

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE**  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche  
scientifique**  
جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان-  
**Université ABOU BEKR BELKAID**



**Faculté de Technologie**

**Département d'Hydraulique**

**MEMOIRE**

Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du diplôme de Master en **Hydraulique**  
**Option : Hydraulique Urbaine**

**Thème**

**Analyse conjointe des régimes pluviométrique et hydrologique du  
bassin de Oued Chouly**

Soutenue publiquement le : 21/06/2020

Présenté par :

**GHENIM Omar**

Devant le jury :

**Dr. BENADDA Lotfi**

**Président**

**Pr. BABA HAMED Kamila**

**Examinatrice**

**Pr. GHENIM Abderrahmane Nekkache**

**Encadreur**

**Promotion 2019/2020**

# REMERCIEMENTS :

*Louange à ALLAH, le Donateur Suprême et le Bienfaiteur glorifié, qui m'a aidé à accomplir cet humble travail et à le mener à bon terme.*

*Ce travail n'aurait pas pu s'accomplir sans Son agrément et Sa Miséricorde.*

*A mon encadreur et avant tout mon cher père*

**Mr GHENIM ABDERRAHMANE NEKKACHE**

*De m'avoir fait l'honneur de diriger ce travail. Pour sa patience, les précieux moments de discussion qu'il m'a réservés, sa confiance et son enthousiasme. Pour ses conseils pertinents et son orientation ficelée tout au long de l'étude. Quoique je dise je ne saurais le remercier assez.*

*Au président du jury*

**Mr BENADDA LOTFI**

*De m'avoir fait l'honneur d'accepter avec une très grande amabilité de siéger à mon mémoire comme président de jury.*

*Veillez trouver ici, le témoignage de mon respect et ma profonde reconnaissance.*

*A mon examinatrice*

**Mme BABA HAMED KAMILA**

*Pour l'honneur d'avoir accepté d'examiner mon travail.*

*Je vous témoigne mon profond respect.*

*Mes derniers remerciements s'adressent à tous mes professeurs et enseignants qui m'ont guidé au cours de toute la formation Master, et à ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

# DEDICACES

## *A mon très cher père*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour éternel, l'estime, le dévouement et le respect profond que j'ai toujours eu pour toi. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation. Ta patience sans fin, ta compréhension et ton encouragement sont pour moi le soutien indispensable que tu as toujours su m'apporter.*

*Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver, te combler de ses grâces infinies et t'accorder santé, longue vie et bonheur.*

## *A ma très chère mère*

*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, te combler de ses grâces infinies et t'accorder santé, longue vie et bonheur.*

## *A mon adorable sœur **Amira** et mon cher frère et ami **Mohammed Wahib***

*Pour votre grand amour, votre soutien et pour toute l'ambiance dont vous m'avez entouré.*

*Vous occupez une place particulière dans mon cœur. Je vous dédie ce travail en vous souhaitant un avenir radieux, plein de bonheur et de succès.*

*Que vous trouviez ici l'expression de ma haute gratitude.*

## *A ma chère grand-mère*

*Pour votre amour, vos prières et vos encouragements qui m'ont été d'un grand soutien au cours de ce long parcours. Que Dieu vous préserve santé et longue vie.*

*A la mémoire de mes grands parents*

*A tous les membres de ma famille*

*A tous mes enseignants*

*A tous mes amis, mes collègues et tous ceux qui me sont chers*

**Omar**

# SOMMAIRE

Résumé .....	vii
Liste des abréviations .....	viii
Liste des figures .....	ix
Liste des tableaux .....	x
Introduction générale .....	1
<b>Chapitre 1. Caractéristiques physiques du bassin versant</b>	<b>2</b>
<b>I. PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE OUED CHOULY</b> .....	<b>2</b>
<b>II. CARACTERISTIQUES DE FORME</b> .....	<b>2</b>
II.1. Indice de compacité $K_c$ .....	2
II.2. Rectangle équivalent .....	2
II.3. Temps de concentration des eaux .....	4
<b>III. DONNEES DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE</b> .....	<b>4</b>
<b>IV. DONNEES PLUVIOMETRIQUES ET HYDROMETRIQUES UTILISEES</b>	<b>4</b>
<b>V. APERÇU GEOLOGIQUE</b> .....	<b>5</b>
V.1. Description litho-stratigraphique .....	5
V.1.1. Secondaire .....	5
V.1.2. Tertiaire .....	6
V.1.3. Quaternaire .....	6
V.2. Tectonique .....	7
<b>VI. METHODES D'INTERPOLATION SPATIALE DES PRECIPITATIONS</b>	<b>7</b>
- Méthodes déterministes .....	7
- Méthodes stochastiques .....	8
VI.1. La méthode des polygones de Thiessen .....	8
VI.2. La méthode des isohyètes .....	8
VI.3. Les tendances .....	8
VI.4. Les fonctions Splines .....	9
VI.5. Méthode de krigeage .....	9
VI.6. Méthode de pondération de distance inverse IDW .....	10
<b>VII. INTERPOLATION DES DONNEES DE LA REGION DRAINEE PAR OUED CHOULY</b> .....	<b>10</b>
<b>Chapitre 2. Méthode d'étude</b>	<b>12</b>
<b>I. COEFFICIENT DE VARIATION</b> .....	<b>12</b>
<b>II. COEFFICIENT D'ECOULEMENT</b> .....	<b>12</b>
<b>III. INDICE DE VARIABILITE DES PRECIPITATIONS ET DES DEBITS</b>	<b>12</b>
<b>IV. DETERMINATION DES PERIODES HUMIDES ET SECHES EN COMPARAISON AUX MOYENNES</b> .....	<b>13</b>
<b>V. LE TEST DE TENDANCE DE MANN-KENDALL</b> .....	<b>13</b>
<b>VI. LA PENTE DE ŞEN</b> .....	<b>14</b>

<b>VII. SEGMENTATION DES SERIES DE PRECIPITATIONS ET DE DEBITS</b>	<b>15</b>
<b>VIII. METHODE DES CUMULS (DOUBLE MASSE) .....</b>	<b>16</b>
<b>IX. CONCENTRATION DES PRECIPITATIONS (PCI) / LAMES D'EAU ECOULEES (RCI) .....</b>	<b>16</b>
<b>X. DEGRE DE CONCENTRATION DES PRECIPITATIONS/LAMES D'EAU (PCD/RCD) ET PERIODE DE CONCENTRATION DES PRECIPITATIONS/ LAMES D'EAU (PCP/RCP) .....</b>	<b>17</b>
<b>XI. POLYONES PLUIE-DEBIT MENSUELS ET COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT MOYENS .....</b>	<b>18</b>
<b>XII. ELASTICITE PLUVIOMETRIQUE DU DEBIT .....</b>	<b>19</b>
<b>Chapitre 3. Résultats</b>	<b>21</b>
<b>I. VARIATION TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS ET DES DEBITS</b>	<b>21</b>
I.1. Echelle annuelle .....	21
I.2. Echelle saisonnière .....	22
I.3. Echelle mensuelle .....	23
<b>II. INDICES DE VARIABILITE DES PRECIPITATIONS ET DES LAMES D'EAU ECOULEES .....</b>	<b>24</b>
II.1. Echelle annuelle .....	25
II.2. Echelle saisonnière .....	25
II.3. Echelle mensuelle .....	26
<b>III. DETERMINATION DES PERIODES HUMIDES ET SECHES EN COMPARAISON AUX MOYENNES .....</b>	<b>27</b>
III.1. Echelle annuelle .....	27
III.2. Echelle saisonnière .....	28
III.3. Echelle mensuelle .....	28
<b>IV. EVOLUTION TEMPORELLE DES COEFFICIENTS D'ECOULEMENT</b>	<b>29</b>
IV.1. Echelle annuelle .....	30
IV.2. Echelle saisonnière .....	30
IV.3. Echelle mensuelle .....	31
<b>V. TENDANCE DES PRECIPITATIONS ET DES DEBITS PAR LA METHODE DE MAN-KENDALL .....</b>	<b>33</b>
V.1. Echelle annuelle .....	33
V.2. Echelle saisonnière .....	34
V.3. Echelle mensuelle .....	34
<b>VI. RUPTURES DANS LES PRECIPITATIONS ET LES DEBITS PAR LA METHODE DE SEGMENTATION .....</b>	<b>35</b>
VI.1. Echelle annuelle .....	35
VI.2. Echelle saisonnière .....	36
VI.3. Echelle mensuelle .....	36
<b>VII. RUPTURES DANS LES COEFFICIENTS D'ECOULEMENT PAR LES METHODES DES CUMULS ET LA SEGMENTATION .....</b>	<b>37</b>
VII.1. Echelle annuelle .....	37
VII.2. Echelle saisonnière .....	37

VII.3. Echelle mensuelle .....	38
<b>VIII. CONCENTRATIONS DES PRECIPITATIONS (PCI) ET DES LAMES D'EAU ECOULEES (RCI) .....</b>	<b>41</b>
VIII.1. Echelle annuelle .....	41
VIII.2. Echelle saisonnière .....	42
<b>IX. DEGRES ET PERIODES DE CONCENTRATION DES PRECIPITATIONS ET DES LAMES D'EAU ECOULEES .....</b>	<b>43</b>
<b>X. POLYGONE PLUIE-DEBIT MENSUELS ET COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT MOYENS .....</b>	<b>44</b>
<b>XI. ELASTICITE PLUVIOMETRIQUE DU DEBIT .....</b>	<b>46</b>
<b>Chapitre 4. Discussion et conclusion</b>	<b>47</b>
<b>Recommandations .....</b>	<b>50</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>51</b>

## Résumé :

La variabilité du climat, une gestion non optimale de la ressource en eau et l'intensification des activités anthropiques pourraient être les trois facteurs majeurs menaçant les écoulements et l'état de la ressource en eau dans les bassins versants Algériens. C'est le cas du bassin de la Tafna qui est situé dans une région au climat semi-aride.

Ce travail porte sur une analyse des régimes pluviométriques et hydrologiques et leurs évolutions temporelles dans le bassin versant de Oued Choluy, un sous bassin de la Tafna, situé dans le Nord-Ouest algérien.

Pour l'étude de la variation temporelle des précipitations et des débits entre 1970 et 2014, on a soumis les séries hydropluviométriques à un ensemble de tests et procédures tels que le test Man Kendall, la pente de Şen, la procédure de segmentation de Hubert, la méthode des cumuls et l'estimation des concentrations. Pour cela, des logiciels tels que ArcGIS, AutoCad, Khronostat et Rstudio ont été utilisés

Les résultats montrent un système très irrégulier, une tendance à la baisse et une dépendance importante des débits aux précipitations.

Mots clés : Précipitations, écoulements, analyse, tendance, variabilité, Oued Chouly.

### ملخص:

يمكن لتقلب المناخ، والإدارة الغير مثلى لموارد المياه وتكثيف الأنشطة البشرية ان تكون العوامل الثلاثة الرئيسية التي تهدد التدفقات وحالة الموارد المائية في احواض المياه الجزائرية. هذا هو الحال في حوض تافنة، الذي يقع في منطقة ذات مناخ شبه جاف. ويتعلق هذا العمل بتحليل أنظمة هطول الأمطار والأنظمة الهيدرولوجية وتطوراتها الزمنية في منطقة حوض وادي الشولي، وهو حوض فرعي في حوض تافنة، يقع في شمال غرب الجزائر.

من أجل دراسة التباين الزمني لهطول الأمطار والتدفقات بين 1970 و2014، تم إخضاع سلسلة بيانات هطول الأمطار والتدفقات إلى مجموعة من الاختبارات والإجراءات مثل اختبار Man Kendall, pente de Sen, نظام التجزئة Hubert, طريقة التراكم وتقدير التراكبات. لهذا الغرض، تم استخدام برامج مثل ArcGis, AutoCad, Khronostat و Rstudio. أظهرت النتائج وجود نظام غير منتظم للغاية، واتجاه تنازلي واعتماد كبير للتدفقات على هطول الأمطار.

