

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf d'Oran

Faculté d'Architecture et de Génie Civil

Département d'Hydraulique

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de
Doctorat En Sciences en Hydraulique

Présentée par

Djelloul BAAHMED

BILAN HYDRIQUE ET EVALUATION DES RESSOURCES EN EAU SUPERFICIELLE DU BASSIN DE LA MACTA

Soutenue le 1/06/2015

Devant la Commission d'Examen

JURY

M. CHERIF El-Amine	Professeur	U.S.T.M.B.Oran	Président
M. ERRIH Mohamed	Professeur	U.S.T.M.B.Oran	Rapporteur
M. BENRAHOU Kouider Halim	Professeur	U.D.L S ^d Bel Abbes	Examineur
M. YEBDRI Djilali	Professeur	U.S.T.M.B.Oran	Examineur
M. DRIS Amine	M.C.A	U.D.L S ^d Bel Abbes	Examineur
M. OUDIN Ludovic	M.C/ HDR	U.P.M.C Paris 6	Examineur

Département Hydraulique
Faculté d'Architecture et de Génie civil
Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf
PB 1505
El Mn'aouar
Oran

Département Hydraulique
Faculté de Technologie
Université Djillali Liabès
89, Route De Tlemcen

UMR 7619 SISYPHE
4 place Jussieu
75 252 Paris Cedex 05

Version compilée Juin 2015.

Résumé

Cette thèse, traite l'évaluation de la ressource en eau au niveau des sous bassins de la Macta qui représente un des grands bassins situé à l'ouest algérien qui draine une superficie d'environ 14000 km².

La quantification des écoulements en contexte semi-aride est un enjeu important pour l'Algérie précisément ces dernières décennies Nous nous intéressons au cas des bassins versants de la Macta, ses deux cours d'eau le divise en deux régions, celle de l'Est drainée par Oued El'hammame l'autre par Oued Mekkerà à l'Ouest.

Ce bassin à subit des conséquences de changements climatiques que notre globe terrestre commence sensiblement à le vivre depuis plus de trois décennies, à l'aide des tests non paramétriques de Mann Kendall et Pettitt, nous avons pu voir les tendances vers la hausse des températures par conséquent les évapotranspirations et les tendances vers la baisse des écoulements et une stabilité de la pluie dans nos sous bassins durant la période 1975 à 2005. Cela nous a poussé à poser la question dans la dernière partie "est-ce que le climat est le seul facteur des baisses des débits ?"

Afin de répondre à cette question, nous avons entrepris, dans ce travail l'estimation du bilan hydrique du bassin de la Macta qui a nécessité un nombre considérable d'informations et de données hydro-climatiques sur la région ce qui nous a permis une modélisation hydrologique des bassins versant instrumentés pour permettre d'avoir un modèle qui peut être utiliser dans la gestion, la prévision, la régionalisation et la quantification de cette ressource des bassin non jaugés.

La modélisation était fait aux différents pas de temps commençant par le mensuel au pluri annuel, la spécification de notre zone aride et les critères de performance obtenus, nous ont amenés à continuer le travail au pas de temps pluri annuel de 3 ans.

Nous avons pu mettre en évidence deux causes répondant sur la question suscitée relative au rôle du climat dans la baisse des débits. Vu la complexité du travail nous pourrions dire que le climat et l'activité anthropique sont les acteurs principaux sur cette problématique.

Mots Clés : Contexte semi-aride, Bilan hydrique, Modèle hydrologique, Changement climatique, Mann-Kendall, Pettitt, Schreiber.

Abstract

This thesis deals with the assessment of water resources at the sub basins Macta representing a major basins located west Algerian which drains an area about 14,000 square kilometers.

Quantification of flow in semi-arid environment is an important issue for Algeria precisely recent decades We consider the case of watersheds Macta two rivers divide into two regions, one of which is is drained by Wadi Wadi El'hamme another by Mekker west.

This basin suffers the consequences of climate that our globe begins substantially live for more than three decades to change using the nonparametric Mann Kendall and Pettitt, we saw trends toward higher temperatures by therefore evapotranspiration and trends toward lower flows and stability of rain in our sub-basins during the period 1975 to 2005 it prompted us to ask the question in the last part "is that climate is the only factor decreases in rates? "

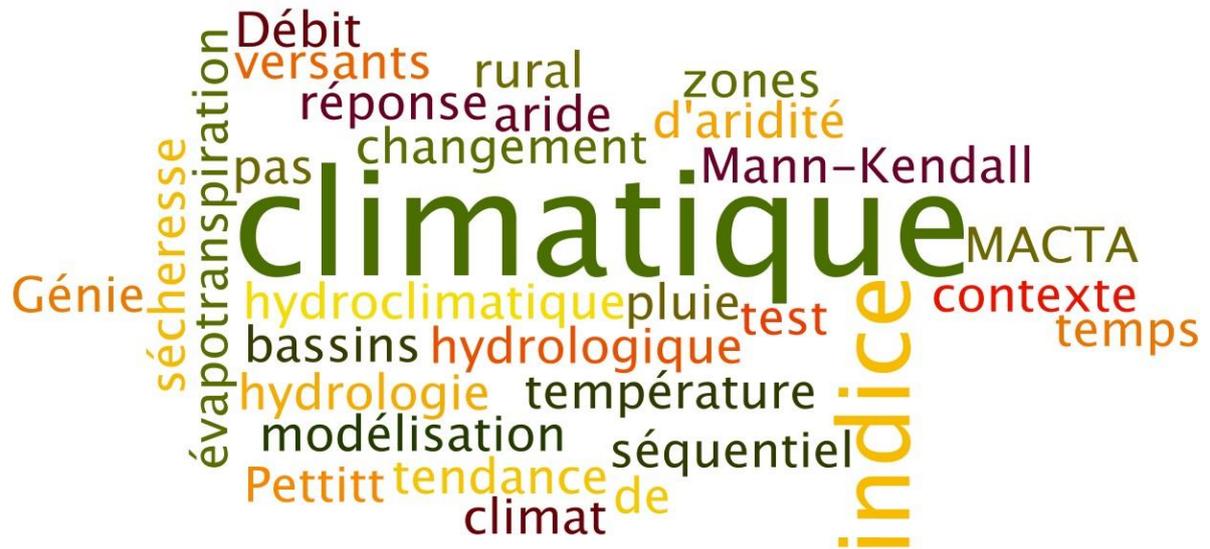
Before answering this question, we undertook this work in estimating the water balance of the basin Macta required considerable information and hydro-climatic data about the area which allowed us calmly modeling number hydrology of the watersheds instrumented to afford to have a model that can be used in the management, forecasting, regionalization and quantification of the resource ungauged basin.

The modeling was done at different time steps starting with the monthly annual multi, the specification of our arid and performance criteria obtained led us to continue the work in no time annual multi 3 years.

We were able to identify two causes respondents prompted the question about the role of climate in lower flows, given the complexity of the work we can say that the climate and human activity are the main actors on this issue.

Keywords: semi-arid context, water balance, hydrologic model, Climate Change, Mann-Kendall, Pettitt, Schreiber.

Nuage de mots clés



ملخص

أحواض تمثل المقطع الفرعية الأحواض في المائدة المواردت تقييم مع الأطروحة هذه تناول
مربع كيلومتر 14,000 حوالي مساحتها تبلغ تصرف الجزائري الغرب التي تقع ريدسية

وجه على الأخريرة العقود خاصة لجزائر هلمة مسألة القادلة شدة البيئية في لتدفق التقييم
منطقة تين، إلى تنقسم لمقطع الهيدروغرافيا للأحواض لحالة إتماماتنا وجهنا ونحن التحديد
الغرب من مكرة طريق عن آخر الحمام وادي من تصريف يتم الشرقية الجهة في منها واحدة

وطرق باستخدام عقود ثلاثة من لأكثر ي بدأ عالمنا يعيشه الذي المناخ آثار من يعاني الحوض هذا
أيضا يعني لذي الحرارة لدرجات ارتفاع نحو الات جاهلت رأينا، PETTITT وكيندال ان نماذج
خلال لذي نافية أحواض في الأمطار واسد تقرار الدننا نحو التدفقات والات جاهلت التبخر
الوحيد العامل هو المناخ أن هو "الأخبر الجزء في السؤال طرح إلى دفعا أنه 1975-2005 الفترة
"معدلات؟ في انخفاض

المقطع الحوض المائية الموازنة تقدير في العمل هذا بها قمنا السؤال، هذا عن الإجابة قبل
لنا سمحت التي المنطقية عن المناخية المائية والبيانات المعلومات من كيراقدر المطالبة
يمكن مودجان يكون أن تحمل على المجهزة المياه للأحواض الهيدروlogيا عدد النمذجة بهدوء
مراقبة التغيير للأحواض والتقدير والإقليمية والتنبؤ إدارة في استخدامها

لدينا معايير يروت حديد الشهرية، السنوية المتعددة بدعا مخلفة زمنية خطوات في نمذجة تم وقد
السنوية المقدرة الزمنية الخطوة في العمل مواصلة إلى دفعتنا عليها الحصول تم التي والأداء
م تتالية سنوات 3

التدفق، في المناخ دور حول السؤال لطرح دفعتنا الأسد باب من اثنين تحدي من تمكنا لقد
حول الرديسية الفاعلة الجهات هي البشرية والنشاط المناخ أن القول يمكننا عمل لتعقيد نظرا
المسألة هذه

كلمات البحث: السياق شدة قاحل، توازن الماء، والنموذج الهيدروlogي وتغير المناخ، مان
وكيندال، ttitteP، شرايبر.

DEDICACES

*A cœur vaillant rien d'impossible
A conscience tranquille tout est accessible
Quand il y a la soif d'apprendre
Tout vient à point à qui sait attendre
Quand il y a le souci de réaliser un dessein
Tout devient facile pour arriver à nos fins
Malgré les obstacles qui s'opposent
En dépit des difficultés qui s'interposent
Les études sont avant tout
Notre unique et seul atout
Ils représentent la lumière de notre existence
L'étoile brillante de notre réjouissance
Comme un vol de gerfauts hors du charnier natal
Nous partons ivres d'un rêve héroïque et brutal
Espérant des lendemains épiques
Un avenir glorieux et magique
Souhaitant que le fruit de nos efforts fournis
Jour et nuit, nous mènera vers le bonheur fleuri
Aujourd'hui, ici rassemblés auprès des jurys,
Nous prions dieu que cette soutenance
Fera signe de persévérance
Et que nous serions enchantés
Par notre travail honoré*



Je dédie cette thèse à ... :✍️

A la mémoire de mon Père Si- Ahmed



Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi.

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.

Je sais que tu attendais ce jour avec impatience, tu m'a dis que ça sera ton meilleurs cadeau, mais Allah a voulu que tu parts à jamais avant cet évènement. " Allah Yerhmek" ; Ta prière et ta bénédiction de chaque matin m'ont été d'un grand secours

Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

A ma très chère mère

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Ta prière et ta bénédiction m'ont été aussi d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A ma très chère épouse

Quand je t'ai connu, j'ai trouvé la femme de ma vie, mon âme soeur et la lumière de mon chemin.

Ma vie à tes cotés est remplie de belles surprises.

Tes sacrifices, ton soutien moral, ta gentillesse sans égal, ton profond attachement m'ont permis de réussir mes études.

Que dieu réunisse nos chemins pour un long commun serein et que ce travail soit témoignage de ma reconnaissance et de mon amour sincère et fidèle.

A mes très chers enfants Meriem et Mahmoud

Quand vous êtes arrivés dans cette vie, un amour de plus est né, vous le bonheur de ma vie, certes je vous ai délaissé un moment mais c'était pour la bonne cause et pour une vie meilleure qu'un papa souhaite offrir à ces enfants mais je ne pourrai jamais faire autant que mon père

A mes très chers frères, leurs épouses, mes très chères sœurs Et leurs enfants

Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.

Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

A tous les membres de ma famille, petits et grands

Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection la plus sincère.

A mes chers amis et collègues

Remerciements

Jeudi 18 septembre 2014, 2 h 10 du matin, un peu fatigué mais assez pour commencer les remerciements de ma thèse qui me hantent depuis le commencement de ce travail. J'aimerais présenter ma grande gratitude aux personnes qui étaient durant tout ce parcours scientifiques ou autre près de moi.

Je tiens tout d'abord à remercier les personnes qui me font l'honneur de juger ce travail : Cherif El Amine, Benrahou Halim Kouider, Dris El Amine et Yebdri Djilali pour avoir accepté le rôle d'examineur. J'ai pu aussi bénéficier des conseils ainsi de la précieuse aide du directeur de thèse Errih Mohamed : cher professeur vous cachez toujours non seulement le secret de la jeunesse mais aussi celui de ton charisme après chaque rendez-vous je rebrousse mon chemin avec un sourire bien que j'étais avant en colère.

J'aimerais réserver une grande partie dans mes remerciements sans faire de jaloux à la personne qui a accepté avant tout de m'accueillir dans son laboratoire qui a accepté de travailler avec moi et me de donner beaucoup de temps pour moi, cette personne est Ludovic Oudin, effectivement notre premier rendez-vous était en mai 2012 durant un stage de court durée à l'ENS de Paris dans le laboratoire de Marie Dominique Löye Pilot, pendant un après-midi complet nous avons réussi à voir comment ça se déroulera la formation résidentielle qui a débuté le 12 octobre 2012 jusqu'à 31 mars 2013 durant cette période Ludo était mon référent (Ludo : est-ce que je peux dire ami ?). Grâce à lui j'ai pu avoir plus rapidement les papiers nécessaires pour séjourner en France une chose qui n'était pas facile. Nous avons fait le tour du laboratoire pour la présentation ce qui m'a facilité l'intégration au groupe en finissant notre tourné par assister au pot de Maya (morte quelque mois après), grâce à Ludo je me suis senti toujours à l'aise et libre non seulement dans le laboratoire mais aussi dans nos séances de travail, chaque matin en se précipitant à mon bureau, espérant toujours d'être avant Adrien, l'honneur était partagé pour s'inviter à une tasse de café souvent avec Ludo et Nicolas rarement Pierre Ribstein, cela me permettait toujours de bien démarrer la journée. Je n'oublie pas les appels pour manger "Ludo cantine ? Oui j'arrive ; Jillou cantine ? Tout de suite !!" et la fin de journée comme c'est Ludo qui part le 1^{er} entre 18h et 18h30, à part une ou deux fois, il n'était jamais sorti sans me dire "bonne soirée" ou "Tchao", "à demain". Bravo Ludo tu es la personne la plus sympa que je connaisse. Je remercie Ludo aussi surtout pour sa méthode de travailler en chassant toute pression, il sait faire-faire marcher les choses, ce qui m'a étonné chez lui sans pouvoir connaître le secret c'est qu'il trouve toujours les solutions à tous problèmes rencontrés, attention Ludo

tu pourras gagner une jalousie ! Sincèrement en réfléchissant ensemble à une solution une lumière paraissait comme une lampe sur sa tête d'où j'ai compris pourquoi ses cheveux change de couleur restant toujours dans l'intervalle du spectre des couleurs jaunes ; là où j'étais saturé il prouvait une patience d'ange mais lorsque il mordait sa langue, oups je comprenais que c'est une partie à suivre.

Je lui présente ma gratitude car dans les vacances quand le laboratoire était quasi-vide, en ce moment Ludo m'a ouvert sa maison ce qui apaise la douleur de la solitude et du dépaysement, j'en profite pour remercier sa femme Joanna qui est un cordon bleu en cuisine très sympa toujours souriante malgré les bêtises des adorables Ilias et Benjamin, leurs enfants m'ont toujours fait penser à mes enfants Meriem et Mahmoud en s'amusant.

Je te suis reconnaissant pour me permettre d'assister au cours de Master 1 et Master 2 ainsi de faire les stages M 1 et M 2 dans lesquels j'ai pu manipuler les outils de l'hydrologie, l'hydrochimie l'hydrobiologie et l'hydrogéologie ce qui m'a permis d'enrichir mon expérience et mes connaissances que je devrai transmettre à nos étudiants.

Le maillot authentique du Paris Saint Germain c'était la cerise sur le gâteau floqué "Djelloul" c'est magnifique. Pour ne pas trop te remercier je t'adresse ce verbe dans l'inverse de la formule de Schreiber, bien sûr ta préférée, et je mets "infiniment" dans l'exposant qui définit le paramètre de cette formule.

Enfin je te remercie de ta diligence, ta compréhension, ta gentillesse, ta générosité ...c'est fini non !

Juste une question : nous avons la même année de naissance, même spécialité en ingénierat et en doctorat, même fonction, nos conjointes sont du même domaine qui est l'environnement, même nombre d'enfant avec des âges très proches. Ludo est ce que c'est le hasard ???

Au suivant : Oh Valérie la personne que j'ai partagé le même bureau durant une année, dans les durs soucis j'ai toujours compté sur son soutien psychologique en plus les échanges de chocolat chez elle y a pas de rupture de stock quant aux friandises ... Merci Valérie d'accepter d'être ton assistant pour les TP's et surtout l'encadrement du stage de M2 HH d'où j'ai eu l'occasion de découvrir le sud de la France entre autre Nîmes, Millau et surtout son pont suspendu.

Pierre Brigode le super "R", Aurélien Campoy, Claire Magand en plus de leur sympathie m'ont grandement aidé dans la programmation en langage R, bon le SciLab et ForTrans Je reviens à Ludo et Nicolas, pour les SIG je suis reconnaissant envers Marie Sylvestre et Aurélien Baro.

Je tiens à remercier : Pierre Ribstein pour m'accueillir dans son laboratoire, lorsque je lui raconte un problème je ne quittais jamais son bureau sans avoir une solution a-t-il une baguette magique ? Hocine Bendjoudi et Marie Dominique Löye pour leurs précieux aides et conseils, Djamel Benmamar pour ses discussions purement à l'Algérienne, merci aussi à Abdelkader Azougui, Nora Roger (je lui dois son immense soutien administratif), Michel Meybeck (et sa co-bureau oups j'ai oublié son nom), Fayçal, Sophie Violette, Rose, Philippe, Christophe, Valérie Anna, l'équipe de RSTEА Antony : Vazken Andréssian, Charle Perrin, Guillaume, Et Hocine Henine.

L'ambiance dans le laboratoire était au beau fixe grâce à : mon frère Amadou, Cyrielle², Pierre Stéphane, Bernadette (tu m'as fait le plaisir de te voir derrière ta vitre !!), Najla, Nicolas, Paul, Bahar, Marie, Ugo, Adrien (qui sera avant l'autre le matin au bureau).

La vie agréable dans la cité m'était possible grâce à Abd El Djalil (celui qui m'a fait découvrir Paris sur un Velib), Nassim et sa Peugeot 205 (toujours en panne lorsque j'ai un vol), sans pouvoir oublier mon ami et collègue H'sen de Paris IIV.

Je reviens aux personnes du Bled et je commence par présenter mes remerciements à Samir ami proche le plus serviable auquel je toujours compté sur lui, Smail le généreux il travaille sur la modélisation des prothèses dentaire sans pouvoir soigner ses dents, Fekih qui n'arrête pas de m'agacer.

Ce travail ne sera pas concret sans les données soutirées auprès du directeur de l'ABH et M. Benzguir, la sous directrice de l'ANRH Alger Mme Abda que je lui souhaite un prompt rétablissement.

Je ne suis pas arrivé là sans un grand coude de pousse de mes parents, mon père directeur d'école honoraire malgré son état de santé mais il ne s'est pas fatigué de m'aider et me soutenir de tous les côtés, ma mère était toujours là quand j'avais besoin d'elle maintenant je commence à comprendre pourquoi Allah leur a donnée un important statut dans notre culture religieuse. Je sollicite Allah Pour leur donner une longue vie et une bonne santé

J'ose dire que pour réaliser ce travail, j'étais obligé de délaisser ma femme et mes enfants pendant 18 mois, pour la bonne cause je présente un immense merci et mes sincères excuses à ma femme qui m'a soutenu et surtout me supporté, ma princesse Meriem toujours les larmes aux yeux durant mon éloignement mais sans le faire savoir et mon fils Mahmoud, lui dès que

possible il n'arrête pas de m'appeler au Skype sans se fatigué. Pour cela je dédie ce travail à mes parents ma femme et mes enfants en leur disant je vous aime.

Je fini cette rubrique en remerciant mes frères Amine et Abd'Essamed, (sa femme et ses deux enfants Tayouba et Hmida qui sont toujours content de ma présence), mes sœurs : Fatima et ses enfants Abdelkarim et Oussama, Soraya (je lui souhaite un prompt rétablissement et enfin Sabrina-info ! et son mari Hocine.

Lorsque je vois ce nombre de personne qui m'ont aidé de près ou de loin je dis que je suis chanson et ce "El'Hamdou Li Allah.

Je reviens sur mes remerciements destinés à mes parents : ma mère pour tous ce qu'elle a fait pour moi depuis ma naissance à ce jours, je te remercie papa, tu n'as pas pu être là aujourd'hui, tu es partis le 20 janvier 2015 très loin sans retour. Je demande à tous ceux et celles qui t'ont connus et aimé et respecté d'avoir une pieuse pensée pour toi et prier Allah le tout puissant de t'accorder dans son vaste paradis, repose en paix.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : CONTEXTE BIBLIOGRAPHIQUE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	3
CHAPITRE II : THEORIE DE LA MODELISATION : UN OUTIL DE LA REPONSE DU COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE	
2.1. Introduction.....	13
2.2. Modélisation hydrologique	13
1. Définitions générales	13
<i>a- Variables d'entrées</i>	14
<i>b- Variables de sorties</i>	14
<i>c- Variables d'état</i>	14
<i>d- Paramètres de calage</i>	14
2. Que peut-on attendre d'un modèle appliqué à l'hydrologie ?	14
3. Etapes d'élaboration d'un modèle	15
4. Classification des modèles.....	16
5. Critères d'évaluation de la modélisation.....	17
a Erreur moyenne absolue.....	17
b Erreur quadratique moyenne.....	17
c Critère de Nash-Sutcliffe.....	18
d Critère C2M.....	18
e Critère de bilan.....	19
6. Exemples de modèles hydrologiques.....	19

TABLE DES MATIERES

2.3. Modèle hydrologique GR (Génie Rural)	21
1. Description du modèle pluriannuel pluie-débit annuel.....	23
• Modèle de Schreiber (1904)	23
• Modèle d' Ol'dekop (1911)	24
• Modèle de Turc (1954)	24
• Modèle de Tixeront (1963)	26
• Modèle de Budyko (1974).....	26
2.4. Description du modèle pluie-débit annuel GR1A	28
2.5. Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M	29
2.6. Modèle pluie-débit journalier GR4J et GR3H	32
2.7. Conclusion	32

CHAPITRE III : PRESENTATION DU BASSIN

3.1 Introduction.....	34
3.2 Contexte Géomorphologiques.....	34
a- Contexte Géographique et administratif.....	35
b- Topographie et relief.....	35
<i>i- Zone à Basse Altitude.....</i>	36
<i>ii- Zone Des Reliefs Moyens.....</i>	36
<i>iii- Zone Des Hauts Reliefs.....</i>	36
c- Sol et Géologie	37
d- Végétation.....	38
e- Réseau Hydrographique.....	39

TABLE DES MATIERES

3.3	Données hydro-climatiques	40
a-	Données pluviométriques	40
b-	Données de température et de l'évapotranspiration	46
c-	Données de débits.....	52
3.4	Conclusion.....	59
 CHAPITRE IV : ANALYSE DES TENDANCES DES VARIABLES HYDRO-CLIMATIQUES		
4.1.	Introduction.....	60
4.2.	Données et Méthodologie.....	60
4.3.	Test classique de tendance de Mann-Kendall	61
a-	Test séquentiel de Mann-Kendall.....	63
b-	Test de Pettitt.....	68
c-	Résultats.....	70
4.4.	Conclusion	73
 CHAPITRE V : MODELISATION HYDROLOGIQUE DES SOUS BASSIN DE LA MACTA		
5.1.	Introduction	74
5.2.	Problématiques de la variabilité hydro climatique.....	74
5.3.	Pourquoi choisissons-nous le modèle conceptuel GR?	75
5.4.	Modélisation pluie - débit à l'échelle mensuelle jusqu'à année 1980.....	78
a-	L'initialisation et la mise en route.....	79
b-	Critère d'évaluation ou fonction objectif.....	79
c-	Algorithme d'optimisation	79
d-	Période de calage	80
e-	Période de validation ou de contrôle	80

TABLE DES MATIERES

5.5. Modélisation par GR2M sur les sous bassins de la Macta.....	82
5.6. Modélisation pluie - débit à l'échelle mensuelle en prenant compte les débits des forages	84
5.7. Modélisation pluie - débit à l'échelle mensuelle par GR3M	85
5.8. Modélisation pluie-débit à l'échelle mensuelle par GR4M en utilisant la méthode calibration-validation	86
5.9. Modélisation au pas de temps annuel par le GR1A	88
5.10. Modélisation au pas de temps pluriannuel par le modèle génie rural	91
5.11. Modélisation au pas de temps pluriannuel période 1980-1996	92
5.12. Modélisation au pas de temps pluriannuel	93
5.13. Discussion et Conclusion	96
5.14. Conclusion	99
 CHAPITRE VI : ROLE DU CLIMAT DANS L'EVOLUTION DU DEBIT. EST-IL LE SEUL FACTEUR ?	
6.1. Introduction	101
6.2. Détermination du paramètre d'un modèle hydrologique à base de l'expression de Schreiber	102
6.3. Calage et validation du modèle à base de l'expression de Schreiber	105
6.4. Rôle du climat sur les écoulements.....	110
6.5. Description du site étude et les données utilisées	112
6.6. Données hydro-climatiques utilisées	112
6.7. Méthodes du bilan hydrologique.....	113

TABLE DES MATIERES

6.8. Méthode pour distinguer les variations observées et entraînés par le climat de ruissellement	115
6.9 Détection de changements hydro-climatiques série au cours des trois dernières décennies	117
6.10. Résultats de calage et validation du modèle	119
6.11. Détection des variations de débits dues au climat à partir des variations des débits observés	120
6.12 Discussion	121
6.14. Conclusion	123
CONCLUSION GENERALE	124
ANNEXE	127
BIBLIOGRAPHIE	140

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1

- Figure 1.** Les conséquences du changement climatique à l'échelle mondiale ("Les Changements Climatiques Vont Exacerber Les Risques de Guerre Dans Le Monde - Notre-Planete.info" 2013) 2
- Figure 2.** Bassin de Chéelif-Zahrez (Source Agence Natonale des bassins hydrographiques ABH) 6

CHAPITRE 2

- Figure 1.** Schématisation d'un modèle pluie-débit global (Oudin 2004) 13
- Figure 2.** Indice climatique en fonction de l'indice d'aridité 27
- Figure 3.** Schéma de la structure du modèle GR2M (Perrin, Michel, and Andréassian 2007). 30

CHAPITRE 3

- Figure 1.** Les sous bassins du bassin versant de la Macta délimitées par l'ANRH. ... 34
- Figure 2.** Situation du bassin de la Macta par rapport au découpage administratif ... 35
- Figure 3.** Topographie du bassin de la Macta 36
- Figure 4.** Esquisse géologique du Nord-Ouest algérien (Ministère de l'environnement) 37
- Figure 5.** Occupation du sol du nord-ouest algérien (Ministère de l'environnement) 38
- Figure 6.** Réseau hydrographique du bassin de la Macta 39
- Figure 7.** Graphe des cumules des pluies mensuelles des deux stations proches au niveau du bassin de la Macta. En rouge le cumules des deux stations, en vert l'asymptote. ... 44
- Figure 8.** Comblement de lacunes des postes pluviométriques. 45
- Figure 9.** La distribution et de la variabilité des données pluviométriques. Le trait épais représente la médiane, la boîte est formée par les valeurs des 1^{er} et 3^{ème} quartiles, et les moustaches mesurent maximum 1,5 fois la longueur de l'interquartile (3^{ème}-1^{er}). Les valeurs au-delà des moustaches sont représentées individuellement appelées valeurs aberrantes ; la ligne rouge présente la moyenne de chaque mois..... 46
- Figure 10.** Variation de l'altitude au sein du bassin de la Macta..... 47
- Figure 11.** Les moyennes mensuelles de l'évapotranspiration et la température des sous bassin de la Macta 51
- Figure 12.** Comparaison des différents pas de temps des chroniques des débits quand cela est possible ; les points rouges présentent la corrélation entre l'annuel à partir des données journalières en fonction l'annuel à partir des données mensuelles ; les triangles bleus présentent l'annuel à partir des données journalières en fonction des données annuelles ; les "plus" verts montres les données du mensuelles en fonction des données annuelles ; lorsque les données

sont verticales ou horizontales sur des axes au négatif cela veut dire que c'est des lacunes relatives au pas de temps illustré.
 54

CHAPITRE 4

Figure 1. Tendances des chroniques de : pluies, température et débit dans un intervalle de confiance égal à 95% qui correspond à une variable réduite égale à 1.96. 68

Figure 2. Détection des ruptures par le test de Pettitt sur les chroniques de : pluies, température et débit dans un intervalle de confiance égal à 95% 70

Figure 3. : Tendances des pluies, températures et débits annuels des sous bassins de la Macta sur une période 1975-2005. 71

Figure 4. : Evolution temporelle du nombre de forages et leurs débits exploités dans la Macta.. 73

CHAPITRE 5

Figure 1. Architecture du modèle GR2M avec P : la pluie, E : évapotranspiration potentielle, S : capacité du réservoir de surface, R : capacité du réservoir de routage et Q : débit le tout est en millimètre.77

Figure 2. Relation entre les deux critères $C2M = f(\text{Nash-Sutcliffe})$ 81

Figure 3. Architecture du modèle GR2M modifiée en tenant compte des débits de forage 84

Figure 4. Résultats du modèle GR pluriannuel appliquées sur les sous bassins de la Macta ; en bleu l'évolution du critère C2M en fonction des pas de temps pluriannuel ; en rouge nombre de valeurs des Q_{sim} et Q_{obs} selon le pas de temps, en vert la fonction 'runsum' renvoie le lissage de la courbe $C2M = f(\text{Nbr}_d \text{ année})$ 95

Figure 5. Corrélation entre débits simulés et observés dans le modèle GR1A sur tous les bassins 98

CHAPITRE 6

Figure 1. L'évolution du RMSE en fonction du paramètre θ dans la formule de Schreiber 104

Figure 2. : L'évolution des indices d'écoulement Q/P en fonction des indices d'aridité dans les bassins entre les deux périodes prises en compte (1975-1990 ; 1990-2000); en vert les bornes de l'enveloppe des indices d'aridité observés, en rouge les valeurs observées des deux périodes, en bleu les valeurs simulées présentant les deux périodes. 108

Figure 3. : Quantification du rôle du climat dans la baisse des débits // l'écart de l'indice d'écoulement observé en fonction de l'écart de l'indice d'écoulement simulé. $\Delta(Q/P)$ observé en fonction $\Delta(Q/P)$ simulés. "○" : sous bassins au-dessus de la bissectrice, "●" : sous bassins au-dessous de la bissectrice. 109

Figure 4.	: Proportionnalité de l'origine de l'évolution du comportement hydrologique des sous bassins versants. " Δ " Q/P Post-Q/P AntQ/P Ant observé en fonction Q/P Post-Q/P AntQ/P Ant observés.	110
Figure 5.	Localisation des stations pluviométriques et hydrométrique utilisées	...111
Figure 6.	Le rapport de la série temporelle au pas de temps 3 ans observée et simulée des bassins 110506 (a) and 111403 (b) en calage and validation modes. Les enveloppes correspondent aux simulations obtenues avec intervalles de confiance à 95% pour la valeur du paramètre du modèle en calage.	116
Figure 7.	Deux exemples de coefficient de ruissellement et variation de coefficient de ruissellement due au climat issue du modèle de Schreiber modifié. Ces exemples sont tirés de bassin versant 0506 (a) et 1 403 (b)	121

ANNEXE CHAPITRE 5

Figure 1.	Modèle GR2M appliqué aux bassins de la Macta (chronique s'arrête jusqu'à l'année 1980).....	126
Figure 2.	Modèle GR2M appliquées aux bassins de la Macta en tenant compte toute la période de la chronique	128
Figure 3.	Modèle GR2M appliqué aux bassins tenant compte des débits des forages d'eau	130
Figure 4.	Modèle GR 3M appliqué aux bassins de la Macta en tenant compte toutes les chroniques.	133
Figure 5.	Modèle GR4M appliqué aux bassins de la Macta (calage-validation)	.. 137

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 2

Tableau 1	: Exemple de caractéristiques des modèles pluie-débit (Oudin 2004)	... 17
Tableau 2	Récapitulatif et analyse adimensionnelle des modèles(Mouelhi 2003)	... 28

CHAPITRE 3

Tableau 1.	Paramètres hydrographiques de sous bassins versant de la Macta	... 40
-------------------	----------------------------------------------------------------	--------

CHAPITRE 4

Tableau 2	Tendance hydro-climatiques des sous bassin de la Macta. Le signe '-' indique une tendance significative (à 95%) à la baisse, le signe '+' indique une tendance significative (à 95%) à la hausse, et '0' indique qu'aucune tendance significative n'est décelée.	62
------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

CHAPITRE 5

Tableau 1.	Sous-bassins modélisation par le modèle GR2M	76
Tableau 2.	Paramètre du modèle, critère de Nash et C2M (période jusqu'à 1980)81

Tableau 3.	Paramètres du modèle, critères de Nash et C2M issus de GR 2M appliquée sur toute la période des chroniques	83
Tableau 4.	Tableau récapitulatif de la modélisation sur les sous bassin de la Macta. X1, X2 : paramètres du modèle GR2M, C2M, Nash. Cas 1 période de la chronique s'arrête à l'année 1980 ; Cas 2 toute la période ; Cas 3 modélisation sur toute la période prenant compte les débits des forages	85
Tableau 5.	Tableau des résultats de la modélisation par le modèle GR3M ..	86
Tableau 6.	Tableau paramètres et critère C2M et NASH issu de GR 4M	87
Tableau 7.	Sous bassin modélisé par GR1A	89
Tableau 8.	Résultats de la modélisation de GR1A su les sous bassin de la Macta : (1) représente le cas de non prise en compte de l'année k-1 et (2) représente le cas de prise en compte de l'effet mémoire de l'année k-1	90
Tableau 9.	Résultats du modèle GR pluri annuel sur la période de 1980-1996 : (1) : période ou les pluies de l'ANRH utilisées ;(2) : lorsque les pluies sont mises en évidence ; (3) : pluie Delaware débiaisée par celles de ANRH.	92
Tableau 10.	Résultats du modèle GR pluri annuel sur la toute la période : (1) : période ou les pluies de l'ANRH reconstituées par celles de Delaware sont utilisées ;(2) : lorsque les pluies Delaware sont utilisées; (3) : pluie ANRH reconstitué par celle de Delaware leur permettant d'aller jusqu'à 2008	93

CHAPITRE 6

Tableau 1.	: Résultats du calage/validation sur les deux parties des séries de débit. θ_{opt} : est le paramètre optimisé ; RMSE : est l'erreur moyenne quadratique en divisant les séries de débit en deux parties avant et après 1990	105
Tableau 2.	Emplacement de $ETP/P = f(Q/P Ant)$ et $ETP/P = f(Q/P Post)$. 'IC' : intervalle de confiance, '+' appartient à IC, '-' : en dehors de IC.	108
Tableau 3.	Ensemble du bassin versant et principales variables hydroclimatiques ..	112
Tableau 4.	Tendances et point de rupture des variables hydroclimatique sur la periode 1975–2005 'NS' indique pas tendance significative à 95% intervalle de confiance, '+' and '-' indique respectivement une tendance significative à la baisse et à la hausse à 95% d'intervalle de confiance. Les années de rupture sont indiqués si elles sont détecté comme significative	117
Tableau 5.	Performance en calage et validation du modèle Schreiber modifié model ; (y) est la moyenne de 3 ans du rapport pluie-débit. La plage du paramètre dans le modèle représenté à 95% d'intervalle de confiance obtenu avec l'équation linéaire 7.....	120

INTRODUCTION GENERALE



L'Afrique du Nord est extrêmement vulnérable aux variations du climat (GIEC, 2007; Schilling et al, 2012.). En plus, la croissance démographique a été accompagnée par une augmentation tout aussi spectaculaire de la demande en eau. Par conséquent, le changement climatique, dont l'occurrence est contestable pour certains, il est soutenu que de nombreux pays en Afrique du Nord dépasseront le maximum de leurs ressources en eau terrestres économiquement utilisables avant 2025 (Ashton, 2002).

En Afrique du Nord, un réchauffement significatif associé à des vagues de chaleur plus fréquentes et de plus longue durée a été noté pour la période 1979-2011 (Fontaine et al, 2013;. Trambly et al, 2013.). Dans le nord de l'Algérie, les archives climatiques montrent que la pluviométrie annuelle a considérablement diminué depuis le milieu des années 1970 (Meddi et al, 2008;. Agneaux et Labiod 2009;. Meddi et al, 2010b;. Donat et al, 2014). Ces changements ont nécessairement un impact sur les ressources en eau de la région et dans une certaine mesure pourraient expliquer le rabattement des niveaux piézométriques et la réduction de l'apport en eau de ruissellement (Bekoussa et al, 2008.) (Meddi et Hubert, 2003; Meddi et al, 2010a). Cependant, les activités de pompage des eaux souterraines ont également fortement augmenté en raison de la croissance démographique, même si les données quantitatives sur les volumes prélevés ne sont pas disponibles.

Ainsi plusieurs facteurs agissant sur l'évolution de l'écoulement entrent en jeu ; il est très difficile de mettre en évidence et de quantifier le rôle joué par chaque facteur (Wagener, 2007; Destouni et al, 2013.). Naturellement, la variabilité du climat est fréquemment évoquée comme la principale cause de la variabilité de l'écoulement, mais également d'autres activités anthropiques locales (prélèvements d'eau pour l'irrigation et l'AEP, les barrages, les changements d'utilisation des terres, etc..) pourraient influencer fortement l'écoulement.

L'objectif principal de ce travail est d'essayer de trouver des méthodes pour quantifier ces variations dans l'évolution chronologique des ressources en eau sur le Bassin de la Macta. Cela suppose la mise en évidence des tendances dans l'évolution des paramètres hydro-climatiques et = la modélisation de la réponse hydrologique des sous-bassins de la Macta aux différents pas de temps, afin de quantifier l'influence de la variabilité actuelle du climat sur ces tendances et les points de changement détectés sur le débit annuel.

Organisation du mémoire

La thèse est organisée en six chapitres et est articulée autour d'un article scientifique et de deux communications avec actes dans des colloques internationaux.

Le premier chapitre vise à introduire le contexte général du changement climatique dans le monde, en Afrique et en Algérie ainsi que quelques synthèses sur des travaux entrepris sur la problématique abordée.

Le deuxième chapitre est une présentation de la théorie de la modélisation, un outil d'analyse de la réponse du comportement hydrologique, permettant notamment de choisir les modèles étudiés dans la suite des travaux.

Le troisième chapitre est une présentation de la zone d'étude ainsi que du jeu de données utilisé dans la suite des travaux.

Le quatrième chapitre, présente l'analyse des tendances des variables hydro-climatiques.

Le cinquième chapitre, vise à modéliser la réponse hydrologique aux différents pas de temps sur les sous-bassins de la Macta.

Le sixième et dernier chapitre, articulé autour de l'article scientifique, consiste à répondre à la question du rôle du climat sur les tendances des écoulements durant les 30 dernières années.

Enfin, une conclusion générale permet de résumer les principaux résultats obtenus et de lister certaines perspectives associées à ces résultats.

CHAPITRE I :

CONTEXTE BIBLIOGRAPHIQUE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

L'eau douce est un élément indispensable à la vie, représentant le constituant inorganique prépondérant dans la matière vivante. Elle se situe dans les glaciers, les nappes souterraines et les cours d'eau. Au fil du temps notre dépendance à l'eau ne fait que se renforcer car elle représente le facteur essentiel dans le développement de notre civilisation. C'est ainsi que la rareté de cette ressource engendre la décroissance de l'économie sur tous les domaines. Sur ce plan on comprend que tout doit être mis en œuvre pour lutter contre la pénurie d'eau qui n'est pas nouvelle et que l'augmentation des activités anthropiques, industrielles et agricoles ainsi que l'accroissement démographique ne font que s'accroître.

Alors que l'année 2009 tirait à sa fin, les gouvernements les plus puissants du Monde démontraient, lors du Sommet des Nations unies à Copenhague (Foster 2009), qu'ils étaient bien décidés à ignorer la question du réchauffement climatique. Cela alors que nous recevons quotidiennement de nouvelles confirmations de l'imminence d'un 'chaos' climatique.

Actuellement les rendements d'utilisation de l'eau dans les secteurs de l'eau potable et de l'irrigation, malgré quelques progrès encourageants, sont loin d'être satisfaisants. Pertes et fuites lors du transport et de la distribution, défauts d'efficacité et gaspillages en irrigation mais aussi lors de l'usage domestique sont estimés, dans tout le bassin méditerranéen, près de 100 km³/an, soit environ 45 % de la demande totale en eau pour ces deux secteurs (220 km³/an) (Blinda 2012).

Les conclusions du dernier Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC) confirment la thèse d'une augmentation de la température mondiale depuis le début de l'ère industrielle et une accélération du réchauffement depuis 1975 (IPCC, 2007). Ceci aura des conséquences à l'échelle planétaire, à savoir une augmentation des fréquences d'apparition des phénomènes climatiques extrêmes (inondations, sécheresses), décroissance de la production agricole, hausse régionale importante des températures, migration humaine d'une région à une autre, dégradation de la qualité des eaux douces...(Figure 1)

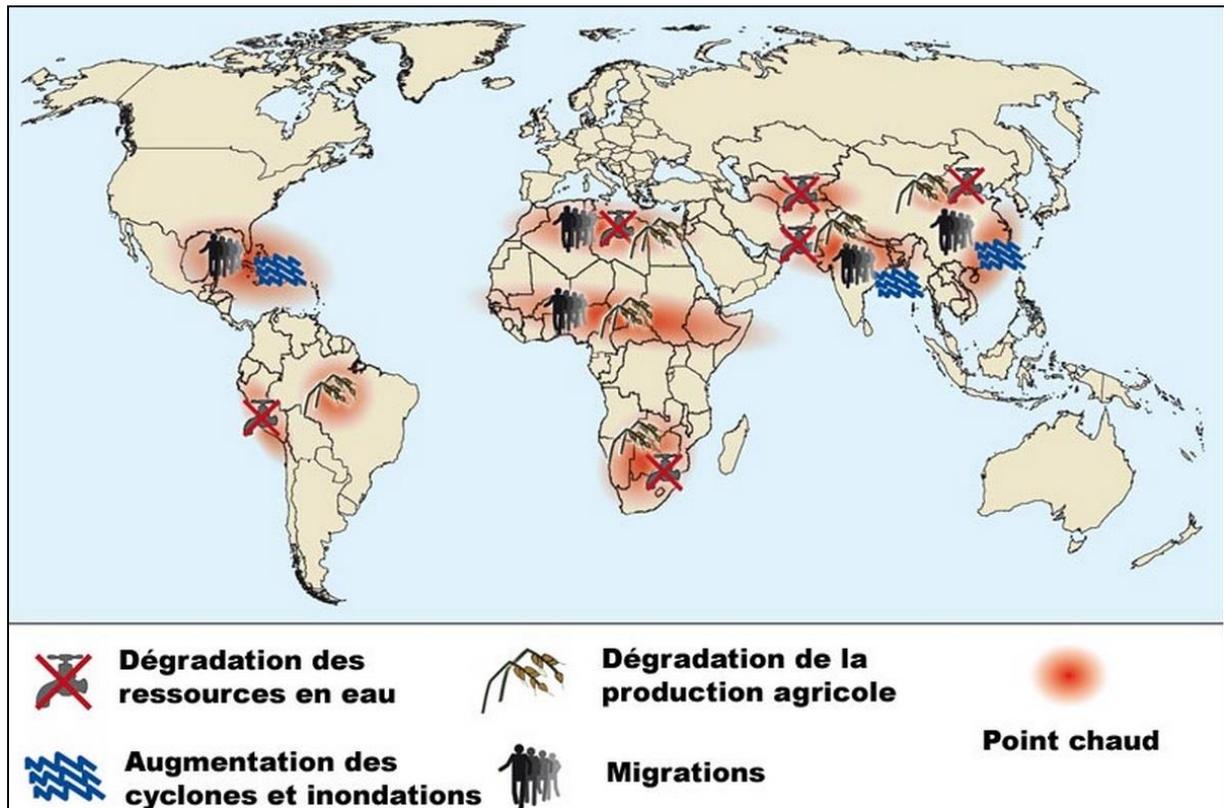


Figure 1. Les conséquences du changement climatique à l'échelle mondiale (“Les Changements Climatiques Vont Exacerber Les Risques de Guerre Dans Le Monde - Notre-Planete.info” 2013)

En outre, le rapport souligne la cause anthropique, maintenant extrêmement probable, de ce réchauffement. Bien que le réchauffement affecte le monde entier, les contrastes régionaux sont présentés avec le réchauffement plus marqué dans l'hémisphère nord et le réchauffement rapide des deux pôles planétaires (Chaouche et al. 2010). On peut donc s'interroger sur les conséquences de ce réchauffement sur le cycle de l'eau global et dans le Nord Algérie septentrionale en particulier. En effet, cette région est probablement très sensible aux changements climatiques. Elle se situe géographiquement dans une zone de transition entre le régime climatique africain, très chaud et sec au Sud, et le climat européen tempéré et humide dans le Nord, avec donc de grandes variations climatiques. Elle est caractérisée par des pluies d'hiver, des sécheresses estivales et des orages marqués au début d'automne et à la fin du printemps. La forte différence entre l'hiver humide et l'été sec est causée par l'alternance saisonnière de la domination des tempêtes cycloniques en hiver et des cellules subtropicales

haute pression sur l'océan adjacent, causant des conditions sèches en été. Il est prévu une augmentation de la variabilité climatique saisonnière, avec : (i) les étés plus chauds et plus secs dans les régions semi-arides, et (ii) une augmentation de la durée et la sévérité des périodes de faible débit ou d'étiage et une diminution de la recharge naturelle des eaux souterraines. Ces changements climatiques devraient s'accompagner non seulement par un changement dans les valeurs moyennes des variables du cycle de l'eau, mais aussi par un accroissement de leur variabilité dans le temps. Les événements extrêmes devraient se produire plus fréquemment et avec une plus grande intensité (Jentsch, Kreyling, and Beierkuhnlein 2007).

Les processus hydrologiques dans les bassins sont influencés par le climat, les caractéristiques physiques du bassin (tels que la topographie, le sol et la végétation), les activités humaines ainsi que le climat (Zhang et al. 2011).

Le réchauffement climatique a intensifié le cycle hydrologique mondial au cours des dernières années. En Russie, l'analyse des données hydrométéorologiques de 146 stations hydrométriques démontre des tendances significatives du changement de régime de la glace au cours des dernières décennies (Frolova and Alekseevskiy 2013). Il a été trouvé qu'en automne, les espaces occupés par la glace se réduisent laissant la place aux socles de glaces flottantes et plus longues, des embâcles plus fréquents, et des périodes d'englacement plus courtes. Un peu plus à l'Ouest, au niveau des bassins versant situés entre l'Allemagne et la Tchécoslovaquie, il a été observé que l'écoulement au niveau des cours d'eau aurait eu une tendance à la baisse évalué à 10%.

Le travail de Destouni, (2012) avait pour objectif l'analyse du comportement hydro-climatique de neuf grands bassins hydrographiques suédois et de synthétiser et puis comparer ces résultats avec d'autres organisations régionales et mondiales : l'évaluation des changements hydrologiques sont dus à l'irrigation et la déforestation. Cette comparaison interrégionale a montré une hausse de l'évapotranspiration pour l'agriculture non irriguée et celle de la production hydroélectrique pour l'agriculture irriguée. Ceci souligne la nécessité de tenir compte des différentes utilisations humaines de l'eau au sein des modèles climatiques et hydrologiques globaux.

En Chine l'analyse des écoulements annuels dans le bassin du fleuve Hun-Tai, des met en évidence des ruptures dans les séries des variables hydroclimatiques autour des années 1978 et 1998. Juste après le point de changement brusque, les débits annuels, à leur tour, ont diminué. Il a été conclu que dans cette région, la variabilité climatique explique plus de 43% de la

variabilité des écoulements, qui peut principalement être attribuée à la diminution des précipitations et à l'augmentation de l'ETP. Les activités humaines sont jugés responsables d'environ 57% de la variabilité de l'écoulement annuel.

Dans le Sud-Ouest de la France, une tendance à la baisse de l'ETP en février est estimée à une moyenne de 0,2 mm par an dans la zone étudiée (Chaouche et al. 2010).

Törnros (Törnros, 2010) a appliqué le test de tendance de Mann -Kendall sur 37 séries de stations pluviométriques jordaniennes et palestiniennes homogènes sur la période 1961-1990 dont aucune tendance n'a pu être observée sur les précipitations moyennes annuelles, par contre, une tendance significative à la baisse était remarquée sur les mêmes stations avec des séries de données plus longues (1950 à 1997).

Quant à l'Afrique occidentale, au cours des 50 dernières années, elle a été soumise à des importantes variations de précipitations, caractérisées à la fois par des périodes de sécheresse de longue durée, e.g de 1970 à 1990. De nombreuses études ont décrit cette variabilité et son facteur déterminant (Hubert, Carbonnel, and Chaouche 1989; Hulme et al. 2001; Le Lay and Galle 2005; Bzioui 2005; Fontaine, Janicot, and Monerie 2013). Les impacts hydrologiques de ces fluctuations climatiques ne sont pas aussi bien compris, car ils nécessitent des études à plus petite échelle spatiale (Le Lay and Galle 2005).

Pour le Maghreb, les ressources hydriques sont sensibles à la variabilité climatique. Les prospectives fondées sur le changement climatique font ainsi peser des risques importants sur les systèmes hydrauliques. Le modèle MAGICC (Hulme et al. 2001), centré sur cette région, estime en effet un réchauffement de l'ordre de 1°C entre 2000 et 2020 et une perturbation des régimes pluviométriques avec une tendance à la baisse, de l'ordre de 5 à 10 %. A plus long terme, la température pourrait augmenter de 3°C d'ici 2050 et dépasser les 5°C en 2100, alors que les précipitations diminueraient de 10 à 30 % d'ici 2050 et de 20 à près de 50 % en 2100 (Arrus and Rousset 2007). D'après ce même auteur, dans cette région, les ressources hydriques sont vulnérables aux variations du climat. L'eau et sa gestion conditionnent l'avenir de cette région, indépendamment de tout changement climatique. La forte sensibilité des bassins hydrologiques à de faibles écarts des variables hydroclimatiques implique que le volume d'eau mobilisable sera fortement touché par la diminution du ruissellement. Au regard des estimations des besoins sectoriels, le changement climatique pourrait ainsi placer ces pays dans des situations inconfortables puisque le volume maximal mobilisable ne satisfera pas leurs besoins en eau, voire déficitaire, particulièrement en Algérie, d'ici 2020.

En Algérie, le climat qui prédominait ces trois dernières décennies a eu une influence négative sur la ressource en eau. Son impact s'est ressenti sur les cours d'eau du bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l'Algérie). Les études des précipitations annuelles faites de septembre à août sur la période 1930-2002 montrent une nette diminution. Sur la période 1976-2002, les lames d'eau écoulées annuelles moyennes sont de 28 à 36 % plus faibles que sur la période 1949-1976 (Mohamed Meddi, Talia, and Martin 2009). (Laborde 1995) a mis en évidence quatre phases pluviométriques successives en étudiant des données de 120 postes pluviométriques du Nord de l'Algérie:

- Une longue phase humide durant laquelle la pluviométrie est supérieure à la moyenne, de 6 %, de 1922 à 1938.
- Une courte phase sèche débutant en 1939 et s'arrêtant en 1946 à l'Ouest et au Centre du pays avec un déficit de l'ordre de 11 %.
- Une phase pluvieuse qui dure jusqu'en 1972.
- Une longue phase sèche qui débute fin 1973.

Une tendance évolutive vers l'aridification du climat sur le nord algérien en général et dans le bassin de la Macta précisément, notée par les résultats des tests statistiques (Khaldi 2005; Laborde 1995), a conduit à un déficit d'écoulement entraînant une diminution des écoulements de surface et des niveaux des nappes souterraines. La comparaison des cartes pluviométriques à travers différentes périodes à savoir : 1913 à 1963, 1922 à 1989 et 1975 à 2000 dévoilent la disparition des isohyètes 400 mm. Les valeurs des coefficients de variations (Cv) des apports interannuels pour la période 1975 à 2000, sont relativement élevées ce qui indique un régime irrégulier. Les débits spécifiques moyens annuels présentent une augmentation générale du Sud vers le Nord sur l'Ouest du pays (0,46 à 0,81 l/s.km²). La période d'étiage pour la plupart des cours d'eau est comprise entre mai et septembre. Sur le plan de l'hydraulicité, ces cours d'eau se caractérisent par un écoulement violent et rapide. Les coefficients de tarissements sont forts (0,63 à 0.7) (Khaldi 2005).

(Laborde 1995) a également élaboré une cartographie de la pluviométrie du nord algérien en collaboration avec l'Agence Nationale des Ressources en Eau (ANRH), d'après ce travail, le changement climatique s'est fait sentir sur le Nord-ouest de l'Algérie particulièrement dans les bassins de la Macta, de la Tafna et du Cheliff, dans le sens où la pluviométrie a fortement diminuée sur cette région.

Dans la littérature peu d'études ont abordé la tendance des principaux paramètres hydroclimatiques (les précipitations, l'évapotranspiration, la température, les écoulements ...etc.) sur le bassin de la Macta qui, à son tour, joue un grand rôle dans le système hydraulique national et dans la gestion des ressources en eau de la région, puisqu'il comprend trois grandes métropoles avec 218 communes, à savoir celles rattachées aux wilayates de Sidi Bel Abbés, Mascara et Saïda avec 1 314 973 d'habitants (en 2004).

Les ressources en eau du bassin versant de l'oued Mina (6 000 km², situé au nord-ouest du pays et affluent de l'oued Cheliff, voir figure 2) sont influencées par une pression anthropique qui ne cesse de croître (changement d'occupation des sols, construction de barrages, prélèvements d'eau souterraine)(Hallouz, Meddi, and Mahe 2013). En effet, il existe une variabilité spatiale et temporelle des pluies et des débits. Ce travail a été effectué sur la base des séries de données de 26 stations pluviométriques durant la période 1930-2007 : une baisse des pluies annuelles de 19 à 20 % sur ce bassin au cours de l'année 1976 et une rupture ont pu être décelées, à partir de 1970 et jusqu'à 1980, dans les séries de débits mensuels et annuels de quelque stations hydrométriques. Cette baisse est plus significative en hiver sur l'ensemble des bassins. À cette échelle, les pluies diminuent effectivement de manière importante et abrupte depuis 1960.

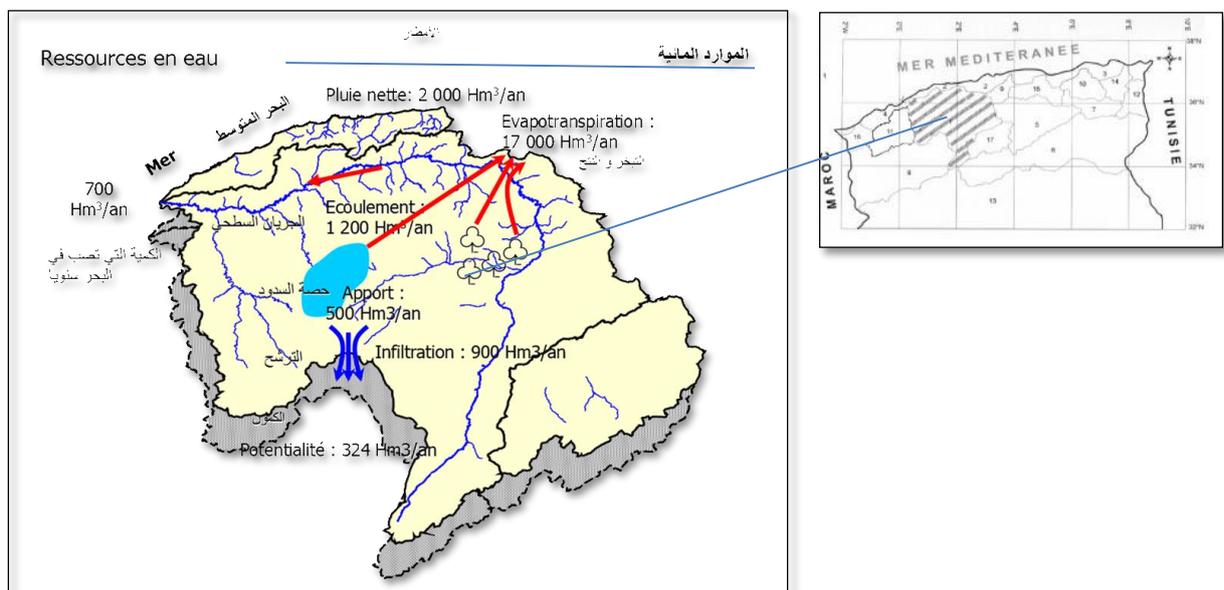


Figure 2. Bassin de Chélif-Zahrez (Source Agence Nationale des bassins hydrographiques ABH)

La baisse de la ressource a affecté même les nappes. Ainsi dans le bassin hydrographique Chélif- Zahrez, suite à la sécheresse qui a touché toute l'Algérie du Nord (M. Meddi et al. 2009), les agriculteurs de la région ont eu recours à la mobilisation intense des ressources en eau souterraine par le biais de forage. L'étude faite sur l'hydrogéologie de cette zone a permis l'identification des tendances des variations climatiques et la mise en évidence des impacts des changements climatiques sur la recharge des nappes.

D'après (M. Meddi et al. 2009; Mohamed and Talia 2013) dès la fin des années 1970, l'Ouest algérien a connu une sécheresse caractérisée par une sévérité, une ampleur et une persistance remarquables du déficit pluviométrique. Entre les années 1930 et 1950, il y a eu une tendance à la hausse de la pluviométrie et une tendance à la baisse au début des années 1940 et au milieu des années 1970. La diminution de la pluviométrie dépasse 36 % dans la région de Mascara et à l'extrême Ouest du pays. A la suite de ces travaux ces auteurs déduisent que pour avoir deux années sèches successives à l'Ouest, la probabilité est plus importante.

Une analyse de la variabilité temporelle des précipitations annuelles enregistrées au niveau de cinq stations des bassins de la Macta (14380 km²) et de la Tafna (7949 km²) situés dans le Nord-Ouest de l'Algérie été menée en utilisant les indices climatiques sur la période 1950-2004. Des tests de régression linéaire et le test de Pettitt ont révélé une baisse significative des précipitations annuelles dans le milieu des années 1970 dans les deux bassins. En outre, une diminution d'au moins 20% du total annuel des précipitations est également observée dans les cinq stations. Quant à la relation entre les indices climatiques et la variabilité des précipitations annuelles, l'analyse de corrélation canonique a montré que, de 1950 à 2004, les précipitations au cours des cinq stations sont corrélées négativement avec El Niño/Southern Oscillation (ENSO) et dans une moindre mesure, avec le North Atlantic Oscillation (NAO)(M. M. Meddi, Assani, and Meddi 2010).

Dans la partie occidentale de l'Algérie, les précipitations enregistrées depuis 1930 montrent de nombreuses années déficitaires durant la décennie 1940, puis sur l'ensemble des décennies 80 et 90. Sur la période 1930-2002, les précipitations annuelles présentent une baisse de l'ordre de 40 %. Par exemple à Sidi Bel Abbès les précipitations annuelles moyennes ont été de 259 mm/an seulement de septembre 2002 à août 2007, contre 292 mm/an de septembre 1980 à août 2002. L'accroissement des températures qui entraîne l'accroissement de l'ETP participe à la baisse des écoulements. Sur la période septembre 1976 - août 2002, les lames d'eau écoulées annuelles des bassins versants de l'oued El Hammam à Trois Rivières et de l'oued Mekerra à

Sidi Ali Ben Youb et à Sidi Bel Abbès ont diminué de 28 à 36 % en moyenne par rapport à la période 1949-76. Dans le même temps, les précipitations ont diminuées de 26 à 28 % entre 1949-76 et 1976-02, les débits annuels moyens sont passés de 4,58 à 2,93 m³/s à Trois Rivières, de 0,27 à 0,19 m³/s à Sidi Ali Ben Youb et de 1,14 à 0,81 m³/s à Sidi Bel Abbès (Mohamed Meddi, Talia, and Martin 2009).

Diverses études ont été menées (Servat et al. 2010; Mohamed Meddi, Boucefiane, and Belabbes 2013) dans le but de vérifier l'évolution historique des paramètres climatiques et des ressources en eau dans le bassin du Chéllif, situé dans le Nord de l'Algérie. Afin d'évaluer l'impact du climat futur sur l'évolution des débits saisonniers aux horizons 2020 et 2050, cette recherche s'est basée sur l'analyse des débits moyens de la période de référence (1961–1990). Les résultats obtenus ont montré une baisse des débits moyens mensuels bien marquée par rapport à la période de référence. A l'horizon 2020, les scénarios indiquent une baisse de 28.2% enregistrée en hiver suivi par l'automne (16%) ; à l'horizon 2050, la baisse des débits sera de l'ordre de 40.2% et de 18% respectivement en hiver et au printemps. Quant au Bas-Chéllif et le bassin de la Mina, la diminution des débits pourrait être de l'ordre de 13.5% et de 17.6% pour la saison d'automne et de printemps.

L'analyse de la température de la station d'Oran entre 1926 et 2006, basée sur des données journalières, montre une augmentation de plus de 2°C de la température (Tabet-Aoul 2008) suivie d'une évolution des précipitations durant la même période avec une signature d'une baisse de l'ordre de 15%, une occurrence accrue des sécheresses d'une année sur trois était constaté dès 1973. Compte tenu des changements climatiques (inédits au cours de l'histoire récente), les ressources en eau vont être plus rares, impactant fortement l'économie des pays du Maghreb . Parmi ces impacts il a été déduit (Tabet-Aoul 2008):

- La baisse de la mobilisation des eaux de surface due à une baisse des écoulements superficiels et à une fréquence de plus en plus grande des périodes de sécheresse ;
- La dégradation accélérée des sols par l'accroissement des érosions hydrique et éolienne, et leur salinisation liée à une plus forte évapotranspiration, due à l'augmentation des températures ;
- L'occurrence et l'intensité de plus en plus grande des crues fortes et des inondations ;
- La surexploitation des nappes d'eau souterraines à cause de la pression anthropique ;

- L'accentuation de la vulnérabilité des cultures pluviales provoquée par une augmentation de l'évapotranspiration et une disponibilité plus faible des eaux de précipitations ;
- Le raccourcissement du cycle végétal et la variabilité intra et inter saisonnière, en plus de l'occurrence de vagues de chaleur en toute saison perturbant et menaçant la croissance normale des cultures ;
- L'augmentation de l'occurrence des risques de maladies et de parasites menaçant aussi bien le végétal, l'animal et l'homme.

La détection des tendances dans les séries des variables hydro-climatiques a inspiré beaucoup de chercheurs qui se sont intéressés à la question sur les causes de ces tendances et sur les dates des ruptures dans la dimension espace-temps (Arnell 2003; Le Lay and Galle 2005). Pour cela beaucoup de méthodes existent se basant toutes sur l'analyse statistique.

Malgré le nombre important de méthodes utilisées pour l'analyse des tendances, aucune n'a été désignée comme standard. Néanmoins, le test de Mann-Kendall est un test largement utilisé en sciences de l'environnement, et plus particulièrement en hydro-météorologie pour sa simplicité et sa robustesse (Adamowski, Adamowski, and Bougadis 2010). Cependant, le test de Mann-Kendall fait l'hypothèse que la variable étudiée est indépendante, ce qui n'est pas toujours vérifié en hydrologie (Khaliq et al. 2009; Khaliq, Ouarda, and Gachon 2009) .

