l'augmentation des GES dans l'atmosphère terrestre. En temps normal, la terre est capable d'absorber les surplus de gaz à effet de serre afin de garder un équilibre des températures dans l'atmosphère. Par exemple, les océans jouent un rôle tampon ; ils absorbent le CO₂ de l'atmosphère et le lui rendent si nécessaire. Cependant, aujourd'hui la quantité de CO₂ est tellement importante que les océans ne sont plus capables d'appliquer ce mécanisme.

➤ *Les rejets de gaz à effet de serre d'origine anthropique sont responsables d'environ 75% du phénomène des changements climatiques (GIEC, 2008).*

I.4.2. La déforestation

La déforestation est responsable d'un quart du phénomène des changements climatiques. En effet, les zones forestières stockent beaucoup de carbone tant au-dessus du sol qu'en dessous. Une fois coupés, les arbres larguent le CO₂ accumulé pendant des siècles. De plus, moins il y a d'arbres, moins il y a de CO₂ absorbé pour la photosynthèse... Ce sont surtout les forêts primaires des zones tropicales qui connaissent la déforestation (agriculture, bois de chauffage, meuble, gain de surface...). Selon la FAO, environ 13 millions d'hectares de forêts disparaissent annuellement sur Terre, soit 1 terrain de football toutes les quinze secondes.

➤ *La déforestation est responsable d'environ 25% du phénomène des changements Climatiques (GIEC, 2008).*

❖ Quelques chiffres plutôt effrayants (GIEC, 2008)

- Un habitant de pays développé rejette 5 tonnes de CO₂ par an.
- Un habitant de pays en développement rejette 400 kg de CO₂ par an.
- 74 % de la population humaine (soit 4 milliards 440 millions de personnes) pourrait être engloutie par les océans si on ne réagit pas assez vite.
- La température a déjà augmenté de 0.5 °C en un siècle.
- Si on ne fait rien la température augmentera de 5°C d'ici un siècle.
- En 150 ans la quantité de CO₂ a augmenté de 50 % dans l'atmosphère.
- Dans 100 ans il n'y aura plus de glace au pôle nord.
- On estime à plus de 3 milliards de tonnes de CO₂ les rejets annuels dans l'atmosphère.
- Les États-Unis déversent par an 10 fois plus de gaz à effet de serre que l'Afrique mais refuse tout de même de signer le protocole de Kyoto.
- Une montée d'un mètre seulement du niveau des océans risquerait d'inonder un demi-million de kilomètres de côtes dans le monde entier.

I.5. Les changements hydrologiques suite au changement climatique (Godefroy et al 2004)

L'accumulation des gaz à effet de serre provoque une augmentation de la température moyenne sur terre et dérègle le climat.

a- Les précipitations

Les précipitations sont le principal facteur de variabilité dans le cycle de l'eau. A un endroit donné, il y a des variations quotidiennes, saisonnières, annuelles et décennales des précipitations.

Différentes tendances de variations des précipitations aux échelles saisonnière et annuelle ont pu être mises en valeur. Il y aurait une augmentation des précipitations annuelles dans les moyennes et hautes latitudes et une diminution dans les régions subtropicales. D'autre part, pour les régions tempérées comme l'Europe, il y aurait une augmentation des précipitations pendant l'hiver (surtout dans le nord de l'Europe) et une diminution des précipitations pendant l'été (surtout dans le Sud de l'Europe).

b- L'évaporation

Elle comprend l'évaporation qui vient du sol ou des surfaces recouvertes d'eau, et l'évapotranspiration. Elle dépend de l'énergie reçue par le sol, du taux d'humidité de l'air et de la turbulence de l'air au-dessus du sol.

Comme l'air peut contenir plus de vapeur d'eau quand sa température augmente, un réchauffement de l'atmosphère pourrait entraîner une augmentation de l'évaporation du sol. Ceci est vérifié dans les régions humides où l'humidité de l'air est le facteur limitant à l'évaporation. Mais dans les régions sèches, l'évaporation est essentiellement dirigée par la quantité d'énergie reçue par le sol et son taux d'humidité, le réchauffement ne changera donc rien à la situation actuelle.

On pourrait s'attendre aussi à une augmentation de l'évapotranspiration avec la diminution de l'humidité de l'air, mais plusieurs systèmes biologiques de régulation pourraient contrer cet effet à court ou long terme. A court terme, c'est simplement la capacité des plantes à diminuer leurs pertes en eau lorsqu'elle se fait rare. A long terme, l'augmentation de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère pourrait jouer un rôle car elle entraîne de la part des plantes une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau. Mais cette augmentation peut entraîner aussi une croissance accrue des plantes qui annulerait l'augmentation de cette efficacité. L'effet global du CO₂ sur les plantes est encore mal connu, il est très difficile aujourd'hui de donner des tendances d'évolution de l'évapotranspiration.

c- L'humidité du sol

D'autre part, l'évaporation peut être limitée par la quantité d'eau contenue par le sol, c'est-à-dire son humidité. En effet, il a été prouvé (Gregory et al, 1997) que dans l'Hémisphère Nord, suite à l'augmentation de température, l'évaporation serait plus forte qu'avant en hiver et au printemps et donc que l'humidité du sol serait de plus en plus faible pendant l'été.

Il faut toutefois noter que ces tendances sont à moduler suivant la composition du sol. En général, moins un sol peut contenir d'eau, plus il sera sujet aux variations dues au changement climatique.

La fréquence et l'intensité du gel peuvent influencer la capacité d'un sol à contenir de l'eau. La baisse de la fréquence et de l'intensité du gel, c'est la tendance actuelle dans les pays tempérés à cause du changement climatique, réduit la quantité d'eau que peuvent contenir les sols et donc son humidité et pourrait augmenter la quantité d'eau qui circule en surface. L'évolution à la baisse de l'humidité du sol entraînerait un besoin accru en irrigation.

d- Les nappes d'eau souterraines

C'est la principale source d'eau utilisée par l'homme dans le monde, mais il y a eu très peu de travaux de recherche sur les effets potentiels du changement climatique. Quelques hypothèses ont tout de même été avancées. Par exemple, dans les moyennes latitudes, suite à l'augmentation des précipitations pendant l'hiver, les nappes pourraient se remplir davantage. Mais nous avons vu aussi que l'évaporation des sols pourrait augmenter en hiver et au printemps. Les chercheurs ne savent pas encore quel effet pourrait l'emporter sur l'autre, cela dépend d'abord du type de nappe.

Il existe en effet deux types de nappes phréatiques, les nappes non confinées et les nappes confinées. Les nappes non confinées sont rechargées directement par les précipitations locales, les rivières et lacs. La majorité des nappes sont de ce type et ce sont celles qui sont les plus sujettes au changement climatique. Elles évoluent en effet en étroite relation avec la quantité d'eau qui leur arrive des pluies ou des rivières, et avec la demande du sol en évaporation, surtout quand elles sont peu profondes. D'autre part certaines nappes d'eau douce peu profondes et proches de la mer sont menacées par l'augmentation du niveau de la mer. une nappe confinée est située en dessous d'une couche de roches imperméables. Son évolution ne dépend donc pas des précipitations locales. Elles sont rechargées par des précipitations, des lacs ou des rivières à quelques kilomètres comme à quelques milliers de kilomètres de la nappe et ne sont donc pas affectées en général par la variabilité saisonnière

ou annuelle des précipitations ou de la température. Elles sont par contre très vulnérables à une exploitation trop intense par l'homme.

e- Les rivières et fleuves

La majorité des études hydrologiques sur les impacts du changement climatique se sont concentrées sur les évolutions des débits des fleuves et rivières. Et cela est l'objectif de ce travail

f -Les lacs

Ils sont particulièrement vulnérables aux changements des paramètres climatiques et sont donc souvent un très bon indicateur de l'évolution de ces paramètres. Les lacs qui n'ont aucun déversoir sont les plus vulnérables à une diminution du débit des rivières qui s'y jettent ou à une augmentation de l'évaporation. En effet, pour ces lacs, la quantité d'eau évaporée est environ égale à l'eau qui arrive de l'amont et une variation de ces deux facteurs peut faire changer rapidement la superficie du lac. Un lac de ce type peut disparaître presque complètement en une décennie si le débit des rivières qui s'y jettent baisse fortement et ne compense plus l'évaporation.

Le changement climatique pourrait avoir aussi des conséquences sur la qualité de l'eau en entraînant une augmentation de la température de l'eau ou en diminuant la durée de la période où le lac est recouvert de glace.

g- La qualité de l'eau

Les conséquences du changement climatique sur la qualité de l'eau dans les rivières sont assez variables : elle pourrait s'améliorer ou se détériorer suivant l'augmentation ou la diminution du débit de la rivière.

Le réchauffement climatique peut toutefois entraîner une tendance générale sur la qualité de l'eau. En effet, une augmentation de la température de l'eau entraîne une diminution de la quantité d'oxygène dissous qu'elle peut contenir et pourrait donc avoir le même effet qu'une augmentation de la pollution organique.

h- Les glaciers

Dans les zones non polaires et particulièrement sous les tropiques, un retrait général des glaciers a été observé depuis la fin du petit âge glaciaire, c'est-à-dire depuis le 18^{ème} ou le 19^{ème} siècle. On observe aujourd'hui que le retrait de ces glaciers s'accélère, l'augmentation des précipitations pendant l'hiver ne compensant pas la hausse de température et donc l'augmentation de la fonte du glacier pendant l'été. Les glaciers tropicaux sont les plus menacés.

Oerlemans et al (1998) ont simulé les variations de masse de douze glaciers situés dans le monde entier. Ils ont conclu qu'avec une augmentation de la température de 0,4°C par décennie, si les précipitations n'évoluent pas, tous les glaciers étudiés auront disparu en 2100.

i- Evénements extrêmes

Ce sont les principales préoccupations des décideurs dans le domaine de la gestion de l'eau. Il est primordial de connaître l'évolution de la fréquence des inondations et des sécheresses avec le changement climatique pour décider de la construction de nouveaux barrages.

L'augmentation du risque d'inondation est souvent citée comme l'un des risques les plus importants liés au changement climatique. Mais il y a eu relativement peu d'études réalisées sur le sujet. Il est en effet très difficile de simuler avec des modèles climatiques globaux des événements de courte durée et de forte intensité.

Certaines études sont toutefois arrivées à la conclusion que la fréquence des inondations sous des latitudes tempérées pourrait augmenter suite à l'augmentation générale des précipitations.

Le scénario le plus extrême auquel Mirza et al (1998) arrivent à montrer que pour une augmentation globale de température de 2°C, les fréquences des inondations du Gange, du Brahmaputra et du Meghna pourraient augmenter respectivement de 15, 6 et 19%.

Les sécheresses sont beaucoup plus difficiles à définir que les inondations en termes quantitatifs. Une sécheresse ne sera pas en effet ressentie comme telle si le niveau des oueds est inhabituellement bas mais si les réservoirs d'eau sont pleins suite à un hiver pluvieux. L'état des ressources en eau ne dépend pas uniquement des facteurs météorologiques mais aussi de la manière de gérer cette ressource.

I.6. Modélisation du climat

I.6.1. Modèles climatiques planétaires

La méthode d'élaboration de scénarios la plus courante et la plus largement connue utilise l'information provenant des modèles climatiques planétaires (MCP). Ces modèles également appelés modèles de circulation générale, sont des représentations mathématiques des processus physiques à grande échelle qui se produisent dans le système Terre-atmosphère-océan, qui nous tracent un portrait complet des changements climatiques futurs.

Les MCP les plus récents contiennent une représentation des variations annuelles de la composition atmosphérique entre 1860 et 1990 environ, et sont donc capables de simuler les conditions planétaires moyennes au cours de cette période avec beaucoup plus de fiabilité que les modèles précédents. Ils nous permettent également de modéliser les effets des aérosols sulfatés, qui ont tendance à refroidir le climat, de même que les effets d'une augmentation des concentrations de gaz à effet de serre, qui ont tendance à réchauffer les températures.

I.6.2. Modèles climatiques régionaux

L'élaboration de modèles climatiques régionaux (MCR) a beaucoup progressé depuis 10 ans les données de MCR ont une résolution spatiale plus élevée que celle des MCP, elles s'appuient sur les données du MCP, de sorte qu'elles peuvent comporter les mêmes erreurs systématiques. Un de leurs avantages par contre, réside dans le fait qu'ils fournissent de l'information plus spatialement détaillée.

- **Qu'est-ce qu'un scénario ?**

Les scénarios servent à prévoir l'évolution possible des conditions dans l'avenir. Il faut entendre par scénarios une « description cohérente structurée et plausible d'un état futur possible du monde », on peut s'en servir pour on tenir des données utiles dans les études sur la vulnérabilité, les impacts et l'adaptation, circonscrire l'éventail du futur plausible ; explorer les ramifications des décisions en matière d'adaptation et d'atténuation ; et sensibiliser les gens au problème du changement climatique.

Il existe une multitude de scénarios portant sur un large éventail des principales forces démographiques, économiques, et technologiques qui détermineront les émissions futures de gaz à effet de serre et d'aérosols sulfatés. Chaque scénario représente une quantification spécifique de l'un des canevas retenus, pour alors former des familles de scénarios

A1.

La famille de scénarios A1 décrit un monde futur caractérisé par une croissance économique très rapide, une population mondiale qui atteint son maximum au milieu du siècle et qui décroît ensuite, et l'apparition de nouvelles technologies plus efficaces. Cette famille se divise en trois groupes qui diffèrent par leur orientation technologique: usage intensif de combustibles fossiles (A1FI), sources d'énergies autre que fossiles (AIT), et un équilibre entre les deux (A1B).

A2.

La famille de scénarios A2 décrit un monde avec une augmentation constante de la population mondiale. La croissance économique par habitant comme le progrès technologique sont plus fragmentés et plus lents que dans les autres canevas.

B1.

La famille de scénarios B1 décrit un monde convergent doté des mêmes caractéristiques démographiques, la population mondiale atteignant son maximum au milieu du siècle pour diminuer ensuite. L'accent est mis sur une recherche mondiale de viabilité économique, sociale et environnementale.

B2.

Pour la famille B2, un monde qui se caractérise par une population mondiale qui ne cesse d'augmenter, par un développement économique de niveau intermédiaire et par un progrès technologique moins rapide et plus divers que dans les autres canevas.

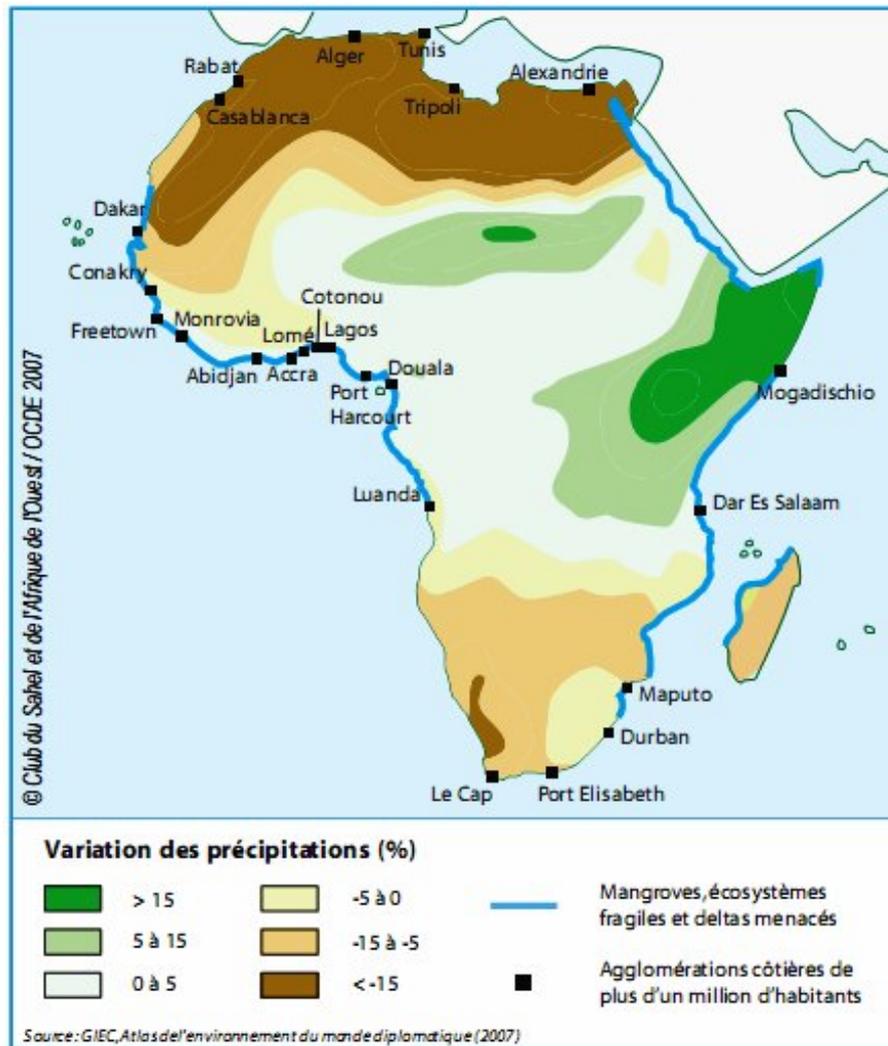


Figure I-3 : Tendances des précipitations annuelles

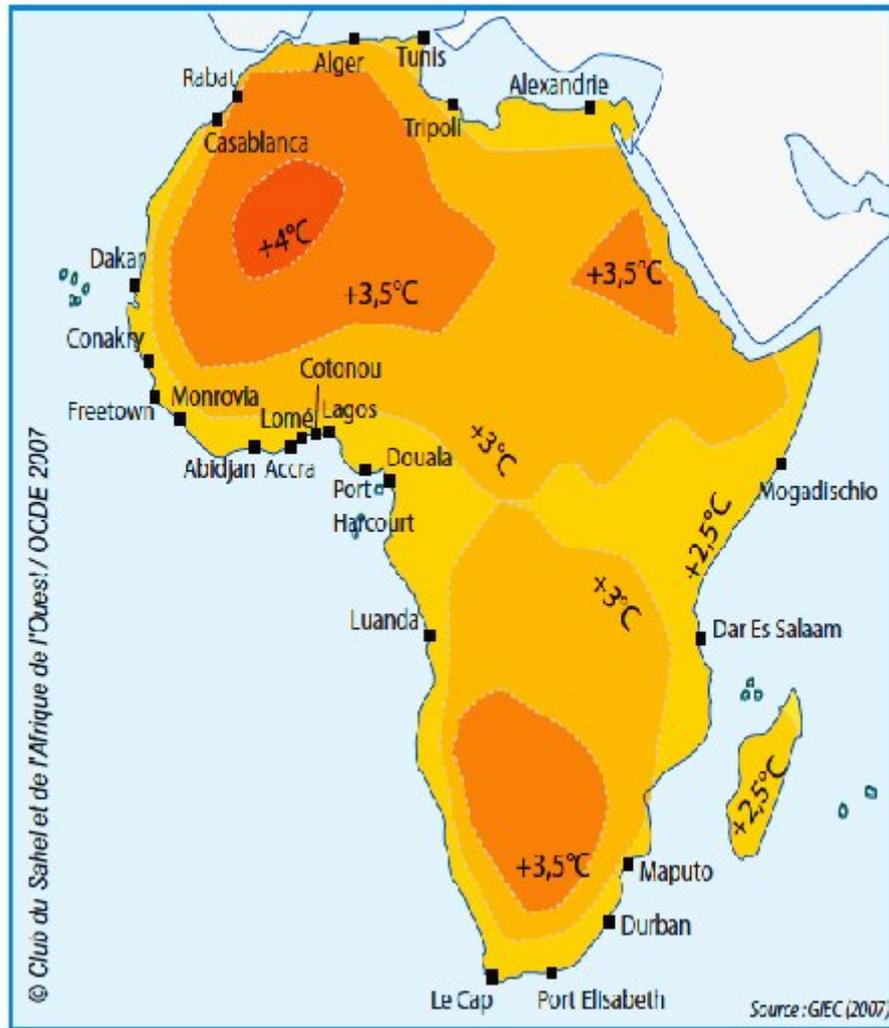


Figure I-4 : Hausse de températures moyennes

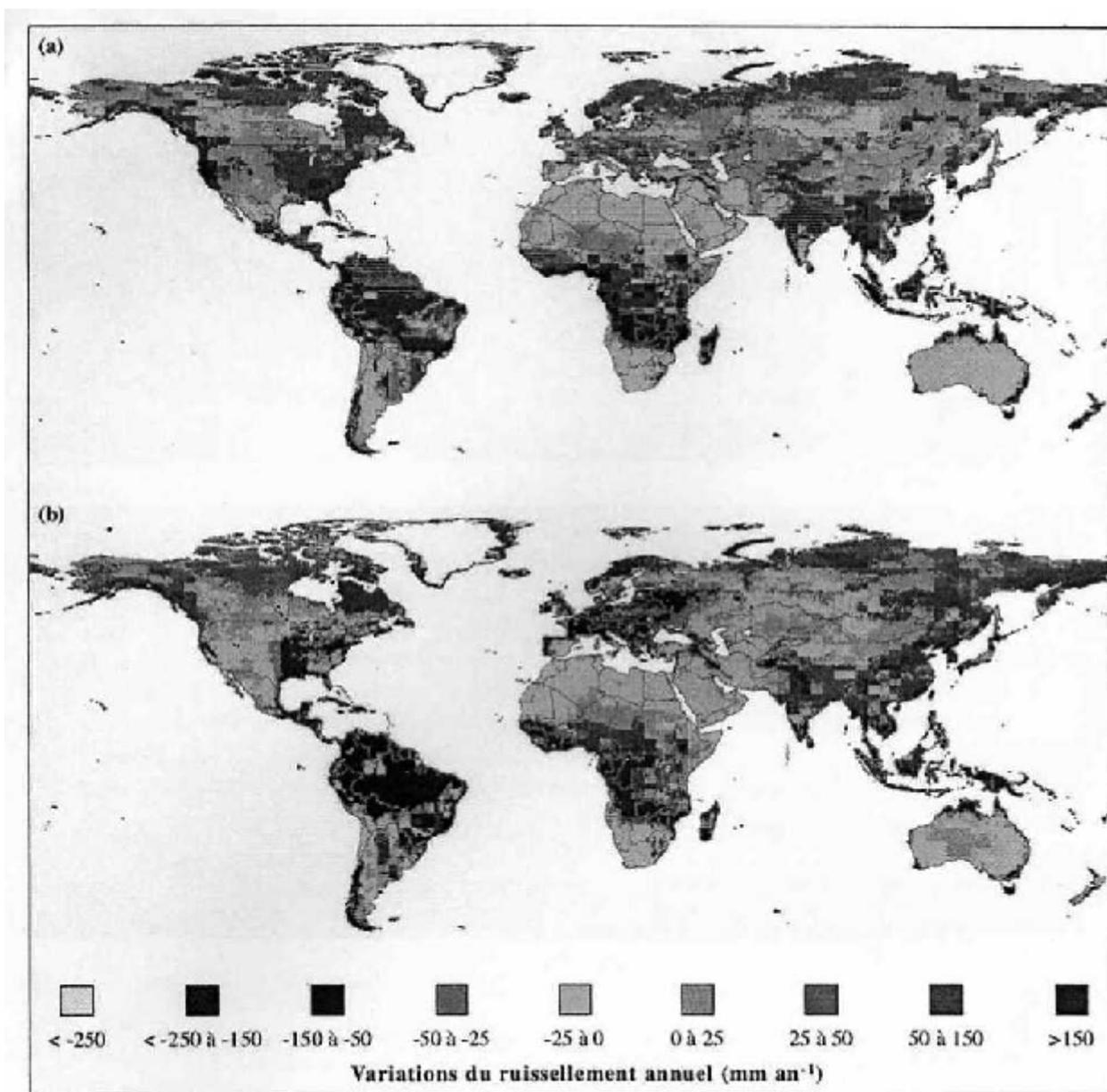


Figure I-5 : Variation de ruissellement annuel (mm/an) (GIEC, 2007)

I.7.Options d'adaptation

A la base des mesures d'adaptation, il faut réhabiliter la notion de vitalité de l'eau. Cela doit se faire par l'information, la formation, l'éducation et à travers la réglementation et la politique tarifaire. La mobilisation de l'eau ne peut pas se concevoir sans un programme intégré faisant intervenir la conservation du sol, des forêts et de l'aménagement des bassins versants. Il faudra mener de front deux types d'actions pour rendre disponible l'eau

- la mobilisation nouvelle des ressources en eau,
- l'économie des ressources en eau.

Option 1: dessalement de l'eau de mer

La cogénération est une technologie qui convient parfaitement à l'association de la production d'énergie avec le dessalement de l'eau de mer, étant donné que les nouvelles centrales seront implantées, en grande partie, sur le littoral. L'option de dessalement de l'eau de mer est à envisager principalement pour l'approvisionnement en eau douce des villes côtières. Ce qui permettra d'envisager une redistribution des eaux des barrages vers l'intérieur du pays et vers les hauts plateaux. Ce qui constituera un appoint important pour l'approvisionnement en eau. Le couplage du dessalement de l'eau de mer à la production d'électricité, par son rendement élevé, peut constituer une solution puisqu'elle concilie deux objectifs du développement durable:

- la maîtrise de l'énergie,
- l'augmentation des ressources en eau potable.

Cette option peut être envisagée rapidement et s'intégrer aux projets de mise en oeuvre de nouvelles centrales de production d'énergie électrique programmées pour la période 2000-2020. En effet d'ici 2020, il faudra presque tripler la capacité de production d'énergie électrique.

Le projet de la nouvelle centrale d'Arzew basée sur ce type de cogénération, a été lancée en 1999 par les entreprises SONATRACH et SONELGAZ. Dans ce cas, les coûts d'investissement pour la production d'eau douce sont largement diminués du fait que la chaleur dégagée par les centrales d'énergie électrique fournira l'énergie nécessaire au dessalement de l'eau. Ce projet comprend un cycle combiné de 180 mégawatts et un dessalement journalier de 40.000 m³. L'électricité est achetée par SONELGAZ et l'eau par SONATRACH. Ce projet constitue un test important pour le choix de cette option.

Option 2 : récupération des eaux usées

La récupération des eaux usées, pour l'agriculture, peut permettre d'économiser près de 0,9 milliard de m³ d'eau (30% du volume destiné à l'AEP et l'industrie); cette option va dans le sens de la nécessité de traiter les eaux usées avant leur rejet, de la réduction de la pollution et des maladies à transmission hydrique. Cette option pose deux types de problèmes

- les coûts d'investissement pour relancer ou reconstruire les stations d'épuration actuellement à l'arrêt,
- les coûts d'investissement des canalisations et équipements de transfert des eaux épurées provenant des stations d'épuration vers les périmètres à irriguer.

Option3: injection des eaux de surface dans les nappes souterraines

La technique d'injection, au cours d'épisodes pluvieux intenses des eaux de pluie dans les nappes souterraines existantes, est largement utilisée dans certains pays. Cependant, cette technique nécessite des aménagements au niveau des sols pour canaliser, filtrer et répartir les eaux de ruissellement. Cette solution est une solution à moyen et long terme du fait qu'elle implique un gros effort de reboisement et d'importants travaux d'aménagement des sols en même temps qu'une bonne connaissance de la configuration des aquifères. Ce qui constitue de lourds investissements.

Conclusion

L'étude des changements climatiques et l'adaptation exige l'intégration d'un large éventail de disciplines, notamment les sciences physiques, biologiques sociales et économiques, même si cet impératif est difficile à réaliser en raison de l'incertitude de l'avenir, il est nécessaire d'obtenir des résultats qui aideront les personnes, les collectivités, les gouvernements et de l'industrie à faire face aux changements climatiques.

Bien que le protocole de KYOTO qui est entré en vigueur le 16 février 2005, contraigne 38 pays industrialisés dont l'Union Européenne, le Japon et dernièrement la Russie, à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre de 5.2% d'ici 2012 par rapport à leur niveau de 1990, afin d'atténuer les impacts, de nombreux scientifiques considèrent que le protocole de KYOTO est nettement insuffisant pour ralentir le réchauffement du climat.

Seuls, les pays africains n'arriveront pas à appliquer toutes les mesures d'adaptations nécessaire pour faire face aux éventuels changements du climat, de ce fait la contribution des pays développés est quasi-obligatoire pour les aider à mettre en place un minimum afin d'éviter une catastrophe humanitaire.

Chapitre II

Intérêt de la modélisation dans les sciences
hydrologiques

II.1 Introduction

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 de nombreuses recherches se sont attachées, depuis plus de cent ans, à essayer de comprendre le processus de génération des débits et le fonctionnement du bassin versant et ceci en remontant à leur cause première, les pluies. Ces recherches ont donné naissance aux modèles hydrologiques appelés modèles pluie débit, dont le but est de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire.

Dans ce chapitre, on va mettre l'accent sur la modélisation hydrologique et ses objectifs, ainsi que présenter les différentes classes de modèles pluie débit.

II.2 bassin versant et bilan hydrologique

L'un des objets et des moyens d'étude de l'hydrologie et la quantification des différentes phases du cycle de l'eau. Cette quantification peut se faire à l'échelle du globe tout entier, mais aussi à des échelles d'espace et de temps plus réduites. C'est le bilan hydrologique qui permet cette approche.

Son principe de base est la conservation de l'eau, ce qui veut dire que, sur un laps de temps suffisant, toute la pluie (P) qui tombe sur un espace donné finit par en sortir, soit par écoulement (Q), soit par évaporation :

$$P = \text{evap} + Q \quad \text{Eq. (II-1)}$$

Sur un laps de temps plus court, il faudra prendre en compte les variations de réserves, et l'équation deviendra:

$$P = \text{evap} + Q + \Delta R \quad \text{Eq. (II-2)}$$

Le terme ΔR désignant la variation des volumes d'eau momentanément retenus dans l'espace considéré.

Les calculs de bilan ne peuvent se faire que dans une portion d'espace dont on connaît à la fois les entrées et les sorties, qu'on définira un bassin versant.

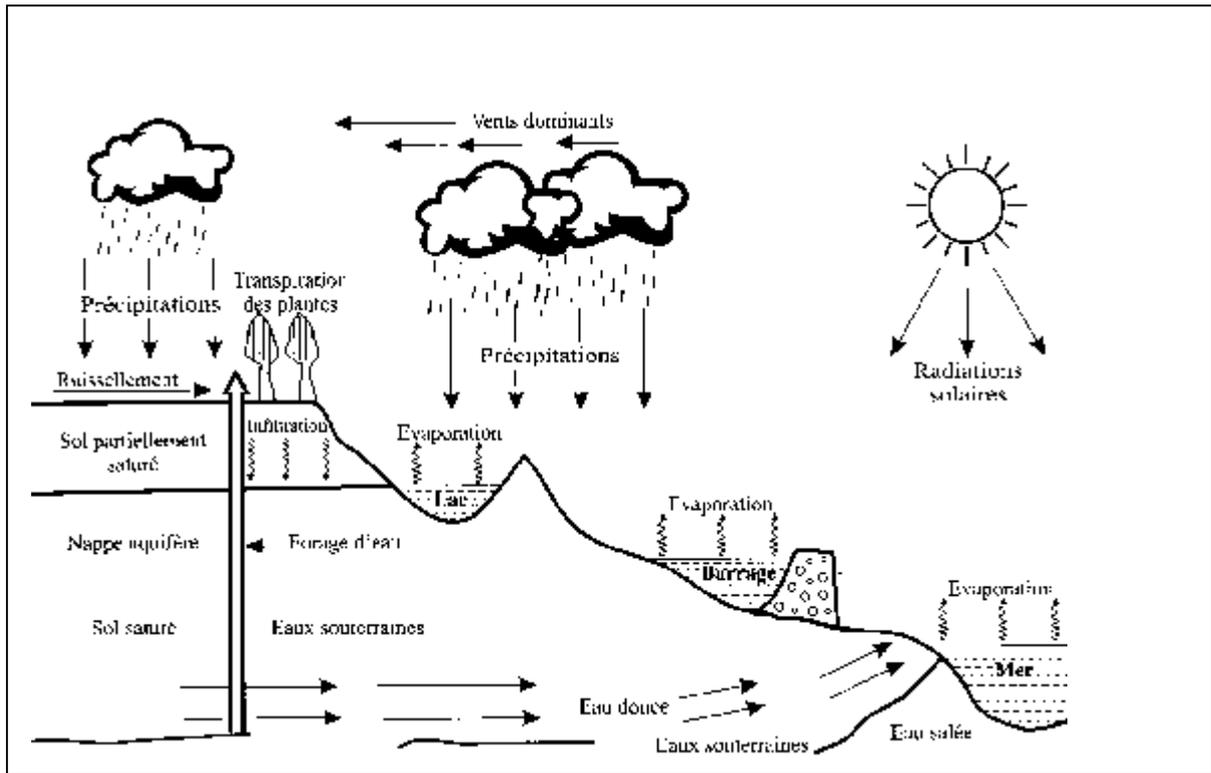


Figure II-1 Cycle de l'eau (SARI AHMED.A, 2002)

II.3 La genèse de ruissellement

Deux concepts sont généralement cités pour expliquer la genèse du ruissellement : Il s'agit du ruissellement Hortonien, et du ruissellement par zones saturées.

- **Le ruissellement Hortonien:** Horton (1933) définit le ruissellement comme « La part des précipitations qui, en négligeant l'interception des végétaux, et l'évapotranspiration n'est pas absorbée par le sol lors de l'infiltration ». Il suppose que chaque sol a une capacité d'infiltration qui doit être dépassée pour qu'il y ait ruissellement. Selon ce concept, la pluie hydrologique qui atteint le sol va commencer par s'infiltrer jusqu'à la saturation des couches superficielles, puis elle va s'accumuler dans les dépressions à la surface du sol. Une fois celles-ci remplies, la pluie s'écoulera en surface sous forme de lame. Le ruissellement Hortonien est observé en général sur des sols minces à basses capacités d'infiltration (Beven, 1991). Il est bien adapté pour simuler les crues en milieu aride sur sol encroûté lors de fortes intensités de pluie mais il est moins adapté aux zones tempérées et tropicales et aux sols humides couverts par une végétation importante. (Chahinian, 2004).