الكلمات المفتاحية: الأمطار، الجريان، تحليل، الاتجاه، التباين، وادي الشولي

### Abstract:

The variability of the climate, a non-optimal management of the water resource and the intensification of anthropic activities could be the three major factors threatening the flows and the state of the water resource in the Algerian watersheds. This is the case of the Tafna basin, which is located in a region with a semi-arid climate.

This work relates to an analysis of the pluviometric and hydrological regimes and their temporal evolutions in the catchment area of Oued Choluy, a sub-basin of Tafna, located in the North-West of Algeria.

For the study of the temporal variation of precipitation and flows between 1970 and 2014, the hydropluviometric series were subjected to a set of tests and procedures such as the Man Kendall test, the slope of Şen, the Hubert segmentation procedure, the cumulation method and the estimation of concentrations. For this, software such as ArcGIS, AutoCad, Khronostat and Rstudio were used

The results show a very irregular system, a downward trend and a significant dependence of flows on precipitation.

Key-words : Precipitations, runoff, trend, variability, Wadi Chouly

## Liste des abréviations :

Les abréviations sont classées par ordre d'apparition dans le texte.

**Kc** : indice de compacité.

**Tc** : Temps de concentration.

**Rc** : Rapport de confluence.

**Ip** : Indice de pente.

**Ig** : Indice de pente global.

**Ds** : Dénivelée spécifique.

**Dd** : Densité de drainage.

**Ct** : Coefficient de torrencialité.

**Cv** : Coefficient de variation.

**Ce** : Coefficient d'écoulement.

**Le** : Lamme d'eau écoulée.

$\tau_i$  : Indice de variabilité des précipitations et des débits.

**IDW** : Méthode de pondération de distance inverse.

**MK** : Test de Mann-Kendall.

**PCI** : Indice de concentration des précipitations.

**RCI** : Indice de concentration des lames d'eau écoulées.

**PCD** : Degré de concentration des précipitations.

**RCD** : Degré de concentration des lames d'eau écoulées.

**PCP** : Période de concentration des précipitations.

**RCP** : Période de concentration des lames d'eau écoulées.

$\varepsilon_p$  : Estimateur non-paramétrique de l'élasticité pluviométrique du débit.

**A.N.R.H** : Agence Nationale des Ressources hydrauliques.



## Liste des figures

N°	Intitulé de la figure	Page
1	Situation du bassin versant de Oued Chouly et localisation des stations utilisées.....	3
2	Coupe synthétique des principales formations affleurant dans les monts de Tlemcen ...	6
3	Schéma tectonique du bassin de la Tafna.....	7
4	Localisation des stations pluviométriques et du point de calcul des précipitations .....	11
5	Résultat de l'interpolation des valeurs annuelles des précipitations obtenu par la méthode des distances inverses (IDW) .....	11
6	Représentation du polygone pluie-lames d'eau mensuelles .....	19
7	Variation interannuelle des précipitations et des débits .....	21
8	Variation saisonnière des précipitations et des débits .....	22
9	Variation moyenne saisonnière des précipitations et des débits .....	23
10	Variation mensuelle des précipitations et des débits .....	24
11	Variation moyenne mensuelle des précipitations et des débits .....	24
12	Indices de variabilité annuels des précipitations et des lames d'eau écoulées .....	25
13	Indices de variabilité saisonniers des précipitations et des lames d'eau écoulées .....	26
14	Indices de variabilité mensuels des précipitations et des lames d'eau écoulées .....	27
15	Précipitations et lames d'eau écoulées annuelles comparées aux moyennes (à gauche) et zonage des années hydrologiques (à droite).....	28
16	Zonage saisonnier (à gauche) et mensuel (à droite) pour l'ensemble des années hydrologiques .....	29
17	Variation annuelle des coefficients d'écoulement .....	30
18	Variation saisonnière des coefficients d'écoulement .....	31
19	Variation mensuelle des coefficients d'écoulement .....	32
20	Rupture dans les coefficients d'écoulement annuels par la méthode des cumuls .....	37
21	Rupture dans les coefficients d'écoulement saisonniers par la méthode des cumuls ....	38
22	Rupture dans les coefficients d'écoulement mensuels par la méthode des cumuls .....	39
23	Concentrations annuelles des précipitations (PCI) et des lames d'eau écoulées (RCI) ..	42
24	Concentrations saisonnières des précipitations (PCI) et des lames d'eau écoulées (RCI)	43
25	Représentation graphique PCD/PCP pour les précipitations (à gauche) et RCD/RCP pour les lames d'eau écoulées (à droite) .....	44
26	PCD et RCD annuels (à gauche) et fréquences PCP et RCP (à droite) .....	44
27	Polygone précipitations-lames d'eau moyennes mensuelles à Oued Chouly .....	45
28	Valeurs annuelles de l'estimateur non paramétrique et valeur de l'estimateur de d'élasticité des précipitations aux écoulements superficiels .....	46

## Liste des tableaux

N°	Intitulé de la figure	Page
1	Caractéristiques du réseau hydrographique.....	4
2	Caractéristiques des stations pluviométriques et hydrométrique utilisées.....	5
3	Classification des degrés d'humidité ou de sécheresse selon les valeurs de l'indice de variabilité	13
4	Caractéristiques interannuelles des précipitations et des débits.....	22
5	Caractéristiques saisonnières des précipitations et des débits.....	23
6	Caractéristiques des précipitations et des débits mensuels.....	24
7	Test de Mann-Kendall et pente de Şen pour les précipitations et les débits annuels.....	34
8	Test de Mann-Kendall et pente de Şen pour les précipitations et les débits saisonniers	34
9	Test de Mann-Kendall et pente de Şen pour les précipitations et les débits mensuels...	35
10	Résultats de la méthode de segmentation appliquée aux précipitations et aux débits aux échelles annuelle, saisonnière et mensuelle.....	36
11	Résultats des méthodes des cumuls et de segmentation appliquées aux coefficients d'écoulement aux échelles annuelle, saisonnière et mensuelle.....	41

## INTRODUCTION GENERALE

Au 21<sup>e</sup> siècle, la gestion des ressources en eau devient une préoccupation majeure pour la vie humaine et la protection de l'environnement (Cosgrove et Loucks, 2015). Il est bien connu que les précipitations sont la source d'eau douce dans la planète Terre, et son intensité varie d'une région à l'autre. L'absence de précipitations provoque souvent des sécheresses qui induisent la dégradation de l'environnement, les conflits sociaux et parfois des crises de la faim (Clover, 2003). La rareté des précipitations aggrave la pauvreté principalement dans les régions arides et semi-arides (Cervigni et Morris, 2016). D'ici 2050, on estime que 40% de la population mondiale sera exposée à un stress hydrique sévère, en particulier en Afrique et en Asie (UNISDR, 2015). Lorsque les précipitations sont abondantes, par contre, les ruissellements d'eaux pluviales entraînent parfois des catastrophes importantes telles que les inondations, l'érosion des sols, les glissements de terrain, la pollution de l'eau et des dommages aux infrastructures (Karamage et al., 2017).

Ces deux paramètres : précipitations et débits de ruissellement permettent de calculer le coefficient d'écoulement, rapport du volume écoulé au volume précipité sur une surface pendant un certain temps. Ce coefficient joue un rôle fondamental dans la planification, la conception et la gestion des ressources en eau d'un bassin (Kadioglu and Şen, 2001).

De ce qui précède et vue l'importance des précipitations et des débits dans le bilan hydrologique de toute région ainsi que l'étroitesse des mécanismes qui les unissent, on s'est intéressé à l'étude conjointe de leurs comportements et leurs évolutions temporelles dans un petit bassin versant qu'est Oued Chouly. On a aussi essayé de mettre en évidence la variabilité et la tendance dans le temps du coefficient d'écoulement. Le choix de ce bassin versant de Oued Chouly ainsi que la période d'étude reposent sur la disponibilité des données et du caractère vierge (peu urbanisé) du bassin.

Ce type d'étude n'est pas très répandu dans la littérature vue que les débits dans les cours d'eau ne reposent pas uniquement sur les précipitations mais sur d'autres paramètres aussi tels que les températures, la nature des sols, leur perméabilité et leur degré de saturation, ainsi que l'importance et le développement du couvert végétal. Ces trois derniers n'étaient pas disponibles pour entamer cette étude. Néanmoins, on note les travaux de Singh (1997) ; Chen et al., 2014 ; Li et al., 2014 ; Karamage et al., 2018 à l'international et ceux de Dahmani et Meddi (2011) ; Bakreti et al., 2013 ; Ghenim et Megnounif, 2013 ou encore Achite et Ouillon (2016) en Algérie.

Ce mémoire comprend 4 chapitres principaux. Le premier est consacré à la présentation du bassin versant ainsi que des données utilisées, le second à la méthode d'étude, le troisième aux résultats obtenus et le quatrième à la discussion des résultats et à la conclusion du travail. Des recommandations clôturent ce mémoire.

## I. PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE OUED CHOULY :

Oued Chouly appelé aussi Oued Lakhdar est un affluent de Oued Isser, lui-même affluent de la Tafna. La station hydrométrique 160601 contrôle une superficie de 172,6 Km<sup>2</sup> dans un périmètre de 70,1 Km du bassin versant de Oued Chouly, résultats de l'étude du M.N.T de ce bassin au moyen du logiciel ArcGis (figure 1) (contre 170 Km<sup>2</sup> et 60 Km respectivement selon l'A.N.R.H). Le bassin versant de Oued Chouly est limité au Sud par le bassin de Meffrouche, à l'Est, par Oued Isser et par le bassin de Sikkak à l'Ouest. Les altitudes maximales, minimales et moyennes du bassin versant sont respectivement de 1616 m, 725 m et 1235 m. La longueur du thalweg principal est de 30 Km selon l'A.N.R.H.

## II. CARACTERISTIQUES DE FORME :

### II.1. Indice de compacité K<sub>c</sub> :

Le coefficient de Gravelius exprime la forme d'un bassin versant, il est égal au rapport du périmètre du bassin versant considéré à celui d'un cercle qui aurait la même surface. Plus cet indice sera proche de « 1 » plus le bassin aura une forme ramassée et plus le temps de concentration des eaux sera court.

$$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad Kc = 1,49$$

Avec :

S : superficie du bassin versant (Km<sup>2</sup>)

P : Périmètre du bassin versant (Km)

Avec une valeur de K<sub>c</sub> = 1,49, on remarque que le bassin est allongé.

### II.2. Rectangle équivalent :

C'est une notion introduite pour pouvoir comparer les bassins entre eux du point de vue influence de la forme sur l'écoulement. On détermine la longueur et la largeur du rectangle donnant la même superficie et le même indice de compacité que ceux du bassin versant considéré.