Le test séquentiel de Mann-Kendall permet de détecter les tendances, même si elles ne sont pas monotones, en donnant en plus l'information sur la date de commencement de la tendance. En hydrologie et en météorologie, de nombreuses études se sont basées sur ce test statistique (Zhang et al. 2011; Partal and Kahya 2006). Un des avantages de ce test est qu'il résiste à l'influence des valeurs extrêmes et aux variables asymétriques, aussi la normalité de la distribution n'est pas nécessaire (Partal and Kahya 2006).

Néanmoins, la détection et l'estimation des tendances en présence de bruits et de différentes périodicités est importante en hydrologie et en climatologie. Aussi, différentes échelles de variabilités peuvent présenter différentes tendances qui, noyées dans le bruit, ne peuvent être détectées à l'aide de tests statistiques.

Lors de notre étude de la stationnarité des variables hydroclimatiques, nous avons choisi d'utiliser une méthode statistique utilisée pour la détection des tendances dans les séries ainsi que les ruptures de stationnarité. Nous avons ainsi appliqué dans un premier temps le test de

Pettitt, le test séquentiel de Mann-Kendall et le test classique de Mann-Kendal (Pettitt 1979; Kendall 1948; Hamed and Ramachandra Rao 1998; Yue, Pilon, and Cavadias 2002; Yue and Pilon 2004).

CHAPITRE II :

THEORIE DE LA MODELISATION : UN OUTIL DE LA REPONSE DU COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE

2.1. Introduction.

Au cours de ces dernières décennies grâce aux développements de l'informatique (soft et hard), les modèles mathématiques de l'hydrologie des bassins versants ont été largement utilisés pour une variété d'applications, y compris la prévision hydrologique, la conception d'ouvrages hydrauliques et la gestion des ressources en eau. Ces modèles sont basés sur des descriptions mathématiques générales des processus des bassins versants qui transforment le forçage naturel (par exemple, les précipitations) en réponse (par exemple, les eaux de ruissellement dans les cours d'eau). L'utilisateur d'un modèle hydrologique de bassins versants doit préciser les paramètres du modèle afin que le modèle soit capable de simuler correctement le comportement des bassins versants (Duan et al. 2003).

La conception d'un schéma synoptique dans le but de simuler le comportement hydrologique d'un bassin versant, en réponse aux événements climatiques (les précipitations, l'évapotranspiration ...etc.), est loin d'être simple. En effet, les différentes évolutions qui interviennent dans le fonctionnement du système physique est compliqué. Mais il est toujours possible d'approcher la réalité autour d'hypothèses simplificatrice qui permettent d'étudier plus finement le système. Le comportement hydrologique des bassins versants à fait l'objet de nombreuses et diverses études et recherches. L'objectif de ces recherches est le développement d'outils d'aide à la décision pour les administrations compétentes dans domaine (décideurs gestionnaires de l'eau), en particulier dans le domaine de la gestion des ressources en eau. Les modèles hydrologiques sont parmi les outils qui tentent de répondre aux questions qui se posent quant au comportement hydrologique. Certains modèles ont fait preuve d'une robustesse dans les domaines de la prévision de crues jusqu'à l'évaluation des ressources en eaux.

Vu que le comportement hydrologique est fonction de beaucoup de variables, le choix du modèle sera difficile car chaque type de modèle est conçu dans des conditions précises. En outre, d'autres facteurs s'avèrent importants, à savoir le type de données, leurs disponibilités et l'expérience du scientifique modélisateur.

2.2. Modélisation hydrologique

1. Définitions générales

L'utilisation d'un modèle hydrologique nécessite une connaissance de l'ensemble d'éléments qui le constituent. Un modèle est une représentation simplifiée, relativement

abstraite d'un processus ou d'un système en vue de le décrire, de l'expliquer ou de le prévoir (Boudhraa 2007). Cette représentation se fait grâce à un ensemble d'équations mathématiques. On distingue quatre types de variables qui peuvent exister en totalité ou en partie dans chaque modèle (Figure 2.1):

- **Variables d'entrées** : Le modèle fait appel à ces variables qui dépendent du temps et/ou de l'espace (pluie, ETP, ...).
- **Variables de sorties** : le modèle répond par un ensemble de variables (débits, flux ou concentration en polluants, ...).
- **Variables d'état** : Elles permettant de caractériser l'état du système modélisé et peuvent évoluer en fonction du temps (niveau de remplissage des réservoirs d'eau d'un bassin versant, taux de saturation des sols, ...).
- **Paramètres de calage** : En plus des variables, la modélisation fait intervenir des variables dont la valeur doit être déterminée par calage (conductivité hydraulique à saturation, ...)

La modélisation hydrologique fait intervenir des variables à travers deux fonctions : une fonction de production et une fonction de transfert (routage)

- *La fonction de production* a pour rôle de répartir les précipitations entre l'infiltration, le ruissellement, l'évapotranspiration et le stockage dans le sol (Girard and Villeneuve 1981).
- *La fonction de transfert (routage)* : a pour objet d'acheminer par isochronisme l'eau superficielle en distinguant un domaine de ruissellement pur (sur les versants) et un domaine d'écoulement (concentré) en rivière ; la fonction de transfert surface-souterrain calcule les échanges réciproques entre le réseau hydrographique et les aquifères (Girard and Villeneuve 1981).

L'ensemble est articulé dans des programmes informatiques écrits en plusieurs langages (soft).

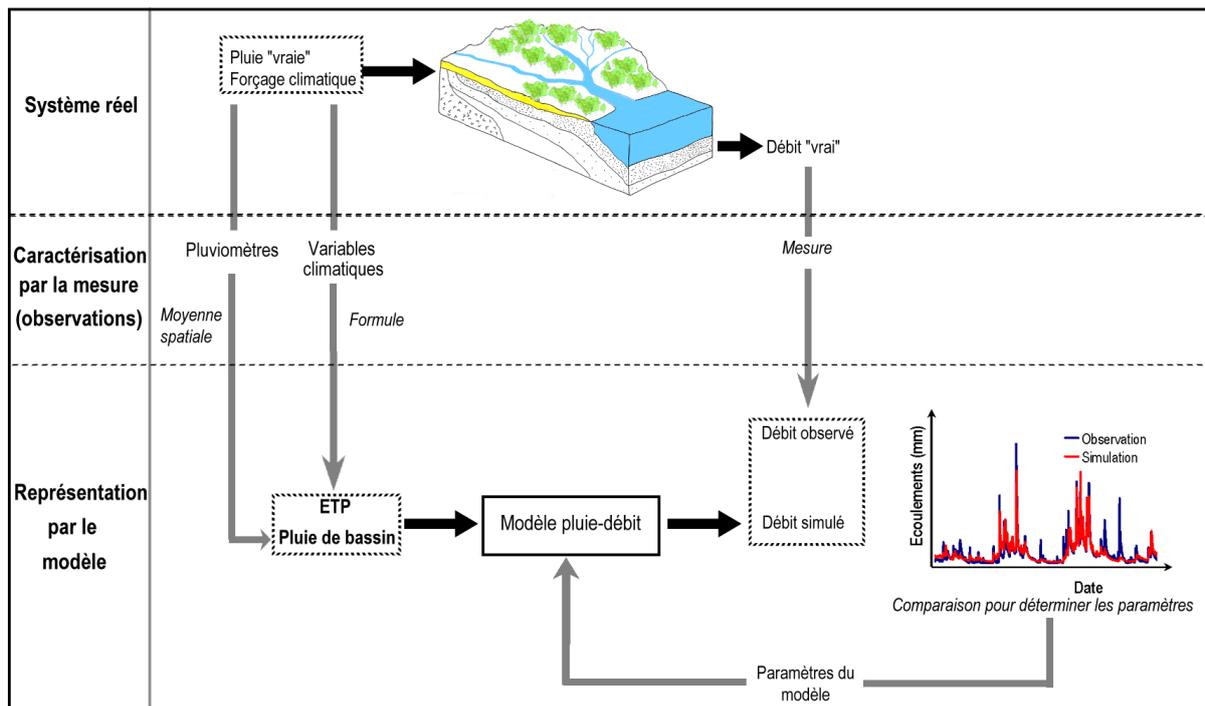


Figure 2.1. Schématisation d'un modèle global pluie-débit (Oudin 2004)

2. Que peut-on attendre d'un modèle appliqué à l'hydrologie ?

D'après (Girard and Villeneuve 1981) un modèle, quel que soit son domaine d'utilisation, apporte son concours à trois niveaux qui interviennent successivement au cours du déroulement d'une étude. Tout d'abord, il synthétise des informations quantitatives et même qualitatives sur l'ensemble du bassin. Cette synthèse peut assurer la cohérence des données et la critique des variables numériques. En cela, c'est un outil d'inventaire qui permet de faire des pré-interprétations. Parmi-elles, celles que l'homme de terrain peut expliquer à travers des mécanismes physiques observés et présents sur le bassin, pour enfin juger de la compatibilité des réponses.

Ce même auteur raconte une expérience anecdotique à ce sujet. S'agissant de l'étude d'un aquifère dolomitique du Jurassique supérieur dans le Midi de la France, le modèle mathématique d'écoulement, construit à cette occasion, se trouvait dans l'incapacité de rendre compte du débit d'étiage d'une source importante utilisée pour l'alimentation en eau d'une ville voisine. Après de nombreux essais destinés à tester différentes hypothèses de fonctionnement, **et** restés infructueux, il apparut à la suite d'une visite sur le terrain que le débit de la source était

artificiellement soutenu à partir d'une prise d'eau en rivière. Cette aventure apporte une certaine confiance quant à la représentativité globale du modèle.

Dans un autre ordre d'idée, le modèle procure souvent une certaine confirmation quantitative d'une information qualitative. Ainsi, à titre d'exemple, au cours d'une étude réalisée sur les nappes du Continental Terminal du Sahara septentrional dans la vallée de l'oued R'hir (Ballais 2010), fort peu de renseignements précis étaient disponibles sur la transmissivité des aquifères. Les données étaient en effet concentrées sur les zones de production ignorant, en particulier, totalement la région du Grand Erg au Sud, qui devait cependant constituer l'essentiel de la réserve d'eau. Seuls quelques forages ayant traversé la formation avaient permis de constater une augmentation de la granulométrie des matériaux détritiques. Au cours du calage du modèle, il est apparu nécessaire d'augmenter la transmissivité dans cette région, ce qui fut fait avec d'autant plus de confiance que cela confirmait une observation qualitative.

Concernant l'hydrologie de surface, le modèle constitue le meilleur moyen de comparer les mesures de débit sur un bassin avec les mesures des précipitations ainsi que l'ETP. Il met en évidence d'éventuelles anomalies. En second lieu et à un stade un peu plus avancé, le modèle permet de connaître la sensibilité des mécanismes physiques influençant le comportement hydrologique du bassin, par conséquent faire un choix de ceux où l'importance est dominante, par exemple dans les modèles GR (Génie Rural) les principales variables sont la pluie, l'ETP et le débit observé, mais le modèle peut prendre compte d'autres variables telles que le débit exploité par les forages, couverture végétale, occupation des sols...etc. En troisième lieu, le modèle permet, lorsque cela est possible, de faire une simulation théorique du processus hydrologique. Dans cette étape le chercheur devra être capable de procéder à un calage du modèle sur un historique observé suffisamment long, tels que les débits aux exutoires, les pluies et l'ETP pondérés et répartis spatialement et temporellement.

En résumé le modèle hydrologique peut répondre aux problématiques liées aux comportements hydrologiques des bassins versant à travers (Perrin 2002) :

- La simulation de débits, afin de combler des lacunes dans des séries de données, la reconstitution de débits historiques (les données de pluie étant souvent disponibles sur des périodes beaucoup plus longues que les débits) ou pour permettre des traitements statistiques;

- La prédétermination des débits de crue ou d'étiage: on désire savoir avec quelle fréquence de débits de crue (supérieurs à un seuil de risque par exemple) ou des faibles débits d'étiage (en delà d'un débit réservé par exemple) risquent de se produire, et sur quelle durée. On se place ici dans une démarche d'analyse fréquentielle. Cette connaissance peut permettre le dimensionnement d'ouvrages et de réservoirs ou d'aménagements dans le lit (mineur à majeur) du cours d'eau;
- La prévision des crues et des étiages: il s'agit d'évaluer par avance (avec un délai de quelques heures à quelques jours), 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 (par des barrages-réservoirs par exemple) pour assurer l'approvisionnement en eau ou la préservation de la vie halieutique. On s'inscrit ici dans une démarche d'analyse en continu du bassin;
- L'influence d'aménagements sur l'hydrologie: on désire pouvoir prédire les changements de la réponse du bassin suite à des aménagements ou à des changements environnementaux pouvant modifier les caractéristiques du bassin.

3. Etapes d'élaboration d'un modèle

L'élaboration d'un modèle hydrologique comporte certaines étapes à savoir : (i) l'identification du modèle, (ii) l'élaboration de l'algorithme répondant aux questions scientifiques, (iii) calibrer – valider et optimiser (De Marsily 1986) :

4. Classification des modèles

Si la modélisation pluie-débit représente un étroit domaine de l'hydrologie, elle n'en est pas moins féconde en terme de production de modèles (Perrin 2002). Depuis les années 60, l'évolution des moyens de calculs informatiques a certainement été l'un des facteurs majeurs ayant favorisé l'essor de ce secteur de recherche, avec la création de dizaines de modèles.

A ce jour, dans la littérature on trouve plusieurs modèles proposés. Ce foisonnement tient d'une part de la diversité des approches possibles, qui font appel à des concepts et des points de vue différents sur la manière de représenter la réponse d'un bassin versant à des événements de

pluie. Il tient certainement, d'autre part, d'un certain degré d'ignorance sur la meilleure façon de modéliser la relation pluie-débit. Devant la complexité et la diversité des systèmes observés, il est probable cependant que la solution miracle n'existe pas. Beaucoup de classifications des modèles ont été proposées et il y a presque autant de classifications que d'hydrologues ! La difficulté de trouver une classification unifiée provient du fait que la grande diversité des approches entraîne une non moins grande diversité des caractéristiques des modèles. Il est alors presque impossible de distinguer des catégories de modèles nettement distinctes, et ce d'autant plus que la terminologie employée est encore fluctuante. Ambroise (Ambroise 1999) a proposé quelques clés de différenciation des modèles (tableau 2.1):

- ✚ modèles déterministes ou stochastiques, suivant la nature des variables, des paramètres et/ou des relations entre eux ;
- ✚ modèles empiriques, conceptuels ou théoriques ("*physical-based models*" fondés sur la physique), suivant les relations utilisées pour modéliser la transformation de la pluie en débit et suivant une conceptualisation du fonctionnement du système mais faisant intervenir des relations empiriques;
- ✚ modèles globaux ("*lumped models*"), semi-distribués ou spatialisés, suivant que le bassin versant est considéré dans l'espace comme une entité homogène, qu'il est divisé en sous-unités supposées homogènes (éventuellement des sous-bassins) ou qu'il est finement discrétisé en mailles ;
- ✚ modèles cinématiques (descriptifs) ou dynamiques (explicatifs), suivant que l'évolution temporelle du système est simplement décrite ou mise en relation avec les forces qui en sont la cause ;

Tableau 2.1: Exemple de caractéristiques des modèles pluie-débit (Oudin 2004)

Caractéristique	Type de modèle
Pas d'espace	Modèle global
	Modèle semi-distribué
	Modèle distribué
Pas de temps de fonctionnement	Pas de temps horaire
	Pas de temps journalier
	Pas de temps mensuel
	Pas de temps annuel
	Pas de temps pluriannuel
Fondement théorique et approche de développement	Modèle conceptuel
	Modèle empirique (à réservoir)
	Modèle théorique fondé sur la physique

Une autre classification utilise le critère de ‘**boîte**’. On parle de modèle de ‘**boîte noire**’ (De Marsily, De Marsily, and De Marsily 1986; Ambroise 1999; Perrin 2002), lorsque l’entrée et la sortie du système sont connus alors que ses caractéristiques sont complètement ignorées. Le cas contraire définit les modèles de ‘**boîte blanche**’. Entre ces deux types de modèles, on retrouve la plupart des systèmes physiques, et on parle de ‘**boîte grise**’.

5. Critères d’évaluation de la modélisation

L’évaluation ou la mesure des **performances** d’un modèle se fait selon les objectifs qu’on se fixe, et par conséquent, le critère qu’on choisit. Un même modèle peut être évalué de plusieurs façons, l’unique contrainte étant l’objectif du jugement.

Pour satisfaire les différents objectifs, plusieurs critères d’évaluation ont été développés, qui sont soit des critères **graphiques**, soit des critères **analytiques**. Les plus utilisés en hydrologie sont :

a Erreur moyenne absolue

Elle représente la moyenne des **écarts** entre les débits observés $Q_{obs,i}$ et les débits calculés $Q_{calc,i}$ (Réméniéras 1965) :

$$Err = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_{obs,i} - Q_{calc,i}| \quad Eq 1$$

Plus elle tend vers zéro, plus l’estimation des débits est considérée meilleure.

b Erreur quadratique moyenne

$$MRSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{calc,i})^2} \quad Eq 2$$

Plus cette erreur quadratique tend vers zéro, plus l’estimation est meilleure. C’est le critère le plus utilisé en hydrologie pour quantifier l’erreur.

c Critère de Nash-Sutcliffe

$$Na(Q) = 100. \left\{ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{calc,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \right\} \quad Eq 3$$

Ce critère (que nous appellerons critère de Nash-Sutcliffe ou critère de Nash), variant dans l'intervalle $[-\infty; 100]$, a l'avantage d'être d'interprétation facile. Il estime l'amélioration d'ajustement que l'on obtient en utilisant le modèle pour simuler les débits par rapport à un modèle 'zéro' (modèle de référence) qui donnerait sur toute la période considérée un débit constant égal au débit moyen. Un critère de valeur 100 signifie que l'erreur du modèle est nulle (modèle parfait). Une valeur de $Na(Q)$ inférieure à zéro signifie que le modèle n'explique pas mieux le comportement du bassin que le modèle de débit constant. Ce critère d'évaluation des modèles est très largement utilisé en hydrologie, probablement en raison de sa simplicité et de son lien intrinsèque avec la régression linéaire (Nash and Sutcliffe 1970; Oudin 2004).

Le critère de Nash peut également s'appliquer sur les racines carrées des débits et sur les logarithmes des débits. L'utilisation combinée de ces trois critères permet de mettre l'accent sur plusieurs situations hydrologiques : le critère de Nash sur les débits est plus sensible aux périodes de crue, le critère de Nash sur les logarithmes des débits est plus sensible aux périodes d'étiage. Nous porterons une attention particulière aux valeurs des critères de Nash sur les racines carrées des débits, qui donnent une estimation de la performance du modèle sans privilégier les épisodes de crue ou d'étiage. Les critères de Nash sur les racines carrées des débits et sur les logarithmes des débits s'écrivent respectivement :

$$Na(\sqrt{Q}) = 100. \left\{ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{Q_{calc,i}})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{\bar{Q}_{obs}})^2} \right\} \quad Eq 4$$

$$Na(\ln(Q)) = 100. \left\{ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_{obs,i} + \varepsilon) - \ln(Q_{calc,i} + \varepsilon))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_{obs,i}) - \ln(\bar{Q}_{obs}))^2} \right\} \quad Eq 5$$

d Critère C2M

Pour avoir une idée globale des performances du modèle sur l'échantillon bassin, toutes les performances obtenues en mode de validation peuvent être moyennées. Cependant, l'un des principaux problèmes associés à ce critère, c'est qu'il n'a pas de limite inférieure et peut varier

entre moins l'infini et 100%. En raison de différents problèmes (insuffisance du modèle, données, calibration ...), très faibles performances (i.e. très négative) peut être obtenu sur certains de ces bassins versants, ce qui peut biaiser la performance moyenne. Un remède à ce problème peut être de transformer le critère de Nash - Sutcliffe en critère borné (Mathevet et al. 2013; Oudin et al. 2006) (par exemple variant entre -100% et +100%) qui permettrait d'éviter de donner trop de poids aux défaillances du modèle et fournir ainsi des moyennes de performance plus importantes. Pour obtenir une borne inférieure égale à 100% le critère de Nash - Sutcliffe, peut être modifié par le critère suivant appelé C2M:

$$C2M = \frac{Nash}{2-Nash} \quad Eq 6$$

e Critère de bilan

Enfin, un dernier critère utilisé est le critère de bilan (Oudin 2004) défini par :

$$CB = 100 \times \left(1 - \left| 1 - \frac{\sum_{i=1}^n Q_{sim,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} \right| \right) \quad Eq 7$$

Il indique, par comparaison des débits moyens observé et calculé, la capacité du modèle à reproduire le volume d'eau total observé sur la période étudiée. A la différence des critères précédents, celui-ci ne fait plus référence à une adéquation temporelle à chaque pas de temps entre le débit calculé et le débit observé (de la même façon que certains critères graphiques tels que la courbe des débits classés éludent cette référence temporelle). Il ne pourrait donc pas être utilisé comme seul critère d'optimisation, un débit constant égal au débit moyen donnant un critère parfait. Une valeur de 100 pour *CB* indiquera un bilan parfait. La formulation utilisée ici permet de faire des moyennes comme pour les critères précédents.

6. Exemples de modèles hydrologiques

Plusieurs modèles pluie-débit existent en littérature parmi eux on peut citer ce qui suit :

- ✓ **Modèle EMILE** (Ensemble Modélisateur Intégré pour le calcul des Lames d'Eau)

C'est un modèle qui a été développé au sein de l'antenne hydrologique de l'**IRD** (Institut de Recherche pour le Développement, ex **ORSTOM**).

✓ **Modèle MODGLO** a été élaboré par Girard en 1971 (Girard et al, 1971) à l'**ORSTOM** (IRD). Il calcule l'**évapotranspiration** par la formule de **Penman** ou de **Thornthwaite**, en identifiant les variables telles que le rayonnement solaire et la durée maximale d'insolation.

✓ **Modèle MERCEDES (Bouvier, 1994)** (Maillage d'Eléments Réguliers Carrés pour l'Etude Des Ecoulements Superficiels) est un modèle conceptuel distribué. Il généralise le principe de l'hydrogramme unitaire à une structure maillée. Le bassin versant est discrétisé en mailles carrées régulières et les pluies sont interpolées par la méthode de Thiessen. Ce modèle a été appliqué en Tunisie centrale sur les bassins versants de Janet et Kamech (Bergaoui, 2001).

✓ **Modèle HBV** : C'est un modèle conceptuel semi-distribué qui permet la prévision des débits d'écoulement. Il assimile les mailles à des sous-bassins versants. Ce modèle a été développé en 1972, à l'Institut Météorologique et Hydrologique Suédois (IMHS). Il a été appliqué sur plus de 45 cours d'eau en Suède et dans plus de 30 pays à travers le monde, tels que la France, l'Italie, les Etats-Unis, Canada ... en Tunisie, (Hassini, 2000).

✓ **Modèle CEQUEAU** (Morin et *al.*, 1995) : c'est un modèle déterministe qui tient compte à la fois des caractéristiques physiques du bassin versant et de leurs variations dans l'espace. Il a été développé au Canada, (Ghorbel, 1983).

✓ **Modèle LISEM (Jetten, 2002)** : (*Limburg Soil Erosion Model*) est un modèle distribué à bases physiques qui peut simuler le ruissellement et l'érosion, pendant et juste après des simples averses, dans des petits bassins versants, dont la superficie varie approximativement entre 10 et 300 ha.

✓ **Modèle ABC** : c'est un modèle physique semi-distribué, qui a été appliqué en Tunisie sur le bassin versant de Fidh Ali (Hermassi, 2003).

✓ **Modèle MODCOU** (Ledoux, 1980 ; In Kingumbi, 2006) : C'est un modèle conceptuel déterministe élaboré au Centre d'Informatique Géologique (CIG) de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

✓ **Autres modèles**

En plus des quelques modèles cités dans les paragraphes précédents, d'autres modèles ont été appliqués en Tunisie et certains ont donné des résultats satisfaisants. Le modèle HYDROMED est un modèle conceptuel global, qui a été mis au point par l'équipe IH de Wallingford en collaboration étroite avec l'équipe INRGREF-IRD (Carbonnel et Cosandey, 2001 ; Ragab *et al*, 2001 a,b,c). Ce modèle a été appliqué avec succès sur trois bassins versants (El Gouazine, Kamech et Es Sénéga). Il est composé de deux modules, dont l'un permet de reconstruire les crues et l'autre de calculer les probabilités de défaillance en fonction du taux de prélèvement et des caractéristiques du bassin versant.

Le modèle KINEROS (Kinematic Runoff and Erosion Model), est un modèle **distribué à bases physiques** (Obiukwu Duru et Allen T. Hjelmfelt, 1994).

Le modèle de **Nash**, appelé encore modèle de l'hydrogramme unitaire instantané (Nash, 1957), est un modèle conceptuel global. Il utilise l'effet de laminage d'une cascade linéaire d'un certain nombre de réservoirs, ayant des coefficients de stockage identiques.

Le modèle LOIEAU est un **modèle conceptuel**, qui a été développé par le centre français de machinisme agricole, du génie rural eaux et forêts (CEMAGREF) (Sammoudi, 1999).

Enfin le modèle **GR** a été mis au point par Edijatno et Michel en 1989 au CEMAGREF (Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural et des Eaux et Forêts).

Dans ce travail on va se concentrer sur ce modèle, il a été appliqués sur certains bassins versants de l'Algérie (Perrin 2000; Perrin, Michel, and Andréassian 2007; Boudhraa 2007; Gherissi 2012; R. Bouanani, Baba-Hamed, and Bouanani 2013).

2.3 Modèle hydrologique GR (Génie Rural).

Ce modèle est conçu pour la simulation du débit à l'exutoire d'un bassin versant à des fins de nombreuses applications d'ingénierie et de gestion de la ressource en eau, telles que le dimensionnement et la gestion d'ouvrages hydrauliques, la prévision des crues ou des étiages, la détection d'impacts, etc. C'est pour répondre à ces questions que l'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA ex Cemagref) a commencé à développer au début des années 1980 des modèles hydrologiques du Génie Rural (GR) permettant de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant

et son débit à l'exutoire (Kabouya 1990; Kabouya and Michel 1991; Perrin 2000; Perrin, Michel, and Andréassian 2007). Au-delà de leur aspect pratique, ces modèles ont soulevé des questions essentielles sur la façon de représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant.

Bien que ces modèles soient parfois apparentés à des modèles conceptuels du fait de leur structure à réservoirs, ce sont en fait des modèles empiriques: leur construction s'est faite sur la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la structure permettant de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant (c'est-à-dire sa réponse aux pluies). Les idées suivantes se sont progressivement imposées au cours du développement de ces modèles pour permettre d'obtenir des modèles fiables et robustes (Mathevet et al. 2013) :

- représentation globale du bassin versant,
- approche empirique de développement sans recours à priori à la physique des écoulements,
- augmentation progressive de la complexité de la structure du modèle en partant de structures simples,
- justification de la complexité de la structure d'un modèle par ses performances,
- recherche de structures de modèle générales (applicables à des bassins variés),
- utilisation de larges échantillons de bassins versants pour tester les performances des modèles (voir par exemple Andréassian et al., 2006),
- évaluation d'un modèle par comparaison à d'autres structures de modèle.

Au niveau des processus : les modèles GR proposent des relations comportementales simples à l'échelle du bassin, mises au point empiriquement et sans liens directs avec la physique des processus à petite échelle et pouvant représenter une moyenne de plusieurs processus.

Au niveau de l'espace : les modèles GR sont globaux, c'est-à-dire que, tout en reconnaissant l'extraordinaire hétérogénéité de tout bassin versant, ils considèrent le bassin versant comme un tout. Les tentatives de distribution progressive n'ont, jusqu'à présent, pas abouti à des résultats intéressants. C'est le comportement de la moyenne spatiale qui est étudié en priorité.

Au niveau du temps : les modèles GR ont été développés pour des pas de temps de fonctionnement spécifiques : annuel et interannuel (GR1A), mensuel (GR2M), journalier (GR4J), et horaire (GR3H) Les différents modèles travaillent donc sur des moyennes temporelles.

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

Au cours de leur développement, les modèles GR ont tous été testés sur de larges échantillons de plusieurs centaines de bassins, particulièrement en France mais également aux Etats-Unis, en Australie, au Brésil, au Mexique, en Algérie ou en Côte d'Ivoire. D'autres équipes de recherche, des bureaux d'études et des services opérationnels ont par la suite utilisé les modèles dans des conditions variées (Perrin, Michel, and Andréassian 2007).

Ces modèles n'ont besoin pour fonctionner que de données continues de pluie et d'évapotranspiration potentielle, cette dernière pouvant être une courbe moyenne interannuelle (Oudin 2004; Oudin et al. 2004; Oudin et al. 2005; Oudin et al. 2006; Oudin 2011).

Les modèles GR ont un faible nombre de paramètres, ce qui permet de limiter les problèmes de surparamétrisation et leur conférer une bonne robustesse (Perrin, Michel, and Andréassian 2007). Les paramètres doivent être déterminés par calage, en minimisant l'erreur du modèle sur une série de débits observés. Lorsque des données de débit ne sont pas disponibles pour le calage, l'estimation des paramètres peut se faire par des formules régionales (liant les valeurs des paramètres à des descripteurs physiques du bassin, par l'utilisation de modèles calés sur des bassins voisins). Cependant, leur utilisation conduit souvent à des erreurs beaucoup plus fortes que lorsque l'on peut réaliser un véritable calage du modèle.

Dans la suite, on désignera par P (mm) la hauteur de pluie, par E (mm) l'évapotranspiration potentielle journalière (ETP) et par Q (mm) le débit simulé (mm). P est une estimation de la pluie de bassin par la méthode de Thiessen calculée à partir de l'information pluviométrique disponible (postes au sol notamment). E n'est pas nécessairement une donnée datée mais peut être issue d'une courbe de régime d'ETP moyenne interannuelle. Toutes les variables internes des modèles sont exprimées en lame d'eau (mm).

1. Description du modèle pluriannuel pluie-débit annuel

Dans la littérature, ils existent plusieurs les modèles pluie-débit au pas de temps pluriannuel. Nous allons les citer, par ordre chronologique de leur publication. La recherche bibliographique était faite sur plusieurs références, parmi elle (Budyko and Miller 1974; Kabouya 1990; Kabouya and Michel 1991; Perrin 2000; Andréassian et al. 2001; L. Zhang, Dawes, and Walker

2001; Arora 2002; Mouelhi 2003; A. Bouanani et al. 2005; Boudhraa et al. 2006; Mouelhi et al. 2006a; Mouelhi et al. 2006b; Boudhraa 2007; Perrin, Michel, and Andréassian 2007; Perrin et al. 2007; Oudin et al. 2008; Oudin et al. 2010; Andréassian et al. 2013)

- **Modèle de Schreiber (1904)**

Schreiber en 1904 a proposé un modèle qui permet de calculer l'évapotranspiration réelle à partir de la pluviométrie et de l'évapotranspiration potentielle (E) au pas de temps interannuel en faisant appel à la fonction exponentielle. Ce modèle s'écrit comme suit :

$$ETR_{k=P_k} \times \left[1 - \exp\left(-\frac{E_k}{P_k}\right) \right] \quad Eq 8$$

En introduisant cette formule dans l'équation du bilan hydrologique de l'eau pour une période suffisamment longue ($Q = P - ETR$), on trouve :

$$Q_{k=P_k} \times \exp\left(-\frac{E_k}{P_k}\right) \quad Eq 9$$

En introduisant le paramètre de Schreiber (Oudin et al. 2008) on aura :

$$Q_{k=P_k} \times \exp\left(-\theta \frac{E}{P_k}\right) \quad Eq 10$$

Avec θ est le paramètre de Schreiber en général et pour une bonne réponse du modèle le paramètre θ tend vers valeur 1.

- **Modèle d' Ol'dekop (1911)**

Le modèle proposé en 1911 par Ol'dekop est un modèle sans paramètres. Il utilise une des fonctions mathématiques usuelles, la fonction «tangente hyperbolique » Il s'écrit sous la **forme suivante :**

$$Q_{k=P_k} - E_k \tanh\left(\frac{E}{P_k}\right) \quad Eq 11$$

L'introduction du paramètre de Schreiber dans cette formule, on obtient ce qui suit :

$$Q_{k=P_k} - E \theta \tanh\left(\frac{E}{P_k}\right) \quad Eq 12$$

- **Modèle de Turc (1954)**

Il avait choisi comme point de départ l'équation du bilan hydrologique (Turc 1953). En effet, si les moyennes sont calculées pour une période suffisamment longue (pas de temps

pluriannuel), la variation de rétention de l'eau dans le bassin est en général négligeable par rapport aux autres termes du bilan. Par suite, la quantité d'eau apportée par les précipitations est égale à celle qui s'est écoulée à l'exutoire du bassin augmentée de celle qui s'est évaporée, ($P = Q + ETR$) Eq 13

L'équation 13 permet alors, lorsque deux termes du bilan sont connus, de calculer le troisième. L. Turc a rassemblé un échantillon de 254 bassins de caractéristiques hydroclimatiques assez variables. Ces bassins pour lesquels les valeurs de P de Q et de la température (t) sont relativement bien connues appartiennent à différentes parties du globe : Europe, Afrique, Amérique, Java. En essayant de relier ces valeurs, Turc a établi la formule

$$\text{suivante : } ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}}$$

$$L(t) = 300 + 25t + 0,05t^3 \quad \text{Eq 14}$$

Avec T : température (°C) ; L : peut être considérée comme une estimation de l'évapotranspiration potentielle. Dans notre cas, l'évapotranspiration potentielle est déjà acquise, et il est inutile de la recalculer en fonction de la température. Nous remplaçons donc L par E. L'équation 14 prend alors la forme suivante :

$$\begin{cases} ETR_k = \frac{P_k}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{P_k}{E_k}\right)^2}} & \text{si } \left(\frac{P}{E}\right)^2 > 0,1 \\ ETR_k = P_k & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{Eq 15}$$

En introduisant l'équation 15 dans l'équation du bilan hydrologique, nous obtiendrons la forme du modèle choisi, soit :

$$\begin{cases} Q_K = \frac{P_k}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{P_k}{E_k}\right)^2}} & \text{si } \left(\frac{P}{E}\right)^2 > 0,1 \\ Q_K = 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{Eq 16}$$

Il y a une autre version du modèle de Turc. Elle consiste à remplacer la constante 0,9 par 1. Cette forme nous paraît relativement plus simple et elle été plus efficace sur notre échantillon

$$\begin{cases} Q_K = \frac{P_k}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{P_k}{E_k}\right)^2}} \end{cases} \quad \text{Eq 17}$$

En introduisant le paramètre de Schreiber dans le modèle on obtiendra la formule suivante:

$$\left\{ Q_K = \frac{P_k}{\sqrt{0,9 + \left(\theta \frac{P_k}{E}\right)^2}} \right. \quad \text{Eq 18}$$

- **Modèle de Tixeront (1963)**

Son idée est l'existence d'une certaine corrélation entre la pluviosité moyenne annuelle et le ruissellement moyen annuel, Il estime que ces corrélations existent quand on a affaire à des bassins aux sols normalement constitués, ni trop perméables (terrains karstiques ou dunaires), ni trop squelettiques (zones trop arides en particulier). Par suite, il a cherché en Tunisie une relation simple permettant, pour des bassins '*normaux*', d'estimer l'écoulement annuel moyen à partir des données pluviométriques et de l'évapotranspiration potentielle. Cette relation se traduit sous la forme suivante :

$$Q_k = (P_k^\theta + E_k^\theta)^{1/\theta} \quad \text{Eq 19}$$

Le paramètre θ , a été trouvé égal à 3 en Afrique du Nord et dans certains pays méditerranéens du Proche Orient. Il a été trouvé compris entre 4 et 5 dans un bassin du Tanganyka, sous régime de saison pluvieuse chaude.

- **Modèle de Budyko (1974)**

Cette formulation est basée principalement sur l'influence des conditions climatiques, en supposant le seul effet de la végétation sur l'évapotranspiration à travers l'influence de l'albédo de surface sur le rayonnement net.

Les limites sèches et humides sont représentées respectivement par BC et AB dans la figure 2.2, Budyko a utilisé le rayonnement net (Rn) et sa substitution pour l'évapotranspiration potentielle,

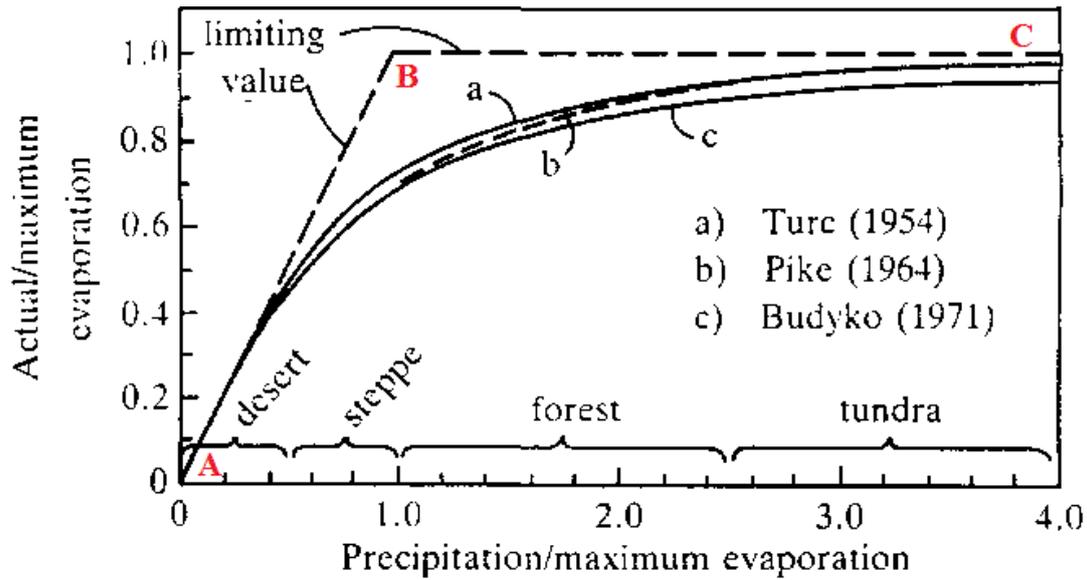


Figure 2.2. Indice climatique en fonction de l'indice d'aridité

Il a mis en évidence la formule suivante :

$$Q_k = P_k - \left\{ E_k \left[1 - e^{(-E_k/P_k)} \right] \tanh \left[\left(E_k/P_k \right)^{-1} \right] \right\}^\alpha \quad Eq\ 20$$

Avec $\alpha \approx 0.5$

Après l'introduction du paramètre de Schreiber au modèle, la formule peut s'écrire comme suit :

$$Q_k = P_k - \left\{ E_k \left[1 - e^{(\theta(-E_k/P_k))} \right] \tanh \left[\left(E_k/P_k \right)^{-1} \right] \right\}^\alpha \quad Eq\ 21$$

Enfin, il existe d'autres modèles pour la relation débit pluies au pas de temps pluriannuel (tableau 2.2), à savoir le modèle du *Soil Conservation Service SCS* élaboré aux états unis (Zhang, 2001).

Tableau 2.2 : Tableau récapitulatif et analyse adimensionnelle des modèles(Mouelhi 2003)

Modèles		Analyse adimensionnelle		
		Ecriture Adimensionnelle	Comportement à l'infini ¹	Comportement au voisinage de zéro
Schreiber	$Q = P \exp\left(\frac{-E}{P}\right)$	$y = \exp\left(-\frac{1}{x}\right)$	$y \approx 1 - \frac{1}{x} + \frac{1}{2x^2} - \frac{1}{6x^3} \dots$ <small>V.Schreiber</small>	$y = \exp\left(-\frac{1}{x}\right)$
Ol'dekop	$Q = P - E \tanh\left(\frac{P}{E}\right)$	$y = 1 - \frac{1}{x} \tanh(x)$	$y \approx 1 - \frac{1}{x} + \frac{2}{xe^{2x}} - \frac{2}{xe^{4x}} \dots$ <small>V.Ol'dekop</small>	$y \approx \frac{x^2}{3}$
Turc	$Q = P - \frac{P}{\sqrt{1 + \left(\frac{P}{E}\right)^2}}$	$y = 1 - \frac{1}{\sqrt{1+x^2}}$	$y \approx 1 - \frac{1}{x} + \frac{0.5}{x^3} + \dots$ <small>V.Turc</small>	$y = \frac{x^2}{2}$
Tixeront	$Q = (P^2 + E^2)^{1/2} - E$	$y = \left(1 + \frac{1}{x^2}\right)^{1/2} - \frac{1}{x}$	$y \approx 1 - \frac{1}{x} + \frac{1}{2x^2} \dots$ <small>V.Tixeront</small>	$y \approx \frac{x}{2}$
SCS	$\begin{cases} Q = \frac{(P-E/6)^2}{P + \frac{2}{3}E} ; P > E/6 \\ Q = 0 ; P \leq E/6 \end{cases}$	$\begin{cases} y = \frac{\left(1 - \frac{1}{6x}\right)^2}{1 + \frac{2}{3x}} ; x > 1/6 \\ y = 0 ; x \leq 1/6 \end{cases}$	$y \approx 1 - \frac{1}{x} + \frac{25}{36x^2}$ <small>V.SCS</small>	$y = 0$

2.4. Description du modèle pluie-débit annuel GR1A

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

La présentation du modèle est celle proposée par (Mouelhi 2003; Mouelhi et al. 2006a)

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

$$Q_k = P_k \times \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{X.E} \right) \right]^{0.5}} \right\} \quad Eq\ 23$$

où X est l'unique paramètre du modèle.

Cette formule dérive de la formule de (Turc 1953), qui donne l'écoulement moyen interannuel. Une recherche systématique de la meilleure manière de prendre en compte l'état antérieur du système a montré que l'on devait se limiter à prendre en compte la pluie de l'année précédant l'année en cours. Le paramètre X traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique (par exemple échange avec des nappes profondes ou avec des bassins adjacents dans le cas d'une non-superposition des limites topographiques et géologiques) : si X est supérieur à 1, le système perd de l'eau et si X est plus petit que 1, le système en gagne, le tout exprimé en fraction de l'ETP.

2.5. Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres. Son développement a été initié à l'IRSTEA à la fin des années 1980 (Kabouya 1990; Kabouya and Michel 1991; Mouelhi 2003), avec des objectifs d'applications dans le domaine des ressources en eau et des étiages (Figure 2.3).

Sa structure, bien qu'empirique, l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage ainsi qu'une ouverture sur l'extérieur, autre que le milieu atmosphérique. Ces trois fonctions permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin.

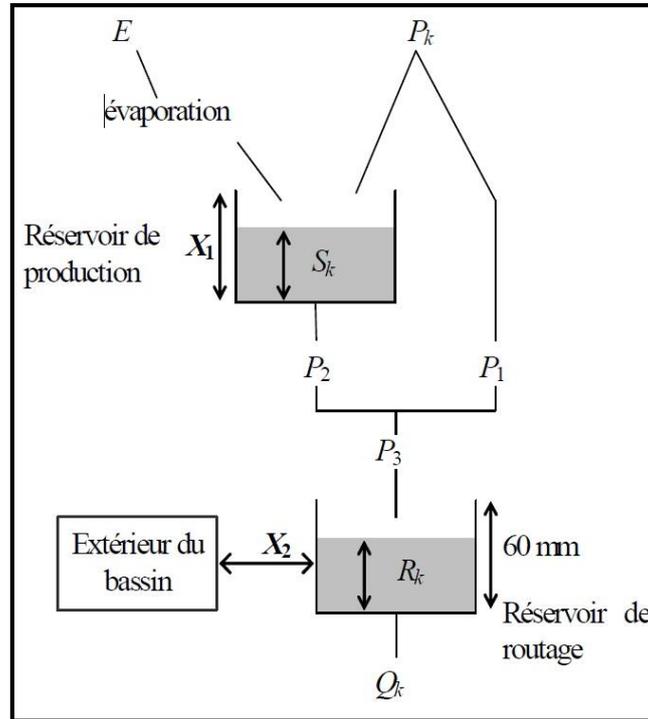


Figure 2.3 : Schéma de la structure du modèle GR2M (Perrin, Michel, and Andréassian 2007).

La fonction de production du modèle repose sur un réservoir de suivi d'humidité du sol. Une partie P_s de la pluie P_k va être ajoutée au contenu S_k dans le réservoir en début de pas de temps

$$P_s = \frac{x_1 \left[1 - \left(\frac{S_k}{X_1} \right)^2 \right] \tanh\left(\frac{P_k}{X_1}\right)}{1 + \frac{S_k}{X_1} \tanh\left(\frac{P_k}{X_1}\right)} \quad \text{Eq 24}$$

X_1 paramètre qui représente la capacité du réservoir ; il est positif et est exprimé en mm. La pluie en excès, P_1 , est donnée par :

$$P_1 = P - P_s' \quad \text{Eq 25}$$

et le contenu du réservoir est actualisé :

$$S' = S_k - P_s \quad \text{Eq 26}$$

Du fait de l'évapotranspiration, une quantité E_s est prélevée du réservoir :

$$E_s = \frac{S' \left[2 - \left(\frac{S'}{X_1} \right)^2 \right] \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S'}{X_1} \right) \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)} \quad Eq \ 27$$

E est l'évapotranspiration potentielle moyenne du mois calendaire considéré. Le niveau S' devient S'' :

$$S'' = S' - E_s \quad Eq \ 28$$

La fonction de Percolation est définie par le réservoir de suivi d'humidité du sol qui se vidange ensuite selon une percolation P_2

$$P_2 = S'' \cdot \left\{ 1 - \left[\left(\frac{S''}{X_1} \right)^3 \right] \right\}^{-1/3} \quad Eq \ 29$$

et son niveau S_{k+1} , prêt pour les calculs du mois suivant, est alors donné par :

$$S_{k+1} = S'' - P_2 \quad Eq \ 30$$

Le Routage et l'échange avec l'extérieur non atmosphérique symbolisé par la quantité d'eau totale P_3 atteignant le réservoir de routage, est donnée par :

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad Eq \ 31$$

Le niveau R_k dans le réservoir devient alors R' :

$$R' = R_k + P_3 \quad Eq \ 32$$

Un terme d'échange en eau souterrain F a été imposé par les données des nombreux bassins utilisés. Ignorer cette ouverture sur l'extérieur non atmosphérique conduit à une baisse considérable de l'efficacité du modèle. F est alors calculé par :

$$F = (X_2 - 1) \cdot R' \quad Eq \ 33$$

Le paramètre X_2 est positif et adimensionnel. Le niveau dans le réservoir devient :

$$R'' = X_2 R' \quad Eq \ 34$$

Le réservoir, de capacité fixe égale à 60 mm, se vidange pour donner le débit Q_k selon l'équation suivante:

$$Q_k = \frac{R''^2}{R'' + 60} \quad Eq \ 35$$

Le contenu du réservoir est enfin actualisé par :

$$R_{k+1} = R' - Q_k \quad \text{Eq 36}$$

Quant aux paramètres optimisés X_1 et X_2 ils représentent respectivement la capacité du réservoir de production et le coefficient d'échanges souterraines

Le modèle a deux paramètres qui pourront être optimisés.

2.6 Modèle pluie-débit journalier GR4J et GR3H.

Dans ce travail on a essayé d'aller à des pas de temps plus fins sans pouvoir trouver des résultats convaincants donc pour la partie bibliographique relative à ces pas de temps non décrite ici et pour ceux qui y sont intéressés, on peut se référer à l'article de (Perrin, Michel, and Andréassian 2007).

2.7 Conclusion

Les modèles présentés précédemment peuvent être utilisés pour un certain nombre d'applications d'ingénierie ou de gestion de l'eau. A titre d'exemples, on peut citer :

- ✓ après calibration du modèle la reconstitution ou l'extension de séries de débit peuvent être possibles en simulant sur une période sur laquelle on dispose de données pluviométriques observées ;
- ✓ la prédétermination : les séries de débit observé étant souvent courte, il peut être intéressant de les étendre à l'aide d'un modèle pluie-débit. On peut pour cela soit utiliser des séries de pluie observée si elles sont suffisamment longues, soit utiliser un générateur stochastique de pluie qui permettra d'obtenir des séries probables de pluie sur le bassin (un tel générateur demandant un calage préalable sur des séries de pluie observée) ;
- ✓ la prévision à moyen ou long termes (de quelques semaines à quelques mois) : elle est intéressante pour les problématiques d'étiage et de gestion de la ressource. Dans ce cas, se pose le problème de l'incertitude sur les pluies futures. Pour en tenir compte, on doit adopter un cadre de prévision probabiliste en utilisant de nombreux scénarios de pluie future à partir de l'instant de prévision, scénarios issus soit de prévisions d'ensemble de modèle météorologiques, soit d'archives météorologiques si elles existent, soit d'un générateur stochastique de pluie ;

- ✓ la détection de tendance dans le comportement hydrologique du bassin versant : l'utilisation d'un modèle hydrologique permet d'identifier dans la variabilité des séries de débit ce qui vient de la variabilité naturelle des conditions climatiques de ce qui vient de changements de caractéristiques du bassin versant
- ✓ la gestion ou le dimensionnement d'ouvrages : grâce au modèle, on peut dans une étude de dimensionnement simuler en continu des apports au réservoir et ainsi optimiser son dimensionnement pour des objectifs particuliers (soutien d'étiage, écrêtement de crue, etc.) en tenant compte ainsi de la variabilité naturelle de ces apports. En conditions opérationnelles, la prévision des apports peut permettre de mieux gérer l'ouvrage.

3.1 Introduction

Ce sont les précipitations atmosphériques qui alimentent les cours d'eau et les nappes souterraines d'un bassin. Seulement, ce n'est pas la totalité de la pluie qui va alimenter le cours d'eau, les lacs ou les nappes. En fait, en plus du climat, de l'intensité et de la nature des précipitations, la réponse d'un bassin versant dépend de beaucoup de paramètres dont la topographie, la géologie, etc. Dans ce chapitre, on présente un aperçu rapide sur la géographie, la géologie, ainsi que sur les données des principaux paramètres morphologiques du bassin versant de la Macta.

3.2 Caractéristiques Géomorphologiques

Le bassin versant de la Macta est le plus grand bassin du nord-ouest Algérien. Il couvre une superficie de 14389 km², et est constitué par 16 sous-bassins selon la délimitation retenue par l'ANRH (figure 3.1).

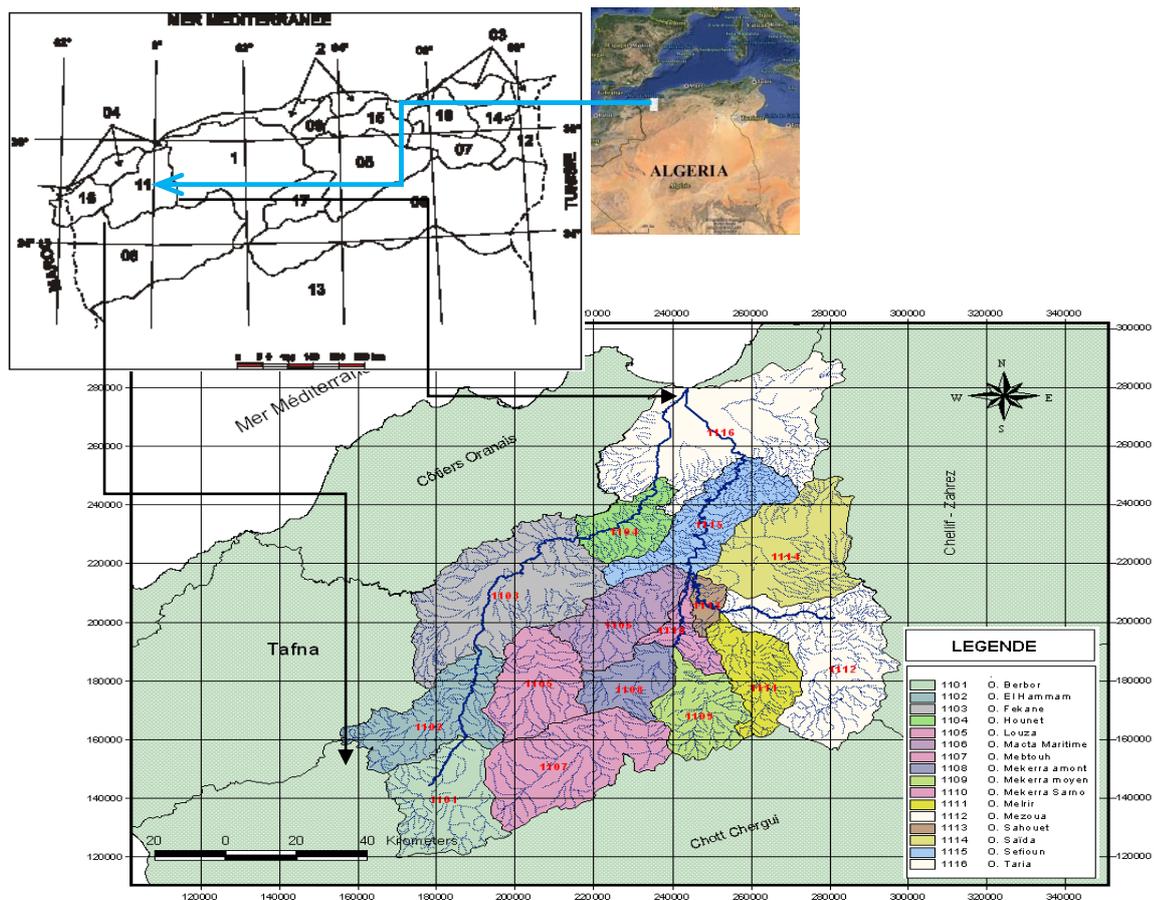


Figure 3.1 : Les sous-bassins de la Macta délimitées par l'ANRH.

a- Contexte géographique et administratif

Actuellement, la nouvelle politique adoptée pour la gestion des ressources est la gestion à l'échelle des bassins versants. La Macta qui superpose sur plusieurs wilayas à savoir Saida, Sidi-Bel-Abbès, Mascara, Tlemcen, Ain-Temouchent, Mostaganem et Oran, est particulièrement concerné par cette région inter-wilayas (figure 3.2).

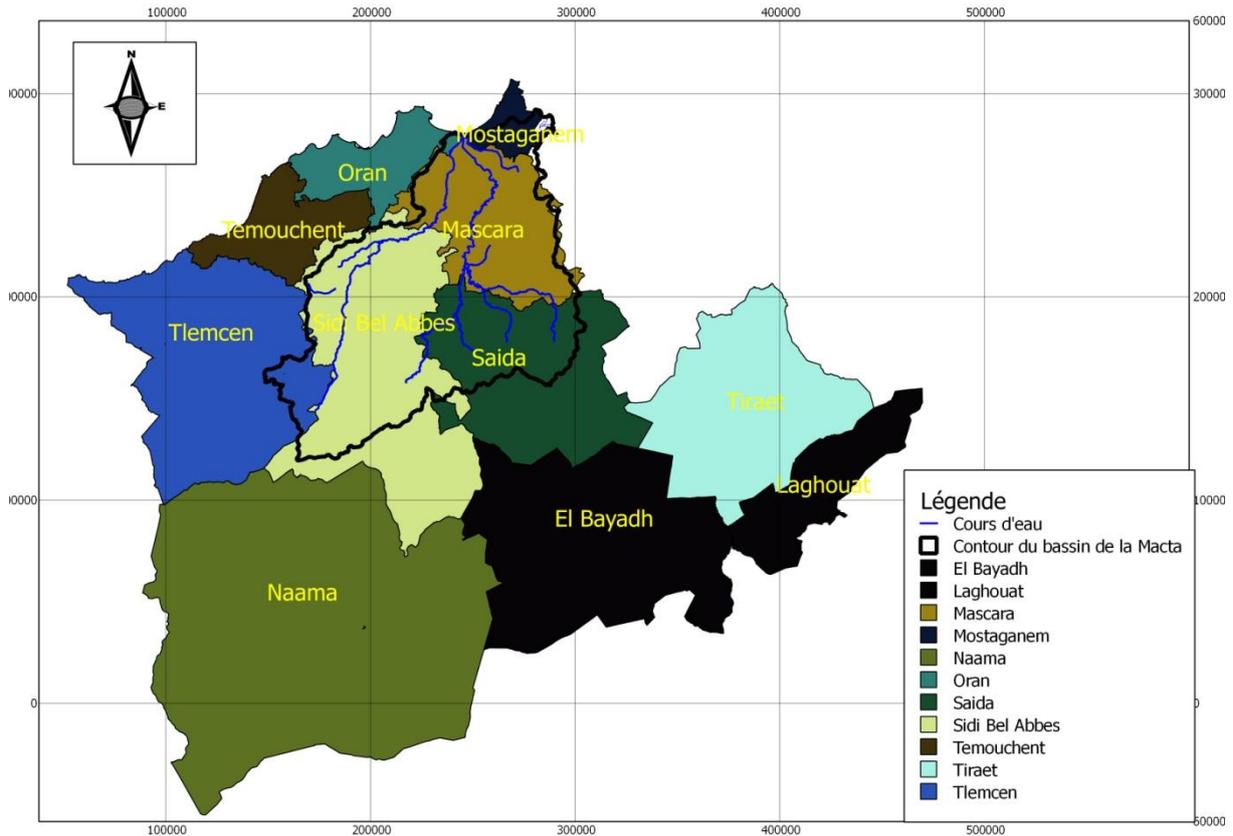


Figure 3.2 : Situation du bassin de la Macta par rapport au découpage administratif

b- Topographie et relief

Le relief est un facteur essentiel, il détermine en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains, l'infiltration. En ce sens c'est l'un des principaux éléments dans l'explication du comportement hydrologique d'un bassin (Figure 3.3).

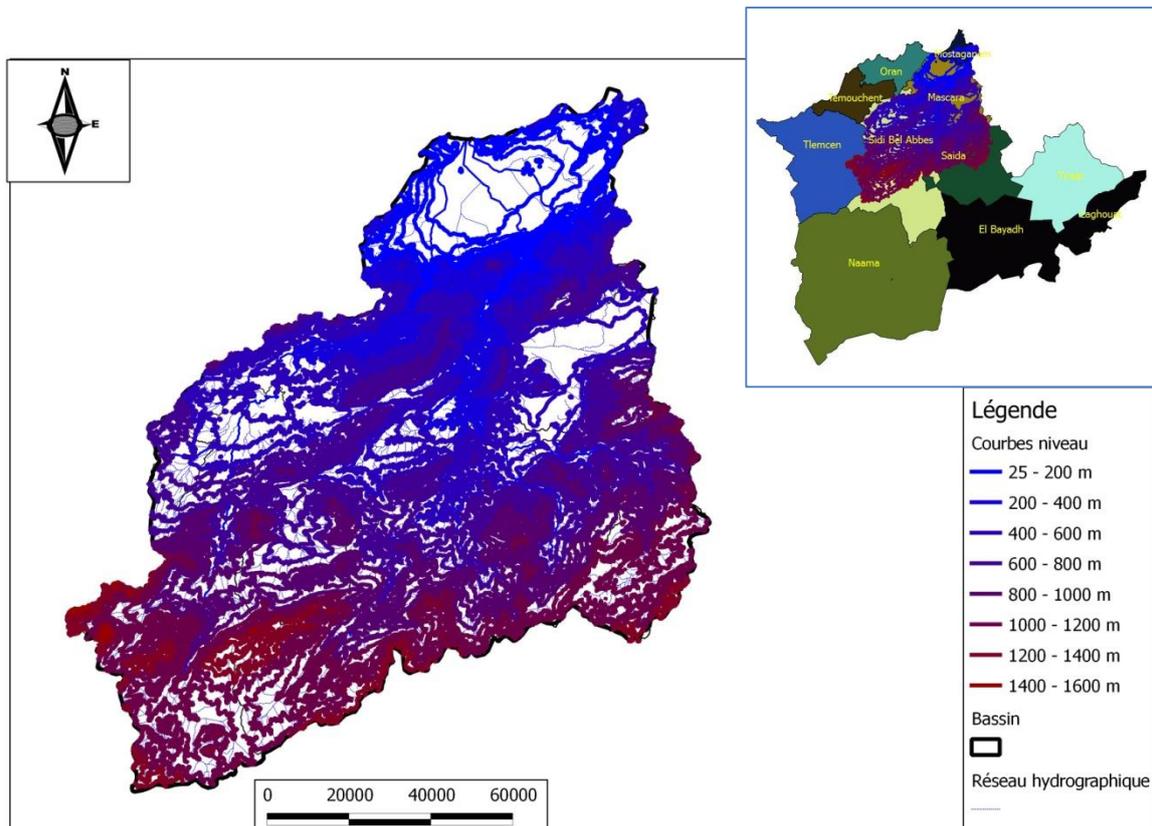


Figure 3.3 : Topographie du bassin de la Macta

A la lumière de la carte topographique, le bassin se caractérise par trois parties bien distinctes.

i- Zone à Basse Altitude

Représentée par des plaines. Au Nord du bassin on trouve la plaine de l'Habra enserrée au sud par les monts de Bénichougrane et derrière laquelle sont situées les plaines de Sidi bel Abbes et de Ghriss.

ii- Zone Des Reliefs Moyens

Se caractérise par les monts de Bénichougane qui sont orientés de Sud Ouest à Nord Est. Cette chaîne, essentiellement montagneuse et très accidentée, se trouve à une altitude moyenne de 700 m avec des altitudes maximum représentées par Dejbél Kallel à 910 m.

iii- Zone Des Hauts Reliefs

Au Sud du bassin, ces reliefs sont représentés par les monts de Daya et ceux de Saïda axés sud-ouest à Nord-Est. Le relief est accidenté, dominé par une série de Djebels élevés : Djebel

Beghira (1409m), Djebel Marhoum (1404 m), Djebel tenfeld (1356) et Djebel Ouled Aouf (1025 m).

c- Sol et géologie

On note en général la dominance des calcaires. Au niveau de hauts piémonts et montagnes, la roche mère affleure en différents endroits. Les sols sont peu profonds à l'exception des sols des différentes vallées et des bas piémonts caractérisés par des dépôts les plus récents.

La région de Bénichougrane se caractérise par un faciès calcaire marneux et un faciès composé de grés et de conglomérats.

A proximité de l'exutoire (marécages de la Macta), on rencontre essentiellement des matériaux transportés ; Les dépôts sont généralement argileux et fortement salés.

L'écoulement est fonction des conditions géologiques des terrains traversées, à savoir : pendage, épaisseur, relations tectoniques, perméabilité...etc. La connaissance détaillée des lithofaciès et de leurs structures profondes et superficielles, est nécessaire à la compréhension du système hydrologique et hydraulique souterrain des régions considérées (plaine de Sidi Bel Abbés, plaine de Ghriss, plateau de Saïda).