- **Le ruissellement par zones saturées:** En 1964, Betson suppose que le ruissellement par refus d'infiltration d'un sol non saturé ne se produit régulièrement que sur une partie du bassin et exceptionnellement sur l'ensemble de sa surface (événements exceptionnels). Au cours des années 70, un grand nombre d'observations, réalisées dans des régions à climat océanique humide, conteste le modèle de Horton (Dunne et Black, 1970 ; Dunne, 1978 ; Ward, 1984). Ces observations montrent que le ruissellement se produit par exfiltration une fois le sol saturé. On assiste alors à une remontée de la zone non saturée jusqu'à la surface. Ces observations démontrent en outre, que les zones humides saturées par le souterrain ont des extensions importantes et variables sur le bassin versant. L'eau qui s'infiltré en amont de ces zones saturées provoque un effet de chasse vers le réseau hydrographique. Les eaux accumulées, soit dans les nappes phréatiques, soit dans des nappes perchées qui se créent pendant les saisons pluvieuses, ruissellent sur des sols saturés sur toute leur profondeur. Ce type de ruissellement peut être observé sur des terrains à perméabilité limitée capables de se saturer rapidement. (Chahinian, 2004).

II.4 définition du modèle hydrologique

On appelle un modèle une représentation qui décrit les relations entre les différents éléments d'un système. En particulier, un modèle hydrologique du bassin versant est une représentation simplifiée du cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant, afin d'expliquer la réponse du bassin aux différentes conditions auxquelles il est soumis (Chérifi, 2001).

La représentation de tout ou partie du cycle de l'eau (démarche de modélisation) à des fins variées, se heurte à la difficulté d'appréhension, de description ou de compréhension des phénomènes et des ces systèmes étudiés. Par conséquent, les représentations de ces systèmes, c'est-à-dire des modèles, sont nécessairement simplificatrices, réductrices de la complexité naturelle, et donc grossièrement inexacts.

Le modélisateur opère des choix de représentation du système en ne retournant que les aspects qui lui semblent les plus pertinents, pour tendre vers une solution la moins inexacte possible. Le développement du modèle repose généralement sur trois éléments:

1- le système observé et sa discrétisation spatiale et temporelle, qui en définissent l'objet et ses limites (spatiales ou temporelles). La connaissance du système est conditionnée par la mesure de ses caractéristiques et l'acquisition de données sur les flux, les stocks et les transformations de phase. Dans notre cas, le système étudié est le bassin versant (Perrin, 2000).

2- l'objectif de la modélisation, pour lequel le modèle est développé. Le modèle est construit pour répondre à des questions et peut ainsi, au delà d'un outil de représentation, être également un instrument de connaissance (recherche la représentation de la transformation de la pluie en débit) (Perrin, 2000).

3- le choix d'une formulation de la réalité. Après la définition des deux points précédents, l'essentiel la démarche de modélisation consiste à trouver la formulation de la réalité la plus satisfaisante relativement aux objectifs fixés. La formulation d'un modèle est conditionnée par la connaissance antérieure des processus ou des systèmes considérés, par les idées de l'imagination du modélisateur et par les hypothèses qui sont formulées (Perrin, 2000).

II.5 Définition de la modélisation pluie-débit

La modélisation pluie débit est une discipline des sciences hydrologiques qui s'intéresse principalement au cycle hydrologique afin d'aboutir à un outil de travail exploitable dans différents domaines. Deux dimensions définissent la modélisation pluie-débit. La première est l'échelle d'espace. Pour différentes superficies, allant d'une maille de quelques mètres carrés au bassin versant de quelques dizaines de milliers de kilomètres carrés, il existe une littérature très riche qui va de la proposition de divers types de modèles jusqu'à la critique de ceux ci. La deuxième dimension est l'échelle de temps. Du pas de temps horaire jusqu'au pas de temps pluriannuel, on trouve dans la littérature de nombreux modèles fonctionnant à chaque pas de temps (Chérifi, 2001).

Lorsque l'on veut décrire, d'une manière rationnelle, le phénomène, on réalise au moins les deux opérations suivantes (Chérifi, 2001):

- Mettre un nom sur les objets, définir des groupes d'objets dans un langage clair;
- Relier ces différents éléments au moyen de relations.

La représentation de l'ensemble des phénomènes hydrologiques et des systèmes hydrauliques d'une manière simple et précise constitue une modélisation pouvant avoir une interprétation mathématique. En effet, l'ensemble de processus illustré dans la figure (II-1).est une structure dynamique dans l'espace et dans une échelle de temps bien définie entre une entrée cause (pluie) et une sortie: effet (écoulement).

II.6 Objectif de la modélisation pluie débit

La modélisation du transfert de la pluie en débit à l'exutoire d'un bassin a pour objet la mise au point de méthodes numériques capables de générer des valeurs réalistes de débit à partir (entre autres) de données de pluie observées sur le bassin ou à son voisinage. Outre un intérêt purement scientifique, ces modèles présentent un grand intérêt opérationnel, car ils permettent :

- Simulation de débit, pour le comblement de lacunes dans les séries de données, la reconstitution des débits historiques.
- Prédétermination des débits des crues ou d'étiages qui peut permettre le dimensionnement d'ouvrage et de réservoirs ou d'aménagement dans le lit du cours d'eau.
- Prévision des crues et des étiages; il s'agit d'évaluer par avance, connaissant l'état du bassin, les débits de crues susceptibles de présenter des risques (inondation) ou les débits d'étiages pouvant demander de mettre en place une gestion particulière de la ressource en eau.
- Influence d'aménagement sur l'hydrologie: on désire pouvoir prédire les changements de la réponse du bassin suite à des modifications des caractéristiques du bassin d'origine humaine ou à des changements environnementaux (Perrin, 2000).

Ces problématiques font ressortir deux aspects importants, celui de l'estimation de risques d'inondation et celui de la gestion optimale de la ressource (Charleux, 2001).

II.7 Historique d'apparition des modèles hydrologiques:

La modélisation mathématique en hydraulique et en hydrologie au sens moderne du terme, c'est-à-dire en utilisant les ordinateurs digitaux, datent des années 1950. C'est en 1952-53 que le groupe de chercheurs de l'université de New York (Stoker, Issacson et Troesch, 1996) a pu construire, en écrivant un programme et en utilisant un ordinateur, un modèle moderne de la propagation des crues le long d'un tronçon de Mississippi.

Depuis les modèles ont subi une série de transformations passant par quatre générations:

- Première génération: des formules numérisées. Cette génération est maintenue jusqu'au début des années 60;
- deuxième génération: des modèles numériques spécifiques. Il s'agissait de programmes créés à cette fin unique et demandant des modifications importantes dès que l'on voulait les utiliser pour une autre application. Cette génération a régné sans conteste entre 1960-1970;
- Troisième génération : des systèmes généraux de modélisation. un système conçu pour simuler la propagation des crues, permet aussi bien construire un modèle de Seine qu'un modèle du Niger. Ces systèmes ont été utilisés à partir de 1965 jusqu'à 1995;
- Quatrième génération: les progiciels véritables, des systèmes généraux de modélisation exploités d'une manière conversationnelle.

II.8 Classification des modèles pluie-débit

La modélisation hydrologique a été très largement utilisée ces vingt dernières années comme outil de simulation du fonctionnement hydrologique des bassins versants. De par leur structure, ces modèles permettent de tenir compte de la variabilité spatiale du milieu et des données hydrométéorologiques qui sont devenues de plus en plus accessibles avec le développement de nouvelles techniques de mesure. Les modèles hydrologiques voient alors leurs domaines d'application s'élargir à la prévision de la réponse de bassins non jaugés. Ces modèles ont été classés selon quatre clés de différenciation (Chahinian, 2004):

- Déterministes ou stochastiques, suivant la nature des variables, des paramètres et/ou des relations entre eux,
- Globaux, semi distribués ou spatialisés, suivant que le bassin versant est considéré dans l'espace comme une entité homogène, qu'il est divisé en sous entités supposées homogènes (éventuellement des sous bassins) ou qu'il est finement discrétisé en mailles,
- Cinématiques (descriptifs) ou dynamiques (explicatifs), suivant que l'évolution temporelle du système est simplement décrite en mise en relation avec les forces qui en sont la cause.

- Empiriques, conceptuels ou théoriques (fondés sur la physique), suivant les relations utilisées pour modéliser la transformation de la pluie en débit et suivant la représentation de système modélisé.

Perrin (2000) a proposé une classification simplifiée et assez satisfaisante, dont on distingue trois catégories de modèles, les modèles "boîte noire", les modèles "à réservoir" conceptuels ou empiriques et les modèles fondés sur la physique.

II.8.1 Les modèles "boîte-noire" (blackbox)

Ces modèles ont en commun de ne faire appel qu'aux seules variables d'entrée et de sortie d'un bassin, sans faire intervenir de données sur sa nature physique, le bassin est considéré comme une boîte noire, Ils s'appuient sur des fonctions et paramètres globaux sans grande signification physique ou non directement reliables à des propriétés mesurables, donnant une description purement mathématique du fonctionnement du bassin versant. On classe dans cette catégorie les modèles ou sous modèles qui établissent un pur lien mathématique entre les variables d'entrée et de sortie du système, Ces modèles sont globaux, Nous en donnons quelques exemples:

- **Les modèles ARMAX (Auto Regressive Moving Average with eXogenous inputs)**

Ces modèles autorégressifs sont parmi les plus simples. Initialement développés par Box et Jenkins (1976), ils ont suscité beaucoup d'intérêt, principalement du fait de leur fondement mathématique, qui s'appuie sur la théorie des modèles linéaires (modèles de régression et de corrélation). La forme générale du modèle est donnée par l'équation (Salas, 1993):

$$y_t = \mu + \sum_{j=1}^p \phi_j (y_{t-j} - \mu) + \sum_{j=1}^r \psi_j z_{t-j} + \varepsilon_t - \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j}$$

Où μ et $\psi_1 \dots \psi_r$ sont les paramètres du modèle, et y_t et z_t respectivement la sortie et l'entrée (pluie) à l'instant t , $\phi_1 \dots \phi_p$ sont des p paramètres autorégressifs, $\theta_1 \dots \theta_q$ sont des q paramètres de moyenne mobile et le bruit ε_t est un processus normal non autocorrélé, de moyenne nulle et non corrélé à $y_{t-1} \dots y_{t-p}$.

Bien qu'ils aient des résultats satisfaisants dans un certain nombre de cas, ces modèles trouvent leur limite dans le fait que leur linéarité n'est pas adaptée pour représenter la transformation pluie-débit non linéaire. Ils doivent donc être utilisés en combinaison avec des opérations de transformation non linéaires.

▪ **Les modèles des réseaux de neurones artificiels**

Le modèle de réseaux de neurones a été développé par analogie avec le neurone biologique (Touzet, 1992).

Un réseau de neurones est formé d'un assemblage d'éléments (neurones) chacun d'eux est lié à d'autres neurones. Ceux-ci sont disposés dans une série de couches: la première couche (couche d'entrée) la (ou les) seconde(s) couche(s) intermédiaire(s) (appelées couche cachées). Et la dernière appelée couche de sortie. Donc un réseau de neurones contient (n-2) couches cachées, les neurones des couches cachées sont reliés (connectés) aussi bien par ceux de la couche d'entrée que ceux de la couche de sortie, et donc chaque neurone peut recevoir une variété d'entrée et produire une seule sortie. Il n'y a pas de connexion entre les neurones au sein d'une même couche (Touzet, 1992). La première couche appelée couche d'entrée reçoit les informations, le rôle principal de cette couche réside dans la fonction d'identité, c'est-à-dire que le nombre d'entrées dans cette couche est égale au nombre de sorties effectuées par celle-ci, la dernière couche génère les sorties (ou résultats) finales du réseau, chaque point de connexion (appelé coefficient ou poids) entre deux neurones joue le rôle d'une synapse, l'élément principal d'interaction entre les neurones (Touzet, 1992).

Ces connexions ou points synaptiques ont un rôle primordial dans le fonctionnement parallèle et adaptatif des neurones.

Les neurones des couches cachées transforment les entrées en sorties et cela en deux étapes :

- Pour chaque neurone, chaque entrée est multipliée par son poids correspondant.
- L'entrée du neurone est transformée en sortie: chaque neurone reçoit des entrées sous forme vectorielle (x) et effectue une somme pondérée (α), et génère à l'aide d'une fonction de transfert (G) un résultat réel (Y) :

$$Y=G(WX+b)$$

$W=(W_{i1}, W_{i2}, \dots, W_{in})$ représente les poids du neurone

$X=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ sont les entrées du neurone.

b est le biais du neurone

La fonction d'activation généralement non linéaire classique est la fonction sigmoïde :

$$G(\alpha) = \frac{1}{(1 + e^{-\alpha})}$$

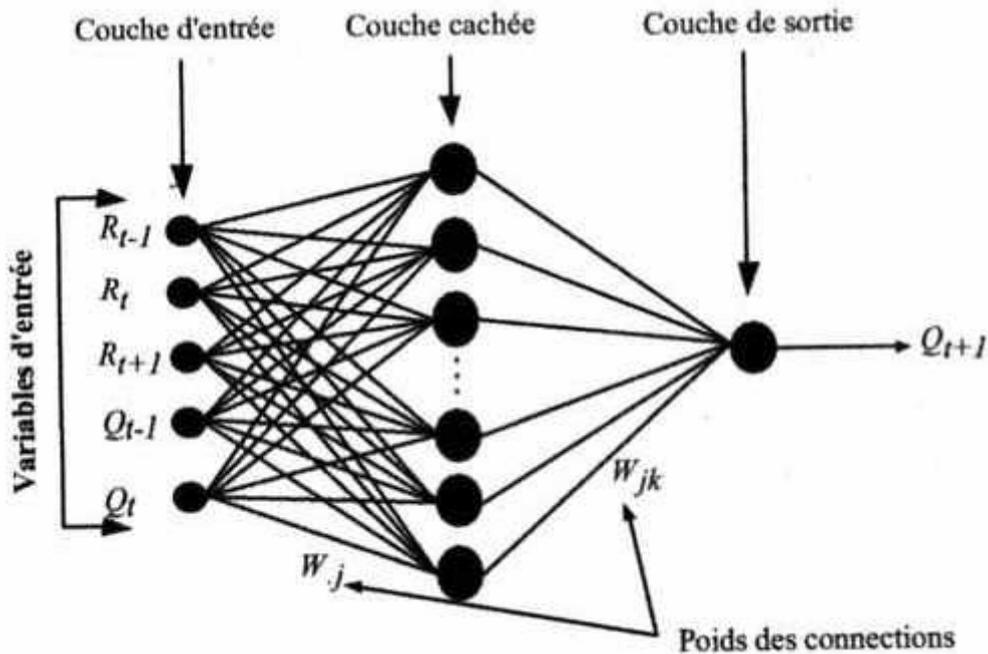


Figure II-2: Architecture du modèle RNA à trois couches

- **Indicateurs de performance de RNA:**

L'évaluation de la performance du modèle RNA est basée sur les paramètres statistiques suivants : L'erreur moyenne des carrés *ASE* (Average Squared Error), le coefficient de détermination R^2 et l'erreur moyenne absolue et relative *MARE* (Mean Absolute Relative Error). Ces paramètres sont donnés par les relations suivantes :

$$ASE = \sum_{i=1}^N \left(Q_{t_i} - \hat{Q}_{t_i} \right)^2 / N$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \left(Q_{t_i} - \hat{Q}_{t_i} \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^N Q_{t_i} - \bar{Q}_t \right)^2}$$

$$MARE = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{\hat{Q}_{t_i} - Q_{t_i}}{Q_{t_i}} \right|}{N} \times 100$$

Q_{t_i} la valeur mesurée du débit, \hat{Q}_{t_i} le débit calculé par le modèle, $\overline{Q_{t_i}}$ le débit moyen mesuré et N le nombre de données (Touzet, 1992).

La valeur de l'*ASE* donne une indication quantitative sur l'erreur de prévision obtenue lors de la phase de test de la modélisation et R^2 montre la variation de la valeur du débit calculé ou estimé par le modèle de la régression linéaire. Les valeurs idéales pour *ASE* et *MARE* sont égales à 0 et R^2 peut correspondre à 1. La performance du modèle est aussi déterminée graphiquement par l'alignement du nuage de points autour de la courbe $x=y$ (droite linéaire à 45°).

Les réseaux de neurones sont nettement plus performants grâce à leur non linéarité contrairement aux modèles, par ailleurs, l'utilisation du réseau de neurones suppose que les données soient normées, ce qui pose le problème lorsque l'on veut appliquer le modèle sur des données sortant de l'intervalle de variation de celles utilisées pour le calage des paramètres (Touzet, 1992).

- **La méthode de l'hydrogramme unitaire**

Proposé en 1932 par Sherman, cette méthode a pour objet la détermination de l'hydrogramme du ruissellement superficiel à l'exutoire d'un bassin à partir des hydrogrammes de l'averse correspondante, elle est très employée aux États-Unis, son usage tend à s'étendre notamment pour le calcul des débits de crue, en outre elle donne les éléments d'une sorte de "modèle schématique" de la transformation "intensité de pluie-débit", elle doit généralement être couplée à des modèles non linéaire qui permettent de convertir la pluie nette en pluie brute (Jakemen et Whitehead, 1996), donc de déterminer la propagation de la pluie en entrée qui contribuera finalement à l'écoulement.

- **La méthode de DPFT-ERHUDIT** (Différentielle première de la fonction de transfert – Excess rainfall and Unit Hydrograph by a deconvolution Iterative Identification technique): cette méthode inspirée des travaux de Newton (1967), a pour but d'essayer de limiter les problèmes liés à l'utilisation des hydrogramme unitaires, en évitant un choix arbitraire dans la sélection et le calage d'une fonction de production et d'une technique de séparation du débit de base (Rodriguer et al. 1989, 1991 ; Duband et al. 1993). Il s'agit d'une procédure itérative, dans laquelle la première estimation de la pluie nette correspond à la pluie brute. La première fonction de transfert est alors calculée, puis rectifiée par des contraintes physiques.

A partir de cette fonction de transfert, on résout alors le problème inverse, c'est-à-dire l'estimation de la pluie nette par déconvolution. La procédure est répétée jusqu'à ce qu'il y ait convergence. Ce modèle, dont le calage repose sur la sélection d'événements de crues, a donné des résultats satisfaisants dans un contexte de prévision de ces événements ou le système hydrologique est en état de répondre par une crue à une entrée de pluie (Perrin, 2000) sa faiblesse dans l'extension à d'autres périodes réside dans l'absence de procédure de suivi d'humidité.

Nous pouvons ainsi citer, dans cette classe de modèle « boîte noire », ceux reposant sur une simple équation non linéaire qui donne directement le débit en fonction des pluies antérieures (Tsykin, 1985 ; Pinault et al., 1997).

Les modèles empiriques « boîte noire » globaux sont très utiles et utilisés en ingénierie hydrologique ; ils constituent des modèles peu complexes et permettent de prédire les flux en sortie d'un bassin versant en fonction de la pluviométrie (flux en entrée), dans ce cas l'effet des grandeurs variables dans le temps et dans l'espace est paramétrisé de façon globale. Ceci a deux inconvénients majeurs : ces modèles ne nous permettent pas d'apprécier l'importance relative des différents phénomènes à l'intérieur du bassin, et donc dans le milieu étudié, de plus leur emploi répété suppose une stationnarité du milieu, ce qui dans notre cas est certainement faux ;

On s'intéresse justement à l'évolution du milieu soumis aux changements.

II.8.2 Les modèles « à réservoir », conceptuels ou empiriques

Ces modèles sont schématiquement constitués de réservoirs interconnectés qui assurent la transformation de la pluie en débit. Ils sont moins abstraits que les modèles « boîte noire » dans leur présentation de la transformation pluie-débit, même si leur représentation physique n'est généralement pas immédiate. Ces modèles sont structurés à partir de deux composants majeurs (Loumagne et al., 1996) :

- Un module de production responsable de la détermination des bilans en eau, c'est-à-dire de la répartition de la pluie brute en pluie nette (alimentant le débit), en quantité évaporée et en quantité stockée. parfois présentés dans les modèles, les fonctions d'échanges en eau, permettant de simuler des pertes et /ou des apports vers ou de l'extérieur, font généralement partie de ce module ;
- Un module de routage ou transfert permettant d'assurer la répartition temporelle de la quantité d'eau transitant dans le cours d'eau.

Les premiers modèles à réservoirs ont été proposés au début des années 60. Ils correspondaient en fait à une simplification des équations de la physique, alors trop complexes pour être utilisées telles qu'elles dans des modèles numériques. Ils essayaient de représenter de façon assez exhaustive tous les processus pouvant influencer les débits et étaient donc très complexes, avec des structures faisant intervenir de nombreux réservoirs et des très nombreux paramètres : le modèle Stanford (Crawford et Linsly, 1963) comprenait plus de 30 paramètres optimisables, le modèle SSARR (Schermerhom et Kuehl, 1986) plus de 25 paramètres, celui proposé par Girard (1970) plus de 20 paramètres.

Devant les problèmes de calage et l'utilisation de tels modèles, ce sont ensuite des modèles moins complexes (moins de paramètres) qui ont été proposés, c'est le cas des modèles GR3 à 3 réservoirs et 3 paramètres (Edijatno et Michel, 1989) et de ses versions plus récentes et complexes, GR4 (Loumagne et al, 1996). Ces modèles sont la plupart du temps globaux, ou dans quelques cas semi distribués ou distribués. Dans ces deux derniers cas, le modèle appliqué sur chaque sous bassin ou maille est une méthode de propagation permet d'assurer le transfert des flux entre sous unités vers l'exutoire.

La différence entre les modèles "à réservoir" conceptuels et empiriques fait exclusivement référence à la manière dont les modèles ont été développés (Perrin 2000):

- La grande majorité des modèles "à réservoir" existants sont des modèles conceptuels mis au point à partir de concept sur la manière dont se passe la transformation pluie-débit. on représente alors dans le modèle de façon simplifiée les processus jugés pertinents pour la modélisation. Le concepteur du modèle introduit des idées a priori, généralement fondées sur les connaissances physiques et l'observation du bassin.
- Beaucoup plus marginaux que les précédents, les modèles empiriques, eux, sont construits seulement à partir des observations hydrométéorologiques (correspondant aux entrées et sorties du modèle), sans avancer d'hypothèses a priori sur la nature des processus dominants ou d'idées préconçues sur la structuration du modèle.

Ces modèles globaux sont simples à utiliser et utiles pour synthétiser l'information climato-hydrologique disponible sur un bassin et simuler l'évolution conjointe des réserves dans chaque compartiment (Ambroise, 1999). Les limites de ces modèles sont cependant nombreuses:

- 1- L'analogie avec le fonctionnement de réservoirs interconnectés reste une représentation grossière du fonctionnement réel d'un bassin: les relations de vidange utilisées sont empiriques et le plus souvent arbitraires;
- 2- Les paramètres utilisés sont généralement sans grande signification physique : n'étant ni mesurables, ni corrélables à des caractéristiques mesurables du bassin ; ils ne peuvent être estimés que par calage du modèle sur des débits mesurés;
- 3- Ces modèles ne permettent pas de tenir compte de l'hétérogénéité du bassin et de sa structure, ni d'analyser leur influence sur son fonctionnement.

II.8.3 Modèles fondés sur la physique

Contrairement aux modèles précédents qui mettent l'accent sur la représentation du comportement hydrologique final (à l'exutoire), les modèles fondés sur la physique tentent d'utiliser des explications physiques à ce comportement. Ils utilisent le cadre théorique des équations de la physique (équations aux dérivées partielles), avec par exemple les équations de Saint-Venant pour les écoulements en rivière ou celles de Boussinesq ou Richard pour les écoulements dans les sols saturés ou non saturés.

Il tient compte de la variabilité spatiale du bassin par une discrétisation fine à base de mailles sur laquelle sont appliquées les lois concernées, ce qui permet de donner une représentation des flux et stocks au sein du bassin. Chacune est caractérisée par un ensemble des paramètres, ayant en principe une signification physique et donc mesurables sur le terrain. Plusieurs modèles physiques ont été développés. Il s'agit à titre exemple des modèles SHE (Abbott et al., 1986), IHDM (Beven et al., 1987), Swatch (Morel-Seytoux et Alhassoun, 1989) et du modèle proposé par Kutchment et al. (1996).

II.9 Choix du modèle

La stratégie adoptée lors de la sélection du modèle hydrologique du système de prévision rejoint sensiblement les idées de Snyder et Stall (1965). Selon eux, un modèle doit tenir compte de la disponibilité des données, la variabilité des contextes, le degré de précision requise et le but de l'application. Il devrait être conçu individuellement pour chaque cas. Le choix d'un modèle possédant une structure simple et flexible a permis une adaptation plus facile aux particularités du bassin à considérer, des données disponibles et des besoins des utilisateurs.

II.10 Mise en oeuvre des modèles

La mise en oeuvre des modèles de simulation implique un certain nombre de phases, conduisant à un modèle opérationnel capable de simuler le système réel il s'agit de la construction, la détermination des paramètres internes, le calage, le test, et l'exploitation du modèle;

- **La construction:** qui consiste à schématiser le système réel par le biais d'une série d'hypothèses simplificatrices et à en donner une formulation symbolique.
- **La détermination des paramètres internes:** celle-ci pose un problème ardu à cause de complexité des mesures in situ.
- **Le calage du modèle:** permet de déterminer les paramètres d'ajustement (paramètres internes qui n'ont pas de sens physique direct) à partir d'un jeu de données et des réponses mesurées sur le système réel.
- **Le test du modèle:** est une opération indispensable qui consiste à vérifier l'aptitude du modèle calé à simuler la réalité et cela sur un jeu de données et des réponses mesurées sur le système réel, différents du jeu de données de calage.
- **Exploitation du modèle:** est la phase opérationnelle du processus pour son utilisation pratique. Dans le cas de la prévision des crues, l'exploitation du modèle étudié consiste en l'extension d'une série de débits à partir de la pluviométrie enregistrée sur le bassin versant (Chérifi, 2001).

Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons défini la modélisation pluie-débit, en montrant son intérêt dans l'estimation des risques (inondations) et celui dans la gestion optimale des ressources en eau.

Après une recherche bibliographique, les modèles pluie-débit ont été classés en trois catégories: les modèles "boite noire", les modèles "à réservoirs" conceptuels et les modèles fondés sur la physique, en déterminant les avantages de chaque catégorie et ses limitations, ce qui nous a permis de conclure que les modèles "à réservoirs" conceptuels semblent les plus en mesure de faire avancer la compréhension de systèmes réels (les bassins versants).

Chapitre III

Synthèse bibliographique de modèles hydrologiques
conceptuels

III.1 Introduction

Les modèles conceptuels globaux « à réservoir » sont les modèles les plus utilisés en modélisation pluie-débit, voire en hydrologie appliquée de fait de leur simplicité et de leur exigence minimale en données (Chérifi, 2001). Ces modèles se contentent généralement de série de pluie et d'évapotranspiration potentielle (ETP) en entrée, et de séries concomitantes de débits pour le calage et l'évaluation de modèle (Chérifi, 2001).

Cependant le calage et la validation de ces modèles reposent principalement sur le nombre de paramètres à optimiser, ce qui signifie qu'une large incertitude pèse sur leur détermination. Par conséquent, on se trouve face à de gros problèmes d'identification au cours de calage.

III.2 Quelques modèles conceptuels au pas de temps mensuel

Dans la bibliographie, les modèles pluie-débit conceptuels globaux ne sont pas très nombreux au pas de temps mensuel. Certains ont été mis au point pour une application particulière (Schaake et Chunzen.1989) et (McCabe et Ayers.1998 in Mouelhi, 2003).

III.2.1 Modèle ABCD (Thomas, 1981)

Ce modèle, à quatre paramètres, s'articule autour de deux réservoirs : un réservoir sol de capacité maximale A et un réservoir linéaire de vidange caractérisé par le paramètre D. La transformation pluie-débit s'effectue en deux phases :

▪ Fonction de production

La pluie nette (PN) destinée à l'écoulement se déduit comme suit :

Pour le mois (i) et sous l'effet de la pluie (P), le stock du réservoir prend la valeur de S^1_i

$$S^1_i = S_{i-1} + P$$

L'évapotranspiration réelle ER, dépend du stock S^1_i et donnée par :

$$ER = S^1_i \left[1 - \exp\left(-\frac{E}{a}\right) \right]$$

Après l'effet de la pluie et de l'évaporation le stock prendra la forme :

$$S_i = S^1_i - ER = (S_{i-1} + P) \exp\left(-\frac{E}{A}\right)$$

La pluie nette pour le mois i est calculée en utilisant la relation suivante :

$$PN_i = \frac{(1-B) \frac{S_i^2}{A}}{1 + (1-2B) \frac{S_i}{A} + \sqrt{\left(1 + \frac{S_i}{A}\right)^2 - 4 \frac{BS_i}{A}}}$$

Où **B** est un paramètre compris entre 0 et 1

▪ **Fonction de transfert**

La pluie nette est subdivisée en deux fractions selon le troisième paramètre C, la première se traduit en écoulement direct :

$$Q_d = (1 - C)PN_i$$

La fraction complémentaire à Q_d , est destinée pour alimenter le réservoir de routage :

$$R_i = R_{i-1} + CP_i$$

Le débit délivré par le réservoir linéaire de routage (de paramètre D) est donné par :

$$Q_r = DR_i$$

Le débit total pour le mois (i) sera alors :

$$Q = Q_d + Q_r$$

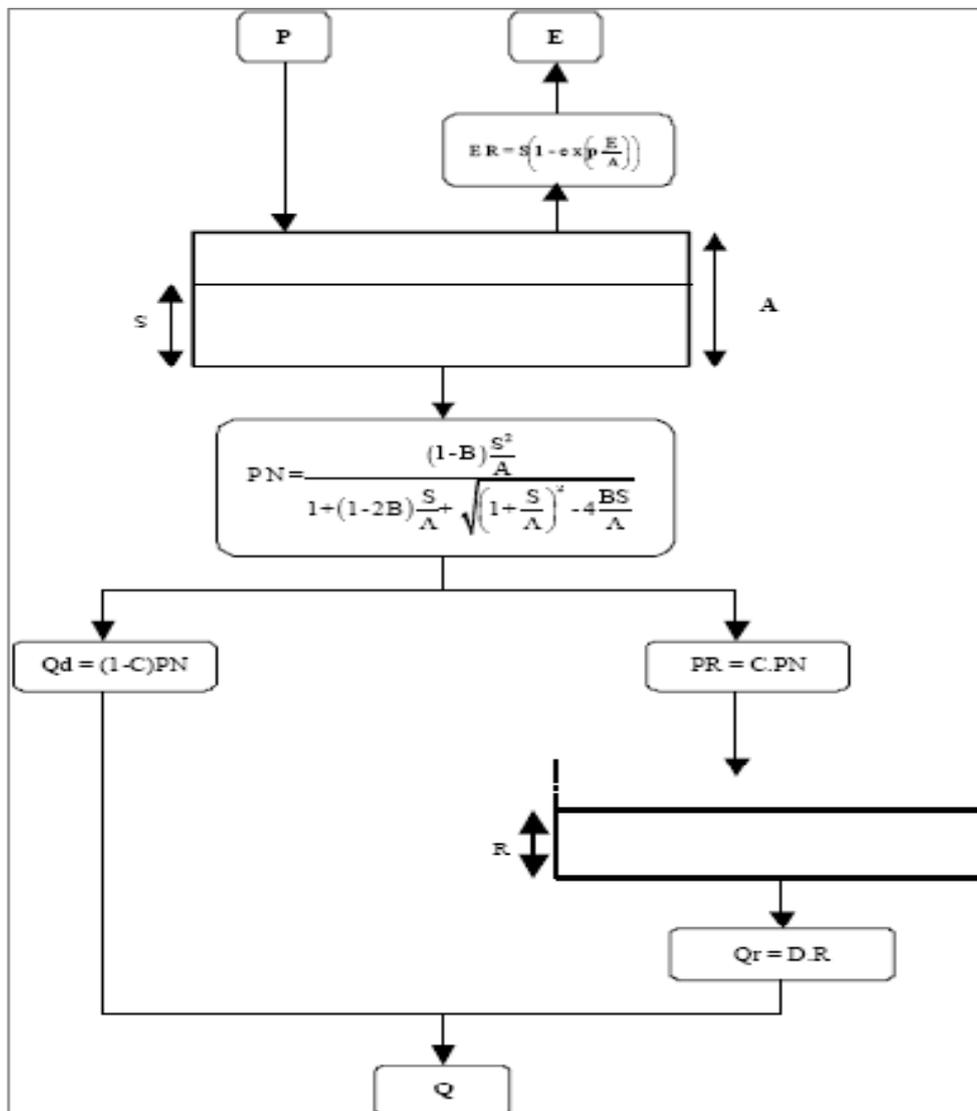


Figure III-1: Architecture du modèle ABCD (Thomas, 1981)

III.2.2 Modèle de Vandewiele et al. (1991)

Ce modèle correspond à une des variantes proposées par Vandewiele et al. (1991). Il a été appliqué sur un échantillon de 79 bassins : 65 bassins du nord de la Belgique, six bassins des Ardennes, six autres bassins du Sud de la Chine et deux bassins de Birmanie.

Il s'agit d'un modèle à trois paramètres avec un seul réservoir qui assure à la fois la régulation de la production et le routage.

Au cours du mois i , le sol subit l'effet de l'évaporation ES donné par la relation :

$$ES = E \left(1 - A \frac{P + S_{i-1}}{E} \right)$$

$$S_{i,1} = S_{i-1} - ES$$

Où A prend des valeurs entre 0 et 1.