La longueur du rectangle équivalent :

$$L = \frac{Kc \cdot \sqrt{S}}{1.12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{Kc} \right)^2} \right] \quad L = 29,0 \text{ Km}$$

La largeur du rectangle équivalent :

$$l = \frac{kc \cdot \sqrt{s}}{1.12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{Kc} \right)^2} \right] \quad l = 5,9 \text{ Km}$$

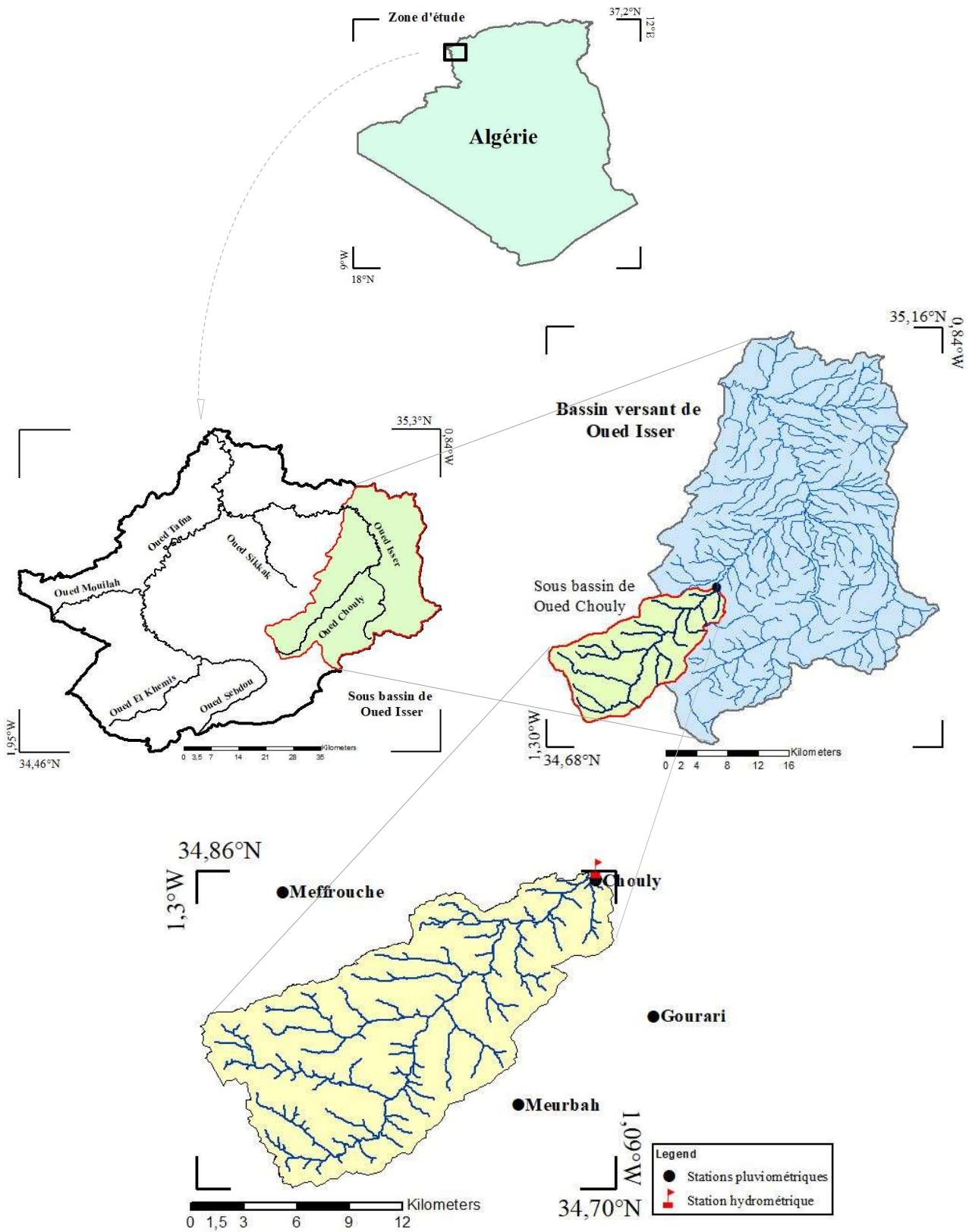


Figure 1. Situation du bassin versant de Oued Chouly et localisation des stations utilisées

### II.3. Temps de concentration des eaux :

C'est le temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée pour parvenir à l'exutoire, pour son calcul, nous faisons appel à la formule de Giandotti :

$$T_c = \frac{4\sqrt{(S+1.5L)}}{0.8\sqrt{(H_{moy}-H_{min})}}$$

Avec :  $T_c$  : temps de concentration (heure)

A : superficie du bassin (km<sup>2</sup>)

L : longueur du thalweg principal (km)

$H_{moy}$  : altitude moyenne (m)

$H_{min}$  : altitude minimale (m)

### III. DONNEES DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE :

Les caractéristiques du réseau hydrographique consignées dans le tableau 1, ont été tirées des fiches de renseignements recueillis auprès de l'A.N.R.H et de (Gherissi, 2012) :

Tableau 1. Caractéristiques du réseau hydrographique

Caractéristiques	Valeurs	Origine
Rapport de confluence ( $R_c$ )	5,75	Gherissi, 2012
Indice de pente ( $I_p$ )	0,19	
Indice de pente global ( $I_g$ )	0,027	
Relief selon « $I_g$ »	Assez fort	
Dénivelée spécifique ( $D_s$ )	628,8	
Relief selon « $D_s$ »	Fort	
Densité de drainage (Km/Km <sup>2</sup> )	3	A.N.R.H
Coefficient de torrentialité ( $C_t$ )	21,6	

### IV. DONNEES PLUVIOMETRIQUES ET HYDROMETRIQUES UTILISEES :

Pour le besoin de l'étude, on a sélectionné une station pluviométrique située à l'intérieur du bassin versant et trois autres situées dans la périphérie de celui-ci et ayant une influence sur les écoulements superficiels transitant par la station hydrométrique de Oued Chouly (tableau 2). Ces données recueillies auprès des services de l'A.N.R.H sont pour certaines mensuelles et pour d'autres journalières. Pour cette raison, le travail établi se base sur l'échelle mensuelle des données.

Tableau 2. Caractéristiques des stations pluviométriques et hydrométrique utilisées.

Station	Nom de la station	Code de la station	Coordonnées		
			X (km)	Y (km)	Z (m)
Hydrométrique	Chouly	160601	149,63	181,06	170
Pluviométriques	Meurbah	160602	145,75	167,60	1100
	Sidi Gourari	160608	152,30	172,90	976
	Chouly	160601	149,65	181,00	170
	Meffrouche	160701	135,55	180,20	1110

## V. APERÇU GEOLOGIQUE :

Afin de pouvoir s'appuyer sur la géologie du bassin dans l'interprétation des résultats, on s'est servi de la description géologique consignée dans (Gherissi, 2012).

### V.1. Description litho-stratigraphique :

La lithologie dominante est la formation calcaire, la formation des grès de Boumediene constitue le "mégarythme" du Jurassique supérieur des monts de Tlemcen selon M. Benest 1985.

Ainsi le bassin versant de l'Oued Lakhdar se caractérise par cinq principales formations géologiques (figure 2).

#### V.1.1. Secondaire :

##### a- Jurassique :

- **Marnes et calcaires du Kimméridgien moyen :**

Constituant la partie Nord de l'Oued Lakhdar. Ce sont des marnes grises, blanchâtres en surfaces intercalées de nombreux lits et bancs de calcaire généralement marneux, parfois durs et su-lithographiques.

- **Dolomies et calcaires du Kimméridgien supérieur :**

C'est la formation dominante, ce sont des calcaires gris en bancs cristallins à la base, surmontés de dolomies d'escarpement. Elle constitue donc avec les dolomies de Terny parfois mises en communication par faille, l'aquifère le plus important du secteur étudié.

##### b- Crétacé :

- **Berriasien :**

Représenté au Sud de l'agglomération de l'Oued Lakhdar par des argiles, de grès et de calcaires.

Les argiles de couleur verdâtre sont intercalées entre les bancs de grès argileux, et d'autres bancs calcaires s'intercalent dans les parties supérieures.

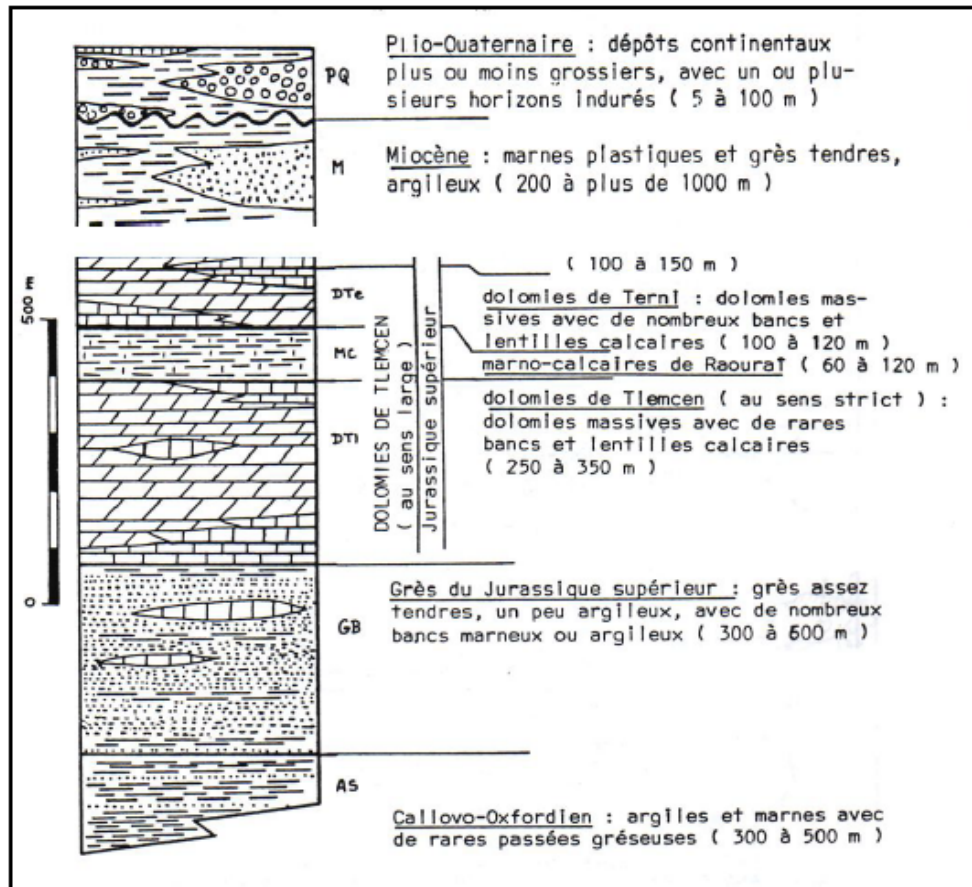


Figure 2. Coupe synthétique des principales formations affleurant dans les monts de Tlemcen (jusqu'au callovo-oxfordien) (Collignon, 1986 in Gherissi, 2012).

### V.1.2. Tertiaire :

#### - Pliocène continental

Affleurant au Nord de l'Oued Lakhdar, ce sont des dépôts alluvionnaires des plateaux caillouteux et limoneux parfois des grès sableux.

### V.1.3. Quaternaire :

Représenté par un faciès continental d'origine alluvial et colluvial.

#### - Alluvions récentes et subactuelles :

Ceux sont des dépôts caillouteux et limoneux occupant les fonds des oueds, surmontant un niveau grossier au niveau de l'Oued Lakhdar et Oued Isser, les formations subactuelles se présentent en terrasse d'origine fluvio-continentales.

Le mouloyen: Conglomérat grossier à ciment calcaire protégé par une croûte calcaire.



## V.2. Tectonique :

La tectonique se traduit par un massif Jurassique calcaréo-dolomitique peu plissé (figure 3). La chaîne montagneuse Nord-Sud forme un anticlinal : c'est un pli de couverture souple bordé sur son flanc et représente un repli synclinal, sa forme en cuvette en fait un bon bassin de réception des eaux, et il donne ainsi naissance à Oued Tafna et à Oued Lakhdar.

La faille d'effondrement Nord au niveau de la forêt de Zarifet est orientée Sud-Ouest-Nord Est. Plus à l'Est une direction Est Ouest est présente jusqu'à l'agglomération de l'Oued Lakhdar où elle rencontre l'accident du fossé d'effondrement de Tlemcen.