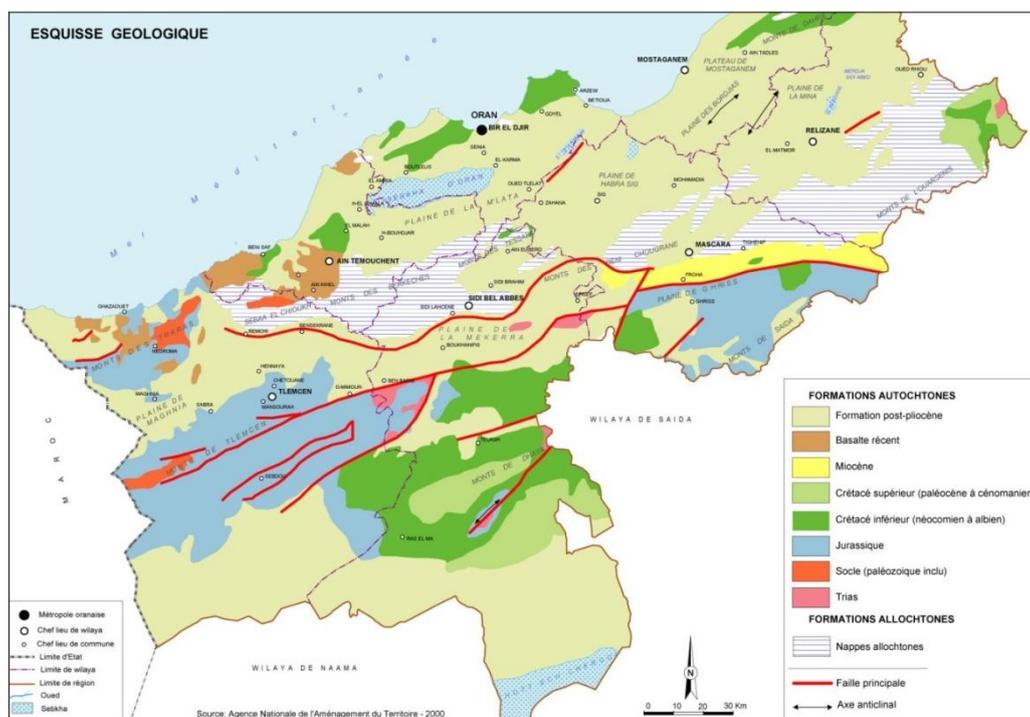


Figure 3.4 : Esquisse géologique du Nord-Ouest algérien (Ministère de l'environnement)

d- Végétation

La végétation est halophile et adaptée aux sels sodiques à proximité de la mer. A l'extrême du bassin versant, on trouve la forêt de Touazizine et la forêt de Zegla. Dans la partie centrale du bassin versant et plus précisément dans le sous-bassin de la Macta, Sarno, on trouve les forêts de Louza , Belarbi, Tenira, constituées essentiellement de pins d'Alep. Cette couverture végétale est généralement dominée par la céréaliculture (plaine de Ghriss de Mascara, Ain Fares...etc.).

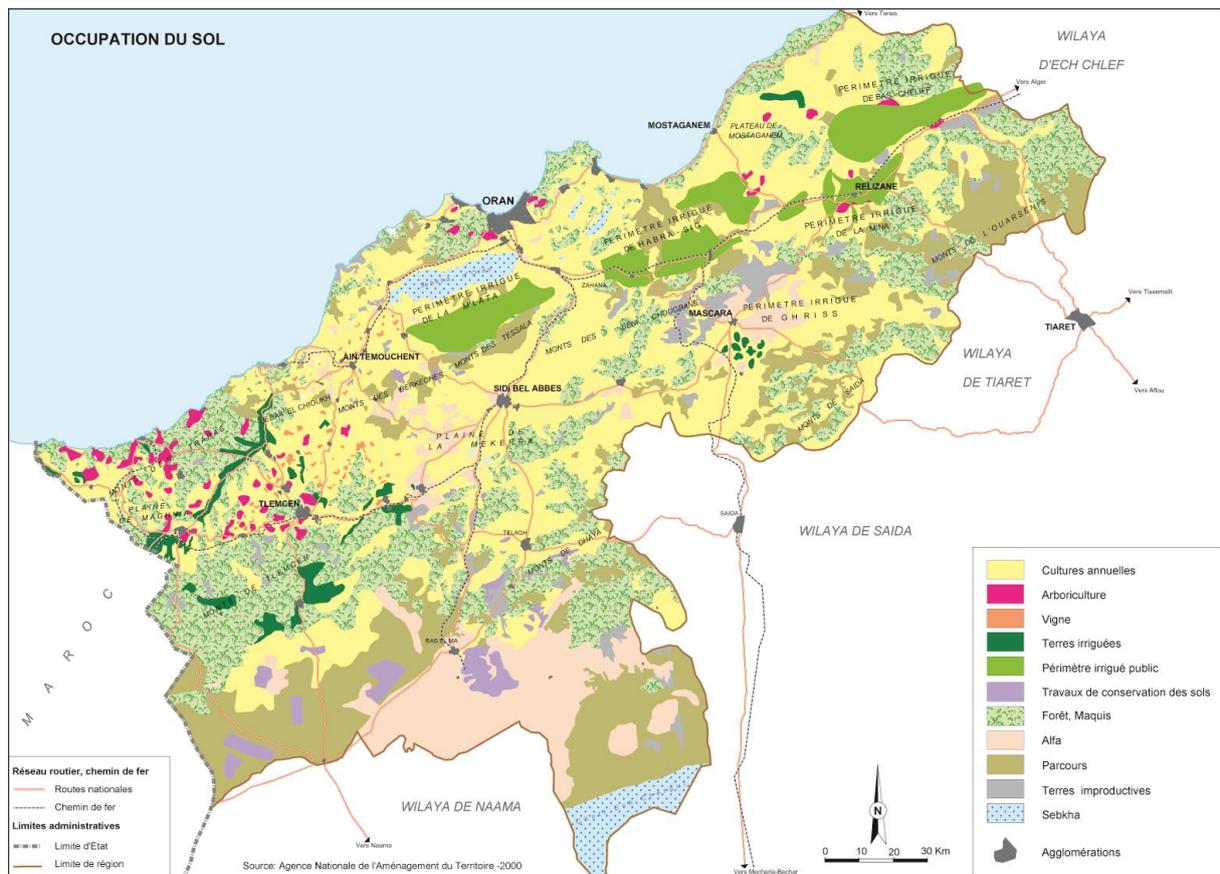


Figure 3.5 : Occupation du sol du nord-ouest algérien (Ministère de l'environnement)

e- Réseau Hydrographique

Le Bassin de la Macta présente un chevelu hydrographique caractéristique des zones semi-arides, constitué de deux grands cours d'eau qui présentent les deux artères drainantes du bassin. Leurs débits en période d'étiage peuvent être nuls. Totalisant un réseau de 658 km, ces cours d'eau sont l'Oued Mekerra à l'ouest et l'Oued El Hammam à l'est, recevant chacun les affluents descendants des reliefs en bordure.

Le bassin versant de l’oued El Hammam est drainé par quatre principaux affluents dont les bassins élémentaires sont : Le Fken (1200 km²), le Sahaouet (2200 km²), le Hounet (1630 km²) et le Melghir (1520 Km²) .ces affluents convergent en éventail pour former l’Oued El Hammam qui draine à lui seul 2/3 du bassin de la Macta (Tableau 3.1).

Le réseau hydrographique du bassin de la Mekerra est bien développé mais constitué en majorité de cours d’eau non-pérennes.

Par contre le contrôle et suivi des débits des cours d’eau qui sont effectués par des stations hydrométriques (Figure 3.6) n’aident pas beaucoup la recherche hydrologique au niveau de ce bassin et ce, dans un certain nombre de sous-bassins, est à cause de courtes chroniques relatives à ces stations. Aussi il faut mettre l’accent sur la qualité des données empêchant leurs exploitations, à cet effet, il est souhaitable de mettre en route les stations en arrêt. Quant aux données il faut qu’elles fassent l’objet d’un contrôle avant leur archivage, cela permettra aux hydrologues de réaliser leurs études, dans des conditions optimales.

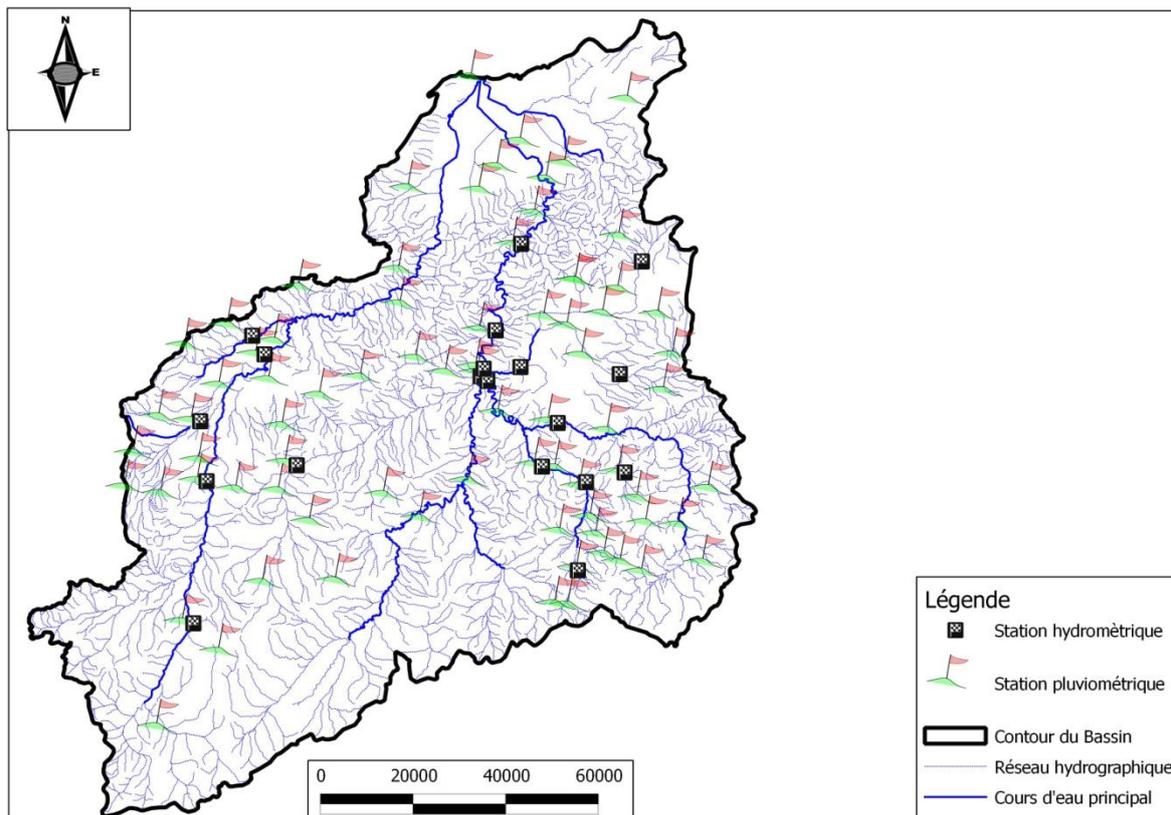


Figure 3.6 : Réseau hydrographique du bassin de la Macta

Tableau 3.1 : Paramètres hydrographiques de sous bassins versant de la Macta

Code	Bassin versant	Surface (Km ²)	Périmètre (Km)	Longueur max.(km)	Kc	Dd km/km ²	Ct	Pente moy m/m
01	O ^d .Mekerra amont	966	123	46	1,25	0,42	2,94	0,044
02	O ^d .Mekerra moyen	936	140	52	1,56	0,64	5,76	0,026
03	O ^d .Mekerra sarno	1500	190	70	1,37	0,34	2,38	0,017
04	O ^d Mebtauh	476	96	34	1,34	0,77	11,55	0,017
05	O ^d .Louza	763	122	44	1,2	0,50	3,00	0,014
06	O ^d .Melrir	701	122	46	1,23	0,63	6,30	0,014
07	O ^d .Mezoua	1249	161	60	1,3	0,42	1,68	0,033
08	O ^d Seffioun	461	96	34	1,3	0,63	5,04	0,038
09	O ^d .Berbour	605	110	40	1,46	0,61	6,10	0,032
10	O ^d .Hounet	258	89	38	1,71	0,78	8,58	0,025
11	O ^d .Saïda	618	118	46	1,42	0,63	6,93	0,026
12	O ^d .Taria	1457	168	60	1,45	0,58	5,80	0,018
13	O ^d . Sahouat	141	66	28	1,6	0,94	12,22	0,032
14	O ^d .Fekane	1185	147	50	1,28	0,47	2,82	0,022
15	O ^d .EL Hamam	848	148	60	1,58	0,85	15,30	0,006
16	Macta maritime	1998	218	86	1,67	0,39	2,34	0,001
17	Saïda pont	100	48	19	1,35	3,20	12,60	0,013
18	PK 50	400	88	38	1,23	2,70	13,20	0,016
19	Dn Bouchikhi	77	36	11	1,15	2,53	12,00	0,016
20	Ghris	132	56	22	1,36	3,24	0,56	0,022
21	Khalouia	58,24	33	10	1,21	1,92	6,32	0,013
22	Sidi Ali Benyoub	1890	200	92	1,29	0,8	0,17	0,063
23	Sidi Bel Abbés	3000	280	134	1,43	2,85	22,31	0,011
24	Lamtar	277	91	13	1,53	1,82	0,20	0,047
25	Sarno	255	80	39	1,40	1,00	11,00	0,012
26	G ^d O ^d Hamam	7460	460	132	1,50	0,47	0,07	0,006

L'utilisation des différents types de paramètres des sous-bassins versants (morphologiques, hydrographiques...etc.) a pour but la valorisation des facteurs du milieu physique, qui reste, dans ce cas, propres aux bassins versants similaires.

3.3 Données hydroclimatiques

a- Données pluviométriques

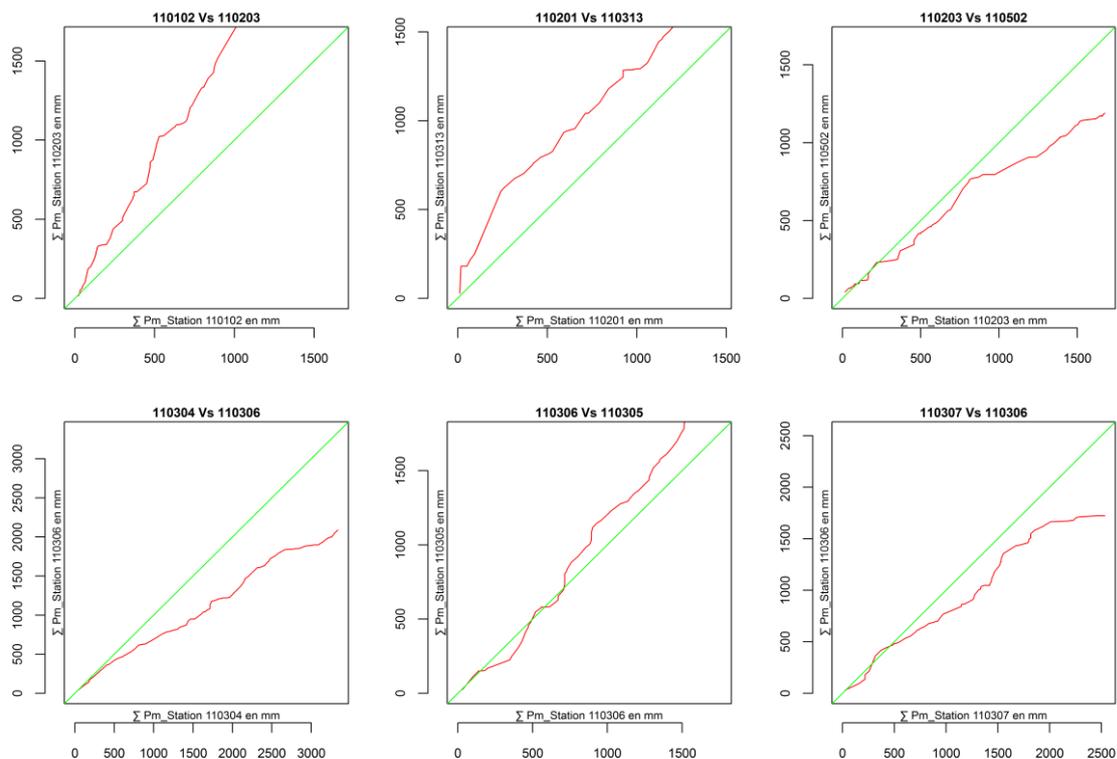
Le bassin versant de la Macta est soumis à un climat méditerranéen. Vers le sud, une tendance continentale s'affirme, qui se traduit par une aridité marquée, des hivers froids et des étés particulièrement chauds.(Mohamed Meddi and Hubert 2003; Mohamed Meddi, Talia, and Martin 2009).

Plus de 70 postes pluviométriques fournissent des données remontant parfois jusqu'en 1940). En considérant les années climatiques ou hydrologiques (du 1^{er} septembre au 31 août), les précipitations annuelles moyennes sur la période 1930-2002 varient de 230 mm à Ras El Ma (dans la partie sud du bassin) à 559 mm à Aouf (au pied des montagnes de Beni Chougrane). Sur la période septembre 1930 août 2004, les précipitations annuelles ont dépassé 800 mm en deux points d'observation seulement : Aouf (sept fois) et Ben Badis (une fois).

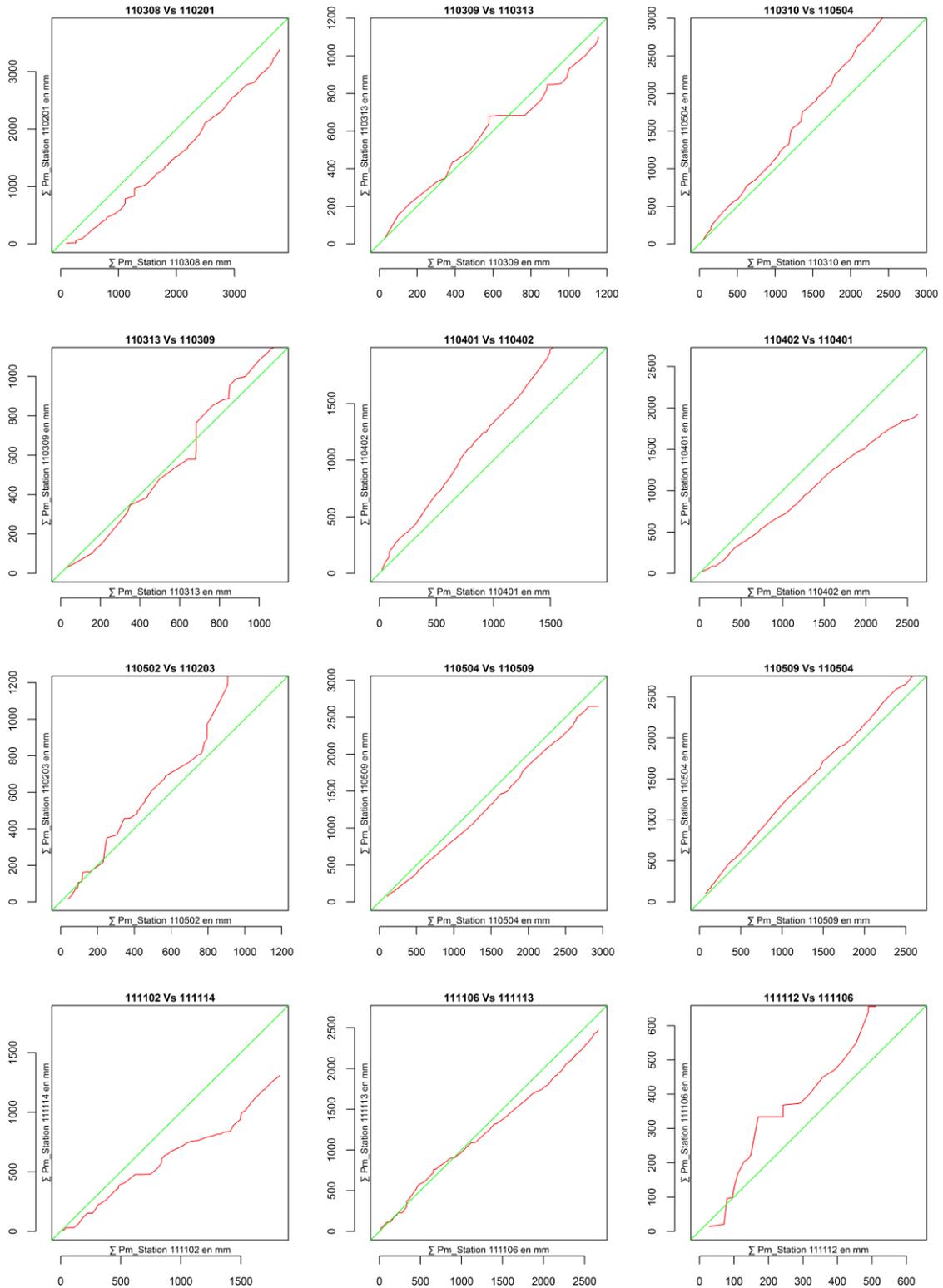
Le rapport entre les précipitations annuelles maximales et minimales est proche de 4 à 5 dans les stations humides (767 mm / 141 mm à Ain Fekane ; 807 mm / 176 mm à Ben Badis), mais il est plus fort dans les stations sèches (542 mm / 36 mm à Ras El Ma). Cette irrégularité interannuelle des précipitations est illustrée par la figure 3.12, pour des postes (Ain Fekane, Ben Badis et Ras El Ma) répartis sur l'ensemble du terrain d'étude et présentant des pluviosités sensiblement différentes.

La critique du réseau pluviométrique se fait généralement par la méthode de doubles cumuls, ancienne mais toujours utilisée, elle permet de détecter des anomalies systématiques pouvant dériver d'erreurs ou une non-stationnarité (P.H. Bois 1991).

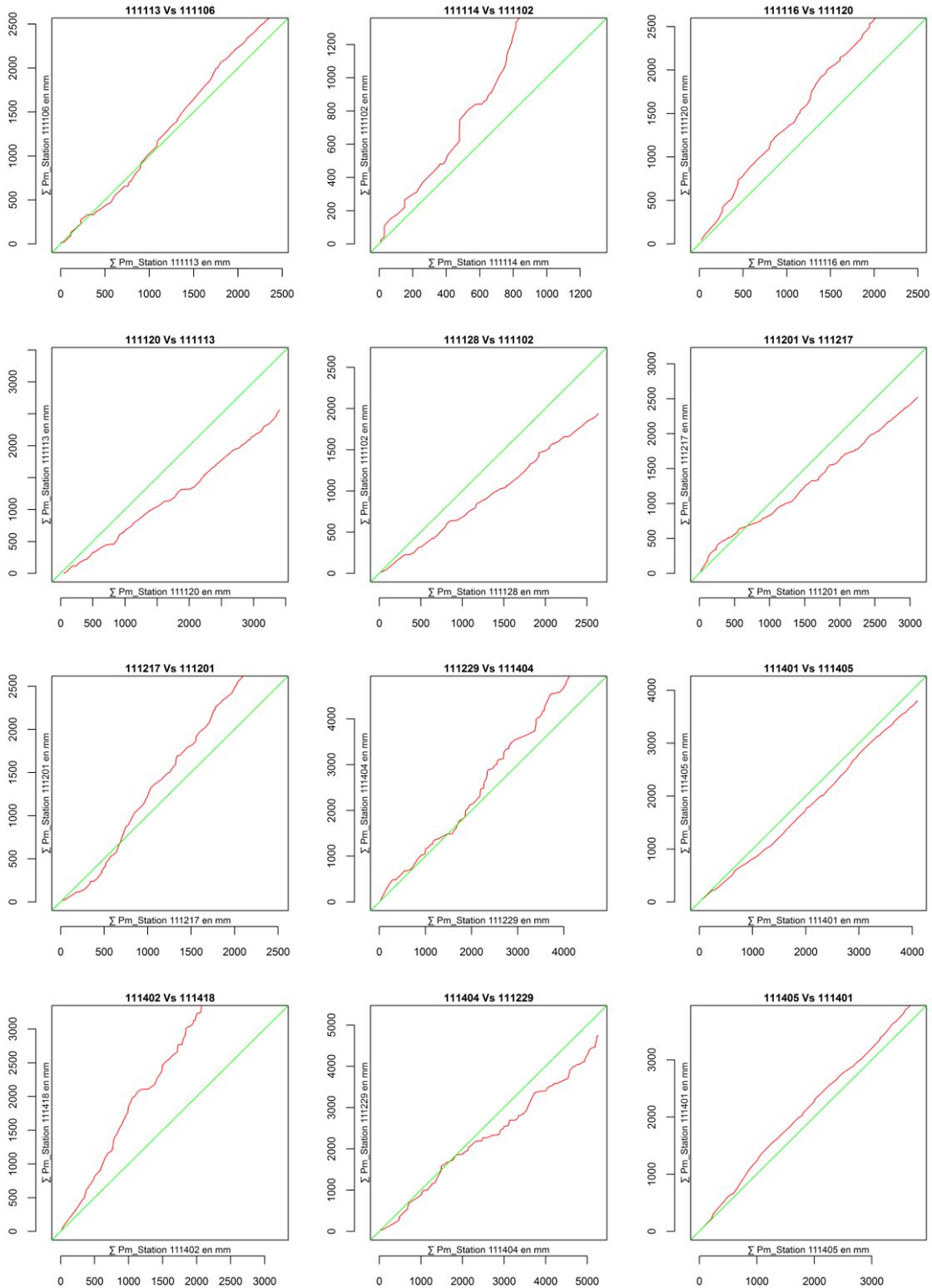
Ci-après en figure 3.10 nous présentons les cumuls des précipitations mensuelles de 39 stations représentatives des postes pluviométriques parmi 78 utilisées dans les calculs qui s'en suivent.



III- PRÉSENTATION DU BASSIN



III- PRÉSENTATION DU BASSIN



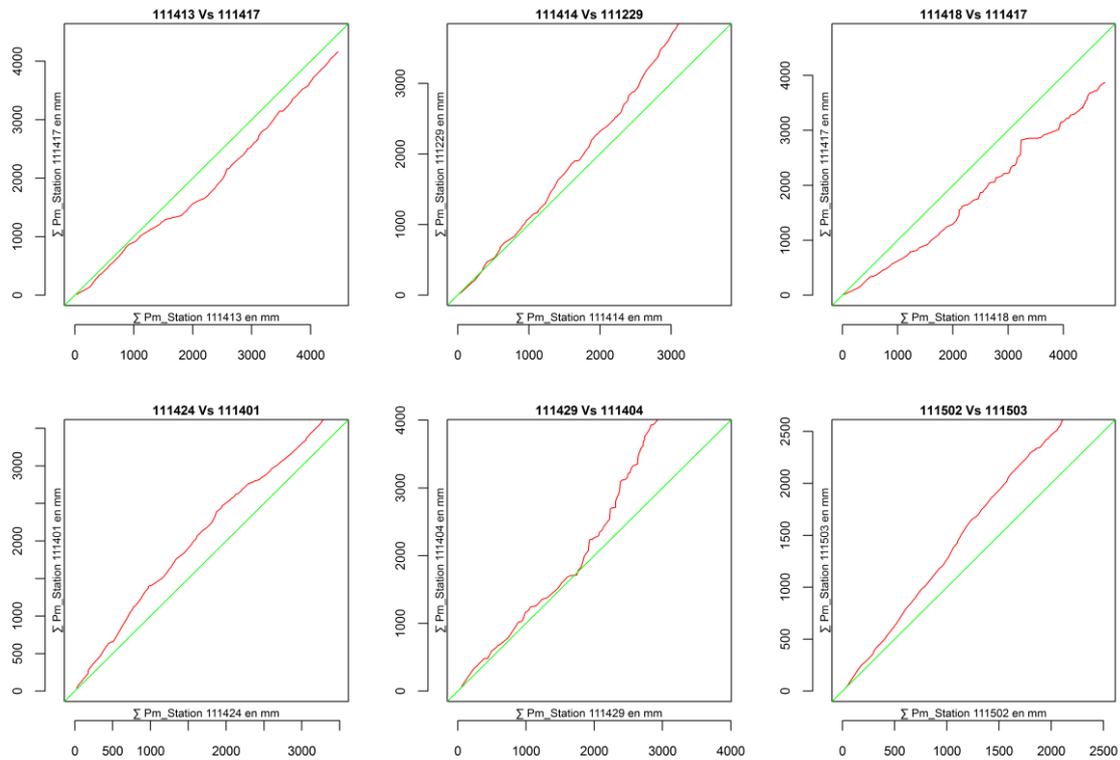


Figure 3.10 : Graphe double cumul des pluies mensuelles des stations au niveau du bassin de la Macta. En rouge le double cumul des stations, en vert l'asymptote.

Les cumuls de pluies entre la plupart des stations les plus proches, montrent qu'elles sont corrélées entre elles. Dans certains cas, lorsqu'il y a des ruptures de pente de la courbe des cumuls on peut dire qu'il existe des erreurs systématiques provenant de la qualité de mesures ou une non-stationnarité durant cette période qui correspond à cette rupture.

Le comblement des lacunes des données pluviométriques a été fait en se basant sur d'autres stations qui présentent une corrélation optimale sur une même période, le graphe ci-après en figure 3.11 montre la corrélation après avoir effectué le comblement de lacune.

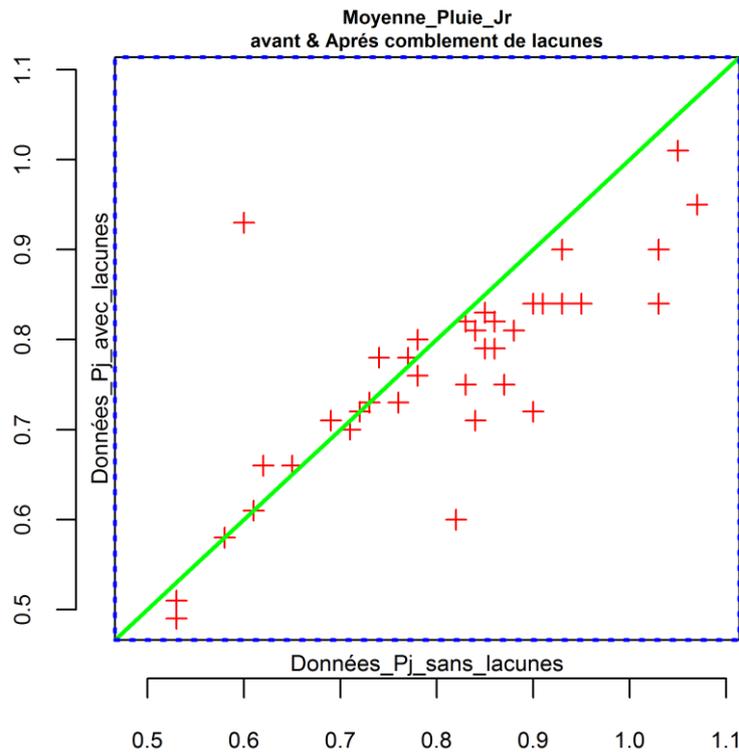


Figure 3.11 : Comblement de lacunes des postes pluviométriques.

Afin de permettre d’avoir un aperçu de la distribution, de la variabilité des données pluviométriques et d’identifier les observations aberrantes, nous représentons les données dans des boîtes de moustaches (voir figure 3.12 ci-après).

Le graphe révèle une variation mensuelle qui suit une logique saisonnière du climat du bassin de la Macta : l’année se divise en deux phases, la 1^{er} est relativement pluvieuse et humide, elle commence du mois d’octobre jusqu’à mai et la deuxième, aride et plus sèche, s’étale sur une période relative aux mois de juin, juillet et aout.

Dans certain mois, à savoir mars, avril, mai et octobre, la médiane, qui est présentée par le trait épais, ne coïncide pas avec la moyenne correspondante, cela pourrait signifier que durant ces mois sur la période auxquelles les données ont été prise en considération, il existe une forte variation annuelle ou/et les mesures de cette donnée présentent des erreurs traduites sur les graphes par des valeurs à l’extérieur de la boîte de moustache en tant que valeurs aberrantes.

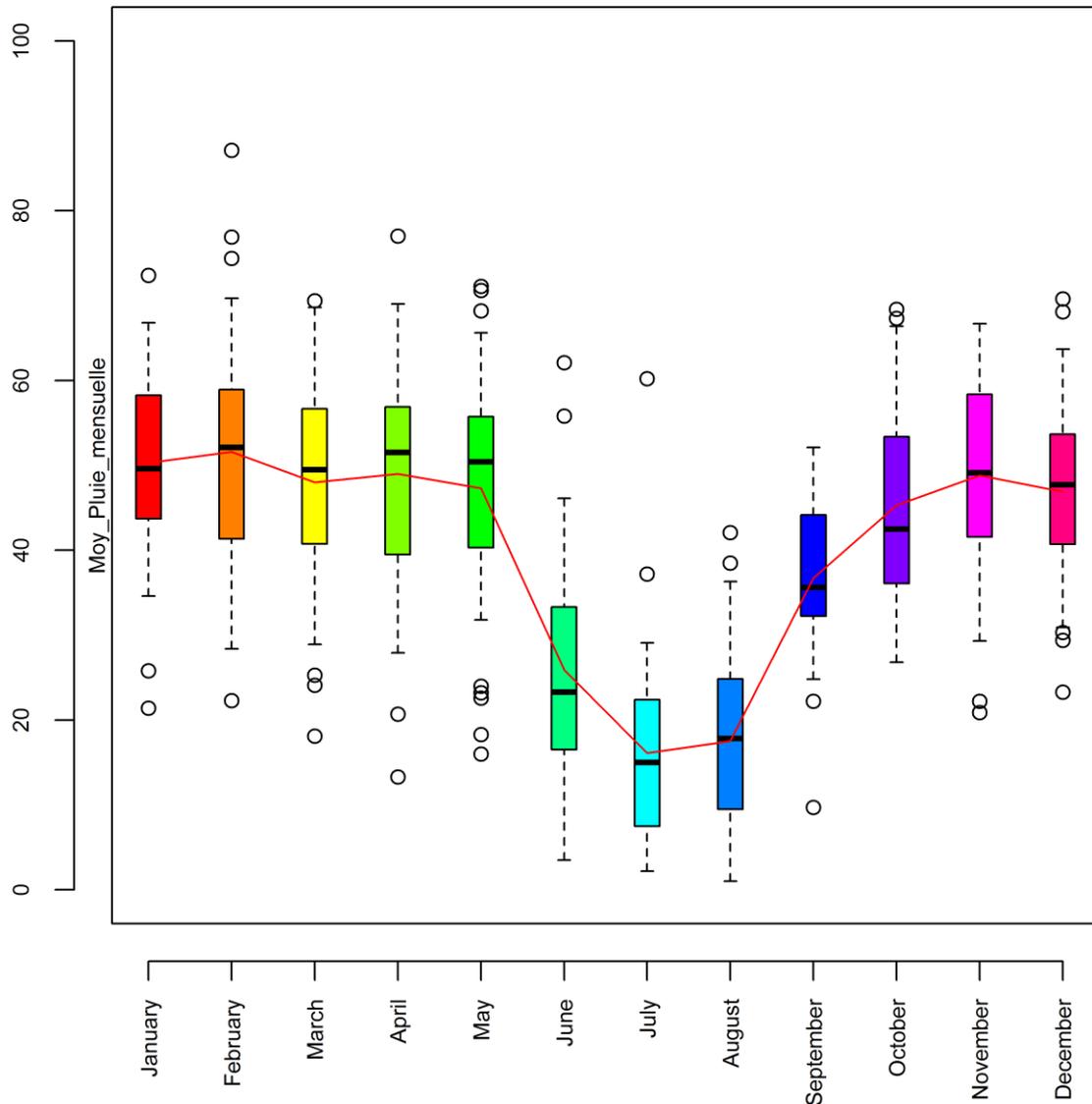


Figure 3.12 : La distribution et la variabilité des données pluviométriques. Le trait épais représente la médiane, la boîte est formée par les valeurs des 1^{er} et 3^{es} quartiles, et les moustaches mesurent maximum 1,5 fois la longueur de l'interquartile (3^{es}-1^{er}). Les valeurs au-delà des moustaches appelées valeurs aberrantes sont représentées individuellement; la ligne rouge présente la moyenne de chaque mois.

b- Données de température et d'évapotranspiration potentielle

Les données mensuelles de températures ont été déterminées à partir des ré-analyses produites par la "National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)". Les ré-analyses originales sont maillées à une résolution de 0.5°, obtenues par interpolation en tenant compte du gradient altitudinal (Willmott and Matsuura 1995; Willmott and Robeson 1995). L'intersection entre les mailles des ré-analyses et le contour de chaque bassin versant a permis d'obtenir une valeur de température de l'air par sous-bassin.

La variation mensuelle des températures au sein du bassin varie du Sud-Ouest ou Nord Est, En effet ceci suit l'évolution de l'altitude (figure 3.13), plus on va du sud-ouest au nord-est les moyennes des températures baissent en outre en s'approchant de la mer méditerranéenne qui est l'exutoire du bassin de la Macta, de ce fait les températures seront influencées non seulement par l'altitude mais aussi par la mer.

Les données de l'évapotranspiration qui sont calculées dans ce travail à partir des données de la température suivant le modèle de Oudin et al. 2005.

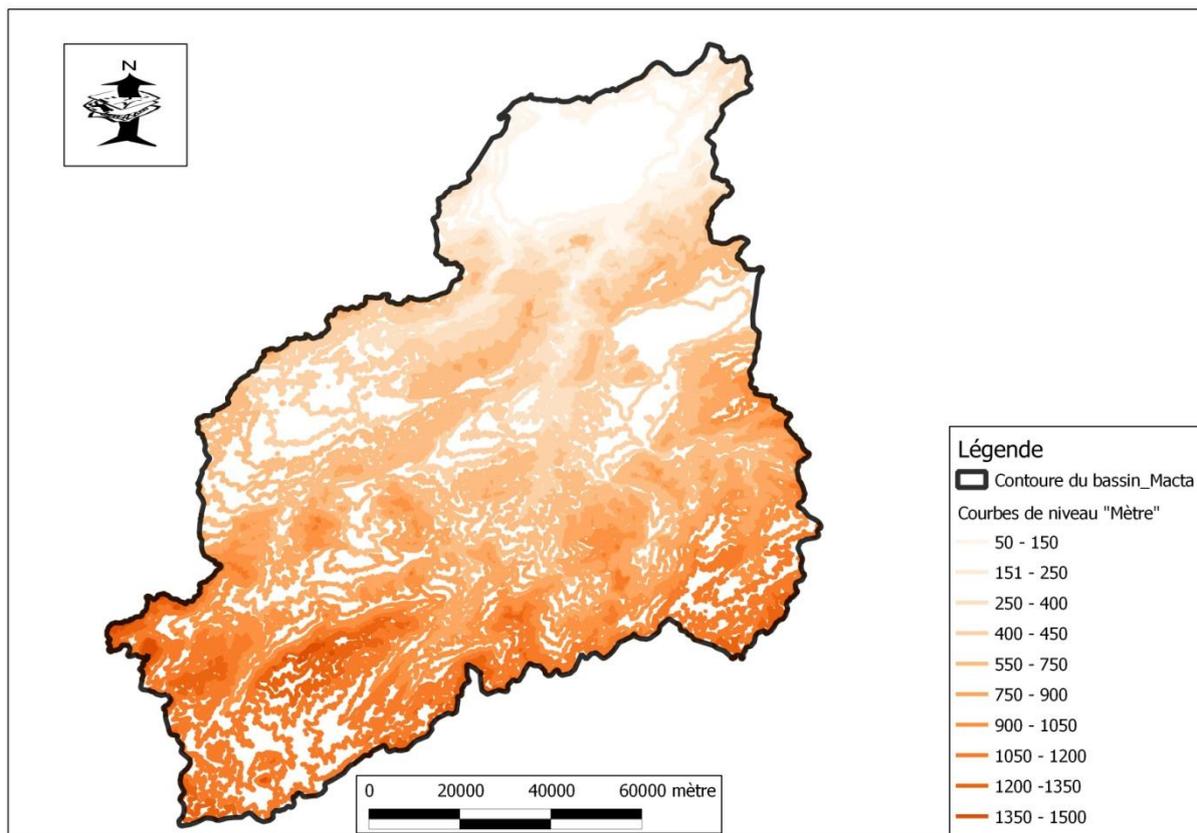
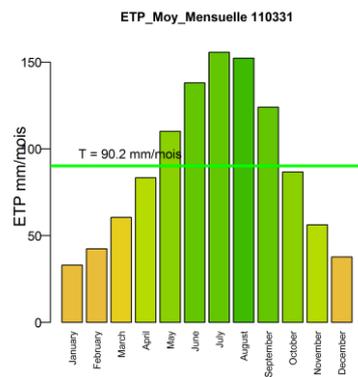
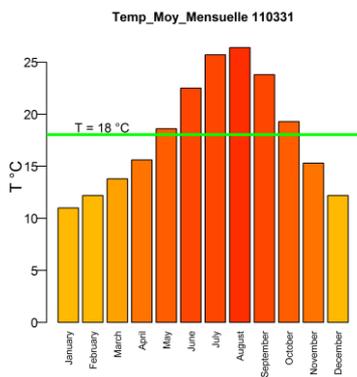
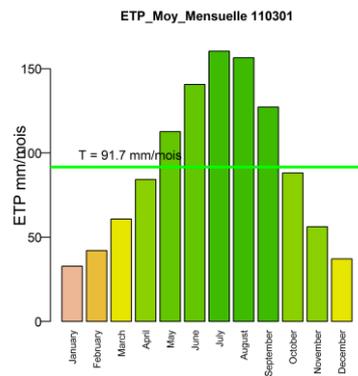
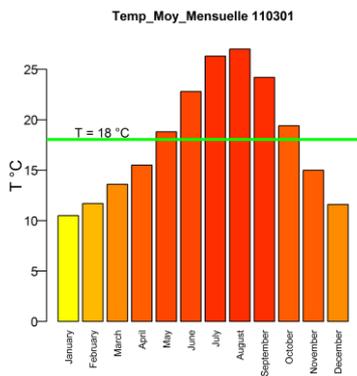
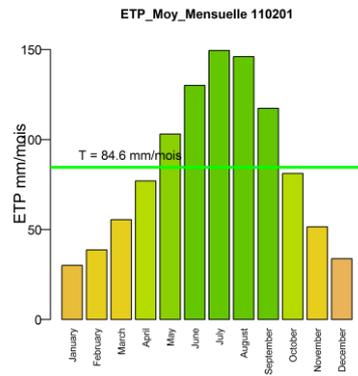
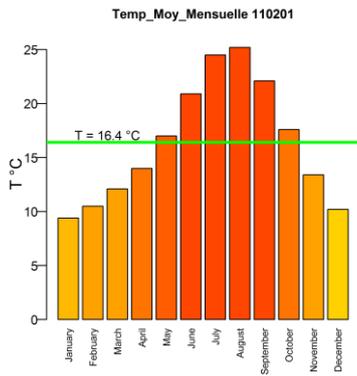
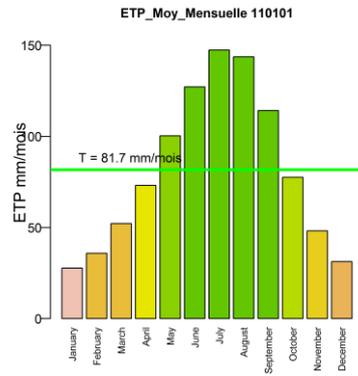
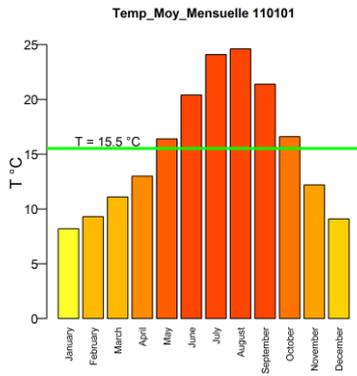
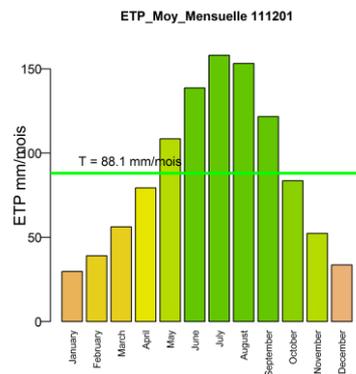
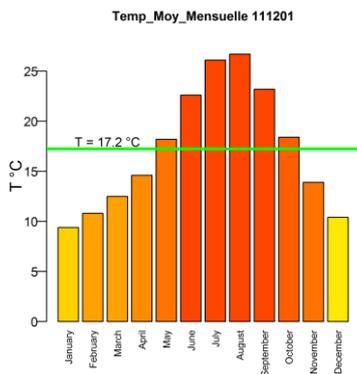
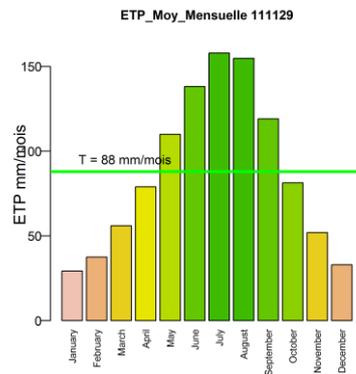
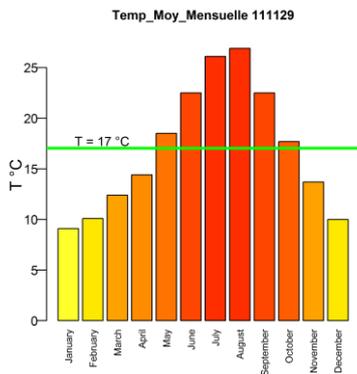
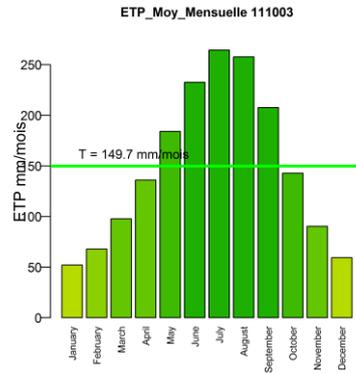
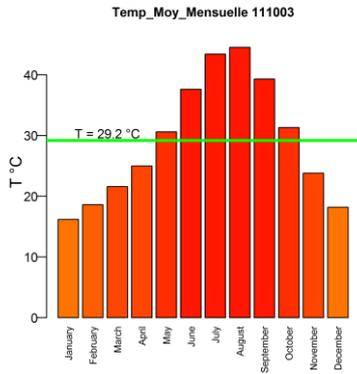
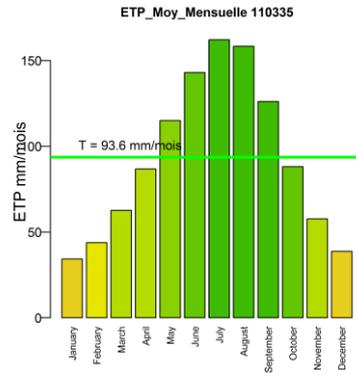
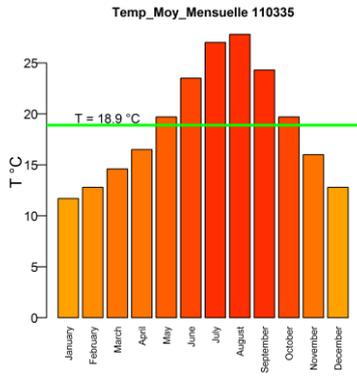


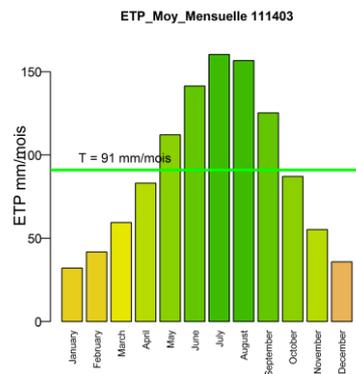
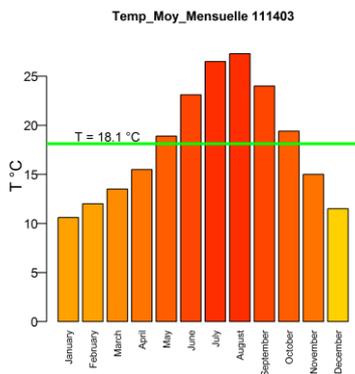
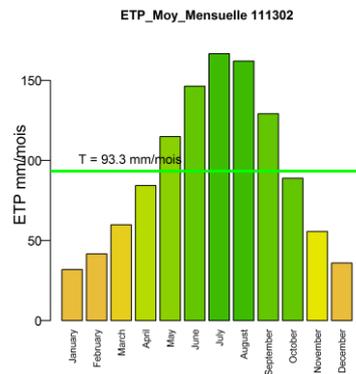
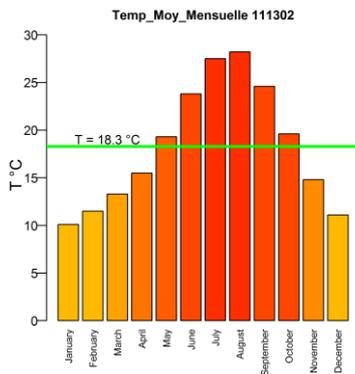
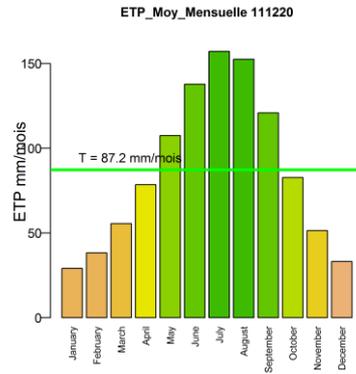
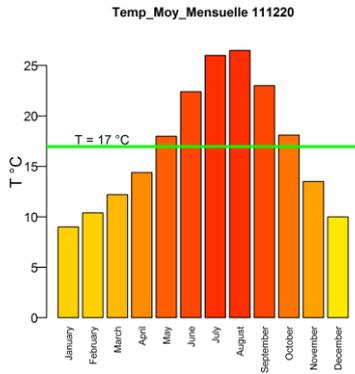
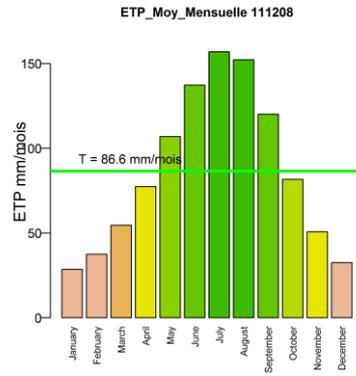
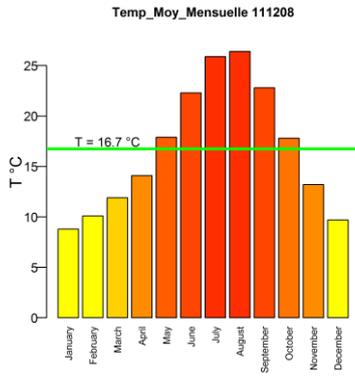
Figure 3.13 : Variation de l'altitude au sein du bassin de la Macta

Après avoir calculé les températures pondérées sur les sous bassin on a présenté leurs moyennes mensuelles de toutes les chroniques de ces températures dans les graphes suivants (figure 3.14):



III- PRÉSENTATION DU BASSIN





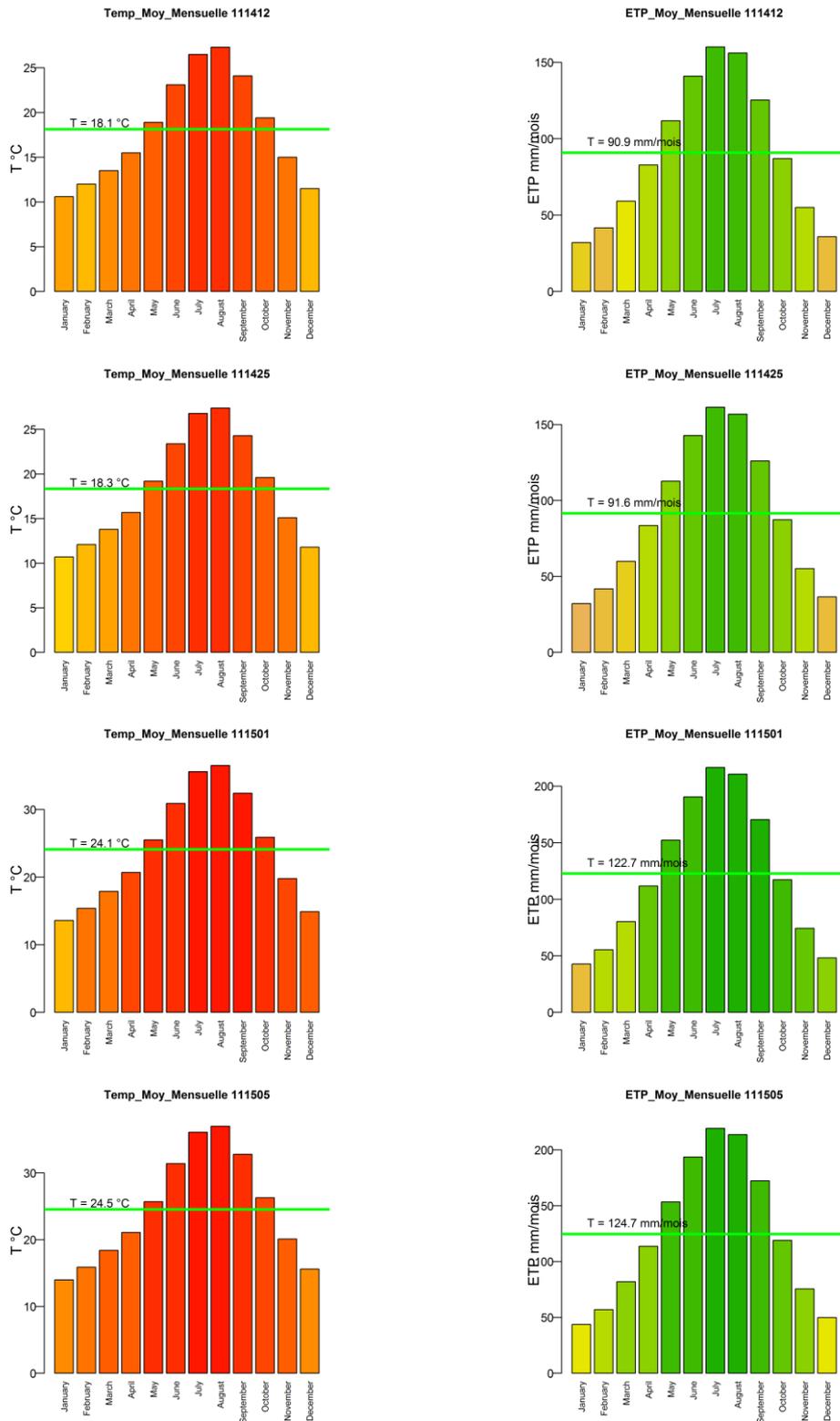


Figure 3.14 : Les moyennes mensuelles de l'évapotranspiration et la température des sous bassin de la Macta.

Le bassin de la Macta est dominé par un climat méditerranéen près de son exutoire c.à.d. chaud et humide en été et doux l'hiver. Par contre à l'intérieur, loin de la mer Méditerranée, dans les hauts plateaux, le climat est plus chaud est sec en période estivale, froid et humide en période hivernale ((Mohamed Meddi et Hubert 2003).

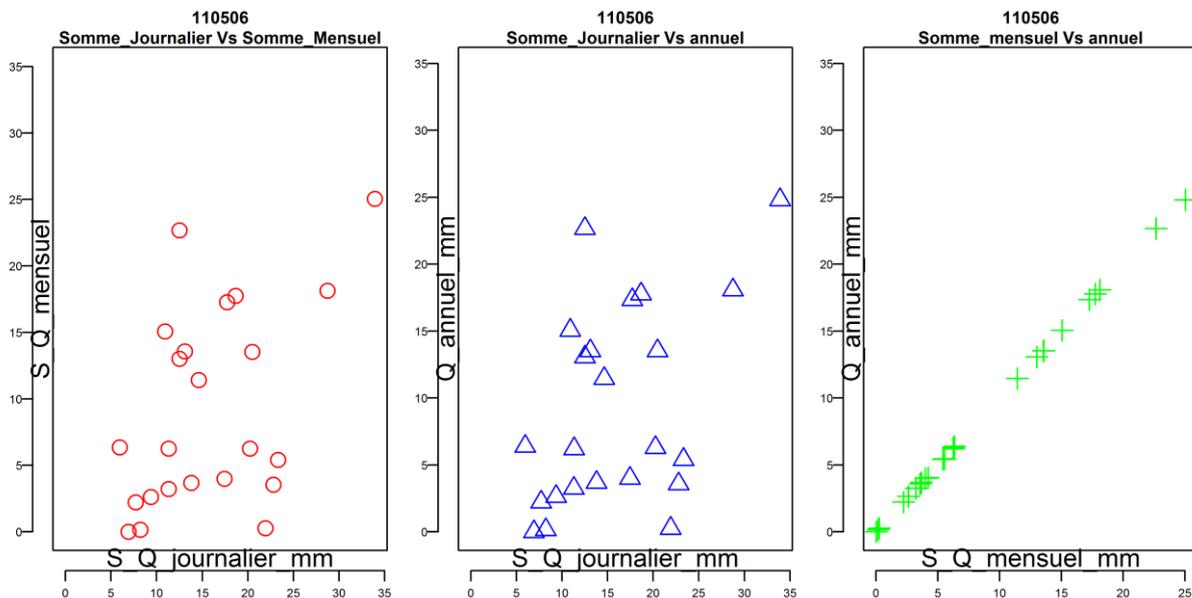
Les températures varient dans les bassins internes entre 15 et 18°C et plus on s'approche des plaines, la température moyenne annuelle s'approche de 25°C ce qui est expliqué par l'influence de la mer Méditerranée .

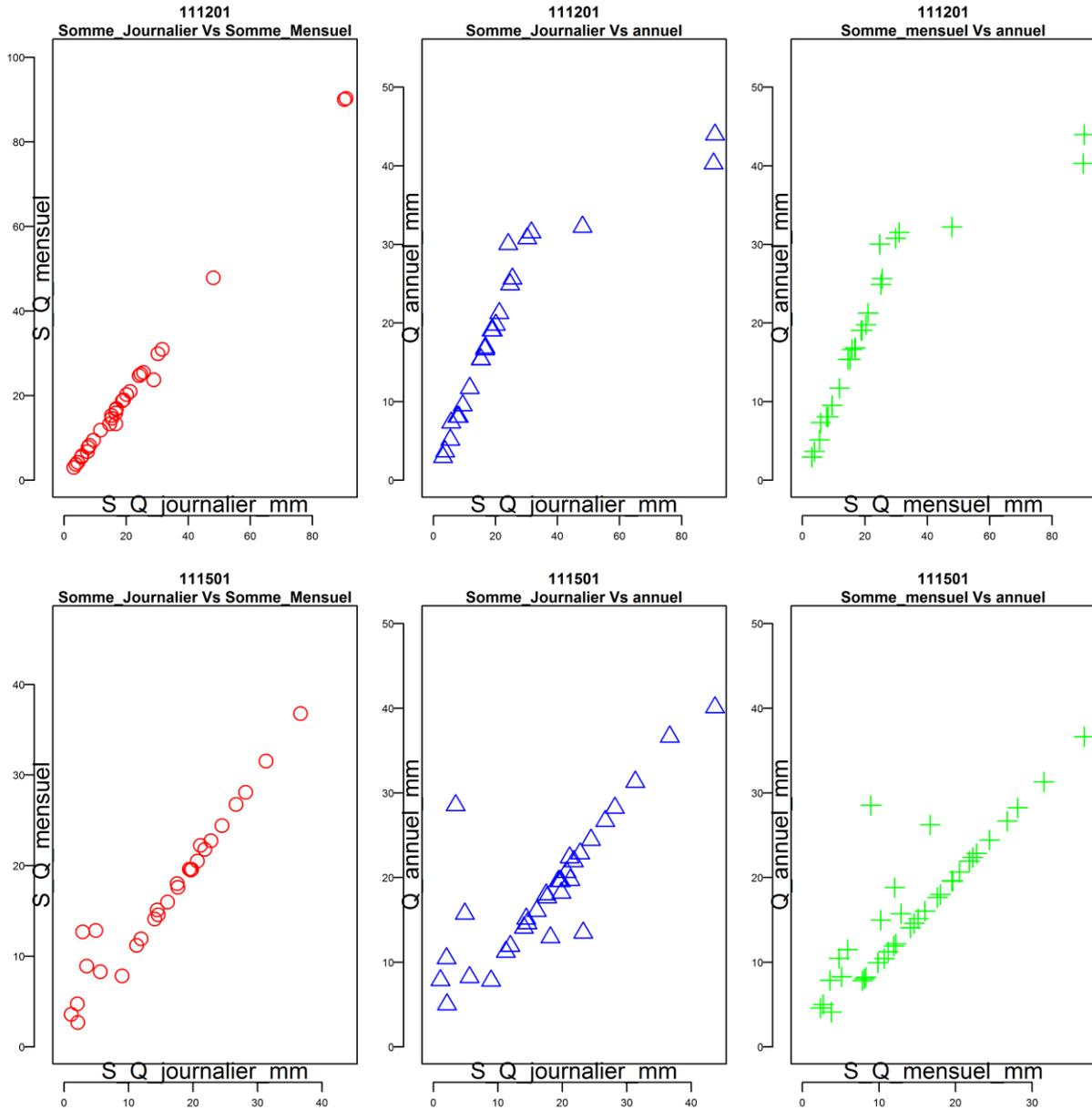
A travers ces graphes, on distingue les mois les plus chauds de l'année, à savoir les trois mois, à leur tête le mois Aout qui est le plus chaud après Juillet et Juin; parfois le mois de septembre s'ajoute comme parmi les mois chauds de l'année.

c- Données de débits

Les données journalières, mensuelles et annuelles de débits proviennent des stations hydrométriques opérationnelles, dont le suivi est assuré par l'ANRH.