Le réservoir se vidange selon une loi quadratique et relâche un débit Q_s en fonction du niveau $S_{i,1}$ du réservoir en introduisant un deuxième paramètre B .

$$Q_s = \frac{S^2}{B + S}$$

La pluie P donne lieu à un écoulement direct Q_d dépendant d'un troisième paramètre C , après une interception partielle par l'ETP qui le réduit au niveau PN :

$$Z = E \left[1 - \exp \left(- \frac{P}{E} \right) \right]$$

$$PN = P - Z$$

$$Q_d = C \cdot S_{i,1}^1 \cdot PN$$

L'écoulement mensuel Q à l'exutoire du bassin est la somme des deux écoulements :

$$Q = Q_s + Q_d$$

Après relâchement de l'écoulement Q , le niveau du stock du réservoir devient S_i donné par l'équation de bilan :

$$S_i = S_{i,1} + P - Q$$

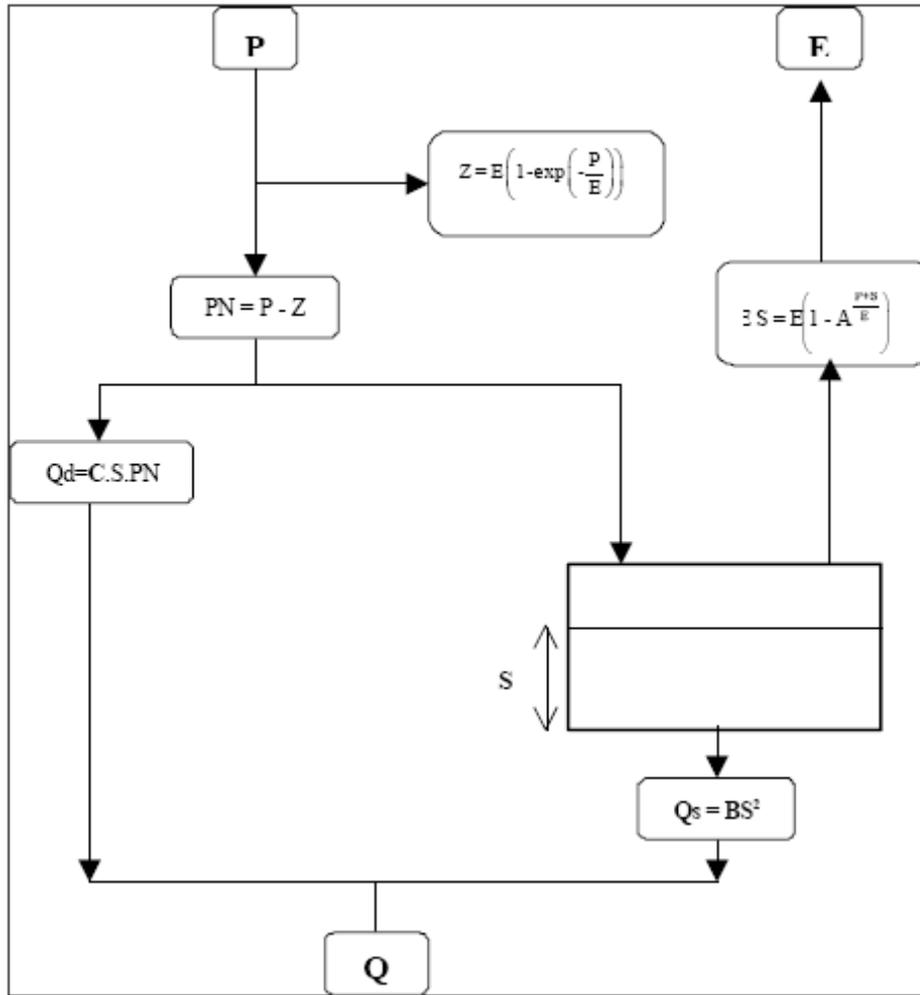


Figure III-2: Architecture du modèle de Vandewiele et al. (1991)

III.2.3 Modèle de Gardner (Bhaskar, 1999)

Le modèle de Gardner est un modèle conceptuel pluie-débit basé sur la formule d'évaporation d'O'ledekop datant de 1911 (Bhaskar, 1999). Il s'agit d'un modèle à 3 paramètres avec un seul réservoir. Ce réservoir dont le contenu en eau est R reçoit la pluie mensuelle P et est soumis à l'évapotranspiration potentielle E . E est ajustée avec un paramètre B afin de donner :

$$E1 = E \cdot B$$

L'évapotranspiration réelle ER prélevée sur la pluie est donnée par l'équation ci-dessous

$$ER = E1 \cdot \tanh\left(\frac{P}{E1}\right)$$

$$PR = P - ER$$

$$D'où R = R_{t-1} + PR$$

Le principe de vidange du réservoir dans ce modèle est le même que pour le modèle GR2M, avec deux cas particuliers de vidange (linéaire ou quadratique) :

Cas linéaire : $Q = AR$

Cas quadratique : $R_i = \frac{R}{1 + \frac{R}{A}}$

$Q = R - R_i$

Avec Q le flux total d'écoulement et A le paramètre de réservoir de stockage.

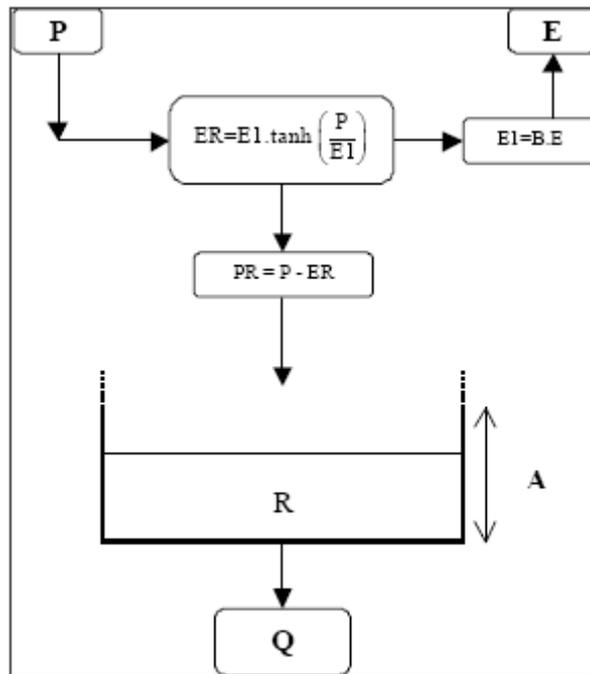


Figure III-3: Architecture du modèle de Gardner (Bhaskar, 1999)

III.2.4 Modèle de Guo (2002)

Guo et al. (2002) ont proposé un modèle pluie-débit au pas de temps mensuel à deux paramètres. Il a été testé et validé sur 100 bassins chinois de petite et moyenne taille. Il a été utilisé pour prédire les impacts des changements climatiques en Chine.

Il s'agit d'un modèle conceptuel pluie-débit basé sur la formule d'évaporation d'Ol'dekop datant de 1911 (Bhaskar, 1999) comme pour le cas du modèle de Gardner avec 2 paramètres (A et C) et un seul réservoir. Ce réservoir dont le contenu en eau est S reçoit la pluie mensuelle P et est soumis à l'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration réelle ER prélevée sur la pluie est donnée par l'équation ci-dessous :

$$ER = C.E. \tanh\left(\frac{P}{E}\right)$$

$$PR = P - ER$$

Avec C le premier paramètre du modèle. Le stock S sera alors déduit comme suit :

$$S = S_{i-1} + PR$$

Le débit Q est donné par :

$$Q = S \tanh\left(\frac{S}{A}\right)$$

En fait, Guo propose une vidange du réservoir à la fois linéaire et quadratique. Quadratique quand S est faible :

$$Q \cong \frac{S^2}{A}$$

et linéaire quand S tend vers A :

$$Q \cong S$$

III.2.5 Modèles 'Cemagref Antony' ou 'GR'

L'idée de la modélisation 'GR' a été lancée par C. Michel en 1983 après l'analyse d'un modèle conceptuel CREC (Cormary et Guilbot, 1973) à neuf paramètres sur le bassin expérimental de l'Orgeval. Il a été constaté que ce modèle présentait des difficultés au niveau de la mise en oeuvre et du calage. L'idée s'est développée alors, en partant du modèle le plus élémentaire possible (un unique paramètre lié à un unique réservoir) et en ne compliquant cette architecture que pour faire face aux difficultés à reproduire les débits réels et non pour satisfaire des conceptions a priori sur le cycle hydrologique. Cette démarche a débouché sur un modèle simple à deux paramètres GR2J (Michel, 1983). Utilisé par Loumagne (1988) et Devred (1989), ce modèle a ensuite été repris par Edijatno (1987,1991) qui a, par une démarche de résolution empirique, amélioré sa structure en modifiant notamment la fonction de production et en ajoutant un troisième paramètre, constante de temps d'un hydrogramme unitaire. Le nouveau modèle journalier GR3 (Edijatno et Michel, 1989) fut testé sur un échantillon de 110 bassins versants français et donna des résultats satisfaisants en comparaison avec quelques modèles plus complexes.

Dans une perspective de constante amélioration de cette structure, Nascimento (1991,1995) a isolé des bassins intermittents pour lesquels le modèle avait du mal à fournir des résultats corrects, et a introduit dans le modèle un quatrième paramètre gouvernant des

échanges souterrains pour répondre aux exigences de bonne reproduction des débits. Le nouveau modèle GR4 a fourni sur un échantillon de 120 bassins de meilleures performances que la version antérieure à trois paramètres.

Parallèlement aux travaux de Nascimento (1995), Makhoulouf a mené des recherches sur l'explication des paramètres du modèle GR4J sur des bassins de Moselle et de Bretagne. Il a également donné quelques voies pour le traitement de la neige sur les bassins de Moselle et travaillé sur un modèle mensuel à deux paramètres GR2M (Makhoulouf et Michel, 1994). Auparavant, Kabouya (1990) avait également mis au point un modèle mensuel GR3M, à trois paramètres pour l'évaluation de la ressource en eau en Algérie.

Plus récemment, Edijatno et al. (1999) ont proposé une nouvelle version à trois paramètres du modèle journalier. Cette version dans laquelle la capacité du réservoir de production est fixe, est très similaire à la version proposée par Nascimento (1995) avec des fonctions de production et d'échange légèrement modifiées. Enfin, Perrin (2000) a rajouté un quatrième paramètre au modèle journalier à la suite d'un travail comparatif avec d'autres modèles (Perrin et al. 2000) un autre volet de la recherche sur la modélisation pluie-débit porte sur le problème plus spécifique de la prévision de crue. Yang (1993), utilisant le modèle GR3 d'Edijatno (1991) au pas de temps horaire, a mis au point une méthode de prévision des crues.

Parallèlement aux travaux réalisés au Cemagref d'Antony, l'équipe du Cemagref d'Aix-en Provence s'est intéressé à la prévision des crues et a couplé un générateur stochastique de pluie (Cernesson et al. 1996) à une version horaire de GR3 au sein de modèle SHYPRE (Cernesson et Lavarbe. 1994). des travaux ont également été menés sur le modèle mensuel (Lavarbe et al. 1993 ; Makhoulouf et al. 1995) qui est à la base de logiciel LOIEAU, pour l'estimation de variables réglementaires sur les débits (Lavarbe et al. 1997).

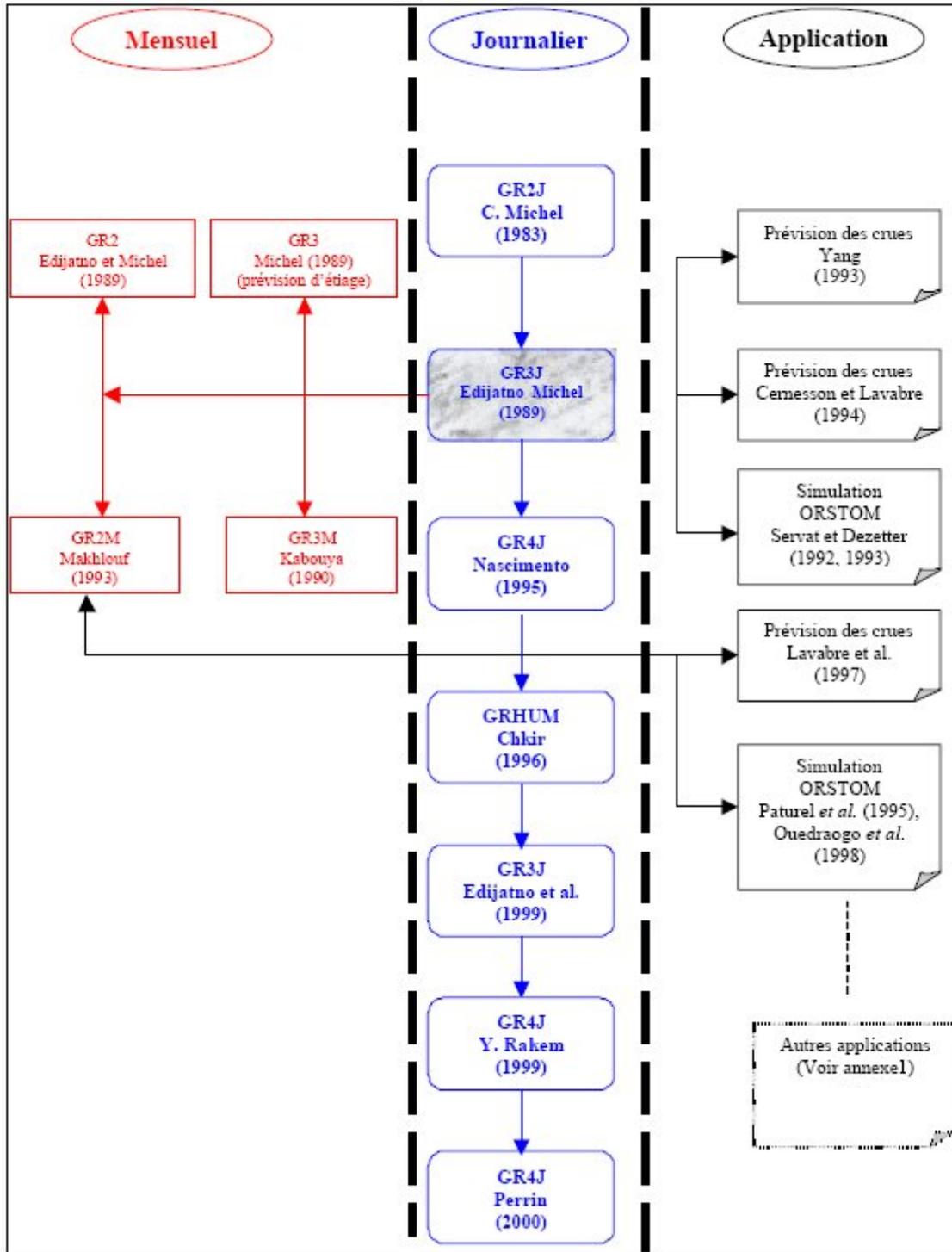


Figure III-4: Evolution des travaux des modèles 'GR' (Cemagref, 2000).

III.2.5.1 Architecture des modèles 'GR'

Nous retenons les modèles mensuels GR, GR3, GR3M, GR2M. L'écriture mathématique de la transformation pluie- débit des ces modèles est semblable. Nous présentons donc seulement les équations relatives aux différentes phases du modèle GR2M (Makhlouf, 1994). Les autres s'obtiennent en remplaçant des termes qui seront signalés dans chaque modèle

a- Modèle GR2 (Edijatno et Michel, 1989)

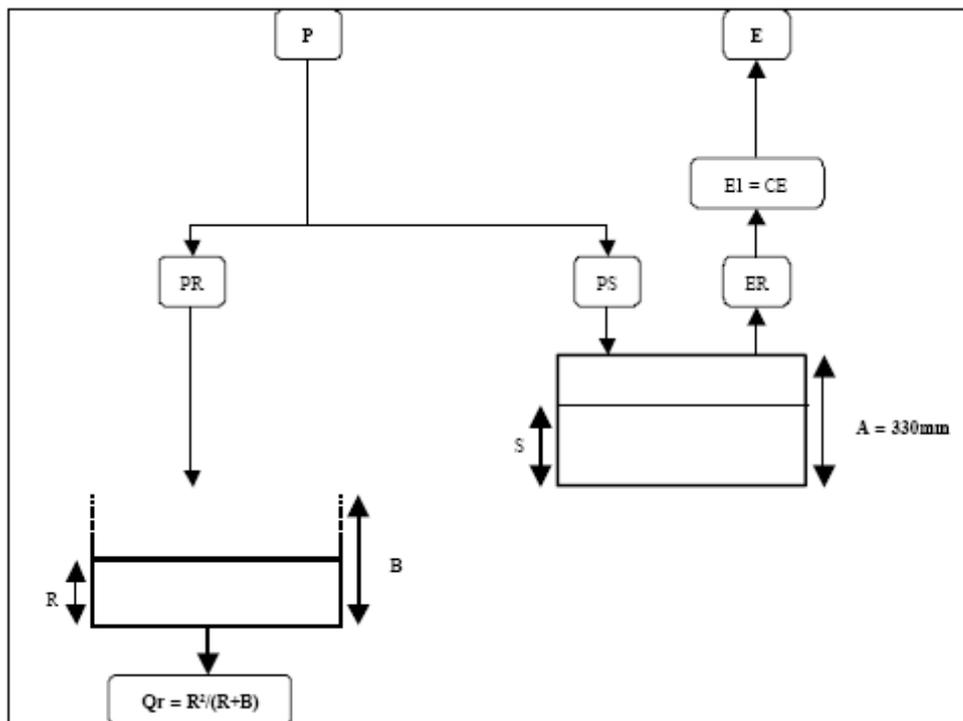


Figure III-5: Architecture du modèle GR2 (Edijatno et Michel, 1989)

Le modèle GR2 a été inspiré du modèle pluie-débit journalier GR3J (Edijatno et Michel, 1989). Il est composé de deux réservoirs, dont les stockages sont notés R et S. Au cours de la transformation pluie-débit, on assiste, selon le modèle, aux phases suivantes :

- Un ajustement partiel des entrées se traduisant par une 'correction' de l'évapotranspiration par le paramètre libre C
- Pas de phase 'd'ajustement'

Il s'agit alors d'un modèle à deux réservoirs. Un réservoir 'Sol' caractérisé par sa capacité maximale A fixée à 330 mm et un réservoir quadratique de routage caractérisé par son paramètre B. Le troisième paramètre C, est introduit pour 'corriger' l'évapotranspiration E Pour prendre la valeur $E1 = C.E$.

b- modèle de prévision d'étiage GR3 (Michel, 1989)

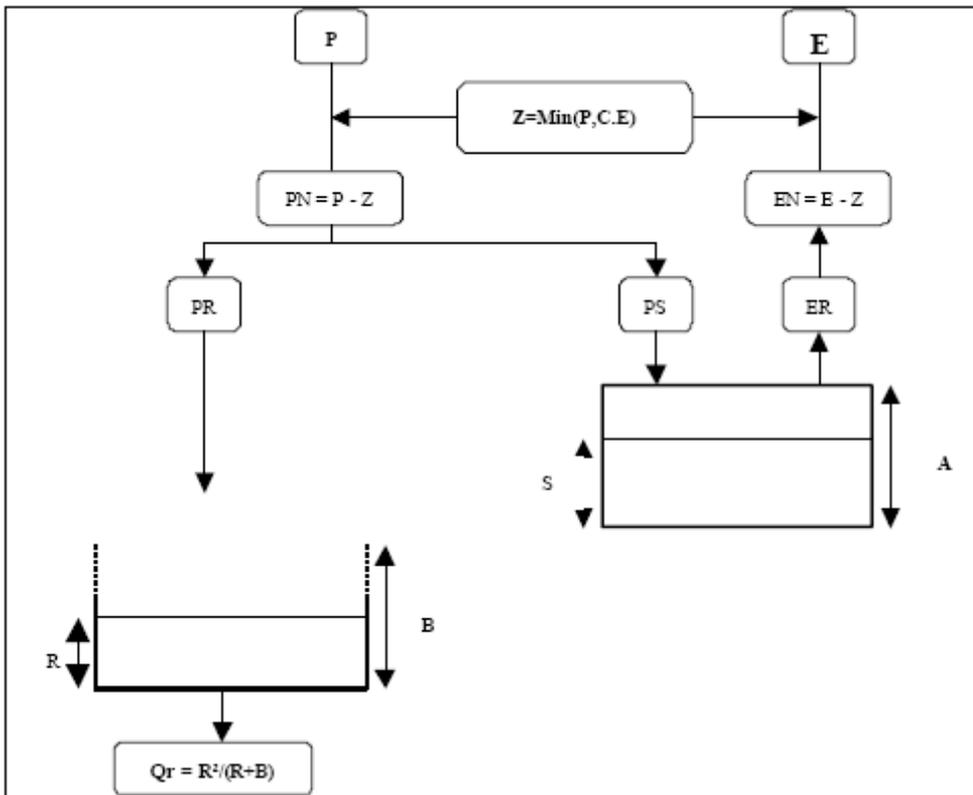


Figure III-6: Architecture du modèle de prévision d'étiage GR3 (Michel, 1989)

Ce modèle a été mis au point par C. Michel à l'occasion de la sécheresse de 1989. Il a été inspiré par les travaux d'Edijatno (1989). Il est très proche de GR2 (Edijatno et Michel, 1989). Les différences sont :

- Une nouvelle phase d'interception présentée par la fonction 'Z' qui modifie l'impact de l'évapotranspiration.
- Le paramètre A est un paramètre libre, contrairement à GR2 où il a été fixé à 330mm.

Il s'agit d'un modèle à deux réservoirs. Un réservoir 'Sol' caractérisé par le paramètre A qui représente sa capacité maximale et un réservoir quadratique de routage caractérisé par le paramètre libre B. Le troisième paramètre C est introduit dans la neutralisation de la manière suivante :

$$Z = \text{Min}(P, \alpha E)$$

Ce qui donne :

$$PN = P - Z$$

$$EN = E - Z$$

c- Modèle GR3M

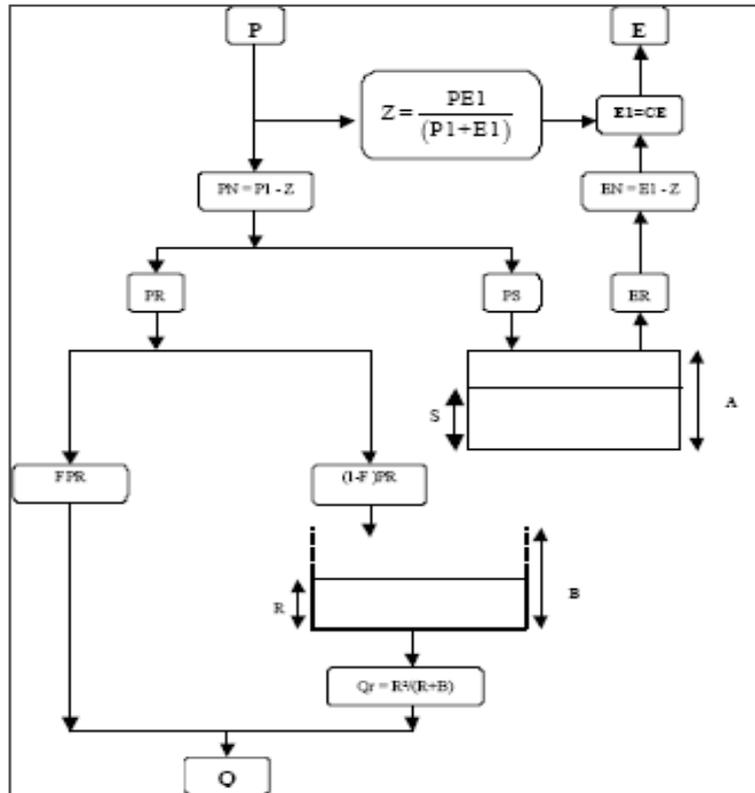


Fig.III.7: Architecture du modèle GR3M issu des travaux Kabouya-Makhlouf-Michel, 1990

Suite aux travaux de Kabouya (1990, 1991) et de Makhlouf (1994), une variante à trois paramètres GR3M a été proposée.

Ce modèle est très proche des autres modèles déjà présentés. Il est caractérisé par :

- Une phase partielle d'ajustement
- des données qui se traduisent par un paramètre lié seulement à l'évapotranspiration. Contrairement au modèle GR2 (Michel et Edijatno, 1989) où le paramètre concerne la pluie et l'évaporation et au modèle GR3 de prévision d'étiage (Michel, 1989) où cette phase ne figure pas.
- Une nouvelle forme d'interception Z
- Contrairement au modèle de prévision d'étiage GR3 (Michel, 1989), le modèle de Kabouya présente un écoulement pseudo-direct caractérisé par son coefficient noté $F=0,5$.

Comme pour le modèle de prévision d'étiage GR3 (Michel, 1989), il s'agit d'un modèle à deux réservoirs. Un réservoir 'Sol' caractérisé par le paramètre A qui représente sa capacité maximale et un réservoir quadratique de routage caractérisé par le paramètre B.

▪ **Ajustement des entrées**

P et E sont ajustées par le même paramètre multiplicatif X_1 afin de donner P1 et E1. Ce paramètre agit comme un coefficient correcteur des entrées.

$$P1 = X_1 P$$

$$E1 = X_1 E$$

▪ **Interception**

Elle se traduit par une quantité (Z) qui permet de calculer les quantités de pluie et d'évapotranspiration nettes participant effectivement à l'écoulement :

$$Z = \frac{P1.E1}{(P1^\gamma + E1^\gamma)}$$

Où $\gamma = 0.4$

Cette quantité est soustraite aux entrées :

$$PN = P1 - Z$$

$$EN = E1 - Z$$

▪ **Effet du réservoir Sol (Stockage ou effet de mémoire)**

En raison des excitations de forçage PN et EN, la valeur du stock d'humidité du réservoir sol, avec la valeur initiale S_{i-1} , au début du mois, prendra successivement différentes valeurs.

D'abord du fait de PN, le niveau de S_{i-1} devient $S1$:

$$S1 = \frac{S_{i-1} + AW}{1 + W \frac{S_{i-1}}{A}}$$

$$\text{Avec } W = \tanh\left(\frac{PN}{A}\right)$$

A : un paramètre fixe = 200 mm correspondant à la capacité maximum du réservoir sol

La valeur d'excès de précipitation PR est déterminée dans cette étape :

$$PR = PN + S_{i-1} - S1$$

Puis, en raison de EN, $S1$ devient S_i :

$$S_i = \frac{S1(1-V)}{1 + V\left(1 - \frac{S1}{A}\right)}$$

$$\text{Où } V = \tanh\left(\frac{EN}{A}\right)$$

Ces relations ont été dérivées de l'intégration des formules instantanées beaucoup plus simples

(Edijatno et Michel, 1989) :

$$dS = \left[1 - \left(\frac{S}{A}\right)^2\right] dPN \quad \text{(I)}$$

$$dPR = \left(\frac{S}{A}\right)^2 dPN \quad \text{(II)}$$

$$dS = -\left(\frac{S}{A}\right) \left[2 - \left(\frac{S}{A}\right)\right] dEN \quad \text{(III)}$$

(I) représente la variation du stock (S) sous l'effet de la fraction de la pluie qui alimente le réservoir Sol

(II) représente la fraction de la pluie destinée au routage

(III) représente la variation du stock S sous l'effet de l'évapotranspiration, les deux actions, celle de PN et celle de EN étant traitées séparément.

▪ **Routage**

Une portion ϕ de PR correspond à l'écoulement direct et la partie complémentaire est introduite dans un réservoir R, dont le niveau passe de R_{i-1} à R_0 .

$$R = R_{i-1} + (1 - \phi)PR$$

ϕ est un paramètre fixe égal à 0,2.

Le réservoir de capacité B et de niveau R se vidange selon une loi puissance d'exposant fixe g (g=2 a été proposé pour les bassins versants français).

$$\frac{1}{R_i^g} = \frac{1}{R_0^g} + \frac{1}{B^g}$$

Le volume libéré par R au cours de la vidange est donné par :

$$Q_r = R_0 - R_i$$

Le débit total est alors

$$Q_i = \phi PR + Q_r$$

II.2.5.2 Récapitulatif des modèles 'GR'

Les principales caractéristiques des modèles GR au pas de temps mensuel sont présentées dans le tableau III.1

Tableau III-1 : Récapitulatif des modèles ‘GR’ (Cemagref, 2000).

	Ajustement des entrées P et E	Neutralisation	Paramètre de réservoir sol A	Paramètre de routage quadratique B	Echantillon de données	Nombre de paramètres
GR2M (Makhlouf, 1994)	P1=C.P E1=C.E	$Z = \frac{P1E1}{(P1^\gamma + E1^\gamma)^{\frac{1}{\gamma}}}$	A=200mm	Libre	91 Bassin français	2
GR3M (Kabouya, 1990)	E1=C.E	$Z = \frac{PE1}{(P1 + E1)}$	Libre	Libre	6 Bassins algériens	3
GR3 (Michel, 1989)	-	$Z = \text{Min}(P, C, E)$	Libre	Libre	91 bassins français	3
GR2 (Edijatno et Michel, 1994)	E1=C.E	-	A=330mm	Libre	Quelques bassins Français	2

Globalement, ces quatre modèles présentent des architectures semblables qui s'articulent autour de deux réservoirs : un réservoir 'Sol' caractérisé par sa capacité maximale A et un réservoir quadratique de routage caractérisé par sa capacité B. Ce qui différencie un modèle d'un autre, c'est la modalité d'ajustement des entrées, l'existence et la forme de l'interception, le caractère du paramètre A qui est libre ou fixe .

La caractéristique de ces modèles qui nous semble 'curieuse' est le traitement des entrées soit par « l'ajustement », soit par « l'interception » ou les deux à la fois.

'L'interception' a pour rôle principal d'éviter l'effet brutal des entrées. En effet pour le pas de temps mensuel, relativement large, introduire la totalité de la pluie et de l'évapotranspiration semble a priori une mesure brutale, négligeant ainsi l'effet tampon de l'interface atmosphère – bassin versant. L'interception alors joue un rôle d'amortisseur de ces effets 'brutaux'.

III.3 Choix du modèle

L'aspect complexe d'un modèle pluie-débit conceptuel global peut être mesuré par le nombre de paramètre laissés libre lors du calage. Un modèle est d'autant plus complexe qu'il présente un nombre de paramètres plus élevés. Cependant, la performance et la fiabilité d'un modèle ne sont pas forcement liés au degré de complexité d'un modèle, c'est-à-dire qu'un modèle conceptuel complexe n'est pas nécessairement plus efficace qu'un modèle moins complexe.

Notre choix a été le modèle GR2M à deux paramètres dans sa nouvelle version modifiée conceptualisé selon le schéma de la figure N° III.9. Notre choix est motivé par les raisons suivantes :

- Ce modèle a donné de bons résultats sur les bassins versants du Sud de la France, et vu que les conditions climatiques de ces bassins sont relativement proches de ceux de notre zone d'étude
- Une étude des apports du Nord de l'Algérie par l'ANRH et le bureau d'études Allemand « GTZ » dans le cadre d'un projet Algero-Allemand « étude des écoulements moyens Annuels sur le Nord de l'Algérie » achevé en 2003, et ce en utilisant le logiciel LOIEAU basé sur la modèle mensuel à deux paramètres, a donné des résultats très satisfaisants. Ce qui nous a incité à choisir un modèle conceptuel ne dépassent pas deux paramètres de calage.

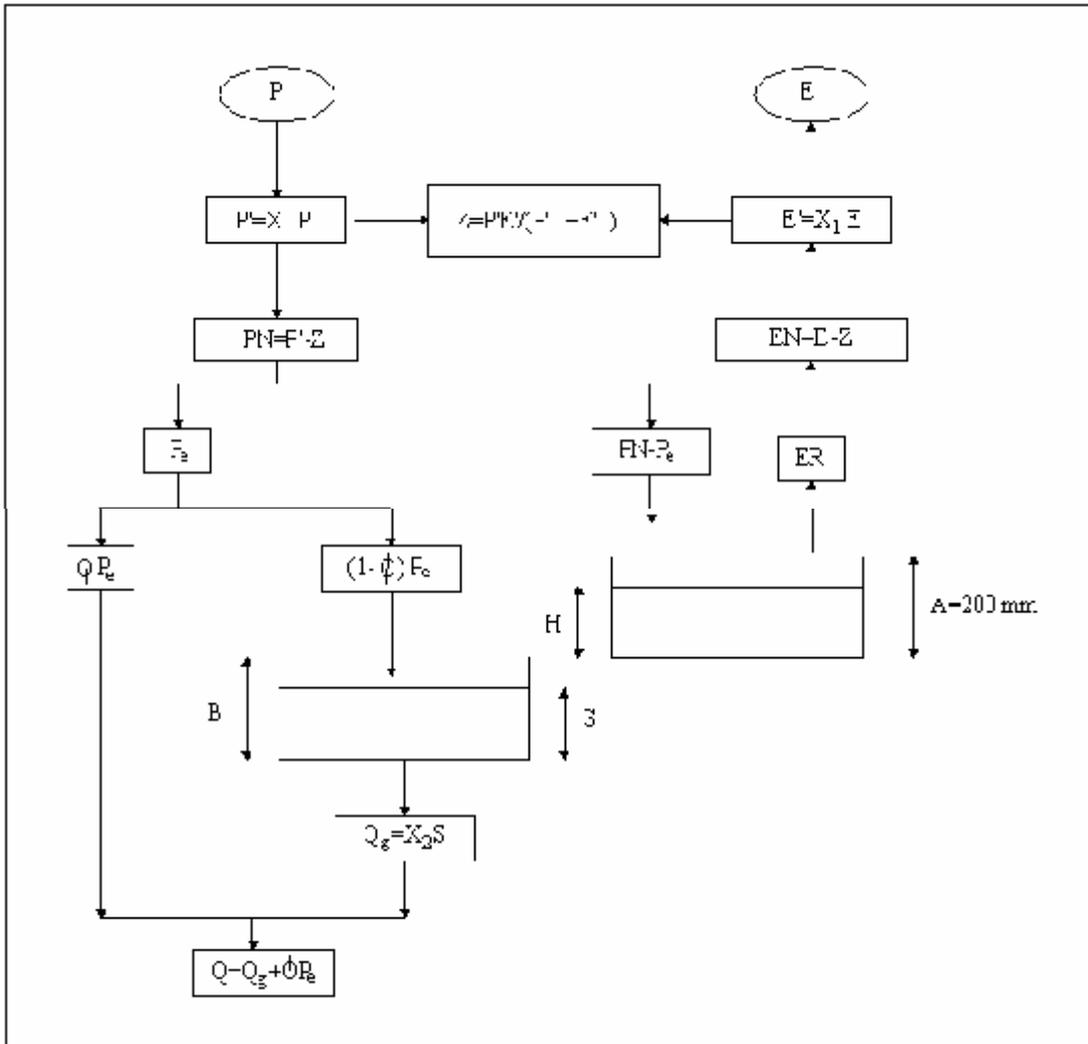


Figure III-9: Schéma conceptuel du modèle GR2M modifié (2002)

• **Le modèle GR2M**

Le modèle GR2M est constitué d'un réservoir sol qui régit la fonction de production et est caractérisé par son remplissage maximale A , qui correspond à la capacité en eau du sol. Il comporte également un réservoir eau gravitaire qui régit la fonction de transfert le schéma conceptuel est présente en figure III.9.

Les deux entrées pluie (P) et évaporation potentielle (E) sont modulées dans la même portion et concomitamment en multipliant les valeur de ces entrées par un coefficient X_1 ($0 < X_1 < 1$) qui est un des paramètres de modèle.