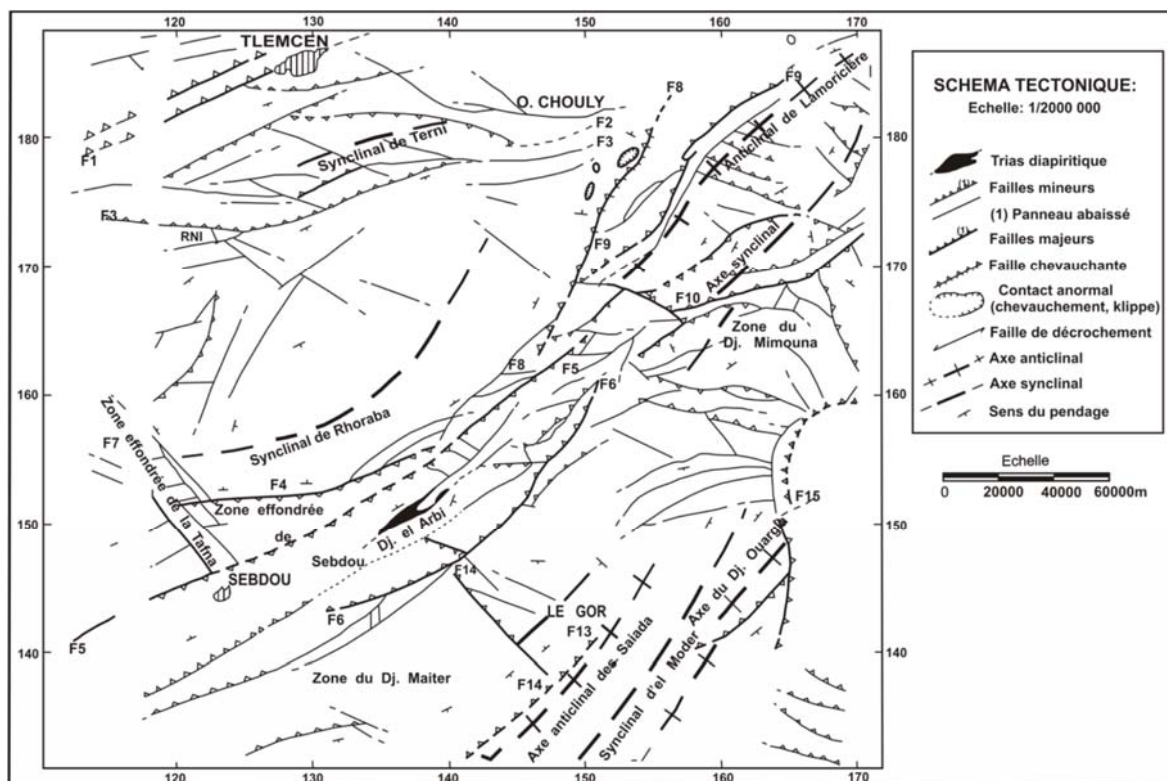


Figure 3. Schéma tectonique du bassin de la Tafna (Auclair et Biehler, 1967 in Gherissi, 2012).

## VI. METHODES D'INTERPOLATION SPATIALE DES PRECIPITATIONS :

Lorsqu'une région est couverte par un réseau pluviométrique comportant plusieurs stations, il serait très intéressant d'estimer la hauteur pluviométrique moyenne arrosant une zone ou l'ensemble de la région étudiée. Pour cela, on a recours aux outils d'interpolation. Ceux-ci sont divisés généralement en méthodes déterministes et géostatistiques :

- **Méthodes déterministes** : elles supposent une modélisation déterministe du phénomène ; ces méthodes se basent alors sur des propriétés purement mathématiques, généralement géométriques, sans tenir compte du phénomène physique qui nous intéresse.

- **Méthodes stochastiques** : elles supposent une modélisation probabiliste du phénomène, dont les observations résultent de la réalisation de variables aléatoires ; ces méthodes font alors appel à des modèles découlant de l'analyse statistique des données considérées.

### VI.1. La méthode des polygones de Thiessen :

Elle convient notamment quand le réseau pluviométrique n'est pas homogène spatialement (pluviomètres distribués irrégulièrement). Elle affecte à chaque pluviomètre une zone d'influence dont la surface exprimée en %, représente le facteur de pondération de la valeur de l'enregistrement.

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=0}^n A_i \times P_i}{A} \quad (1)$$

Avec :

$A_i$  : Surface d'influence du pluviomètre  $i$  en  $\text{Km}^2$ .

$P_i$  : Précipitation au poste  $i$  en mm.

$A$  : Surface du bassin versant en  $\text{Km}^2$ .

### VI.2. La méthode des isohyètes :

Les isohyètes sont des lignes de même pluviosité (iso-valeurs de pluies annuelles, journalières, etc.) tracées grâce aux valeurs pluviométriques acquises aux stations du bassin et aux autres stations avoisinantes. Lorsque les courbes isohyètes sont tracées, la pluie moyenne peut être calculée de la manière suivante :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=0}^n A_i \times P_i}{A} \quad \text{avec} \quad P_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2} \quad (2)$$

Avec :

$P_{moy}$  : Précipitation moyenne sur le bassin.

$A_i$  : Surface entre deux isohyètes  $i$  et  $i+1$  en  $\text{Km}^2$ .

$P_i$  : Précipitation au poste  $i$  en mm.

$A$  : Surface totale du bassin versant en  $\text{Km}^2$ .

### VI.3. Les tendances :

On cherche à ajuster par la méthode des moindres-carrés une surface polynomiale aux valeurs observées. Cette surface se présente sous la forme :

$$\hat{z}(s) = \hat{z}(x, y) = \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^{p-i} a_{ij} x^i y^j \quad (3)$$

Où  $P$  est le degré du polynôme ou l'ordre de la surface. Les  $a_{ij}$  sont obtenus par minimisation de la quantité  $\sum_{i=1}^n [\hat{z}(s_i) - z(s_i)]^2$  par moindre-carré par exemple. Il faut alors que le degré du polynôme vérifie :

$$\frac{1}{2}(p+1)(p+2) \leq n \quad (4)$$

L'inversion peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} x_1^0 y_1^0 & x_1^0 y_1^p & x_1^1 y_1^0 & \dots & x_1^1 y_1^{p-1} & \dots & x_1^p y_1^0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_n^0 y_n^0 & x_n^0 y_n^p & x_n^1 y_n^0 & \dots & x_n^1 y_n^{p-1} & \dots & x_n^p y_n^0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{0,0} \\ \vdots \\ a_{0,p} \\ a_{1,0} \\ \vdots \\ a_{1,p-1} \\ \vdots \\ a_{p,0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_n \end{pmatrix} \quad (5)$$

#### VI.4. Les fonctions Splines :

Les splines sont une famille de fonctions qui minimisent l'énergie de flexion sous certaines contraintes d'ajustement. Dans notre contexte, il existe deux catégories de fonctions de splines : les splines d'interpolation qui passent exactement par les points d'observation et les splines de lissage qui passent à proximité (Mansouri, 2017).

On désire obtenir une fonction qui soit la plus lisse possible tout en restituant les valeurs mesurées aux différents sites d'observation. Elle doit minimiser l'énergie de flexion :

$$\iint \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} dx dy \quad (6)$$

#### VI.5. Méthode de krigeage :

Le krigeage est une méthode d'interpolation spatiale stochastique qui tient compte à la fois de la configuration géométrique des points observés et de la structure spatiale propre à la variable estimée.

L'idée de base du krigeage est de prévoir la valeur de la variable régionalisée étudiée en un site non échantillonné  $s_0$  par une combinaison linéaire de données ponctuelles adjacentes :

$$z(s_0) = a + \sum_{i \in V(a_0)} \lambda_i z(s_i) \quad (7)$$

Les poids  $\lambda_i$  associés à chacune des valeurs régionalisées observées sont choisis de façon à obtenir une prévision non biaisée et de variance minimale. Ces poids dépendent de la localisation des observations et de leur structure de dépendance spatiale. En fait, le krigeage est le nom donné à la meilleure prévision linéaire sans biais nommée « BLUP », dans un cadre spatial. Le modèle de base du krigeage a la même forme que le modèle de régression classique ou locale, mais les erreurs sont maintenant supposées dépendantes spatialement. Il s'énonce comme suit :

$$Z(s) = \mu(s) + \delta(s), s \in D \quad (8)$$

Où  $\mu(s)$  est la structure déterministe pour l'espérance de  $Z(s)$  et  $\delta(s)$  une fonction aléatoire stationnaire d'espérance nulle et de structure de dépendance connue. Pour formuler complètement le modèle, il faut spécifier la forme de la tendance  $\mu(s)$ . C'est en fait cette tendance qui précise le type de krigeage effectué. Les trois types classiques de krigeage sont :

- Le krigeage simple :  $\mu(s) = m$  est une constante connue.

- Le krigeage ordinaire :  $\mu(s) = \mu$  est une constante inconnue.
- Le krigeage universel :  $\mu(s) = \sum_j^p f_j(s)\beta_j$  est une combinaison linéaire de fonctions de la position s. (Baillargeon, 2005).

#### VI.6. Méthode de pondération de distance inverse IDW :

Cette méthode est une méthode locale d'interpolation. Dans cette méthode, la valeur à estimer en un point de la zone d'étude est déterminée à l'aide de la moyenne pondérée des valeurs des points les plus proches du point considéré. Au début, on mesure donc la distance entre le point recherché et les points connus aux alentours. Dans la suite, le calcul du point recherché se fait grâce à la moyenne des valeurs des points environnants. Ainsi, plus le point à interpoler est proche d'un point dont on connaît sa valeur, plus la valeur du point à interpoler sera proche de la valeur connue. La distance D entre le point recherché et les points connus aux alentours est définie de la manière suivante :

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (9)$$

La forme générale de cette méthode est donnée comme suit :

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i^\beta} Z_i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i^\beta}} \quad (10)$$

avec :

N : nombre de stations météorologiques utilisées.

$Z_p$  : Valeur au point d'intérêt.

$Z_i$  : Valeur à l'i-ème point donné.

$D_i$  : Distance entre l'i-ème point donné et le point d'intérêt.

$\beta$  : Puissance de  $D_i$ .

#### VII. INTERPOLATION DES DONNEES DE LA REGION DRAINEE PAR OUED CHOULY :

Afin de calculer la distribution spatiale des précipitations dans la région drainée par Oued Chouly, on a utilisé la méthode de pondération de distance inverse IDW parce qu'elle permet d'estimer la précipitation en un point. Il est à noter que l'ensemble des méthodes citées ci-dessus sont relativement imprécises.

Ci-dessous, on présente un exemple d'interpolation des valeurs annuelles des précipitations au centre du bassin versant de Oued Chouly (figure 4).