Pour l'analyse de la qualité de ces données on a essayé de restituer le pas mensuel et annuel à partir du journalier, quand c'est possible en le comparant avec ceux qui le sont déjà :





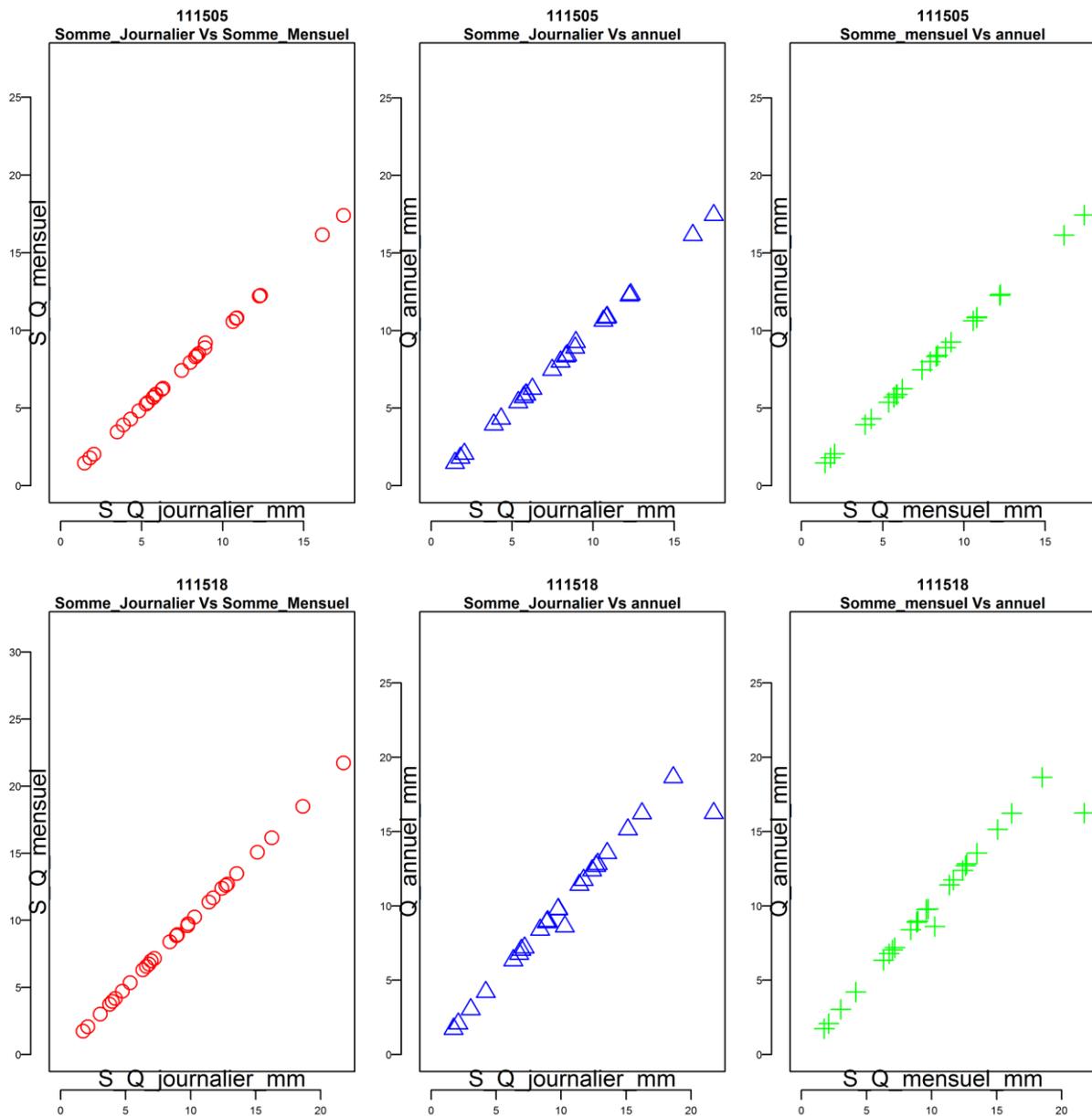


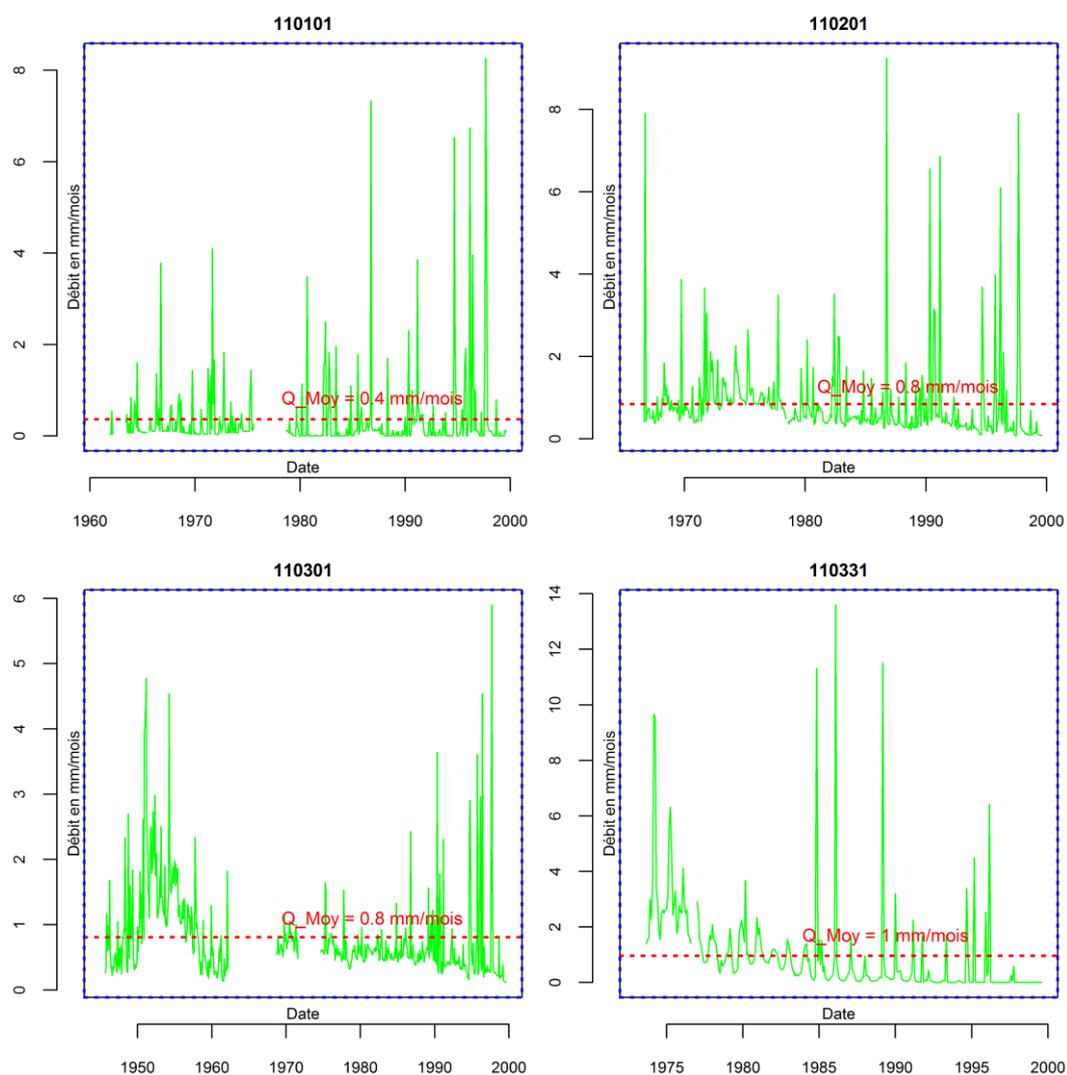
Figure 3.15 : Comparaison des différents pas de temps des chroniques des débits quand cela est possible ; les points rouges présentent la corrélation entre l'annuel à partir des données journalières en fonction de l'annuel à partir des données mensuelles ; les triangles bleus présentent l'annuel à partir des données journalières en fonction des données annuelles ; les "plus" verts montres les données des mensuelles en fonction des données annuelles ; lorsque les données sont verticales ou horizontales sur des axes au négatif cela veut dire que c'est des lacunes relatives au pas de temps illustré.

Sachant que les données sont issues de deux agences de l'ANRH, celles d'Alger et d'Oran, donc les erreurs peuvent être produites par les traitements effectués lors de l'agrégation

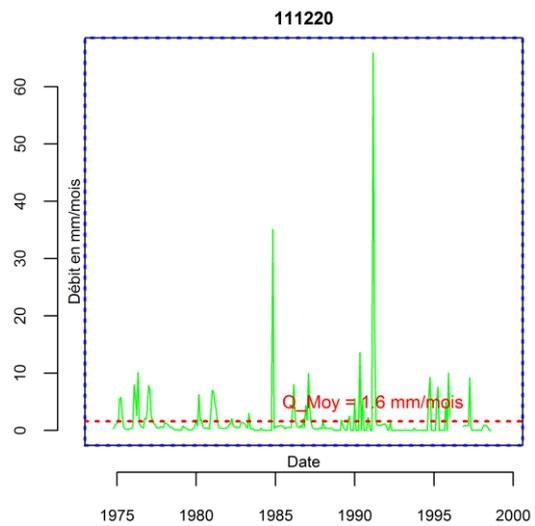
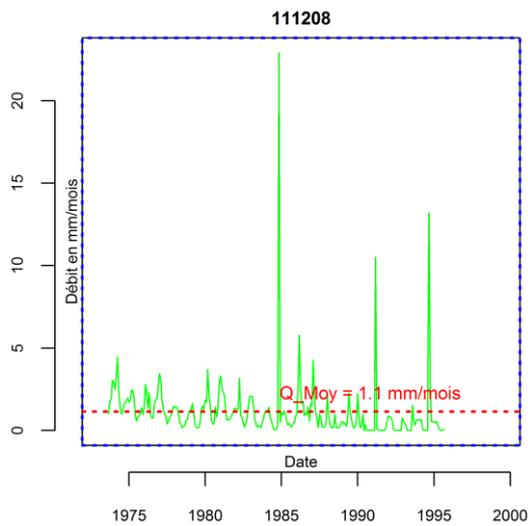
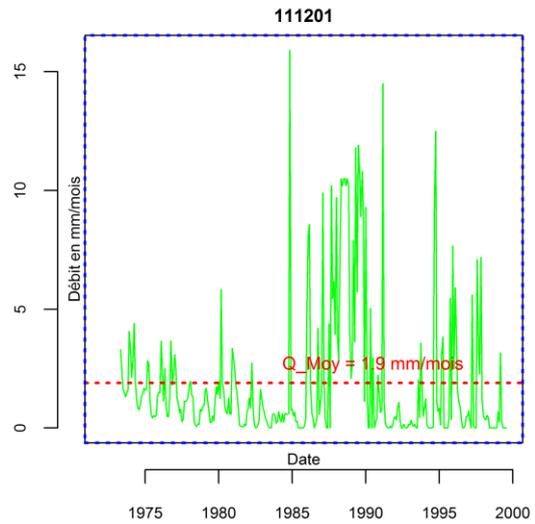
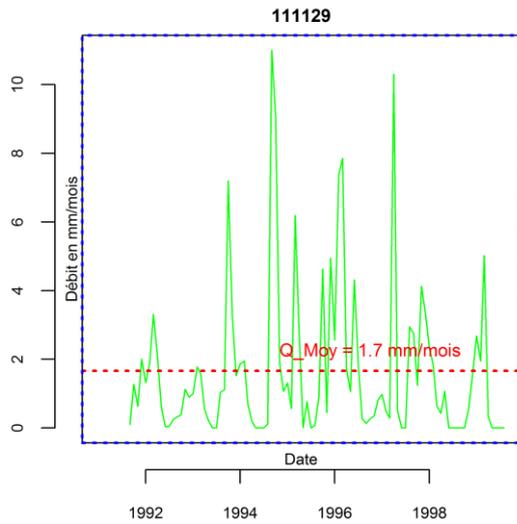
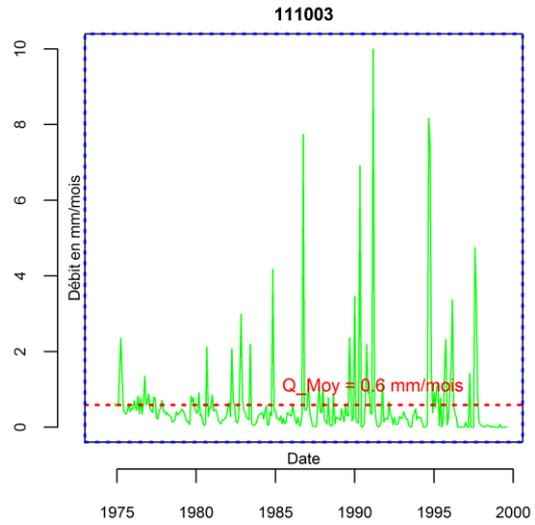
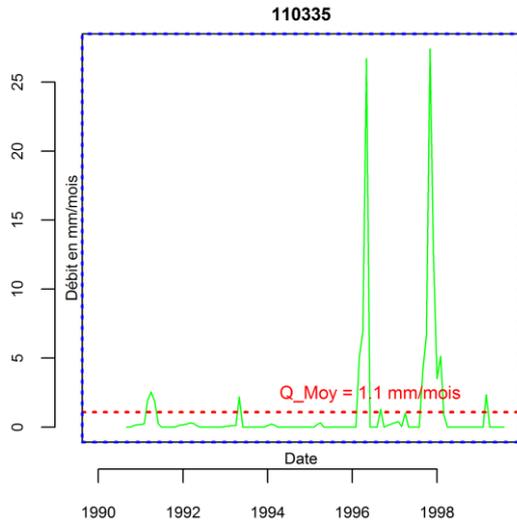
à de pas de temps plus larges, et notamment le comblement de lacunes de ces chroniques durant leur transfert d'une agence à une autre.

Les graphes ci-dessus en figure 3.15 nous montrent qu'il peut y avoir une indépendance entre les données de pas de temps différents comme celle illustrée dans le bassin "110506", à cet effet le choix des données se repose si au moins y a une corrélation entre deux pas de temps si cela est possible.

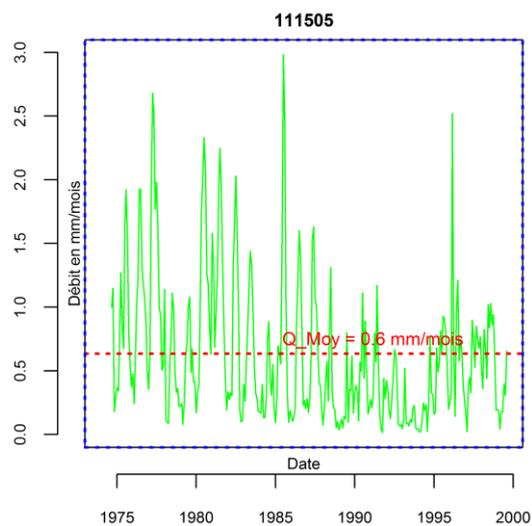
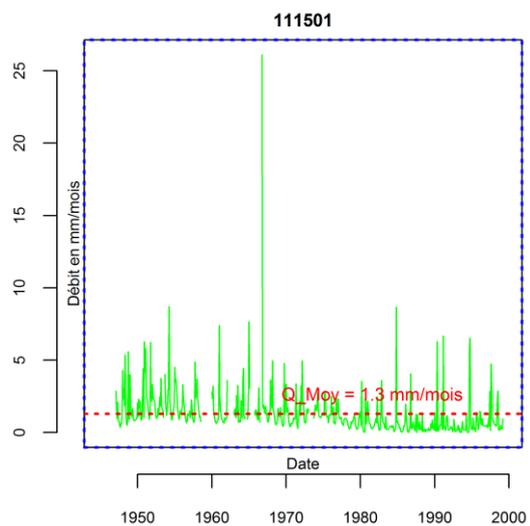
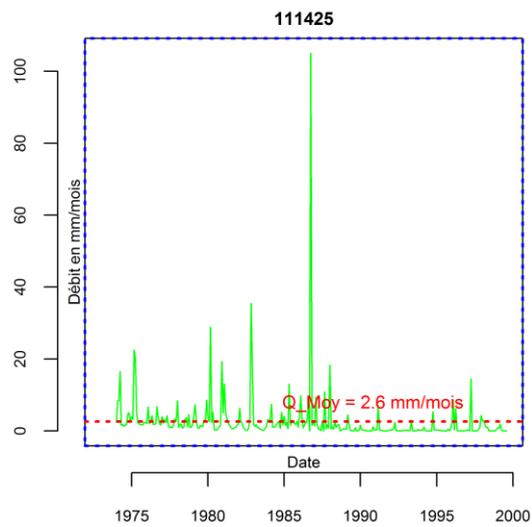
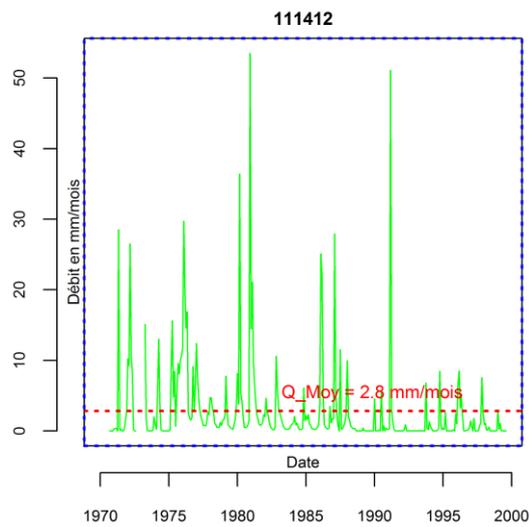
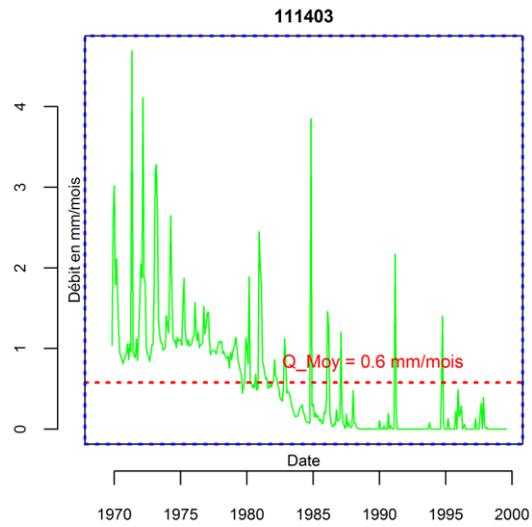
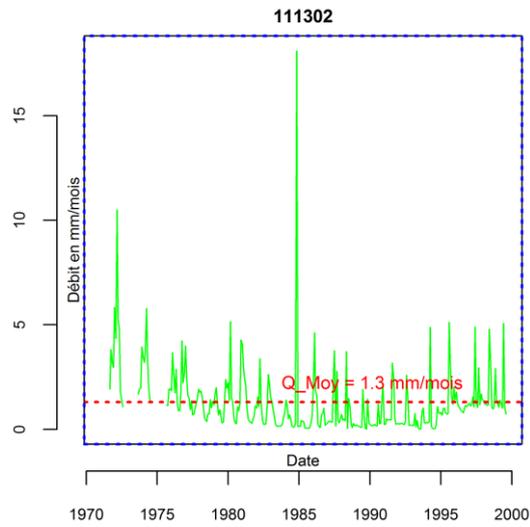
A l'issu de ce choix on a tracé les hydrogrammes annuels des chroniques de débit des sous bassins à leurs exutoires dans les figures ci-après (Figure 3.16):



III- PRÉSENTATION DU BASSIN



III- PRÉSENTATION DU BASSIN



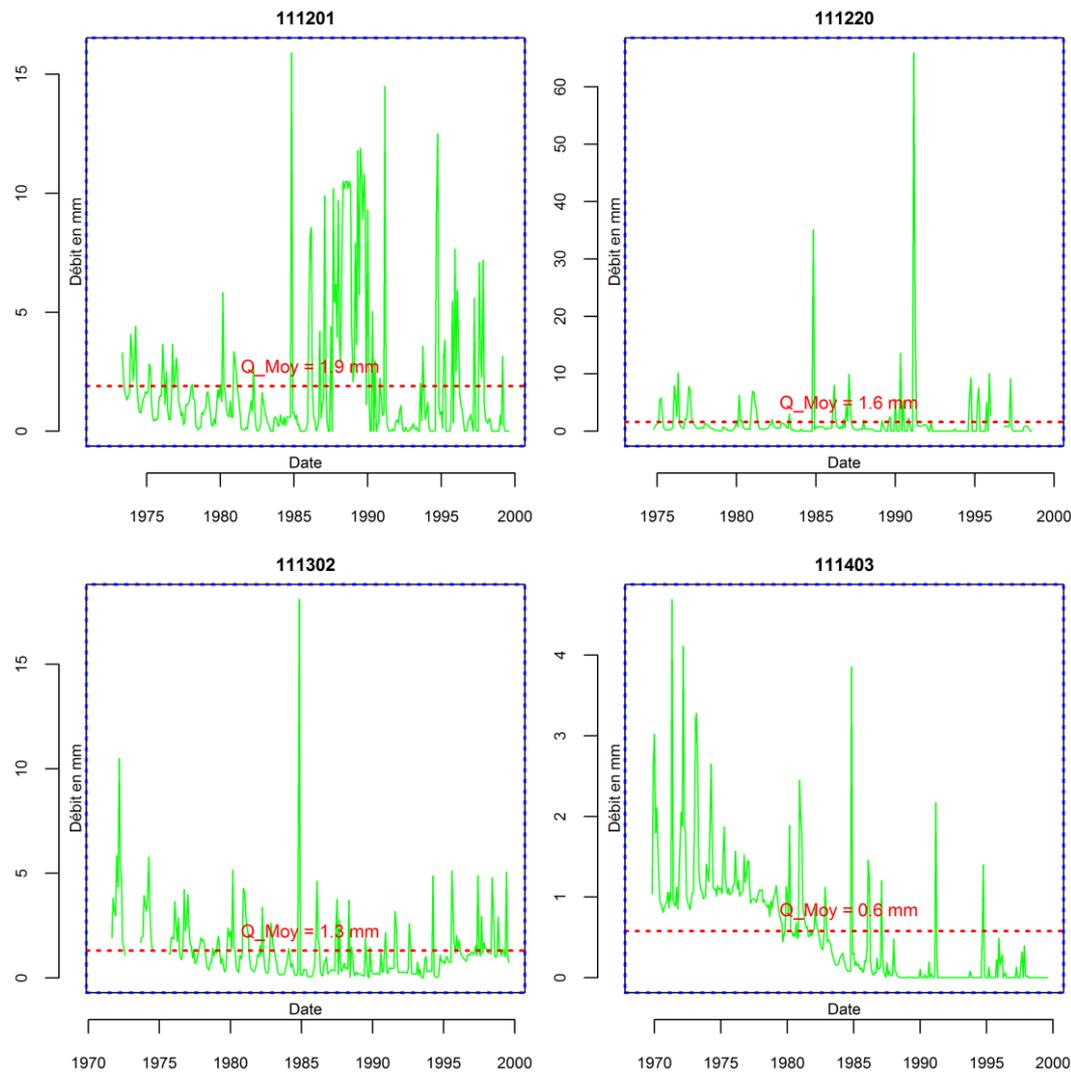


Figure 3.16 : Hydrogrammes des débits des sous bassins

D'après ces hydrogrammes nous pouvons constater que les moyennes interannuelles des lames d'eau varient entre 0.4 à 2.8 mm/mois avec des pics qui peuvent atteindre de 5 à 50 fois les modules.

La région étudiée est caractérisée, d'après ces hydrogrammes, par des variations dans le temps ; en effet, on peut voir la non-stationnarité des écoulements à l'échelle interannuelle avec des années sèches au-dessus de la moyenne et qui peuvent persister plusieurs années (bassins 111208, 111302 et 111403), ce qui donne à ce bassin sa nature aride.

En contrepartie, on peut constater des pics des débits qui témoignent sur les crues survenues sur cette région avec une ampleur qui peut dépasser dans certain cas 50 fois le débit moyen.

Une constatation est aussi faite sur l'indépendance de la grandeur des moyennes des lames d'eau avec les surfaces des sous bassins. Effectivement, à ce stade il est difficile de faire un rapport entre la surface du bassin versant et sa lame d'eau écoulée moyenne interannuelle.

3.4 Conclusion

Le bassin de la Macta est situé dans l'ouest de la bande septentrionale sur une assiette, pédo-géo-morphologiquement variée et spécifique à la région. En effet, les sols sont moins couverts avec des fortes pentes dans certaines zones, ce qui influence sa réponse hydrologique.

Cette région, dont le bassin de la Macta fait partie, est soumise à un climat plutôt aride avec deux saisons, l'une estivale caractérisée par une période dominante chaude et sèche, l'autre hivernale définie par une période courte froide et humide.

La pluviométrie est variable dans le temps et dans l'espace, effectivement, la non-continuité du régime pluviométrique change d'un endroit à un autre en fonction des conditions atmosphériques, du relief, de l'emplacement par rapport à la mer Méditerranée.

La non-stationnarité est constatée dans le temps car les précipitations peuvent être produites d'une façon localement brutale avec de fortes intensités, par conséquent les écoulements réagissent de la même façon, selon le comportement hydrologique du bassin.

Les températures se comportent d'une manière homogène dans le bassin avec quelques différences d'un lieu à un autre mais en général les températures maximales sont enregistrées aux mois de juin à août et les minimales sont notées aux mois de décembre à février. Cette posture est parfaitement applicable à l'évapotranspiration potentielle "ETP" et dont les chroniques sont obtenus à partir de la formule d'Oudin (2004).

Quant aux écoulements, ils se comportent de la même manière que la pluviométrie, i.e. le régime hydrologique est non-stationnaire dans le temps comme dans l'espace, en outre, les cours d'eau en leur majorité sont à secs sauf dans en périodes d'orages.

Dans les deux principaux cours d'eau il existe des ouvrages qui contrôlent l'écoulement et soutiennent les étiages.

CHAPITRE IV :

ANALYSE DES TENDANCES DES VARIABLES HYDRO-CLIMATIQUES

4. 1. Introduction

Les conditions climatiques qui prédominent depuis presque quatre décennies ont un impact négatif sur la ressource en eau, en particulier sur le bassin de la Macta. Il est par conséquent nécessaire de suivre rigoureusement et périodiquement la quantité de cette ressource, d'analyser sa tendance et de s'interroger sur les facteurs influençant cette tendance.

Dans cette partie, nous allons utiliser les tests classiques et séquentiels de Mann Kendall afin de déceler les tendances des variables hydro-climatiques à savoir le débit, la pluie et la température de l'air, au pas de temps annuel sur l'ensemble des sous bassins de la Macta.

La connaissance des modifications des variables hydro-climatiques et leurs impacts sur la ressource en eau disponible est essentielle (Massei et al. 2010). Le climat de la Terre a considérablement changé depuis l'ère préindustrielle (Houghton, Callander, and Varney 1992; Change 2007), et puisque le climat et le cycle de l'eau sont intimement liés, un changement dans l'un de ces deux systèmes peut induire une variation dans l'autre (Kundzewicz and Schellnhuber 2004). Toutefois, les écoulements ne sont pas uniquement régis par le climat, mais aussi (le cas échéant), par des influences d'origine anthropique. La sécheresse observée ces dernières décennies en Algérie pose la question de savoir si elles sont dues exclusivement au changement climatique (Mohamed Meddi and Hubert 2003; M. Meddi et al. 2009; Mohamed Meddi, Boucefiane, and Belabbes 2013; Mohamed and Talia 2013; Hallouz, Meddi, and Mahe 2013). En effet, la construction de barrages par exemple, peut modifier le bilan hydrique et le régime d'un cours d'eau. Les modifications qui peuvent être apportées à la couverture du sol (occupations de sols) peuvent également modifier la relation pluie-débit (Nascimento 1995). Enfin, les différents prélèvements en rivières et en nappes peuvent également modifier les régimes d'écoulement, surtout en étiage (Galéa et al. 2005) et particulièrement dans les régions arides.

4. 2. Données et méthodologie

Malgré le nombre important de méthodes utilisées pour l'analyse des tendances, aucune n'a été désignée comme standard. Néanmoins, le test de Mann-Kendall est un test largement utilisé en sciences de l'environnement, et plus particulièrement en hydrométéorologie pour sa simplicité et sa robustesse (Adamowski et al., 2009). Cependant, le test de Mann-Kendall fait l'hypothèse que la variable étudiée est indépendante, ce qui n'est pas toujours vérifié en hydrologie (Khaliq et al., 2009). En outre, l'idée de base des tests statistiques couramment

utilisés dans l'estimation des tendances, est que les tendances doivent être lissées et monotones. Or, les variables hydro-climatiques contiennent de multiples signaux, et ont des segments de tendances à la hausse et à la baisse (Adamowski et al., 2009), d'où la nécessité de trouver une méthode permettant de palier à ce problème. Le test Séquentiel de Mann-Kendall permet de détecter les tendances, même si elles ne sont pas monotones, en donnant en plus l'information sur la date de commencement de la tendance. En hydrologie et en météorologie, de nombreuses études se sont basées sur ce test statistique (Zhang et al., 2006 ; Partal et Kahya, 2006). Un des avantages de ce test est qu'il résiste à l'influence des valeurs extrêmes et aux variables asymétriques, aussi la normalité de la distribution n'est pas nécessaire (Partal et Küçük, 2006).

4. 3. Test classique de tendance de Mann-Kendall

Ce test vérifie si il y a une tendance dans les données de séries chronologiques. Il s'agit d'un test non-paramétrique robuste à l'influence des extrêmes et permet son application à des variables biaisées (Hamed 2008). Plus particulièrement, ce test de tendance non paramétrique est le résultat d'une amélioration du test d'abord étudié par Mann (1945) puis repris par Kendall (1975) et finalement optimisé par ((Hirsch and Slack 1984; Dennis R. Helsel and Hirsch 1992; D. R. Helsel and Hirsch 2002).

L'hypothèse nulle H_0 de ce test est qu'il n'y a pas de tendance. Les trois hypothèses alternatives de tendance négative, non nulle ou positive peuvent être choisies. Les tests de Mann-Kendall s'appuient sur le calcul du paramètre " τ " de Kendall mesurant l'association entre deux échantillons et lui-même basé sur les rangs à l'intérieur des échantillons.

L'hypothèse alternative H_1 d'un test bilatéral en ce que les distributions de x_k et x_j ne sont pas identiques pour tous les $k_j \leq n$ avec $k \neq j$.

S statistique de test est donnée ci-dessous (Partal and Kahya 2006):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad \text{eq.6}$$

Où " $\text{sign}()$ " est le signe de la soustraction entre deux nombres qui se suivent chronologiquement respectivement x_k, x_j . S, dans les cas où la taille de l'échantillon n est plus grande que 10, est supposée être asymptotiquement normale, avec une espérance mathématique $E(S) = 0$ et une variance $V(S)$ égale à :

$$V(S) = [n(n - 1)(2n + 5) - \sum_t t_i(t_i - 1)(2t_i + 5)] \times 1/18 \quad \text{eq.7}$$

Où t_i est le nombre des valeurs de données (rang) et $\sum t$ indique la sommation sur tous les liens. La variable normale réduite Z est calculée comme suit (Partal and Kahya 2006; Y. Zhang et al. 2011) :

$$.Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} \text{ si } S > 0 \\ 0 & \text{ si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} \text{ si } S < 0 \end{cases} \quad \text{eq.8}$$

Par conséquent, dans le cas où $|Z| \leq Z_{1-\alpha/2}$, l'hypothèse H_0 doit être acceptée au niveau d'un seuil de signification. Une valeur positive de S signifie une tendance à la hausse, le contraire, c'est une tendance à la baisse.

Pour une description détaillée de ces tests, le lecteur peut se référer à (Kundzewicz and Schellnhuber 2004).

Les tests de tendance ont été conduits sur une période commune à tous les bassins s'étendant de 1975 à 2005, représentant une période dans laquelle les données pluviométriques et hydrométriques sont jugées fiables, sauf pour certain sous-bassins malgré qu'ils disposent des courtes chroniques, mais on les a présenté.

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-après :

Tableau 4.1 : Tendances hydro-climatiques au niveau des sous bassin de la Macta. Le signe ‘-’ indique une tendance significative à la baisse (à 95%), le signe ‘+’ indique une tendance significative à la hausse (à 95%), et ‘0’ indique qu’aucune tendance significative n’est décelée.

Code "11-"	0101	0201	0301	0506	1003	1127	1208	1220	1302	1403	1412	1425	1501	1505	1518	Σ
P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	3
T	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	14
Q	0	0	0	-	0	0	-	-	0	-	-	0*	0	-	-	6

a- Test séquentiel de Mann-Kendall

Il est connu le paramètre sous le nom de statistique " τ " de Kendall, est utilisé pour tester l'hypothèse d'un point de commencement de la tendance dans l'échantillon (Y. Zhang et al. 2011) L'hypothèse nulle H_0 signifie que l'échantillon étudié ne montre pas de point de début de tendance. Ce test considère les valeurs relatives des rangs de tous les termes dans la série temporelle (x_1, x_2, \dots, x_n) (Karpouzou et al. 2011).

La variable t_j du test statistique est calculée comme suit :

$$t_j = \sum_{k=1}^{j-1} n_j \quad \text{eq.9}$$

Où n_j donne pour chaque élément x_j ($j > k$) le nombre de cas où $x_j > x_k$, avec $j=1, n$ et $k=1, j-1$.

Notons que la distribution de t_j est asymptotique à la distribution normale avec comme paramètres la moyenne "E" et la variance Var de la statistique définies comme suit :

$$E(t_j) = \frac{j(j-1)}{4} \quad \text{eq.2} \quad \text{et} \quad \text{Var}(t_j) = \frac{j(j-1)(2j+5)}{72} \quad \text{eq.10}$$

Notée $u(t)$ elle est calculée pour chacune des variables t_j du test statistique comme suit :

$$u(t_j) = \frac{t_j - E(t_j)}{\sqrt{\text{Var}(t_j)}} \quad \text{eq.11}$$

De façon similaire au calcul de $u(t)$, qui est un calcul progressif, le calcul régressif de $u'(t)$ est effectué en commençant par la fin de l'échantillon.

Les valeurs séquentielles $u(t)$ et $u'(t)$ issues d'analyses progressive et régressive du test de Mann-Kendall respectivement ont été déterminées dans le but d'observer les changements de tendances dans le temps (Buffoni, Maugeri, and Nanni 1999). Dans ce cas, $u(t)$ est une valeur standardisée ayant une moyenne nulle et un écart-type unitaire. Ainsi, son comportement séquentiel fluctue autour du niveau zéro (Partal and Küccük 2006).

Il y a une tendance (l'hypothèse H_0 doit être rejetée) si au moins une des deux variables réduites $u(t)$ ou $u'(t)$ a une valeur absolue dépassant le niveau de signification de la distribution gaussienne choisie, dans notre cas $\alpha = 95\%$, donc si :

$$|u(t_j)| \geq u(t_j)_{1-\frac{\alpha}{2}} \quad \text{eq.12}$$

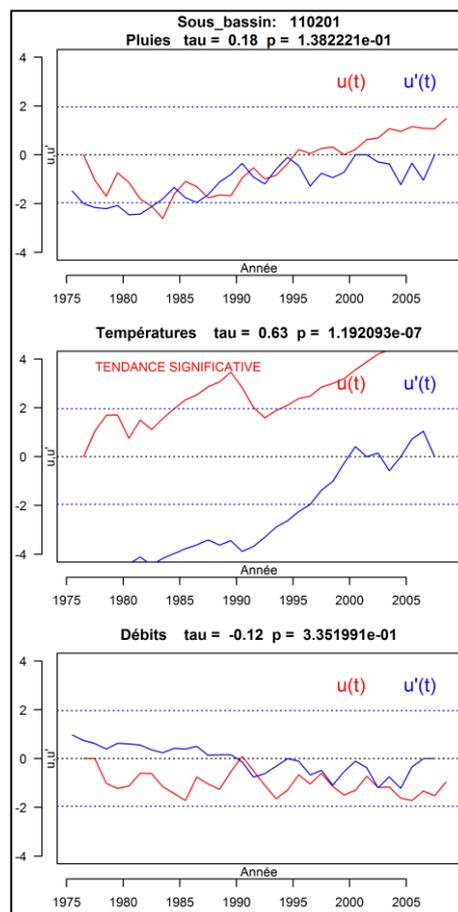
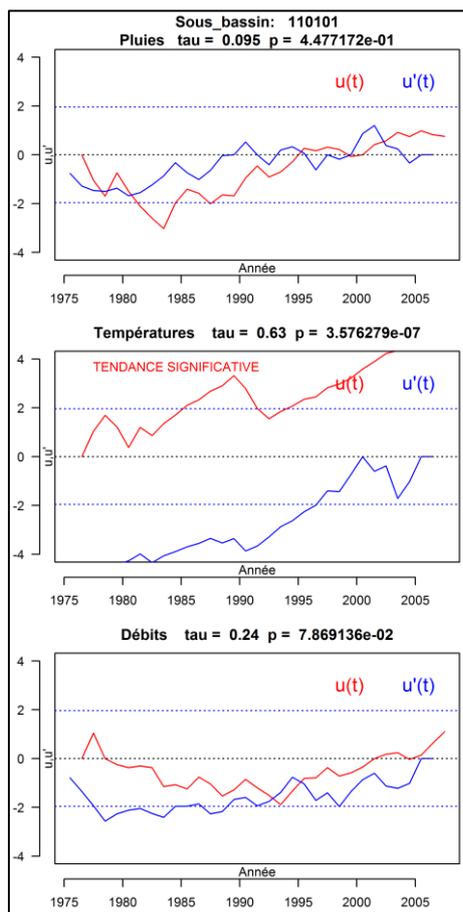
L'abscisse de l'intersection progressive $u(t)$ et régressive $u'(t)$ donne la date du début de la tendance.

Le test de Mann-Kendall permet de confirmer ou pas l'existence d'une tendance (à la hausse ou à la baisse) sur une série chronologique.

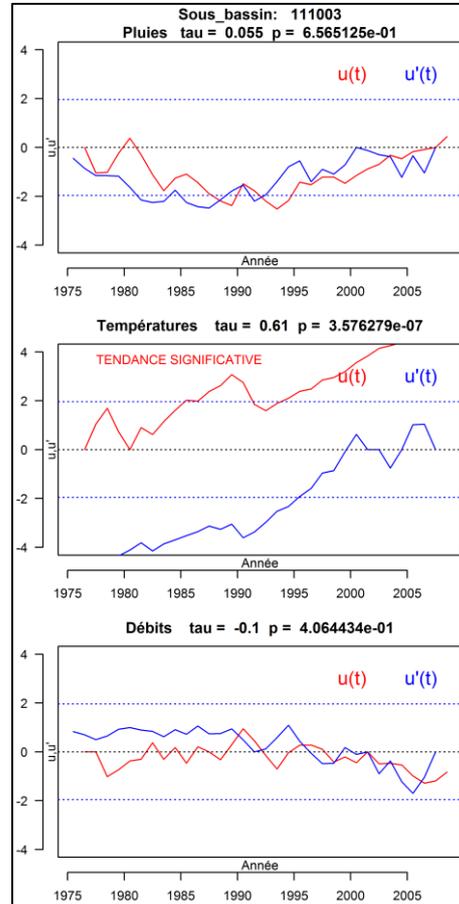
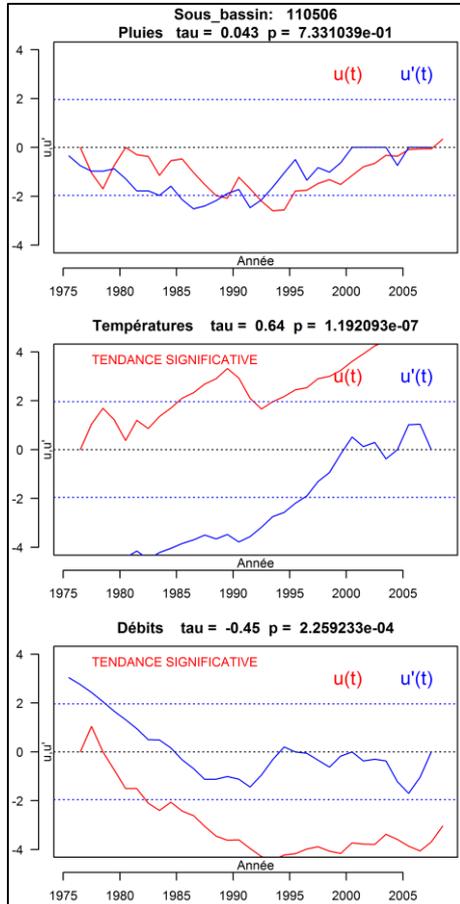
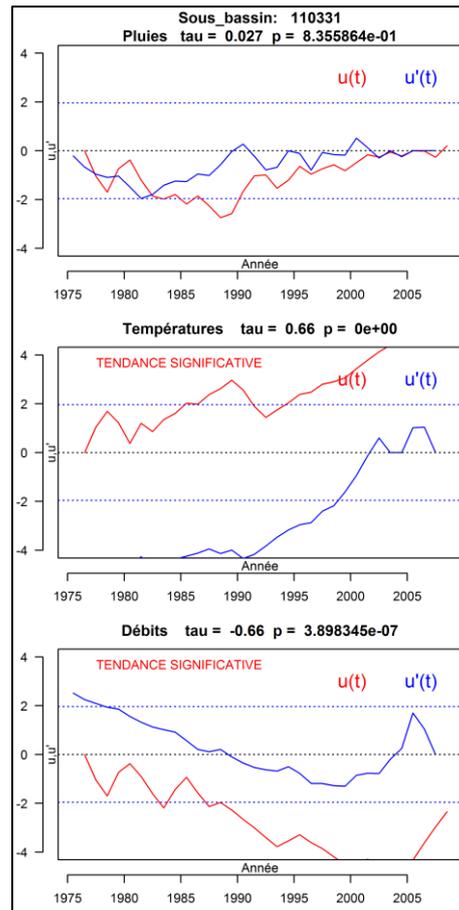
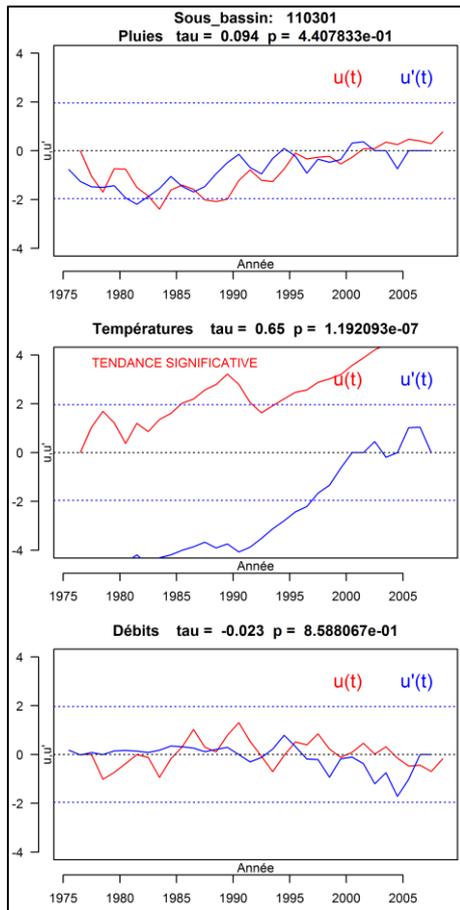
Les résultats sont présentés en figures ci-après (Figure 4.1) : les deux courbes relatives à $u(t)$ et $u'(t)$ sont représentées ; p (p_value) est la probabilité de la variable réduite, si sa valeur

absolue soit supérieure à 0,95 (l'intervalle de confiance prédéfini), cela confirmera une tendance significative.

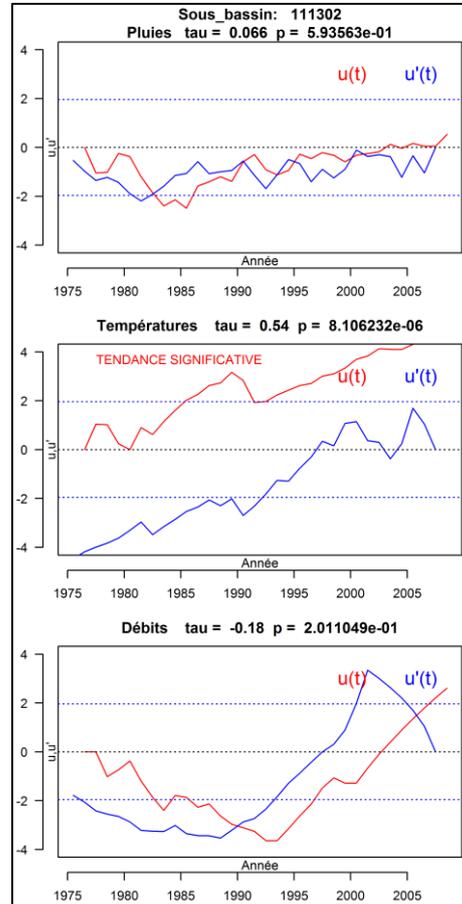
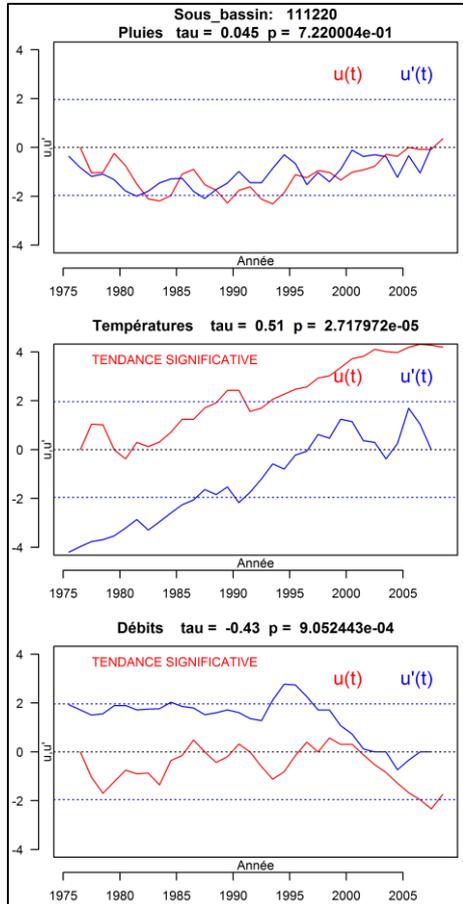
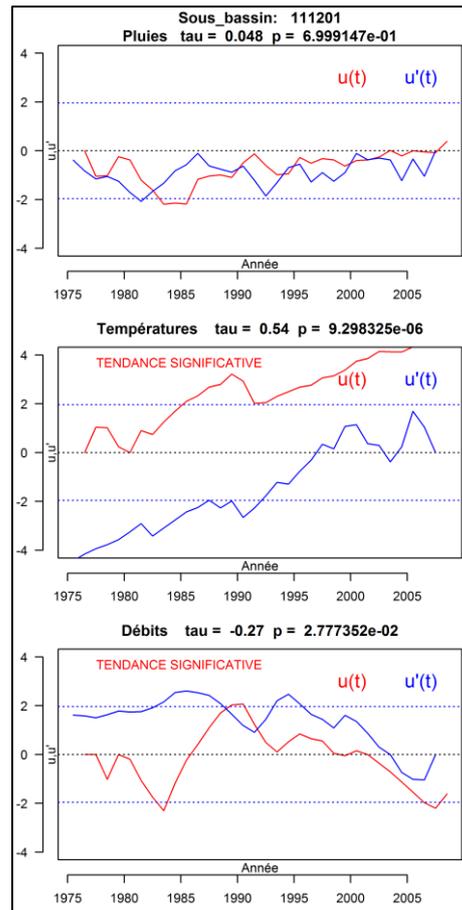
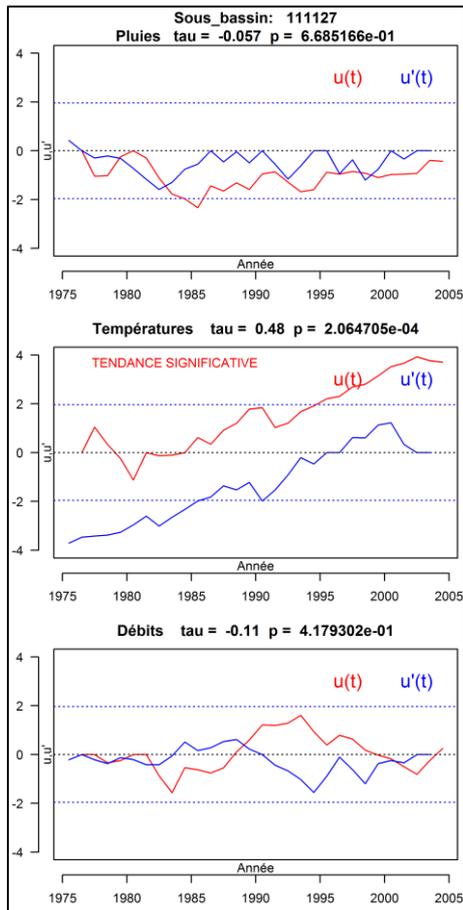
Le croisement des deux courbes montre les points de rupture dans la chronique mise en considération.



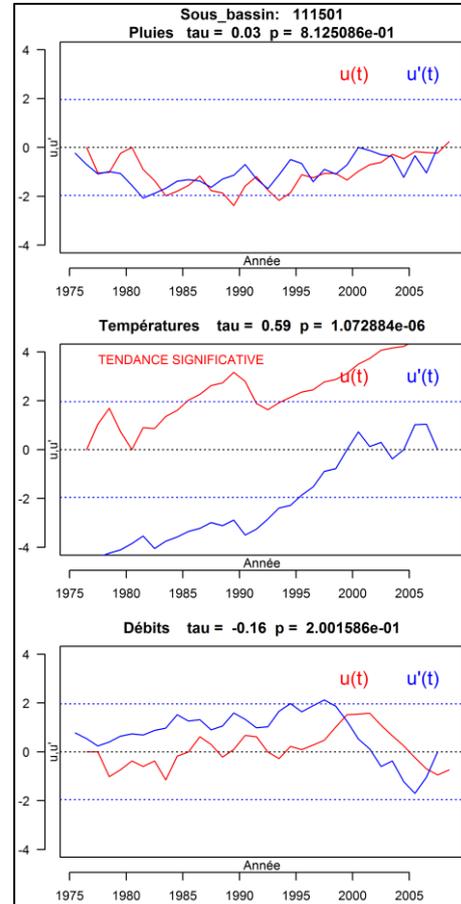
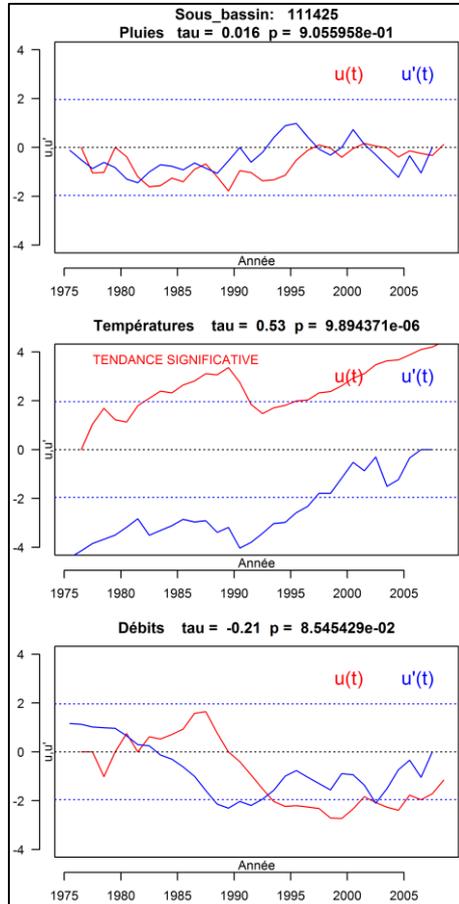
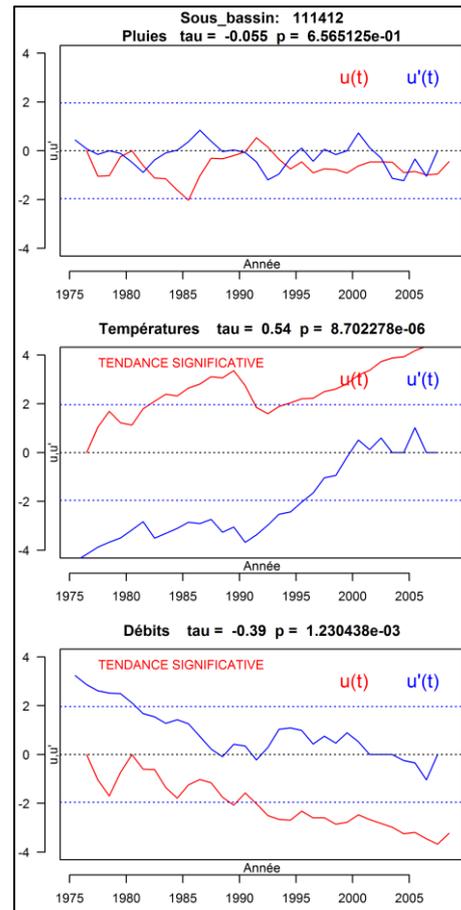
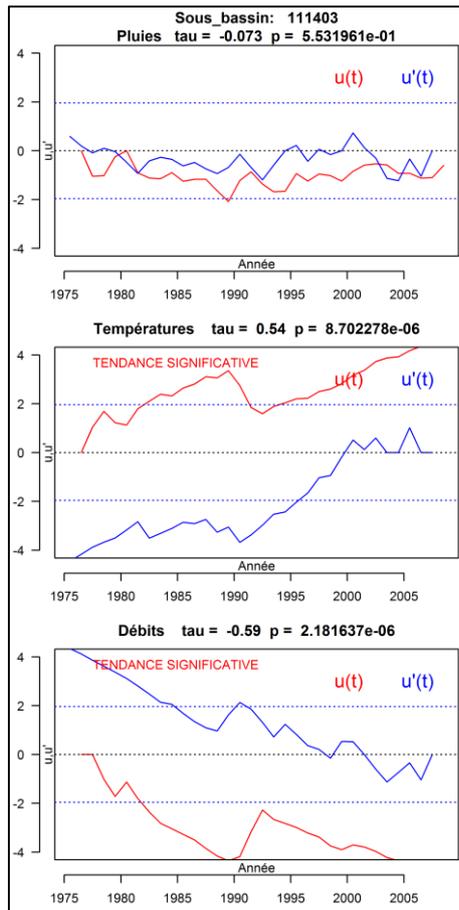
IV- ANALYSE DES TENDANCES DES VARIABLES HYDROCLIMATIQUES



IV- ANALYSE DES TENDANCES DES VARIABLES HYDROCLIMATIQUES



IV- ANALYSE DES TENDANCES DES VARIABLES HYDROCLIMATIQUES



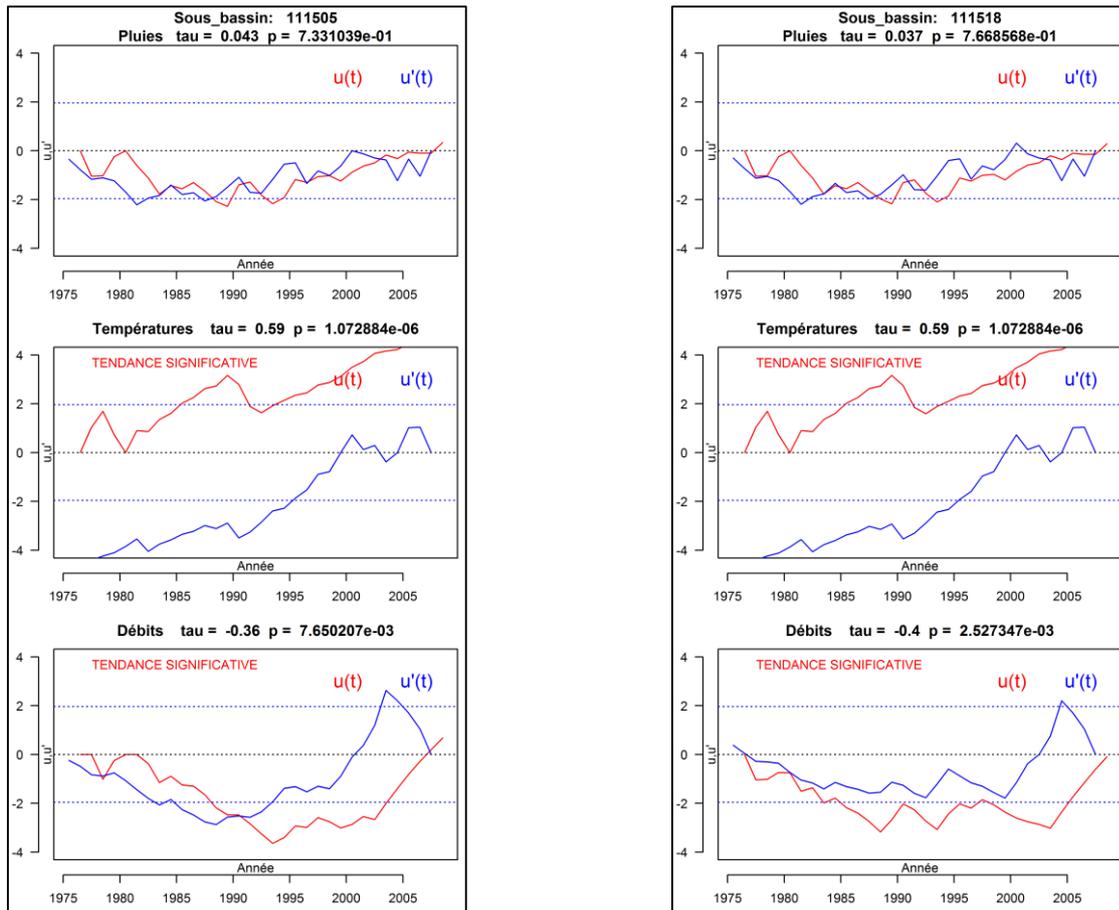


Figure 4.1 : Tendances des chroniques de pluies, température et débit dans un intervalle de confiance égal à 95% correspondant à une variable réduite égale à 1.96.

b- Test de Pettitt

De la réputation de ce test de détection de rupture en témoigne l'existence de multiples applications (Demarée, 1990 ; Sutherland et al., 1991 ; Vannitsem et Demarée, 1991), ce qui justifie qu'il soit ici retenu.

La série étudiée est divisée en deux sous-échantillons respectivement de taille m et n .

Les valeurs des deux échantillons sont regroupées et classées par ordre croissant. On calcule alors la somme des rangs des éléments de chaque sous-échantillon dans l'échantillon total. Une statistique est définie à partir des deux sommes ainsi déterminées, et testées sous l'hypothèse nulle d'appartenance des deux sous-échantillons à la même population (Pettitt, A. N. 1979). C'est quasiment la même procédure que le test d'homogénéité.

L'hypothèse nulle H_0 du test est l'absence de rupture dans la série chronologique.

La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant t variant de 1 à n , les séries x_i , t_i , de taille n appartiennent à la même population.

Soit $D_{ij} = \text{sign}(x_i - x_j)$ eq.

Avec $\text{sign}(x) = 1$ si $x > 0$, 0 si $x = 0$ et -1 si $x < 0$.

On considère la variable $U(t, n)$ telle que :

$$U_{t,n} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n D_{ij} \tag{Eq 13}$$

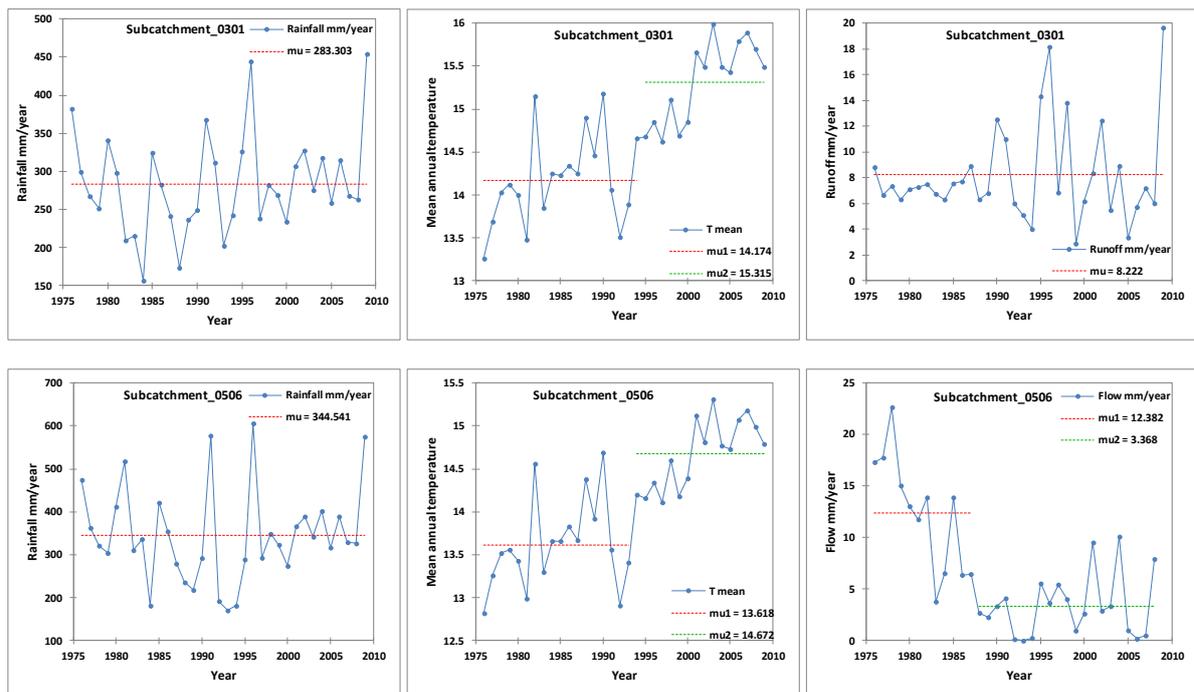
Soit K_n la variable définie par le maximum en valeur absolue de U_t , n pour t variant de 1 à $n-1$. Si k désigne la valeur de K_n prise sur la série étudiée, sous hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur k est donnée approximativement par :

$$\text{Prob}(K_n > k) \approx 2 \exp(-6 k^2 / (n^3 + n^2)) \tag{Eq 14}$$

Pour un risque α (dans la plupart des cas on prend $\alpha = 0.95$), si $\text{Prob}(K_n > k)$ est inférieure à α , l'hypothèse nulle est rejetée.

Pour plus de détail les lectures peuvent se référer à (Pettitt 1979; Renard 2006).

Les figures suivantes (figure 4.2) montrent l'application du test de Pettitt sur les chroniques.



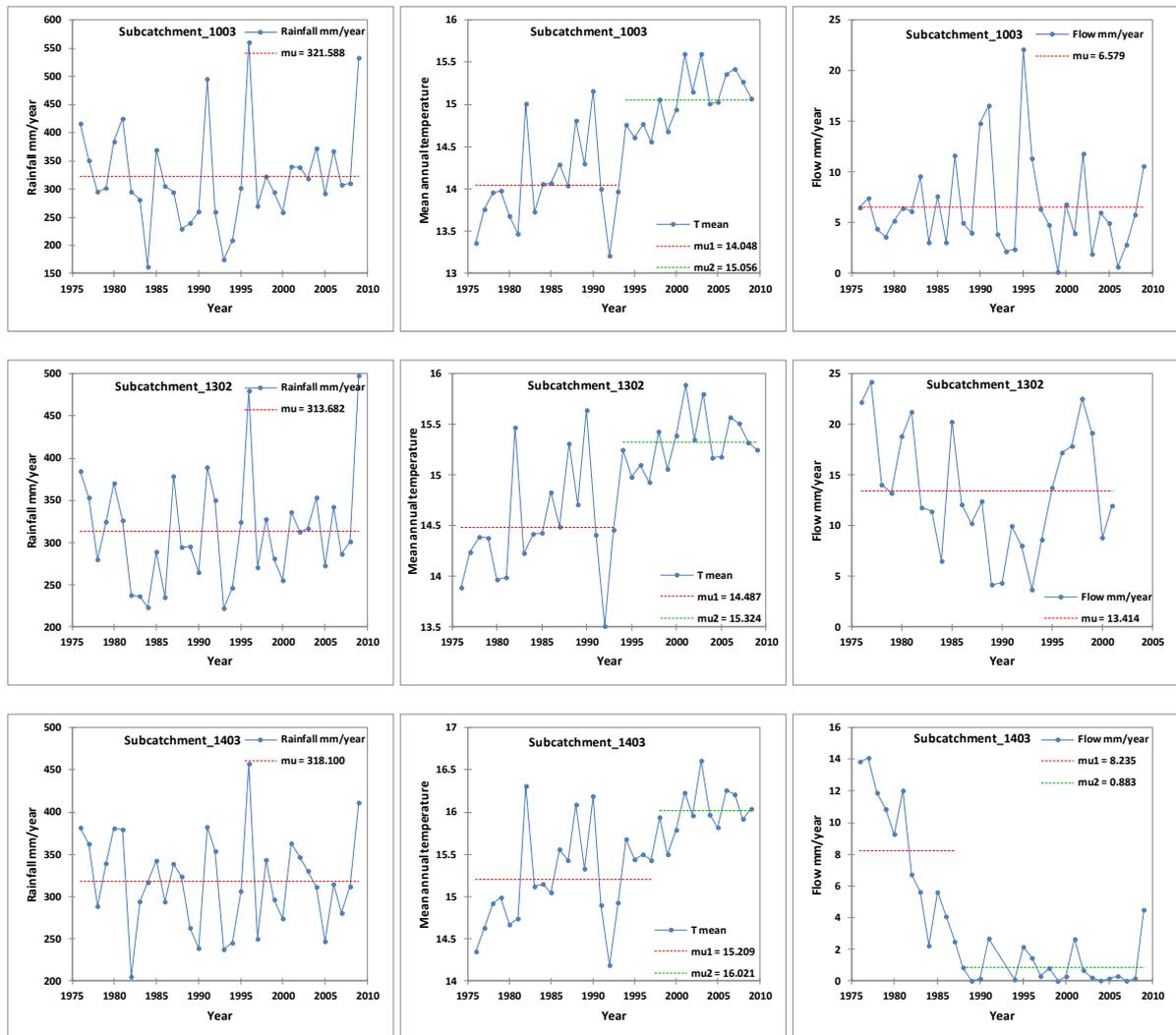


Figure 4.2 : Détection des ruptures par le test de Pettitt sur les chroniques de : pluies, température et débit dans un intervalle de confiance égal à 95%

c- Résultats

Sur les 15 bassins versants étudiés, il a été constaté ce qui suit :

- ✓ 3 tendances significatives à la baisse sont mises en évidences lorsque les séries de pluies de bassins sont considérées ;
- ✓ 14 tendances significatives à la hausse sont mises en évidences lorsque les séries de températures sont considérées ;
- ✓ 6 séries de débits présentent des tendances significatives à la baisse.
- ✓ Quant au test de Pettitt il nous a permis de détecter des ruptures autour des années (1994 à 1997),

La distribution spatiale des tendances des trois variables est illustrée ci-après (figure 4.3). Chaque station hydrométrique est symbolisée par trois cercles qui décrivent la pluie, la température et le débit de chaque sous bassin avec trois couleurs : le blanc indique aucune tendance, le rouge une tendance vers la hausse et le bleu une tendance à la baisse.