Ce paramètre agit comme un coefficient d'ajustement des entrées, supposant que les précipitations et les ETP sont des variables souvent douteuses et qu'on préfère le modèle décider de la valeur corrective à attribuer. Une quantité Z est en suite soustraite à la pluie modulée P' et à l'évapotranspiration potentielle modulée E' du moins considéré.

$$P' = X_1 P$$

$$E' = X_1 E$$

Cette quantité joue le rôle d'interception et permet de calculer les précipitations et les ETP nettes participant à l'écoulement. Au pas de temps mensuel, cette quantité sert à amortir l'effet brutal des entrées dans le modèle.

La quantité Z est de la forme :

$$Z = \frac{P' E'}{(P'^{1/2} + E'^{1/2})^2}$$

Ces opérations sur la pluie et l'évapotranspiration donnent respectivement :

$$PN = X_1 P - Z$$

$$EN = X_1 E - Z$$

Soit H le niveau du réservoir sol en début du pas de temps. Une partie de PN augmente le niveau du réservoir, qui devient H_1 :

$$H_1 = \frac{H + AV}{1 + H \frac{V}{A}}$$

$$\text{Avec } V = \tanh\left(\frac{PN}{A}\right)$$

Le complément de PN est donc :

$$Pe = PN - (H_1 - H)$$

Sous l'effet de EN , le niveau H_1 du réservoir sol devient H_2

$$H_2 = \frac{H_1(1 - W)}{1 + W\left(1 - \frac{H_1}{A}\right)}$$

$$\text{Où } W = \tanh\frac{EN}{A}$$

H_2 correspond au niveau de réservoir pour le pas de temps suivant.

L'évapotranspiration réelle peut être déduite par différence des niveaux du réservoir sol au début et à la fin de chaque pas du temps.

Le réservoir eau gravitaire reçoit $(1 - \phi)P_2$, tandis que ϕP_e s'écoule directement.

Le niveau S du réservoir eau gravitaire au début du mois considéré augmente et devient S_1

$$S_1 = S + (1 - \phi)P_e$$

Le débit délivré par ce réservoir est:

$$Q_g = X_2 S_1$$

Avec $0 < X_2 < 1$, X_2 étant le second paramètre du modèle.

Le niveau S_2 du réservoir à la fin du pas de temps de calcul est alors :

$$S_2 = S_1 - Q_g$$

L'écoulement total Q s'écrit alors :

$$Q = Q_g + \phi P_e$$

III.4 Choix de la fonction de critère :

Il existe une bibliographie très riche présentant différentes formes de fonctions critère.

Nous citons quelques critères:

Tableau III-2: Formes de fonctions critère.

Auteur	Formulation	Domaine
Pearson	$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}) - (P_i - \bar{P})}{\left[\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}) \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}) \right]^{0.5}} \right\}^2$	[0,1]
Nash et Sutcliffe (1970)	$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$]-∞,1]
Willmott (1981)	$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{O} + O_i - \bar{O})^2}$	[0,1]

Notre choix de la forme de la fonction critère s'est porté sur le critère de Nash pour deux raisons principales :

- Une étude comparative entre différentes formes de critères a été effectuée par Servat et al. (1989) et a montré que le critère de Nash s'impose comme celui qui, globalement, permet d'accéder au meilleur calage.
- Lors de ses travaux de recherche au sein de Cemagref, Perrin (2000) a utilisé le même critère, après une étude comparative avec d'autres formes de fonctions critères, en vue d'une amélioration du modèle GR4J.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques modèles conceptuels « à réservoir » au pas de temps mensuel, et après cet aperçu bibliographique nous pouvons dire que le modèle GR2M représente une technique puissante d'approximation et d'optimisation, et constitue un moyen efficace dans la modélisation pluie-debit et d'autre part, il est moins exigeant en données.

Le modèle GR2M a été testé sur des bassins et des contextes climatiques très variés, en France mais aussi dans d'autres pays (Etats-Unis, Australie, Brésil, Allemagne, Angleterre, Côte d'Ivoire, etc.). Applicable à l'échelle du bassin versant, il a été testés sur des bassins versants allant de moins de 10 km² à plus de 100 000 km². Ils sont également utilisés pour une large gamme d'applications opérationnelles telles que la prédétermination des crues, la prévision des crues ou des étiages, la détection d'impact et la gestion ou le dimensionnement d'ouvrages.

Chapitre IV

Présentation des caractéristiques du bassin d'étude

IV.1 PRESENTATION DE LA REGION D'ETUDE

L'espace physique constitue l'élément déterminant sans lequel aucune étude hydrologique n'est véritablement possible. C'est pour cette raison essentielle qu'est abordée la présentation des aspects physiques et de l'environnement climatique et hydrologique. Le climat du bassin versant de la Mina, objet de cette étude, est de type méditerranéen caractérisé par des pluies plus au moins torrentielles et irrégulières.

IV.1.1 caractéristiques générales du bassin versant de l'oued Mina

IV.1 .1.1 Situation géographique

Le bassin versant de l'Oued Mina fait partie d'un ensemble plus vaste qui est le bassin de l'Oued Chelif. Il est situé à environ quelque 300 Kms à l'Ouest d'Alger, entre 0° 20' et 1° 10' de longitude Est et entre 34° 40' et 35° 40' de l'attitude Nord, drainant ainsi une superficie de 4900 Km² au droit du barrage Sidi M'Hamed Ben Aouda. L'oued Mina est parmi les principaux affluents de l'Oued Chelif. Il parcourt une distance de 135 km environ entre les barrages de Bakhada et Sidi M'hamed Ben Aouda, avec une orientation Sud-Est, Nord-West

Durant ce parcours, l'oued Mina reçoit quelques affluents: l'Oued Haddad, l'Oued El Abd, l'Oued Taht et l'Oued Medroussa (fig.VI.1).

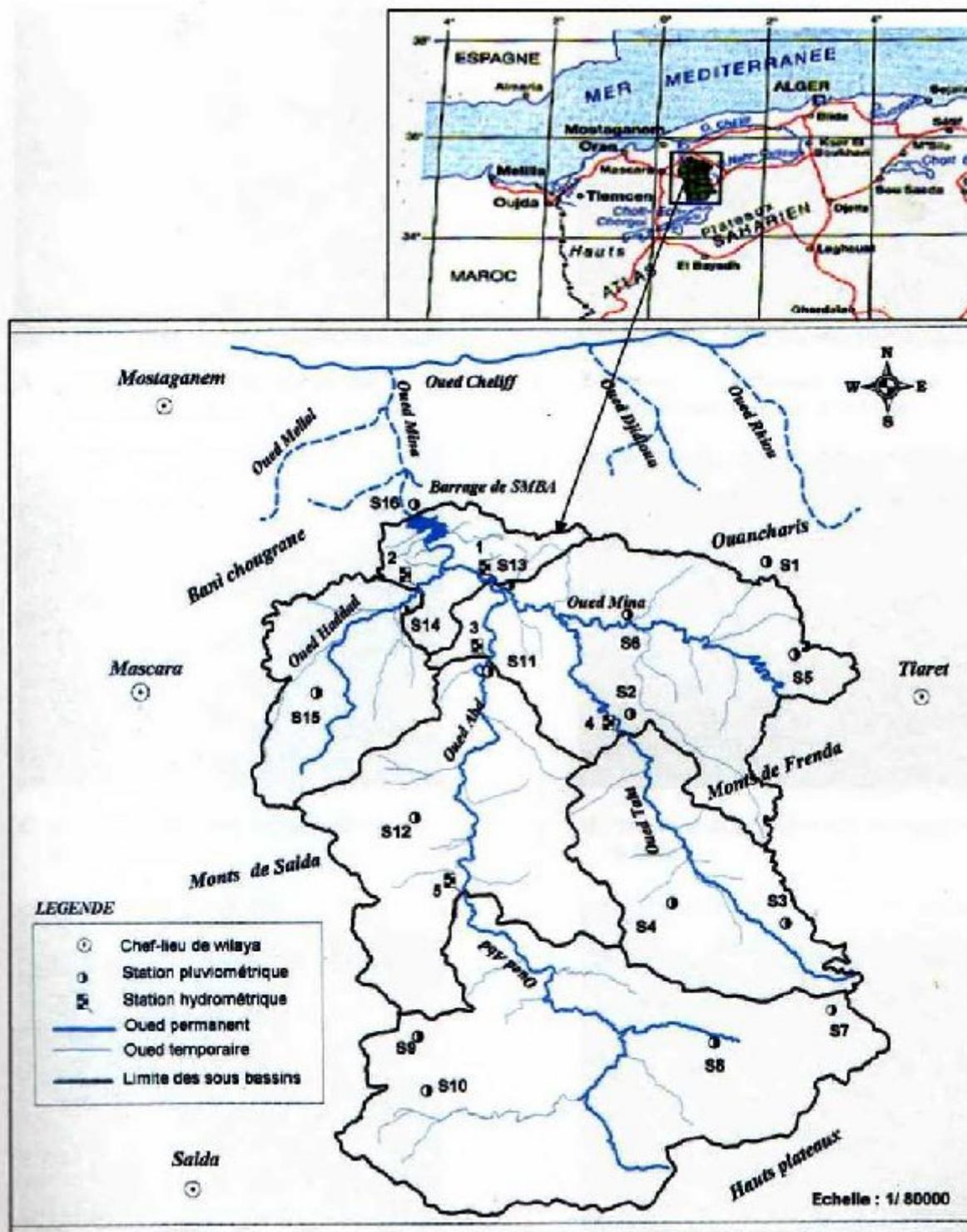


Figure IV-1 : Situation du bassin versant de l'oued Mina (Achite, 2002)

IV.1 .1.2 Géologie

Le bassin versant de l'oued Mina est caractérisé du point de vue géologique par:

- la prépondérance du jurassique au Nord et à l'Ouest.
 - les restes d'un paysage créacé avec des roches calcaires et grès calcaires. Les couches inférieures du jurassique supérieur constitué les marnes et l'occasion de gisement alternant avec des bancs de roches carboniques. A laquelle se joignent les marnes tertiaires au Nord qui contiennent localement des bancs de calcaire et de grès-calcaire.
- la présence de marnes dans lesquelles il y a des intercalations de quelques bancs de carbonate, il ressort du tableau IV.1, que la majorité des sols du bassin sont constitués de marnes et d'argile imperméables.

Tableau IV-1 : Les différentes formations lithologiques du bassin versant de la Mina.

Désignation	période	ERE	S (Km ²)	%
Sables fins rouge et jaune clair, dunes	Pliocène	T E R T I A I R E	52.36	1.07
Grès sableux avec en partie un peu de cimentation carbonatée, calcaires sableux et croûtes pouvant atteindre 1 m d'épaisseur.	Pliocène		307.19	6.27
Grès bruns à grains fins d'origine marine avec cimentation carbonatée - alternant avec des couches de grès marins et des calcaires, en partie conglomérat bien ronds	Miocène Sup		179.77	3.67
Marnes sableux alternant en partie avec des bans de grès peu importants	Miocène Sup		72.56	1.48
Dépôts de carbonates et de grès en partie sous forme de conglomérats et de brèches et par endroits de minces plaques de grès et de marnes.	Miocène Inf		225.36	4.60
marnes avec des intercalations de minces plaques de grès et de bancs de limon.	Miocène Inf		169.25	3.45
Bancs de grès et de carbonate important, avec de rares intercalations de couches de marnes	Oligocène		69.46	1.42
marnes verts clair avec sporadiquement de faibles bancs de grès et de limon en partie de marnes sableuses foncées.	Oligocène		232.91	4.75
Calcaires fossilisés surtout d'origine marine et calcaires à nummulites, en partie conglomérat bien ronds, grès mal assortis avec cimentation carbonatée.	Eocène Moy		18.26	0.37
calcaires à foraminifères, grès marins en alternance avec des marnes colorées.	Eocène Inf		67.04	1.37

Marnes avec intercalations de bancs peu importants de carbonates et de grés.	Crétacé Sup	C R É T A C É	9.85	0.20
Bonne couche de grés à grains fins jaune- rougeâtres.	Crétacé Sup		51.69	1.05
Importante quantité de calcaires gris et dolomies	Crétacé Sup		49.10	1.00
Marnes claires à verdâtres, pierres limoneux	Crétacé Inf		95.56	1.95
Calcaires en partie sableux et par endroits stromatolithe	Crétacé Inf		69.12	1.41
Calcaires et dolomies, par endroits bien déposés avec des intercalations de marnes et en partie de conglomérats et du calcaire sableux.	Jurassique Sup	J U R A S	756.29	15.43
Calcaires et dolomies alternant en général avec des marnes claires et par endroits avec des calcaires sableux et des marnes	Jurassique Sup		405.22	8.27
Dominance des marnes claires, grises et vertes alternant avec de faibles bancs de calcaires et de dolomies	Jurassique Sup		1078.10	22.00
Importante quantité de calcaire gris en partie et dolomies à gros grains, surface karstique	Jurassique moy	S I Q U E	736.10	15.02
Importante quantité de calcaire gris et dolomies, surface karstiques avec éboulis	Jurassique moy		227.60	4.64
Alternance de gris quartziques, dolomies roche limoneux et marnes	Jurassique Inf		10.29	0.21
Gris durs et dolomies	Trias	T R I A S	7.89	0.16
Eau libre				
Total			4900.00	100

IV.1 .1.3 La végétation

C'est un très bon indicateur de la vitesse d'écoulement, parce que l'existence de la végétation peut freiner le ruissellement.

Dans l'ensemble du bassin, on voit deux parties :

- La zone du nord purement marneuse et dépourvue de végétation dans la plupart des terres ; à l'exception de quelques îlots de reboisements de Tassaalat et des plantation d'arbres fruitiers dans la vallée, les cultures annuelles intensives et les champs résiduels se retrouvent sur les collines et les zones rocheuses (Achite, 2002).
- La zone jurassique du sud qui est recouvertes par une végétation de densité variable. Les formations végétales existantes sur cette zone sont :
 - les forets, représentant 4.91% sont dominées par une grande partie de jeunes plantations de pin d'Alep (Achite, 2002).
 - Les maquis représentent environ 30.56% du l'ensemble du bassin versant.
 - La végétation herbacée : en plus de la végétation naturelle, les céréales sont les principales cultures annuelles appliquées (Achite, 2002).

Tableau IV-2 : Les différentes cultures du bassin versant de l'oued Mina (Achite, 2002)

désignation	S (km ²)	%
Zones irriguées Plantation d'arbres fruitiers et cultures maraîchères	275.26	5.62
Cultures annuelles Rotation de cultures céréalières et de légumineux	325.65	6.65
Cultures annuelles et cultures permanentes Mosaïque de cultures annuelles, arbres fruitiers et viticultures	53.74	1.10
Cultures de céréales Cultures de céréales seulement	200.96	4.10
Agricultures et économie pastorale Mosaïque de cultures annuelles, d'arbres fruitiers et de pâturage	93.95	1.92
Cultures annuelles et pâturage en zone rocheuse Mosaïque de cultures sur les sols plus profonds et surpâturage de steppe d'ARTEMESIA sur roches et éboulis.	476.06	9.72
Cultures de céréales et pâturage d'Artemisia rocheux Mosaïque de cultures sur les sols plus profonds et surpâturage de steppe d'Artemisia sur roches et éboulis	180.66	3.69
Cultures annuelles et maquis dégradé Maquis surpâturé, arbustes isolés entre les champs	60.66	1.24
Champs résiduels sur les collines Champs avec des cultures annuelles sur les sommets et les pentes de moins de 10%. Pentes raides avec indices de surpâturages, couverture végétale sporadique.	190.86	3.90
Champs résiduels sur les ravines Cultures annuelles sur les petits fonds plats entre les ravines. Pentes surpâturées et avec des indices de surpâturage.	212.1	4.33
Zones ravinées Pentes instables et surpâturées, sols nus.	161.12	3.29
Pâturage rocheux Fort surpâturage sur les roches, les éboulis et les croûtes calcaires. Couverture végétale discontinue	617,34	12,60

Formations de dunes		
Végétation initiale des dunes tertiaires réactivées	14.02	0.29
Maquis avec pistacia et Olea	160.25	3.27
Haut de 3 à 5 m maquis, dense avec une grande diversité		
Maquis avec Tetraclinis	369.2	7.53
Formation arbustive discontinue, indices de surpâturage dans la formation herbeuse		
Maquis avec Quercus et Pisticia	420.13	8.57
Maquis avec des indices de dégradation		
Maquis avec Juniperus et Artemisia	300.4	6.13
Formation d'arbustes discontinue de Juniperus, arbustes sporadiques de Quercus, Artimisia,...		
Maquis avec Tetraclinis et Stipia	248.14	5.06
Formation dégradée, formation discontinue.		
Formation des roches et des éboulis	189.28	3.86
Buissons isolés surpâturés, ne dépassant pas 20 cm, formation herbeuse discontinue		
Steppe d'Artemisia et de Stipia	100.91	2.06
Couverture végétale discontinue		
Forêt de Pinus	64.96	1.33
Forêt dense de pinus avec formation arbustive de Quercus		
Reboisement	175.25	3.58
Reboisement récent, couverture végétale discontinue		
Eau libre	9.1	
	4900.00	100

IV.1 .1.4 La topographie

Le bassin est situé entre le massif de l'Ouarsenis et les massifs du BENI – CHOUGRANE. Les monts de la Mina sont formés en grande partie de chaînons et de collines qui relèvent progressivement du nord-ouest au sud-est. Le relief est dans l'ensemble aéré et peu élevé. La topographie est accidentée, les versants sont fortement entaillés par un réseau de ravins généralement dense et digité, aux parois raides. Les Monts de la Mina présentent des caractères ressemblant avec des régions voisines de l'Atlas tellien occidental. En outre, l'inclinaison du relief est un facteur important en ce qui concerne le ruissellement. Cependant le degré d'inclinaison dépend de la roche en place des sols du ravinement, des pluies et de l'activité de l'homme.

Quatre types de pente composent le bassin versant de l'oued Mina.

Cette classification est illustrée dans le tableau IV.3

Tableau IV-3 : Classes de pentes dans le bassin versant de l'oued Mina (Kouri, 1993)

Classes	Superficie (km ²)	%
$P \leq 3$	2604.97	54.6
$3 \leq P \leq 12.5$	1935.47	40.5
$12.5 \leq P \leq 25$	233.49	4.7
$P \leq 25$	3.34	0.1

IV.1 .1.5 Le climat

Le climat de la région, se caractérise par des étés chauds et secs peu orageux et des hivers doux et humides et peut être appelé méditerranéen semi – aride (Gomer, 1994).

Du point de vue climatique, la partie septentrionale de la région d'étude peut être rangée dans les régions méditerranéennes, à part quelques situations spécifiques comme les hauts plateaux méridionaux montrent un caractère aride.

IV.1 .1.6 La température

Le bassin versant de l'oued Mina est caractérisé par une température sèche et chaude de mai à septembre et par une température relativement humide d'octobre à avril.

A titre d'exemple le tableau IV.4 illustre les valeurs de températures enregistrées à la station de Matmeur qui s'éloignent à quelques dizaines de km du bassin. Pour la période (1970/71-1999-00) la température moyenne annuelle est de 18.37°C.

Tableau IV-4 : Températures enregistrées à la station de Frenda (°C).(1970/71-1999/00)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Min	17.72	13.92	9.34	6.20	5.22	6.41	7.52	9.74	13.24	17.45	20.46	20.91
Max	31.11	25.5	20.16	16.16	15.32	17.08	19.21	21.44	25.55	30.71	34.04	35.37
Moy	24.11	19.61	14.75	11.18	10.29	11.74	13.37	15.59	19.50	24.08	27.75	28.14

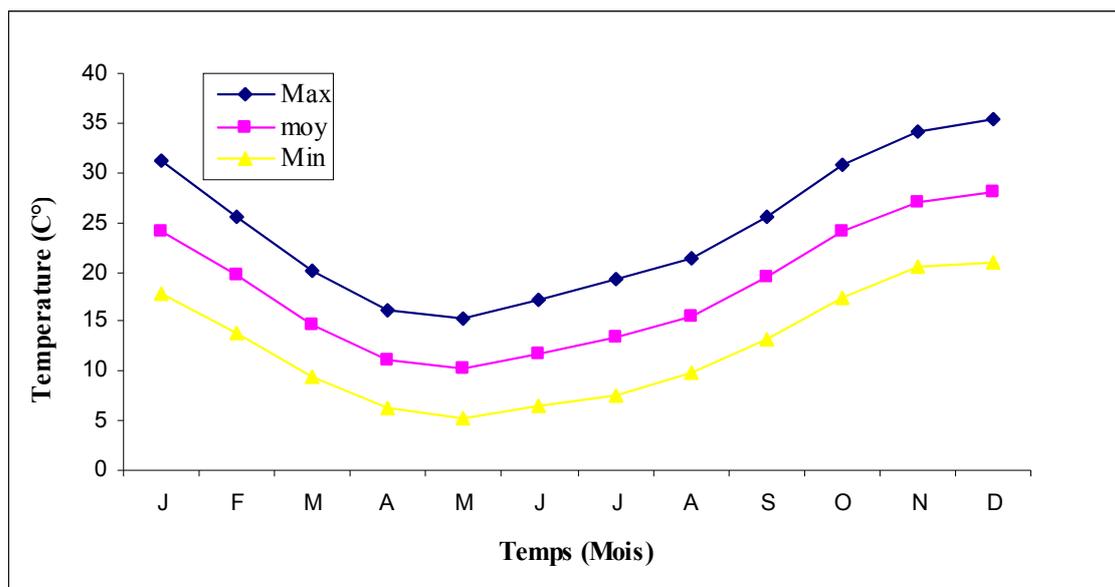


Figure IV-2 : Températures enregistrées à la station de Frenda (°C).(1970/71-1999/00)

IV.1 .1.7 Humidité relative

C'est la quantité de vapeur d'eau contenue dans un certain volume d'air. Elle est représentée par l'humidité relative considérée comme l'un des éléments essentiels du cycle hydrologique.

Les données d'humidité relative de la station de Tiaret qui s'éloignent quelques dizaines de Kms du site du bassin sont mentionnées dans le tableau IV.5

L'humidité en hiver varie de 69 à 78 % et en été de 38 à 48 %

Tableau IV-5 : Humidité relative (%) enregistrée de la station de Tiaret (1970-1995)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	An
Hr	55	64	73	78	76	69	66	56	54	48	38	45	60.17

IV.2 HYDROGRAPHIE ET HYDROLOGIE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED MINA

Le bassin versant de l'oued Mina comprend cinq sous-bassins de tailles variables drainés par les oueds Taht, Medroussa, Haddad, Abd et l'oued Mina lui-même, comme le montre la fig. IV.3, Le cours d'eau supérieur de l'oued est limité par le barrage réservoir de Bakhada. De la à celui de Sidi M'hamed Benaouda, l'Oued ne draine directement que la partie Nord-Oriental du bassin versant.

Le long de son parcours SE-NE il reçoit les Oueds Medroussa, Taht, Abd, et Haddad qui drainent les secteurs sud-est, sud et nord-ouest du bassin versant. Cependant, l'oued Medroussa draine la partie orientale du bassin versant, se jetant dans le cours supérieur de l'Oued Mina. C'est une zone restreinte, mais pluvieuse, atteignant plus de 1000 m d'altitude. En outre, l'Oued Taht draine le Sud-Est du bassin versant. Il prend sa source dans les montagnes de Frenda qui dépassent aussi les 1000 m d'altitude, cependant, il est jaugé à la station de Kef-Mahboula.

L'Oued Abd l'affluent principal, résulte de la confluence des Oueds Chiba et Dez. La longueur totale de son cours est de environ 118 km.

L'Oued Haddad roule les eaux des cours d'eaux Baloul, Rekada et Medjaref. Il a sa source dans le Djebel Bazita à environ 1000m d'altitude. Il draine de sa part le nord-ouest du bassin; on le jauge à la station de Sidi Abdelkader Djillali (Achite, 2002)

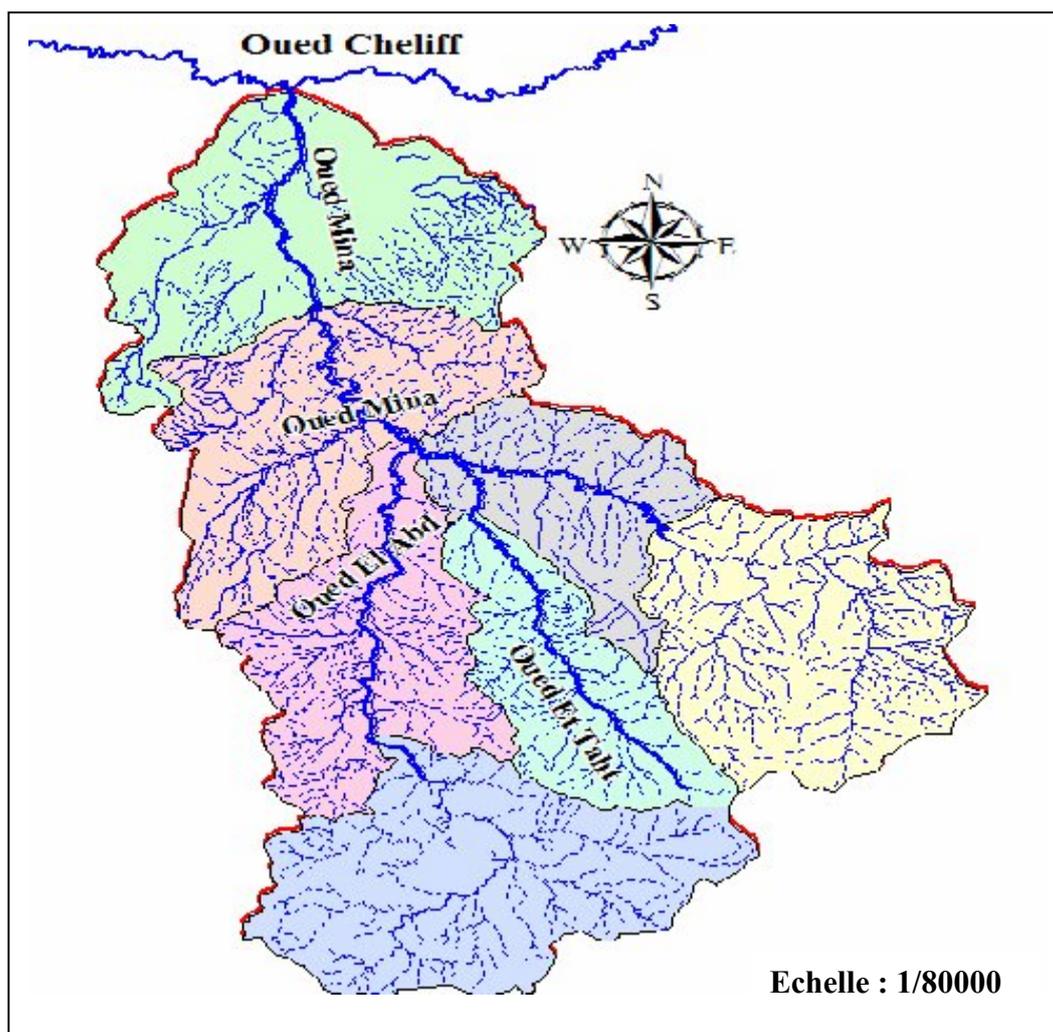


Figure IV-3 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Mina
(DHW de Tissemsilt)

IV.2 .1 Présentation des stations hydrométriques

Le bassin versant de l'Oued Mina est muni de cinq stations hydrométriques, réparties entre des sites différents. Nous nous intéressons dans cette étude aux stations de l'Oued Abtal, de Sidi AEK Djillali et d'Ain Hamarra qui drainent toutes les trois plus de 95% de la surface du bassin. Leurs caractéristiques sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau IV-6 : Code, année de service et coordonnées Lambert des stations hydrométriques

N°	Stations	Code	Année de mise en service	X (Km)	Y(Km)	Z(m)
1	Oued El Abtal	013402	1964	316.8	245.65	205.00
2	Sidi A.E.K. Djilali	013401	1968	309.00	244.50	225.00
3	Ain Hamarra	013302	1967	316.4	235.40	288.00

IV.2 .2 Morphométrie des sous bassins au droit des stations hydrométriques

IV.2 .2.1 Caractéristiques de forme

La forme d'un bassin versant est la configuration géométrique telle qu'elle est projetée sur un plan horizontal. Elle influence directement le temps de réponse du bassin, c'est à dire sur le temps de parcours des eaux à travers le réseau de drainage et par conséquent influent sur l'hydrogramme.

IV.2 .2.2 Caractéristiques topographiques

La plus part des facteurs climatiques et hydrologiques sont fonction de l'altitude (Benaabidate, 2000). Il est donc important de déterminer la répartition du bassin versant par des tranches d'altitudes et de dégager les différents paramètres du relief.

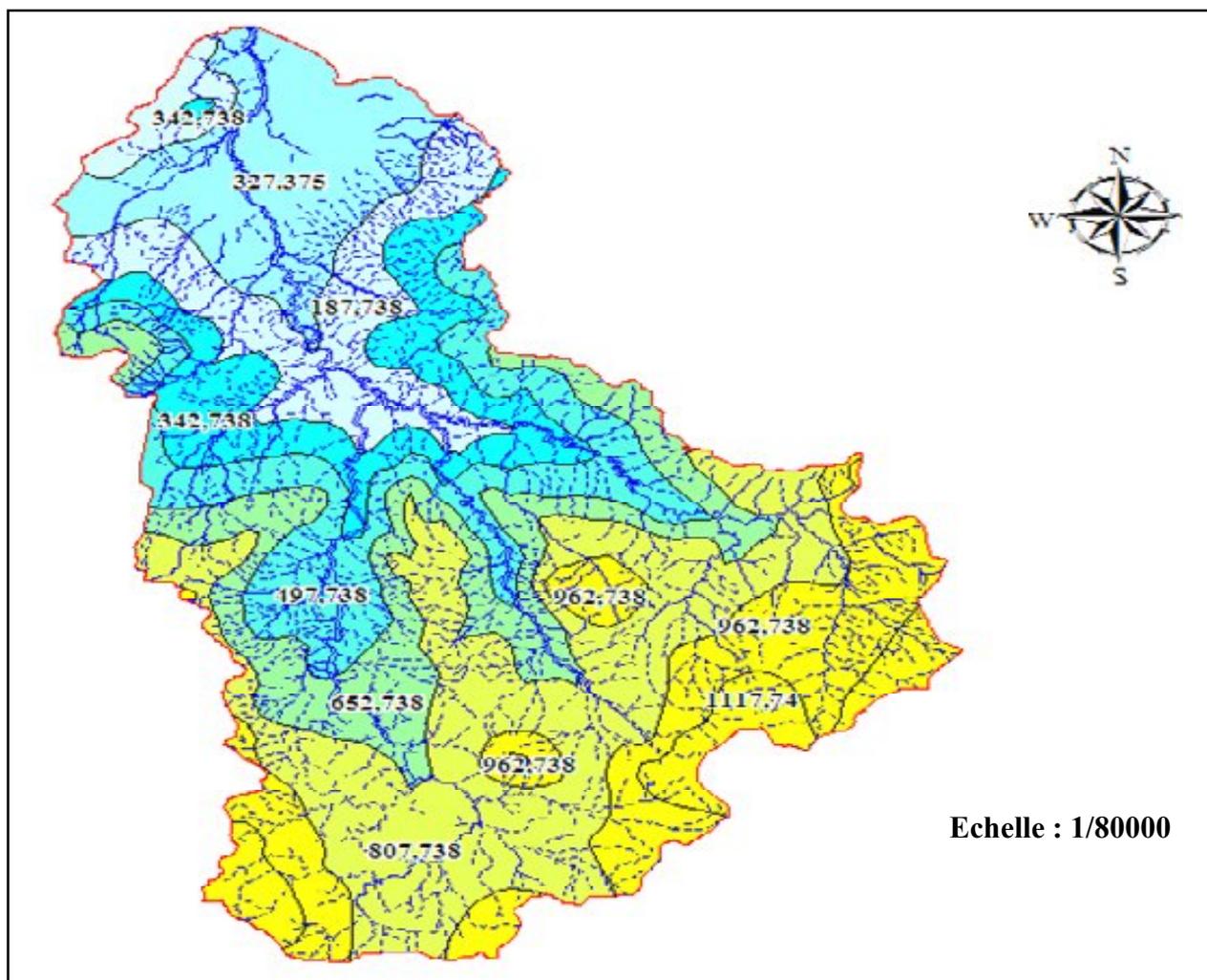


Figure IV-4 : Carte topographique du bassin versant de l'oued Mina (DHW de Tissemsilt)

IV.2 .2.3 Caractéristiques hydrographique

Le réseau hydrographique désigne l'ensemble des canaux de drainage naturels, permanents ou temporaire, par lesquels s'écoulent les eaux provenant du ruissellement ou restituées par les nappes souterraines

les courbes hypsométriques fournissent une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Ces courbes représentent la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude, Figure. IV.5

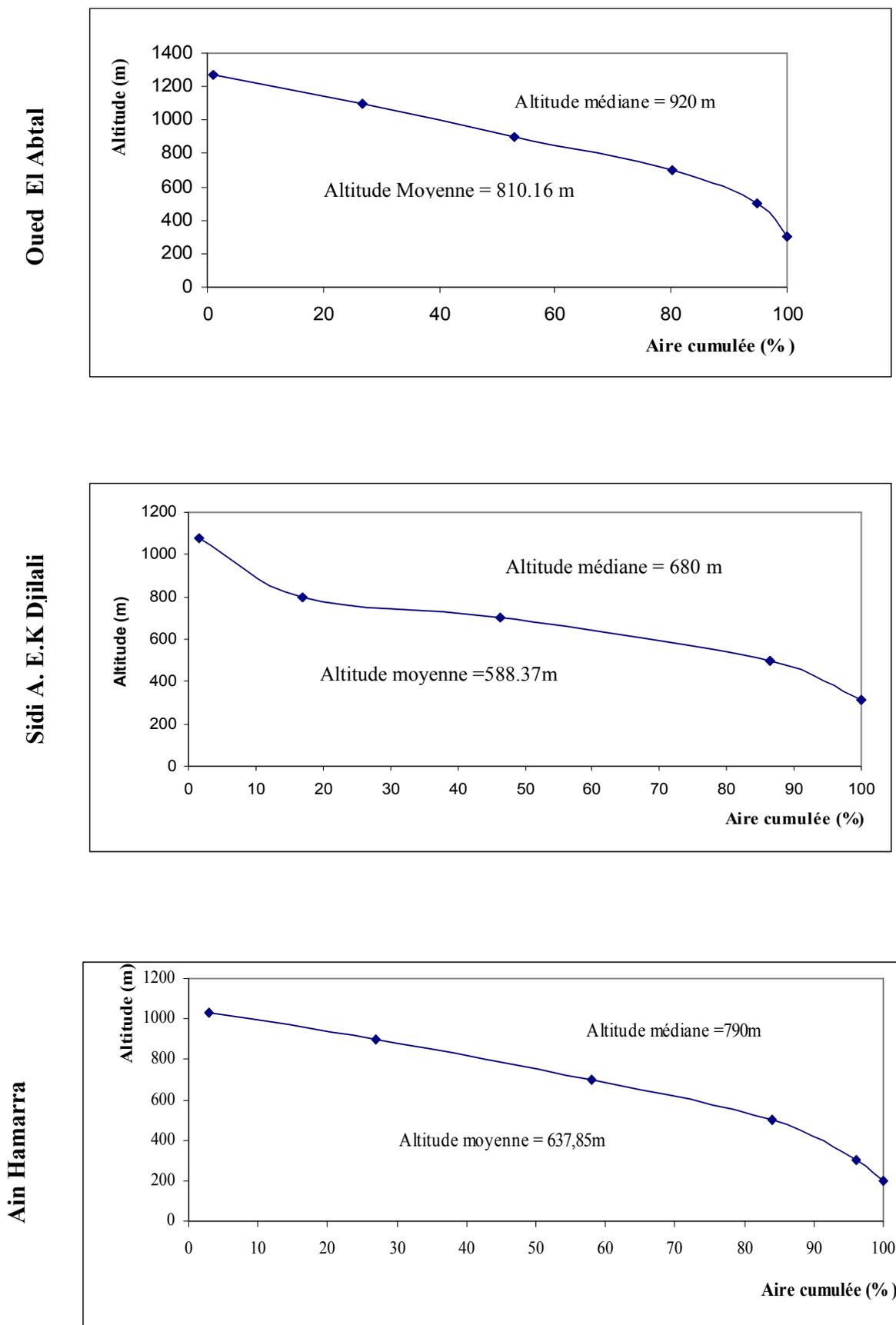


Figure IV-5 : Courbes hypsométriques des bassins versants

- **Profil en long des Oueds**

Le profil en long de l'Oued Mina est tracé à partir des cartes topographiques au 1/20000^{ème} comme montre la figure IV.7

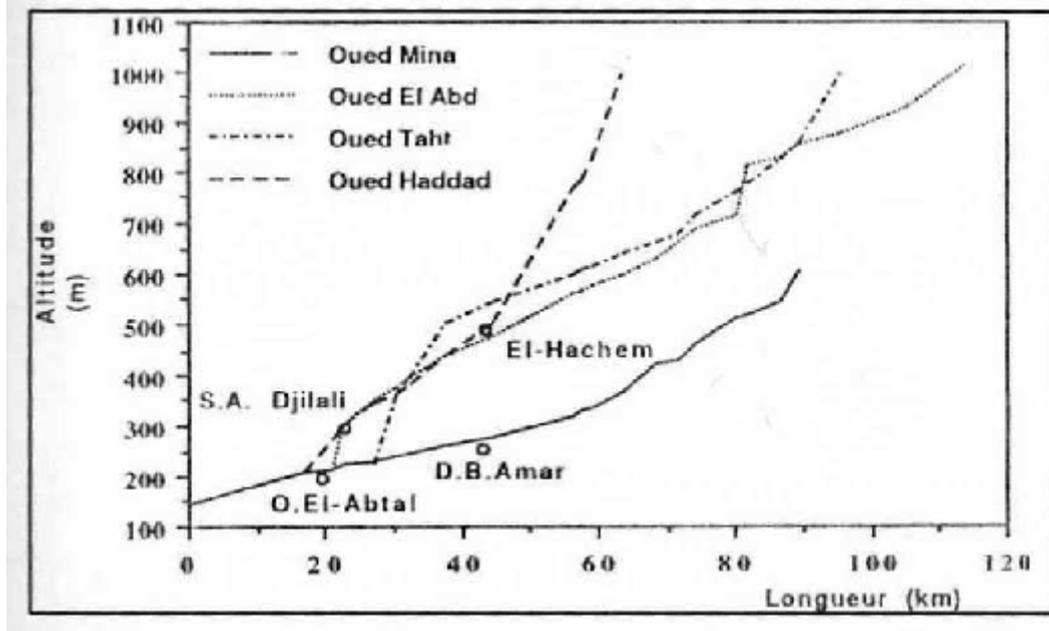


Figure IV-7 : Profil en long de l'oued Mina et ses affluents (Achit, 2002).