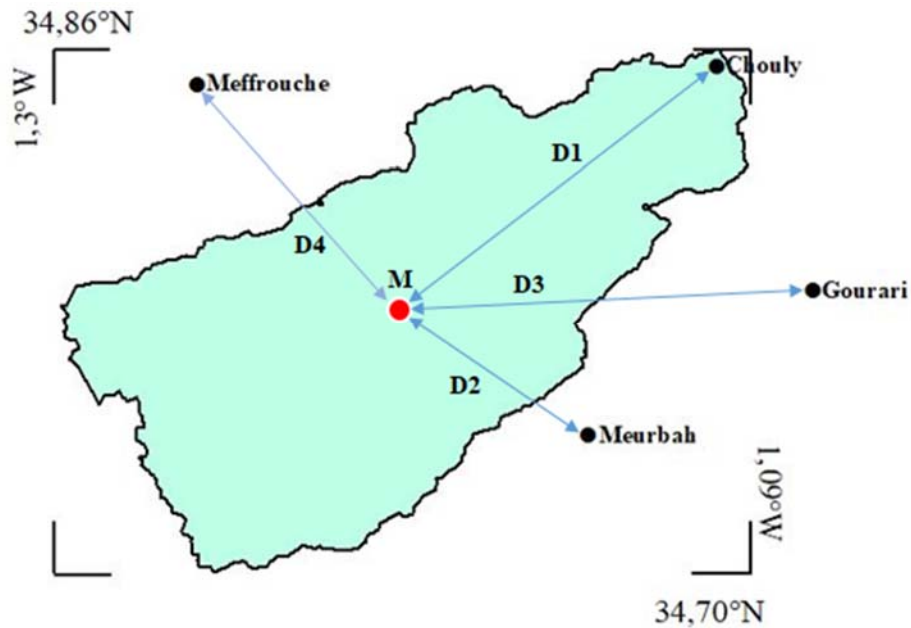


Figure 4. Localisation des stations pluviométriques et du point de calcul des précipitations

Partant des 4 séries annuelles des pluies relatives aux stations de Chouly, Meurbah, Sidi Gourari, Meffrouche, on a estimé selon la méthode décrite ci-dessus, les précipitations au centre du bassin versant de Oued Chouly (Figure 5) . Les résultats sont consignés dans la figure ci-dessous.

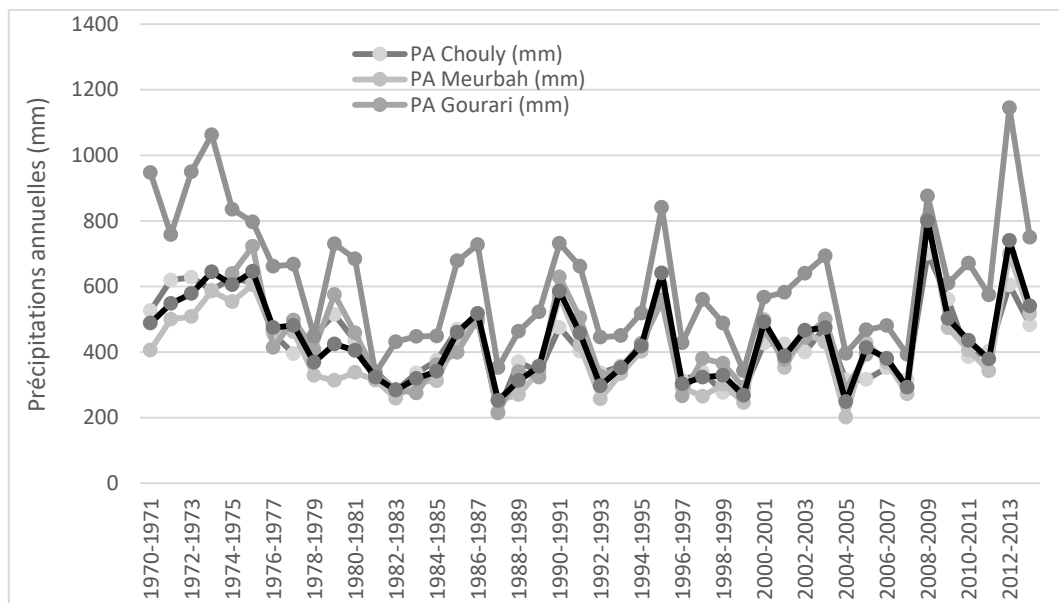


Figure 5. Résultat de l'interpolation des valeurs annuelles des précipitations obtenu par la méthode des distances inverses (IDW).

### I. COEFFICIENT DE VARIATION :

Le coefficient de variation est défini comme le rapport entre l'écart-type et la moyenne arithmétique.

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (11)$$

Ce facteur adimensionnel caractérise la dispersion intrinsèque de la variable aléatoire. Selon Hare (2003), le Cv est utilisé pour classer le degré de variabilité des événements chronologiques tels que les événements pluvieux. Pour Hare (2003), la variabilité est faible pour ( $C_v < 20$ ), modérée lorsque ( $20 < C_v < 30$ ) et élevée pour ( $C_v > 30$ ).

### II. COEFFICIENT D'ÉCOULEMENT :

Le coefficient d'écoulement est défini par le rapport entre la quantité d'eau écoulee et la quantité d'eau précipitée (rapport entre les précipitations et les lames d'eau écoulees).

$$C_e = \frac{Le}{P} \quad (12)$$

avec :

$$L_e = \frac{Q}{S} \cdot t \quad (13)$$

où : Q est le débit en m<sup>3</sup>/s

S est la surface du bassin versant (km<sup>2</sup>)

t est le nombre de secondes dans le mois, la saison ou l'année considérée (s)

### III. INDICE DE VARIABILITE DES PRECIPITATIONS ET DES DEBITS :

L'indice de variabilité ( $\tau$ ) est évalué comme suit :

$$\tau_i = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \quad (14)$$

Où  $\tau_i$  est l'indice de variabilité des précipitations (débits) pour le mois, la saison ou l'année  $i$ ,  $X_i$  est la pluie (débit) pour l'échelle de temps  $i$ ,  $\bar{X}$  et  $\sigma$  sont la valeur moyenne et l'écart type pour la période considérée. Les valeurs positives/négatives de  $\tau_i$  sont synonymes de périodes excédentaires/déficitaires. Généralement, l'indice de variabilité est confondu avec le SPI (Standard Precipitation Index) d'où on adopte la même classification consignée dans le tableau 3 (Gocic et Trajkovic, 2014).

Tableau 3. Classification des degrés d'humidité ou de sécheresse selon les valeurs de l'indice de variabilité

Degré d'humidité ou de sécheresse	Valeurs de l'indice de variabilité
Extrêmement humide	2,0 et plus
Sévèrement humide	1,50 à 1,99
Modérément humide	1,00 à 1,49
Proche de la normale	-0,99 à 0,99
Modérément sec	-1,00 à -1,49
Sévèrement sec	-1,50 à -1,99
Extrêmement sec	-2,00 et moins

#### IV. DETERMINATION DES PERIODES HUMIDES ET SECHES EN COMPARAISON AUX MOYENNES

Afin de pouvoir différencier entre les périodes sèches et humides en pluviosité et en écoulements superficiels, on met en graphiques les deux paramètres ainsi que leurs moyennes aux différentes échelles temporelles. Cette représentation permet de mettre en évidence quatre zones :

- **Zone 1** : Périodes excédentaires en pluie et en écoulement lorsque les précipitations > moyenne et les lames d'eau écoulées > moyenne.
- **Zone 2** : Périodes déficitaires en pluie et en écoulement lorsque les précipitations < moyenne et les lames d'eau écoulées < moyenne.
- **Zone 3** : Périodes excédentaires en pluie et déficitaires en écoulement lorsque les précipitations > moyenne et les lames d'eau écoulées < moyenne.
- **Zone 4** : Périodes déficitaires en pluie et excédentaires en écoulement lorsque les précipitations < moyenne et les lames d'eau écoulées > moyenne.

#### V. LE TEST DE TENDANCE DE MANN-KENDALL :

Le test MK est l'un des tests non paramétriques les plus utilisés pour détecter les tendances significatives dans les séries chronologiques climatiques et hydrologiques.

Dans ce test, seules les valeurs relatives de tous les termes dans la série  $X_i$  sont utilisées. Par conséquent, la première étape est pour remplacer les valeurs  $X_i$  par leurs rangs  $k_i$ , tels que chaque valeur est attribuée à un ordre de numérotation de 1 à N.

La deuxième étape comprend le calcul de la statistique P comme suit :

- Comparer le rang ( $k_i$ ) de la première valeur avec celles des valeurs ultérieures de la seconde à la  $N^{\text{ième}}$  valeur.
- Compter le nombre de valeurs ultérieures dont le rang dépasse  $k_i$  et désigne ce nombre par  $n_1$ .

- Comparer le rang de la deuxième valeur ( $k_2$ ) avec celles des valeurs ultérieures, compter le nombre de valeurs ultérieures qui dépassent  $k_2$  et désigner cela par  $n_2$ . Continuez cette procédure pour chaque valeur de temps se terminant par  $k_{N-1}$  et son numéro correspondant  $n_{N-1}$ .

P peut être calculé par l'équation suivante :

$$P = \sum_{i=1}^{N-1} n_i \quad (15)$$

L'étape suivante consiste à calculer la statistique  $\tau$  comme suit :

$$\tau = \frac{4P}{N(N-1)} - 1 \quad (16)$$

La valeur de la statistique  $\tau$  peut être utilisée comme une base d'un test de signification en le comparant avec :

$$(\tau)_t = 0 \pm t_g \sqrt{\frac{4N+10}{9N(N-1)}} \quad (17)$$

où  $t_g$  est le point de probabilité souhaité de la distribution normale gaussienne. Dans la présente étude,  $t_g$  aux points 0,05 et 0,10 ont été pris pour la comparaison (Sabzevari, 2015).

## VI. LA PENTE DE ŞEN :

L'estimation de la pente de Şen a été utilisée pour déterminer l'ampleur des tendances à long terme du débit et des précipitations dans les cours d'eau avec une tendance linéaire supposée dans les séries chronologiques. La pente (variation par unité de temps) des tendances peut être estimée en utilisant une procédure non paramétrique simple proposée par Şen (1968). Récemment, plusieurs études ont utilisé la méthode de l'estimation de la pente de Sen au lieu d'une régression linéaire pour estimer la pente de tendance dans les séries chronologiques météorologiques et hydrologiques.

Les estimations de N paires de données sont d'abord calculées par :

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \text{ pour } i = 1, \dots, N \quad (18)$$

où  $x_j$  et  $x_k$  sont des valeurs de données aux moments  $j$  et  $k$  ( $j > k$ ), respectivement. La médiane de ces N valeurs de  $Q_i$  est l'estimation de la pente de Şen. Si N est impair, l'estimation de la pente de Şen est calculé par :

$$Q_{med} = Q_{(N+1)/2} \quad (19)$$

Si N est pair, alors l'estimation de la pente de Sen est faite par comme suit :

$$Q_{med} = \frac{1}{2} (Q_{(N/2)} + Q_{[(N+2)/2]}) \quad (20)$$

Les changements totaux au cours de la période d'observation sont estimés en multipliant la pente par le nombre d'années. (Sabzevari, 2015).



## VII. SEGMENTATION DES SERIES DE PRECIPITATIONS ET DE DEBITS :

La procédure de segmentation (Hubert et al, 1989 ; Hubert, 2000) est en quelque sorte un test de stationnarité. Elaborée à partir de l'étude de la "cassure" pluviométrique observée en Afrique de l'Ouest à la fin des années soixante, elle permet de déterminer si une série chronologique est ou non homogène (stationnaire) et, si elle ne l'est pas, la découpe en autant de sous-séries homogènes que possible. La procédure de Hubert a aussi fait l'objet de recherches théoriques qui ont mis en évidence sa puissance et sa robustesse et a inspiré de nouveaux développements algorithmiques (Hubert, 2015).

La procédure de segmentation a pour principe le découpage d'une série en  $m$  segments de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit nettement différente de la moyenne du (des) segment (s) voisin (s).

La segmentation est retenue lorsque l'écart quadratique entre elle et la série est minimum. Cette condition est nécessaire mais non suffisante pour la détermination de la segmentation optimale. Il faut lui adjoindre, par application du test de Scheffé, la contrainte selon laquelle les moyennes des deux segments contigus doivent être significativement différentes.