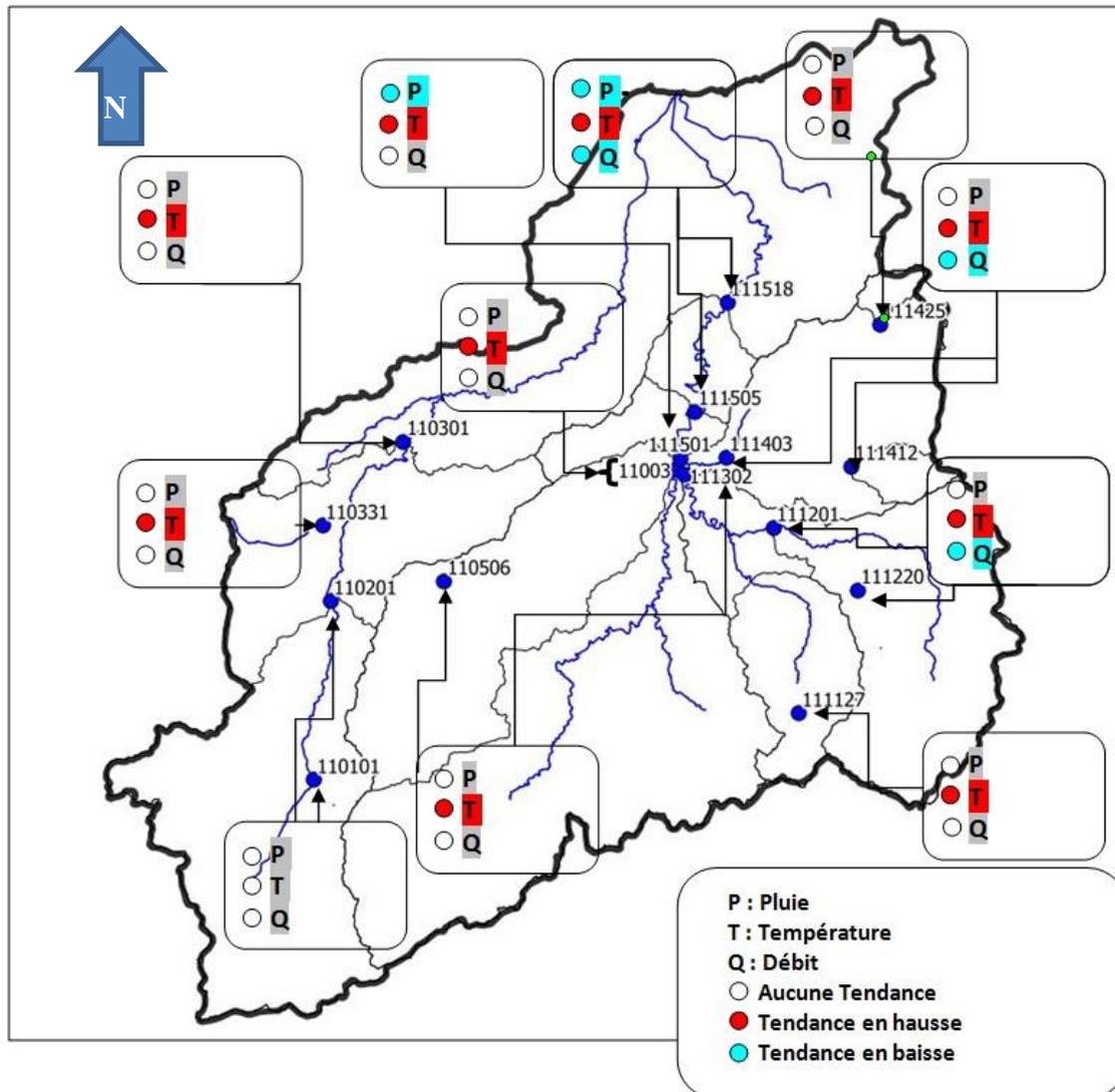


Figure 4.3 : Tendances des pluies, températures et débits annuels des sous bassin de la Macta sur la période 1975-2005.

La tendance à la baisse dans les chroniques de pluie n'est observée que sur le grand sous bassin "111518", drainé par le cours d'eau principal "Oued Hamam", ce qui permet de dire que les tendances peuvent être liées à la surface considérée. Notons que les pluies pondérées sont calculées par la méthode de Thiessen et donc plus le bassin est grand plus le nombre de postes pluviométriques pris en compte est grand.

Pour les séries de températures, on constate qu'il existe une tendance à la hausse sur l'ensemble du bassin de la Macta excepté le sous bassin qui se trouve au sud-ouest, au relief très accentué et d'aspect montagneux qui forme de hautes vallées de la steppe atteignant une altitude de 1200m d'altitude, ce qui soutient l'hypothèse de l'influence du réchauffement climatique sur le bassin de la Macta..

Ensuite, on remarque qu'il n'y a pas de tendances significatives dans les séries de débit, que sur la partie ouest du bassin, en réalité, cette partie est connue par l'irrigation intensive sur les cultures de maraichages à partir de prélèvement d'eau souterrain ou de surface, ce qui peut conduire à la diminution de l'écoulement tout au long de réseau.

Les séries de pluies et de débits observées sur un grand nombre de sous-bassins de la Macta, ne dévoilent pas de tendances significatives à la baisse. A l'inverse, les séries de températures sont caractérisées par des tendances significatives à la hausse.

Nous concluons que la baisse des débits constatée sur la partie Est du bassin de la Macta est probablement liée au réchauffement climatique qui engendre une hausse des évapotranspirations moyennes annuelles, et un accroissement des températures moyennes annuelles. Cela reste à vérifier par un modèle hydrologique car dans ces régions, où l'eau est le facteur limitant à l'évapotranspiration, une augmentation de l'ETP ne s'accompagne pas toujours d'une baisse significative de l'écoulement.

Toutefois, pour le reste des sous bassin, aucune tendance significative n'est détectée pour les séries de débit. Cette différence de comportement entre les sous-bassins étudiés reste à être expliquée soit par des comportements hydrologiques différents et des bassins plus sensibles à la hausse des températures (du fait de la plus grande disponibilité en eau sur la partie Est), soit par une pression anthropique plus importante sur ces bassins. En effet, la baisse des débits a pu être amplifiée par les prélèvements en nappe. La figure 4.4 montre l'accroissement temporel du nombre de forages et de leurs débits d'exploitation par unité de surface sur l'ensemble du bassin de la Macta lors de la période 1974-1996.

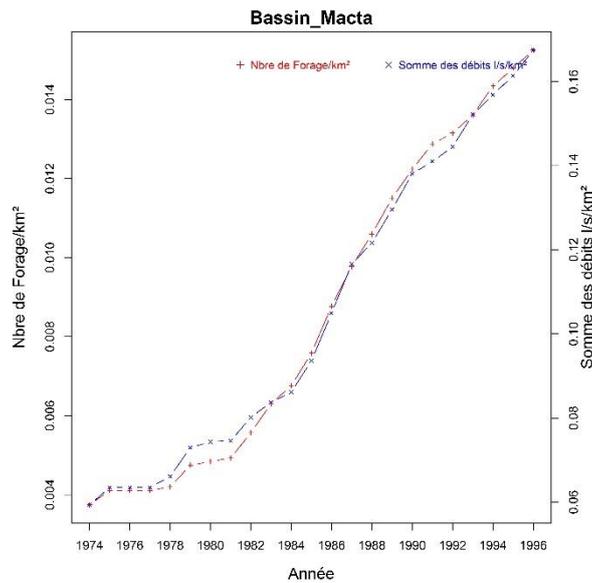


Figure 4.4 : Evolution temporelle du nombre de forages et leurs débits exploités dans la Macta

4.4. Conclusion

Le bassin de la Macta n'avait pas recours aux eaux souterraines jusqu'à 1960 du fait de l'abondance des sources d'eau potable. Après 1970, la croissance démographique, le développement de l'agriculture et de l'industrie ont conduit à l'exploitation des eaux souterraines, dont le débit exploité est passé de **0 à plus de 2000 l/s sur l'ensemble du bassin de la Macta** (forages jugés licites par l'Agence des Bassins Hydrographiques "ABH" & les Directions des Ressources en Eau "DRE").

Par ailleurs, il est important de souligner que le nombre effectif de forages, ainsi que leurs débits d'exploitation restent très incertains, et doit être considérablement supérieur à ce qui est montré en figure 4.4, qui indique uniquement les chiffres des forages autorisés.

Enfin, la détection de tendances des variables hydroclimatiques suivie dans cette étude a été réalisée en suivant un seul test statistique, l'utilisation d'autres tests de tendance permettrait d'étayer les résultats obtenus.

La prochaine étape de notre travail est d'essayer de quantifier la part de la baisse imputable au climat uniquement. Une approche de modélisation hydrologique des bassins versants apparaît comme la seule façon de répondre à cette question.

CHAPITRE V :

MODELISATION HYDROLOGIQUE DES SOUS BASSIN DE LA MACTA

5.1. Introduction

La simulation du débit à l'exutoire d'un bassin versant est 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'impacts.

La conception des modèles hydrologiques a pour but de représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant. Elle met notamment en évidence une relation entre la pluie et le débit aux différents pas de temps.

Ce chapitre arbore les travaux de modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel, annuel et pluriannuel. Elle présente une approche de modélisation pluie-débit, à l'échelle mensuelle et annuelle suite à l'application des modèles pluie - débit "GR2M", "GR1A" et une version modifiée de "GR1A".

A l'échelle de temps pluriannuelle la modélisation se fera suite au modèle de Schreiber (1903), dérivé des modèles du bilan.

Ce travail expose les résultats de modélisation, les critiques et les conclusions qui en résultent.

Nous commençons par présenter les étapes de la modélisation pluie-débit au pas de temps mensuel ensuite annuel, suivi par un examen de l'applicabilité des modèles répertoriés à l'échelle de temps annuelle.

Nous nous intéresserons ensuite aux possibilités de conceptualisation des modèles interannuels, en proposant des structures plus efficaces à ce pas de temps.

5.2. Problématiques de la variabilité hydroclimatique

Comme cela était cité dans chapitre 1, le réchauffement du climat qui s'est fait sentir depuis plus d'une trentaine d'années et l'augmentation de la pression anthropique incitent les scientifiques sur la question de leurs impacts. En hydrologie le défi pour aborder sereinement ces questions est de comprendre et de théoriser les interactions qui existent entre le climat, l'homme et le cycle de l'eau.

Il convient d'admettre que la capacité de l'homme à traiter ces questions est limitée, étant donné le manque de connaissances et les incertitudes intrinsèques aux outils et méthodes utilisées. Certaines contraintes peuvent limiter l'utilisation de la modélisation hydrologique, telles que :

- Les incertitudes sur les scénarios climatiques qui limitent la portée des résultats obtenus ;
- Le volume des chroniques de données nécessaires pour le calage et la validation peut rendre la modélisation réalisable.
- La qualité des données influençant fortement les résultats.
- Le choix de la durée de la période d'initialisation et de calage du modèle.
- Les conditions extrêmes telles que les crues et les sécheresses qui sont mal prises en compte.
- Les caractéristiques pédologiques et morphométriques généralement non prises en compte explicitement par un grand nombre de modèles, dont ceux qui seront utilisés dans ce chapitre.

5. 3. Pourquoi notre choix s'est porté sur le modèle conceptuel GR?

Comme tout modèle hydrologique, les modèles GR opèrent une triple globalisation (triple considération de moyenne) du système bassin versant:

- au niveau des processus : les modèles GR proposent des relations comportementales simples à l'échelle du bassin, mises au point empiriquement et sans liens directs avec la physique des processus à petite échelle et pouvant représenter une moyenne de plusieurs processus;
- au niveau de l'espace: les modèles GR sont globaux, c'est-à-dire que, tout en reconnaissant l'extraordinaire hétérogénéité de tout bassin versant, ils considèrent le bassin versant comme un tout. Les tentatives de distribution progressive n'ont, jusqu'à présent, pas abouti à des résultats intéressants (Perrin, Michel, and Andréassian 2007).
- C'est le comportement de la moyenne spatiale qui est étudié en priorité; au niveau du temps : les modèles GR ont été développés pour des pas de temps de fonctionnement spécifiques : annuel (GR1A), mensuel (GR2M) et journalier (GR4J). Les différents modèles travaillent donc sur des moyennes temporelles. La spécificité du pas de temps, souvent négligée, est importante, une même structure de modèle n'étant pas également

performante à tous les pas de temps. Généralement, les structures sont d'autant plus simples que le pas de temps est long.

- Au cours de leur développement, les modèles GR ont tous été testés sur de larges échantillons de plusieurs centaines de bassins, particulièrement en France mais également aux Etats-Unis, en Australie, au Brésil, au Mexique, en Algérie ou en Côte d'Ivoire. D'autres équipes de recherche, des bureaux d'études et des services opérationnels ont par la suite utilisé ces modèles dans des conditions variées.
- Ces types de modèles n'ont besoin pour fonctionner que de données continues de pluie et d'évapotranspiration potentielle.
- Les modèles GR ont un faible nombre de paramètres, ce qui permet de limiter les problèmes de sur-paramétrisation et leur confère une bonne robustesse

Le développement des modèles étant un processus de longue haleine, nous présentons ici succinctement la version actuelle de deux modèles GR conçus respectivement pour les pas de temps annuel et mensuel.

Dans la suite, on désignera par P (mm) la hauteur de pluie, par E (mm) l'évapotranspiration potentielle (ETP) et par Q (mm) le débit simulé (mm). P est une estimation de la pluie de bassin, calculée par la méthode de Thiessen à partir de l'information pluviométrique disponible (postes au sol notamment). Toutes les variables internes des modèles sont exprimées en mm. E est une estimation de l'ETP par une formule utilisant la température de l'air. La température de l'air utilisée ici correspond aux températures de l'air des ré-analyses CRU (P. Brohan 2006 ; <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>)

Pour ce faire, nous avons opté d'utiliser les jeux de données relatifs aux sous-bassins admissibles, parmi ces bassins nous avons gardé ceux donnés au tableau 5.1.

Ce choix s'est fait sur la base de plusieurs critères à savoir la qualité des données, le nombre d'année de données disponibles, le nombre de lacunes dans les séries de pluie ou de débit.

Notons que les chroniques des variables n'ont pas la même année de départ ni la même année de fin de série.

Tableau 5.1 : Sous-bassins modélisées par le modèle GR2M

Bassin	Nom	Surface,km ²	\bar{P} mm/an	\bar{Q} mm/an	\bar{ETP} mm/an
110101	El Haçaiba	955	212	5.16	1228
110201	Sidi Ali Benyoub	1890	265	9.25	1237
110301	Sidi Bel Abbès	3000	276	8.22	1286
111201	Taria	1346	323	15.12	1438
111208	Sidi Mimoun	775	290	12.82	1430
111220	Dn Bouchikhi	77	268	23.04	1456
111302	Ouzet	2210	305	13.41	1616
111403	Ain Fekan	1160	318	3.64	1454
111412	Ghriss	132	405	24.80	1436
111505	Bouhanifia	7725	308	7.45	1614

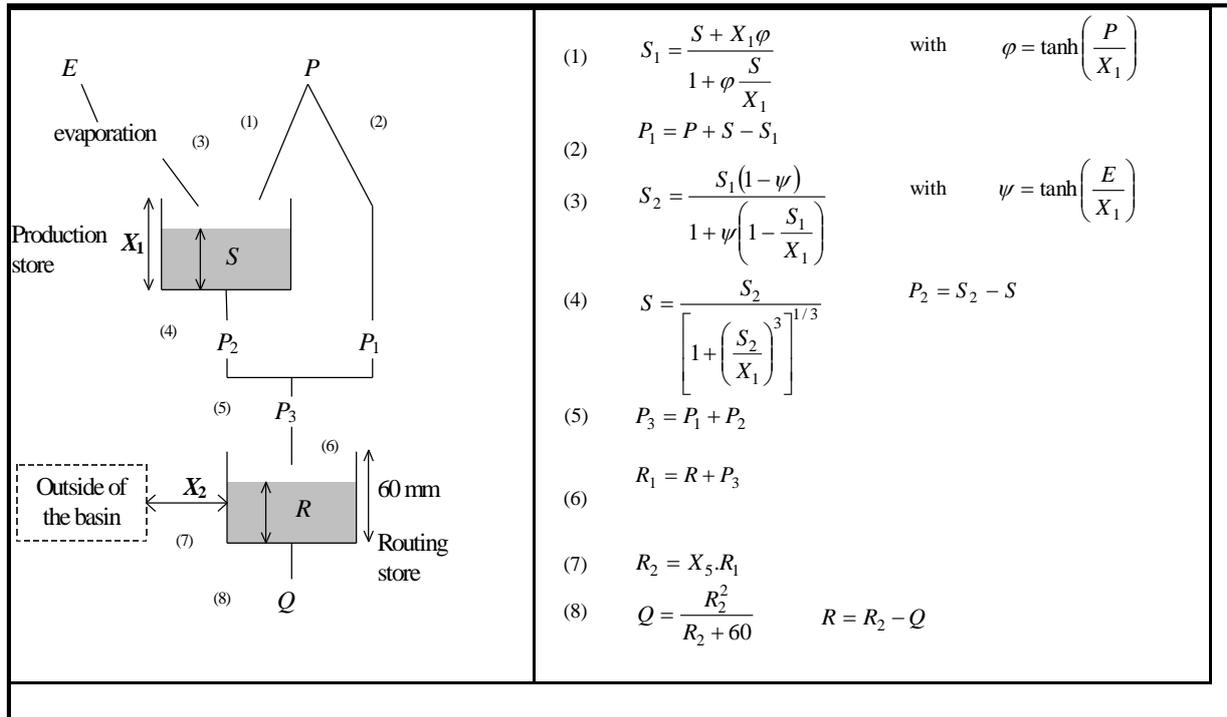


Figure 5.1 : Architecture du modèle GR2M avec P : la pluie, E : évapotranspiration potentielle, S : capacité du réservoir de surface, R : capacité du réservoir de routage et Q : débit, le tout en millimètre de lame d'eau.

En s'inspirant du modèle mensuel GR2M en figure 5.1 (Makhlouf,1993), Bouabdallah a testé différentes variantes de celui-ci au pas de temps annuel sur un échantillon de 84 bassins versants français.

Cela lui a permis de proposer deux architectures très proches de modèles pluie-débit au pas de temps annuel, GR1A et GR2A, respectivement à un et deux paramètres.

Les performances de ces deux modèles sont très proches. Le modèle GR1A présente un unique paramètre à caler. Il dérive du modèle GR2A en fixant le 2ème paramètre de routage.

La formule utilisée dans le modèle GR1A est :

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

Où :

Q_k est le débit simulé de l'année k

P_k est la pluie observée de l'année k

P_{k-1} est la pluie observée de l'année k-1

E_k est l'évapotranspiration potentielle de l'année k

X est le paramètre du modèle à optimiser.

5. 4. Modélisation pluie - débit à l'échelle mensuelle jusqu'à l'année 1980.

Pourquoi utiliser le pas de temps mensuel ?

Concernant le bassin de la Macta, les données relatives à la pluie, débit et évapotranspiration ne sont pas disponibles à des pas de temps plus fins.

Cela permet de tenir compte de la saisonnalité des pluies et évapotranspiration qui sont assez marquées dans cette région.

Ça permet aussi de simuler des périodes d'étiage critiques pour la gestion de l'eau.

Dans cette partie, la modélisation se fera sur les chroniques s'arrêtant à l'année 1980. L'idée c'est de chercher si le modèle s'adapte aux années sèches moins influencées non seulement

par le changement climatique, mais aussi par la pression anthropique et son activité au sein des sous bassins de la Macta

En effet, d'après le rapport du groupe ICCP (Houghton, Callander, et al 1992; Change 2007), c'est qu'à partir de l'année 1975 que le réchauffement climatique commence à se faire sentir ; en plus la population présentait presque 40% de ce qu'elle est maintenant ("ONS : Office National Des Statistiques" 2014).

a- L'initialisation et période de mise en route

Le modèle permet de restituer les débits calculés (Q_s) à condition de connaître l'état initial au début de la période simulée. Les choix portant sur les initialisations sont inévitablement assez grossiers et s'ensuit une erreur non négligeable pouvant être commise. Cependant, au fur et à mesure que le modèle fonctionne, il s'effectue un réajustement progressif des états du système. Compte tenu du caractère inéluctablement arbitraire de l'initialisation, les premières valeurs de Q_c ne seront pas fiables et par conséquent, on n'en tiendra pas compte dans le calcul de la fonction critère. Nous utiliserons systématiquement une ou deux années pour cette période de mise en route, dont les résultats ne seront pas comptabilisés. L'initialisation du modèle dans notre cas s'est fait sur 365 jours, e.g une année.

b- Critère d'évaluation ou fonction objectif

La fonction objective dans le modèle fait sortir les critères d'évaluation et de qualité pour évaluer plus complètement la qualité du calage, ces critères sont définis dans le paragraphe 2.5

c- Algorithme d'optimisation

Un algorithme d'optimisation des paramètres d'un modèle hydrologique est défini par trois caractéristiques (Mathevet 2005):

- **une fonction objective**, qui mesure l'erreur du modèle, c'est-à-dire la différence entre les débits simulés par le modèle et les débits observés ;
- **une stratégie de recherche de l'optimum** de la fonction objective dans l'espace des paramètres ;
- **un critère d'arrêt**, qui permet de stopper l'algorithme de recherche.

La majeure partie des travaux de recherche a porté sur les stratégies de recherche de l'optimum, mais la réussite d'une optimisation dépend des interactions complexes entre la fonction

objective, la stratégie de recherche, l'information contenue dans les données et la structure du modèle testé. (Basé sur la minimisation du nombre de Nash et C2M).

L'optimisation manuelle des paramètres des modèles hydrologiques permet de produire de bonnes simulations de débit. Néanmoins, le calage manuel n'est pas à la portée de tout le monde : il est compliqué, fastidieux et la réussite de cet exercice dépend souvent de l'expérience de la personne qui l'entreprend. En revanche, les stratégies d'optimisation automatiques, qu'elles soient locales ou globales, sont plus rapides, objectives et très faciles à utiliser pour le type de modèles hydrologiques étudiés. Néanmoins, les stratégies automatiques d'optimisation des modèles hydrologiques sont loin d'être parfaites et souffrent, soit d'un manque d'efficacité (difficulté à trouver le 'meilleur' vecteur de paramètres), soit d'un manque d'efficience (nécessité de tester un très grand nombre de vecteurs de paramètres avant d'en trouver un bon). Ces imperfections proviennent généralement de la complexité de la surface de réponse produite par les modèles hydrologiques

- d- **Période de calage** est composée : (i) d'une année de mise en route du modèle (warm-up) où les niveaux des réservoirs (variables internes) se stabilisent progressivement, de manière à ce qu'ils soient devenus indépendants, à l'issue de cette période, des niveaux initiaux choisis arbitrairement et (ii) d'une année de calage. Cette durée de calage peut sembler relativement courte par rapport à la pratique de la modélisation pluie-débit avec des données journalières. Néanmoins, cette durée d'un an est réaliste par rapport à la disponibilité actuelle des données de pluie et de débit. De plus, cette durée permet également de tester les modèles dans des conditions difficiles et d'assurer que les modèles qui sortiront de cette comparaison seront capables d'être calés avec une faible quantité d'information.
- e- **Période de validation ou contrôle** est composée du reste de la chronique. La mise en route du modèle est d'au moins un an. Elle est parfois plus longue lorsqu'elle inclut la période de calage, quand les périodes de calage et de validation se suivent.

Les résultats de la simulation sont mis dans le tableau 5.2 et les graphes sont mises en annexe figure 1.

Nous remarquons que les débits simulés suivent mal les débits observés, dans certains bassins, la temporalité des pluies dans le temps est différente de celle des débits observés, ce qui rend difficile l'exercice de modélisation.

Pour les bassins 110101, 110201 et 111201 (voir annexe 1 figure 1.a, 1.b et 1.d) les débits sont très élevés pour des faibles pluies, cela est dû à des données de pluie, soit non représentatives, soit mauvaises ou au pas de temps du modèle choisi ne permettant pas de simuler de grosses averses sur des pas de temps plus fins.

Nous avons constaté qu'il y a un problème d'*initialisation* du modèle (111220 annexe figure 1.e), ainsi qu'un problème de structure (111403 annexe 1 figure 1.h) pour lequel le soutien d'étiage n'est pas pris en compte par le modèle (paramètre X2 \approx 10 ou -10).

Les valeurs des deux critères ainsi que celles des deux paramètres du modèle pris en considération sont présentées par sous bassin dans le tableau 5.2 suivant :

Tableau 5.2 : Paramètre du modèle, critère de Nash et C2M (période jusqu'à 1980)

Bassin	X1	X2	C2M	Nash
110101		-10	-2.038	0.081
110201		9.091	-0.186	-0.036
110301		9.461	-0.326	0.543
111201		9.113	-0.283	0.246
111208		6.369	-0.104	-0.081
111220		5.302	-0.175	0.677
111302		8.648	-0.076	0.329
111403		-10	-2.104	-1.157
111412		-10	-1.486	0.406
111505		9.432	-0.151	-0.056
Moyenne		1.583	-0.747	0.129

Rappelons pour la lecture des résultats que le critère C2M évolue entre -1 et 1 ; Le critère de Nash et Sutcliffe (1970) varie entre $-\infty$ et 1. C2M égal à 1 traduit une reproduction parfaite des débits observés, tandis que le score 0 signifie des performances équivalentes à un modèle naïf de simulation (donnant un débit constant égal au débit moyen observé). Enfin, les scores négatifs sanctionnent des performances de simulation moins bonnes que celles de ce même modèle. La figure 5.2 représente la relation entre le critère de Nash-Sutcliffe et le critère borné C2M.

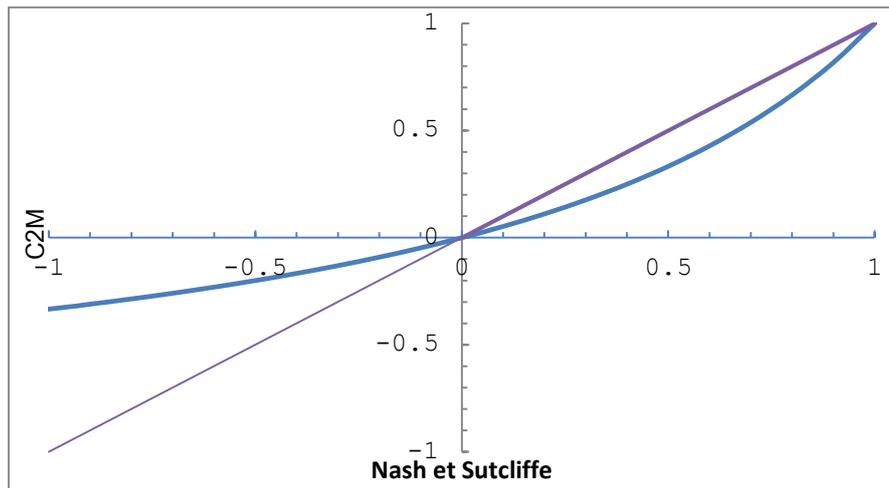


Figure 5.2 : Relation entre les deux critères $C2M = f(\text{Nash-Sutcliffe})$.

Bien que nous distinguons dans les sous bassins : ‘110301’, ‘111201’, ‘111220’ & ‘111412’ qu’ils ont, relativement, de bons critères, mais sur leurs graphes ils n’affirment pas une bonne corrélation.

Après nous passons à la modélisation hydrologique sur les sous bassins en utilisant toute leur chronique de données.

5. 5. Modélisation par GR2M sur toute la période des chroniques des sous bassins de la Macta

Dans ce qui suit nous prenons en compte toute la taille les chroniques que nous avons pu avoir au début. On ajoute à la liste un autre sous bassin dont les données commencent dès 1992, ce qui présente une période de 6 ans,

Les résultats sont présentés dans le tableau 5.3, les graphes sont placés en annexe figure 2.

L’application du modèle GR2M sur toutes les chroniques des variables des sous bassins dévoile une légère amélioration quant aux critères, cela soutient que la performance du modèle demande des chroniques d’une période plus grande.

Pour le sous bassin ‘110101’ les débits simulés suivent l’aspect des débits observées par contre il est difficile de simuler les pics de crues ou les périodes sèches bien que dans cette dernière les données de pluies existent.

Pour le sous bassin ‘110103’ au cours des premières années le débit simulé varie similairement avec l’observé, mais par la suite aucune corrélation n’est mise en évidence.

Pour le ‘111220’ les débits simulés sont assez proches des débits observés.

Pour ‘111129’ la simulation parait mieux mais il est toujours utile à rappeler que la taille des chroniques est relativement petite donc, à notre avis, nous ne pouvons pas nous baser sur celle-ci.

Pour le reste, nous avons constaté que les débits simulés et ceux observés, qualitativement, ne se suivent pas.

Les paramètres et les critères de la simulation du GR2M sont dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3 : Paramètres du modèle, critères de Nash et C2M issus de GR 2M appliqué sur toute la période des chroniques

Bassin	X1	X2	C2M	Nash
110101	-10	-1.899	0.08	0.148
110201	-10	-1.795	0.027	0.052
110301	8.764	-0.19	0.118	0.211
111129	-10	-1.299	0.314	0.478
111201	-10	-1.612	0.136	0.239
111208	-10	-1.684	0.07	0.13
111220	4.302	-0.235	0.319	0.484
111302	9.542	-0.197	0.024	0.046
111403	10	-0.451	0.242	0.39
111412	1.089	-1.443	0.325	0.49
111505	7.747	0.023	0.103	0.187
Moyenne	-0.778	-0.98	0.16	0.26

Le paramètre X1 relatif au réservoir du sol présenté dans le modèle GR2M, dans certains sous bassins, bute dans la borne inférieure e.g ‘-10’ cela veut dire que le réservoir-sol est vide.

Dans le cas où X1 présente des valeurs grandes avoisinant la borne supérieure ‘10’ cela veut dire que le réservoir-sol est infiniment rempli sachant que nous avons forcé le modèle pour que X1 soit inclus dans l’intervalle [-10,10].

Notons aussi que certains critères obtenus paraissant satisfaisant mais cela coïncide avec des valeurs X1 aberrantes.

5.6. Modélisation pluie - débit à l'échelle mensuelle en prenant en compte les débits des forages (Figure 5.3)

Dans les étapes passées nous avons essayé d'avoir une meilleure modélisation de la réponse hydrologique sur les sous bassin de la Macta ; dans ce qui suit nous cherchons à intégrer les débits des forages comme une entrée majorée dans le modèle, cela sur le fait que les données des débits des forages ont été obtenues auprès de l'Agence des Bassin Hydrographique (ABH).

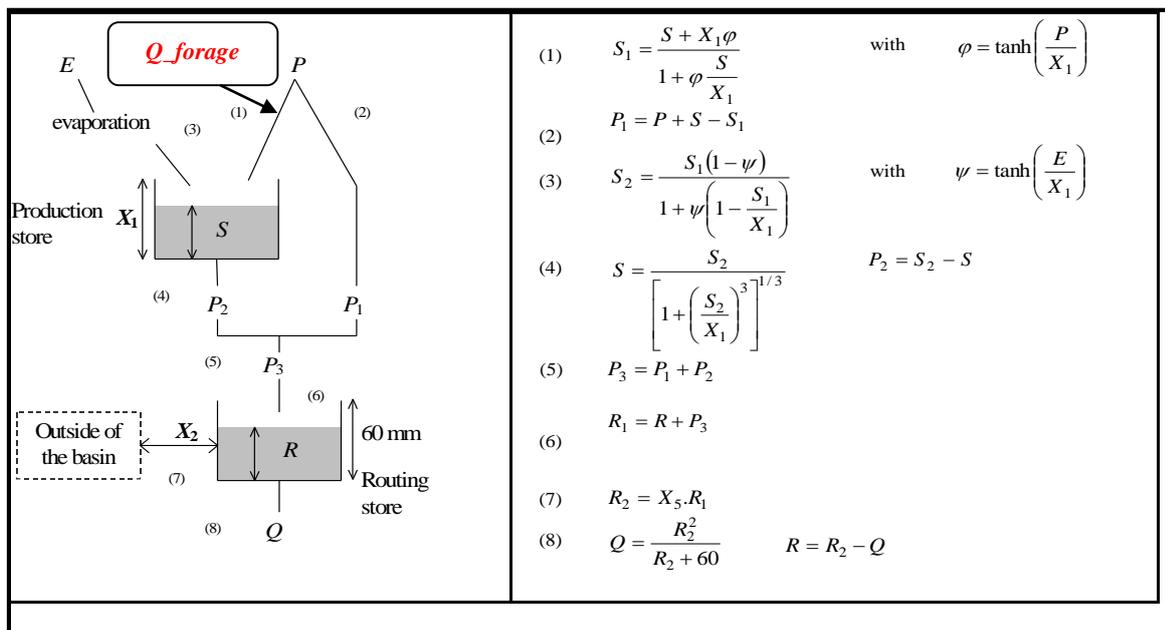


Figure (5.3) : Architecture du modèle GR2M modifiée en tenant compte des débits de forage

Les résultats sont représentés dans le tableau 5.4, les graphes qui en résultent sont mis en annexe figures 3.

D'après les résultats obtenus, dans cette étape nous remarquons qu'il n'y a pas une amélioration quant à la modélisation hydrologique par le modèle GR2M i.e. que les débits issus du modèle n'arrivent pas à suivre les débits observés.

Pour aller plus loin nous avons présenté tous les résultats de toutes les étapes dans un tableau (5.4) récapitulatif suivant :

Tableau (5.4) : Tableau récapitulatif de la modélisation sur les sous bassin de la Macta. X1, X2 : paramètres du modèle GR2M, C2M, Nash. Cas 1 période de la chronique s'arrête à l'année 1980 ; Cas 2 toute la période ; Cas 3 modélisation sur toute la période prenant compte les débits des forages.

Bassin	X1			X2			C2M			Nash		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
110101	-10	-10	-10	-2.038	-1.899	-1.896	0.081	0.08	0.084	0.15	0.148	0.155
110201	9.091	-10	-10	-0.186	-1.795	-1.797	-0.018	0.027	0.030	-0.036	0.052	0.058
110301	9.461	8.764	8.509	-0.326	-0.19	-0.156	0.373	0.118	0.140	0.543	0.211	0.245
111129	9.113	-10	-10	-0.283	-1.299	-1.430	0.14	0.314	0.354	0.246	0.478	0.523
111201	6.369	-10	-10	-0.104	-1.612	-1.618	-0.039	0.136	0.142	-0.081	0.239	0.249
111208	5.302	-10	-10	-0.175	-1.684	-1.700	0.512	0.07	0.074	0.677	0.13	0.137
111220	8.648	4.302	4.254	-0.076	-0.235	-0.249	0.197	0.319	0.319	0.329	0.484	0.484
111302	-10	9.542	9.998	-2.104	-0.197	-0.410	-0.366	0.024	0.037	-1.157	0.046	0.071
111403	-10	10	-10	-1.486	-0.451	-2.255	0.254	0.242	-0.073	0.406	0.39	-0.158
111412	9.432	1.089	-0.455	-0.151	-1.443	-1.477	-0.027	0.325	0.321	-0.056	0.49	0.486
111505	1.583	7.747	8.900	-0.747	0.023	-0.061	0.129	0.103	0.055	0.136	0.187	0.104
Moy.	-10	-0.778	-2.618	-2.038	-0.98	-1.186	0.081	0.16	0.135	0.15	0.26	0.214

A l'issu de ces étapes nous pouvons dire que le modèle n'a pas pu s'adapter sur le comportement hydrologique des sous bassins, bien que dans certains sous bassin nous avons pu avoir relativement des critères de Nash et C2M satisfaisants.

5.7. Modélisation pluie - débit à l'échelle mensuelle par GR3M

Dans cette démarche on essayera d'ajouter un troisième paramètre X3 au modèle qui changera le type de vidange dans la structure du modèle. Par le passé, pour le modèle GR3M le passage d'une vidange quadratique à une vidange linéaire a permis un gain de l'ordre de 1% sur le critère de Nash, soit de 65% à 66.2% (Kabouya 1990; Makhlouf and Michel 1994). Cette nouvelle variante de modèle, paraît encore une fois la plus performante pour l'instant (Mouelhi 2003). Nous proposons d'appliquer GR3M sur les sous bassins de la Macta ; Les résultats sont dans le tableau 5.5, les figures sont placées en annexe 1 figure 4

Nous constatons qu'ici aussi il n'y a pas une grande amélioration par rapport aux paramètres du modèle et ses critères qui sont montrés dans le tableau 5.3

Tableau 5.5 : Tableau des résultats de la modélisation par le modèle GR3M

Bassin	X1	X2	X3	C2M	Nash
110101	-10	-1.908	0.665	0.080	0.149
110201	-10	-1.803	-9.664	0.026	0.051
110301	9.071	-0.232	-6.561	0.113	0.203
111129	-10	-1.294	-10	0.319	0.484
111201	-10	-1.597	-5.913	0.135	0.239
111208	-10	-1.662	-10	0.059	0.111
111220	4.156	-0.425	-10	0.203	0.337
111302	8.241	-0.017	-5.755	0.112	0.201
111403	9.166	-0.354	-6.070	0.435	0.606
111412	0.810	-1.461	-10	0.333	0.500
111425	-10	-1.351	-9.561	0.040	0.077
111501	-10	-1.690	0.656	0.129	0.229
111505	9.681	-0.043	-7.906	0.097	0.177
Moy	-6.5846	-1.521	-7.267	0.095	0.100

Les valeurs du X1 atteignent dans certains sous bassins toujours la borne inférieure, ce qui signifie que le réservoir-sol a une capacité nulle.

D'autres valeurs sont plus grandes avoisinant la borne supérieure ce qui signifie que système a un réservoir de capacité infinie ce qui est physiquement irréaliste.

5. 8. Modélisation pluie-débit à l'échelle mensuelle par GR4M : Calage-validation

Dans cette étape de modélisation mensuelle nous allons ajouter un quatrième paramètre " X4" ; ce nouveau paramètre rentrera encore dans la fonction vidange du bassin, il est sensé d'améliorer l'application du modèle sur le comportement hydrologique.

Pour ce faire nous allons réaliser un calage-validation i.e. nous calibrerons le modèle sur la 1^{er} moitié des chroniques et ferons la validation sur la deuxième moitié. Ensuite le calage sera sur la deuxième moitié et la validation s'appliquera sur la première moitié.

Les résultats sont présentés dans le tableau 5.6, les graphes sont mis en annexe 1 figure 4.

Dans cette étape nous constatons que dans certains sous bassins, à savoir le "111129" et "111201", les débits simulés suivent bien les débits observés en le calant sur la deuxième partie de la chronique ; dans d'autre cas, l'allure de la courbe des débits simulés suit l'allure de la courbe qui présente les débits mesurés sans que le modèle puisse simuler les pics des crues et les périodes sèches. Dans la plupart des cas, le modèle reste impuissant pour représenter le comportement hydrologique de façon satisfaisante.

Les résultats des paramètres et les critères obtenus avec cette version du modèle sont montrés dans le tableau 5.6.

Tableau 5.6 : Tableau paramètres et critère C2M et NASH issu de GR 4M

Bassin	X1	X2	X3	X4	C2M	Nash
110101	-10	-3.684	-0.111	1.406	0.122	0.217
	-10	-3.473	-10	-10	0.101	0.184
110201	-10	-3.567	-10	5.017	-0.093	-0.205
	-10	-3.401	-10	-8.041	0.157	0.272
110301	8.862	-0.644	1.131	-6.380	0.424	0.595
	-10	-3.866	-10	-10	-0.019	-0.038
111129	-10	-2.485	-1.127	-5.864	0.202	0.336
	-10	-2.305	0.643	-9.517	0.608	0.756
111201	-10	-3.341	-10	-1.540	0.115	0.206
	0.866	-2.614	-10	4.603	0.256	0.408
111208	-10	-3.170	-10	-1.794	0.041	0.079
	-10	-2.743	0.667	2.327	0.236	0.382
111220	-10	-2.813	-10	-3.053	0.068	0.127
	4.325	-0.103	3.726	-10	0.630	0.773
111302	-0.275	-0.296	8.232	10	0.251	0.402
	-10	-3.880	-10	-4.166	-0.159	-0.377
111403	9.207	-1.350	-0.879	-5.716	0.489	0.657
	-3.472	-3.077	2.854	2.446	0.275	0.432
111412	5.005	-1.736	-10	-10	0.303	0.465
	5.759	-0.812	3.057	10	0.654	0.791
111425	1.649	-0.855	4.473	10	0.419	0.590
	8.967	-0.501	0.718	-1.963	0.048	0.091
111501	-10	-2.998	-10	0.558	0.162	0.279
	-10	-3.543	-10	0.529	0.146	0.255
111505	10	-0.970	-10	-7.382	-0.099	-0.220
	10	-0.096	3.499	-8.142	0.012	0.023
Moy	-3.043	-2.243	-3.966	-2.180	0.206	0.288

A l'issue de cette étape nous avons vu que les paramètres prennent des valeurs trop faibles ou trop fortes qui veut dire que la capacité maximale des réservoirs-sol sont respectivement soit nulle, ou soit infinie. Dans le 1^{er} cas, cela nous conduit à des pertes par évapotranspiration nulle, donc un surplus en eau est évacué par échange souterrain (X2 négatif).

Dans le second cas, cela conduit à stocker une grande partie de la pluie dans le sol, sans que celle-ci atteigne l'exutoire du bassin. Par conséquent, X2 devient positif ou proche de zéro.

Les étapes où nous avons voulu modéliser le comportement hydrologique des sous bassins de la Macta à l'échelle mensuelle n'ont pas bien marché.

De ce fait on passera à la modélisation au pas de temps annuel.

5. 9. Modélisation au pas de temps annuel par le GR1A

En s'inspirant du modèle mensuel GR2M (Makhlouf and Michel 1994), Mouelhi (2003) a vérifié différentes variantes de celui-ci au pas de temps annuel sur un échantillon de 84 bassins versants français. Cela lui a permis de proposer deux architectures très proches de modèles pluie-débit au pas de temps annuel, GR1A et GR2A, respectivement à un et deux paramètres.

Le modèle GR1A présente un unique paramètre à caler. Il dérive du modèle GR2A qui d'après Mouelhi (2003) le paramètre de routage est fixé à 0.85.

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

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{0.7 P_k + 0.3 P_{k-1}}{*ETP} \right)^x \right]^{1/x}} \right\} \quad \text{eq 5.1}$$

Cette formule dérive de la formule de Turc (1953), qui donne l'écoulement moyen interannuel.

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

Dans ce pas de temps on utilisera les données des bassins mentionnés dans le tableau 5.7

Tableau 5.7 : Sous bassin modélisé par le modèle GR1A

Code	Nom Bassin	\bar{P} (mm/an)	$E\bar{T}P$ (mm/an)	\bar{Q} (mm/an)
110101	O ^d Mekerra Amont	212	1228	5.16
110201	O ^d Mekerra moyen	265	1237	9.25
110301	O ^d Mekerra Aval	276	1286	8.22
110331	Lamtar	302	1259	7.36
110506	Tenira	335	1442	6.65
111003	Laâbna	313	1453	6.58
111106	PK 50	297	1537	27.32
111127	Saida Pont	310	1495	53.95
111129	S ^d Boubker	314	1536	25.77
111201	O ^d Taria	323	1438	15.12
111208	S ^d Mimoun	290	1430	12.82
111220	D ⁿ Bouchikhi	268	1456	23.04
111302	Ouizert	305	1616	13.41
111403	Ain Feken	318	1454	3.64
111412	Ghriss	405	1436	24.80
111425	Khalouia	324	1440	28.05
111501	Trois rivières	290	1480	10.87
111505	Bouhnifia	308	1614	7.45
111518.	Hacine	306	1565	8.19

Le principe est d'utiliser les résultats du modèle de tous les sous bassins pour en déduire le critère C2M moyen.

Les chroniques de débit simulées par le modèle GR1A sont placées dans l'annexe 1 figure 5.

Seules les performances en termes de critère C2M sont reportées ci-après.

Les résultats de l'application de ce modèle sont présentés dans le tableau 5.8

Tableau 5.8 : Résultats de la modélisation de GR1A sur les sous bassins de la Macta : (1) représente le cas de non prise en compte de l'année k-1 et (2) représente le cas de prise en compte de l'effet mémoire de l'année k-1

Bassin	Critère C2M		Paramètre X	
	(1)	(2)	(1)	(2)
110101	-0.196	-0.328	2.17	3.82
110201	0.171	-0.082	2.05	2.39
110301	0.298	0.059	2.09	2.76
110331	0.102	-0.038	2.12	3.04
110335	0.131	0.139	2.05	2.26
110506	0.071	-0.012	2.07	2.53
111003	-0.032	-0.179	2.11	2.74
111106	0.195	0.171	1.93	1.56
111127	-0.274	-0.295	1.92	1.47
111129	-0.241	-0.329	1.96	1.72
111201	-0.064	-0.139	2.04	2.28
111208	-0.004	-0.099	2.01	2.15
111220	0.01	0.005	1.95	1.60
111302	0.254	0.146	2.04	2.17
111403	0.217	0.194	2.15	3.19
111412	0.373	0.284	2.10	3.55
111425	-0.095	-0.135	1.99	1.93
111501	0.151	-0.010	2.06	2.44
111505	0.139	-0.094	2.09	2.60
111518	0.382	0.190	2.07	2.45
Moyenne	0.079	-0.028	2.05	2.43

Les paramètres obtenus dans le cas (1) sont des valeurs qui s'approchent de 2 ; cette valeur a été fixée par Turc sur son modèle, par contre le critère C2M paraît loin d'être satisfaisant excepté les trois sous bassins, à savoir "110301", "111302" et "111403" ; pour les autres cas, le modèle n'a pas pu s'adapter.

La courbe des débits simulés suit relativement bien les courbes des débits observés lorsqu'ils sont mis en évidence.

Le critère C2M moyen obtenu est égale à 0.08, certes positif mais loin d'être satisfaisant.

Les valeurs des paramètres obtenus dans le cas (2) tournent autour de 2 avec une moyenne relativement un peu loin que dans le cas (1) mais le critère C2M moyen dans ce cas est toujours faible démontrant l'incapacité du modèle à présenter convenablement le comportement hydrologique des sous bassin de la Macta.

5. 10. Modélisation au pas de temps pluriannuel par le modèle génie rural.

Après les pas de temps mensuel et annuel, nous allons faire la modélisation hydrologique des bassins de la Macta au pas de temps à l'échelle pluriannuelle. Le pas de temps des chroniques de données sera choisi sur la base du critère C2M moyen de tous les bassins simulés et le nombre de points obtenu sur une fréquence donnée allant d'une année jusqu'à n années,

Nous étudierons dans un premiers temps l'influence du jeu de données de pluies en utilisant soit les pluies de l'ANRH, soit les pluies des ré-analyses de l'université de Delaware, soit un jeu de données exploitant les deux sources et utilisant les pluies de l'ANRH pour débiaiser (corriger) pluies de ré-analyses. Les jeux de données de pluie sont donc :

1. Sur la base des séries de pluies prises auprès de l'ANRH et obtenue par la méthode de Thiessen.
2. Sur la base des séries de pluies prises auprès de la banque de donnée américaine de l'université de Delaware et obtenue par l'intersection des grilles de ces pluies avec les sous bassins.
3. Sur la base des séries de pluies prises auprès de l'ANRH et celles issues de l'université de Delaware, débiaisées par comparaison avec les pluies de l'ANRH.

Les jeux de données obtenues ne couvrent pas toujours la même période. Nous procéderons donc en deux temps :

- 1- Analyse sur la période 80-96 : les jeux de données sont complets quelles que soient les sources.
- 2- Analyse sur la période 80-2008 : seuls les jeux de données utilisant les ré-analyses sont exploitables

5. 11. Modélisation au pas de temps pluriannuel période 1980-1996.

Pour gérer les problèmes liés à la taille des chroniques, nous avons fait une condition dans le modèle (utilisant l'équation 5.1) afin qu'il arrête les calculs dès que la chronique

par sous bassin ne peut pas être divisé par deux (limite pour effectuer une procédure de calage-validation). Par conséquent, nous avons obtenu au plus un pas de temps de 8 ans.

Les résultats sont montrés sur le tableau 5.9.

Tableau 5.9 : Résultats du modèle GR pluri annuel sur la période de 1980-1996 : (1) : pluies de l'ANRH utilisées ;(2) : lorsque les pluies sont mises en évidence ; (3) : pluies Delaware débiaisées par celles de l'ANRH.

Nombre d'année	C2M validation			Nombre de valeurs		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
1	0.063	0.258	0.259	255	246	246
2	0.153	0.285	0.286	125	121	121
3	0.21	0.52	0.523	80	77	77
4	0.272	0.484	0.49	61	58	58
5	0.282	0.581	0.589	48	45	45
6	0.439	0.802	0.806	32	30	30
7	0.337	0.619	0.623	32	30	30
8	0.26	0.513	0.52	26	26	26

Les graphes des corrélations entre les débits simulés et les débits observés ainsi que les graphes de simulation du modèle à différents pas de temps pluriannuel sont montrés dans les figures placées en annexes 1 figure 6.

Les critères obtenus (voir tableau 5.9) montre que la performance du modèle est liée au pas de temps pluriannuel, ceci est dû à l'effet de filtrage imposé sur les séries chronologiques des variables hydroclimatiques (e.g plus le pas est plus grand plus les erreurs aléatoires sur les pluies et les débits se compensent dans le cycle hydrologique du bassin).

5. 12. Modélisation au pas de temps pluriannuel période 1980 - 2008

Même raisonnement que dans le cas précédent : e.g que le modèle prend compte la taille des chroniques au différents pas de temps pluriannuels par conséquent nous avons obtenu des pas de temps allant jusqu'à douze ans.

Les résultats sont présentés dans le tableau 9.10.

Tableau 5.10 : Résultats du modèle GR pluri annuel sur la toute la période : (1) : pluies de l'ANRH reconstituées par celles de Delaware sont utilisées ;(2) : lorsque les pluies Delaware sont utilisées; (3) : pluie ANRH reconstitué par celle de Delaware leur permettant d'aller jusqu'à 2008.

Nombre d'année	C2M			Nombre de valeurs		
	Jeux de pluie (1)	Jeux de pluie (2)	Jeux de pluie (3)	(1)	(2)	(3)
1	0.192	0.232	0.215	699	699	490
2	0.327	0.328	0.274	344	344	241
3	0.413	0.424	0.357	225	225	159
4	0.455	0.513	0.446	165	165	118
5	0.481	0.501	0.575	131	131	91
6	0.55	0.587	0.531	107	107	77
7	0.504	0.483	0.546	92	92	58
8	0.56	0.587	0.64	75	75	53
9	0.568	0.62	0.72	64	64	42
10	0.582	0.633	0.819	56	56	37
11	0.748	0.777	0.821	51	51	37
12	0.794	0.792	0.85	42	42	34

Dans ce cas aussi le critère C2M est influencé par le nombre de valeurs des débits simulés et observés,

Nous remarquons qu'en utilisant les pluies de l'ANRH et celles de l'université du Delaware débiaisées par les pluies de l'ANRH, permettant ainsi d'étaler les chroniques jusqu'à 2008, cela nous a permis d'avoir des critères relativement satisfaisants, de même lorsque les chroniques de la période 1980-1996 sont utilisées.

Nous avons opté d'utiliser les pluies de l'ANRH et celles de l'université de Delaware débiaisées, nous avons pu ainsi remplir les lacunes et étaler la série de pluie jusqu'à 2008, ce qui correspond à la fin des séries de débit obtenues auprès des services de l'ANRH.

Les figures représentant les graphes issus de la simulation du modèle GR pluriannuel seront placées dans l'annexe 1 (figure 7), les résultats dans le tableau 5.10 sont présentés sur les graphes de la figure 5.4, mettant en évidence le compromis entre longueur des chroniques (nombre des bassins étudiés) et performance du modèle en fonction du pas de temps choisi.

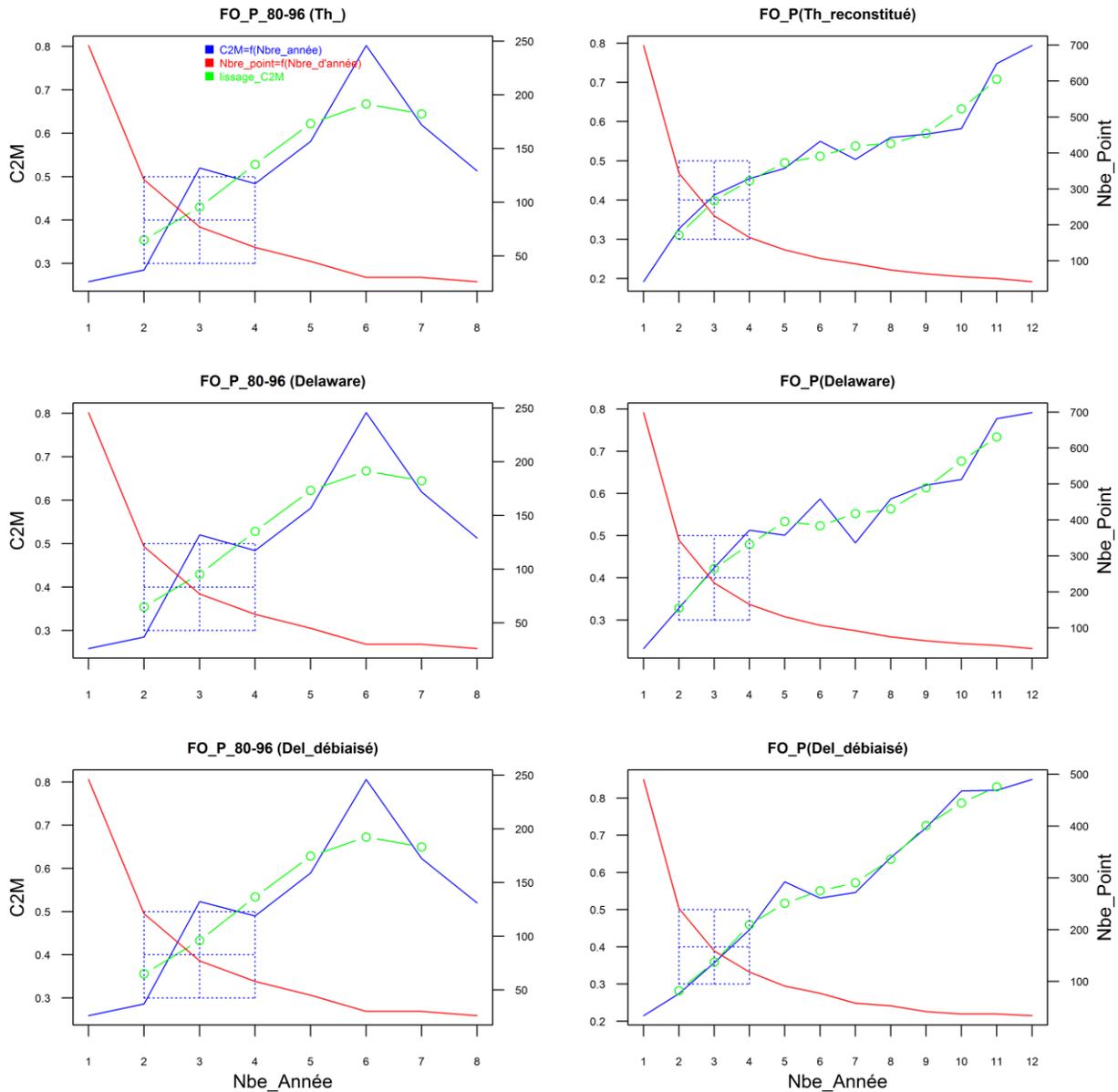


Figure 5.4 : Résultats du modèle GR pluriannuel appliqué sur les sous bassins de la Macta ; en bleu l'évolution du critère C2M en fonction des pas de temps pluriannuel ; en rouge nombre de valeurs des Q_{sim} et Q_{obs} selon le pas de temps, en vert la fonction 'runsum' renvoie le lissage de la courbe $C2M=f(Nbr_d'année)$.

Nous constatons que plus le pas de temps Pluriannuel augmente plus le critère de C2M augmente dans tous les cas étudiés, en effet, le fait d'augmenter l'échelle de temps contribue à filtrer les erreurs aléatoires dans chroniques utilisées (pluies et débits). La question qui se pose : quel pas de temps pluriannuel choisir ?

Dans la figure 5.4 tous les graphes montrent que la croissance du critère C2M est inversement proportionnelle au nombre de valeur du couple (Q_{sim}, Q_{obs}). En tenant compte d'avoir un

maximum de valeur avec un C2M satisfaisant nous avons opté à optimiser le modèle sur la base de l'intersection graphique des deux courbes, respectivement relatives au $C2M=f(\text{Nbr_d'année})$ et $\text{Nbr_points}=f(\text{Nbr_d'année})$, ce qui correspond au pas de temps pluriannuel égal à 3 ans.

Cette résolution nous permettra dans le chapitre suivant d'essayer de répondre aux questions liées à la relation existante entre la modélisation et le changement climatique.

5. 13. Discussion et Conclusion

Dans ce chapitre le travail a consisté à tenter de modéliser le comportement hydrologique aux différents pas de temps à savoir mensuel, annuel et pluri annuel.

Au pas de temps mensuel nous avons testé le modèle GR2M sur les sous bassins de la Macta sur une période allant jusqu'à 1980 qui coïncide avec le début du changement climatique (voir chapitre III). En supposant que la non-stationnarité des variables hydroclimatiques est indépendante, la sécheresse est constatée la fin des années 70. Les paramètres et les critères obtenus n'étaient pas satisfaisants car les valeurs des paramètres s'approchaient, voire égales, aux bornes forcées par le calage, ce qui indique clairement une mauvaise adéquation entre les données et la structure dans le modèle utilisé. Ceci nous a conduit à utiliser un certain nombre de variantes afin de tenir compte notamment (i) des difficultés d'initialisation des modèles dans ces contextes arides et (ii) des prélèvements anthropiques dans la nappe.

Nous avons donc voulu pousser l'étude à l'échelle mensuelle modifiant le modèle GR2M en GR3M en ajoutant un troisième paramètre dans le rôle du réservoir vidange. Les résultats obtenus sont meilleurs avec des critères de Nash dans tous les cas positifs, variant entre 0.05 et 0.6. Les bassins qui répondent bien sont : '111403' (Aïn Fekan) et '111412' (Ghris). Malgré ces résultats, les paramètres obtenus sont encore peu réalistes.

Dans le sens d'améliorer la fonction vidange dans le modèle pour les bassins étudiés, un autre paramètre 'X4' a été ajouté pour en faire GR4M. Aussi, la calibration du modèle s'est faite d'abord sur la 1^{er} moitié des chroniques et la validation est faite sur l'autre moitié de plus la calibration s'est faite sur la 2^{ème} moitié des chroniques et la validation s'est faite sur la 1^{er} moitié. Au vu des graphes obtenus (voir annexe 1 figure 5), dans ce cas, aussi les débits simulés sont loin d'être proches des débits observés. Les critères sont meilleurs que dans les autres cas : en comparant la 1^{er} avec la 2^{ème} méthode, nous constatons que le critère de Nash est, relativement, supérieur dans le 2^{ème} cas (e.g la calibration faite sur la 2^{ème} moitié et la validation appliqué à 1^{er} moitié de la chronique). Le critère de Nash a pu atteindre la valeur 0.8 dans le cas

du bassin '111412'. Dans le 2^{ème} cas contre la valeur est de 0.6 dans le 1^{er} cas, la valeur moyenne de Nash est égale à 0.29 par rapport aux cas antérieurs aux valeurs de 0.13, 0.26, 0.21 et 0.10, relatives respectivement à GR2M (période jusqu'à 1980), GR2M (sur toute la période correspondante aux données disponibles), GR2M (tenant compte des débits de forages) et GR3M.

Ces résultats mettent en évidence l'importance du rôle de la vidange pour simuler les débits ainsi que l'initialisation.

Les bassins bien simulés dans le modèle GR au pas de temps mensuel pourront faire l'objet d'une recherche plus approfondie et plus orientée vers la modification de la structure du modèle afin d'avoir des paramètres admissibles ainsi que des critères pouvant ainsi définir leur comportement hydrologique à cette échelle.

Au pas de temps annuel, nous avons appliqué le modèle GR1A de deux façons, en premier lieu sans la prise en compte de l'effet de mémoire de l'année k-1 en seconde lieu c'était avec la prise en considération de l'effet mémoire. Les résultats que le modèle nous a donné ont démontré qu'une fois de plus que le modèle s'applique difficilement sur les bassins de la Macta à cette échelle, en effet, les critères de C2M que nous avons eu dans le cas de la prise en compte de l'effet de mémoire de l'année k-1 prennent en majorité des valeurs négatives ayant pour moyenne -0.028 et dans le cas contraire (non prise en compte de l'effet mémoire de l'année k-1) les valeurs de C2M sont meilleures mais restent tous les deux loin d'être satisfaisantes. Les figures suivantes (figure 5.5) montrent qu'à travers les deux méthodes, les débits simulés et observés sont peu corrélés.

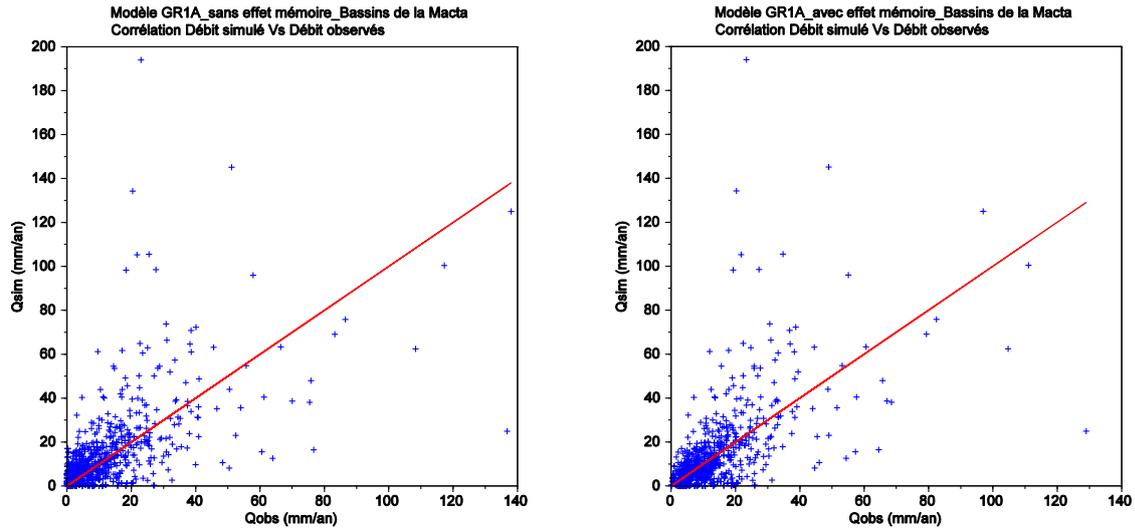


Figure 5.5 : Corrélation entre débits simulés et observés dans le modèle GR1A sur tous les bassins

En ce qui concerne les paramètres, rappelons-nous que le modèle se base sur la formule dérivée de Turc qui donne l'écoulement moyen interannuel, et le paramètre X qui apparaît comme un coefficient modulateur de l'évapotranspiration potentielle traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique (par exemple échange avec des nappes profondes ou avec des bassins adjacents dans le cas d'une non-superposition des limites topographiques et géologiques): si X est supérieur à 1, le système perd de l'eau et si X est plus petit que 1, le système en gagne, le tout exprimé en fraction de l'ETP (Perrin, Michel, and Andréassian 2007).