Nous notons les points suivants (Achite, 2002):

- L'Oued Mina est long de 135 Km, il a une concavité marquée. La pente, faible dans les tronçons inférieurs (0,27%) atteint 0,86% en amont de Djilali Ben Amar
- L'Oued Haddad a une pente moyenne de 0,89% sur une longueur de 47 Km. le profil en long montre un changement de pente localisé approximativement à El - Hachem. A l'aval de cette localité, la pente est de 0,36%, et atteint 2,5% dans les tronçons à l'amont.
- Les Oueds Abd et Taht s'allongent respectivement sur 118 et 53 Km avec des pentes moyennes de 0,8% et 1,1%. Ces affluents ont une concavité peu marquée. Ils ont à l'amont de leurs confluences avec l'Oued Mina des formes convexes.

Tous les paramètres hydromorphométriques des sous bassins versants sont données par le tableau IV-7

Tableau IV-7 : Caractéristiques physiographiques des bassins versants de la Mina

Paramètres		Oued Mina à Oued El-Abtal	Oued Haddad à Sidi A E K Djilali	Oued Abd à Ain Hamarra	
Caractéristiques de forme		Km ²	5400	470	2480
	p	Km	295	91	366.15
	Kc	-	1.28	1.29	1.26
	Rf	-	0.51	0.48	1.91
	Kf	-	0.77	0.59	0.69
	Re	-	0.81	0.76	1.50
	Rc	-	0.59	0.71	0.62
	L	Km	108.94	37.36	114.83
	I	Km	37.87	12.58	42.67
Caractéristiques topographiques	H_{max}	m	1339	1160	1339
	H_{min}	m	205	225	145
	H_{moy}	m	810	588	755
	H_{5%}	m	1243	1018	1232
	H_{95%}	m	492	381	404
	H_{50%}	m	923	681	874
	D	m	1134	935	1194
	D_s	m	688	542	138.5
	I_g	%	25.59	46.05	6.2
	I_p	%	1.04	2.50	1.04
	I_m	%	50.1	46.0	56.6
Caractéristiques hydrographiques	$\sum_{i=1}^N L_i$	Km	18256	1150	21974
	D_d	Km/ Km ²	4.42	2.44	4.48
	C_t	-	15.01	5.4	18.30
	L_{cp}	Km	90	47	135
	T_c	Heures	19.91	10.31	24.41

Conclusion

Au terme de ce chapitre qui présente les fondements géographiques du bassin versant de la Mina, quelques points caractéristiques sont à relever :

Le bassin versant de la Mina est un bassin de forme ramassée de temps de concentration de 24.41h

Le sol du bassin est formé en majeure partie de marnes .Un tel sol a tendance à favoriser un ruissellement rapide et une intensité d'infiltration assez faibles

Le climat de la région est de type semi-aride méditerranéen (pluie d'hiver, sécheresse estivale).

Chapitre V

Application du modèle GR2M et l'étude de tendance
des écoulements

V-1 Introduction

Les modèles hydrologiques pluie-débit ne peuvent être testés ni fonctionnés sans l'apport de données hydrométéorologiques, à savoir les données pluviométriques et d'évapotranspiration comme entrées du modèle et les données hydrométriques comme sorties de ce dernier (pour la période de calage et celle de validation). L'étape la plus difficile dans l'application de modèles conceptuels est l'optimisation de leurs paramètres, certains auteurs s'accordent pour dire que la qualité des paramètres d'un modèle dépend notamment de la puissance et de la robustesse de l'algorithme utilisé (Duan et al. 1992). Cette phase d'optimisation n'est cependant pas un problème hydrologique proprement dit, mais plutôt un corollaire mathématique de la modélisation lié à la nature et à la complexité intrinsèque de modèle (structure et nombre de paramètres).

Néanmoins, la complexité de certains modèles pluie-débit a conduit au développement de méthodes d'optimisation de plus en plus sophistiquées, destinées à pallier les défaillances des méthodes traditionnelles d'optimisation.

V.2 Changements climatiques aux horizons 2020 et 2050

Plusieurs manifestations climatiques récentes de grande ampleur ont poussé la communauté scientifique à s'intéresser aux changements climatiques et leurs conséquences socio-économiques. Parmi ces manifestations, la sécheresse qui a touché des grandes zones de notre planète, notamment les pays Africains (Wesselink & al., 1995; Mahe & al., 1995; Ouedraogo, 2001; Albergel & al., 2000; Ardoin-Bardin, 2004; Totin, 2005).

En Algérie, le changement des principaux facteurs climatiques (Température, Evapotranspiration potentielle et pluie) a été particulièrement remarquable depuis 1975 (Meddi M. & al. 2003 ; Meddi M. et al. 2002 ; Meddi et al. 2009) la sécheresse a dramatiquement perturbé les usages de l'eau sur le plan domestique, agricole et industriel.

Pour une prévision hydrologique nécessaire à une gestion intégrée et une utilisation rationnelle des ressources en eau, nous avons fait une combinaison entre les résultats d'un modèle climatique global (UKHI) et un autre de transformation pluie débit afin de simuler le comportement hydrologique de l'oued Mina aux horizons 2020 et 2050 .

Pour étudier l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau, nous avons utilisé les projections climatiques saisonnières sur l'Algérie à l'horizon 2020 et 2050 obtenues par le modèle UKHI (United Kingdom Meteorological Office High Resolution) en adoptant le scénario « IS92a » du GIEC avec les deux hypothèses haut et bas (Tableau V-1).

Tableau V-1 : Caractéristiques des projections climatiques sur l'Algérie

Saison	Paramètre Climatique	2020		2050	
		Bas	Haut	Bas	Haut
Automne	T °C (+)	0,8	1,1	1,2	2,2
	P % (-)	6	8	10	15
Hiver	T °C (+)	0,65	0,8	0,95	1,6
	P % (-)	10	10	16	16
Printemps	T °C (+)	0,85	0,95	1,25	1,9
	P % (-)	5	9	10	20
Eté	T °C (+)	0,85	1,05	1,25	2,1
	P % (-)	8	13	15	22

V.3 Changement climatique et pluviométrie pour le bassin du Chéllif-Zahrez

La carte pluviométrique de la période 1961/1990 représente un échantillon caractéristique d'un paramètre si important dans la détermination des bilans hydrologique, elle fait bien ressortir, les traits essentiels de la répartition des précipitations moyennes inter-annuelles dans le bassin de la Mina. Ses pluies sont assez faible, cette région est cernée dans sa majorité par les isohyètes de 300 mm et 400 mm (Seconde communication nationale de Algérie sur les changements climatiques à la CCNUCC. Meddi M et al ; 2010).

Les cartes obtenues pour ces différents horizons montrent la diminution des surfaces plus pluvieuses et l'augmentation des surfaces moins pluvieuses par rapport à la carte relative à la période de référence (1961-1990). La région Nord-Est du Bassin du Cheliff et particulièrement le massif du Zaccar, dont la pluviométrie dépasse les 600mm, sera caractérisée par une pluviométrie comparable à celle de la période de référence. Par contre, une plus grande partie du bassin se situera entre les isohyètes 100 et 400 mm (réduction de la pluviométrie), elle concernera les régions du bas Cheliff, la Mina et celle du Cheliff en Amont de Boughzoul (fig. V-1), (Seconde communication nationale de Algérie sur les changements climatiques à la CCNUCC. Meddi M et al ; 2010).

Les différentes cartes pluviométriques établies pour les différents horizons (2020, 2025 et 2050) montrent les mêmes traits de la répartition spatiale des précipitations moyennes annuelles, mais avec des valeurs moins importantes par rapport à la moyenne relative à la

période de référence (1961-1990), (Seconde communication nationale de Algérie sur les changements climatiques à la CCNUCC. Meddi M et al ; 2010).

De ce fait, on remarque bien la réduction des zones pluvieuses dans le bassin du Cheliff :

- Les régions du côtier et du massif de l'Ouerssenis, dont les pluies étaient de plus de 450 mm pour la période 1961-1990, deviennent moins importantes et ne dépasseront guère les 400 mm pour les différents scénarios est les différents horizons.
- Sur le massif de Zaccar la pluviométrie deviendra moins importante.
- Les régions de l'amont Boughzoul, Bas Cheliff et de la Mina seront comprises entre l'isohyète 300 mm au Nord et l'isohyète 100 mm au Sud. Le climat semi aride à aride devient, par conséquent plus développé en occupant des surfaces de plus en plus vastes.

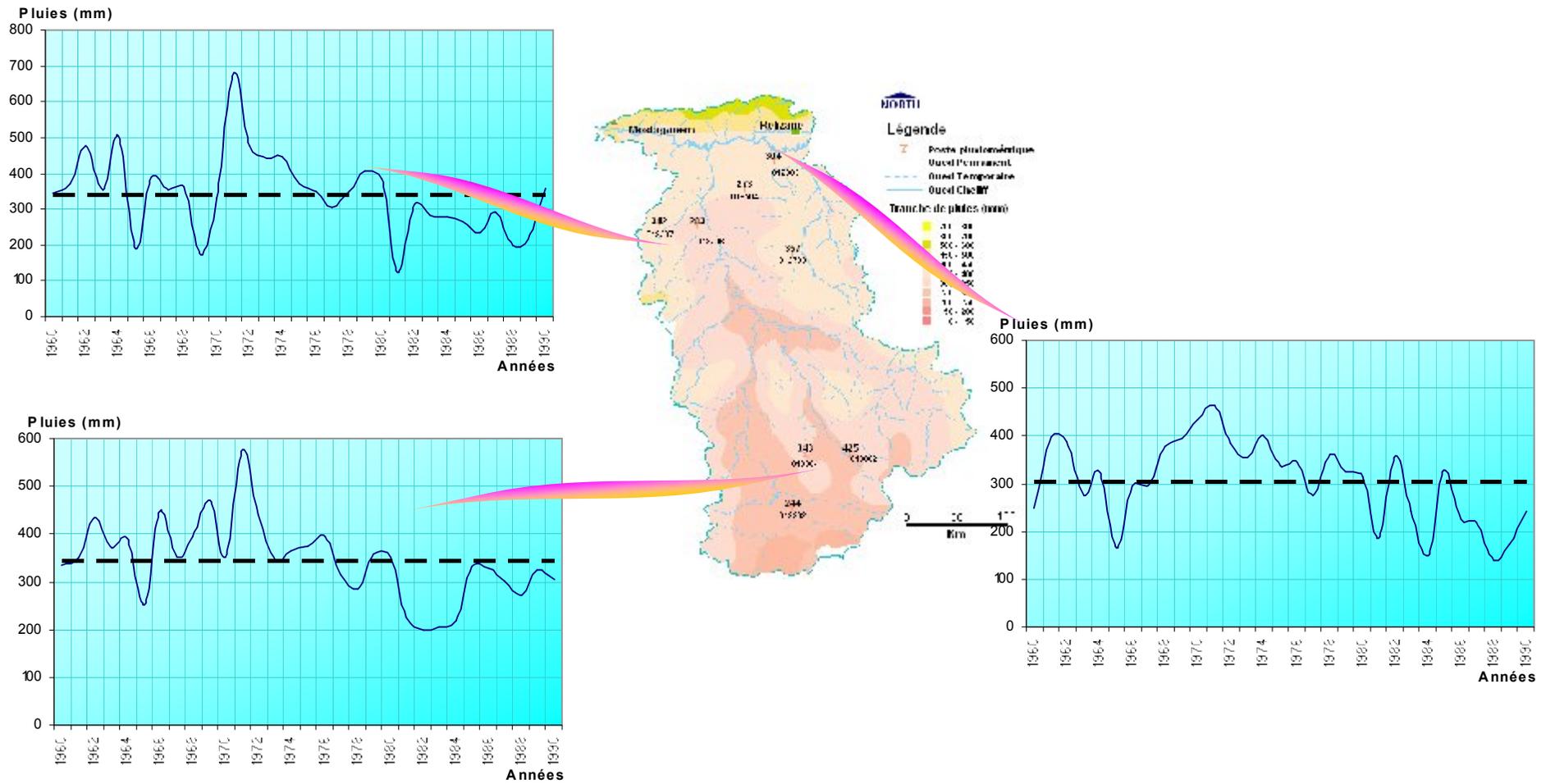


Figure 1 : Variabilité pluviométrique dans le Bas Cheliff et la Mina (période 1961-1990)

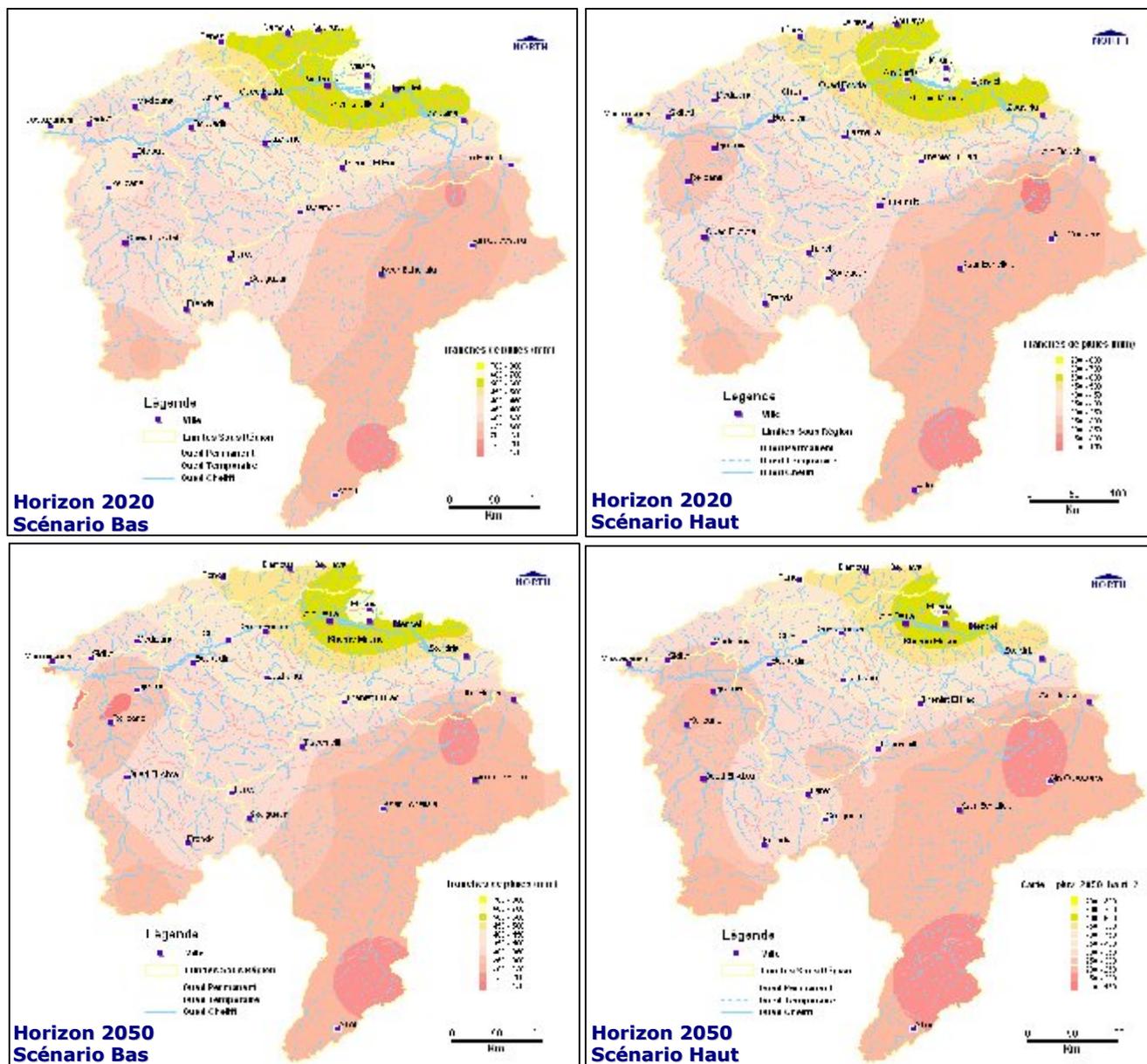


Figure V-2 : Variabilité pluviométrique dans le Bas Cheliff et la Mina (période 1961-1990) et projection pour les horizons 2025 et 2050 (Meddi et al., 2010)

V.4 Impact des changements climatiques sur les débits

Le modèle hydrologique GR2M sera utilisé pour la traduction du fonctionnement hydrologique de l'oued Mina. Le modèle sera calé et validé sur certaines périodes d'observations de références à savoir 1961-1990 et 1971-2000, et cela pour montrer que les simulations des débits futurs sont dépendantes de la période utilisé comme référence.

V-2 Homogénéisation des données

Le modèle retenu GR2M a été appliqué sur les sous bassins versants de l'oued Mina, Nous avons choisi, pour l'application du modèle, le bassin qui possède des séries d'observation, de pluie et de débit, assez longues (supérieur à 10 ans).

- **Comblement des données manquantes**

Afin d'obtenir des séries pluviométriques homogènes (aiez, 1977), un comblement des lacunes s'est avéré nécessaire. Le comblement de lacunes mensuelles, entre stations a été fait en utilisant la régression linéaire, la méthode des rapports (Ghachi , 1986) a été utilisée, cette dernière se base sur le rapport entre les mois et les années de la station de base et celle à combler.

$$P_{mij2} = P_{mij1} * (P_{ani2} / P_{ani1})$$

Avec :

P_{mij2} : Pluie du mois j de l'année i de la station à combler.

P_{mij1} : Pluie du moi j de l'année i de la station de base.

P_{ani2} : pluie de l'année i de la station à combler.

P_{ani1} : Pluie de l'année i de la station de base.

Pour l'homogénéisation des données pluviométriques, plusieurs méthodes statistiques permettent de tester l'homogénéité des séries pluviométriques avant utilisation. Parmi elles, nous avons retenu pour sa pertinence et sa simplicité, le test graphique des doubles cumuls des totaux pluviométriques (Bertrand, 2007). Il s'agit de savoir si les données d'observation sont fiables, donc utilisables telles quelles. En effet, les changements d'observateurs, de déplacements et de fermetures de postes, avaries sur le matériel ou panne d'un pluviomètre qu'on attend plusieurs semaines avant de remplacer, occasionnent de ruptures de continuité dans les séries. Ces aléas peuvent expliquer la présence d'hétérogénéité dans les données (Bertrand, 2007).

L'analyse des représentations graphiques révèle que la plut part des données sont continues et homogènes au cours des 30 années d'observations.

V.3 les données du modèle

V.3.1 les données pluviométriques

La précipitation est la source principale de notre approvisionnement en eau, les relevés de précipitation sont donc à la base de nombreuses études et projets qui ont trait aux approvisionnements en eau, aux inondations, à la sécheresse, à l'irrigation et aux structures de contrôle ainsi qu'aux études de modélisation hydrologique (Chérifi, 2006). La précipitation comprend toutes les formes d'humidité tombant de l'atmosphère à la surface de la terre. Sa source primaire est la vapeur d'eau présentée sous forme de vapeur, de liquide et de solide. Elle s'accroît par l'évaporation et la transpiration et elle décroît avec la précipitation. Une étude faite par Allis, et al, (1963) a démontré que "la vraie précipitation pour une région donnée est inconnue". Ceci est sans doute dû à l'erreur instrumentale des pluviomètres et à l'hétérogénéité naturelle de la précipitation. Les erreurs commises dans la mesure des pluies sont généralement dues au changement du type de pluviomètre, l'inclinaison du pluviomètre, l'évaporation et l'effet du vent. Lorsque la précipitation est relativement uniforme et que les mesures sont représentatives, la moyenne arithmétique de plusieurs valeurs peut fournir un estimé satisfaisant de la quantité de pluie moyenne d'une région, ainsi que par la méthode des polygones de Thiessen et celle des isohyètes (Oray, 1972). Nous avons appliqué la méthode de Thiessen pour calculer la précipitation moyenne, c'est une méthode purement géométrique, Elle permet d'identifier à partir de la densité du réseau pluviométrique, les zones d'influences et la précipitation moyenne, cette dernière est donnée par l'expression suivante :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i P_i}{S}$$

Avec :

S_i : Surface d'influence du pluviomètre i

P_i : Précipitation au poste i

S : Surface du bassin versant

V.3. 2 L'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration notée ETP, implique l'eau utilisée par les procédés d'évaporation et de transpiration il est évident que Plusieurs facteurs, notamment les facteurs climatiques qui influent l'évaporation affectent aussi l'évapotranspiration. Parmi ces facteurs l'intensité et la durée de la radiation solaire, les conditions du vent, l'humidité relative, le couvert nuageux, la pression atmosphérique et d'autres. Elle est estimée par une mesure par évaporomètre ou déduite par des formules empiriques telles que celles de Penman, Turc, Thornthwaite ... etc. L'unité de l'évapotranspiration est le millimètre sur le pas de temps désiré (mois dans notre cas). Les données de l'ETP, utilisées ont été calculées par la formule de Thornthwaite, c'est une méthode empirique qui a été établie par ajustement statistique (Thornthwaite, 1951). Il est souvent aisé de calculer L'ETP par cette formule car elle nécessite des données climatiques relativement simple à acquérir.

La formule de Thornthwaite est la suivante:

$$ETP \text{ (mm)} = 16. (10. (T/I))^a. F(\lambda)$$

Avec :

T : Température moyenne de la période considérée en °C;

I : indice thermique annuel qui est la somme des douze indices thermiques mensuels i , avec

$$i = (T/5)^{1.514}$$

a est une fonction complexe $a = (6,75. 10^{-7}.I^3) - (7,71. 10^{-5}.I^2) + (1,79.10^{-2}.I) + 0,49$

F (λ) est un terme correctif qui intègre la durée théorique d'insolation dépendant de la latitude et du mois.

Tableau V-1 : Valeurs de coefficient de correction F (λ) du bassin versant de l'Oued Mina.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
F (λ)	0.86	0.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	0.97	0.85	0.83

V.3.3 Les données hydrométriques

Suite à une pluie tombée sur le bassin versant, tout un mécanisme complexe d'interaction de phénomènes hydrologiques et climatologiques se met en oeuvre. Il se traduit par une circulation directe ou indirecte, de l'eau à travers le sol ou le sous-sol en passant par les cours d'eau secondaires puis principaux, et finissant par l'exutoire du bassin versant. A l'échelle globale du bassin versant, le débit à l'exutoire traduit la réaction de tout le bassin suite à une pluie. Il est mesuré par différentes techniques hydrométriques, par exemple: le jaugeage par moulinet ou le jaugeage chimique. Ce débit est exprimé en mètre cube par

seconde (m^3/s). Pour les nécessités de calcul du modèle, les débits sont exprimés en mm d'eau par mois (apports).

V.4 Méthodologie de modélisation

Le modèle retenu (GR2M) fonctionne au pas de temps mensuel. Ce modèle, de type conceptuel, est réglé par deux paramètres (GR pour **G**énie **R**ural, **2** pour Deux paramètres, M pour le pas de temps **M**ensuel). Deux paramètres, X_1 et X_2 règle la génération de débits mensuels. Les valeurs de ces deux paramètres sont déduites d'une période d'apprentissage durant laquelle sont comparés les débits observés et ceux calculés par le modèle grâce à la seule connaissance des pluies de chaque mois. A travers ces valeurs, on vise à réduire l'écart entre débits observés et débits calculés.

V.4.1 Le calage

Le calage consiste à « sélectionner les paramètres d'un modèle de façon à ce que celui-ci simule le comportement hydrologique du bassin versant de la meilleure façon possible » (Madsen, 2000). Il s'agit donc de rechercher le minimum d'une fonction mathématique reliant les données mesurées aux paramètres calculés.

Cette opération peut se faire manuellement, par essai et erreur ou automatiquement à partir d'algorithmes de recherche d'optimum (Ambroise, 1999).

V.4.2 La validation

La validation est une phase de contrôle ou l'on tente de s'assurer que l'ensemble construit représente bien le monde réel ; il est donc indispensable, pour valider, de comparer les sorties du modèle avec de vraies observations.

La validation consiste donc à tester sur un modèle un jeu d'entrée non utilisé pendant la phase du calage, mais pour lequel la sortie est connue, et de comparer sorties réelle et calculée (G.De MARSILY).

V.4.3 Optimisation des paramètres de calage du modèle

L'optimisation des paramètres d'un modèle pluie-débit a pour but de trouver le jeu de paramètres qui rapproche le plus possible le comportement du modèle de celui du bassin modélisé, la similitude des comportements étant qualifiée par un critère servant à l'optimisation des paramètres et mesurant ce degré de similitude (Charifi, 2006). Le calage demande donc le choix à la fois d'un critère de qualité, d'une méthode pour identifier les paramètres, ainsi que de séries de données destinées à fournir l'information nécessaire au calage (Sorooshian et Gupta, 1985). C'est une phase délicate, souvent plus délicate que le modèle a un nombre élevé de paramètres. Avec l'amélioration des moyens de calcul, les

méthodes automatiques de calage sont de plus en plus utilisées, par opposition à des techniques manuelles utilisant généralement des critères graphiques.

Le modèle GR2M a été programmé sur une feuille Excel (Makhlouf et Michel, 1994). Nous avons divisé les séries d'observation en deux sous périodes, l'une pour le calage du modèle et l'autre pour la validation de ce dernier. Les paramètres du modèle sont optimisés à l'aide de l'outil 'SOLVEUR' du logiciel Excel jusqu'à l'obtention d'une valeur de Nash proche de 100% et d'un meilleur ajustement entre les débits observés et les débits calculés par le modèle.

V.4.4 Initialisation du système et la période de mise en route

La mise en œuvre d'un modèle pluie débit, l'évaluation de sa performance ainsi que l'optimisation des paramètres nous oblige à partir d'un état initial du système. Elle consiste à prédéfinir des valeurs initiales pour les paramètres du modèle avant de passer à la phase d'optimisation ou autrement dit avant sa confrontation à la réalité hydrologique observée. Dans le cas où le modèle comporte des réservoirs, cette phase d'initialisation consiste aussi à prédéfinir les niveaux initiaux de ceux-ci avant le calage.

Dans une modélisation empirique ou conceptuelle, cette phase d'initialisation apparaît comme une nécessité physique, généralement cet état initial est défini de façon arbitraire par le modélisateur. Cependant, le choix d'un état initial peut influencer le jeu optimal de paramètres du modèle ainsi que sa performance. Pour remédier à cette contrainte, on choisit généralement une période de mise en route. La période de mise en route est donc une solution au problème du choix arbitraire des niveaux initiaux des réservoirs au début de la période test. Elle consiste à prendre en compte que les résultats après une durée d'observation fixé au préalable. A titre d'exemple, Perrin (2000) a utilisé une période de mise en route une année. Bouabdallah (1997) a fixé la période de mise en route à 2 ans lors de l'élaboration de GR1A. Dans ce travail la période de mise en route choisie est 1 an pour le pas de temps mensuel.

V.5 Etude comparative et choix de la série de référence

A travers cette étude, nous voulons montrer que les prévisions de débits au futur sont liées à la période de référence choisie, donc l'étude de l'impact des changements climatiques sur le régime des cours d'eau pour les trois stations étudiés sera effectuée selon la période de référence choisie. Les données météorologiques et hydrométriques de la station d'oued El Abtal ont été choisies pour effectuer cette comparaison entre deux périodes de référence à savoir : 1960-1990 et 1970-2000.