Cette méthode présente l'avantage de pouvoir rechercher des changements multiples de moyenne dans une série hydrométéorologique. Elle est considérée comme un test de stationnarité ; « la série étudiée est stationnaire » constitue l'hypothèse nulle de ce test. Elle a été utilisée dans plusieurs études de changements climatiques notamment en Roumanie (Carbannel et Hubert, 1994) et surtout en Afrique de l'ouest où elle a été appliquée aux séries des précipitations et des débits de cette région (Hubert et al., 1989). La puissance de cette procédure a été confirmée par Lubès-Niel et al. (1998) surtout au niveau de signification 0,01 du test de Scheffé.

La méthode repose sur le concept suivant :

Soit  $i_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, m$  le rang dans la série initiale de l'extrémité terminale du  $k^{\text{ième}}$  segment, dont la longueur sera  $n_k = i_k - i_{k-1}$  et la moyenne  $\bar{x}_k$  (moyenne locale).

$$\bar{x}_k = \frac{\sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} x_i}{n} \quad (21)$$

On définit aussi :

$$d_k = \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} (x_i - \bar{x}_k)^2 \quad (22)$$

et :

$$D_m = D(i_1, i_2, \dots, i_m) = \sum_{k=1}^m \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} (x_i - \bar{x}_k)^2 = \sum_{k=1}^m d_k \quad (23)$$

$D_m$  est défini comme l'écart quadratique entre la série et la segmentation considérée. La quantité  $D_m$  permet d'apprécier la proximité de la série et de la segmentation appliquée. C'est en effet la somme, étendue à tous les termes de la série initiale, de l'écart quadratique à la moyenne locale de chaque segment identifié par la procédure et ne dépend, pour une série donnée, que

de la segmentation adoptée. La segmentation optimale pour chaque ordre  $m$  est celle qui aura  $D_m$  minimum parmi les  $D_m$  de toutes les segmentations possibles du même ordre. Pour  $m = 1$  et  $m = n$ , il n'y a qu'une seule segmentation possible  $D_1 = (i_1) = n\sigma^2$  où  $\sigma$  est l'écart type de la série initiale, et  $D_n = (i_1, i_2, \dots, i_n) = 0$ .

Pour toute segmentation d'ordre  $m$  compris entre 1 et  $n$ , il existe plusieurs segmentations possibles : l'extrémité du  $m^{\text{ième}}$  segment correspond au  $n^{\text{ième}}$  élément de la série, tandis que les  $(m-1)$  extrémités des autres  $(m-1)$  segments peuvent arbitrairement être placées sur les  $(n-1)$  premières valeurs de la série ; le nombre de segmentations d'un même ordre  $m$  possibles est donc donné par Djellouli, 2017 :

$$C_{n-1}^{m-1} = \frac{(n-1)!}{(m-1)(n-m)!} \quad (24)$$

### VIII. METHODE DES CUMULS (DOUBLE MASSE) :

Le principe de la méthode des cumuls consiste à tracer progressivement le cumul des valeurs d'un paramètre à tester dans le temps. Cette technique est graphique. Lorsque les séries sont homogènes, les points sont sensiblement alignés sur une droite. Les cassures dans la pente de la droite donnent les dates probables de rupture d'homogénéité.

Généralement on utilise la méthode des cumuls, dans le but de confirmer ou d'infirmer l'existence d'une hétérogénéité au sein d'une série pluviométrique ou hydrométrique d'une station donnée. Un décalage entre les points du graphe des cumuls indique l'existence de cassure ou de rupture d'homogénéité dans la série temporelle (Rhissa, 2018).

Le gros défaut de cette méthode est l'absence de tests statistiques valables pour préciser la signification des cassures apparentes. Il peut être démontré par des raisonnements probabilistes que la courbe résultant de séries homogènes doit présenter nécessairement de telles cassures par sa nature même et il reste à distinguer les cassures "naturelles" de celles qui sont imputables aux ruptures de tendances (Bernier, 1977).

### IX. CONCENTRATION DES PRECIPITATIONS (PCI) / LAMES D'EAU ECOULEES (RCI)

La concentration des précipitations est un élément clé de la variabilité climatique inter-annuelle en Méditerranée car cette région est caractérisée par une variabilité importante de ses paramètres climatiques. Un déséquilibre dans la répartition des précipitations évoque des périodes d'excès de pluie ou de sécheresse qui rendent la croissance des plantes et des cultures difficile (Michiels et al., 1992 ; Zamani et al., 2018).

Afin d'analyser l'hétérogénéité mensuelle des quantités de précipitations et d'examiner leur poids variable, on utilise la version modifiée de l'Indice de Concentration des Précipitations (PCI) proposée par Oliver (1980) (de Luis et al., 2010, 2011 ; Elagib, 2011 ; Nunes et al., 2014). Cet indice explique le niveau de concentration des précipitations au cours d'une année (saison) donnée. Il a été utilisé par plusieurs chercheurs dans différentes régions du monde (Apaydin et al., 2006 ; De Luis et al., 2010 ; Elagib, 2011). Sur une échelle annuelle, cet indice est décrit comme suit :

$$PCI = 100. \frac{\sum_{i=1}^{12} Pm_i^2}{(\sum_{i=1}^{12} Pm_i)^2} \quad (25)$$

Sur une échelle saisonnière, le PCI a été calculé selon l'équation (15) pour l'automne (septembre - novembre), l'hiver (décembre-février), le printemps (mars - mai) et l'été (juin - août).

$$PCI_s = 25. \frac{\sum_{i=1}^{12} Pm_i^2}{(\sum_{i=1}^{12} Pm_i)^2} \quad (26)$$

où  $Pm_i$  est la précipitation mensuelle du mois  $i$  calculée pour chaque station étudiée et pour chaque année tout au long de la période d'observation. L'indice de concentration de 100% impliquerait que toutes les précipitations d'un emplacement chutent de manière très concentrée en un seul mois, tandis qu'un indice de concentration de 0% signifierait que les précipitations de chaque mois de l'année sont les mêmes. Par conséquent, plus l'indice de concentration est élevé, moins la saison des pluies est répartie dans le temps (indépendamment du fait qu'il s'agisse d'une zone de pluviométrie élevée ou faible, ou d'une région pluviométrique hivernale ou estivale). Selon la classification d'Oliver, des valeurs PCI inférieures à 10 indiquent une distribution mensuelle uniforme des précipitations tout au long de l'année, les valeurs comprises entre 10 et 15 indiquent la saisonnalité de la distribution des précipitations, les valeurs de 15 à 20 indiquent une distribution irrégulière et les valeurs supérieures à 20 représentent une forte irrégularité des quantités de pluie.

Similairement aux précipitations, on a calculé dans les mêmes conditions et suivant la même méthodologie les concentrations des lames d'eau écoulées RCI : Runoff Concentation Index et RCI\_s : Seasonal Runoff Concentation index. Ces indices qu'on a transposé à partir du PCI et PCI\_s informent sur la régularité ou non des écoulements de surface le long de l'année hydrologique (saison). Cette régularité est importante pour l'irrigation ainsi que le remplissage et la gestion des ouvrages hydrauliques. Les résultats sont classés selon la même classification utilisée ci-dessus.

#### **X. DEGRE DE CONCENTRATION DES PRECIPITATIONS/LAMES D'EAU (PCD/RCD) ET PERIODE DE CONCENTRATION DES PRECIPITATIONS / LAMES D'EAU (PCP/RCP) :**

Le PCD (degré de concentration des précipitations) et le PCP (période de concentration des précipitations) ont été développés par Zhang et Qian (2003) pour caractériser la durée et la distribution des précipitations dans une seule station.

Les deux indices ont été utilisés avec succès pour détecter les concentrations de précipitations sur la base de données mensuelles. Le PCP représente le mois au cours duquel les précipitations totales d'une année sont concentrées et le PCD représente le degré de distribution des précipitations totales annuelles en 12 mois (Zhang et Qian, 2003). L'idée de base du PCD et du PCP est que la précipitation mensuelle totale est une quantité vectorielle ayant à la fois une amplitude et une direction. Les quantités sont les précipitations totales pour chaque mois, et les directions sont des angles (30 ° par mois) attribués aux 12 mois de l'année et dont la somme (année complète) forme un cercle (360 °).

Le PCD et le PCP annuels dans une station peuvent être calculés comme suit :

$$R_i = \sum r_{ij} \quad (27)$$

$$R_{xi} = \sum r_{ij} \cdot \sin\theta_j \quad (28)$$

$$R_{yi} = \sum r_{ij} \cdot \cos\theta_j \quad (29)$$

$$PCP_{ij} = \arctan\left(\frac{R_{xi}}{R_{yi}}\right) \quad (30)$$

$$PCD_{ij} = \frac{\sqrt{R_{xi}^2 + R_{yi}^2}}{R_i} \quad (31)$$

Où  $i$  est l'année et  $j$  est le mois d'une année.  $\theta_j$  est l'angle attribué au mois  $j$ .  $r_{ij}$  est la valeur des précipitations (lames d'eau écoulées) du mois  $j$  de l'année  $i$ . Pour chaque station dans la zone d'étude, les valeurs PCD et PCP ont été calculées pour chaque année et pour la période d'étude complète (44 ans). Les valeurs annuelles obtenues ont été évaluées pour décrire leurs changements temporels. En revanche, les valeurs interannuelles sont utilisées pour obtenir le mois où la précipitation est la plus concentrée et son degré de concentration. (Yin et al., 2016).

Dans cette étude, on a appliqué la même méthode pour évaluer les paramètres RCD (Runoff Concentration Degree) et RCP (Runoff Concentration Duration) relatifs aux lames d'eau écoulées

## XI. POLYGONES PLUIE-DEBIT MENSUELS ET COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT MOYENS :

Le coefficient de ruissellement, rapport du volume écoulé au volume précipité sur une surface pendant un certain temps, joue un rôle fondamental dans la planification, la conception et la gestion des ressources en eau d'un bassin. Le plus souvent sa valeur moyenne, en particulier sa moyenne annuelle, est reliée à la couverture végétale, au degré d'urbanisation, et aux caractéristiques climatologiques ou géologiques du bassin étudié (Dwarakish et Ganasri, 2015). Cette méthode initiée par Kadioglu et Şen (2001) consiste à représenter l'évolution du coefficient de ruissellement mensuel au cours de l'année moyenne par un diagramme polygonal sous forme de polygone fermé (figure 6) obtenu à partir de données mensuelles de précipitations et des lames d'eau écoulées. Chaque côté de ce polygone présente une variabilité linéaire supposée pour des mois individuels et de cette manière la non-linéarité globale du comportement du coefficient de ruissellement est prise en considération.

Cette représentation permet plusieurs interprétations. Entre autres, la proximité de la pente de chaque côté du polygone par rapport à la verticale ou à l'horizontale indique les proportions relatives des précipitations et du ruissellement dans la composition de la valeur numérique du coefficient de ruissellement mensuel. De même, plus le polygone est étroit, plus le coefficient de ruissellement est uniforme et représentatif pour le bassin versant concerné. Les polygones larges impliquent des coefficients de ruissellement temporels hétérogènes pour le bassin versant. Cela signifie également une non-linéarité dans les relations précipitations-ruissellement pour le bassin versant considéré. Dans chaque polygone, il y a toujours une séquence de côtés ascendante suivie d'une séquence descendante comme le montre la figure 6.