Vu que les valeurs du paramètre $X1$ obtenues varient entre 2 et 3.8 donc tous sont supérieurs à 1, probablement les bassins perdent beaucoup d'eau par évapotranspiration appuyant l'hypothèse du réchauffement du climat (accroissement de la température au niveau de cette région qui augmente la capacité évaporatoire du milieu), par contre la performance du modèle exprimée par le critère C2M reste toujours faible

Au pas de temps pluriannuel, la modélisation consistait à modifier la structure du modèle GR1A dans le but de définir un pas de temps pluriannuel optimal qui permet d'une part d'avoir des critères C2M satisfaisants et d'autre part de filtrer les erreurs aléatoires des mesures de débit, pluie et ETP.

Les résultats ont dévoilé que plus le pas de temps augmente plus la performance du modèle croit.

L'application du modèle GR1A modifié sur la période [1980.1996], nous a donné un maximum de 8 ans ce qui correspond à deux valeurs de couple (Q_{sim} , Q_{obs}) par bassin.

Le critère de performance du modèle avait pour valeur 0.26, 0.51, et 0.52, en utilisant respectivement : les chroniques de pluie calculée par la méthode de Thiessen, les chroniques de pluie issues des ré-analyses de l'université de Delaware et celles de Delaware débiaisées par celles de l'ANRH. Nous avons décidé de prendre comme pas de temps la valeur de trois ans vu qu'il en résulte un nombre de points jugé suffisant.

L'application du modèle GR1A modifié sur toute la période correspondant à la disponibilité des données des chroniques de débit, nous a donné un pas de temps allant jusqu'à 12 ans.

Dans ce cas nous avons opté pour maintenir le pas de temps pluriannuel égal à trois ans jugé suffisant vu le nombre de points obtenu du couple (Q_{sim} , Q_{obs}) et le critère de performance du modèle.

Dans le pas de temps pluriannuel égal à trois ans, le critère C2M était relativement mieux en utilisant les pluies de Thiessen que celles de l'université de Delaware.

Sachant que ce travail peut pour objectif la régionalisation ou l'étude de l'influence du climat sur ces régions arides donc systématiquement, il fortement recommandé de prendre en compte les pluies réellement mesurées, de ce fait nous avons fini par maintenir les pluies de Thiessen reconstituées dans les travaux présentés dans le chapitre suivant.

5. 14. Conclusion

Nous pouvons conclure que la modélisation hydrologique des comportements des bassins de la Macta n'est pas une partie gagnée bien que le modèle ait fait ses preuves dans des bassins un peu partout dans le monde et même dans certaines régions en Algérie (Perrin, Michel, and Andréassian 2007).

Il est recommandé de changer la structure du modèle afin de l'adapter aux conditions hydro-climatiques et pédo-géomorphologiques des régions arides connues pour des périodes

longues humides et sèches dans lesquelles il pourrait y avoir des crues éclairs ainsi des surfaces réduites en matière de couvert végétal.

La structure du modèle devra aussi prendre en compte le comportement dynamique de l'hydrogéologie de la région ce qui aide à avoir des paramètres qui représentent mieux le routage des eaux de pluie ainsi que les paramètres qui rappellent le mécanisme de vidange et l'échange avec les systèmes aquifères, ceci nécessite impérativement l'utilisation de données relatives à la cinétique des données hydrogéologique, à savoir les débits de pompage des nappes présentés sous une chronique de taille suffisante et l'échange qu'il peut y avoir entre les différents aquifères qui existent.

Il est fortement recommandé, pour entreprendre la modélisation hydrologique, de choisir les sous bassins qui nous avons pu étudier, à travers les critères de performance obtenus des modèles conceptuels.

CHAPITRE VI :

ROLE DU CLIMAT DANS L'ÉVOLUTION DU DÉBIT. EST-IL LE SEUL FACTEUR ?

6.1.Introduction

Les facteurs de changements des écoulements sont multiples, aussi il est assez difficile de distinguer et de quantifier le rôle de chaque facteur (Wagener, Wheeler, and Gupta 2003; Destouni, Jaramillo, and Prieto 2013). La variabilité du climat est souvent invoquée comme la principale cause de la variabilité de l'écoulement. Cette variabilité ainsi que d'autres activités anthropiques locales (prélèvement d'eau pour l'irrigation ou l'eau potable, barrages, utilisation des terres, etc.) pourraient également être prédominantes.

L'objectif premier de ce chapitre est d'analyser les tendances et ruptures des séries des variables hydro-climatiques dans les sous bassins versants de la Macta qui se situent à l'ouest de l'Algérie. En deuxième lieu, le rôle du climat sur les tendances observées sur les chroniques de débit est quantifié par une modélisation hydrologique pluriannuelle à l'aide de la formule de Schreiber. Les résultats montrent une stabilisation des pluies annuelles sur la période entre 1975 et 2005, une augmentation significative des températures et différentes réponses sur le débit selon les cinq bassins versants : deux sur les cinq bassins présentent une baisse significative avec une rupture identifiée après le début des années 1990. Les résultats de modélisation semblent indiquer que l'augmentation de température n'est pas le seul facteur pouvant expliquer la baisse du débit sur ces deux sous-bassins.

Aussi dans ce chapitre nous allons présenter la variation du paramètre de la formule de Schreiber et la définition de sa valeur optimale en fonction du RMSE qui va être utilisé dans la modélisation hydrologique de nos bassins.

Le cadre classique pour estimer les impacts du changement climatique sur le comportement l'hydrologie comprend les étapes suivantes (Le Lay and Galle 2005) :

- (a) détermination du paramètre d'un modèle hydrologique à base de l'expression de Schreiber (Arora, 2002) dans les sous bassins versants étudiés, en utilisant des séries des variables hydroclimatiques après avoir calé le modèle (Mouelhi, 2003) ;
- (b) les chroniques des données climatiques sont découpées en deux parties, celles avant l'année 1990 pour le calage et après pour la validation ; ce choix se base sur la signification des tendances sur l'ensemble des sous bassins qui correspondent à certains scénarios de changement climatique;

- (c) obtenir les débits simulés des sous bassins versants à partir du paramètre issu du climat de la première période, en utilisant le modèle hydrologique calé ;
- (d) déduire l'erreur moyenne quadratique "RMSE" entre les débits simulés et observés.
- (e) à partir du paramètre optimisé, nous illustrons dans le graphe de Budyko l'indice d'aridité en fonction de l'indice d'écoulement dans la première période " $ETP/P = f(Q/P|_{Ant})$ " et dans la deuxième période " $ETP/P = f(Q/P|_{Post})$ " des débits observés et débits simulés obtenus par le paramètre optimisé dans l'expression de Schreiber.

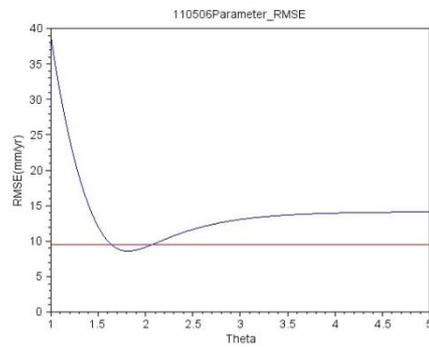
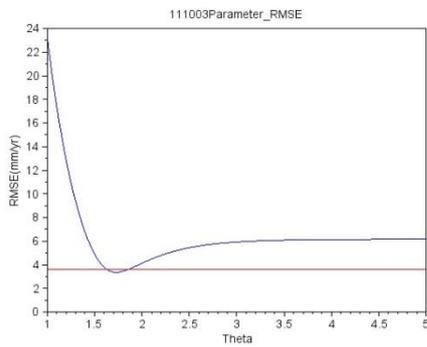
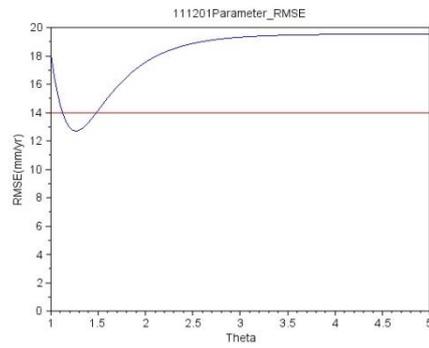
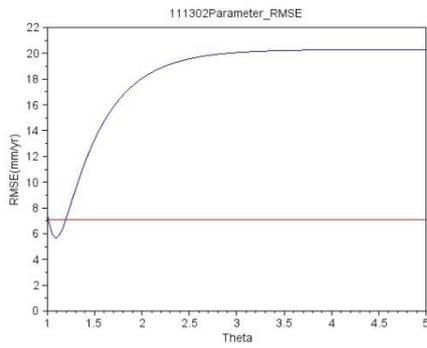
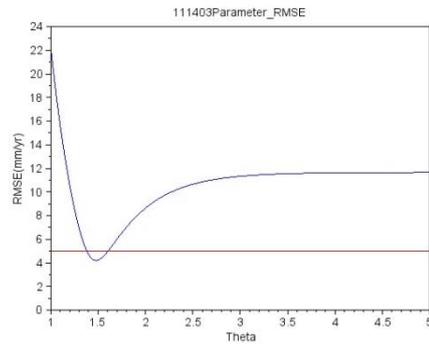
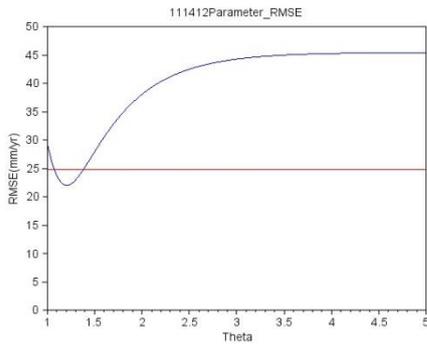
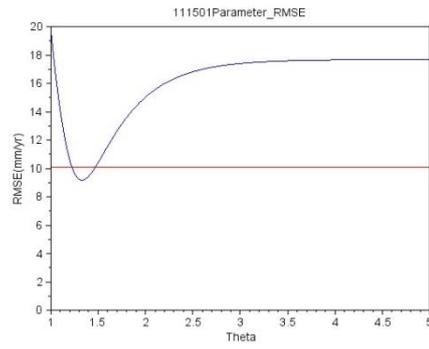
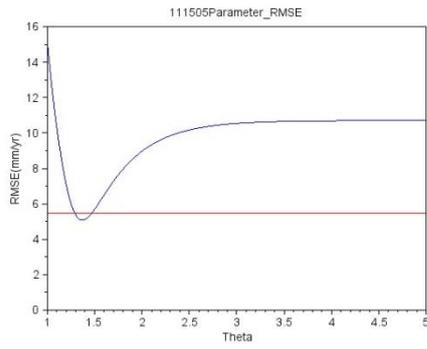
6.2.Détermination du paramètre d'un modèle hydrologique basé sur l'expression de Schreiber (1904)

Cette méthodologie impliquant le calage du paramètre du modèle hydrologique, est basée sur une hypothèse, qui est l'influence du changement climatique sur le comportement hydrologique des sous bassins versants. Elle est vérifiée, en utilisant une période de calage on obtiendra un paramètre statique sur toute la chronique des débits par sous bassin. En outre, la simulation du modèle nous permet de vérifier les résultats obtenus et ainsi valider notre hypothèse quant au rôle du climat sur les débits.

Pour ce faire, nous avons mis en place les bornes de l'intervalle du paramètre dans la formule de Schreiber qui correspond à l'intervalle RMSE dans lequel nous pourrions avoir la valeur *thêta* optimisé correspondant aux valeurs RMSE minimales obtenues. Le choix de cette formule dans notre modèle conceptuel est la facilité de sa linéarisation. En outre dans sa thèse, Mouelhi (2003) a obtenu des critères de performance relativement meilleurs par rapport à d'autres formules.

La figure 6.1 montre l'évolution du RMSE en fonction de la valeur du paramètre θ du modèle qui permet d'avoir un paramètre dans la formule de Schreiber avec un intervalle auquel nous pouvons avoir une valeur optimale avec des bornes (intervalles).

VI- RÔLE DU CLIMAT DANS L'ÉVOLUTION DU DÉBIT. EST-IL LE SEUL FACTEUR ?



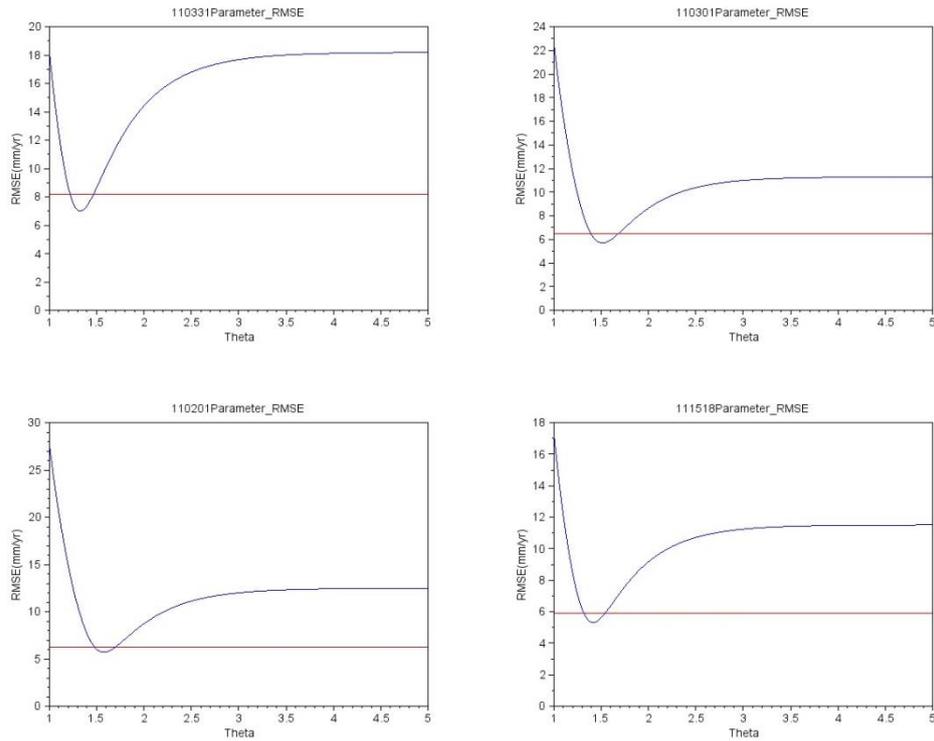


Figure 6.1 : L'évolution du RMSE en fonction du paramètre θ dans la formule de Schreiber

L'intervalle de confiance est défini par la valeur minimale de RMSE majorée de 50% de l'écart type. Mais dans ce qui va suivre, cet intervalle de confiance sera déterminé par la méthode de linéarisation de l'expression de Schreiber du modèle au pas de temps pluriannuel.

Les résultats de validation du modèle par le θ optimal dans l'expression de Schreiber dans les deux parties de la chronique sont présentés dans le tableau 6.1.

Tableau 6.1 : Résultats du calage/validation sur les deux parties des séries de débit. Θ_{opt} : est le paramètre optimisé ; RMSE : est l'erreur moyenne quadratique en divisant les séries de débit en deux parties avant et après 1990.

Code Bassin	Calage avant 1990				Calage après 1990			
	Theta opt	RMSE opt	RMSE val	Δ RMSE (val-opt)	Theta opt	RMSE opt	RMSE val	Δ RMSE (val-opt)
0101	2.3	3.27	22.52	19.25	1	3.07	6.79	3.72
0201	1.6	5.73	20.57	14.84	1.1	3.73	8.2	4.47
0301	1.5	5.7	16.42	10.72	1.1	3.26	6.32	3.06
0331	1.3	7.07	11.44	4.37	1.7	4.02	6.48	2.46
0506	1.8	8.58	8.58	0	1.8	1.16	1.16	0
1003	1.7	3.37	6.75	3.38	1.4	4.47	5.53	1.06
1127	1	34.69	34.69	0	1	46.23	46.23	0
1201	1.3	12.76	18.17	5.41	1	8.05	12.33	4.28
1220	1	18.21	18.21	0	1	31.04	31.04	0
1302	1.1	5.69	5.69	0	1.1	5.86	5.86	0
1403	1.5	4.23	8.63	4.4	2	0.54	2.41	1.87
1412	1.2	22.01	25.27	3.26	1.4	5.15	11.01	5.86
1425	1	24.43	24.43	0	1	23.92	23.92	0
1501	1.3	9.23	14.11	4.88	1.1	5.64	7.36	1.72
1505	1.4	5.12	5.12	0	1.4	2.13	2.13	0
1518	1.4	5.33	6.16	0.83	1.3	2.26	3	0.74
Mean	1.40	10.96	15.42	4.46	1.28	9.41	11.24	1.83

Les bassins suivant [110303, 110335, 111106, 111129, 111208] n'ont pas pu être pris en considération dans le modèle, car au pas de temps de 3 ans leurs chroniques ne sont pas assez longues pour ce pas de temps.

6.3. Calage et validation du modèle à base de l'expression de Schreiber

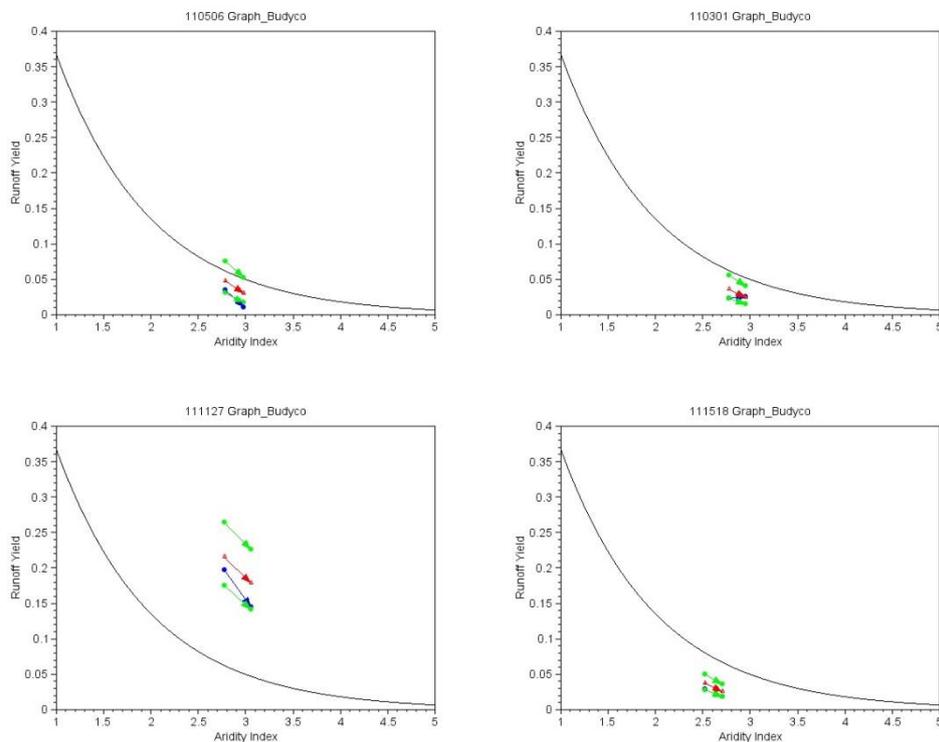
La première étape consiste à caler le modèle sur la première partie des séries de débit et valider sur la deuxième partie ; la seconde étape est l'inverse. Les résultats dans le tableau 6.1 nous montrent que le paramètre varie autour de 1 et en moyenne les deux paramètres calés dans les deux étapes sont proches avec un écart pour le paramètre X validé. Pour RMSE, en moyenne il n'y a pas un grand écart, dans certains cas l'efficacité du modèle est moins observée surtout lors du calibrage sur la première étape à l'ouest du bassin.

Sachant que l'expression originale de Schreiber a pour paramètre θ égal à 1, dans notre travail, nous avons constaté que le paramètre varie autour de 1 par contre les valeurs de RMSE obtenue dans le cas de certains bassins sont loin d'être représentables ce qui nous pousse à les éliminer dans les étapes suivantes concernant la modélisation hydrologique des bassins étudiés.

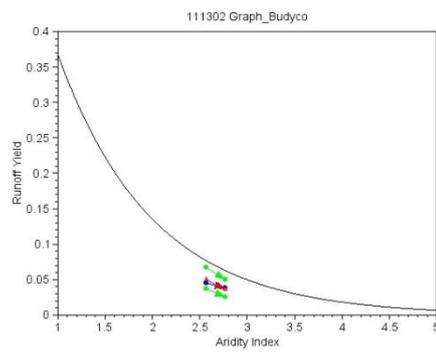
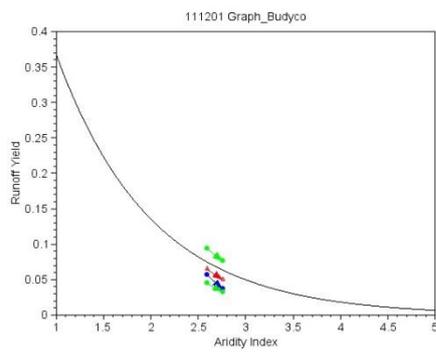
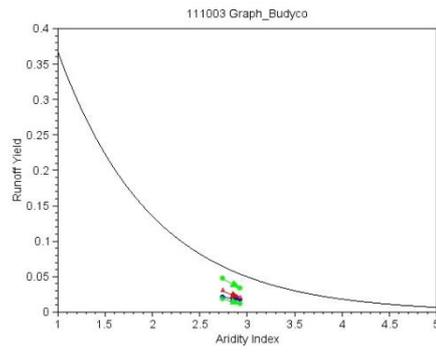
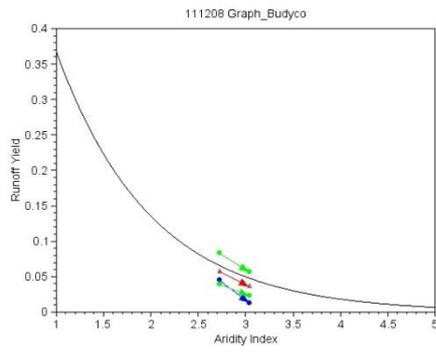
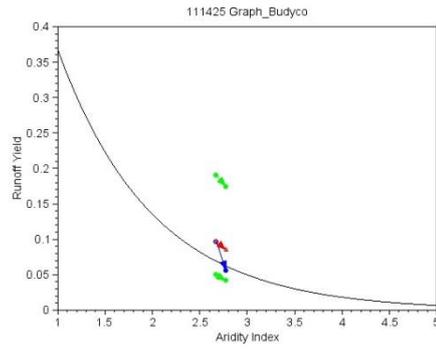
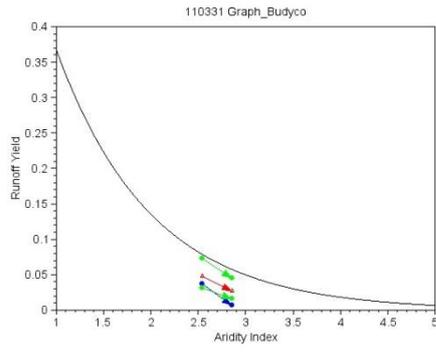
Nous avons pris la valeur de θ (paramètre du modèle) optimisée à travers le modèle calé dans la première période ensuite elle sera utilisée dans le calcul des débits simulés dans la deuxième période.

Dans la figure 6.2 on représente des graphes pour l'ensemble des bassins retenus dans lesquels nous avons pu suivre l'évolution des indices d'aridité calculés à partir des débits observés et des débits simulés entre la première période et la deuxième période

Respectivement en bleu, rouge et vert représentant l'évolution de : l'indice aridité observée en fonction de l'indice climatique entre les deux périodes, l'évolution de l'indice d'aridité calculé et en vert l'intervalle de confiance durant ces mêmes périodes ; la courbe noire présente le graphe de Budyko.



VI- RÔLE DU CLIMAT DANS L'ÉVOLUTION DU DÉBIT. EST-IL LE SEUL FACTEUR ?



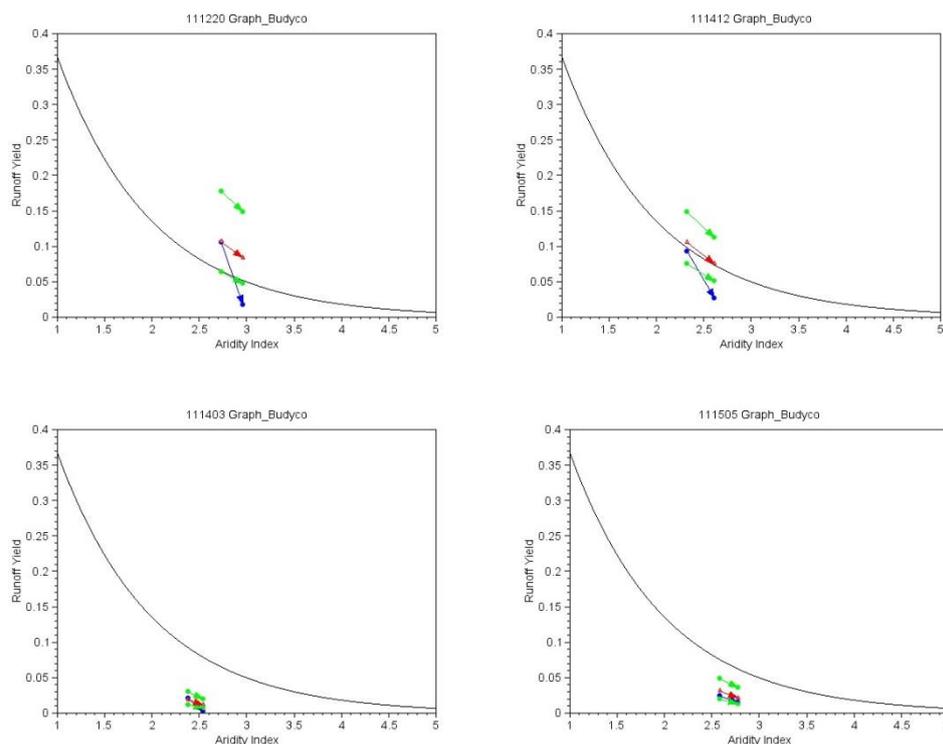


Figure 6.2: L'évolution des indices d'écoulement Q/P en fonction des indices d'aridité dans les bassins entre les deux périodes prises en compte (1975-1990 ; 1990-2000); en vert les bornes de l'enveloppe des indices d'aridité observés, en rouge les valeurs observées des deux périodes, en bleu les valeur simulées présentant les deux périodes.

Les résultats sont montrés dans le tableau 6.2

Tableau 6.2 : Emplacement de $ETP/P = f(Q/P|_{Ant})$ et $ETP/P = f(Q/P|_{Post})$. 'IC' : intervalle de confiance, '+' appartient à IC, '-' : en dehors de IC.

Bassin	Antérieur			Postérieur		
	Dessous I.C.	Dans I.C.	Dessus I.C.	Dessous I.C.	Dans I.C.	Dessus I.C.
0301	-	+	-	-	+	-
0331	-	+	-	+	-	-
0506	-	+	-	+	-	-
1003	-	+	-	-	+	-
1127	-	+	-	-	+	-
1201	-	+	-	-	+	-
1208	-	+	-	+	-	-
1220	-	+	-	+	-	-
1302	-	+	-	-	+	-
1403	-	+	-	+	-	-
1412	-	+	-	+	-	-
1425	-	+	-	-	+	-
1505	-	+	-	-	+	-
1518	-	+	-	-	+	-
Somme	0	14	0	6	8	0

Parmi l'ensemble des sous bassins étudiés 14 sont retenus du fait que $ETP/P = f(Q/P|_{Ant})$ soit dans l'intervalle de confiance, cet intervalle est obtenu à partir de la méthode de linéarisation de l'expression Schreiber, en prenant un intervalle de confiance à 95%.

Nous constatons que dans la deuxième période 8 sous bassins restent dans IC et les 6 autres sont au-dessous, ce qui veut dire que sur cet ensemble il y a une évolution vers la baisse qui n'est pas expliquée par la variabilité climatique, deux exemples sur l'évolution du comportement hydrologique dans les deux périodes relatives au cas des bassins :111302 (Ouzert) et 111220 (D^{ne} Bouchikhi) sont présentés dans la figure 6.3 qui montre que le premier illustre une évolution à la baisse due au climat du fait qu'elle suit la courbe de Schreiber, le deuxième montre une évolution à la baisse probablement à cause du climat plus un autre facteur.

Pour en savoir plus, nous avons analysé la différence entre les indices d'écoulement antérieurs et postérieurs observés en fonction de la différence entre les indices d'écoulement antérieurs et postérieurs (cf. Figure 6.3), les résultats indiquent que 9 sous bassins ont leur écart de l'indice d'écoulement observé supérieur à l'écart de l'indice d'écoulement simulé, 2 indiquent une égalité et 3 indiquent l'inverse : plus les points s'approchant de la bissectrice plus la climat joue le rôle majeur dans la baisse des débits.

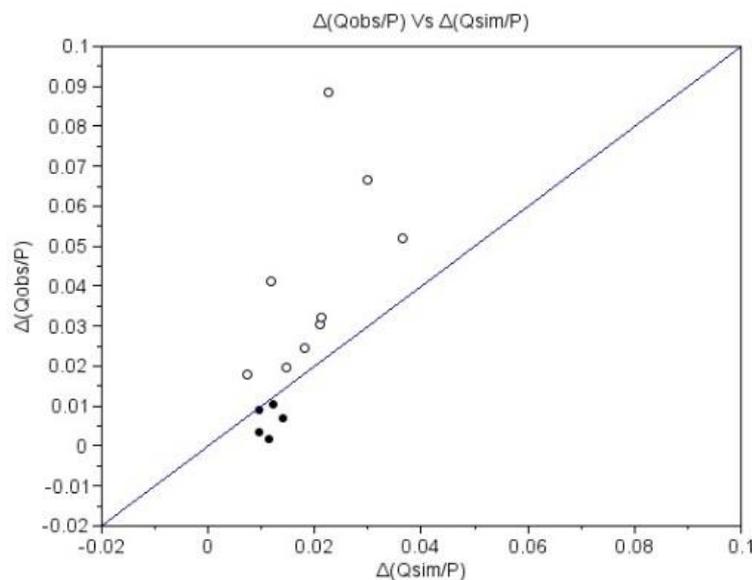


Figure 6.3: Quantification du rôle du climat dans la baisse des débits. // l'écart de l'indice d'écoulement observé en fonction de l'écart de l'indice d'écoulement simulé. $\Delta(Q/P)$ observé en fonction $\Delta(Q/P)$ simulé. "○" : sous bassins au-dessus de la bissectrice, "●" : sous bassins au-dessous de la bissectrice.

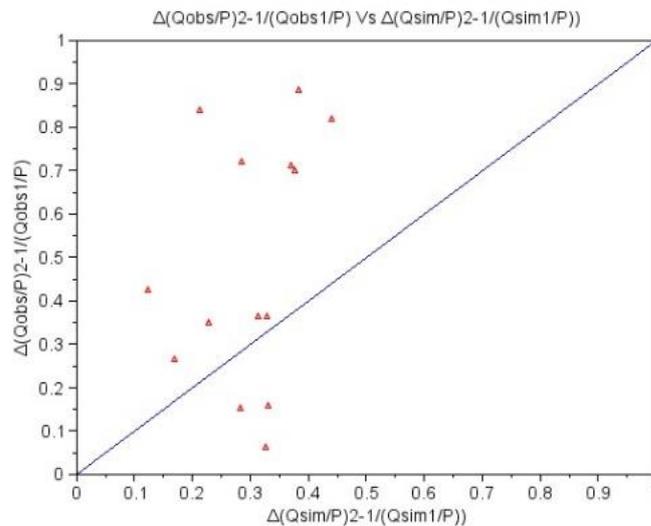


Figure 6.4 : Proportionnalité de l'origine de l'évolution du comportement hydrologique des sous bassins versants. "Δ" $\frac{Q/P|_{Post}-Q/P|_{Ant}}{Q/P|_{Ant}}$ observé en fonction $\frac{Q/P|_{Post}-Q/P|_{Ant}}{Q/P|_{Ant}}$ observés.

Afin d'avoir plus de précision, nous utilisons le rapport $\frac{Q/P|_{Post}-Q/P|_{Ant}}{Q/P|_{Ant}}$ observé en fonction de $\frac{Q/P|_{Post}-Q/P|_{Ant}}{Q/P|_{Ant}}$ simulé nous obtiendrons les résultats ci-après (cf. Figure 6.4), 4 sous bassins sont proches de la bissectrice qui implique que la baisse du débit évolue uniquement par le climat, 6 sont nettement supérieures à la bissectrice qui signifie une forte évolution à la baisse des débits et 3 montrent une faible évolution à la baisse des débits, la baisse des débits dans les deux derniers cas est telle qu'il est fort probable que le climat n'est pas la **seule** raison.

6.4. Rôle du climat sur les écoulements

L'objectif de cette partie est d'analyser les tendances et les points de ruptures dans les séries chronologiques des variables hydro-climatiques de cinq sous-bassins représentatifs du bassin de la Macta, qui se trouve dans l'ouest algérien. Ce choix se base sur l'idée que les bassins retenus ne doivent pas être emboîtés et compte tenu de cette variabilité spatiale dans le climat de la région, cinq sous-bassins versants ont été utilisés pour analyser la sensibilité relative des écoulements (voir Figure 6.5).

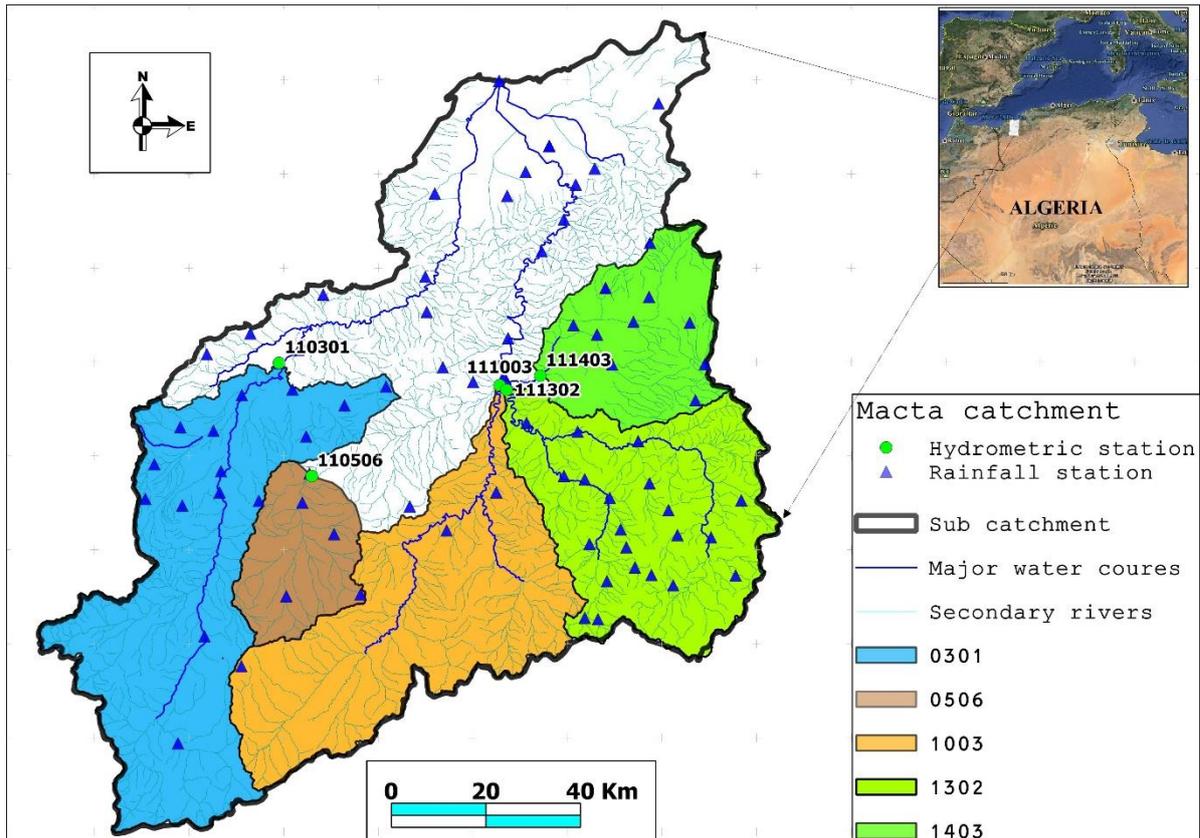


Figure 6.5 : Localisation des stations pluviométriques et hydrométriques utilisées

Le second objectif est de quantifier le rôle du climat sur les tendances observées pour la chronique des débits annuels. Ceci est réalisé grâce à la modélisation hydrologique au pas de temps pluriannuel à l'aide de la formule de Schreiber. Les résultats ont montré qu'aucune tendance significative n'est observée sur les pluies annuelles dans la période 1975-2005, une augmentation significative des températures et des différentes réponses des débits à ces tendances selon le bassin versant considéré. De plus, cinq bassins versants examinés, ont présenté une importante diminution pendant la période 1975-2005 avec un point de rupture au début des années 1990. Les résultats de la modélisation suggèrent que l'augmentation de la température de l'air n'est pas le seul facteur expliquant la baisse des débits au pas de temps annuel sur ces deux versants.

6.5. Description du site étude et des données utilisées

L'occupation des sols du bassin de la Macta se caractérise par le maquis méditerranéen dans la partie Sud-Ouest du bassin, des terres boisées dans la partie centre et les terres arables dans la partie Est (Cherif et al., 2009; El Mahi et al., 2012). Les activités liées au pompage d'eau ont considérablement augmentées au cours de la période 1975-2005, tel que présenté dans le tableau 6.3, mais aucune estimation (information) quantitative n'est disponible.

Tableau 6.3 : Ensemble des sous bassin versant et principales variables hydro-climatiques

Code	0301	0506	1003	1302	1403
Nom	Sd Bel Abbés	Tenira	Lâabana	Ouzert	Ain Fekan
Surface (km ²)	3000	746	257	2210	1160
Pluie moyenne annuelle (mm/yr)	276	336	313	305	318
Température moyenne annuelle (°C)	14.7	14.1	14.5	14.9	15.5
Écoulement moyen annuel (mm/yr)	8.22	6.65	6.58	13.4	3.64
Période de mesure	1975–2009	1975–2008	1975–2009	1975–2001	1975–2009
Nombre de station pluviométriques	16	6	4	22	10
Nombre de forage d'eau	5 (1975) 22 (1996)	8 (1975) 20 (1998)	3 (1975) 22 (2004)	9 (1975) 48 (2004)	15 (1975) 65(2000)

6.6. Données hydro-climatiques utilisées

Dans cette partie, les données de débit ont été utilisées au pas de temps annuel et pluriannuel, à partir de la base de données quotidienne disponible. Après délimitation des bassins versants au droit de ces stations hydrométriques, la moyenne de précipitations au pas de temps annuelles du bassin versant ont été estimées depuis les pluies mensuelles, qui consistaient à 68 pluviomètres situés dans ou près des sous-bassins versants considérés. Notez

que les données manquantes représentaient seulement 1,68 % en moyenne pour l'ensemble du réseau de pluviomètres.

La technique des polygones de Thiessen (Thiessen et Alter, 1911) a été suivie pour obtenir des estimations des précipitations pondérées sur chacun des sous bassins versants sur la période de 1975 – 2005.

Les données de la température de l'air du bassin versant ont été dérivées de ré-analyses issues de l'université du Delaware (Willmott et Matsuura, 1995; Willmott et Robeson, 1995). Les estimations ont été comparées à la température de l'air observée à la station de Ghriss. La forte corrélation entre l'observation et la ré-analyse de l'université de Delaware suggère que cet ensemble de données à long terme représente avec précision les changements de température dans la région. Les modèles du bilan hydrologique utilisent préférentiellement les estimations de l'évapotranspiration potentielle, pour cela, une simple équation d'ETP de Oudin et al. (2010) basée sur la température de l'air mensuelle a été utilisée.

6.7. Modèle du bilan hydrologique

Considérant le bassin comme un système fermé, le bilan hydrologique pourrait s'exprimer ainsi :

$$P - ET - Q - DS = 0 \qquad \text{Eq. 1}$$

Ou P : précipitation, ET : l'évapotranspiration, Q : débit et DS la variation de stockage d'eau du bassin versant. Étant donné que pour un grand pas de temps, la variation de stockage de l'eau de drainage devient négligeable, Eq. 1 est généralement exprimée comme suit:

$$ET = P - Q \qquad \text{Eq. 2}$$

Et sa forme adimensionnelle est:

$$\frac{ET}{P} = 1 - \frac{Q}{P} \quad \text{Eq. 3}$$

Les modèles dits bilan visent à proposer une formulation du terme de gauche de l'équation Eq. 3 ; ils s'appuient généralement sur l'évapotranspiration potentielle (ETP) et les estimations prennent la forme suivante:

$$\frac{\widehat{ET}}{P} = f\left(\frac{PE}{P}\right) \quad \text{Eq. 4}$$

ou bien en considérant l'équation. 3 pour être valide:

$$\frac{\widehat{Q}}{P} = 1 - f\left(\frac{PE}{P}\right) \quad \text{Eq. 5}$$

Un grand nombre de modèles de bilan existe, l'équation Budyko (1974) étant le plus couramment utilisé parmi eux. Bien que simples, ces modèles sont largement utilisés pour étudier la sensibilité de l'écoulement à la variabilité climatique (Dooge et al., 1999; Arora, 2002; Gardner, 2009). Lorsque le modèle est appliqué sur de grands échantillons de bassins versants, les études rapportent généralement peu de différences significatives en termes d'efficacité dans l'estimation de l'écoulement annuel moyen (voir e.g. Arora, 2002; Mouelhi et al., 2006), en particulier lorsqu'un paramètre libre est ajouté dans les formulations originales (Oudin et al., 2008).

Dans ce chapitre, nous avons choisi de concentrer notre analyse sur la simple équation Schreiber (1904), Qui peut être exprimée de façon adimensionnelle comme suit:

$$\frac{\widehat{Q}}{P} = \exp\left(-\theta \frac{PE}{P}\right) \quad \text{Eq. 6}$$

ou $\frac{\widehat{Q}}{P}$ le coefficient d'écoulement calculé au pas de temps de 3 ans, $\frac{PE}{P}$ est l'indice d'aridité de 3 ans, i.e. le rapport de l'évapotranspiration potentielle (PE) sur la précipitation de 3 années consécutives.

Ces deux rapports sont calculés sur des périodes de 3 ans et θ est un paramètre libre qui est obtenu par régression sur chaque bassin versant. θ est un paramètre nécessaire pour obtenir des simulations raisonnables de $\frac{\widehat{Q}}{P}$, la formule originale de Schreiber ($\theta = 1$) donne de grands

écarts pour certains bassins. La modélisation de la réponse des bassins versants arides est une difficulté bien connue en hydrologie et nous avons rencontré quelques problèmes classiques sur les sous-bassins de la Macta lors de l'application du modèle Schreiber: les rôles importants des crues extrêmes qui peuvent influencer largement les variations annuelles de débit, le fait que l'aquifère est probablement assez profond, ce qui signifie certainement que l'initialisation du modèle nécessite une période de temps assez longue et enfin, les incertitudes relativement importantes des données pour certaines périodes (en particulier pendant les troubles politiques au cours des années 1990). Par conséquent, le choix du modèle (et son pas de temps) était une question épineuse et nous avons finalement décidé d'utiliser un modèle à grand pas de temps pour faire face en partie avec le grand effet mémoire de l'aquifère profond. Cela semble un compromis raisonnable, mais ce choix exclut la possibilité de représenter les épisodes extrêmes (crues et étiages).

6.8. Méthode pour distinguer les variations observées et simulées de l'indice d'écoulement dues au climat

La méthodologie appliquée pour distinguer les variations d'écoulement dues au climat est dérivée du cadre proposé par Arora (2002) et récemment appliquée par Jaramillo et al. (2013) sur les bassins versants suédois et par Coron et al. (2014) sur les 14 bassins versants de la session de l'atelier "*Testing simulation and forecasting models in non-stationary conditions*" qui s'est tenu à Göteborg (Suède) (Thirel et al. 2014). Les modèles du bilan hydrologique, telle que la formule de Budyko ou celle de Schreiber supposent implicitement que le climat est le seul facteur de variabilité de ruissellement ; ils fournissent ainsi une représentation de dimension simple des liens entre la variabilité du climat et la variabilité des écoulements. Les équations du bilan hydrique (l'équation. 6) peuvent être tracées sur un graphe dans la figure 6.6. Quand le climat varie, sous l'hypothèse que le modèle Schreiber soit correcte, le rendement du bassin peut varier en conséquence sur la base du modèle de bilan hydrique. La déviation positive ou négative à cette ligne de base indique l'action d'un autre facteur que le climat.

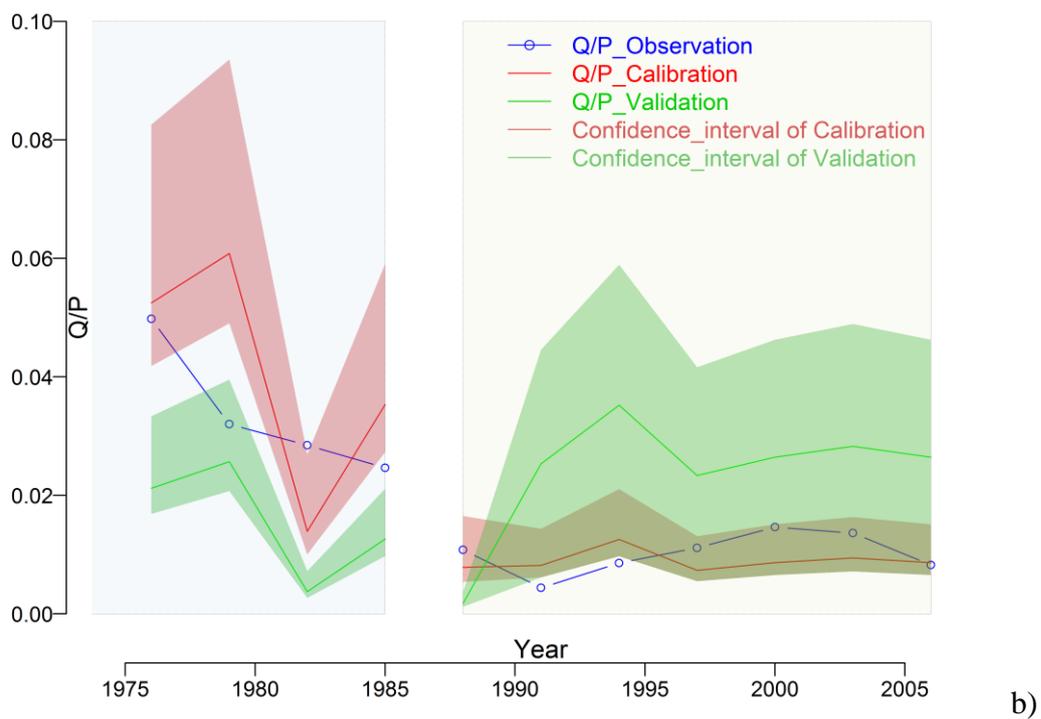
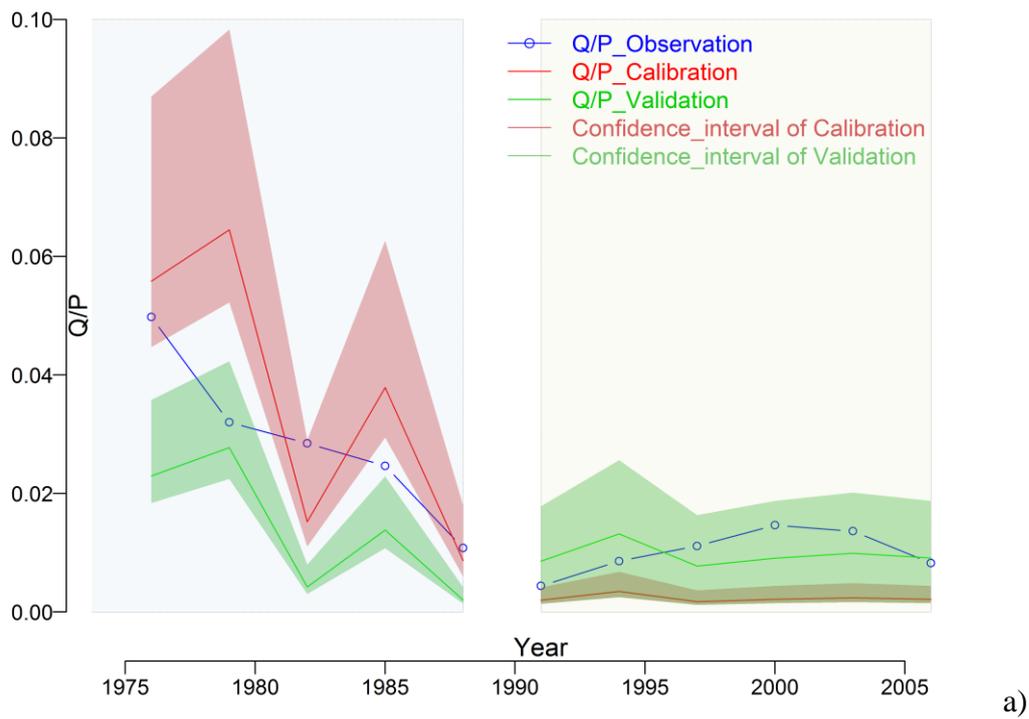


Figure 6.6 : Le rapport de la série temporelle au pas de temps 3 ans observée et simulée des bassins 110506 (a) and 111403 (b) en modes calage et validation. Les enveloppes correspondent aux simulations obtenues avec des intervalles de confiance à 95% pour la valeur du paramètre du modèle en calage.

La figure 6.6 montre la série de d'écoulement observé et simulé au pas de temps de 3 ans pour les bassins 110506 (a) et 111403 (b) dans les modes en calage et en validation. Les enveloppes obtenues correspondent aux valeurs de paramètre calé avec des intervalles de confiance à 95%.

La période de 30 ans (1975-2005) a été divisée en deux sous-périodes : 1975-1990 et 1990-2005. Ensuite, pour la première sous-période de chaque bassin, θ et les intervalles de confiance de $\frac{\hat{Q}}{P}$ ont été obtenues par linéarisation de la formule de Schreiber et ce utilisant la technique des moindres carrés ordinaires. Le paramètre calé a ensuite été utilisé pour simuler le coefficient d'écoulement $\frac{\hat{Q}}{P_{clim}}$ attribué à la variation du climat pour la seconde sous-période et les intervalles de confiance associés, représentant l'incertitude des paramètres.

La comparaison entre le rapport de précipitation-ruissellement observé et le rapport de précipitation-ruissellement d'origine climatique permet d'évaluer si le climat est à lui seul responsable de la variabilité de précipitation-ruissellement entre les deux sous-périodes.

6.9. Détection de changements dans les chroniques des variables hydro-climatiques au cours des trois dernières décennies.

Pour chaque bassin, les tests Mann-Kendall et Pettitt ont été appliqués afin de détecter l'existence de tendances et/ou ruptures hydro-climatiques de la série chronologique les périodes 1975-2005. Le tableau 6.4 résume les résultats en indiquant les points de ruptures détectés par les tests et les tendances significatives. Le tableau 6.4 montre les séries temporelles annuelles pour les cinq bassins versants.

Tableau 6.4 : Tendances et point de rupture des variables hydroclimatiques sur la période 1975–2005 'NS' indique pas tendance significative à 95% intervalle de confiance, '+' and '-' indique respectivement une tendance significative à la hausse et à la baisse à 95% d'intervalle de confiance. Les années de rupture sont indiquées si elles sont détectées comme significatives.

Code	0301	0506	1003	1302	1403
Nom	Sd Bel Abbés	Tenira	Lâabana	Ouzert	Ain Fekan
Surface (km ²)	3000	746	257	2210	1160
Période de mesure	1975–2009	1975–2008	1975–2009	1975–2001	1975–2009
Tendance dans la pluie annuelle	NS	NS	NS	NS	NS
Tendance dans la température annuelle	+	+	+	+	+
Tendance dans le débit annuel	NS	-	NS	NS	-
Point de rupture dans la pluie annuelle	NS	NS	NS	NS	NS
Point de rupture dans la température annuelle	+(1994)	+(1993)	+(1993)	+(1993)	+(1997)
Point de rupture dans le débit annuel	NS	-(1987)	NS	NS	-(1987)

Sur les cinq bassins versants étudiés, aucune tendance significative n'a été observée pour les chroniques de pluie au pas de temps annuelle du bassin versant. Par rapport aux précédentes conclusions sur la même région (Meddi et al., 2010 b; Trambly et al., 2013 ; Donat et al., 2014), qui ont détecté une baisse significative, les différents résultats obtenus dans ce document proviennent de la plus courte période de temps considérée ici (1975 – 2005). Le point de rupture dans les chroniques des pluies annuelles pour la région étudiée s'est produit dans les années 1970, et par conséquent, il n'est pas détecté ici.

Pour les température de l'air, en ce qui concerne les cinq bassins considérés, présentent une augmentation significative de la période de temps, qui est en accord avec de nombreuses études sur l'Afrique de l'Hémisphère Nord 1975 – 2004 (voir par exemple Collins, 2011; Fontaine et al., 2013 ; Donat et al., 2014). Un point de rupture significatif est également détecté au début des années 1990 pour tous les bassins versants.

Les tendances de l'écoulement moyen annuel sont variées. Deux bassins versants (110506 et 11403) ont présentés une diminution importante et les trois autres ne présentent aucune tendance significative.

La répartition spatiale des tendances dans les séries chronologiques des débits (voir le Tableau 6.2) suggèrent que les petits bassins versants dans les régions montagneuses de l'Ouest et de l'Est du bassin Macta sont plus touchés par cette tendance à la baisse. C'est peut-être en raison de l'absence d'un aquifère profond pour ces deux versants. Un point de rupture vers la fin des années 1980 est aussi détecté par le test de Pettitt pour les bassins versants 0506 et 1403. Par conséquent, dans ce qui suit, nous considérons le point de rupture de 1990 et le modèle de débit après et avant ce point de rupture pour les deux bassins qui présentent des points de rupture et des tendances dans les séries temporelles de débit.

6.10. Les résultats de calage et de validation de modèle

La performance du modèle modifié par l'expression de Schreiber a été évaluée par le biais du test de calage-validation classique de Klemeš, (1986). Comme expliqué dans la section précédente, deux sous-périodes (1975-1990 et 1990-2005) ont été examinées pour chaque bassin. Le paramètre θ a été obtenu en résolvant l'équation linéaire en utilisant la méthode des moindres carrés dérivée de l'Eq. 6.

Compte tenu de la relation linéaire exprimée par Eq. 7 et considérant que les erreurs dans la régression sont normalement distribuées ; les intervalles de confiance pour le paramètre θ et les coefficients de ruissellement simulés peuvent être obtenus.

$$\log\left(\frac{\hat{Q}}{P}\right) = -\theta \frac{PE}{P} \quad \text{Eq. 7}$$

Le Tableau 6.5 présente les résultats de calage et de validation pour les deux sous-périodes sur les bassins versants 110506 et 111403. Les valeurs moyennes de 3 ans de l'erreur quadratique moyenne "RMSE" et le biais, ainsi que le coefficient d'écoulement ($y = \left(\frac{\hat{Q}}{P}\right)$) présentent de grandes différences entre le calage et la validation. Cela est dû au passage de la

valeur du paramètre du modèle de calage à la validation sur les deux bassins versants. D'autres équations de bilan hydrologique (p. ex., Budyko) ont été testées pour améliorer les résultats dans le calage et la validation, mais étant donné que des résultats très similaires ont été obtenus, nous avons gardé le modèle Schreiber puisqu'il est assez simple et permet d'aborder la question de l'incertitude de manière simple grâce aux outils d'analyse de régression linéaire.

Tableau 6.5 : Performance en calage et validation du modèle Schreiber modifié ; (y) est la moyenne de 3 ans du rapport pluie-débit. La plage du paramètre dans le modèle représentée à 95% d'intervalle de confiance obtenue avec l'équation linéaire 7.

Code		0506		1403		
		Calage	Validation	Calage	Validation	
1 ^{er} sous période (avant 1990)	Paramètre du model (θ)	1.3		1.3		
	Plage du Paramètre	[1.1 ; 1.4]		[1.1 ; 1.4]		
	Nombre d'observations	5	6	4	6	
	(y)	0.029	0.012	0.025	0.0023	
	RMSE	ln(y)	0.475	1.21	0.425	2.34
		y	0.017	0.020	0.0080	0.017
	Bias(y)	0.80	0.34	0.95	0.13	
Seconde sous période (après 1990)	Paramètre du model (θ)	1.7		2.0		
	Plage du Paramètre	[1.5 ; 1.8]		[1.8 ; 2.1]		
	Nombre d'observations	6	5	6	4	
	(y)	0.012	0.029	0.0023	0.025	
	RMSE	ln(y)	0.428	1.266	0.643	2.119
		y	0.004	0.018	0.002	0.023
	Bias(y)	1.053	2.149	1.09	6.529	

6.11. Détection des variations de débits dues au climat à partir des variations des débits observés

Dans cette section, nous interprétons les variations du coefficient de ruissellement de la période de temps 1975 – 1990 à la période qui suit 1990 – 2005 par la méthodologie décrite ci-dessus. Les intervalles de confiance du paramètre θ ont été utilisés pour tenir compte des incertitudes du modèle calé pour la première sous-période.

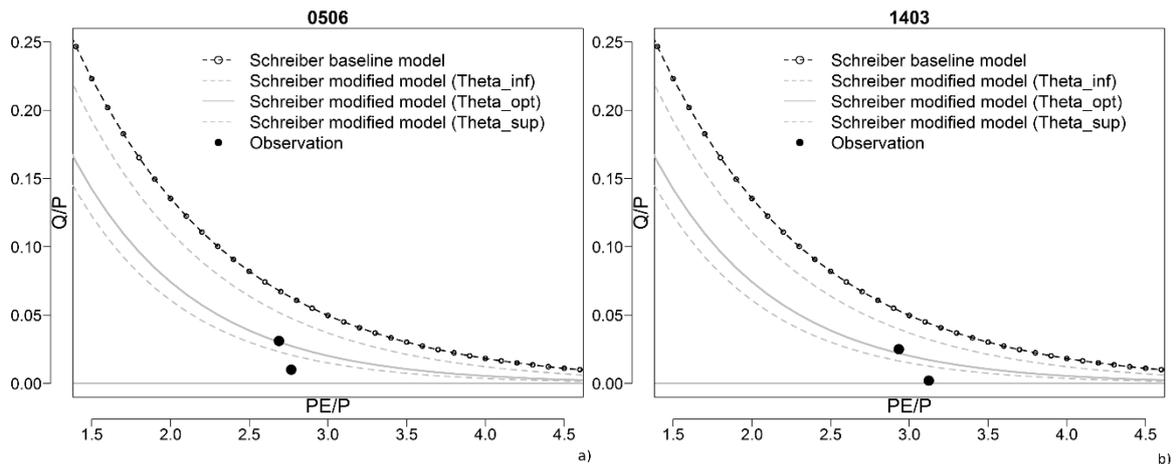


Figure 6.7 : Deux exemples de variation de coefficient de ruissellement due au climat issue du modèle de Schreiber modifié. Ces exemples sont tirés de bassins versants 0506 (a) et 1403 (b)

La figure 6.7 montre les résultats pour deux bassins. Pour ces deux bassins versants, les coefficients de ruissellement observés pour la seconde sous-période sont situés au-dessous de l'intervalle de confiance, et donc la diminution ne peut s'expliquer par le seul climat pour ces bassins. Cela signifie qu'une autre cause que le climat pourrait expliquer la réduction du débit. Les différences observées sur ces deux bassins versants contre les trois autres bassins étudiés probablement se trouvent dans les diverses tendances des niveaux des aquifères profonds. Les bassins versants 110506 et 111403 ne sont plus soutenus par les aquifères sous-jacents, contrairement aux trois autres bassins versants. Cette hypothèse est corroborée par des études antérieures, soulignant les réductions des niveaux piézométriques de certains aquifères de la région (Bekoussa et al., 2008).

6.12. Discussion.

Dans le chapitre 4, nous avons suivi une analyse de détection classique de tendance dans les variables hydroclimatiques disponibles sur le bassin de la Macta pour la période 1975 – 2005. Les moyennes annuelles des précipitations sur cette région rencontrent un changement sévère depuis les années 1970 (voir exemple Meddi et al., 2010 b), quant aux débits, ils sont considérablement impactés, mais il semble que depuis 1975, aucune tendance n'est détectable pour les précipitations annuelles sur le bassin versant. À l'inverse, la température de l'air et l'évapotranspiration potentielle ont augmentées au cours des trois dernières décennies. Cette

augmentation pourrait aussi expliquer la réduction des débits observés pour certains des bassins étudiés après 1975.

Malgré le rôle important du climat sur la variabilité du débit, beaucoup d'autres causes d'origine anthropique peuvent influencer les chroniques de débit. L'effet du changement climatique sur les écoulements annuels moyens peut être l'objet d'une recherche à travers l'utilisation des modèles de bilan hydrologique empirique tels que les modèles de Budyko et de Schreiber (Gardner, 2009). Nous avons évalué la pertinence de ces modèles pour simuler les variations des débits observés dans les bassins versants situés en Algérie. Parmi les cinq bassins étudiés, actuellement une baisse importante dans les écoulements annuels moyens au cours des trois dernières décennies, avec une période de changement survenant dans les années 1980. Puisque la demande évaporatoire a augmenté ces trois dernières décennies, nous avons déterminé dans quelle mesure cela pourrait expliquer la diminution du débit sur ces deux versants. Cela signifie que les variations climatiques annuelles ne suffisent pas à expliquer la baisse des débits observés puisque généralement le débit observé est inférieure au débit simulé par le modèle de bilan hydrologique, donc d'autres causes de cette baisse peuvent être étudiées.

Le pompage d'eau influence probablement la baisse de débit observé par l'utilisation de l'eau qui a probablement augmenté considérablement au cours des trois dernières décennies, et du moment qu'aucune donnée quantitative sur le prélèvement d'eau est disponible, cela ne permet pas d'appréhender cette question.

Le changement des régimes saisonniers du climat, notamment les pluies d'hiver, – pourraient aussi avoir influencé la baisse des débits. Cela ne peut être évalué par les modèles du bilan hydrologique classique avec un pas de temps de 3 ans ; par conséquent, les autres modèles doivent être utilisés à un pas de temps plus fin, mais la qualité des données hydrométriques au pas de temps plus fins rend l'application de ces modèles difficile. Le raffinement des modèles basés sur le bilan hydrologique qui tiennent compte des autres entrées comme la saisonnalité des pluies (Potter et Zhang, 2009) peuvent également être utilisé pour régler ce problème de manière plus raisonnable.

6.13. Conclusion

Les résultats n'ont montré aucune tendance significative sur les précipitations annuelles au cours de la période 1975-2005, on note par contre une augmentation significative à la hausse de la température et des différentes réponses à ces tendances des débits selon le bassin versant considéré. Deux, sur cinq bassins versants examinés, ont présenté une importante diminution pendant la période 1975-2005 avec un point de rupture au début des années 1990. Les résultats de la modélisation suggèrent que l'augmentation de la température de l'air n'est pas le seul facteur expliquant la baisse du débit annuel sur ces deux versants.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

« Le monde est un pot à eau, quand on a bu, on le passe à autrui pour qu'il boive aussi »

Proverbe Bambara

L'étude du bilan hydrique et l'estimation des ressources en eau superficielle en milieux semi-aride et aride est souvent confrontée aux problématiques liées à ce contexte climatique. En effet, le contexte d'aridité est caractérisé par une forte variabilité de la pluie dans le temps et dans l'espace et l'existence d'événements assez marqués. C'est le cas du bassin versant de Macta, situé à l'Ouest de l'Algérie septentrionale, et qui est caractérisé par de fortes hétérogénéités pluviométrique et territoriale.