Le tableau V-2 résume les résultats de la calibration et de la validation pour les deux périodes pour la station de l'oued El Abtal

Tableau V-2 : Paramètres optimisés du modèle GR2M pour les périodes 1960-1990 et 1970-2000

Nom de la station	Période de calage	Période de validation	X ₁	X ₂	Critère de Nash au calage	Critère de Nash à la validation
Oued Al Abtal	1960-1976	1977-1990	6.16	0.84	66.1	62.5
	1970-1986	1987-2000	7.48	0.58	74.70	70.20

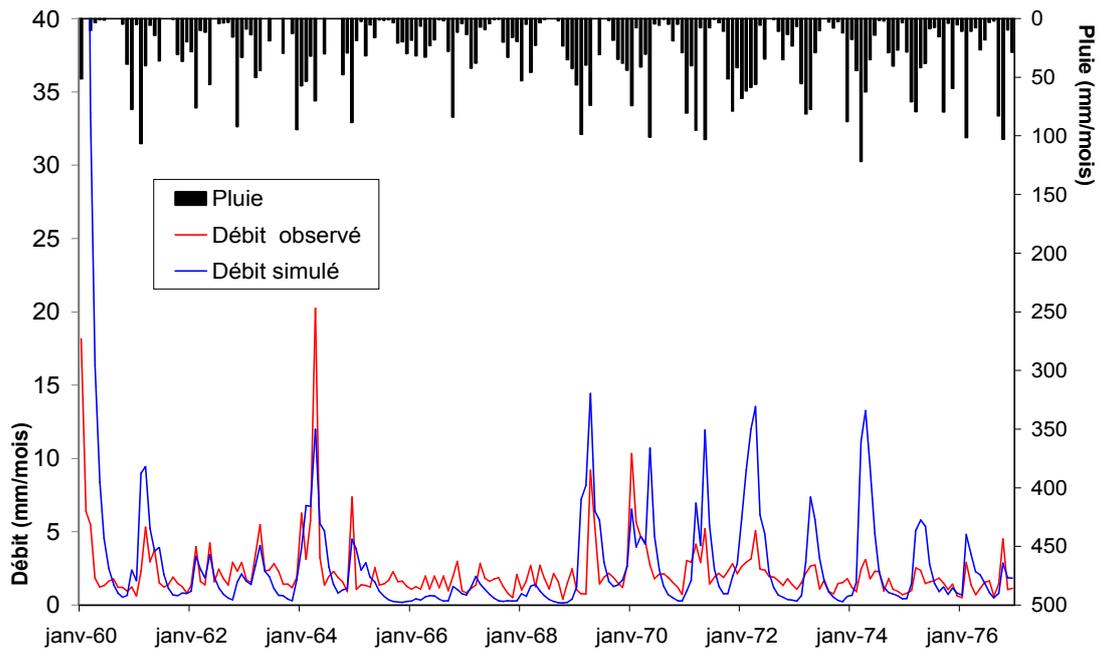


Figure V-3 : Variabilité des pluies et débits observée et simulée sur la période de calage (1960-1976) pour la station de l'Oued Al Abtal

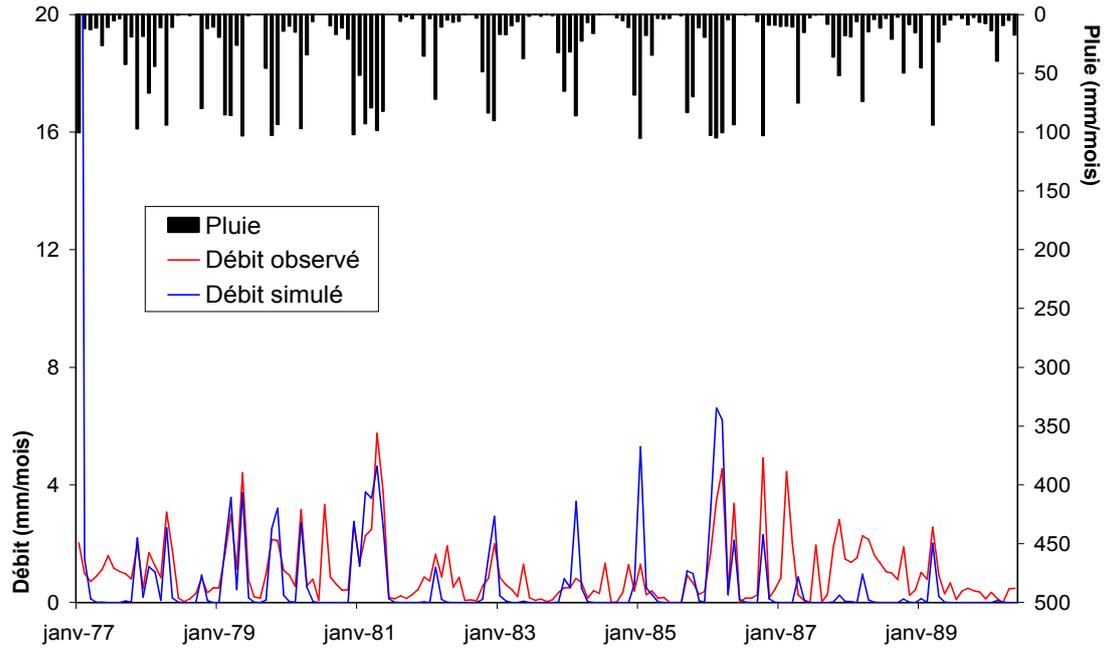


Figure V-4 : Variabilité des pluies et débits observée et simulée sur la période de validation (1977-1990) pour la station de l'Oued Al Abta

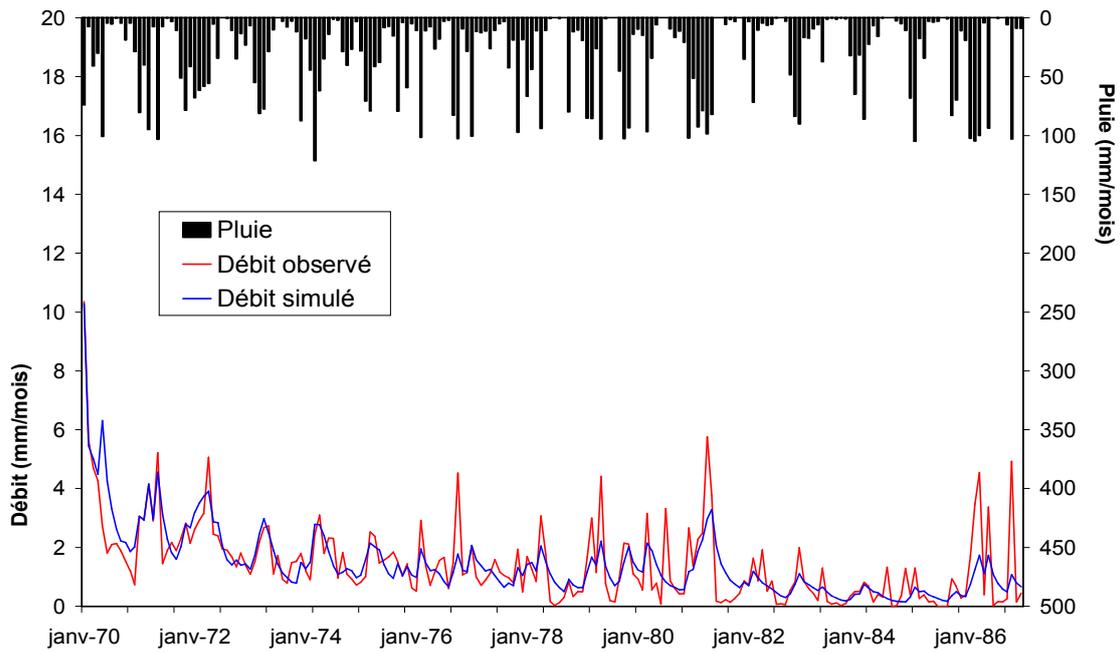


Figure V-5 : Variabilité des pluies et débits observée et simulée sur la période de calage (1970-1986) pour la station de l'Oued Al Abtal

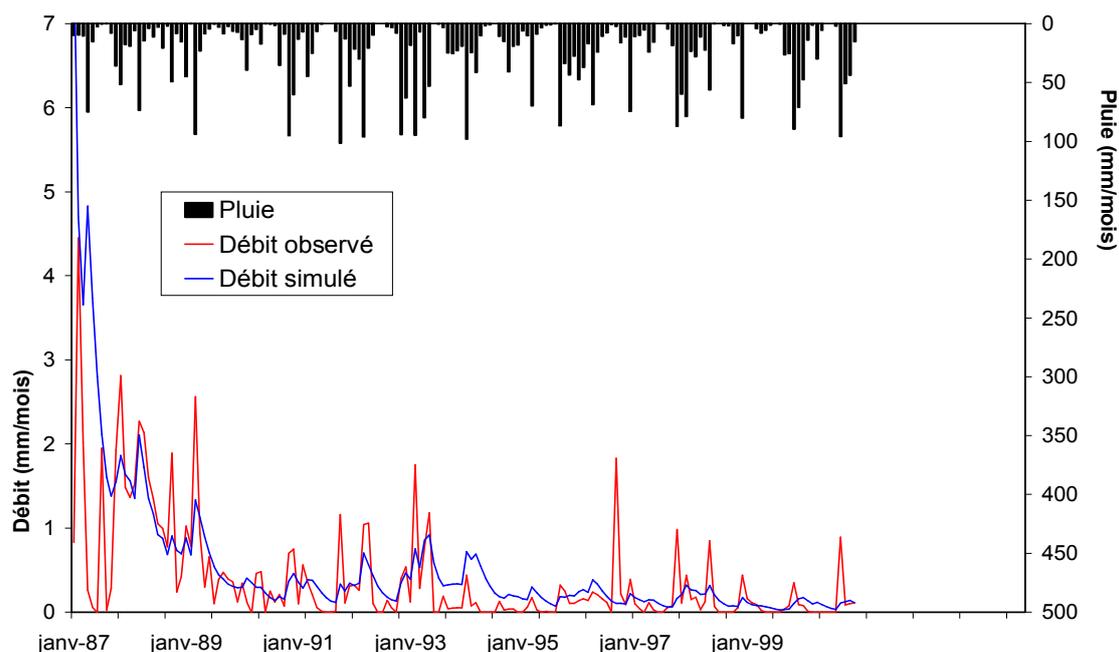


Figure V-6 : Variabilité des pluies et débits observée et simulée sur la période de validation (1987-2000) pour la station de l'Oued Al Abtal.

V.5.1 Comparaison des débits saisonniers entre la période de référence (1960-1990) et l'horizon 2020

Les résultats de la combinaison modèle climatique-modèle hydrologique sont montrés par les tableaux V-3 et V-4 et la figure V-5 :

Tableau V-3: Débits moyens saisonniers de l'Oued Mina à la Station de l'Oued Al Abtal à l'horizon 2020 (scénario bas) par rapport à la période de référence (1960-1990)

Saison	Pluie moy à l'horizon 2020 (mm)	ETP moy à l'horizon 2020 (mm)	Pluie moy (1960-1990) (mm)	ETP moy (1960-1990) (mm)	Débit moy (1960-1990) (m3/s)	Débit moy à l'horizon 2020 (m3/s)	Réduction de débit (%)
Automne	102,97	145,45	109,54	162,07	4,15	3,7	10,84
Hiver	117,32	281,08	130,35	143,50	13,9	13,6	2,16
Printemps	65,38	367,46	68,82	278,53	8,2	7,7	6,10
Été	20,79	164,47	22,60	136,83	4,28	3,92	8,41

Tableau V-4: Débits moyens saisonniers de l'Oued Mina à la Station de l'Oued Al Abtal à l'horizon 2020 (scénario haut) par rapport à la période de référence (1960-1990)

Saison	Pluie moy à l'horizon 2020 (mm)	ETP moy à l'horizon 2020 (mm)	Pluie moy (1960-1990) (mm)	ETP moy (1960-1990) (mm)	Débit moy (1960-1990) (m3/s)	Débit moy à l'horizon 2020 (m3/s)	Réduction de débit (%)
Automne	100,78	372,29	109,54	162,07	4,15	3,62	12,8
Hiver	117,32	148,62	130,35	143,50	13,9	13,36	3,9
Printemps	62,63	283,54	68,82	278,53	8,2	7,66	6,6
Été	19,66	372,29	22,60	136,83	4,28	3,75	12,4

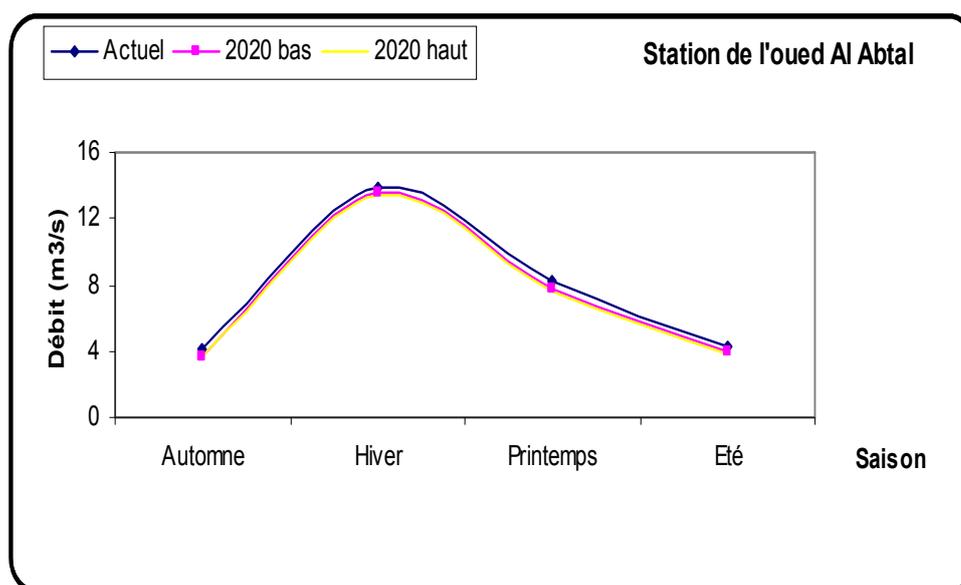


Figure V-7 : Tendance des écoulements à l'horizon 2020 (Station de l'Oued Al Abtal) par rapport à la période (1960-1990)

V.5.2 Comparaison des débits saisonniers entre la période de référence (1960-1990) et l'horizon 2050

Pour l'horizon 2050, la combinaison modèle climatique-modèle hydrologique a donné des résultats qui sont montrés par les tableaux V-5 et V-6 et la figure V-6 :

Tableau V-5: Débits moyens saisonniers de l'Oued Mina à la Station de l'Oued Al Abtal à l'horizon 2050 (scénario bas) par rapport à la période de référence (1960-1990)

Saison	Pluie moy à l'horizon 2050 (mm)	ETP moy à l'horizon 2050 (mm)	Pluie moy (1960-1990) (mm)	ETP moy (1960-1990) (mm)	Débit moy (1960-1990) (m3/s)	Débit moy à l'horizon 2050 (m3/s)	Réduction de débit (%)
Automne	98,59	170,97	109,54	162,07	4,15	3,50	15,7
Hiver	109,49	151,8	130,35	143,50	13,9	13,12	5,6
Printemps	61,94	290,94	68,82	278,53	8,2	7,47	8,9
Été	19,21	377,15	22,60	136,83	4,28	3,74	12,6

Tableau V-6: Débits moyens saisonniers de l'Oued Mina à la Station de l'Oued Al Abtal à l'horizon 2050 (scénario haut) par rapport à la période de référence (1960-1990)

Saison	Pluie moy à l'horizon 2050 (mm)	ETP moy à l'horizon 2050 (mm)	Pluie moy (1960-1990) (mm)	ETP moy (1960-1990) (mm)	Débit moy (1960-1990) (m3/s)	Débit moy à l'horizon 2050 (m3/s)	Réduction de débit (%)
Automne	93,11	188,15	109,54	162,07	4,15	2,95	28,9
Hiver	109,49	165,87	130,35	143,50	13,9	13,05	6,1
Printemps	55,06	307,18	68,82	278,53	8,2	6,98	14,9
Été	17,63	397,99	22,60	136,83	4,28	3,29	23,1

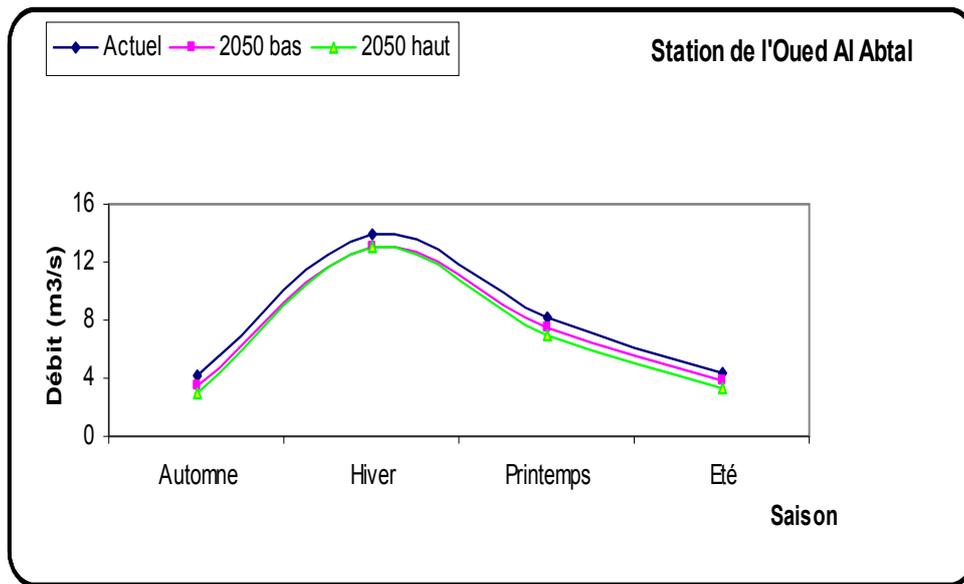


Figure V-8 : Tendence des écoulements à l'horizon 2050 (Station de l'Oued Al Abtal) par rapport à la période (1960-1990)

Interprétation des résultats

- **Pour l'horizon 2020 :**

A l'horizon 2020, pour le scénario bas le fléchissement le mois important est de 2.16 % pour la saison hivernale, et il est de 3.9 pour le scénario haut, cette diminution continue à se constater pour le scénario bas et atteint des valeurs de l'ordre de 6.1 % ; 8.41 % et 10.84 % respectivement en printemps, en été et en automne. Pour le scénario haut, la réduction des débits est de l'ordre de 6.6 % en printemps, 12.4 % en été et 12.8 % en automne.

- **Pour l'horizon 2050 :**

Les illustrations graphiques nous ont permis d'observer des diminutions significatives des débits qui sont de l'ordre de 15.7 %, 12.6 % ,8.9 % et de 5.6 % respectivement, pour la saison automnale, estivale, printanière et hivernale pour le scénario bas. Pour le scénario haut, ces diminutions sont très significatives notamment en automne avec une réduction de 28.9 % et pour le reste des saisons, elles sont de l'ordre de 23.1 % ,14.9 % et de 6.1 % respectivement en été, en printemps et en hiver.

V.5.3 Comparaison des débits saisonniers entre la période de référence (1970-2000) et l'horizon 2020

Pour la période de référence (1970-2000), les résultats obtenus par l'application du modèle sont montrés par la figure V-7 et les tableaux V-7 et V-8

Tableau V-7: Débits moyens saisonniers de l'Oued Mina à la Station de l'Oued Al Abtal à l'horizon 2020 (scénario bas) par rapport à la période de référence (1970-2000)

Saison	Pluie moy à l'horizon 2020 (mm)	ETP moy à l'horizon 2020 (mm)	Pluie moy (1970-2000) (mm)	ETP moy (1970-2000) (mm)	Débit moy (1970-2000) (m3/s)	Débit moy à l'horizon 2020 (m3/s)	Réduction de débit (%)
Automne	109,04	147,09	116,00	175,83	4,21	3,65	13,3
Hiver	111,48	128,49	123,87	117,00	13,89	13,4	3,5
Printemps	64,05	349,92	67,42	332,13	8,28	7,7	7,0
Eté	26,69	147,09	29,01	364,91	4,18	3,78	9,6

Tableau V-8: Débits moyens saisonniers de l'Oued Mina à la Station de l'Oued Al Abtal à l'horizon 2020 (scénario haut) par rapport à la période de référence (1970-2000)

Saison	Pluie moy à l'horizon 2020 (mm)	ETP moy à l'horizon 2020 (mm)	Pluie moy (1970-2000) (mm)	ETP moy (1970-2000) (mm)	Débit moy (1970-2000) (m3/s)	Débit moy à l'horizon 2020 ((m3/s)	Réduction de débit (%)
Automne	106,72	151,38	116,00	175,83	4,21	3,51	16,6
Hiver	111,48	131,22	123,87	117,00	13,89	13,38	3,7
printemps	61,35	265,68	67,42	245,52	8,28	7,58	8,5
Eté	25,24	354,15	29,01	364,91	4,18	3,69	11,7

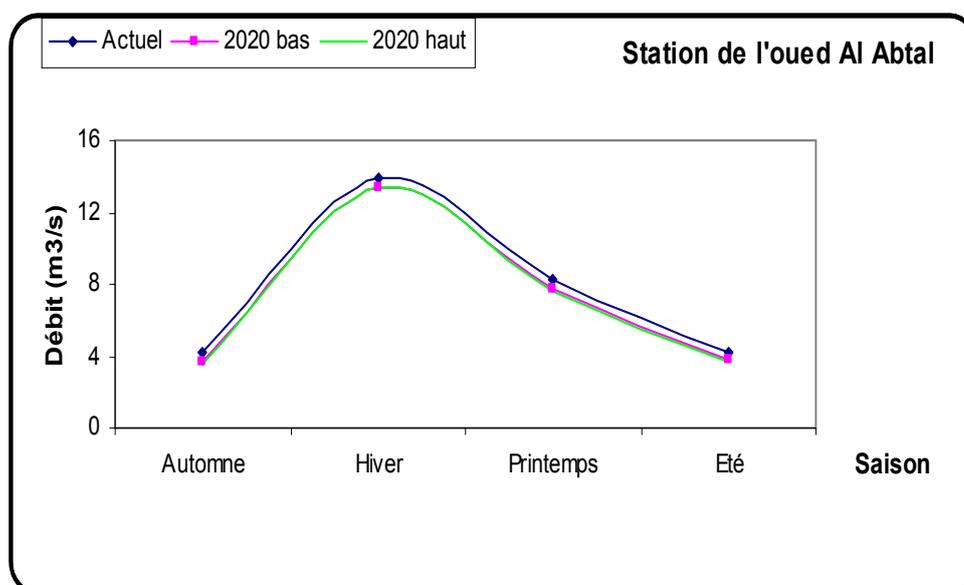


Figure V-9 : Tendance des écoulements à l'horizon 2020 (Station de l'Oued Al Abtal) par rapport à la période (1970-2000)

V.5.4 Comparaison des débits saisonniers entre la période de référence (1970-2000) et l'horizon 2050

Pour l'horizon 2050, les résultats obtenus sont montrés par la figure V-8 et les tableaux V-9 et V-10.

Tableau V-9: Débits moyens saisonniers de l'Oued Mina à la Station de l'Oued Al Abtal à l'horizon 2050 (scénario bas) par rapport à la période de référence (1970-2000)

Saison	Pluie moy à l'horizon 2050 (mm)	ETP moy à l'horizon 2050 (mm)	Pluie moy (1970-2000) (mm)	ETP moy (1970-2000) (mm)	Débit moy (1970-2000) (m3/s)	Débit moy à l'horizon 2050 (m3/s)	Réduction de débit (%)
Automne	104,40	152,37	116,00	136,83	4,21	3,34	20,7
Hiver	104,05	133,95	123,87	117,00	13,89	13,13	5,5
Printemps	60,68	272,19	67,42	245,52	8,28	7,35	11,2
Eté	24,66	358,41	29,01	332,13	4,18	3,55	15,1

Tableau V-10 : Débits moyens saisonniers de l'Oued Mina à la Station de l'Oued Al Abtal à l'horizon 2050 (scénario haut) par rapport à la période de référence (1970-2000)

Saison	Pluie moy à l'horizon 2050 (mm)	ETP moy à l'horizon 2050 (mm)	Pluie moy (1970-2000) (mm)	ETP moy (1970-2000) (mm)	Débit moy (1970-2000) (m3/s)	Débit moy à l'horizon 2050 (m3/s)	Réduction de débit (%)
Automne	98,60	166,56	116,00	136,83	4,21	2,9	31,1
Hiver	104,05	146,07	123,87	117,00	13,89	13,0	6,4
Printemps	53,94	286,5	67,42	245,52	8,28	6,92	16,4
Eté	22,63	376,71	29,01	332,13	4,18	3,2	23,4

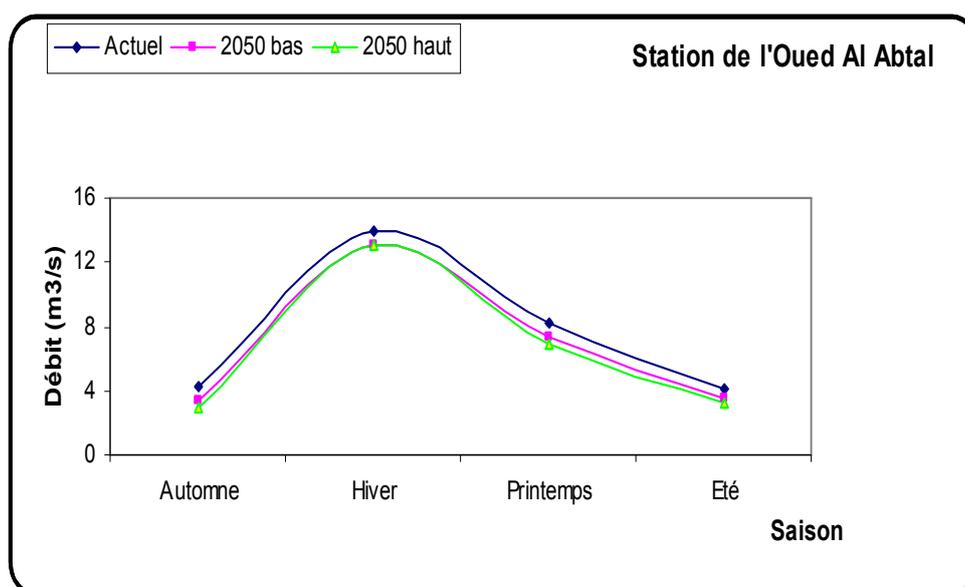


Figure V-10 : Tendance des écoulements à l'horizon 2050 (Station de l'Oued Al Abtal) par rapport à la période (1970-2000)

Interprétation des résultats

- **Pour l'horizon 2020 :**

Nous avons pris la station de l'Oued El Abtal comme station de référence (tableau V-4 et le tableau V-5). Pour étudier l'évolution de débits de ce bassin à l'horizon 2020 par rapport à la période de référence (1970-2000), le signal hydrologique lié aux changements climatiques est représenté par la figure V-8. Cette dernière montre pour le bas scénario qu'une diminution importante en automne et en été, avec un pourcentage de 13.3 et 9.6% respectivement, sera enregistrée suivie par la saison de printemps avec une réduction de 7 %. Par contre, en hiver, nous avons observé une légère diminution de l'ordre de 3.5 %. Pour le scénario haut cette baisse de l'écoulement s'accroîtra pour toutes les saisons. Pour la saison automnale, estivale et printanière, nous avons observé une diminution de débits respectivement de 16.6 %, 11.7 % et 8.5 %. Et pour la saison hivernale cette diminution reste toujours faible par rapports aux autres saisons avec un pourcentage de 3.7 %

- **Pour l'horizon 2050 :**

Les courbes de débits mensuels montrent une diminution des débits respectivement de 20.7 % et 5.5 % pour la saison automnale et hivernale pour le scénario bas, et pour le reste des saisons la diminution des débits moyens est de l'ordre de 11.2 % en printemps et de 15.1 % en été. Pour le scénario haut, les valeurs de débits mensuels vont baisser respectivement de 31.1%, 23.4 %, 16.4 % et de 6.4.% pour les saisons automnale, estivale, printanière et hivernale.

V.5.5 Comparaison des projections de débits saisonniers entre deux périodes de référence à l'horizon 2020 :

La comparaison des résultats obtenus par rapport à la période (1960-1990) et (1970-2000) est résumée dans les tableaux V-11, V-12, V-13 et V-14.

- Pour le scénario bas :

Tableau V-11 : Réduction de débits saisonniers pour l'horizon 2020(scénario bas)

Saison	Pa rapport à la période de référence (1960-1990)			Pa rapport à la période de référence (1970-2000)		
	Débit moy (m3/s) (60-90)	Débit moy à l'horizon 2020 (m3/s)	Réduction de débit (%)	Débit moy (m3/s) (70-00)	Débit moy à l'horizon 2020 (m3/s)	Réduction de débit (%)
Automne	4,15	3,7	10,84	4,21	3,65	13,3
Hiver	13,9	13,6	2,16	13,89	13,4	3,5
Printemps	8,2	7,7	6,10	8,28	7,7	7,0
Eté	4,28	3,92	8,41	4,18	3,78	9,6

- Pour le scénario haut:

Tableau V-12 : Réduction de débits saisonniers pour l'horizon 2020(scénario haut)

Saison	Pa rapport à la période de référence (1960-1990)			Pa rapport à la période de référence (1970-2000)		
	Débit moy (m3/s) (60-90)	Débit moy à l'horizon 2020 (m3/s)	Réduction de débit (%)	Débit moy (m3/s) (70-00)	Débit moy à l'horizon 2020 (m3/s)	Réduction de débit (%)
Automne	4,15	3,62	12,77	4,21	3,51	16,6
Hiver	13,9	13,36	3,88	13,89	13,38	3,7
Printemps	8,2	7,66	6,59	8,28	7,58	8,5
Eté	4,28	3,75	10,28	4,18	3,69	11,7

V.5.6 Comparaison des projections débits saisonniers entre deux périodes de référence à l'horizon 2050

- Pour le scénario bas :

Tableau V-13 : Réduction de débits saisonniers pour l'horizon 2050(scénario bas)

Saison	Pa rapport à la période de référence (1960-1990)			Pa rapport à la période de référence (1970-2000)		
	Débit moy (m3/s) (60-90)	Débit moy à l'horizon 2050 (m3/s)	Réduction de débit (%)	Débit moy (m3/s) (70-00)	Débit moy à l'horizon 2050 (m3/s)	Réduction de débit (%)
Automne	4,15	3,50	15,66	4,21	3,34	20,7
Hiver	13,9	13,12	5,61	13,89	13,13	5,5
printemps	8,2	7,47	8,90	8,28	7,35	11,2
Eté	4,28	3,74	12,62	4,18	3,55	15,1

- **Pour le scénario haut:**

Tableau V-14 : Réduction de débits saisonniers pour l'horizon 2050(scénario haut)

Saison	Pa rapport à la période de référence (1960-1990)			Pa rapport à la période de référence (1970-2000)		
	Débit moy (m3/s) (60-90)	Débit moy à l'horizon 2050 (m3/s)	Réduction de débit (%)	Débit moy (m3/s) (70-00)	Débit moy à l'horizon 2050 (m3/s)	Réduction de débit (%)
Automne	4,15	2,95	28,9	4,21	2,9	31,1
Hiver	13,9	13,05	6,1	13,89	13,0	6,4
Printemps	8,2	6,98	14,9	8,28	6,92	16,4
Été	4,28	3,29	23,1	4,18	3,2	23,4

- **Interprétation :**

D'après les résultats trouvés à la fin de l'étude comparative ente les deux périodes de référence (1960-1990) et (1970-2000), nous constatons une certaine différence dans la réduction des débits saisonniers entre les deux périodes, Cette différence est due au nombre d'années sèches et humides contenues dans les périodes de références utilisées pour les projections. La période de référence (1960-1990) est caractérisée par 16 années sèches et 15 années humides, par contre la période (1970-2000) est caractérisée par 18 années sèches et 13 années humides, ce qui justifie une baisse considérable de débits futurs saisonniers calculés sur la période (1970-2000) par rapport à la période (1960-1990), (voir le tableau V-15 et V-16). Donc les projections sont fortement liées à la période de référence choisie.

Tableau V-15 : Précipitations saisonnières (mm) de la période (1960-1990)

Année	Automne	Hiver	printemps	Été	annuelle	Type d'année
1960	120,7	61,2	4,8	0	186,7	Sèche
1961	126,11	151,6	55,8	0,5	334,4	Humide
1962	140,6	114,1	67,6	10,8	333,1	Humide
1963	107	72,2	63,2	29,3	271,7	Sèche
1964	165,3	142,6	100,1	0	408	Humide
1965	70,1	52,6	22	5,3	150	Sèche
1966	99,4	56,4	73,4	30,5	259,7	Sèche
1967	68,4	93,2	20,6	20,8	203	Sèche
1968	100,8	103,4	26,4	1,8	232,4	Sèche
1969	116,2	194,5	104,5	19,8	435	Humide
1970	52,27	122,8	135,61	10,05	320,73	Sèche
1971	171,62	215,37	118,43	14,45	519,87	Humide
1972	71,66	188,09	95,6	11,33	366,68	Humide
1973	102,36	142,99	116,4	10,75	372,5	Humide
1974	70,45	183,53	111,28	32,25	397,51	Humide
1975	68,35	178,15	88	102	436,5	Humide
1976	140,7	123,14	52,51	88,06	404,41	Humide
1977	134,5	125,11	48,06	50,79	358,46	Humide
1978	102,26	121,44	105,11	1,01	329,82	Humide
1979	209,99	190,04	129,98	45,4	575,41	Sèche
1980	134,34	121,12	40,19	26,26	321,91	Sèche
1981	38,43	223,33	180,61	7,15	449,52	Humide
1982	222,37	85,82	16,73	3,11	328,03	Sèche
1983	98,11	43,56	44,67	1,63	187,97	Sèche
1984	84,19	140,02	22,47	2,54	249,22	Sèche
1985	99,74	157,06	10,04	84,06	350,9	Humide
1986	120,68	307,38	98,23	6,47	532,76	Humide
1987	105,5	30,12	92,72	8,91	237,25	Sèche
1988	73,05	98,48	29,65	25,93	227,11	Sèche
1989	15,99	139,23	36,38	12,23	203,83	Sèche
1990	164,45	62,31	22,38	37,37	286,51	Sèche

Tableau V-16 : Précipitations saisonnières (mm) de la période (1970-2000)

Année	Automne	Hiver	printemps	Été	annuelle	Type d'année
1970	52,27	122,8	135,61	10,05	320,73	Sèche
1971	171,62	215,37	118,43	14,45	519,87	Humide
1972	71,66	188,09	95,6	11,33	366,68	Humide
1973	102,36	142,99	116,4	10,75	372,5	Humide
1974	70,45	183,53	111,28	32,25	397,51	Humide
1975	68,35	178,15	88	102	436,5	Humide
1976	140,7	123,14	52,51	88,06	404,41	Humide
1977	134,5	125,11	48,06	50,79	358,46	Humide
1978	102,26	121,44	105,11	1,01	329,82	Sèche
1979	209,99	190,04	129,98	45,4	575,41	Humide
1980	134,34	121,12	40,19	26,26	321,91	Sèche
1981	38,43	223,33	180,61	7,15	449,52	Humide
1982	222,37	85,82	16,73	3,11	328,03	Sèche
1983	98,11	43,56	44,67	1,63	187,97	Sèche
1984	84,19	140,02	22,47	2,54	249,22	Sèche
1985	99,74	157,06	10,04	84,06	350,9	Humide
1986	120,68	307,38	98,23	6,47	532,76	Humide
1987	105,5	30,12	92,72	8,91	237,25	Sèche
1988	73,05	98,48	29,65	25,93	227,11	Sèche
1989	15,99	139,23	36,38	12,23	203,83	Sèche
1990	164,45	62,31	22,38	37,37	286,51	Sèche
1991	167,58	64,64	32,3	6,46	270,98	Sèche
1992	165,67	148,11	30,55	6	350,33	Humide
1993	67,52	119,85	133,01	28,89	349,27	Humide
1994	78,07	164,23	12,95	25,89	281,14	Sèche
1995	104,79	86,21	12,75	88,09	291,84	Sèche
1996	102	101,78	103,84	10,83	318,45	Sèche
1997	226,07	26,33	40	23,17	315,57	Sèche
1998	107,38	62,54	79,03	3,22	252,17	Sèche
1999	186,03	4,28	14,88	26,97	232,16	Sèche
2000	109,93	62,81	35,55	98,09	306,38	Sèche

- **Remarque**

Dans cette étude la différence de réduction est relativement faible à cause de la ressemblance de deux périodes de référence, par contre si nous avons une dissemblance de deux périodes de référence automatiquement elle se répercute sur les projections établies.