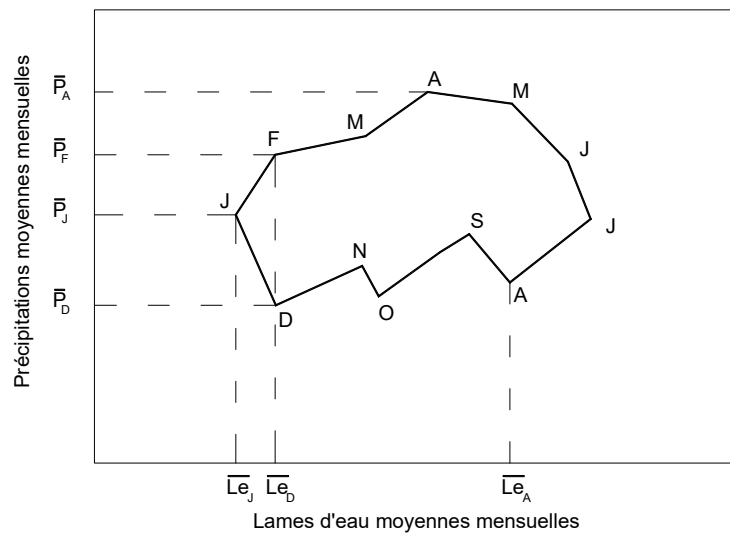


Figure 6. Représentation du polygone pluie-lames d'eau mensuelles.

En général, les coefficients de ruissellement le long d'une séquence montante sont comparativement supérieurs à ceux d'une séquence descendante. Pendant la séquence montante, le bassin versant devient plus humide dans le temps, tandis que le long de la séquence descendante, le bassin versant devient plus sec. D'un autre côté, une séquence montante correspond à des périodes de précipitations, mais la séquence descendante pourrait même représenter les contributions des eaux souterraines aux eaux de surface, ce qui fait que le coefficient de ruissellement prend des valeurs supérieures à un. En outre, plus la superficie du polygone est petite, plus les précipitations mensuelles sont cohérentes et le coefficient de ruissellement plus constant. Par contre, plus la pente globale du polygone par rapport à l'axe horizontal est petite, plus les précipitations sont converties en ruissellement par le système de captage.

## XII. ELASTICITE PLUVIOMETRIQUE DU DEBIT :

L'élasticité pluviométrique du débit est définie ici comme la variation proportionnelle du débit annuel moyen divisée par la variation proportionnelle de la pluviométrie annuelle moyenne. L'élasticité est donc une simple estimation de la sensibilité du débit aux changements des précipitations à long terme, et est particulièrement utile comme estimation initiale de l'impact du changement climatique dans les projets de ressources en terres et en eau. Cette élasticité de l'écoulement par rapport à la pluie est estimée grâce à un estimateur non-paramétrique ( $\varepsilon_p$ ).

L'élasticité de l'écoulement par rapport à la pluie est fortement corrélée avec le coefficient d'écoulement, et avec la pluie et l'écoulement annuels moyens ; l'écoulement étant plus sensible à la pluie pour les bassins plus arides et pour ceux dont le coefficient d'écoulement est faible.

L'estimateur non-paramétrique est utile lorsque des estimations cohérentes de la sensibilité au climat de l'écoulement à long terme sont requises, car il est simple d'utiliser et d'estimer l'élasticité directement à partir des données historiques. L'estimateur non paramétrique peut être exprimé comme suit :

$$\varepsilon_p = \text{median}\left(\frac{Q_i - \bar{Q}}{P_i - \bar{P}} \frac{\bar{P}}{\bar{Q}}\right) \quad (31)$$

où  $\bar{P}$  et  $\bar{Q}$  sont respectivement les précipitations et les débits moyens annuels.

La valeur de  $\left(\frac{Q_i - \bar{Q}}{P_i - \bar{P}} \frac{\bar{P}}{\bar{Q}}\right)$  est calculée pour chaque paire de  $P_i$  et  $Q_i$  dans le temps ( $P_i$  et  $Q_i$  sont les valeurs annuels).

La médiane de ces valeurs est l'estimation non paramétrique de  $\varepsilon_p$ . Cet estimateur non paramétrique de  $\varepsilon_p$  est donc défini par la valeur moyenne de la variable hydro climatique (Francis et Chiew, 2006).

## I. VARIATION TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS ET DES DEBITS :

### I.1. Echelle annuelle :

La variabilité interannuelle des précipitations et des débits durant la période entre 1970-71 et 2013-14 dans la zone drainée par Oued Chouly est parfois très importante (figure 7 et tableau 4). Pour les précipitations, le degré de variabilité est néanmoins modéré ( $C_v = 30\%$ ). La valeur moyenne des précipitations est de 440 mm. La valeur maximale atteinte en 2008-09 (800 mm) représente près du double de la valeur moyenne, tandis que la valeur minimale (248 mm) relevée en 2004-05 ne représente que 56% de la valeur moyenne et 31% de la valeur maximale. Sur les 44 valeurs annuelles, 24 sont au-dessous de la moyenne.

Il convient de remarquer également, la tendance déficitaire des précipitations lors des 30 dernières années (1978-79 à 2007-08) où plusieurs valeurs annuelles se trouvent en dessous de la moyenne. C'est là, en effet, que l'on repère les années les plus sèches de la période d'étude. Cette période déficitaire en pluie aura sûrement des conséquences directes sur l'hydraulicité du cours d'eau.

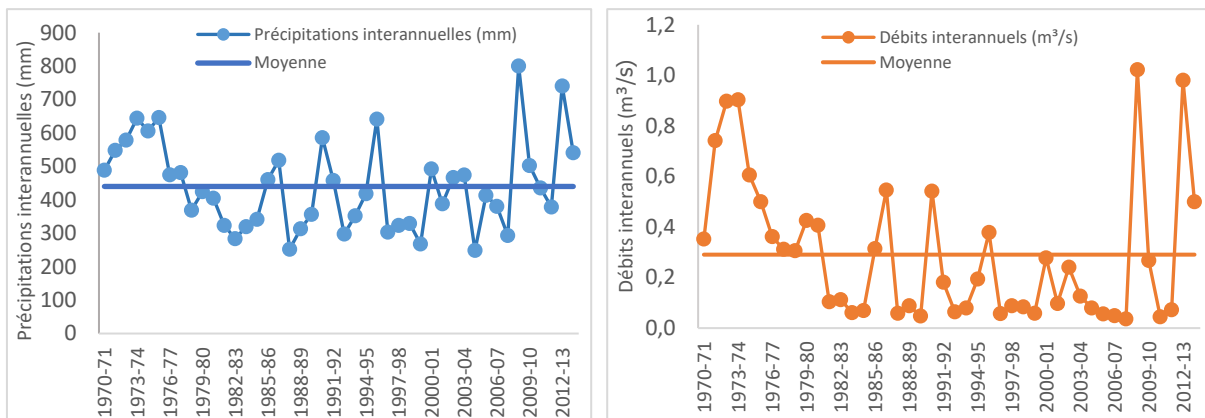


Figure7. Variation interannuelle des précipitations et des débits.

Pour les débits, la valeur maximale est de  $1,022 \text{ m}^3/\text{s}$  atteinte en 2008-09 et la valeur minimale qui est de  $0,036 \text{ m}^3/\text{s}$  a été atteinte en 2007-08. La valeur du coefficient de variation qui est de 96% montre que le degré de variabilité est très élevé.

Les coefficients d'asymétrie sont positifs pour les précipitations interannuelles ainsi que pour les débits. Ainsi, la symétrie des deux courbes est étalée à droite d'où la majeure partie des valeurs annuelles sont inférieures à la moyenne interannuelle.

En se basant sur les valeurs des centiles, on a enregistré au cours des 44 années d'étude, pour les précipitations et pour les débits : 3 valeurs très faibles, 8 valeurs faibles, 22 valeurs moyennes, 8 valeurs fortes et 3 valeurs très fortes.

Les coefficients de variation sont importants. Celui des débits est plus élevé que celui des précipitations. Ceci montre qu'il y a une grande dispersion des débits par rapport à la moyenne qui est égale à  $0,29 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Tableau 4. Caractéristiques interannuelles des précipitations et des débits.

Caractéristiques		Précipitations (mm)	Débits (m <sup>3</sup> /s)
Valeur moyenne		440	0,290
Valeur Max (Année)		800 (2008-2009)	1,022 (2008-2009)
Valeur Min (Année)		248,2 (2004-2005)	0,036 (2007-2008)
Coefficient de variation		0,30	0,96
Coefficient d'asymétrie		0,73	1,26
Centiles	5%	269,9	0,047
	25%	327,5	0,071
	75%	506,1	0,411
	95%	645,5	0,902

### I.2. Echelle saisonnière :

La variation saisonnière et moyenne saisonnière des précipitations et des débits durant la période (1970-2014) est présentée par les figures 8 et 9 et le tableau 5. On constate que la saison la plus humide est la saison d'hiver pour les précipitations avec une valeur moyenne de 164 mm et la saison de printemps pour les débits où l'on atteint 0,557 m<sup>3</sup>/s. La saison d'été est la plus sèche pour les deux paramètres avec 20,1 mm pour les précipitations et 0,067 m<sup>3</sup>/s pour les débits.

D'une année à une autre, l'évolution des deux paramètres est complexe principalement pour les trois saisons (automne, hiver et printemps). La saison d'été apparait comme la courbe la plus basse enregistrant les valeurs les plus faibles. La moyenne saisonnière est de 109,7 mm pour les précipitations et 0,29 m<sup>3</sup>/s pour les débits.

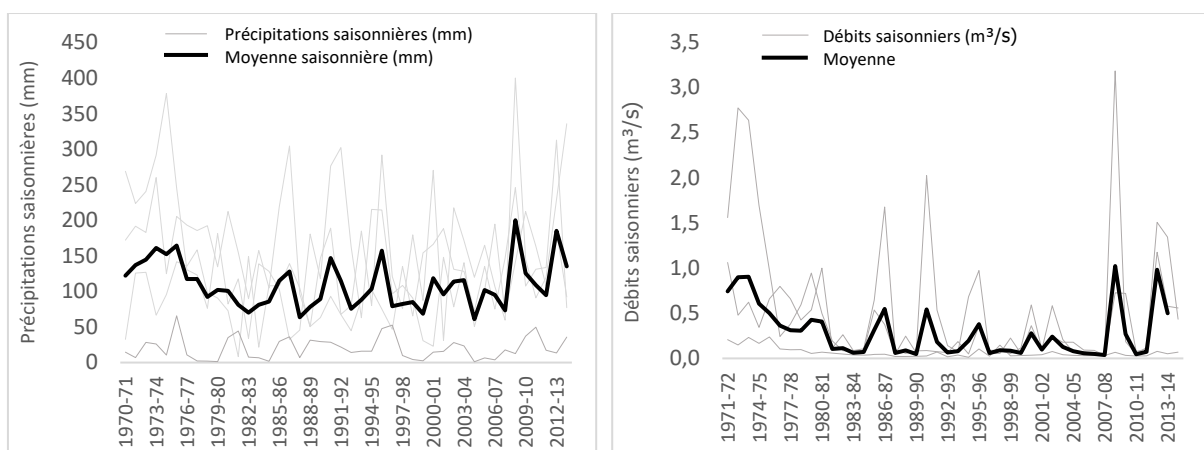


Figure 8. Variation saisonnière des précipitations et des débits.