Le bassin de la Macta héberge beaucoup de villes et agglomérations dont trois sont importantes, à savoir les villes de Sidi Bel Abbès, Mascara et Saïda. Vu la politique de la gestion intégrée de l'eau par bassin hydrographique, ce bassin a été retenu pour étudier et analyser les problèmes de la ressource en eau dans le pays. Des projets ont été lancés dans cette stratégie, et depuis plusieurs années, le bassin est suivi et étudié par différentes équipes. Des travaux de conservation des eaux et des sols ont été réalisés sur une grande partie du bassin, dont des aménagements de cours d'eau et des aménagements de versants. Malheureusement, le suivi dans un tel contexte climatique et géographique est assez difficile, ce qui engendre des lacunes et des erreurs, alors que le vieillissement de ces aménagements rend le bassin versant non-stationnaire.

A l'issue de ce travail, nous avons constaté que peu d'études ont été réalisées sur ce bassin quant à la modélisation de sa réponse hydrologique et des tendances des variables hydro-climatiques. Ceci est du fort probablement aux présences des lacunes dans ces variables et à l'accès difficile aux données relatives à ce bassin, aussi il est bon à savoir qu'il existe deux périodes auxquelles les stations de mesures furent à l'arrêt, l'une après l'indépendance (environ 7 ans) et l'autre pendant les événements politiques vécus dans les années 90.

L'analyse des tendances des variables hydro-climatiques durant la période de 1975 à 2005 par les tests de Mann Kendall et Pettitt nous a permis de conclure que sur les sous-bassins versants de la Macta, les chroniques annuelles des pluies présentent une stabilité, alors que les chroniques annuelles des températures ont mis en évidence des tendances à la hausse et par conséquent une tendance à la hausse également de l'évapotranspiration annuelle. Les points de changements ou de ruptures se situent généralement dans les années 90.

La modélisation conceptuelle a nécessité l'identification d'une structure de modèle approprié et, au sein d'une structure choisie, l'estimation des valeurs des paramètres de modèles

(et dans l'idéal, leur incertitude) grâce à une Calibration ou une calibration par rapport aux données observées.

Nous avons exploité différents modèles à réservoirs pour essayer de mettre une évidence une relation rationnelle pluie-débit, pour cela on a utilisé différentes périodes, au pas de temps mensuel et annuel (saisonnier) : allant jusqu'à 1995, de 1980 à 1995, toute la période disponible et enfin de 1975 à 2005. Malgré de nombreuses tentatives nous n'avons pas pu avoir des critères de performances assez crédibles pour exploiter les modèles comme outils d'analyse.

Après avoir passé au pas de temps pluriannuel, nous avons constaté que les critères de performance commencent à être meilleurs, en effet, plus le pas de temps augmente plus le modèle s'applique mieux, ceci peut être expliqué par le fait que l'augmentation du pas de temps joue le rôle du filtre qui élimine les erreurs aléatoires ('bruits') sur les variables hydroclimatiques. Nous pourrions dire que les modèles mensuels et saisonniers n'ont pas pu modéliser la réponse hydrologique des sous-bassins de la Macta, ceci probablement à cause de la présence des nappes aquifères sous-jacentes qui jouent le rôle de réservoirs renvoyant une réponse hydrologique tardive de ces sous-bassins, ainsi qu'à la forte hétérogénéité spatio-temporelle des pluies, sans exclure la qualité de la donnée elle-même.

La structure du modèle devra aussi prendre en compte le comportement dynamique de l'hydrogéologie de la région ce qui aide à mettre en évidence les paramètres qui représentent mieux le routage des eaux de pluie ainsi que les paramètres qui rappellent le mécanisme de vidange et l'échange avec les systèmes aquifères, ceci nécessite impérativement des données relatives à la cinétique des données hydrogéologiques, à savoir les débits de pompage des nappes présentés sous une chronique de taille suffisante et l'échange qu'il peut y avoir entre les différents aquifères existants.

Des résultats de la modélisation hydrologique à travers les différents pas de temps adoptés, nous pouvons conclure que pour gérer les ressources en eau superficielle des bassins de la Macta ainsi que des régions analogues des points de vues aspects climatique et géomorphologique, nous recommandons de le faire au pas de temps pluriannuel car cela contribue à la compensation des erreurs de mesures commises au niveau des données.

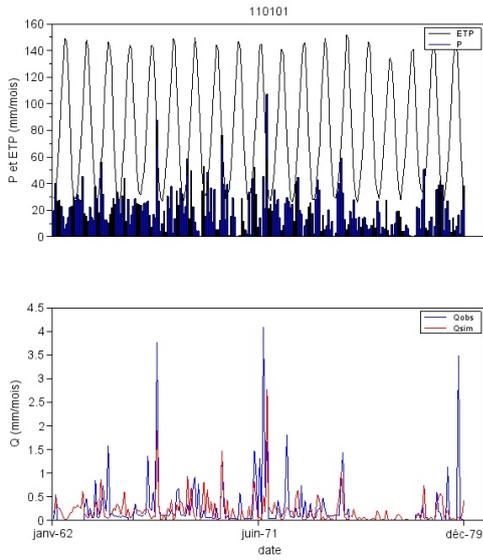
En se basant sur les valeurs obtenues du paramètre de performance RMSE, nous avons retenue deux sous-bassins aux codes ANRH 110506 et 111403 pour y enquêter si le climat est à lui seul l'acteur influençant la tendance à la baisse des débits constatés sur la région étudiée.

A l'aide du graphe de Budyko, nous avons conclu que cette tendance à la baisse dans les chroniques des écoulements annuels est vraisemblablement due, non seulement au climat, vu l'accroissement constaté sur les chroniques des températures annuelles et par conséquent des évapotranspirations potentielles, mais aussi à l'activité anthropique que la région a connue ces dernières années.

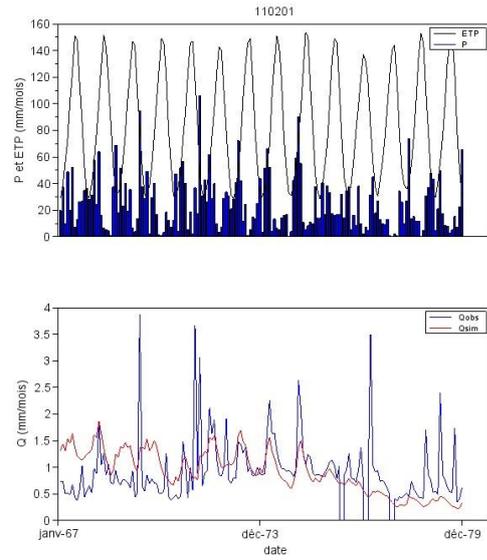
En effet, en plus du réchauffement planétaire fortement ressenti sur la région, les soutirages excessifs des nappes à travers des forages d'eau, des puits ou directement depuis les cours d'eau contribuent probablement au tarissement de ces réservoirs.

ANNEXE

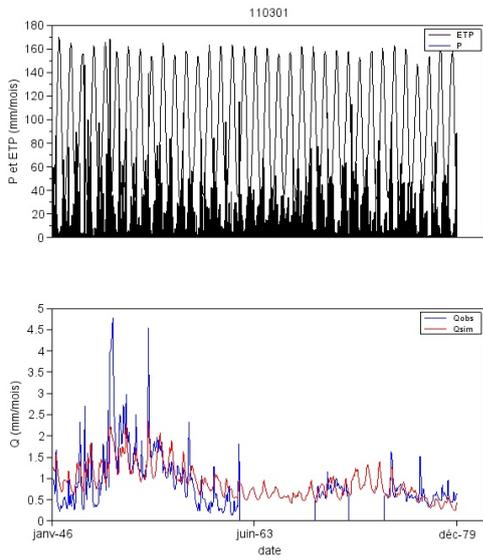
ANNEXE CHAPITRE V



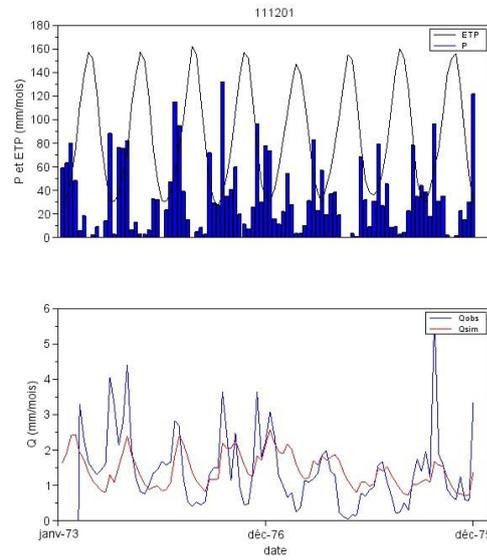
a)



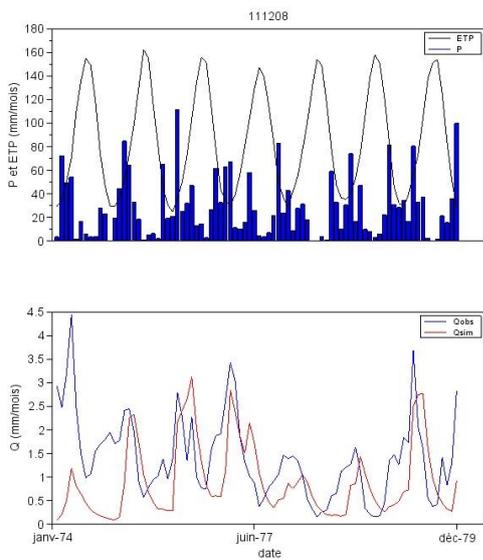
b)



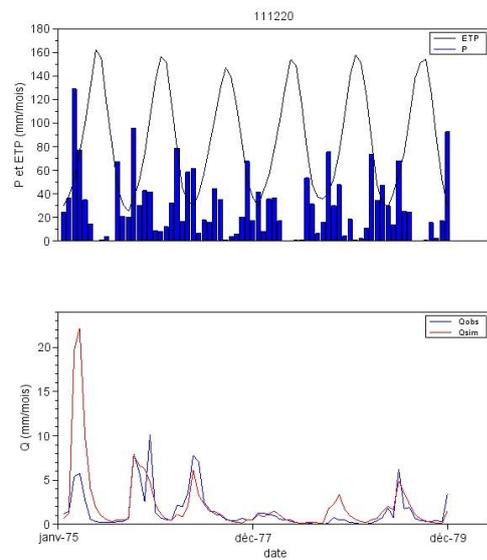
c)



d)



e)



f)

ANNEXE CHAPITRE V

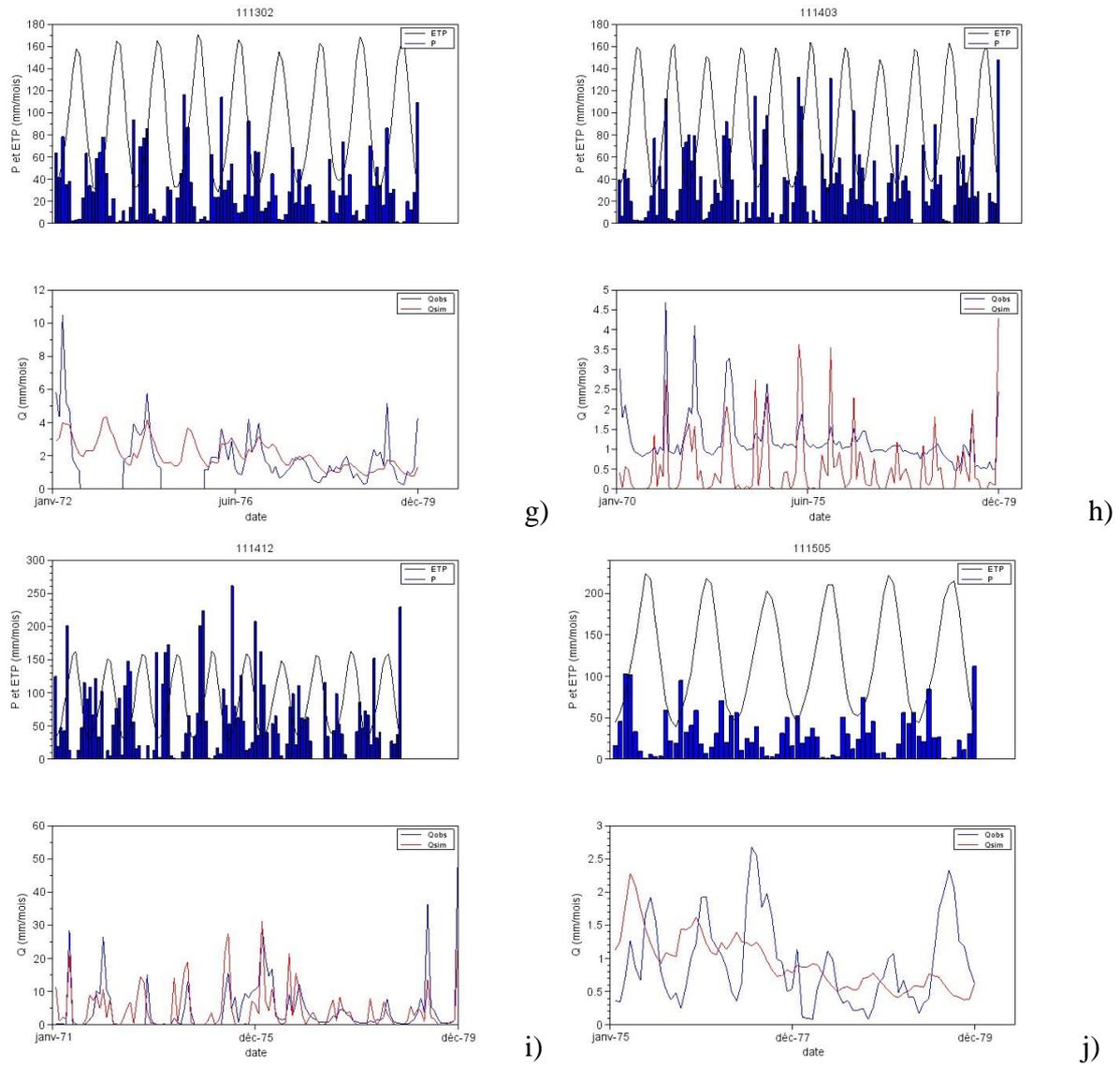
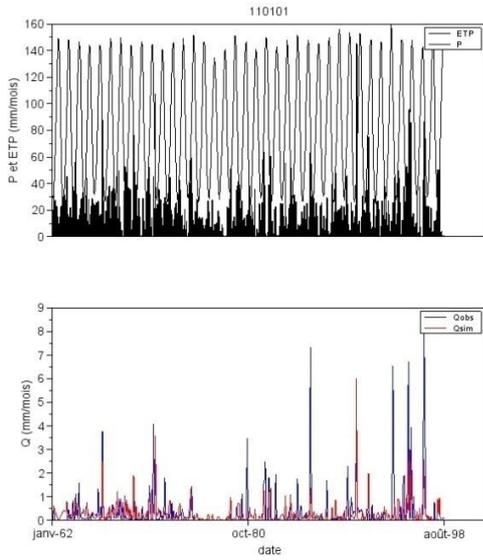
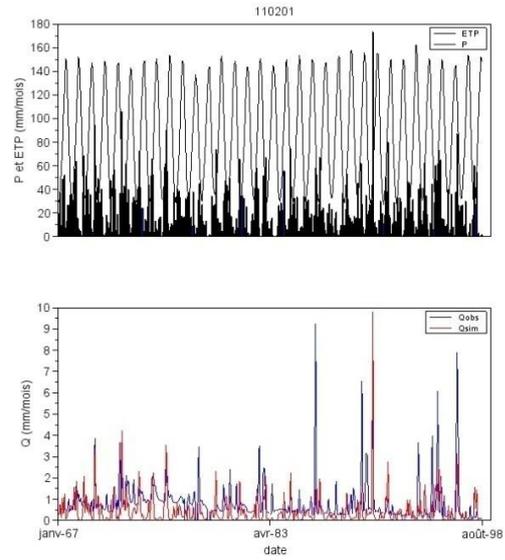


Figure 1. Modèle GR2M appliqué aux bassins de la Macta (chronique s'arrête jusqu'à l'année 1980).

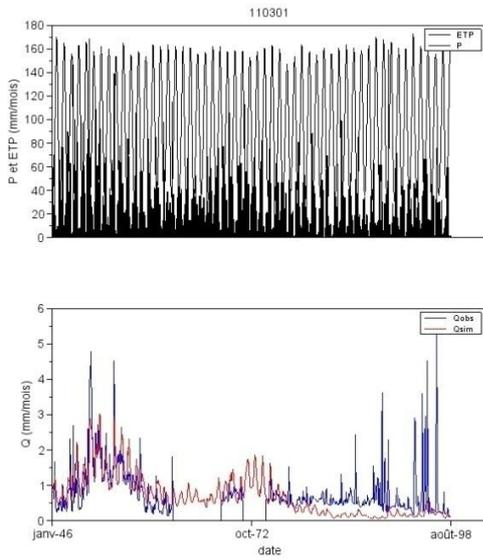
ANNEXE CHAPITRE V



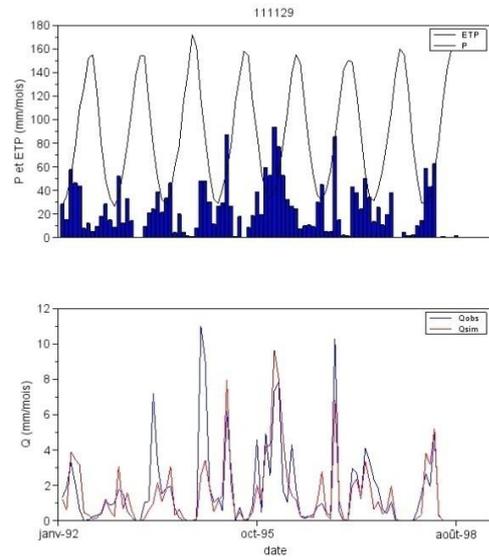
a)



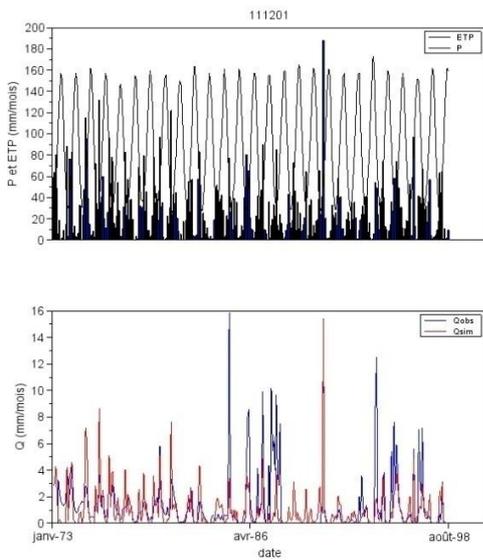
b)



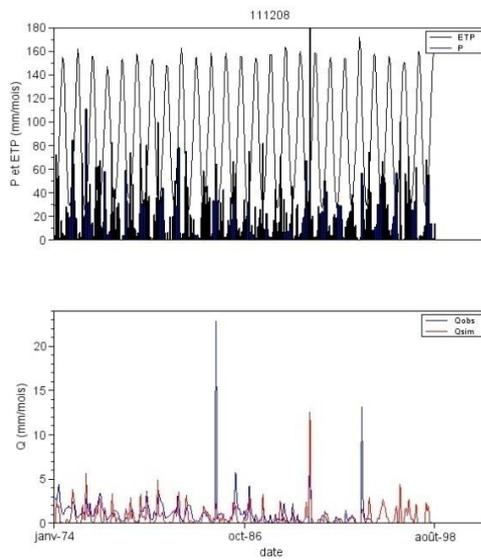
c)



e)



f)



g)

ANNEXE CHAPITRE V

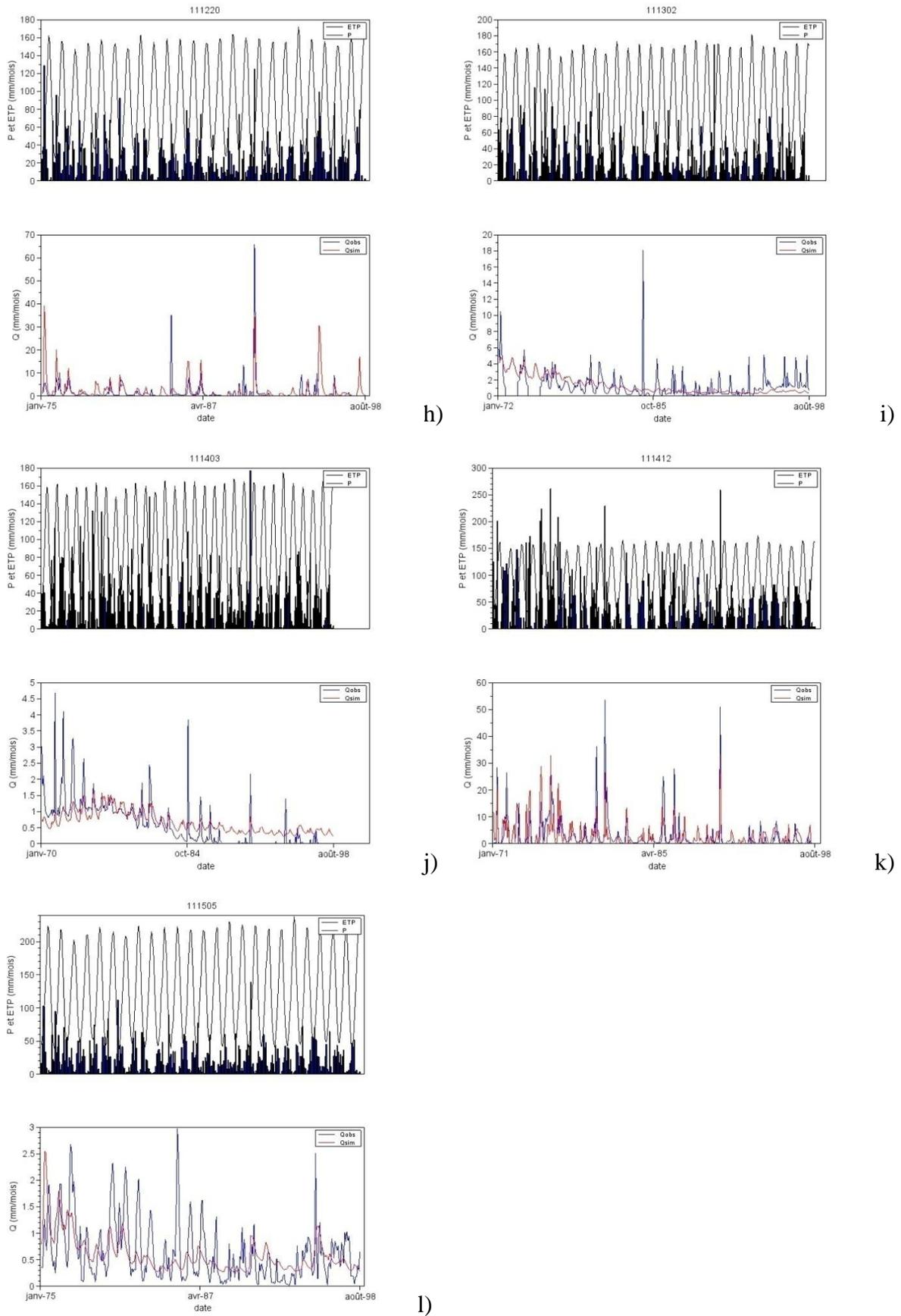
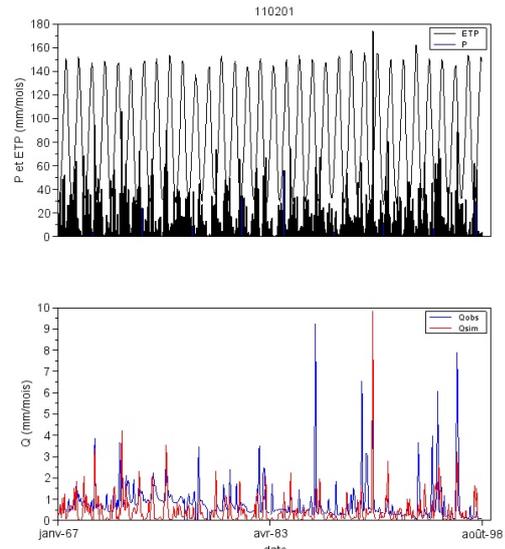
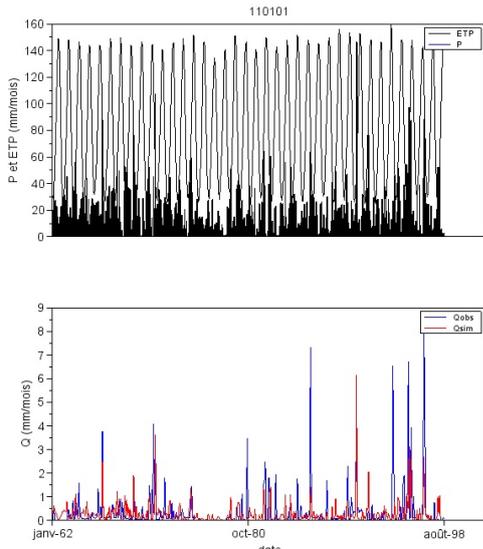


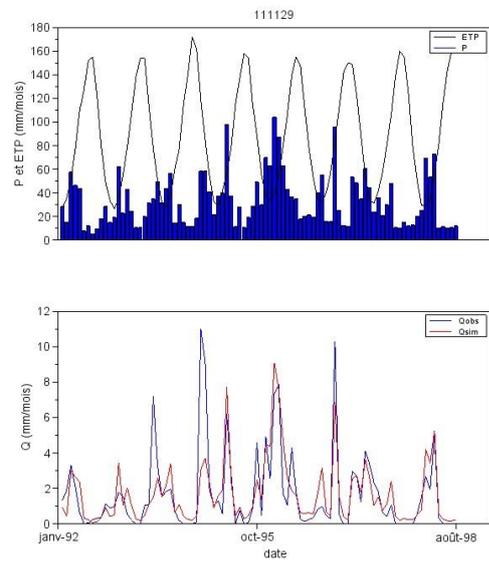
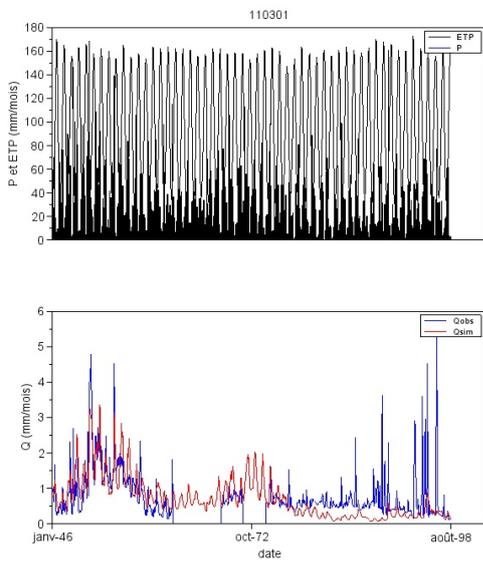
Figure 2. Modèle GR2M appliquées aux bassins de la Macta en tenant compte toute la période de la chronique

ANNEXE CHAPITRE V



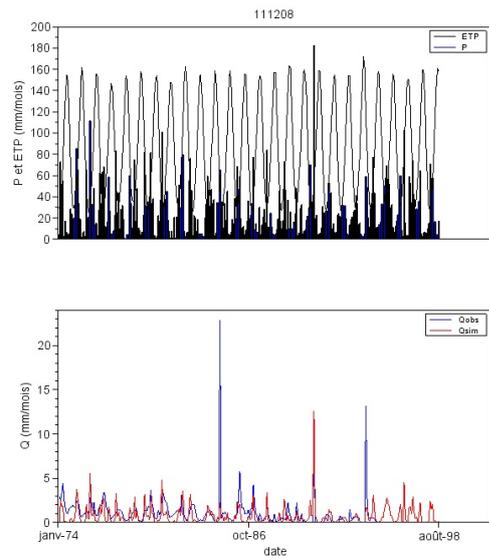
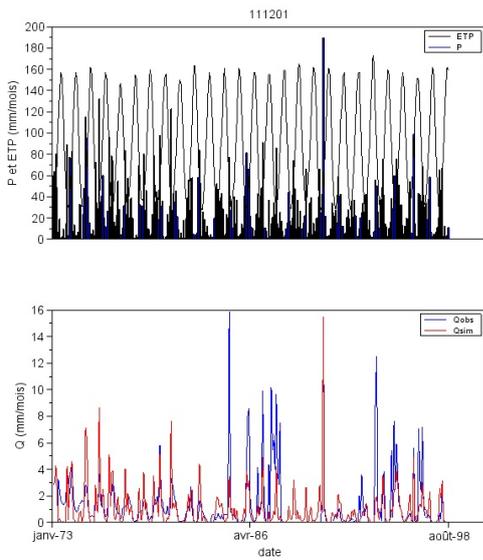
a)

b)



c)

d)



e)

f)

ANNEXE CHAPITRE V

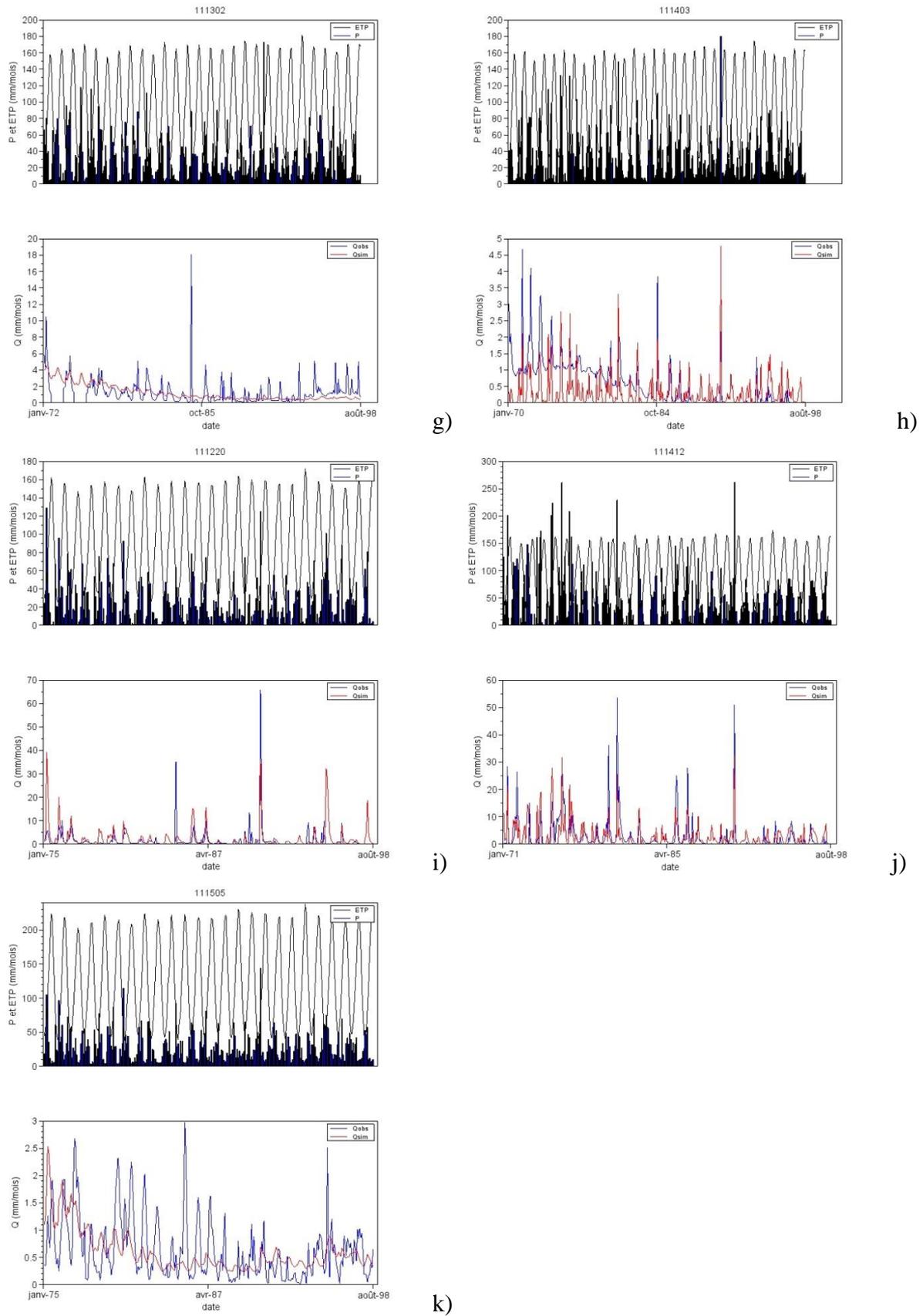
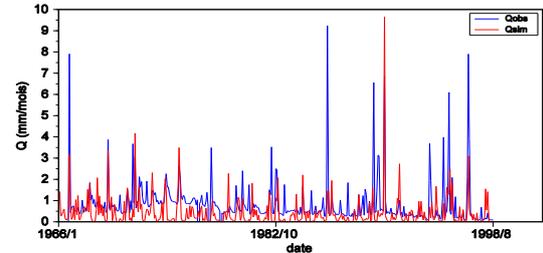
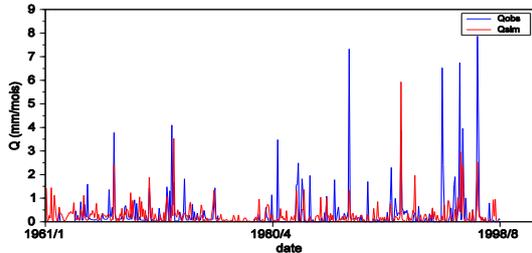
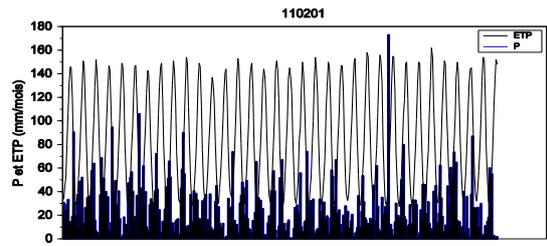
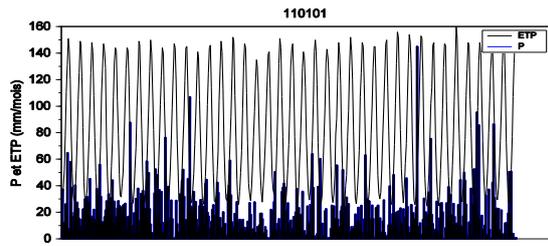


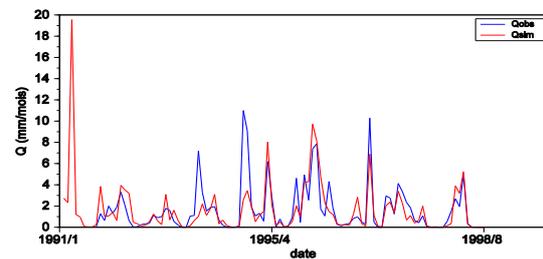
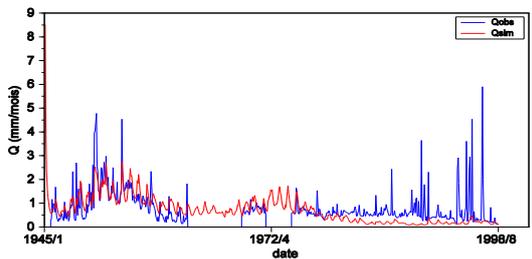
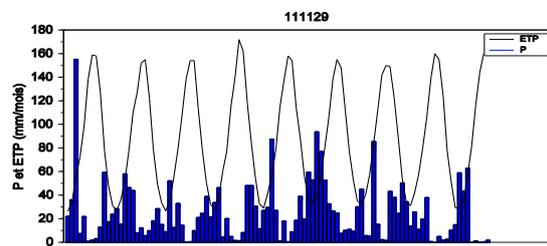
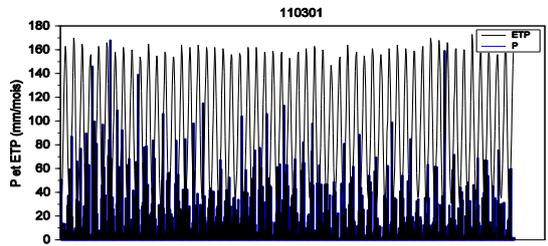
Figure 3. Modèle GR2M appliqué aux bassins tenant compte des débits des forages d'eau

ANNEXE CHAPITRE V



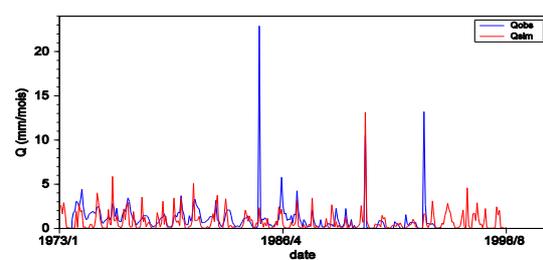
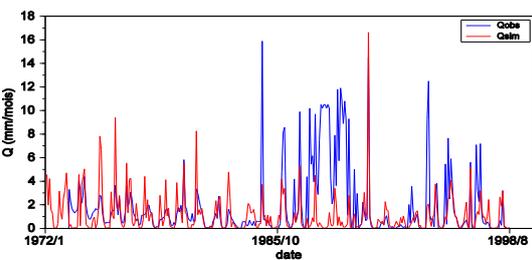
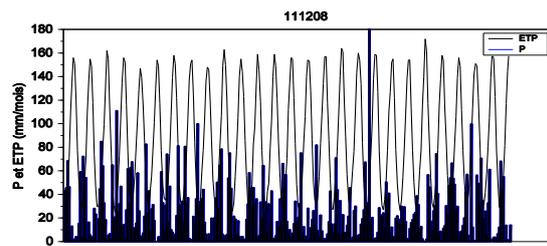
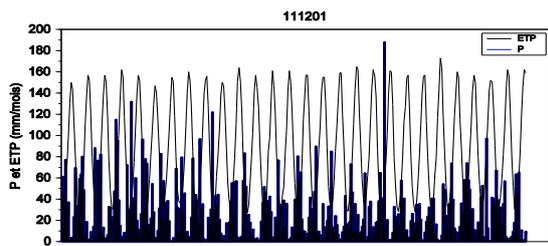
a)

b)



c)

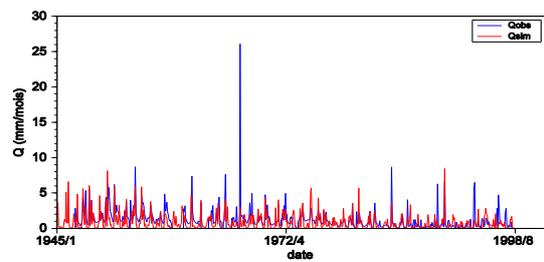
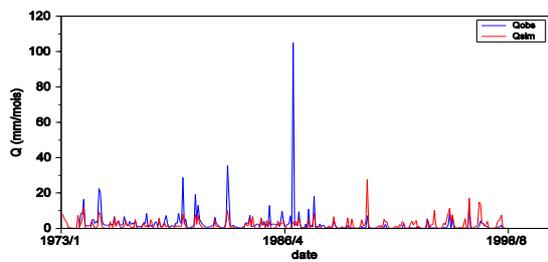
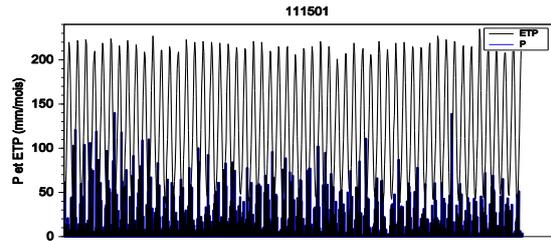
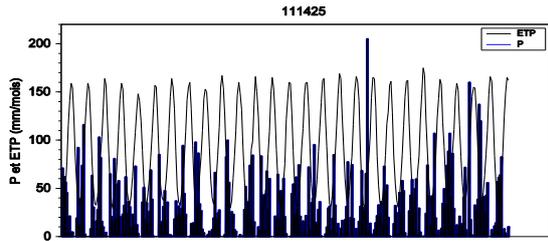
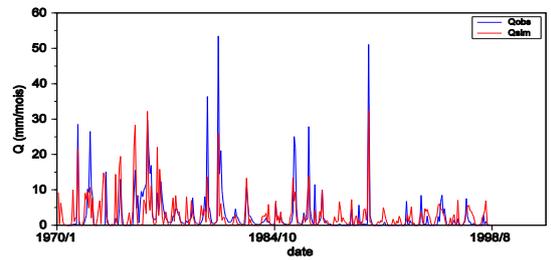
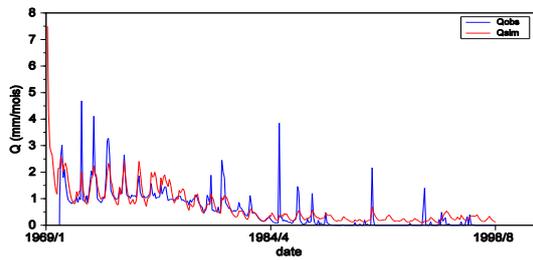
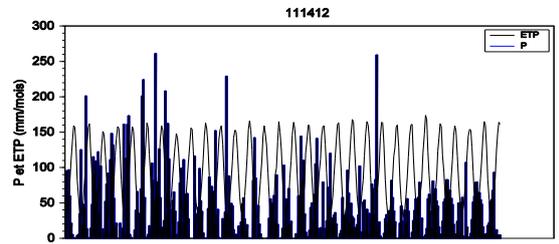
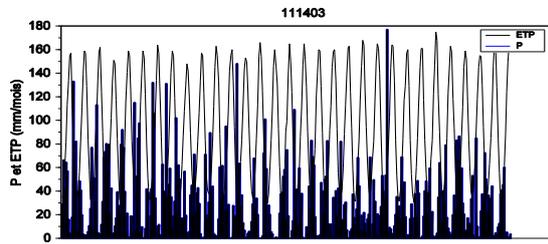
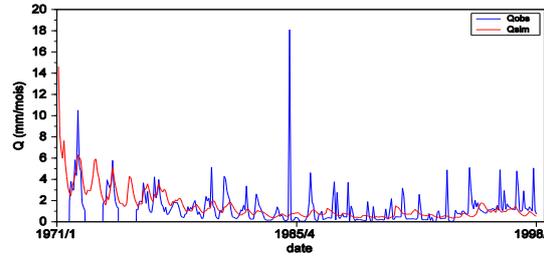
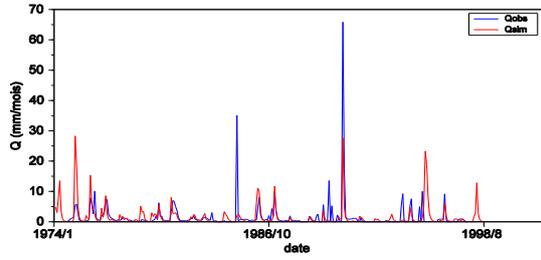
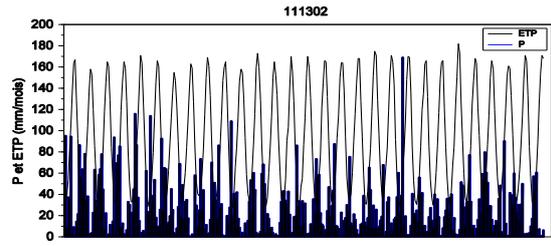
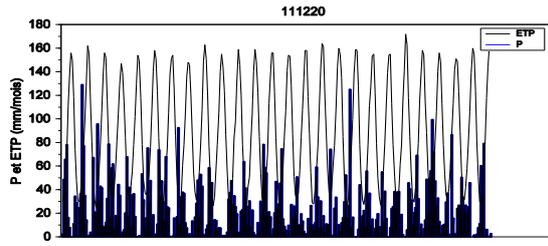
d)



e)

f)

ANNEXE CHAPITRE V



g)

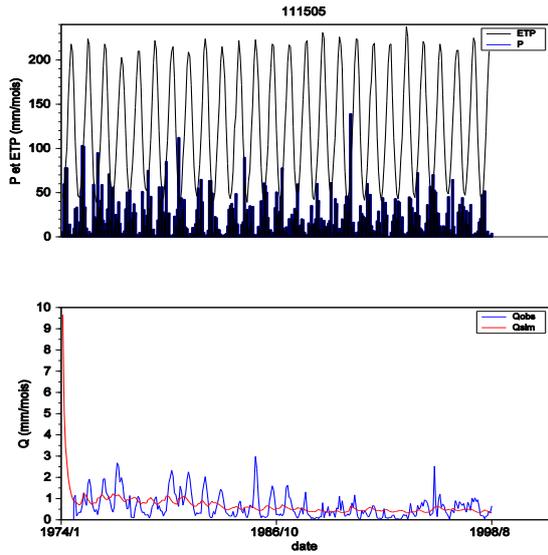
h)

i)

j)

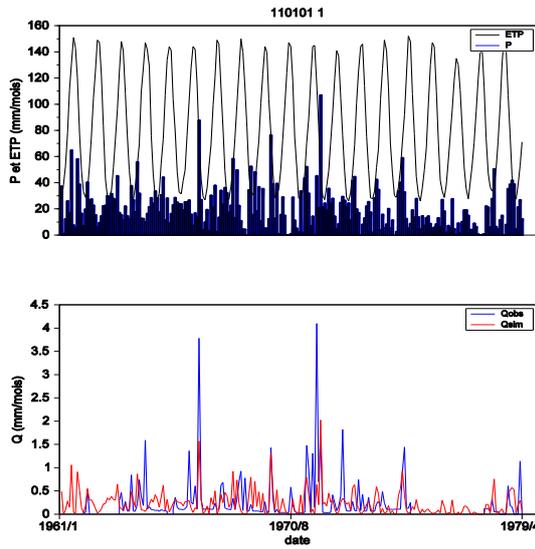
k)

l)

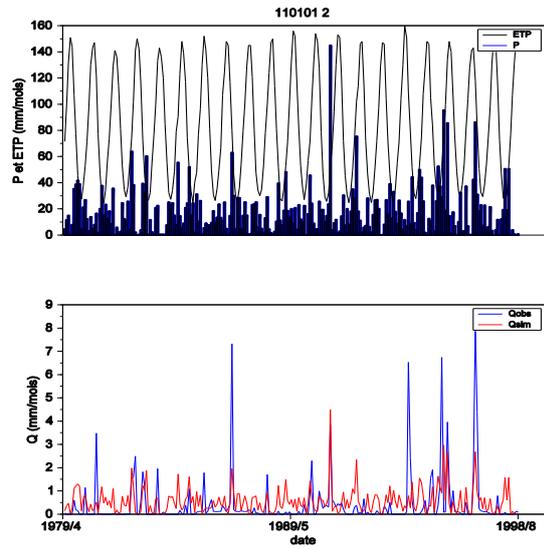


m)

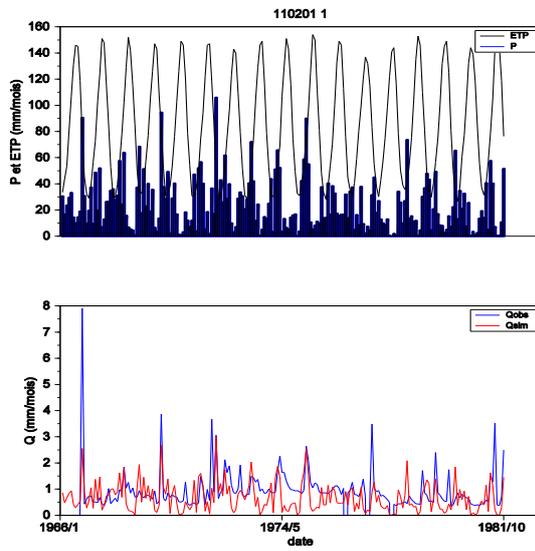
Figure 4. Modèle GR 3M appliqué aux bassins de la Macta en tenant compte toutes les chroniques.



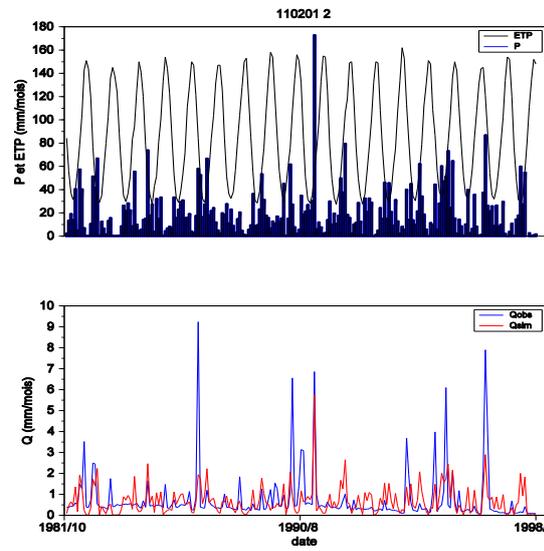
a)



a')

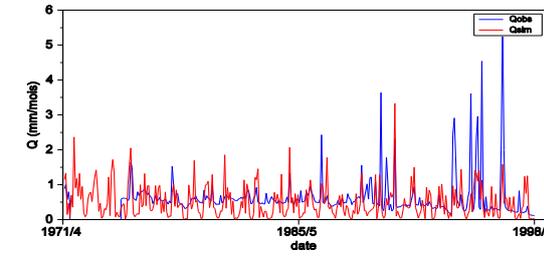
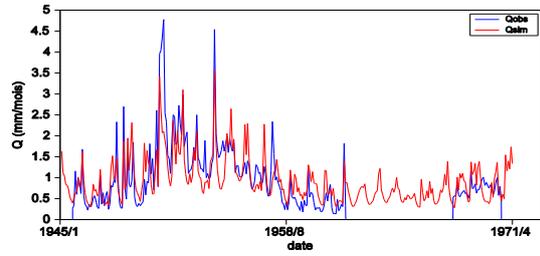
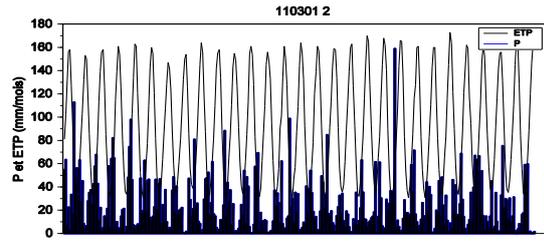
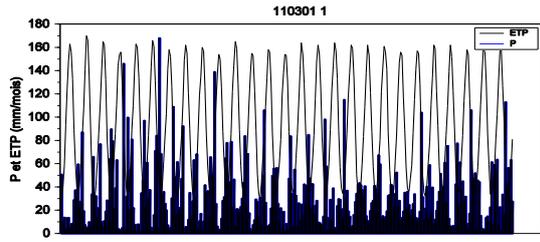


b)



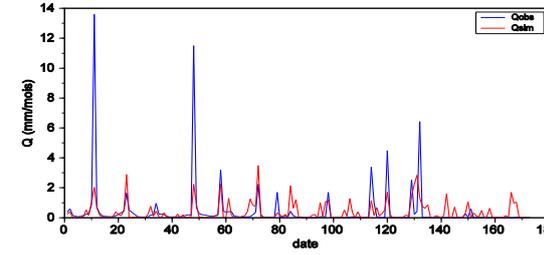
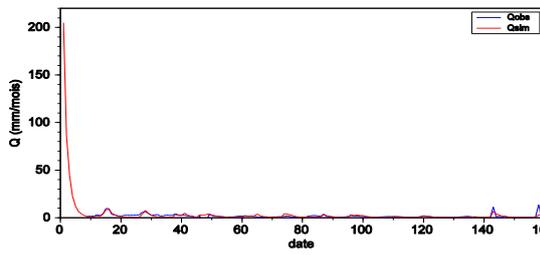
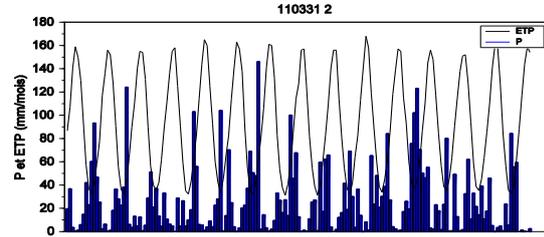
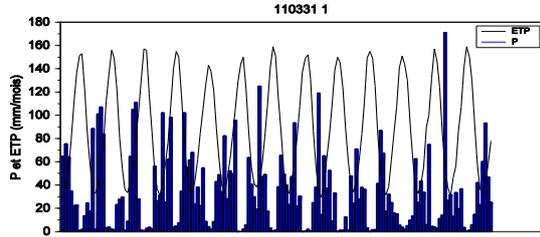
b')

ANNEXE CHAPITRE V



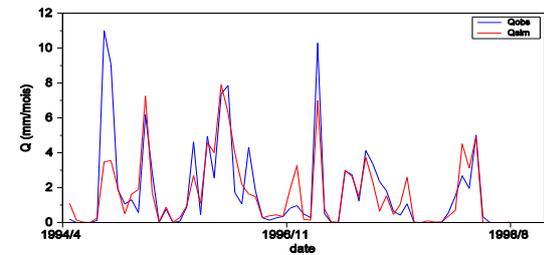
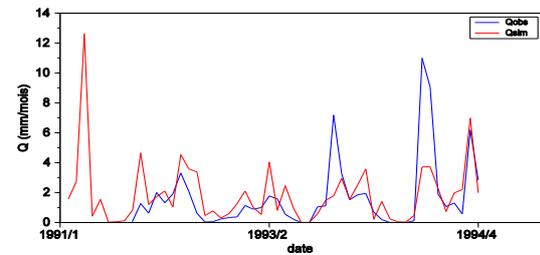
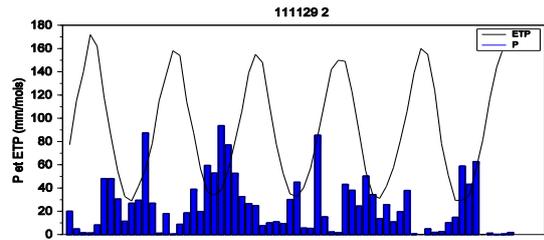
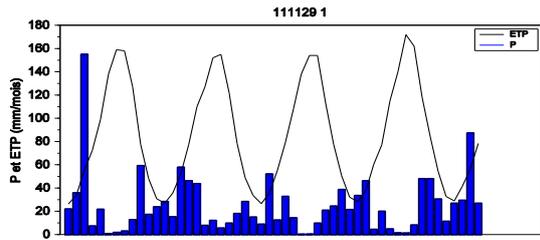
c)

c')



d)

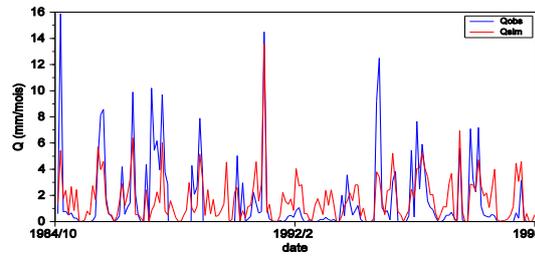
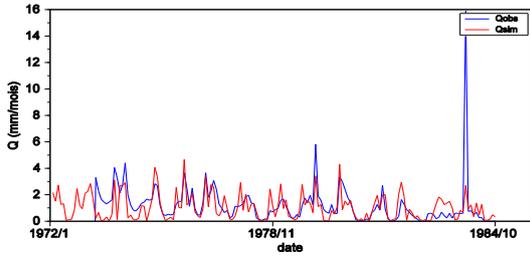
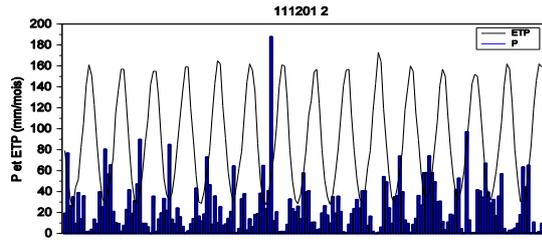
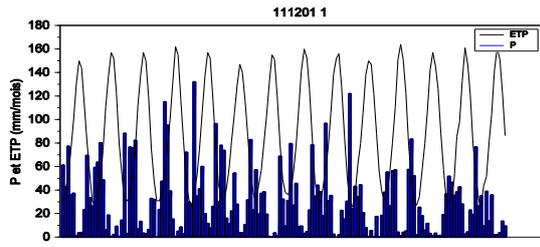
d')



e)

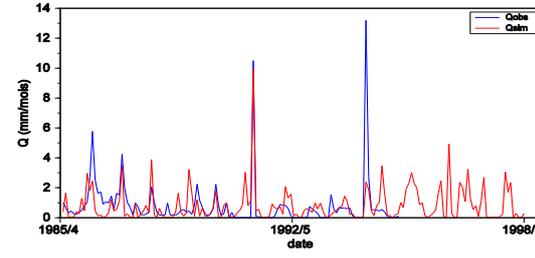
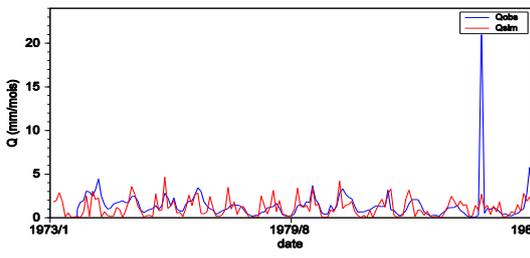
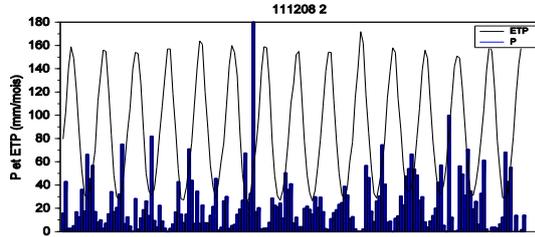
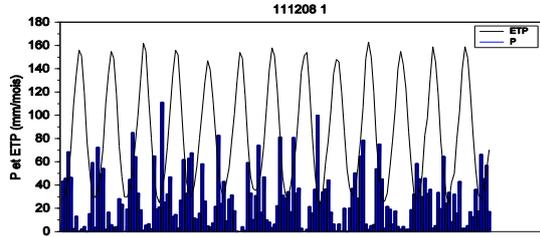
e')

ANNEXE CHAPITRE V



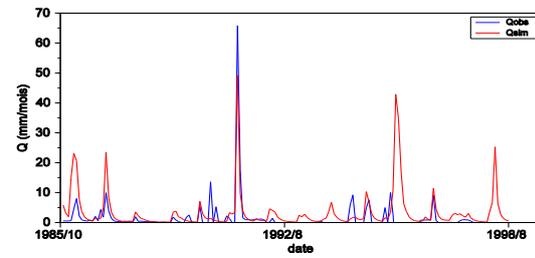
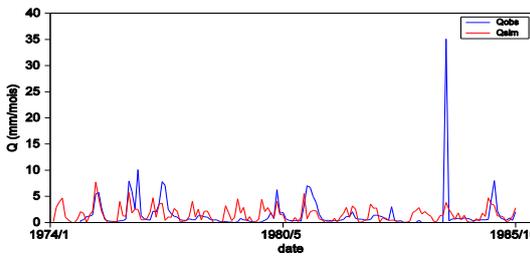
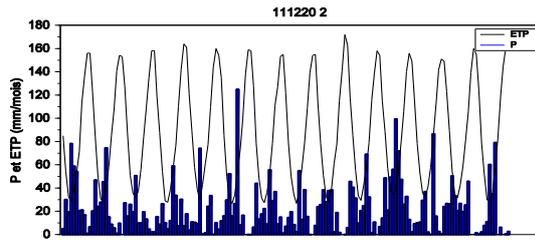
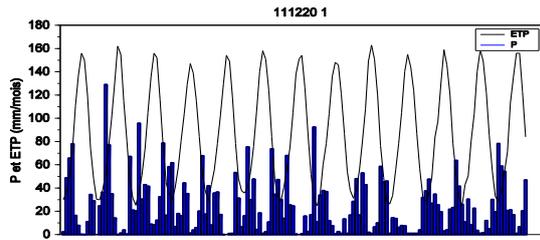
f)

f')



g)

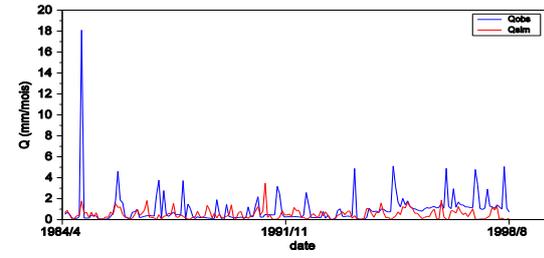
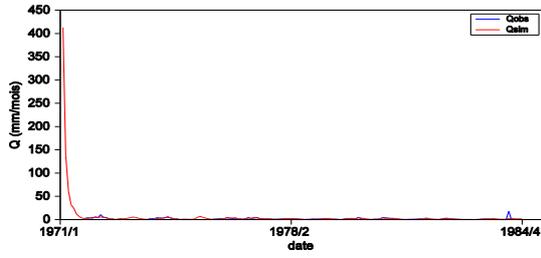
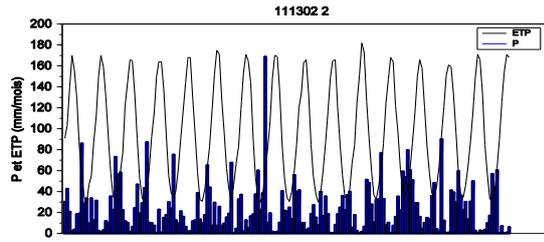
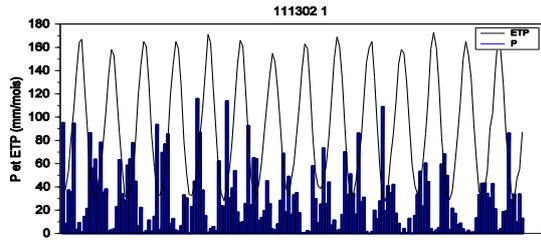
g')



h)

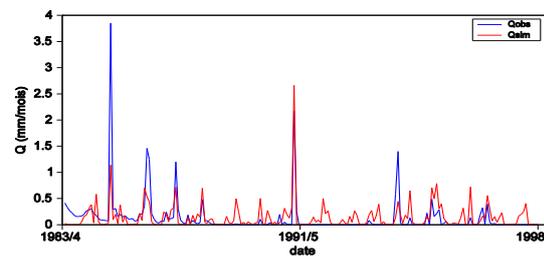
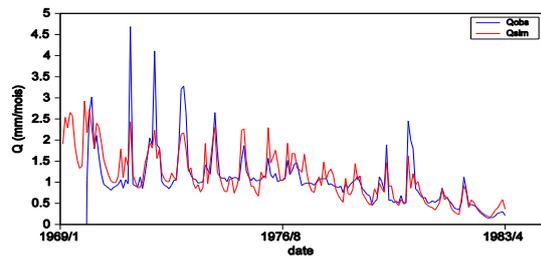
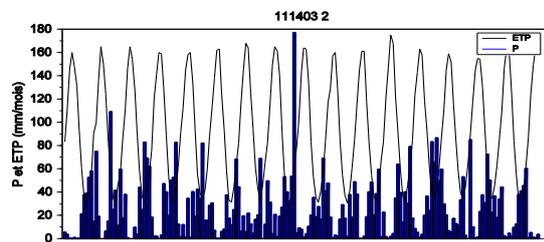
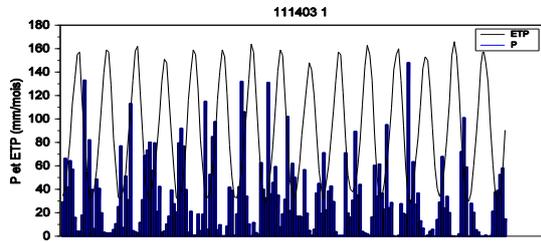
h')