Pour le reste des sous bassins de la Mina (Oued El Abd et Oued Haddad), nous effectuerons les projections par rapport à la période de (1970-2000), après la calibration et la validation sur la même période de référence, du fait que cette période est pessimiste vu le nombre d'années sèche. L'existence d'années sèches durant la période allant de 1970 à 2000, influence le résultat final de comparaison. Donc, le choix de la période de référence possède un effet sur les estimations futures des ressources en eau.

V.6 Résultats du calage et la validation du modèle GR2M pour la station d'Ain

Hamarra et Sidi AEK Djilali

Afin de s'assurer de la robustesse du modèle, une procédure de calage-contrôle a été menée sur l'ensemble des stations. Cette méthode consiste à séparer la chronique en sous-période et d'évaluer le modèle sur ces différentes sous périodes : le modèle est calé sur une période puis évalué avec ce jeu de paramètres sur les autres sous périodes (appelées périodes de validation ou de contrôle). Nous avons appliqué ce test en séparant la chronique de données en deux sous périodes distinctes. Les résultats de ce test sont indiqués dans le tableau.

Tableau V-17 : illustration des résultats de la procédure de calage-validation du modèle GR2M

Nom de la station	Période de calage	Période de validation	Critère de Nash au calage	Critère de Nash à la validation
Ain Hamarra.	1970-1986	1987-200	71.70	74.00
Sidi AEK Djilali			71.20	71.30

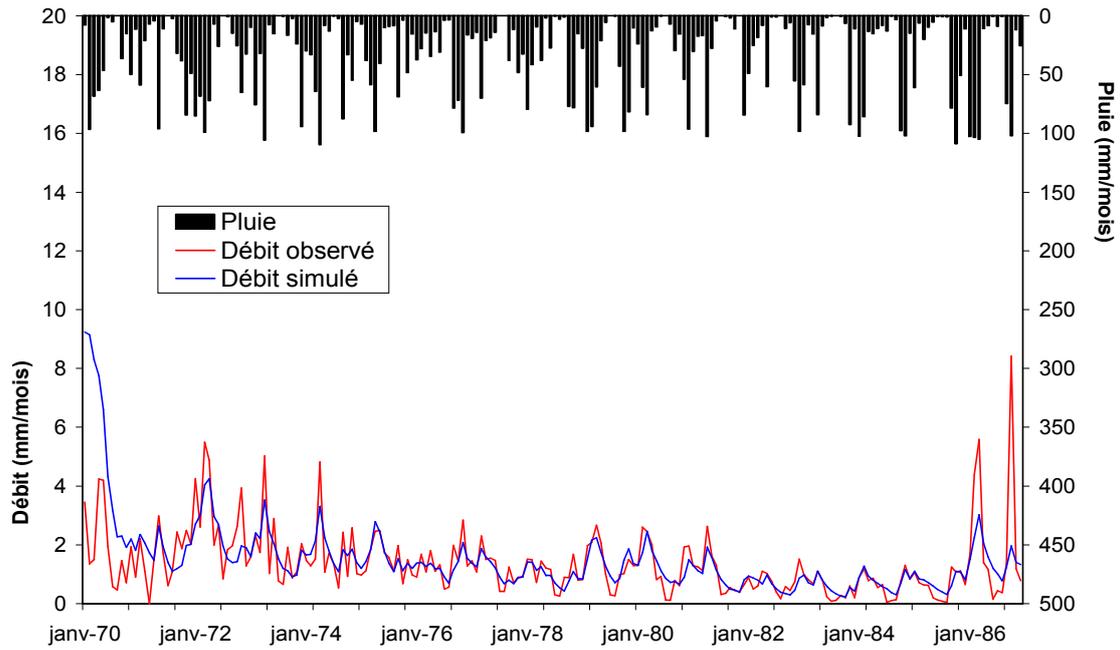


Figure V-11 : Variabilité des pluies et débits observée et simulée sur la période de calage (1970-1996) pour la station d'Ain Hamarra.

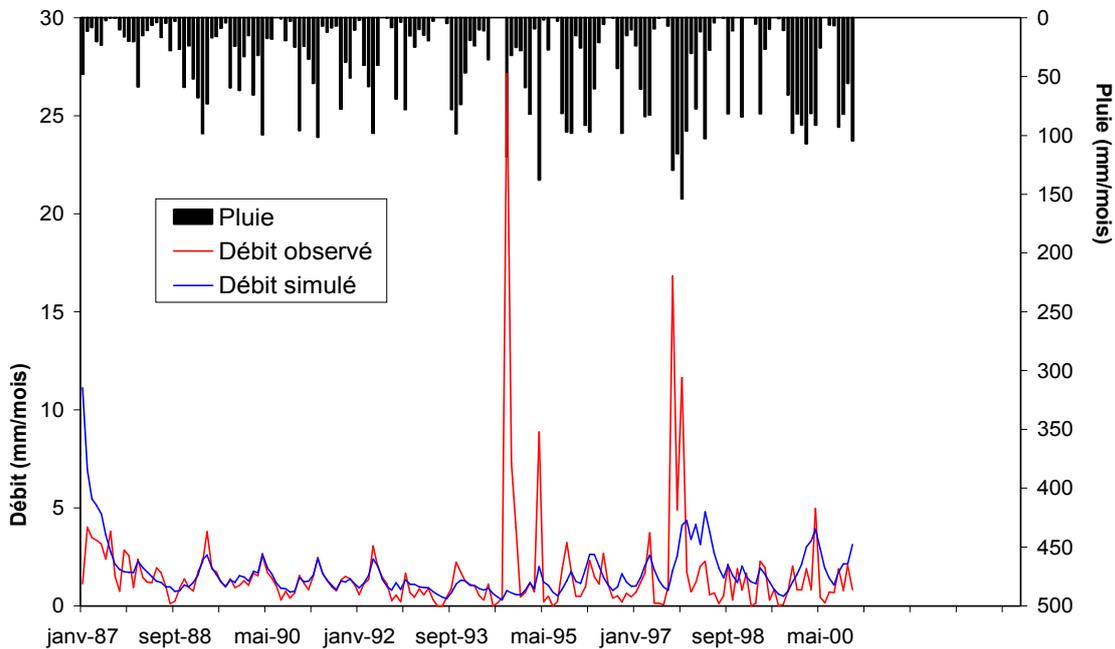


Figure V-12 : Variabilité des pluies et débits observée et simulée sur la période de validation (1987-2000) pour la station d'Ain Hamarra.

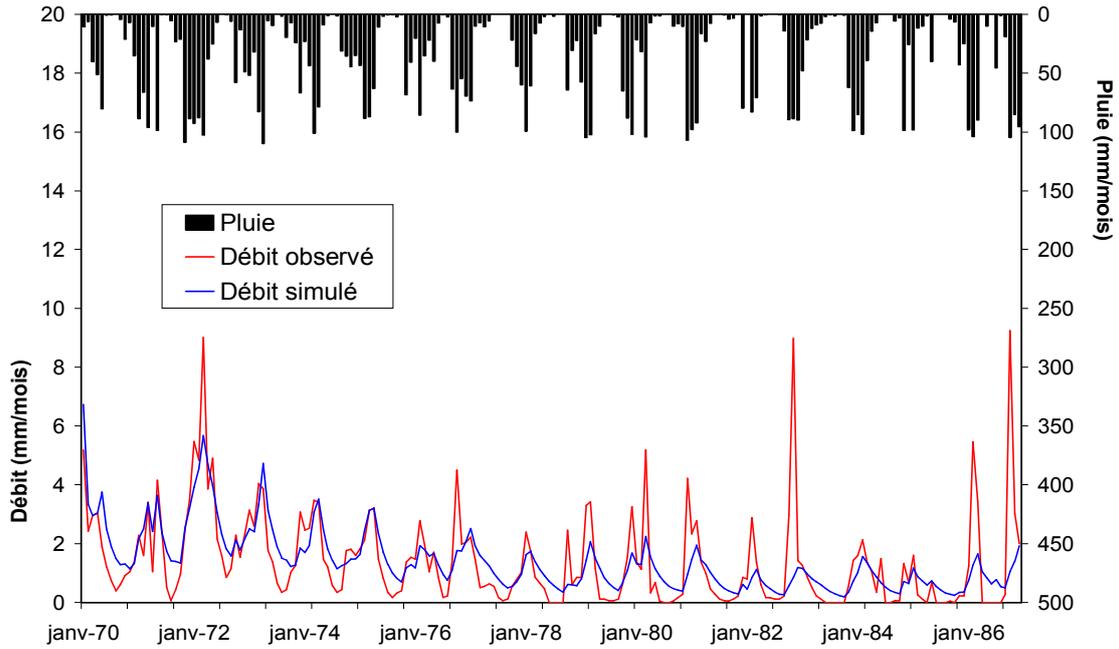


Figure V-13 : Variabilité des pluies et débits observée et simulée sur la période de calage (1970-1996) pour la station de Sidi AEK Djilali.

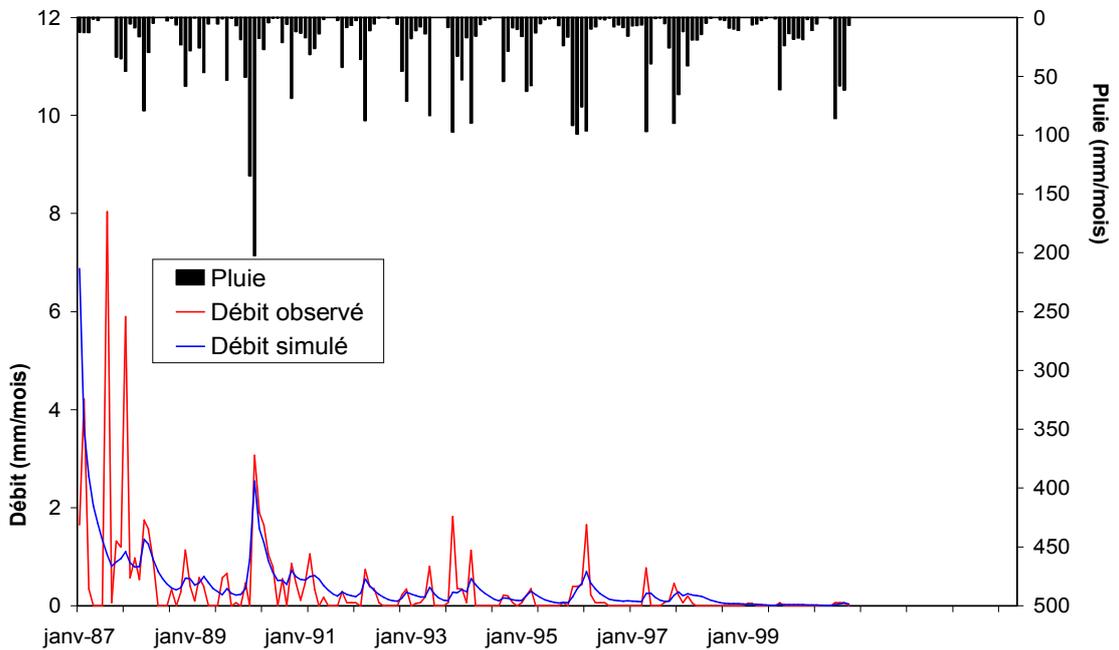


Figure V-14 : Variabilité des pluies et débits observée et simulée sur la période de validation (1987-2000) pour la station de Sidi AEK Djilali.

V.7 Discussion des résultats du calage et de la validation

V.7.1 Résultats du calage

Le calage du modèle nécessite, généralement l'utilisation d'une partie des données disponibles (Refsgaard, 1997). En effet, pour déterminer les paramètres d'ajustement internes du modèle, La méthode de calage suivie, appelée « solver », les figures 1, 2 et 3 montrent que les hydrogrammes simulés par GR2M s'accordent mieux avec les hydrogrammes observés ce qui traduit des valeurs de Nash acceptables égale à 71.7 ; 74.7 et 71.2 % respectivement pour les bassins suivants : Oued El Abd, Oued Mina et Oued Haddad.

V.7.2 Résultats de la validation

La validation est une opération indispensable dans le processus d'élaboration du modèle. Elle doit être basée sur des événements différents de ceux utilisés lors du calage.

Tout comme la phase de calage, nous pouvons établir le critère de Nash pour chaque bassin Le résultat numérique nous a donné des Nash satisfaisants 74.00, 70.20 et 71.30 % respectivement pour les bassins suivants : Oued El Abd, Oued Mina et Oued Haddad.

Pour s'assurer que notre modèle est bien calibré et validé d'autres critères ont été appliqués, les résultats du test sont regroupés dans les tableaux suivants :

- **Pour la calibration :**

Tableau V-18 : résultats d'application de critères de performance du modèle (calibration)

Critères	Stations hydrométriques		
	Oued Al Abtal	Ain Hamarra	Sidi AEK Djilali
EAM	0.50	0.39	0.46
EQM	0.83	0.81	0.63

- **Pour la validation :**

Tableau V-19: résultats d'application de critères de performance du modèle (validation)

Critères	Stations hydrométriques		
	Oued Al Abtal	Ain Hamarra	Sidi AEK Djilali
EAM	0.40	0.36	0.68
EQM	0.57	0.90	0.95

Avec :

EAM : Ecart arithmétique moyen

EQM : Ecart Quadratique Moyen

V.8 Résultats et interprétation

Après le calage et la validation du modèle, nous avons pu analyser la réponse hydrologique de nos sous bassins devant les changements climatiques aux horizons 2020 et 2050 et la comparer aux séries de références (1970-2000).

V.8.1 Comparaison des débits saisonniers entre la période de référence et l'horizon 2020

Nous avons fait la combinaison modèle climatique-modèle hydrologique pour évaluer les changements potentiels du régime de débit de l'oued Mina, les résultats du calcul pour les deux sous bassins restants (Oued El Abd et Oued Haddad) sont représentés sous forme des tableaux et des graphes:

a) Oued El Abd :

Nous avons choisi la station de Ain Hamarra comme station de référence pour étudier la réponse de Oued El Abd à l'horizon 2020 (tableau V-8 et tableau V-9), les résultats graphiques nous ont permis de dégager les tendances du comportement de l'oued El Abd. L'analyse de ces résultats montre que la diminution de débits moyens mensuels est importante pour toutes les saisons par rapport aux séries de la période de référence (1970-2000).

A l'horizon 2020 et pour le scénario bas le fléchissement le mois important est de 3.8 % pour la saison hivernale et il est de 3.9% pour le scénario haut, cette diminution continue à augmenter pour le scénario bas et atteindre des valeurs des débits de l'ordre de 6.9 % ; 9.5 % et 13.3 % respectivement en printemps, en été et en automne, et pour le scénario haut la réduction des débits est de l'ordre de 8.5 %, 11.9 % et 17 % respectivement.

Tableau V-20: Débits moyens saisonniers de l'Oued El Abd à la Station d'Ain Hamarra à l'horizon 2020 (scénario bas)

Saison	Pluie moy à l'horizon 2020 (mm)	ETP moy à l'horizon 2020 (mm)	Pluie moy (1970-2000) (mm)	ETP moy (1970-2000) (mm)	Débit moy (1970-2000) (m3/s)	Débit moy à l'horizon 2020 (m3/s)	Réduction de débit (%)
Automne	137,76	147,09	146,55	136,83	3,24	2,81	13,3
Hiver	120,3	128,49	4044,95	117,00	8,22	7,91	3,8
printemps	84,81	263,55	89,28	245,52	5,66	5,27	6,9
Eté	49,41	349,92	53,70	332,13	2,94	2,66	9,5.

Tableau V-21: Débits moyens saisonniers de l'Oued EL Abd à la Station d'Ain Hamarra à l'horizon 2020 (scénario haut)

Saison	Pluie moy à l'horizon 2020 (mm)	ETP moy à l'horizon 2020 (mm)	Pluie moy (1970-2000) (mm)	ETP moy (1970-2000) (mm)	Débit moy (1970-2000) (m3/s)	Débit moy à l'horizon 2020 (m3/s)	Réduction de débit (%)
Automne	134,82	151,38	146,55	136,83	3,24	2,69	17
Hiver	120,3	131,22	133,35	117,00	8,22	7,9	3,9
Printemps	81,24	265,68	89,28	245,52	5,66	5,18	8,5
Eté	46,71	354,15	53,70	332,13	2,94	2,59	11,9

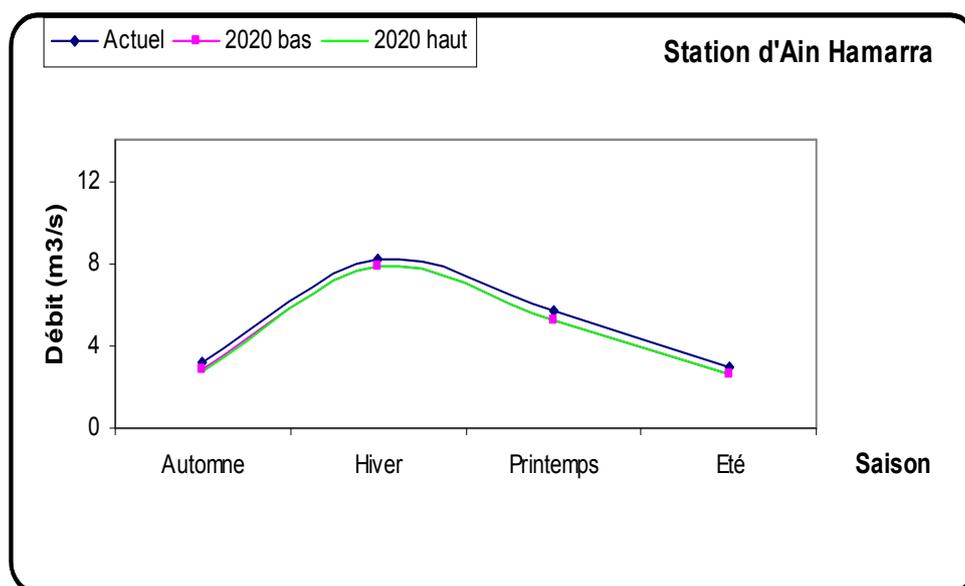


Figure V-15 : Tendance des écoulements à l'horizon 2020 (Station d'Ain Hamarra)

b) Oued Haddad :

La station de Sidi AEK Djilali a été choisie comme station de référence afin d'analyser la variation mensuelle des débits de l'oued Haddad (tableau V-20 et tableau V-21), les illustrations graphiques nous ont permis d'observer une diminution des débits de 15.38 % en automne et de 8.3 % en été pour le scénario bas et concernant le scénario haut cette diminution est automatiquement importante et elle est respectivement de l'ordre de 19.2 % et 12.5 %. En printemps et en hiver, nous avons la même diminution des débits pour le scénario bas et haut, elle est respectivement de l'ordre de 10 % et 4 %.

Tableau V-22: Débits moyens saisonniers de l'Oued El Haddad à la Station de Sidi AEK Djilali à l'horizon 2020 (scénario bas)

Saison	Pluie moy à l'horizon 2020 (mm)	ETP moy à l'horizon 2020 (mm)	Pluie moy (1970-2000) (mm)	ETP moy (1970-2000) (mm)	Débit moy (1970-2000) (m3/s)	Débit moy à l'horizon 2020 (m3/s)	Réduction de débit (%)
Automne	115,41	147,09	122,79	136,83	0,26	0,22	15,4
Hiver	131,67	128,49	146,31	117	1	0,96	4,0
Printemps	39,93	263,55	44,40	245,52	0,5	0,45	10,0
Eté	20,13	349,92	21,18	332,13	0,24	0,22	8,3

Tableau V-23: Débits moyens saisonniers de l'Oued El Haddad à la Station de Sidi AEK Djilali à l'horizon 2020 (scénario haut)

Saison	Pluie moy à l'horizon 2020 (mm)	ETP moy à l'horizon 2020 (mm)	Pluie moy (1970-2000) (mm)	ETP moy (1970-2000) (mm)	Débit moy (1970-2000) (m3/s)	Débit moy à l'horizon 2020 (m3/s)	Réduction de débit (%)
Automne	112,95	151,38	122,79	136,83	0,26	0,21	19,2
Hiver	131,67	131,22	146,31	117	1	0,96	4,0
Printemps	40,41	265,68	44,40	245,52	0,5	0,45	10,0
Eté	18,45	354,15	21,18	332,13	0,24	0,21	12,5

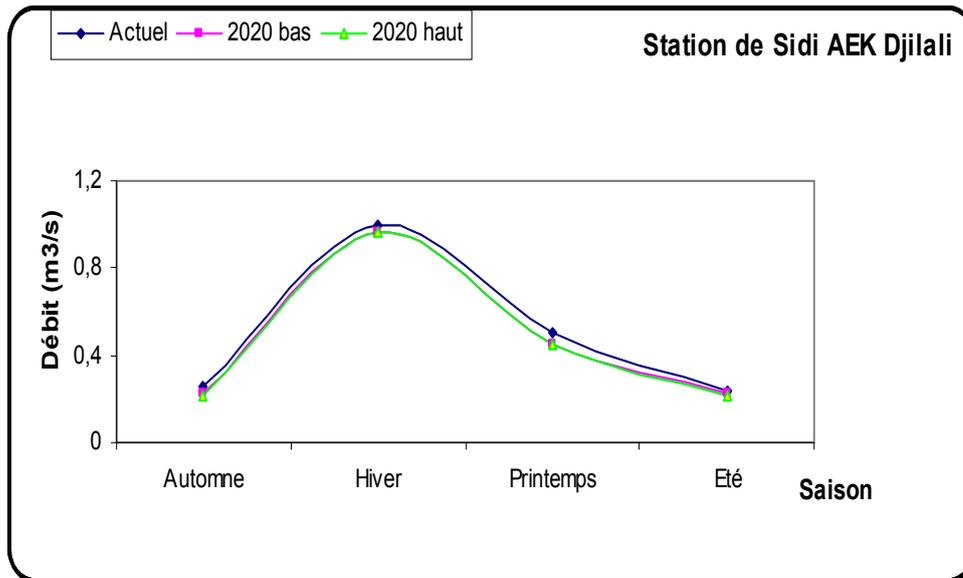


Figure V-16 : Tendence des écoulements à l'horizon 2020 (Station de Sidi AEK Djilali)

V.8.2 Comparaison des débits saisonniers entre la période de référence et l'horizon 2050

Suite à la réduction des apports atmosphériques (pluviométrie) et l'augmentation de la température constatée durant la période d'étude, des changements prévus se traduisent généralement par une baisse des débits moyens saisonniers.

a) Oued El Abd :

Pour la prévision de l'écoulement mensuel de l'oued El Abd à horizon 2050, le modèle traduit des diminutions significatives des débits de l'ordre de 20.7 % , 15.3 % ,11.1 % et de 5.8 % pour la saison automnale, estivale, printanière et hivernale respectivement pour le scénario bas. Pour le scénario haut, ces diminutions sont très significatives notamment en automne avec une réduction de 30.3 % et pour le reste des saisons, elles sont de l'ordre de 21.8 % ,16.08 % et de 6.6 % respectivement en été, en printemps et en hiver par rapport à la série de référence (1970-2000).

Tableau V-24 : Débits moyens saisonniers de l'Oued El Abd à la Station d'Ain Hamarra à l'horizon 2050 (scénario bas)

Saison	Pluie moy à l'horizon 2050 (mm)	ETP moy à l'horizon 2050 (mm)	Pluie moy (1970-2000) (mm)	ETP moy (1970-2000) (mm)	Débit moy (1970-2000) (m3/s)	Débit moy à l'horizon 2050 (m3/s)	Réduction de débit (%)
Automne	131,88	150,237	146,55	136,83	3,24	2,57	20,7
Hiver	112,26	133,95	133,35	117,00	8,22	7,74	5,8
printemps	80,34	272,19	89,28	245,52	5,66	5,03	11,1
Eté	45,63	358,41	53,70	110,71	2,94	2,49	15,3

Tableau V-25 : Débits moyens saisonniers de l'Oued El Abd à la Station d'Ain Hamarra à l'horizon 2050 (scénario haut)

Saison	Pluie moy à l'horizon 2050 (mm)	ETP moy à l'horizon 2050 (mm)	Pluie moy (1970-2000) (mm)	ETP moy (1970-2000) (mm)	Débit moy (1970-2000) (m3/s)	Débit moy à l'horizon 2050 (m3/s)	Réduction de débit (%)
Automne	124,56	166,56	146,55	136,83	3,24	2,26	30,3
Hiver	112,26	146,07	133,35	117,00	8,22	7,68	6,6
printemps	71,43	286,5	89,28	245,52	5,66	4,75	16,1
Eté	41,88	376,71	53,70	332,13	2,94	2,30	21,8

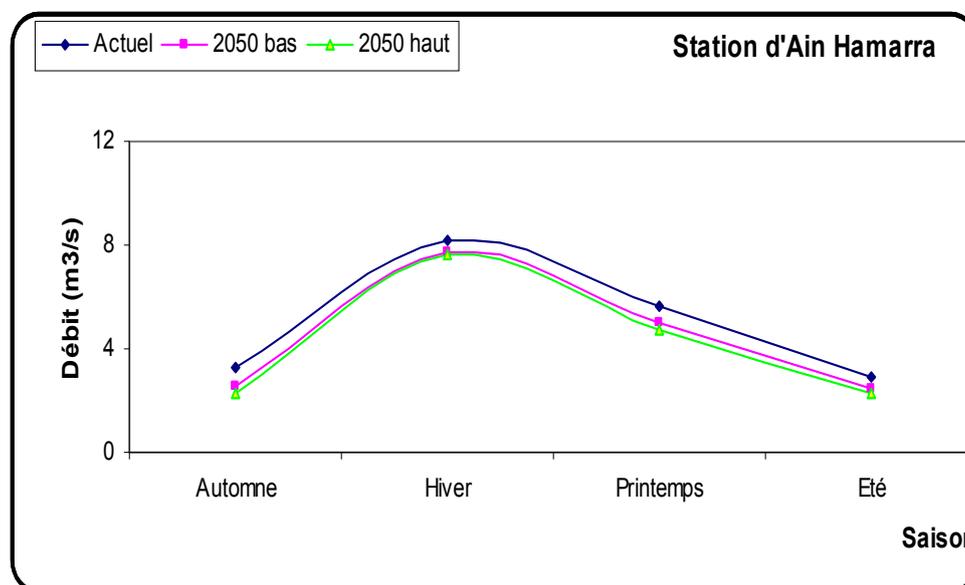


Figure V-17 : Tendance des écoulements à l'horizon 2050 (Station d'Ain Hamarra)

b) Oued Haddad :

Les simulations montrent une diminution pour l'ensemble des saisons. En automne la baisse de débit est de l'ordre de 23.1 % et de 6 % en hiver pour le scénario bas, pour le reste des saisons, la baisse est de 12 % et 16.7 % pour le printemps et l'été respectivement, dans la situation du scénario haut la diminution des débits mensuels est de l'ordre de 30.8 % , 20.8 % ,16 % et 7 % pour la saison automnale, estivale, printanière et hivernale respectivement par rapport à la période de référence (1970-2000).

Tableau V-26 : Débits moyens saisonniers de l'Oued El Haddad à la Station de Sidi AEK Djilali à l'horizon 2050 (scénario bas)

Saison	Pluie moy à l'horizon 2050 (mm)	ETP moy à l'horizon 2050 (mm)	Pluie moy (1970-2000) (mm)	ETP moy (1970-2000) (mm)	Débit moy (1970-2000) (m3/s)	Débit moy à l'horizon 2050 (m3/s)	Réduction de débit (%)
Automne	110,52	152,37	122,79	136,83	0,26	0,2	23,1
Hiver	122,88	133,95	146,31	117	1	0,94	6,0
printemps	39,96	272,19	44,40	245,52	0,5	0,44	12,0
Eté	18	358,41	21,18	332,13	0,24	0,2	16,7

Tableau 27 : Débits moyens saisonniers de l'Oued El Haddad à la Station de Sidi AEK Djilali à l'horizon 2050 (scénario haut)

Saison	Pluie moy à l'horizon 2050 (mm)	ETP moy à l'horizon 2050 (mm)	Pluie moy (1970-2000) (mm)	ETP moy (1970-2000) (mm)	Débit moy (1970-2000) (m3/s)	Débit moy à l'horizon 2050 (m3/s)	Réduction de débit (%)
Automne	104,37	166,56	122,79	136,83	0,26	0,18	30,8
Hiver	122,88	146,07	146,31	117	1	0,93	7,0
printemps	35,52	286,5	44,40	245,52	0,5	0,42	16,0
Eté	104,37	376,71	21,18	332,13	0,24	0,19	20,8

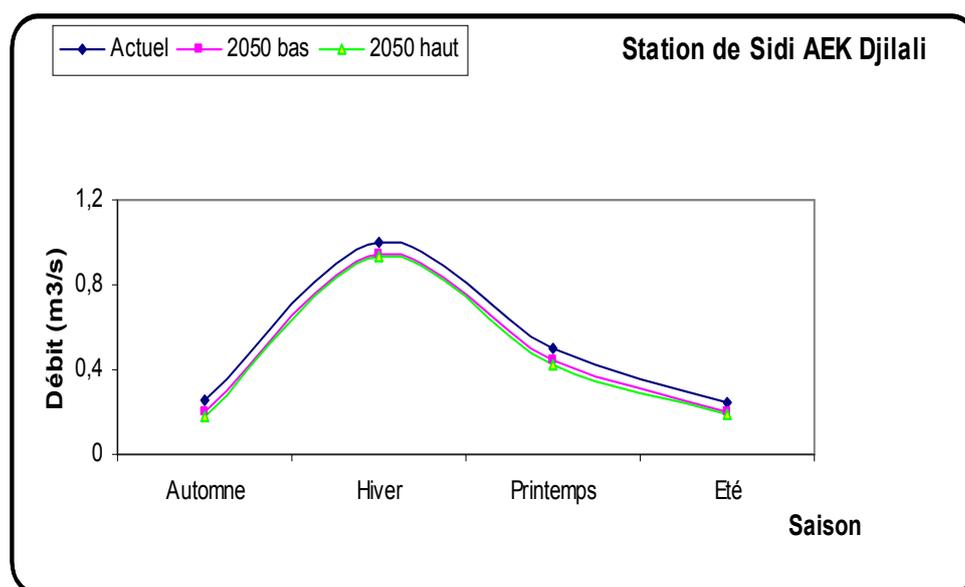


Figure V-18 : Tendance des écoulements à l'horizon 2050 (Station de Sidi AEK Djilali)

➤ **Discussion régionale**

L'analyse des résultats obtenus par le couplage modèle climatique-modèle hydrologique nous a permis de ressortir certaines constatations régionales :

• **A l'horizon 2020**

La diminution des débits moyens mensuels, la plus importante, se concentre dans les régions Nord-ouest du bassin. Elle est pour le scénario bas de l'ordre de 15.4 %, 4 %, 10 % et 8.3 % pour la saison automnale, hivernale, printanière, et estivale respectivement. Pour le scénario haut, cette diminution sera aggravée et atteindra les valeurs suivantes : 19 % en automne, 4 % en hiver, 10% en printemps et 12.5 % en été.

Au centre du bassin, la diminution de débits moyens mensuels pour le scénario bas, est de l'ordre de 13.3 %, 8.3 %, 6.9 %, et 9.5 % pour la saison automnale, hivernale, printanière, et estivale respectivement. Pour le scénario haut, elle est de l'ordre de 17 %, 3.9 %, 8.5 % et pour les mêmes saisons citées précédemment.

Pour la région Nord-est, la diminution des débits moyens mensuels est moins importante comparée au reste du bassin. Elle est d'environ de 13.3 %, 3.5 %, 7 % et 9.6 % pour la saison automnale, hivernale, printanière et estivale respectivement. Quant au scénario haut, la diminution des débits pourra atteindre les valeurs suivantes : 16.6 % en automne, 3.7 % en hiver, 8.5 % en printemps et 11.7 en été.

• **A l'horizon 2050**

La continuation des émissions des gaz à effet de serre aggravera le changement du climat, et par conséquent ce dernier amplifiera la diminution des débits moyens mensuels dans le bassin. Pour l'horizon 2050, les constatations régionales obtenues à la fin de cette étude sont comme suit :

Pour les régions Nord-ouest et le centre du bassin, la diminution de débits moyens mensuels est relativement semblable. Pour le scénario bas, la diminution de débit dans la région Nord-Ouest est de l'ordre de 23.1 %, 6 %, 12 %, 16.7 % pour la saison automnale, hivernale, printanière, et estivale respectivement ; Parallèlement pour le centre la diminution est de l'ordre de 20.7 %, 5.8 %, 11.1 %, 15.3 %, en ce qui concerne le scénario haut, et pour la région Nord-ouest, nous avons obtenu les diminutions suivantes : 30.8 % en automne, 7 % en hiver, 16 en printemps % et 20.8 % en été. Quant au centre, les diminutions enregistrées sont : 30.3 % en automne, 6.6 % en hiver, 16.1 en printemps % et 21.8 % en été.

Pour la région Nord-Est, et pour le scénario bas le modèle a donné une diminution de débit en automne semblable a celle du centre mais pour le reste des saisons, elle est de l'ordre de 5.5 %, 11.2 %, 15.1 % pour la saison hivernale, printanière, et estivale respectivement,

concernant le scénario haut, le modèle a donné une diminution très importantes en automne égale à 31.1 %, et pour le reste des saisons, elle atteindra des valeurs de l'ordre de 6.4 % en hiver, 16.4 % en printemps et 23.4 en été.

➤ **Discussion des résultats**

L'estimation quantitative de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau à l'horizon 2020, pour les bassins étudiés (Oued Mina, Oued Haddad, Oued Abd) est respectivement de l'ordre de 8.9 %, 6 % et 9.4 % (réduction de débits) pour le scénario bas. Cette diminution est de l'ordre de 10.1 %, 10.3 %, et 11.4 % (pour les mêmes bassins) pour le scénario haut. Pour l'horizon 2050, la réduction des débits est respectivement de l'ordre de 13.1 %, 13.2 % et 14.5 % pour le scénario bas, et de l'ordre de 19.3 %, 18.7 % et 18.7 % pour le scénario haut.