ANNEXE CHAPITRE V



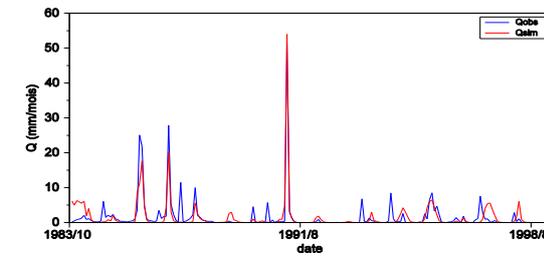
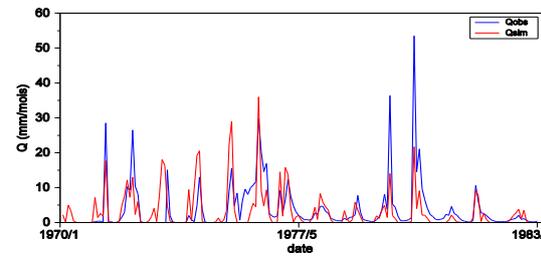
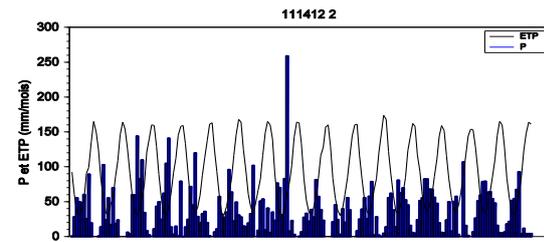
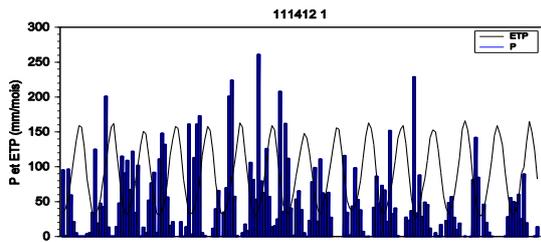
i)

i')



j)

j')



k)

k')

ANNEXE CHAPITRE V

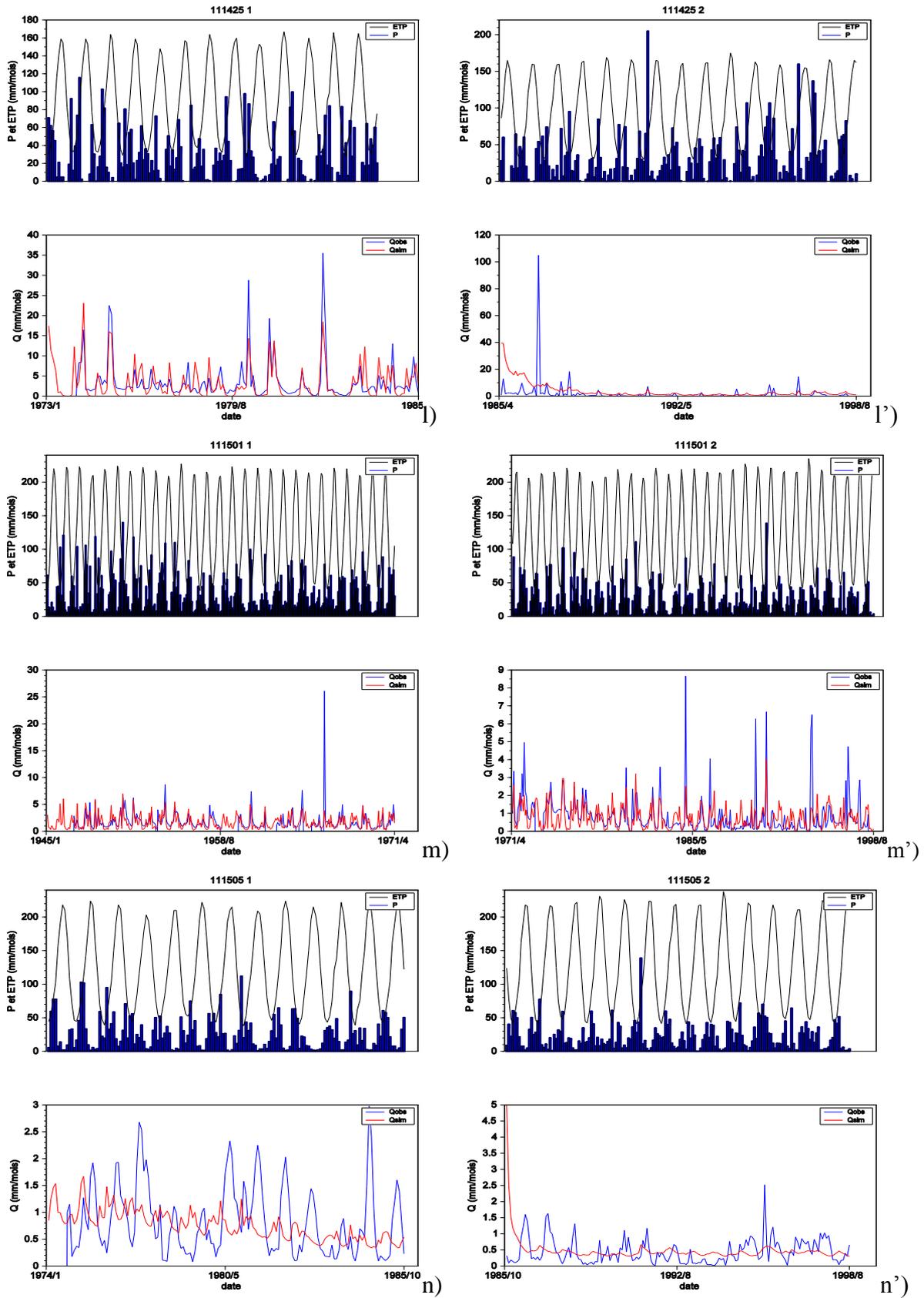


Figure 5. Modèle GR4M appliqué aux bassins de la Macta (calage-validation)

BIBLIOGRAPHIE

- Abdelkader, MENDAS, ERRIH Mohamed, and DJILALI Abdelkader. “Hydrologic Model Combined to a GIS for Estimating Hydrologic Balance at Watershed Scale- Application to the Watershed of Macta (Western Algerian).” In *Proceedings of the 2nd IASME/WSEAS International Conference on Water Resources, Hydraulics & Hydrology*, 26–30, 2007. <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2007portoroz/papers/555-115.pdf>.
- Abouabdillah, Aziz, Ons Oueslati, Anna Maria De Girolamo, and Antonio Lo Porto. “Modeling the Impact of Climate Change in a Mediterranean Catchment (Merguellil, Tunisia).” *Fresenius Environmental Bulletin* 19, no. 10 (2010): 2334–47.
- Adamowski, Jan, Kaz Adamowski, and John Bougadis. “Influence of Trend on Short Duration Design Storms.” *Water Resources Management* 24, no. 3 (2010): 401–13.
- Adamowski, Jan, and Karen Sun. “Development of a Coupled Wavelet Transform and Neural Network Method for Flow Forecasting of Non-Perennial Rivers in Semi-Arid Watersheds.” *Journal of Hydrology* 390, no. 1 (2010): 85–91.
- Aït MESBAH, S. *Analyse du comportement hydrologique du bassin versant de l’Orgeval : Tendances sur les cinquante dernières années*. Master II. Antony: Irstea, 2012.
- Ali, Tarik Benkaci, and Noureddine Dechemi. “Modélisation Pluie–débit Journalière Par Des Modèles Conceptuels et À Boîte Noire; Test D’un Modèle Neuroflou / Daily Rainfall–runoff Modelling Using Conceptual and Black Box Models; Testing a Neuro-Fuzzy Model.” *Hydrological Sciences Journal* 49, no. 5 (2004): null–930. doi:10.1623/hysj.49.5.919.55132.
- Amara, A.O., and Yannick Pépin. *Analyse des données hydro-pluviométriques sur bassins versants en Algérie*. Mémoire de mastère. Montpellier: IRD, 2006. IRD Bondy. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010055143>.
- Ambroise, B. “Genèse Des Débits Dans Les Petits Bassins Versants Ruraux En Milieu Tempéré: 1-Processus et Facteurs.” *Revue Des Sciences de l’eau/Journal of Water Science* 11, no. 4 (1998): 471–96.
- Ambroise, Bruno. *La Dynamique Du Cycle de L’eau Dans Un Bassin Versant: Processus, Facteurs, Modèles*. Ed. HGA, 1999.
- Andréassian, V., C. Perrin, L. Berthet, N. Le Moine, J. Lerat, C. Loumagne, L. Oudin, T. Mathevet, M. H. Ramos, and A. Valéry. “Crash Tests for a Standardized Evaluation

BIBLIOGRAPHIE

- of Hydrological Models.” *Hydrology and Earth System Sciences Discussions Discussions*, no. 13 (2009). <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00455623/>.
- Andréassian, Vazken, Julien Lerat, Cécile Loumagne, Thibault Mathevet, Claude Michel, Ludovic Oudin, and Charles Perrin. “What Is Really Undermining Hydrologic Science Today?” *Hydrological Processes* 21, no. 20 (2007): 2819–22.
 - Andréassian, Vazken, Ludovic Oudin, Nicolas Le Moine, and Charles Perrin. “Calage Régional Des Modèles Hydrologiques—application À La France et À L’Australie Regional Calibration of Hydrological Models—application in France and Australia.” Accessed November 6, 2013. http://ed398.ent.upmc.fr/modules/resources/download/ed398/Sujets_2013/IRSTEA_HBAN/Andreassian.pdf.
 - Andréassian, Vazken, Charles Perrin, Claude Michel, Iolanda Usart-Sanchez, and Jacques Lavabre. “Impact of Imperfect Rainfall Knowledge on the Efficiency and the Parameters of Watershed Models.” *Journal of Hydrology* 250, no. 1 (2001): 206–23.
 - Arnell, Nigel W. “Relative Effects of Multi-Decadal Climatic Variability and Changes in the Mean and Variability of Climate due to Global Warming: Future Streamflows in Britain.” *Journal of Hydrology* 270, no. 3 (2003): 195–213.
 - Arora, Vivek K. “The Use of the Aridity Index to Assess Climate Change Effect on Annual Runoff.” *Journal of Hydrology* 265, no. 1–4 (August 30, 2002): 164–77. doi:10.1016/S0022-1694(02)00101-4.
 - Arrus, René, and Nathalie Rousset. “L’agriculture Du Maghreb Au Défi Du Changement Climatique : Quelles Stratégies D’adaptation Face À La Raréfaction Des Ressources Hydriques ?,” February 28, 2007. <http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00134115>.
 - Assaba, Mohamed. “La connaissance des pluies mensuelles au service de la modélisation hydrologique des apports mensuels en eau de surface : application a l’Algérie du nord, au sud de la France et a la corse.” université Nice Antipolis, 2004.
 - Azaïs, Jean-Marc, and Jean-Marc Bardet. *Le modèle linéaire par l’exemple - 2e éd.: Régression, analyse de la variance et plans d’expérience illustrés avec R et SAS*. Dunod, 2012.
 - Baccini, Alain, and Philippe Besse. “Data Mining I, Exploration Statistique.” *Université de Toulouse*, 2005. http://www-irma.u-strasbg.fr/~fbertran/enseignement/DataMining_2013/DataMiningBesse.pdf.

BIBLIOGRAPHIE

- Bakreti, Amel, Isabelle Braud, Etienne Leblois, and Abdelmadjid Benali. “Analyse Conjointe Des Régimes Pluviométriques et Hydrologiques Dans Le Bassin de La Tafna (Algérie Occidentale).” *Hydrological Sciences Journal* 58, no. 1 (2013): 133–51.
- Ballais, Jean-Louis. “Des oueds mythiques aux rivières artificielles : l’hydrographie du Bas-Sahara algérien.” *Physio-Géo. Géographie, physique, et environnement*, no. Volume 4 (April 20, 2010): 107–27. doi:10.4000/physio-geo.1173.
- Barbe, L. le, and Thierry Lebel. “Rainfall Climatology of the HAPEX-Sahel Region during the Years 1950–1990.” *Journal of Hydrology* 188 (1997): 43–73.
- Beghdadi, Ali, and Ali Dakiche. “Synthèse Bibliographique Du Bassin Versant de La Macta, ANRH d’Oran.,” 1996.
- Bekkoussa, Belkacem, Mohamed Meddi, and Hervé Jourde. “Forçage Climatique et Anthropique Sur La Ressource En Eau Souterraine D’une Région Semi-Aride: Cas de La Plaine de Ghriss (Nord-Ouest Algérien).” *Science et Changements planétaires/Sécheresse* 19, no. 3 (2008): 173–84.
- Bessaoud, Omar, and Michel Petit. “Les Territoires Ruraux En Méditerranée.” *Communication Académie D’agriculture de France* 9 (2008). http://ressources.iamm.fr/publi/territoires_ruraux_bessaoud_2008.pdf.
- Beven, K. J. “Dalton Medal Lecture: How Far Can We Go in Distributed Hydrological Modelling?” *Hydrology and Earth System Sciences* 5, no. 1 (2001): 1–12.
- Beven, Keith. “Changing Ideas in Hydrology—the Case of Physically-Based Models.” *Journal of Hydrology* 105, no. 1 (1989): 157–72.
- Beven, Keith, and Andrew Binley. “The Future of Distributed Models: Model Calibration and Uncertainty Prediction.” *Hydrological Processes* 6, no. 3 (1992): 279–98.
- Beven, Keith J. “A Discussion of Distributed Hydrological Modelling.” In *Distributed Hydrological Modelling*, 255–78. Springer, 1996. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-0257-2_13.
- Blinda, Mohammed. “EAU,” 2012. http://www.planbleu.org/publications/Cahier14_efficienc FR.pdf.
- Bouanani, A., K. Baba Hamed, J. Mania, and M. Bensalah. “Le Comportement D’un Système Hydrologique En Climat Méditerranéen Par L’analyse Corrélatoire et Spectrale Des Débits et Des Pluies. Cas de Trois Sous Bassins Sud-Méditerranéens : (oued Sebdou, Moulah et Isser - Tafna - NW Algérie).” *Revue Des Sciences de L’eau* 18, no. 2 (2005): 215. doi:10.7202/705557ar.

BIBLIOGRAPHIE

- Bouanani, Rahima, Kamila Baba-Hamed, and Abderrazak Bouanani. "Utilisation D'un Modèle Global Pour La Modélisation Pluie-Débit: Cas Du Bassin d'Oued Sikkak (NW Algérien)." Accessed July 12, 2013. http://www.univ-chlef.dz/revuenatec/Issue_09_Art_C_06.pdf.
- Boudhraa, H. "Modélisation Pluie-Débit a Base Géomorphologique En Milieu Semi-Aride Rural Tunisien: Association D'approches Directe et Inverse." *Thèse de Doctorat En Sciences Agronomiques. Institut National Agronomique de Tunisie: p193*, 2007.
- Boudhraa, H., C. Cudennec, M. Slimani, and H. Andrieu. "Inversion D'une Modelisation de Type Hydrogramme Unitaire a Base Geomorphologique: Interpretation Physique et Premiere Mise En Oeuvre." *IAHS PUBLICATION* 303 (2006): 391.
- Braud, Isabelle. "Méthodologie d'Analyse de tendance sur les longues séries hydrométéorologiques." Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine "OTHU," 2011.
- Budyko, Mikhail Ivanovich, and David Hewitt Miller. *Climate and Life*. Vol. 508. Academic press New York, 1974. <http://library.wur.nl/WebQuery/clc/345648>.
- Buffoni, L., M. Maugeri, and T. Nanni. "Precipitation in Italy from 1833 to 1996." *Theoretical and Applied Climatology* 63, no. 1–2 (1999): 33–40.
- Bzioui, Mokhtar. "Rapport Sous-Régional Sur La Mise En Valeur Des Ressources En Eau En Afrique Du Nord." *Rapport UN WATER-AFRICA*, 2005. http://www.pnud.org.ma/pdf/sub_regionalreport_19juin_fr.pdf.
- Caire, A. "The Central Mediterranean Mountain Chains in the Alpine Orogenic Environment." In *The Ocean Basins and Margins*, 201–56. Springer, 1978. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4684-3039-4_4.
- Center for History and New Media. "Guide Rapide Pour Débuter," n.d. http://zotero.org/support/quick_start_guide.
- Change, Intergovernmental Panel On Climate. "REPORT OF THE NINETEENTH SESSION OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) Geneva, 17-20 (am Only) April 2002," 2007. <http://193.194.138.236/meetings/session19/final-report.pdf>.
- Chaouche, Keltoum, Luc Neppel, Claudine Dieulin, Nicolas Pujol, Bernard Ladouche, Eric Martin, Dallas Salas, and Yvan Caballero. "Analyses of Precipitation, Temperature and Evapotranspiration in a French Mediterranean Region in the Context of Climate

BIBLIOGRAPHIE

- Change.” *Comptes Rendus Geoscience* 342, no. 3 (March 2010): 234–43. doi:10.1016/j.crte.2010.02.001.
- Chaponnière, Anne. “Fonctionnement Hydrologique D’un Bassin Versant Montagneux Semi-Aride: Cas Du Bassin Versant Du Rehraya (Haut Atlas Marocain),” 2005. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010047426>.
 - Cherif, El Amine, Mohamed Errih, and Hayet Madani Cherif. “Modélisation Statistique Du Transport Solide Du Bassin Versant de l’Oued Mekerra (Algérie) En Zone Semi-Aride Méditerranéenne.” *Hydrological Sciences Journal* 54, no. 2 (2009): 338–48.
 - Chiew, F. H. S., and T. A. McMahon. “Detection of Trend or Change in Annual Flow of Australian Rivers.” *International Journal of Climatology* 13, no. 6 (1993): 643–53.
 - Choudhury, BhaskarJ. “Evaluation of an Empirical Equation for Annual Evaporation Using Field Observations and Results from a Biophysical Model.” *Journal of Hydrology* 216, no. 1–2 (March 1999): 99–110. doi:10.1016/S0022-1694(98)00293-5.
 - Coron, L, V Andréassian, L Perrin, and N Le Moine. “Visualising catchment changes in the Turc-Budyko nondimensional space.” *Hydrological Sciences Journal*, no. special issue (2014).
 - Cosandey, Claude. “La Forêt Réduit-Elle L’écoulement Annuel?” In *Annales de Géographie*, 104:7–25, 1995. http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geo_0003-4010_1995_num_104_581_13866.
 - D.K. Karpouzo, S. Kavalieratou, and C. Babjimopoulos. “Trend Analysis of Précipitation DATA in Pieria Region (Greece).” 2010, European Water edition, sec. 30.
 - De Marsily, Ghislain. *Quantitative Hydrogeology*. Paris School of Mines, Fontainebleau, 1986. http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=6784827.
 - De Marsily, Ghislain, Ghislain De Marsily, and Ghislain de Marsily. *Quantitative Hydrogeology: Groundwater Hydrology for Engineers*. Vol. 21. Academic Press San Diego, 1986. <http://www.lavoisier.fr/livre/notice.asp?id=OR3W3OAS6RXOWD>.
 - Dégerine, Serge. *LE MODELE LINEAIRE EN STATISTIQUE REGRESSION LINEAIRE*. Université Joseph Fourier, 2002. <http://www-ljk.imag.fr/membres/Serge.Degerine/Enseignement/MLDESS.pdf>.
 - Destouni, Georgia, Fernando Jaramillo, and Carmen Prieto. “Hydroclimatic Shifts Driven by Human Water Use for Food and Energy Production.” *Nature Climate Change* 3, no. 3 (2012): 213–17.

BIBLIOGRAPHIE

- Donat, M. G., T. C. Peterson, M. Brunet, A. D. King, M. Almazroui, R. K. Kolli, Djamel Boucherf, Anwar Yousuf Al-Mulla, Abdourahman Youssouf Nour, and Ahmed Attia Aly. "Changes in Extreme Temperature and Precipitation in the Arab Region: Long-Term Trends and Variability Related to ENSO and NAO." *International Journal of Climatology*, 2013. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.3707/full>.
- Douglas, E. M., R. M. Vogel, and C. N. Kroll. "Trends in Floods and Low Flows in the United States: Impact of Spatial Correlation." *Journal of Hydrology* 240, no. 1 (2000): 90–105.
- Duan, Qingyun, Hoshin V. Gupta, Soroosh Sorooshian, Alain N. Rousseau, and Richard Turcotte. *Calibration of Watershed Models*. Vol. 6. American Geophysical Union, 2003. <http://www.agu.org/books/ws/v006/>.
- Duan, Qingyun, Soroosh Sorooshian, and Vijai K. Gupta. "Optimal Use of the SCE-UA Global Optimization Method for Calibrating Watershed Models." *Journal of Hydrology* 158, no. 3 (1994): 265–84.
- El Mahi, Aicha, Mohamed Meddi, and Jean Paul Bravard. "Analysis of Sediment Transport in the Wadi El Hammam Basin, Northern Algeria." *Hydrological Sciences Journal* 57, no. 8 (2012): 1642–61. doi:10.1080/02626667.2012.717700.
- Elalmi, Talbi. "Evaluation de La Ressource En Eau Superficielle (bilan Hydriques Des Bassins Versants Du Nord de L'algerie)," 2013. <http://dspace.univ-ouargla.dz:8080/jspui/handle/123456789/482>.
- Fontaine, Bernard, Serge Janicot, and Paul-Arthur Monerie. "Recent Changes in Air Temperature, Heat Waves Occurrences, and Atmospheric Circulation in Northern Africa." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118, no. 15 (2013): 8536–52. doi:10.1002/jgrd.50667.
- Foster, John Bellamy. *The Ecological Revolution: Making Peace with the Planet*. Monthly Review Press New York, 2009. http://labreche.org/wp-content/uploads/2011/04/Rev06_AlireFoster.pdf.
- Franks, Stewart W., and International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly. *Water Availability and Global Change*. International Association of Hydrological Science, 2003.
- Frolova, Natalia, and Nikolay Alekseevskiy. "Influence of Ice Regime on Hydroecological Safety under Climate Change: Case Study in the North of the European Part of Russia." In *IAHS-AISH Publication*, 40–46. International Association of

BIBLIOGRAPHIE

- Hydrological Sciences. Accessed October 24, 2013. <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=23478465>.
- Galéa, G., B. Vasquez-Paulus, B. Renard, and P. Breil. “L’impact Des Prélèvements D’eau Pour L’irrigation Sur Les Régimes Hydrologiques Des Sous-Bassins Du Tescou et de La Séoune (bassin Adour-Garonne, France).” *Revue Des Sciences de L’eau* 18, no. 3 (2005): 273. doi:10.7202/705560ar.
 - Gaume, Eric, Valerie Bain, Pietro Bernardara, Olivier Newinger, Mihai Barbuc, Allen Bateman, Lotta Blaškovičová, et al. “A Compilation of Data on European Flash Floods.” *Journal of Hydrology* 367, no. 1–2 (March 30, 2009): 70–78. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.12.028.
 - Gaume, Eric, Marc Livet, Michel Desbordes, and J.-P. Villeneuve. “Hydrological Analysis of the River Aude, France, Flash Flood on 12 and 13 November 1999.” *Journal of Hydrology* 286, no. 1 (2004): 135–54.
 - Ghenim, Abderrahmane Nekkache, Abdessalem Megnounif, Abdelali Seddini, and Abdelali Terfous. “Fluctuations Hydropluviométriques Du Bassin-Versant de L’oued Tafna À Béni Bahdel (Nord-Ouest Algérien).” *Science et Changements planétaires/Sécheresse* 21, no. 2 (2010): 115–20.
 - Gherissi, Radia. “Hydrologie et modélisation pluie-débit : cas du bassin versant de l’oued lakhdar (ex : chouly) Tafna-NW Algérien,” 2012. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/2287>.
 - Girard, Georges, and J. P. Villeneuve. *Le Modèle Couplé: Simulation Conjointe Des Écoulements de Surface et Des Écoulements Souterrains Sur Un Système Hydrologique*. ORSTOM, 1981. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_4/hydrologie/01825.pdf.
 - Goubanova, K., and L. Li. “Extremes in Temperature and Precipitation around the Mediterranean Basin in an Ensemble of Future Climate Scenario Simulations.” *Global and Planetary Change* 57, no. 1 (2007): 27–42.
 - Gupta, Hoshin V., Luis A. Bastidas, Jasper A. Vrugt, and Soroosh Sorooshian. “Multiple Criteria Global Optimization for Watershed Model Calibration.” *Calibration of Watershed Models*, 2003, 125–32.
 - Gupta, Hoshin V., Soroosh Sorooshian, Terri S. Hogue, and Douglas P. Boyle. “Advances in Automatic Calibration of Watershed Models.” *Water Science and Application* 6 (2003): 9–28.

BIBLIOGRAPHIE

- Guyader, Arnaud. “Régression Linéaire.” Accessed March 11, 2014. http://perso.univ-rennes2.fr/system/files/users/guyader_a/Regression.pdf.
- Hallouz, Faiza, Mohamed Meddi, and Gil Mahe. “Modification Du Régime Hydroclimatique Dans Le Bassin de l’Oued Mina (nord-Ouest d’Algérie).” *Revue Des Sciences de L’eau* 26, no. 1 (2013): 33. doi:10.7202/1014917ar.
- Hamed, Khaled H., and A. Ramachandra Rao. “A Modified Mann-Kendall Trend Test for Autocorrelated Data.” *Journal of Hydrology* 204, no. 1 (1998): 182–96.
- Hau, Meggy. *Modélisation Hydrologique Des Sous-Bassins Versants de La Garonne À L’aide D’un Modèle Pluie-Débit Global*. Cemagref, 2008. http://www.cemagref.fr/webgr/Download/Rapports_et_theses/2008-HAU-MASTER.pdf.
- Helsel, D. R., and R. M. Hirsch. “Statistical Methods in Water Resources. Chapter A3 in Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey; Book 4, Hydrologic Analysis and Interpretation.” *US Geological Survey, Reston, VA*, 2002.
- Helsel, Dennis R., and Lonna M. Frans. “Regional Kendall Test for Trend.” *Environmental Science & Technology* 40, no. 13 (2006): 4066–73.
- Helsel, Dennis R., and Robert M. Hirsch. *Statistical Methods in Water Resources*. Vol. 49. Elsevier, 1992. <http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=jao4o5X1pvgC&oi=fnd&pg=PP2&dq=Hesel+1992&ots=QTXHfLb6MW&sig=zUhIRr4C2CDiXPgCYybqsEuiOaQ>.
- Hirsch, Robert M., and James R. Slack. “A Nonparametric Trend Test for Seasonal Data with Serial Dependence.” *Water Resources Research* 20, no. 6 (1984): 727–32.
- Houghton, John Theodore, Bruce A. Callander, and Sheila K. Varney. *Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment:[combined with Supporting Scientific Material]*. Cambridge University Press, 1992. http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=6ERV_5M4wRsC&oi=fnd&pg=PP11&dq=Houghton+1990&ots=jsLVaqbjtV&sig=PtaLxXYxkKpcan5PXouaOPWPlao.
- Hubert, Pierre, Jean-Claude Bader, and Hocine Bendjoudi. “One Century of Senegal River Annual Discharges.” *Hydrological Sciences Journal. Journal Des Sciences Hydrologiques* 52, no. 1 (2007): 68–73.
- Hubert, Pierre, Jean Pierre Carbonnel, and Ali Chaouche. “Segmentation Des Séries Hydrométéorologiques—application À Des Séries de Précipitations et de Débits de l’Afrique de L’ouest.” *Journal of Hydrology* 110, no. 3 (1989): 349–67.

BIBLIOGRAPHIE

- Hulme, Mike, Ruth Doherty, Todd Ngara, Mark New, and David Lister. "African Climate Change: 1900-2100." *Climate Research* 17, no. 2 (2001): 145–68.
- Ibrahim, Boubacar. "Caractérisation Des Saisons de Pluies Au Burkina Faso Dans Un Contexte de Changement Climatique et Évaluation Des Impacts Hydrologiques Sur Le Bassin Du Nakanbé." Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 2012. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00827764/>.
- Jaramillo, Fernando, Carmen Prieto, Steve W. Lyon, and Georgia Destouni. "Multimethod Assessment of Evapotranspiration Shifts due to Non-Irrigated Agricultural Development in Sweden." *Journal of Hydrology*, 2013. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169413000449>.
- Jean-Louis. "Changement Climatique Ou Météo, Quel Impact Sur La Valeur D'une Entreprise ? Dirigeants D'entreprises, Soyez Prêts !" *METEONSENSIBILITE.COM*. Accessed October 9, 2013. <http://meteosensibilite.com/couverture-du-risque-meteo/changement-climatique-climat-ou-meteo-quel-impact-sur-la-valeur-dune-entreprise-dirigeants-dentreprises-soyez-prets-550>.
- Jentsch, Anke, Jürgen Kreyling, and Carl Beierkuhnlein. "A New Generation of Climate-Change Experiments: Events, Not Trends." *Frontiers in Ecology and the Environment* 5, no. 7 (September 1, 2007): 365–74. doi:10.1890/1540-9295(2007)5[365:ANGOCE]2.0.CO;2.
- Kabouya Hadj-Noui, Messaouda. *Modélisation Pluie-Debit Aux Pas de Temps Mensuel et Annuel En Algérie Septentrionale*. Paris 11, 1990. <http://www.theses.fr/1990PA112376>.
- KABOUYA HADJ-NOUI, MESSAOUDA. "Modélisation Pluie-Debit Aux Pas de Temps Mensuel et Annuel En Algérie Septentrionale." Paris 11, 1990. <http://www.theses.fr/1990PA112376>.
- Kabouya, M. "Modélisation Pluie-Débit Au Pas de Temps Mensuel et Annuel En Algérie Septentrionale." *Université Paris-Sud, Paris, France*, 1990.
- Kabouya, M., and C. Michel. "Estimation Des Ressources En Eau Superficielle Aux Pas de Temps Mensuel et Annuel, Application À Un Pays Semi-Aride." *Revue Des Sciences de l'eau/Journal of Water Science* 4, no. 4 (1991): 569–87.
- Karpouzou, D. K., E. A. Baltas, S. Kavalieratou, and C. Babajimopoulos. "A Hydrological Investigation Using a Lumped Water Balance Model: The Aison River Basin Case (Greece)." *Water and Environment Journal* 25, no. 3 (2011): 297–307.

BIBLIOGRAPHIE

- Kendall, Maurice George. "Rank Correlation Methods." *Rank Correlation Methods.*, 1948. <http://www.cabdirect.org/abstracts/19521603271.html>.
- Khaldi, Abdelkader. "Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien ' Monts de Tlemcen - Saïda.'" Doctorat d'état, UNIVERSITE D'ESSENIA, 2005. <http://hydrologie.org/THE/KHALDI.pdf>.
- Khaliq, M. N., TBMJ Ouarda, and P. Gachon. "Identification of Temporal Trends in Annual and Seasonal Low Flows Occurring in Canadian Rivers: The Effect of Short- and Long-Term Persistence." *Journal of Hydrology* 369, no. 1 (2009): 183–97.
- Khaliq, M. N., TBMJ Ouarda, P. Gachon, L. Sushama, and A. St-Hilaire. "Identification of Hydrological Trends in the Presence of Serial and Cross Correlations: A Review of Selected Methods and Their Application to Annual Flow Regimes of Canadian Rivers." *Journal of Hydrology* 368, no. 1 (2009): 117–30.
- Khomsi, K., Gil Mahe, M. Sinan, and M. Snoussi. "Evolution et Régionalisation Des Précipitations Au Nord de l'Algérie (1936-2009)," 2013. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010059948>.
- Khomsi, K., Gil Mahé, M. Sinan, and M. Snoussi. "Evolution et Régionalisation Des Précipitations Au Nord de l'Algérie (1936-2009)," 2013. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010059948>.
- Kingumbi, Ahmadi, Zoubeida Bargaoui, Emmanuel Ledoux, Mustapha Besbes, and Pierre Hubert. "Modélisation Hydrologique Stochastique D'un Bassin Affecté Par Des Changements D'occupation: Cas Du Merguellil En Tunisie centrale/Hydrological Stochastic Modelling of a Basin Affected by Land-Use Changes: Case of the Merguellil Basin in Central Tunisia." *Hydrological Sciences Journal/Journal Des Sciences Hydrologiques* 52, no. 6 (2007): 1232–52.
- Koch, Hagen, Michael Kaltofen, Stefan Kaden, and Uwe Grünewald. "Effects of Global Change and Adaptation Options for Water Resources Management in the Czech Part of the River Elbe Basin." In *IAHS-AISH Publication*, 244–50. International Association of Hydrological Sciences. Accessed October 24, 2013. <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=23478491>.
- Kundzewicz, Z. W., and H.-J. Schellnhuber. "Floods in the IPCC TAR Perspective." *Natural Hazards* 31, no. 1 (2004): 111–28.
- Kundzewicz, Zbigniew W., Dariusz Graczyk, Thomas Maurer, Iwona Pińskwar, Maciej Radziejewski, Cecilia Svensson, and Małgorzata Szwed. "Trend Detection in River

BIBLIOGRAPHIE

- Flow Series: 1. Annual Maximum flow/Détection de Tendence Dans Des Séries de Débit Fluvial: 1. Débit Maximum Annuel.” *Hydrological Sciences Journal* 50, no. 5 (2005). <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1623/hysj.2005.50.5.797>.
- Kundzewicz, Zbigniew W., Dariusz Graczyk, Thomas Maurer, Iwona Pińskwar, Maciej Radziejewski, Cecilia Svensson, and Ma\textbackslashslashgorzata Szwed. “Trend Detection in River Flow Series: 1. Annual Maximum flow/Détection de Tendence Dans Des Séries de Débit Fluvial: 1. Débit Maximum Annuel.” *Hydrological Sciences Journal* 50, no. 5 (2005). <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1623/hysj.2005.50.5.797>.
 - Kundzewicz, Zbigniew W., and Alice J. Robson. “Change Detection in Hydrological Records—a Review of the methodology/Revue Méthodologique de La Détection de Changements Dans Les Chroniques Hydrologiques.” *Hydrological Sciences Journal* 49, no. 1 (2004): 7–19.
 - ———. “Change Detection in Hydrological Records—a Review of the methodology/Revue Méthodologique de La Détection de Changements Dans Les Chroniques Hydrologiques.” *Hydrological Sciences Journal* 49, no. 1 (2004): 7–19.
 - ———. “Change Detection in Hydrological Records—a Review of the methodology/Revue Méthodologique de La Détection de Changements Dans Les Chroniques Hydrologiques.” *Hydrological Sciences Journal* 49, no. 1 (2004): 7–19.
 - Laboratoire de Recherche en Sciences et Technologies de l’Eau, Institut National Agronomique de Tunisie (INAT), 43 av. Charles Nicolle, TUN, (Prénom), MATHLOUTHI Majid, LEBDI Fethi, Servat Eric, and Ferrari Ennio. “Caractérisation Des Événements Secs Dans Un Bassin Du Nord de La Tunisie
Characterization of Dry Spell Events in a Basin North of Tunisia
.” *IAHS-AISH Publication* 340, no. 06 (2010): 86–94.
 - Laborde, J. P. “Les Différentes Étapes D’une Cartographie Automatique: Exemple de La Carte Pluviométrique de l’Algérie Du Nord.” *Public. de l’AIC* 8 (1995): 37–46.
 - Lambs, Luc, and Mohamed Labiod. “Climate Change and Water Availability in North-West Algeria: Investigation by Stable Water Isotopes and Dendrochronology.” *Water International* 34, no. 2 (2009): 280–86.
 - LE LAY, Matthieu. “MODELISATION HYDROLOGIQUE DANS UN CONTEXTE DE VARIABILITE HYDRO-CLIMATIQUE. Une Approche Comparative Pour L’étude Du Cycle Hydrologique À Méso-Échelle Au Bénin.” Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2006. <http://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00116912/>.

BIBLIOGRAPHIE

- Le Lay, MATTHIEU, and Sylvie Galle. “How Changing Rainfall Regimes May Affect the Water Balance: A Modelling Approach in West Africa.” *Regional Hydrological Impacts of Climatic Change–Hydroclimatic Variability AISH* 296 (2005): 203–10.
- LE LAY, Matthieu, and Sylvie GALLE. “How Changing Rainfall Regimes May Affect the Water Balance: A Modelling Approach in West Africa.” *Regional Hydrological Impacts of Climatic Change–Hydroclimatic Variability AISH* 296 (2005): 203–10.
- ———. “Variabilités Interannuelle et Intra-Saisonnière Des Pluies Aux Échelles Hydrologiques. La Mousson Ouest-Africaine En Climat Soudanien.” *Hydrological Sciences Journal* 50, no. 3 (2005): 509–24.
- ———. “Variabilités Interannuelle et Intra-Saisonnière Des Pluies Aux Échelles Hydrologiques. La Mousson Ouest-Africaine En Climat Soudanien.” *Hydrological Sciences Journal* 50, no. 3 (2005): 509–24.
- LE LAY, Matthieu, and Georges-Marie Saulnier. “Exploring the Signature of Climate and Landscape Spatial Variabilities in Flash Flood Events: Case of the 8–9 September 2002 Cévennes-Vivarais Catastrophic Event.” *Geophysical Research Letters* 34, no. 13 (2007). <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007GL029746/full>.
- Le Moine, Nicolas, Vazken Andréassian, Charles Perrin, and Claude Michel. “How Can Rainfall-Runoff Models Handle Intercatchment Groundwater Flows? Theoretical Study Based on 1040 French Catchments.” *Water Resources Research* 43, no. 6 (2007). <http://www.agu.org/journals/wr/wr0706/2006WR005608/2006wr005608-t02.txt>.
- Legesse, Dagnachew, Christine Vallet-Coulomb, and Françoise Gasse. “Hydrological Response of a Catchment to Climate and Land Use Changes in Tropical Africa: Case Study South Central Ethiopia.” *Journal of Hydrology* 275, no. 1–2 (April 25, 2003): 67–85. doi:10.1016/S0022-1694(03)00019-2.
- Lilas, Damien, Charles Perrin, and Vazken Andreassian. “Mise Au Point D’un Modèle de Prévision Des Crues Sur Le Bassin Versant de l’Orgeval.” *Sciences Eaux & Territoires*, no. III (2012): 10–15.
- Liu, Qiang, Zhifeng Yang, and Xinghui Xia. “Trends for Pan Evaporation during 1959–2000 in China.” *Procedia Environmental Sciences* 2 (2010): 1934–41. doi:10.1016/j.proenv.2010.10.206.
- Lubes-Niel, H., C. Cudennec, M. Slimani, and H. Andrieu. “Inversion D’une Modelisation de Type Hydrogramme Unitaire a Base Geomorphologique: Interpretation Physique et Premiere Mise En Oeuvre.” *IAHS PUBLICATION* 303 (2006): 391.

BIBLIOGRAPHIE

- Lubes-Niel, H., J. M. Masson, J. E. Paturel, and E. Servat. “Variabilité Climatique et Statistiques. Etude Par Simulation de La Puissance et de La Robustesse de Quelques Tests Utilisés Pour Vérifier L’homogénéité de Chroniques.” *Revue Des Sciences de L’eau* 11, no. 3 (1998): 383. doi:10.7202/705313ar.
- Makhlof, Zoubir. “Compléments Sur Le Modèle Pluie-Débit GR 4 J et Essai D’estimation de Ses Paramètres,” 1994. <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=174167>.
- Makhlof, Zoubir, and Claude Michel. “A Two-Parameter Monthly Water Balance Model for French Watersheds.” *Journal of Hydrology* 162, no. 3 (1994): 299–318.
- Marchandise, ARTHUR. “Modélisation Hydrologique Distribuée Sur Le Gardon d’Anduze; Étude Comparative de Différents Modèles Pluie-Débit, Extrapolation de La Normale À L’extrême et Tests D’hypothèses Sur Les Processus Hydrologiques.” 2007. http://www.ohmcv.fr/Documents/theses/these_marchandise-old.pdf.
- Massei, Nicolas, Benoit Laignel, Julien Deloffre, Johanna Mesquita, Anne Motelay, Robert Lafite, and Alain Durand. “Long-Term Hydrological Changes of the Seine River Flow (France) and Their Relation to the North Atlantic Oscillation over the Period 1950–2008.” *International Journal of Climatology* 30, no. 14 (2010): 2146–54. doi:10.1002/joc.2022.
- Mathevet, T. “Quels Modèles Pluie-Débit Globaux Pour Le Pas de Temps Horaire? Développement Empirique et Comparaison de Modèles Sur Un Large Échantillon de Bassins Versants.” Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris), Cemagref (Antony), France, 2005.
- Mathevet, Thibault. “Quels Modèles Pluie-Débit Globaux Au Pas de Temps Horaire? Développements Empiriques et Intercomparaison de Modèles Sur Un Large Échantillon de Bassins Versants.” Ph. D. thesis, ENGREF, 463 pp, 2005. <http://hydrologie.org/SOU/051104MATHEVET.pdf>.
- MATHEVET, Thibault, Claude MICHEL, Vazken ANDREASSIAN, and Charles PERRIN. “A Bounded Version of the Nash-Sutcliffe Criterion for Better Model Assessment on Large Sets of Basins.” *IAHS-AISH Publication*, 2006, 211–19.
- Mathevet, Thibault, Claude Michel, Charles Perrin, and Vazken Andreassian. “Experimental Design Of A Lumped Hydrological Model Representing The Rainfall-Runoff Transformation At The Hourly Time-Step.” Accessed October 30, 2013. http://balwois.com/balwois/administration/full_paper/ffp-8o-042.pdf.

BIBLIOGRAPHIE

- Meddi, Hind, and Mohamed Meddi. "Variabilité Des Précipitations Annuelles Du Nord-Ouest de l'Algérie." *Science et Changements Planétaires / Sécheresse* 20, no. 1 (January 1, 2009): 57–65. doi:10.1684/sec.2009.0169.
- Meddi, M., and A. Boucefiane. "Impacte Des Changements Climatique Sur Le Renouvellement Des Ressources En Eau Souterraines: Cas Du Bassin Hydrographique Chélif-Zahrez." *IAHS-AISH Publication*, 2009, 135–42.
- Meddi, M., A. Boucefiane, R. Taylor, C. Tindimugaya, M. Owor, and M. Shamsudduha. "Impact of Climate Change on Groundwater Recharge in the Chélif-Zahrez Basin of Algeria." In *Groundwater and Climate in Africa. Proceedings of the Kampala Conference, Uganda, 24-28 June 2008.*, 135–42, 2009. <http://www.cabdirect.org/abstracts/20103142519.html>.
- Meddi, Mohamed, Abdelkader Boucefiane, and Abdelkader Sadeuk Belabbes. "Impact Des Changements Climatiques Sur Les Débits Dans Le Bassin Du Chélif (Algérie)." In *IAHS-AISH Publication*, 95–102. International Association of Hydrological Sciences. Accessed October 23, 2013. <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=23478472>.
- Meddi, MOHAMED, and PIERRE Hubert. "Impact de La Modification Du Régime Pluviométrique Sur Les Ressources En Eau Du Nord-Ouest de l'Algérie." *IAHS PUBLICATION*, 2003, 229–35.
- Meddi, Mohamed M., Ali Arkamose Assani, and Hind Meddi. "Temporal Variability of Annual Rainfall in the Macta and Tafna Catchments, Northwestern Algeria." *Water Resources Management* 24, no. 14 (2010): 3817–33.
- Meddi, Mohamed, Amel Talia, and Claude Martin. "Évolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l'Algérie)." *Physio-Géo. Géographie, physique, et environnement*, no. Volume 3 (January 1, 2009): 61–84. doi:10.4000/physio-geo.686.
- Medjerab, A., and L. Henia. "VARIATIONS SPATIO-TEMPORELLES DE LA SECHERESSE CLIMATIQUE EN ALGERIE NORD-OCCIDENTALE." Accessed December 2, 2013. http://193.194.69.98/courrierdusavoir/Revue_11/71-79%20MEDJEREB.pdf.
- Medjerab, Abderrahmane, and Latifa Henia. "Régionalisation des pluies annuelles dans l'Algérie nord-occidentale." *Revue Géographique de l'Est* 45, no. 2 (June 10, 2009). <http://rge.revues.org/501#entries>.

BIBLIOGRAPHIE

- Mendas, A., M. Errih, K. Benhanifia, M. Maldi, M. A. Rahmani, and ALGERIA Arzew. “Hydrologic Model and GIS to Estimate Hydrologic Balance at Watershed Scale- Application to the Watershed of Macta (Western Algerian)-.” *Division of Geomatics, Arzew. Algeria.* Accessed December 18, 2013. http://balwois.com/balwois/administration/full_paper/ffp-775.pdf.
- Mertz, Ole, Cheikh Mbow, Anette Reenberg, Lorenzo Genesio, Eric F. Lambin, Sarah D’haen, Malicki Zorom, et al. “Adaptation Strategies and Climate Vulnerability in the Sudano-Sahelian Region of West Africa.” *Atmospheric Science Letters* 12, no. 1 (2011): 104–8. doi:10.1002/asl.314.
- Meylan, Paul, Anne-Catherine Favre, and André Musy. *Hydrologie Fréquentielle: Une Science Prédicative.* PPUR presses polytechniques, 2008. <http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=R6Q3hQ1MtYYC&oi=fnd&pg=PR5&dq=erreur+moyenne+hydrologie+statistique&ots=ncf8EhM8Yy&sig=En74JSHYliMF-ZvutaysaTeymJI>.
- Michel, Claude. “Que Peut-on Faire En Hydrologie Avec Modèle Conceptuel À Un Seul Paramètre?” *La Houille Blanche*, no. 1 (1983): 39–44.
- Mohamed, Meddi M., and Amel Talia. “Runoff Evolution in Macta Basin (Northwest of Algeria).” *Arabian Journal of Geosciences* 6, no. 1 (2013): 35–41.
- Moisselin, Jean-Marc, Michel Schneider, and Claire Canellas. “Les Changements Climatiques En France Au XX^e Siècle. Etude Des Longues Séries Homogénéisées de Données de Température et de Précipitations.” 2002. <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/36233>.
- Mouelhi, Safouane. “Existe-T-Il Une Relation Entre Les Modèles Pluie-Débit Au Pas de Temps Pluriannuel ?” *Revue Des Sciences de L’eau* 24, no. 3 (2011): 193. doi:10.7202/1006455ar.
- Mouelhi, Safouane, Claude Michel, Charles Perrin, and Vazken Andréassian. “Linking Stream Flow to Rainfall at the Annual Time Step: The Manabe Bucket Model Revisited.” *Journal of Hydrology* 328, no. 1 (2006): 283–96.
- Nascimento, Nilo De Oliveira. “Appréciation À L’aide D’un Modèle Empirique Des Effets D’actions Anthropiques Sur La Relation Pluie-Débit À L’échelle D’un Bassin Versant.” Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1995. <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00569059>.
- Nash, Jea, and J. V. Sutcliffe. “River Flow Forecasting through Conceptual Models Part I—A Discussion of Principles.” *Journal of Hydrology* 10, no. 3 (1970): 282–90.

BIBLIOGRAPHIE

- New, Mark, Mike Hulme, and Phil Jones. “Representing Twentieth-Century Space-Time Climate Variability. Part I: Development of a 1961-90 Mean Monthly Terrestrial Climatology.” *Journal of Climate* 12, no. 3 (1999): 829–56.
- Niel, Hélène, Jean-Emmanuel Paturel, and Eric Servat. “Study of Parameter Stability of a Lumped Hydrologic Model in a Context of Climatic Variability.” *Journal of Hydrology* 278, no. 1–4 (July 25, 2003): 213–30. doi:10.1016/S0022-1694(03)00158-6.
- O’connell, P. E., J. E. Nash, and J. P. Farrell. “River Flow Forecasting through Conceptual Models Part II-The Brosna Catchment at Ferbane.” *Journal of Hydrology* 10, no. 4 (1970): 317–29.
- Oguntunde, Philip G., Jan Friesen, Nick van de Giesen, and Hubert H.G. Savenije. “Hydroclimatology of the Volta River Basin in West Africa: Trends and Variability from 1901 to 2002.” *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 31, no. 18 (2006): 1180–88. doi:10.1016/j.pce.2006.02.062.
- “ONS : Office National Des Statistiques.” Accessed January 17, 2014. <http://www.ons.dz/>.
- Oudin, Ludovic. “R ealisme physique des modèles hydrologiques conceptuels et de leurs paramètres.” Habilitation   Diriger des Recherches, Pierre et Marie Curie, 2011.
- Oudin, Ludovic, Vazken Andréassian, Julien Lerat, and Claude Michel. “Has Land Cover a Significant Impact on Mean Annual Streamflow? An International Assessment Using 1508 Catchments.” *Journal of Hydrology* 357, no. 3 (2008): 303–16.
- Oudin, Ludovic, Vazken Andréassian, Charles Perrin, and François Anctil. “Locating the Sources of Low-Pass Behavior within Rainfall-Runoff Models.” *Water Resources Research* 40, no. 11 (2004). <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004WR003291/full>.
- Oudin, Ludovic, Frédéric Hervieu, Claude Michel, Charles Perrin, Vazken Andréassian, François Anctil, and Cécile Loumagne. “Which Potential Evapotranspiration Input for a Lumped Rainfall–runoff Model?: Part 2—Towards a Simple and Efficient Potential Evapotranspiration Model for Rainfall–runoff Modelling.” *Journal of Hydrology* 303, no. 1–4 (March 1, 2005): 290–306. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.08.026.
- Oudin, Ludovic, Alison Kay, Vazken Andréassian, and Charles Perrin. “Are Seemingly Physically Similar Catchments Truly Hydrologically Similar?” *Water Resources Research* 46, no. 11 (2010). <http://www.agu.org/pubs/crossref/2010/2009WR008887.shtml>.

BIBLIOGRAPHIE

- Oudin, Ludovic, Charles Perrin, Thibault Mathevet, Vazken Andréassian, and Claude Michel. “Impact of Biased and Randomly Corrupted Inputs on the Efficiency and the Parameters of Watershed Models.” *Journal of Hydrology* 320, no. 1 (2006): 62–83.
- Ouis, S. “IMPACT DES FLUCTUATIONS CLIMATIQUES SUR LA QUANTITE ET LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES D’UNE REGION SEMI-ARIDE: CAS DE LA PLAINE DE GHRISS (Nord-Ouest Algérien).” *LARHYSS Journal ISSN 1112-3680*, no. 11 (2012). <http://larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/view/143>.
- P.H. BOIS. *HYDROLOGIE GENERALE*. INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE. GRENOBLE: ECOLE NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, 1991.
- Pachauri, Rajendra K. “Climate Change 2007. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report,” 2008. https://www.etde.org/etdeweb/details_open.jsp?osti_id=944235.
- Partal, Turgay, and Ercan Kahya. “Trend Analysis in Turkish Precipitation Data.” *Hydrological Processes* 20, no. 9 (2006): 2011–26.
- Partal, Turgay, and Murat Küccük. “Long-Term Trend Analysis Using Discrete Wavelet Components of Annual Precipitations Measurements in Marmara Region (Turkey).” *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 31, no. 18 (2006): 1189–1200.
- Paturel, J. E., E. Servat, and A. Vassiliadis. “Sensitivity of Conceptual Rainfall-Runoff Algorithms to Errors in Input data—Case of the GR2M Model.” *Journal of Hydrology* 168, no. 1 (1995): 111–25.
- Pearman, Graeme I., and Jill Jäger. “Greenhouse: Planning for Climate Change.” *Environment: Science and Policy for Sustainable Development* 31, no. 5 (1989): 25–27.
- Perrin, Charles. “Vers Une Amélioration D’un Modèle Global Pluie-Débit Au Travers D’une Approche Comparative.” 2000. <http://www.shf-lhb.org/articles/lhb/abs/2002/05/lhb2002089/lhb2002089.html>.
- Perrin, Charles, Claude Michel, and Vazken Andréassian. “Modèles Hydrologiques Du Génie Rural (GR).” *Rapport, Edition CEMAGREF*, 2007. http://fresno.cemagref.fr/webgr/Download/Rapports_et_theses/Modeles_GR_Resume.pdf.
- Perrin, Charles, Ludovic Oudin, Vazken Andreassian, Claudia Rojas-Serna, Claude Michel, and Thibault Mathevet. “Impact of Limited Streamflow Data on the Efficiency and the Parameters of Rainfall—runoff Models.” *Hydrological Sciences Journal* 52, no. 1 (2007): 131–51.

BIBLIOGRAPHIE

- Pettitt, A. N. "A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem." *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)* 28, no. 2 (January 1, 1979): 126–35. doi:10.2307/2346729.
- Pouyaud, Bernard, Jean Albergel, Henri Camus, Pierre Chevallier, and Jean-Marie Lamachere. "Réhabilitation Des Régimes Hydriques et Hydrologiques Des Terres Semi-Arides Dégradées." *L'homme Peut-Il Refaire Se Qu'il a Défait*, 1995, 49–64.
- Prokoph, Andreas, Jan Adamowski, and Kaz Adamowski. "Influence of the 11year Solar Cycle on Annual Streamflow Maxima in Southern Canada." *Journal of Hydrology* 442 (2012): 55–62.
- Réméniéras, Gaston. *L'hydrologie de L'ingénieur*. Vol. 6. Eyrolles, 1965.
- Remini, B. "LA PROBLEMATIQUE DE L'EAU EN ALGERIE DU NORD." *LARHYSS Journal ISSN 1112-3680*, no. 8 (2010). <http://larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/viewFile/99/93>.
- Renard, Benjamin. "Analyses Statistiques Pour La Détection de Tendances Ou de Ruptures Dans Le Régime Des Crues et Sècheresses En France." thèse, Cemagref de Lyon, France, 2006. <http://pnrhns.lyon.cemagref.fr/Intranet/Rapport%20EDF%20II.doc>.
- ROCHE, Marcel. "Les Divers Types de Modèles Déterministes." *La Houille Blanche* 2 (1971): 111–29.
- "Routage." *Wikipédia*, January 13, 2014. <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Routage&oldid=99987140>.
- SAMBOU, SOUSSOU, MASSECK BOYE, BADJI ANSOU MALANG, EDMOND NICAISE MALANDA-NIMY, and HAMADOUN SOUMARE. "Calage et Validation Des Modèles Hydrologiques GR4J et GR2M Sur Le Bassin Du Bafing En Amont de Bafing-Makana: Vers L'étude de L'impact Du Climat Sur Les Ressources En Eau de La Retenue de Manantali." Accessed July 12, 2013. http://journées-scientifiques.2ie-educ.org/js2011/sessions/pdf/sossou_s.pdf.
- Saporta, Gilbert. *Probabilités, Analyse Des Données et Statistique*. Editions Technip, 2011. http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=RKzGk-LzpnwC&oi=fnd&pg=PR5&dq=+D%C3%A9cision+et+Pr%C3%A9vision+Statistiques&ots=dnd_rAImbn&sig=OVmpH8pXH1t-y7zaWfaeSFaK-hM.
- Schilling, Janpeter, Korbinian P. Freier, Elke Hertig, and Jürgen Scheffran. "Climate Change, Vulnerability and Adaptation in North Africa with Focus on Morocco." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 156 (2012): 12–26.

BIBLIOGRAPHIE

- Servat, Eric, Siegfried Demuth, Alain Dezetter, Trevor Daniell, Ennio Ferrari, Mustapha Ijjaali, Raouf Jabrane, Henny Van Lanen, and Yan Huang. *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources: Proceedings of the Sixth World FRIEND Conference*, 2010. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010054996>.
- Sokal, Robert R., and F. J. Rohlf. *Biometry* W. H. Freeman, San Francisco, 1981.
- Somot, Samuel. “Modélisation Climatique Du Bassin Méditerranéen: Variabilité et Scénarios de Changement Climatique.” Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2005. http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/16/52/52/PDF/SOMOT_Samuel.pdf.
- Studer, M., and R. Du Dresnay. “Déformations Synsédimentaires En Compression Pendant Le Lias Supérieur et Le Dogger, Au Tizi n’Irhil (Haut Atlas Central de Midelt, Maroc).” *Bulletin de La Société Géologique de France*, no. 3 (1980): 391–97.
- Svensson, Cecilia, W. Zbigniew Kundzewicz, and Thomas Maurer. “Trend Detection in River Flow Series: 2. Flood and Low-Flow Index Series / Détection de Tendances Dans Des Séries de Débit Fluvial: 2. Séries D’indices de Crue et D’étéage.” *Hydrological Sciences Journal* 50, no. 5 (2005): null–824. doi:10.1623/hysj.2005.50.5.811.
- Taabni, Mohamed, and Moulay-Driss El Jihad. “Eau et Changement Climatique Au Maghreb: Quelles Stratégies D’adaptation?” *Les Cahiers d’Outre Mer*, no. 4 (2013): 493–518.
- Tabet-Aoul, Mahi. “Impacts Du Changement Climatique Sur Les Agricultures et Les Ressources Hydriques Au Maghreb.” *Les Notes D’alerte Du CIHEAM*, no. 48 (2008). <http://portail2.reseau-concept.net/Upload/ciheam/fichiers/Nal48.pdf>.
- Tabios, Guillermo Q., and Jose D. Salas. “A Comparative Analysis of Techniques for Spatial Interpolation of Precipitation1.” *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 21, no. 3 (1985): 365–80. doi:10.1111/j.1752-1688.1985.tb00147.x.
- Talia, Amel, Mohamed Meddi, and Belkacem Samir Bekkoussa. “Étude de La Variabilité de La Pluviométrie Dans Les Hauts Plateaux et Le Sahara Algériens.” *Science et Changements Planétaires / Sécheresse* 22, no. 3 (September 1, 2011): 149–58. doi:10.1684/sec.2007.0099.
- Thiessen, Alfred H. “Precipitation Averages for Large Areas.” *Monthly Weather Review* 39, no. 7 (1911): 1082–89.
- Thirel, G., V. Andréassian, C. Perrin, J.-N Audouy, L. Berthet, P. Edwards, N. Folton, et al. “Hydrology under change. An evaluation protocol to investigate how hydrological

BIBLIOGRAPHIE

- models deal with changing catchments.” *Hydrological Sciences Journal*, no. special issue (2014).
- TÖRNROS, TOBIAS. “Precipitation Trends and Suitable Drought Index in the Arid/semi-Arid Southeastern Mediterranean Region.” In *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources (Proc. of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco, 2010.* http://www.glowa-jordan-river.de/uploads/Publications/toernros_iahs_marokko_2010.pdf.
 - Touaïbia, Benina, Abdellah Aïdaoui, Dieter Gomer, and Mohamed Achite. “Temporal Quantification and Variability of Sediment Discharge in a Semiarid Area in Northern Algeria.” *Hydrological Sciences Journal* 46, no. 1 (2001): 41–53. doi:10.1080/02626660109492799.
 - Touazi, Mustapha, Najat Bhiry, Jean-Pierre Laborde, and Farid Achour. “Régionalisation Des Débits Moyens Mensuels En Algérie Du Nord.” *Revue Des Sciences de L’eau* 24, no. 2 (2011): 177. doi:10.7202/1006110ar.
 - Touazi, Mustapha, Jean Pierre Laborde, and Najat Bhiry. “Modelling Rainfall-Discharge at a Mean Inter-Yearly Scale in Northern Algeria.” *Journal of Hydrology* 296, no. 1 (2004): 179–91.
 - Trambly, Y., S. El Adlouni, and E. Servat. “Trends and Variability in Extreme Precipitation Indices over Maghreb Countries.” *Natural Hazards & Earth System Sciences* 13, no. 12 (2013). <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authType=crawler&jrnl=15618633&AN=93288441&h=VhqDgXH%2BmL1Z7Whi7mF1ohYVVlw1auKklvPPHWQtEEuIN%2FCfqZlWtsZZu7Whm3Z%2BwB1G4ujuAlcAH1N2uE7BSQ%3D%3D&crl=c>.
 - Turc, L. “Calcul Du Bilan de L’eau Évaluation En Fonction Des Précipitations et Des Températures.” In *IASH Rome Symp*, 111:188–202, 1954.
 - Turc, Lucien. *Le Bilan D’eau Des Sols: Relations Entre Les Précipitations, L’évaporation et L’écoulement*. Institute National de la Recherche Agronomique, 1953.
 - Vergnes, J.-P., and B. Decharme. “A Simple Groundwater Scheme in the TRIP River Routing Model: Global off-Line Evaluation against GRACE Terrestrial Water Storage Estimates and Observed River Discharges.” *Hydrology and Earth System Sciences* 16, no. 10 (October 30, 2012): 3889–3908. doi:10.5194/hess-16-3889-2012.

BIBLIOGRAPHIE

- Vergnes, Jean-Pierre. “Développement D’une Modélisation Hydrologique Incluant La Représentation Des Aquifères : Évaluation Sur La France et À L’échelle Globale.” PhD Thesis, December 14, 2012. <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00002113/>.
- Vogel, Richard M. “Regional Calibration of Watershed Models.” *Watershed Models* 45 (2006): 47–74.
- Wagener, Thorsten, Howard S. Wheater, and Hoshin V. Gupta. “Identification and Evaluation of Watershed Models.” *Calibration of Watershed Models*, 2003, 29–47.
- Willmott, Cort J., and Kenji Matsuura. “Advantages of the Mean Absolute Error (MAE) over the Root Mean Square Error (RMSE) in Assessing Average Model Performance.” *Climate Research* 30, no. 1 (2005): 79.
- Willmott, Cort J., and Scott M. Robeson. “Climatologically Aided Interpolation (CAI) of Terrestrial Air Temperature.” *International Journal of Climatology* 15, no. 2 (1995): 221–29.
- Yates, David N. “Approaches to Continental Scale Runoff for Integrated Assessment Models.” *Journal of Hydrology* 201, no. 1–4 (December 20, 1997): 289–310. doi:10.1016/S0022-1694(97)00044-9.
- Yiou, P., K. Goubanova, Z. X. Li, and M. Nogaj. “Weather Regime Dependence of Extreme Value Statistics for Summer Temperature and Precipitation.” *Nonlinear Processes in Geophysics* 15, no. 3 (2008): 365–78.
- Yonghui Yang, and Fi Tian. “Abrupt Change of Runoff and Its Major Driving Factors Haihe River Catchment, China,” 2009, Journal of hydrology edition, sec. 374.
- Yue, Sheng, and Paul Pilon. “A Comparison of the Power of the T Test, Mann-Kendall and Bootstrap Tests for Trend detection/Une Comparaison de La Puissance Des Tests T de Student, de Mann-Kendall et Du Bootstrap Pour La Détection de Tendence.” *Hydrological Sciences Journal* 49, no. 1 (2004): 21–37.
- Yue, Sheng, Paul Pilon, and George Cavadias. “Power of the Mann–Kendall and Spearman’s Rho Tests for Detecting Monotonic Trends in Hydrological Series.” *Journal of Hydrology* 259, no. 1 (2002): 254–71.
- Zhang, Lu, W. R. Dawes, and G. R. Walker. “Response of Mean Annual Evapotranspiration to Vegetation Changes at Catchment Scale.” *Water Resources Research* 37, no. 3 (2001): 701–8.
- Zhang, Yongfang, Dexin Guan, Changjie Jin, Anzhi Wang, Jiabing Wu, and Fenghui Yuan. “Analysis of Impacts of Climate Variability and Human Activity on Streamflow

BIBLIOGRAPHIE

for a River Basin in Northeast China.” *Journal of Hydrology* 410, no. 3–4 (November 22, 2011): 239–47. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.09.023.