Ces chiffres sont du même ordre de grandeur que ceux trouvés dans le même contexte géographique et climatique, Senoussi S. et al. (1999) en étudiant l'impact du changement climatique sur les ressources en eau dans le bassin versant de l'Ouergha au Maroc, ils ont trouvé une diminution des débits de l'ordre de 8%. Drogue G. & al. (2010) et les chercheurs de l'IISD. (2003), en étudiant respectivement la vulnérabilité des pays de l'Afrique du Nord au changement climatique, et le plan des scénarios de crue et d'étiage dans le bassin de la Meuse dans le cas des changements climatiques ont trouvé une réduction de débit de l'ordre de 10 % un ordre de grandeur similaire au notre. Pour la Tunisie, Raoudha L. (2010) dans son étude sur l'adaptation du secteur de l'eau au changement aux changements climatiques, a révélé une diminution de l'écoulement de l'ordre de 28 %. Ce chiffre corrobore avec celui trouvé dans le cas du scénario haut pour notre bassin d'étude. Dans le bassin du Rhône (France), Hendrickx. F& Sauquet. E. (2008) ont montré une diminution des débits de l'ordre de 26% en étudiant les constats et les prévisions de l'évolution de l'hydrologie et de la température de ce bassin. L'analyse probabiliste de la variation des ressources en eau due au changement de précipitation dans le bassin de Crati (en Italie) faite par Sirangelo B. & Ferrari E. (2010) ont trouvé une diminution des débits de l'ordre de 13 % un pourcentage qui reste dans la fourchette des valeurs trouvées pour nos prévisions. A l'échelle nationale, Meddi M. & al. (2010) ont trouvé une réduction de l'écoulement de l'ordre de 15.3 % dans le bassin du Chéllif lors de l'étude de l'impact des changements climatiques sur les débits de ce bassin. Une diminution qui rejoint ce que nous avons trouvé. Pour un contexte géographique et climatique différent de notre région, Bou-Zeid E. & Fadel M. (2002) en étudiant le changement climatique et les ressources en eau au Liban et au Moyen Orient, ont trouvé un

fléchissement des débits notable d'environ 50%. Autres chercheurs comme Rakotondrabe F. (2007) dans l'étude de la vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques dans le Sud-Est du Madagascar, a trouvé une diminution importante, de l'ordre de 46 %. Cette réduction est plus importante que celle trouvée dans les pays du Maghreb et des les pays de la rive Nord-Ouest de la Méditerranée et des chiffres que nous avons estimés.

Par contre, en Afrique Occidentale et Central, Mahé G. & Olivry J.C. (1991), en étudiant les changements climatique et la variation des écoulements, ont trouvé un résultat comparable à celui que nous avons estimé (réduction de débits de l'ordre de 10 %). Au Togo, dans le cadre de la communication nationale initiale (2001), la diminution de l'écoulement est de l'ordre de 11.51%. Un résultat aussi comparable à celui que nous avons estimé.

Nous remarquons au terme de cette comparaison que nos résultats sont dans l'ensemble proches que ceux trouvés dans des régions où les conditions climatiques sont similaires à celles de notre région d'étude, par contre, ils sont différents de ceux trouvés au Madagascar et au Moyen Orient où le climat est complètement différent du notre. Par contre, en Afrique occidentale et central, les prévisions sont similaires à ceux des pays de l'Afrique du Nord.

Nous constatons que la réduction sera plus conséquente dans le cas du scénario pessimiste. Ces constats demandent une prise de conscience de la part des gestionnaires pour mettre en place des moyens nécessaires afin de pallier à ces insuffisances en termes de ressources en eau aux horizons futurs.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cherché à simuler les écoulements et de prédire le comportement hydrologique des sous bassins versants de la Mina devant les changements climatiques. L'étude de la robustesse du modèle GR2M à travers l'analyse des critères d'optimisation de Nash et autres appliqués aux écoulements moyens des sous bassins met en évidence des valeurs significatives. Nous pouvons donc dire que le modèle GR2M présente une certaine efficacité à simuler les écoulements aux pas de temps mensuel.

A travers ce travail, nous avons confirmé la constatation de la communauté scientifique mondiale en ce qui concerne les changements climatiques qui sont devenus une fatalité.

Les variations des précipitations et des températures pourront faire baisser les niveaux d'eau, notamment durant l'été pour tous les sous bassins étudiés.

Les effets du changement climatique sur les régimes d'écoulement et les niveaux d'eau se répercuteront sur nos approvisionnements en eau. La diminution de ces approvisionnements en eau de surface et en eau souterraine ainsi que l'augmentation de la demande de ces ressources remettraient en question tous les aspects de la gestion des ressources en eau.

Nous avons vu que les débits mensuels variaient de façon continue suite à la diminution des précipitations et à l'augmentation des températures pour l'horizon 2020 et 2050 ce qui nous rends inquiets sur la disponibilité de l'eau et sa qualité. par conséquent penser à des mesures d'adaptation.

La variation distincte des débits saisonniers dans les différentes zones du bassin, nous poussera à réfléchir à faire des projections locales.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire qui s'inscrit dans la recherche sur l'évolution des ressources en eau à pour objectif principal d'établir un diagnostic du fonctionnement hydrologique de l'Oued Mina dans le contexte des changements climatiques. Dans l'optique d'une gestion intégrée des ces ressources, les modèles hydrologiques constituent un outil adapté à la prévision des débits sur les cours d'eau, lors de notre travail nous avons fait le choix d'un modèle hydrologique conceptuel qui s'appelle GR2M « Génie rural, deux paramètres de calage, et au pas de temps mensuel ».

Ce modèle est facile à maître en œuvre du fait qu'il nécessite peu de données à savoir ; les précipitations, les évapotranspirations et les débits pour la période de calage, ainsi qu'un faible nombre de paramètres de calage « deux paramètres x_1 et x_2 ».

Nous avons commencé par un bref aperçu sur les changements climatiques tels qu'ils ont été observés au cours du XX^{ème} et leur impact sur les ressources en eau, pour cela nous avons proposé une stratégie d'adaptation aux ces changements climatiques, ensuite des modèles hydrologiques conceptuels ont été exposés afin de justifier notre choix du modèle que nous avons utilisé pour la simulation des écoulements et pour la recherche de tendance dans le comportement hydrologique du bassin devant les changements climatiques et cela par un couplage « modèle climatique - modèle hydrologique ».

L'efficacité du modèle à simuler les écoulements moyens de bassin est donnée par l'analyse du critère de Nash appliqué aux écoulements, Il a donné des valeurs satisfaisantes (supérieure à 70%) et pour confirmer la robustesse de notre modèle, nous l'avons testé par d'autre critères de performance comme l'écart arithmétique moyen (EAM) et l'écart Quadratique Moyen (EQM), donc, nous pouvons dire que le modèle GR2M présente une certaine efficacité à simuler les écoulements au pas de temps mensuel et garantir une meilleure compréhension du comportement hydrologique du bassin.

Les résultats du modèle nous ont permis de déduire certaines prévisions, par exemple dans le sous bassin de l'oued Mina, pour un déficit pluviométrique de 9.7 % à l'horizon 2020 pour le scénario bas un déficit d'écoulement de 8.9 %, pour le scénario haut, pour un déficit pluviométrique de 13.3 % correspond un déficit d'écoulement de 10.1 %. En ce qui concerne l'horizon 2050 pour le scénario bas, un déficit pluviométrique de 17. % a entraîné un déficit de 13.1 %, pour le scénario haut, pour un déficit pluviométrique de 24.3 %, un déficit d'écoulement de 19.3 % a été trouvé.

Nous avons constaté que les réductions des débits sont comparables aux prévisions faites dans les pays limitrophes et pour l'Afrique Occidentale et Centrale.

Pour affiner d'avantages ces prévisions, nous comptons les faire en se basant sur des sorties climatique régionales propres au bassin. Ce travail sera effectué pour compléter cette initiation à la recherche.

L'étude de la caractérisation hydro-climatique montre que les déficits pluviométriques et l'élévation de la température ont des répercussions immédiates et importantes sur l'écoulement des eaux superficielles, ce constat oblige les gestionnaires de ressources en eau de tracer une bonne stratégie pour l'utilisation rationnelle de l'eau qui représente une richesse précieuse pour tout développement social et économique.

Les changements climatiques n'affecteront pas seulement la quantité d'eau disponible en augmentant les risques de pénuries en années sèches mais ils affecteront aussi la qualité de cette ressource.

Enfin, nous suggérons ce document comme un outils d'alertes aux autorités concernés pour planifier les mesures d'adaptation nécessaires devant les changements climatiques inéluctables, la lutte contre ces changements climatiques est une affaire mondiale qui nécessite l'implication des gouvernements, elle ne peut être gagnée que si la responsabilité soient partagées entre les nations développées et en développement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Achite M., 2002.** Approche statistique d'évaluation du transport solide dans le bassin versant de l'oued Mina (Nord ouest algérien). Watmed, Tunisia. 10-13 oct. vol2, 894-899.
- Andre, H., 1976.** Hydrométrie pratique des cours d'eau. Paris : Eyrolles, 259 p.
- Andreassian, V., Hall, A., Chahinian, N., Schaake, J., 2006.** Large sample basin experiments for hydrological model parameterisation: Results of the Model Parameter Experiment-MOPEX. AISH, Wallingford, Royaume-Uni, 347 p.
- Ardoin-Bardin S., 2004.** Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat en Sciences de l'Eau. Université Montpellier II, 255P.
- Arnell, N.W., 1999.** Climate change and global water resources. Global Environmental Change-Human And Policy Dimensions, 9: S31-S49.
- Arnell, N.W., 1999.** The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective. Global Environmental Change-Human And Policy Dimensions, 9(1):5-23.
- Baudez, JC., Loumagne, C., Michel, C., Palagos, B., Gomendy, V., Bartoli, F. 1999.** Modélisation hydrologique et hétérogénéité spatiale des bassins, Cemagref, division qualité et fonctionnement hydrologique des systèmes aquatiques. Parc de Tourvoie BP 121, 92185 Antony Cedex, CNRS, Centre de Pédologie Biologique associé à l'Université Henri Poincaré - Nancy I. BP 5, 54501 Vandoeuvre les Nancy Cedex
- Beniston, M., 2005.** Changement climatique et impacts possibles dans la région alpine, Revue de géographie alpine, Volume 93, Numéro 2 p. 13 - 24
- Benkaci Ali, T., Dechemi, N., 2004.** Modélisation pluie-débit journalière par des modèles conceptuels et "boîte noire"; test d'un modèle neuroflou, Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, 49(5)
- Berterreche, L., Champredonde, R., 2008** Etude de la génération de crues rapides par la confrontation de deux logiciels, INP ENSEEIHT
- Booij, M.J., 2005.** Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions. 303(1-4): 176.
- Bouchard, S., 1986.** Amélioration d'un modèle hydrologique déterministe et son application à la prévision des ruissellements du bassin du lac St-Jean. Thèse de doctorat d'état, Université du Québec à Chicoutimi, 235P.

- Bou-Zeid1, E., El-Fadel2, M. (2002).** Climate Change and Water Resources in Lebanon and the Middle East. 10.1061/(ASCE)0733-9496(2002)128:5(343).
- Bravard, J.P., 1997.** Les cours d'eau: dynamique du système fluvial, Armand Colin, Paris, p. 222-230.
- Calvo, J-P., Desandre, A., Hernandez., Ponzo, L., 2005.** Changement Climatique et Tourisme de Montagne, Ecole nationale de ponts et des chaussées
- Chahinian, N., 2004.** Paramétrisation multi-critère et multi-échelle d'un modèle hydrologique spatialisé de crue en milieu agricole, Thèse de doctorat d'état. Université de Montpellier II, sciences et techniques du Languedoc
- Charles, P., Claude, M., Vazken, A., 2007.** Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR), document disponible au Cemagref
- Chérifi, S., 2001.** Application de modèle GR2M sur le bassin de la Soummam et de l'Isser, these de Magister, ENP, Alger
- Dechemi, N., Benkaci, T., Issolah, A., 2003.** A monthly streamflows modelling using conceptual models and neural fuzzy system, revue des sciences de l'eau. Rev. Sci. Eau 16/3(2003) 407-424
- Degoutte, G., 2006.** Aide mémoire d'hydraulique a surface libre, Edition ENGREF, 66 p.
- Dezetter, A., 2004.** Impact de la variabilité climatique et anthropique sur les ressources en eau, Commission Modélisation IFR
- Dominguez, R., Bouvier, C., Neppel, L., Lubes, H., 2005.** Approche régionale pour l'estimation des distributions ponctuelles des pluies journalières dans le Languedoc-Roussillon. Hydrological Sciences Journal, 50(1), 17-29
- Douville, H., Andre, J.C., Marsily, G., 2007.** Les impacts des changements climatiques sur le cycle hydrologique, série des annales des Mines "responsabilité et environnement"
- Droque, G., Fournier, M., Bauwens, A., Buiteveld, H., Commeaux, F., Degré, A., De Keizer, O., Detrembleur, S., Dewals, B., Francois, D., Guilmin, E., Hausmann, B., Hissel, F., Huber, N., Lebaut, S., losson, B., Kufeld, M., Nacken, H., Piroton, M., pontégnie, D., Sohier, C., Vanneuville, W., (2010).** Analyse du changement climatique, des scénarios de crue et d'étiage sur le bassin de la Meuse, résumé du rapport du WP1-action 1 et 3.
- Ducharne, A.,Théry, S.,Viennot , P.,Ledoux, E.,Gomez, E.,Déqué, M., 2003.** Influence du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine, [Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement](#)
- Duclaux, M., 2009.** Caractérisation Hydrologique du Bassin Versant de Chalpi Grande, Versant oriental de la Cordillère des Andes en Equateur, ENSAR 157

- Florence, H., 2008.** Impact du changement climatique sur la ressource en eau en France, CNRS, UPMC, Mines-Paristech
- Gaume, E., Livet, M., Desbordes, M., Villeneuve, J.P., 2004.** Hydrological analysis of the river Aude, France, flash flood on 12 and 13 November 1999. *J. Hydrol.*, 286 (2004) 135–154
- GIEC., 2001.** Bilan de l'évolution du climat: Troisième rapport d'évaluation, Rapport de synthèse du GIEC. Wembley, Royaume-Unis: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 37 p.
- Gineste, p., 1999.** Télédétection spatiale et modélisation du fonctionnement hydrologique des petits bassins versants, Laboratoire commun de télédétection, CEMAGREF-ENGREF, Montpellier, France
- Godefroy, N., Haaser, F., Henniaux, S., Mosser, N., Stern, O., Vogel, N., 2001.** Changement climatique et hydrologie
- Goubanova, K., 2007.** Une étude des événements climatiques extrêmes sur l'Europe et le bassin méditerranéen et de leur évolution future, Thèse de doctorat, laboratoire de météorologie dynamique di CNRS,IPSL, université Pierre et Marie Currie, paris , France
- Hendrickx, F& Sauquet., E., (2008)** les constats et les prévisions de l'évolution de l'hydrologie et de la température des cours d'eau. Cemagref.
- Hérault, L., 2002.** Réseaux de neurones – Méthodologie et applications. Éditions Eyrolles. p. 168-175.
- IISD., 2003.** Analyse de changement climatique, des scenario de crue et d'étiage sur le bassin de la Meuse. résumé du rapport du WP1-action 1 et 3
- Klemes, V., 1986.** Operational testing of hydrologic simulation models. *Hydrological Sciences Journal*,31(1): 13-24.
- Kouameé, B., Servat, E., 1992.** Essai de caractérisation des paramètres des modèles pluie-débit dans le centre et le sud e la cote d'Ivoire, 8^{ème} journée hydrologique - Orstom - 561
- Labelle, C., 2000.** Les gaz à effet de serre et les changements climatiques, division des sciences et de la technologie, Division des sciences et de la technologie, 79-2F
- Laborde J.P., 2003.** Hydrologie de surface. Université de Nice-Sophia Antipolis. Laboratoire d'analyse spatiale. Nice.
- Lahache, R., 2010.** Climate change adaptation in water. UNDP.
- Laurent, F., 1996.** Outils de modélisation spatiale pour la gestion intégrée des ressources en eau Application aux Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux, Thèse de doctorat d'état, N° 137 GD. Ecole Nationale Supérieure Des Mines De Saint-Etienne, Ecole Nationale Supérieure Des Mines De Paris

- Lazaro, P., 1996.** Influence des changements climatiques sur le régime hydrologique et hydraulique des cours d'eau – PNR 31, E547cole polytechnique fédérale de Lausanne, laboratoire de constructions hydrauliques
- Ledoux, E., 1980.** Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Marsily, G., 1994.** Quelques réflexions sur l'utilisation des modèles en hydrologie, Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 7, n° 3, 1994, p. 219-234.
- Marsily, G., 2008.** Eau, changement climatique, alimentation et évolution démographique, Laboratoire de Géologie Appliquée, Case 105, 4, Place Jussieu 75252 Paris Cedex 05
- Mathevet, T., 2004.** Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire ? Développements empiriques et intercomparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants . Thèse de Doctorat, École Doctorale Géosciences et Ressources Naturelles UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, Cemagref, Antony
- McKenney, M.S. and Rosenberg, N.J., 1993.** Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. 64(1-2): 81.
- Meddi, M. (2010).** Impact des changements climatiques sur les débits dans le bassin Chélif. Projet GEF/PUND 00039149.
- Merrien soukatchoff, V., 2004.** Hydrologie et hydrogéologie. Ecole des mines de Nancy.ST 153
- Mezener, N., 2008.** Contribution à la gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant côtier algérois. Mémoire de Magister. Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique. Blida.
- Morin, G., 1991.** Le modèle hydrologique CEQUEAU : exemples d'application, INRS-Eau, Université du Québec, CP 7500, Ste-Foy, Québec, G1V 4C7, Canada
- Mouelhi, S., 2003.** Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat. Université Paris VI. ENGR.EF. Ecole Nationale des Mines de Paris.
- Musy, A., 2001.** Cours d'hydrologie générale. Lausanne : disponible sur le site du laboratoire d'hydrologie et d'aménagement de l'école polytechnique de Lausanne,
- Musy, A., Higy, C., 1998.** Hydrologie appliquée, Edition H.G.A. Bucarest. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- <http://hydram.epfl.ch/e-drologie/>.

- Muzik, I., 2001.** Sensitivity of hydrologic systems to climate change. Canadian water resources journal, 26(2), 233-253.
- Nouma, R., 2006.** Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron, thèse doctorale.
- Orstom, E.S., Orstom, A.D., 1994.** modelling the rain-runoff relationship: a tool for evaluating water resources, Laboratoire d'Hydrologie, Centre OFSTOM d'Adiopodoum6, 01 BP 51, Abidjan, Côte d'Ivoire
- Philippe, R., 2009.** Analyse et validation des extrêmes et de la variabilité des températures et de la précipitation de modèle régional canadien du climat, mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en sciences de l'atmosphère
- Pruneau et al., 2004.** Guide pédagogique d'éducation au changement climatique. Université de Moncton, Groupe de recherche Littoral et vie.
- Puech, C., 2007.** Chemins de l'eau et modèles hydrologiques, Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale, Unité Mixte de Recherche Cemagref – CIRAD – ENGREF
- Rakotondrabe, F. ; 2007.** Etude de la vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques, modélisation par le logiciel WEAP 21 : cas du bassin versant de Morondava (en Sud-Est de Madagascar)
- Remenieras, G., 1999.** L'hydrologie de l'ingénieur. Collect. Div. Rech. Dev. Electr. France. Ed., Eyrolles. 269 p.
- Roubinet, D., 2004.** Variabilités climatiques et leurs impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Ouest Centrale, Hydrosciences Montpellier, CRNS – IRD – UM1 UMS
- Sauquet, E., Haond, M., 2004.** Investigating non-stationarity in Rhone streamflows related to climate variability and human impact
- Sauquet, E., Ribatet, M., Leblois, E. 2007.** Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme (RExHySS), Département Ressources en eau, usages et risques
Unité de Recherche Hydrologie – Hydraulique
- Senoussi, S., Agoumi, A., Yacoubi, M., Fakhraddine, A., Sayouty, E.H., Mokssit, A., Chikri, N., (1999)** Changements climatiques et ressources en eau Bassin versant de l'Ouergha (Maroc). Hydroécol. Appl. (1999) Tome 11, pp. 163-182.

Sirangelo, B., Ferrari, E. (2010). Probabilistic analysis of the variation of water resources variability due to rainfall change in the Crati basin (Italy). universita della calabria (Italy).

Terry, E.E., 1996. Les effets des changements dans le cycle hydrologique mondial sur la disponibilité des ressources en eau, [Département du développement durable](#),

Touaibia, B., 2004. Manuel pratique d'hydrologie, ISBN 9947-0-03367-1

Touazi, M., Laborde, j-p., 2004. modelling rainfall-discharge data at a mean annual scale in northern Algeria ,revue des sciences de l'eau, rev. sci. eau 17/4(2004) 503-516

Viennot, P., 2009. Description des modèles hydrologiques, Projet RExHySS

Vissin, E-W., 2007. Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger, Université de Bourgogne Centre de Recherches de Climatologie CNRS - UMR 5210

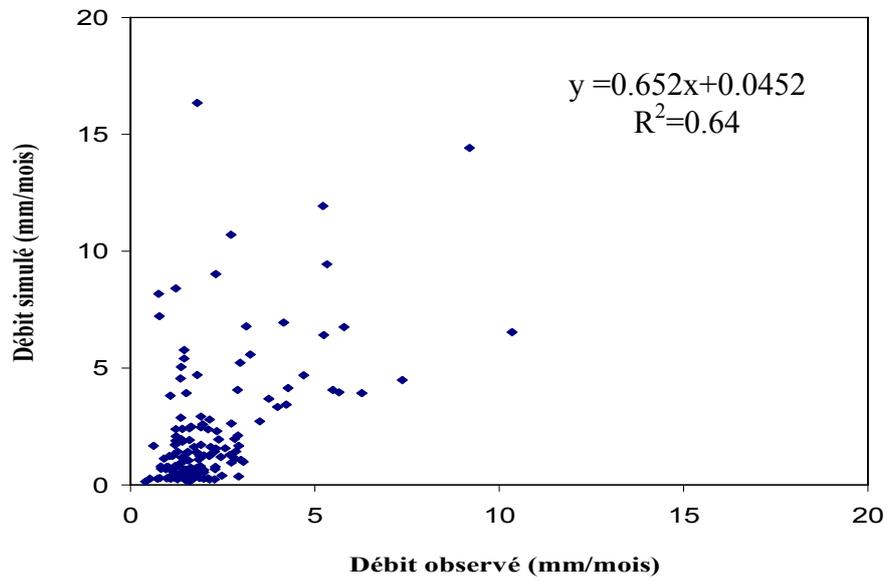


Figure.1 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous période (1960-1976) pour la station de l'Oued Al Abtal (en calage)

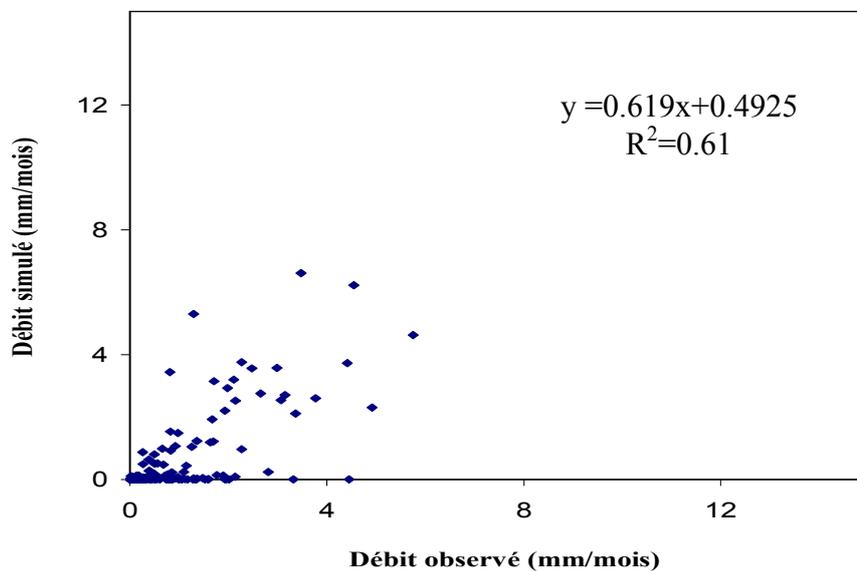


Figure.2 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous période (1976-1990) pour la station de l'Oued Al Abtal (en validation)

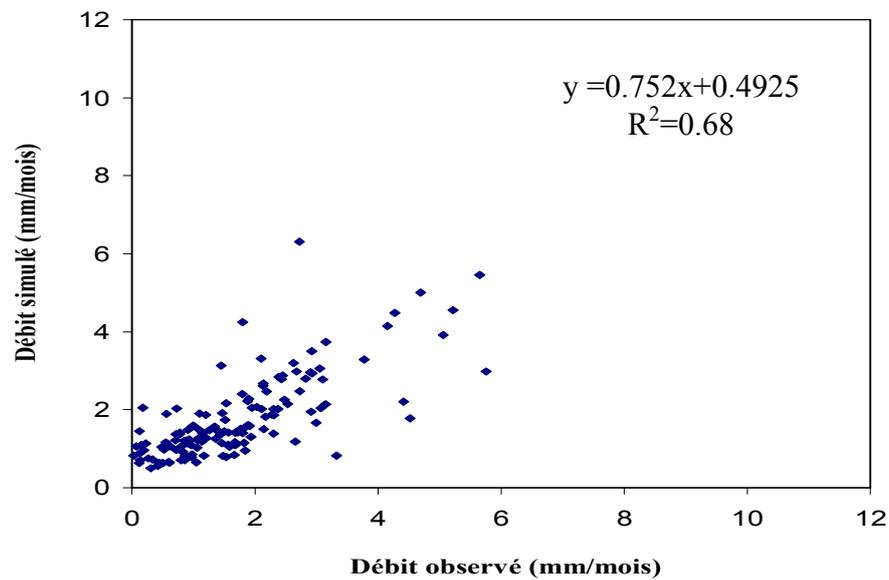


Figure.3 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous période (1970-1986) pour la station de l'Oued Al Abtal (en calage)

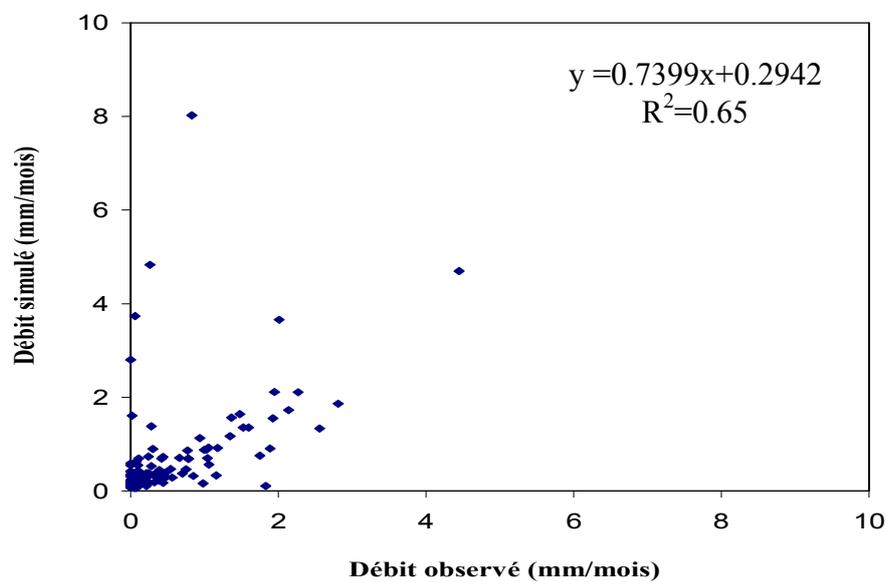


Figure.4: Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous période (1987-2000) pour la station de l'Oued Al Abtal (en Validation)

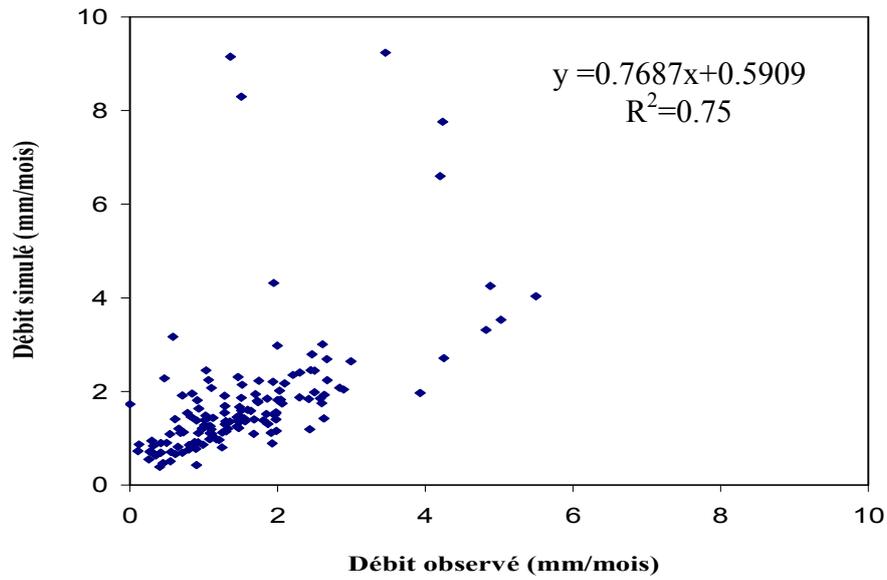


Figure.5 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous période (1970-1986) pour la station d'Ain Hamarra (en calage)

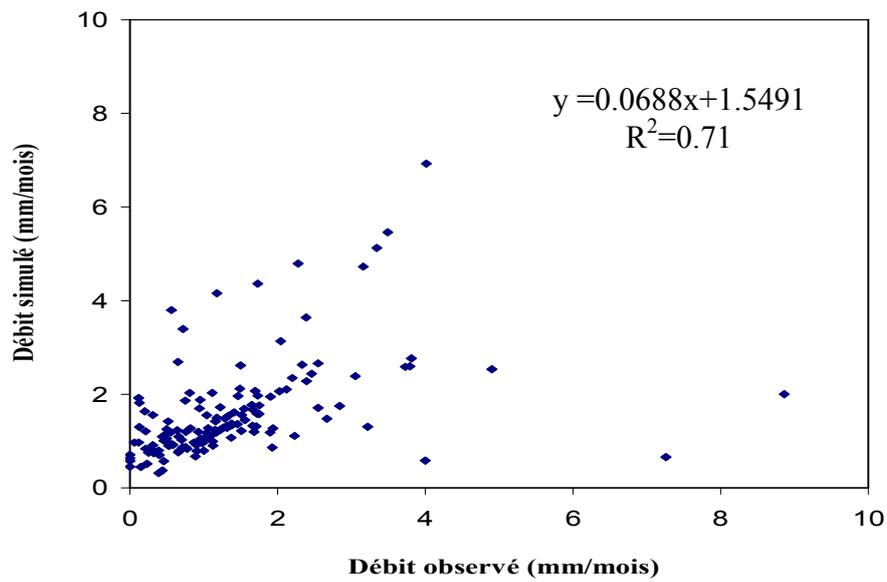


Figure.6 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous période (1987-2000) pour la station d'Ain Hamarra (en validation)

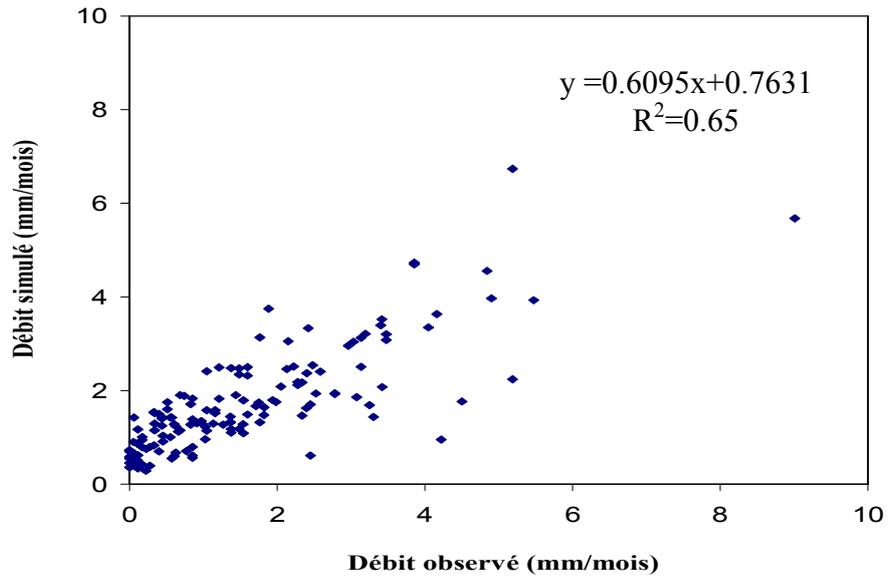


Figure.7 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous période (1970-1986) pour la station de Sidi AEK Djilali (en calage)

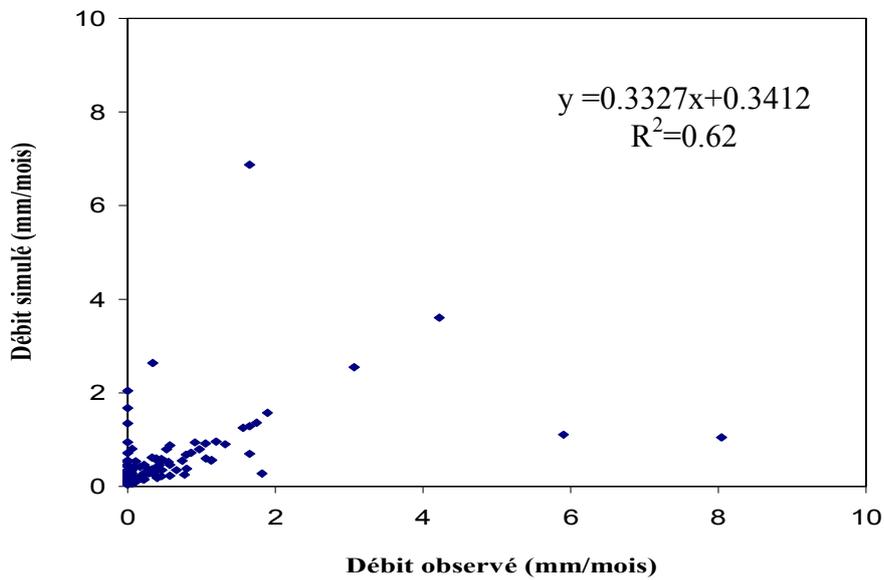


Figure.8 : Corrélation débit observé et débit simulé sur la sous période (1987-2000) pour la station de Sidi AEK Djilali (en Validation)