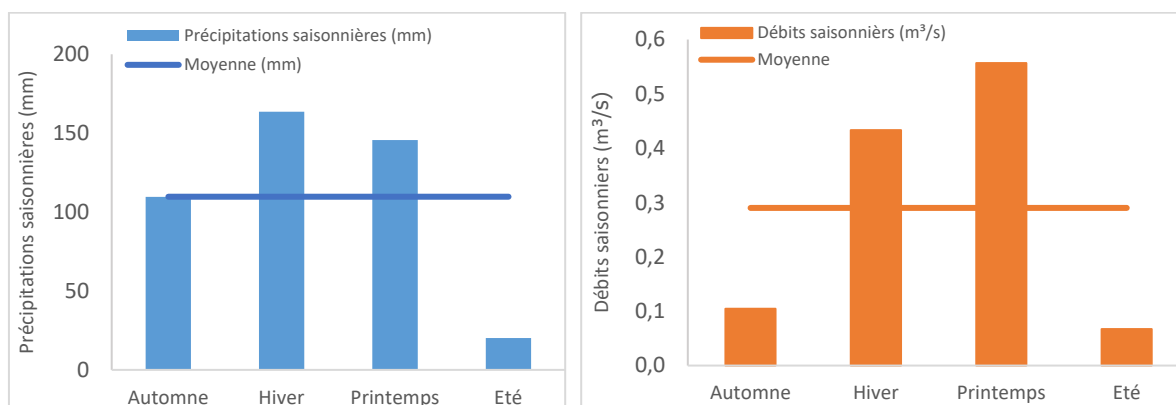


Figure 9. Variation moyenne saisonnière des précipitations et des débits.

Tableau 5. Caractéristiques saisonnières des précipitations et des débits.

Caractéristiques	Précipitations (mm)	Débits (m <sup>3</sup> /s)
Valeur moyenne	109,7	0,290
Valeur Max (Saison)	163,6 (Hiver)	0,557 (Printemps)
Valeur Min (Saison)	20,1 (Eté)	0,067 (Eté)
Coefficient de variation	0,58	0,83
Coefficient d'asymétrie	-1,33	0,20

### I.3. Echelle mensuelle :

Les valeurs mensuelles et moyennes mensuelles des précipitations et des débits correspondants à la période (1970/14) sont représentées dans les figures 10 et 11 et le tableau 6. La plupart des précipitations dans la région drainée par Oued Chouly se produisent entre Octobre et Mai avec une valeur maximale de 63,9 mm atteinte au mois de Mars. La période la plus sèche correspond à la saison d'été et la valeur minimale (4,9 mm) est atteinte au mois de juillet.

Le plus important débit est mentionné en mois de Mars avec une valeur de 0,96 m<sup>3</sup>/s et le débit le plus faible est de 0,04 m<sup>3</sup>/s correspondant au mois d'août.

Durant des années particulières, on enregistre des valeurs mensuelles très fortes comme par exemple 266 mm de pluie enregistrée en mars 1991, soit 60% de la valeur moyenne interannuelle ou encore un débit de 5,853 m<sup>3</sup>/s correspondant au mois de mars 1973. Notons que les valeurs moyennes mensuelles d'une année à une autre, sont plus ou moins stables et faibles (36,6 mm pour les précipitations et 0,29 m<sup>3</sup>/s pour les débits).

Pour les valeurs moyennes mensuelles, la représentation des débits est une forme en cloche avec une ascension du mois de septembre au mois de mars puis une rechute parfaite jusqu'au mois d'août. Quatre mois seulement (de janvier à avril) présentent des débits supérieurs à la moyenne. Pour les pluies, cette variation n'est pas aussi parfaite que celle des débits, de plus pendant six mois (de novembre à avril), les précipitations sont nettement supérieures à la moyenne.

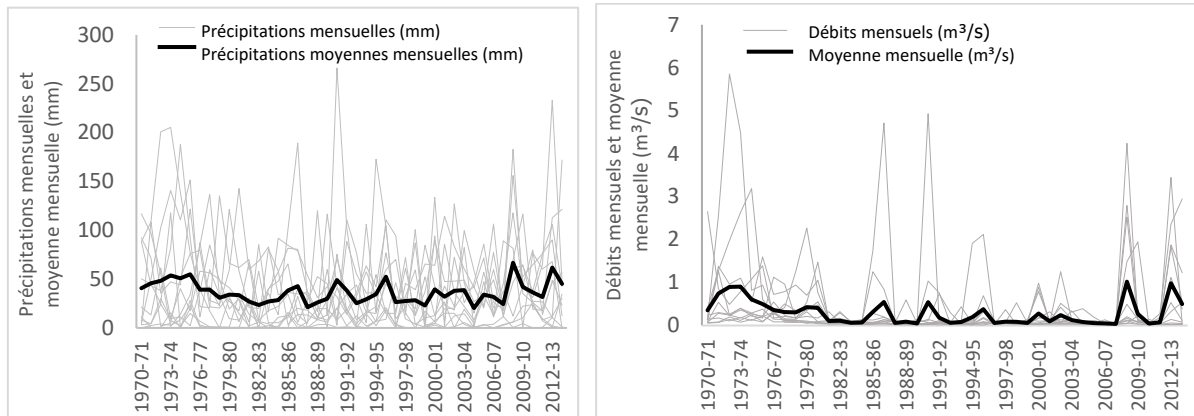


Figure 10. Variation mensuelle des précipitations et des débits

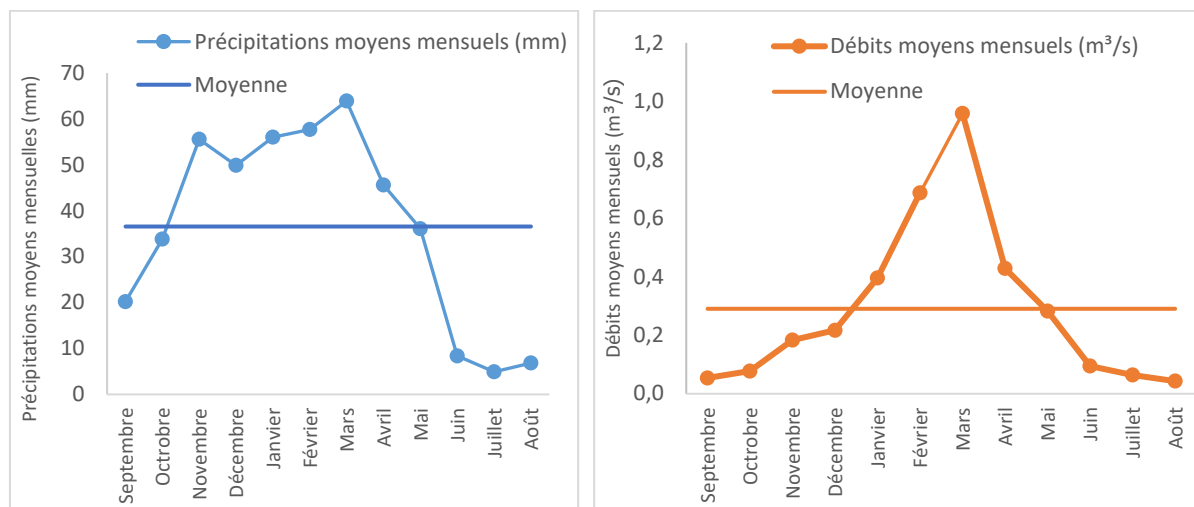


Figure 11. Variation moyenne mensuelle des précipitations et des débits

Le degré de variation est élevé ( $Cv > 30\%$ ) pour les deux séries (précipitations et débits) indiquant une variabilité élevée des deux paramètres. Les coefficients d'asymétrie sont de sens contraires. La majeure partie des valeurs mensuelles sont inférieures à la moyenne pour les débits et le contraire pour les précipitations.

Tableau 6. Caractéristiques des précipitations et des débits mensuels.

Caractéristiques	Précipitations (mm)	Débits ( $m^3/s$ )
Valeur moyenne	36,6	0,290
Valeur Max (Mois)	63,9 (Mars)	0,959 (Mars)
Valeur Min (Mois)	4,9 (Juillet)	0,043 (Août)
Coefficient de variation	0,59	0,99
Coefficient d'asymétrie	-0,41	1,42

## II. INDICES DE VARIABILITE DES PRECIPITATIONS ET DES LAMES D'EAU ECOULEES

Les indices de variabilité des précipitations et des lames d'eau écoulées calculés sont présentés conjointement dans les figures 12, 13 et 14.

**II.1. Echelle annuelle :**

Les précipitations et les lames d'eau écoulées annuelles (figure 12) ont connu une période humide allant jusqu'à la fin des années 1970 ensuite plusieurs séquences sèches se sont déclarées. Les années singulières humides et très humides observées entre ces séquences sèches ne peuvent être considérées comme des séquences vu leurs durées réduites. Malgré cela, la classification adoptée pour qualifier les degrés d'humidité et de sécheresse permet de constater que la classe proche de la normale occupe 64 et 84% du temps pour les précipitations et les lames d'eau écoulées respectivement. Les autres classes sont relativement minoritaires. Notons que la classe « modérément sec » a sévi pendant 18,2% des années pour les pluies.

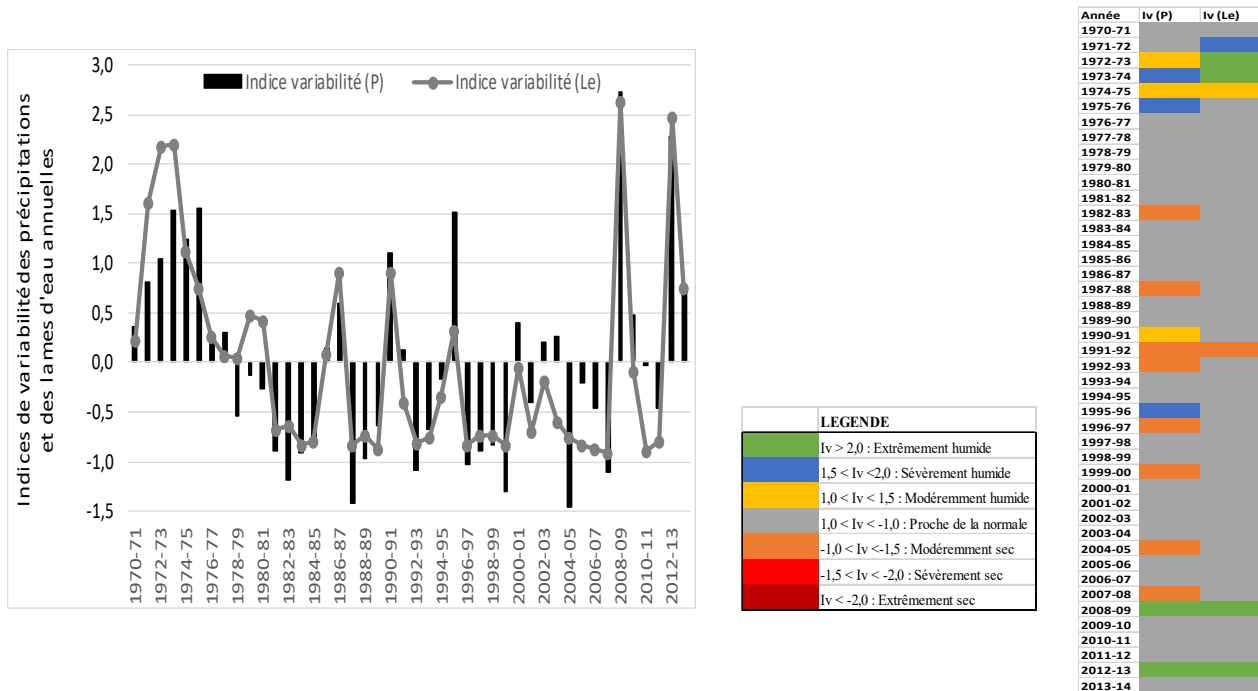


Figure 12. Indices de variabilité annuels des précipitations et des lames d'eau écoulées

**II.2. Echelle saisonnière :**

A l'échelle saisonnière, à l'instar de l'échelle annuelle la classe « proche de la normale » est majoritaire principalement en automne pour les lames d'eau écoulées. Pour les précipitations, contrairement à l'échelle annuelle, on a enregistré des années sévèrement sèches (1981-82 et 1983-84 en automne et 2001-02 en hiver). En hiver et au printemps, on remarque aussi que la classe « modérément sec » se classe en 2° position (figure 13).

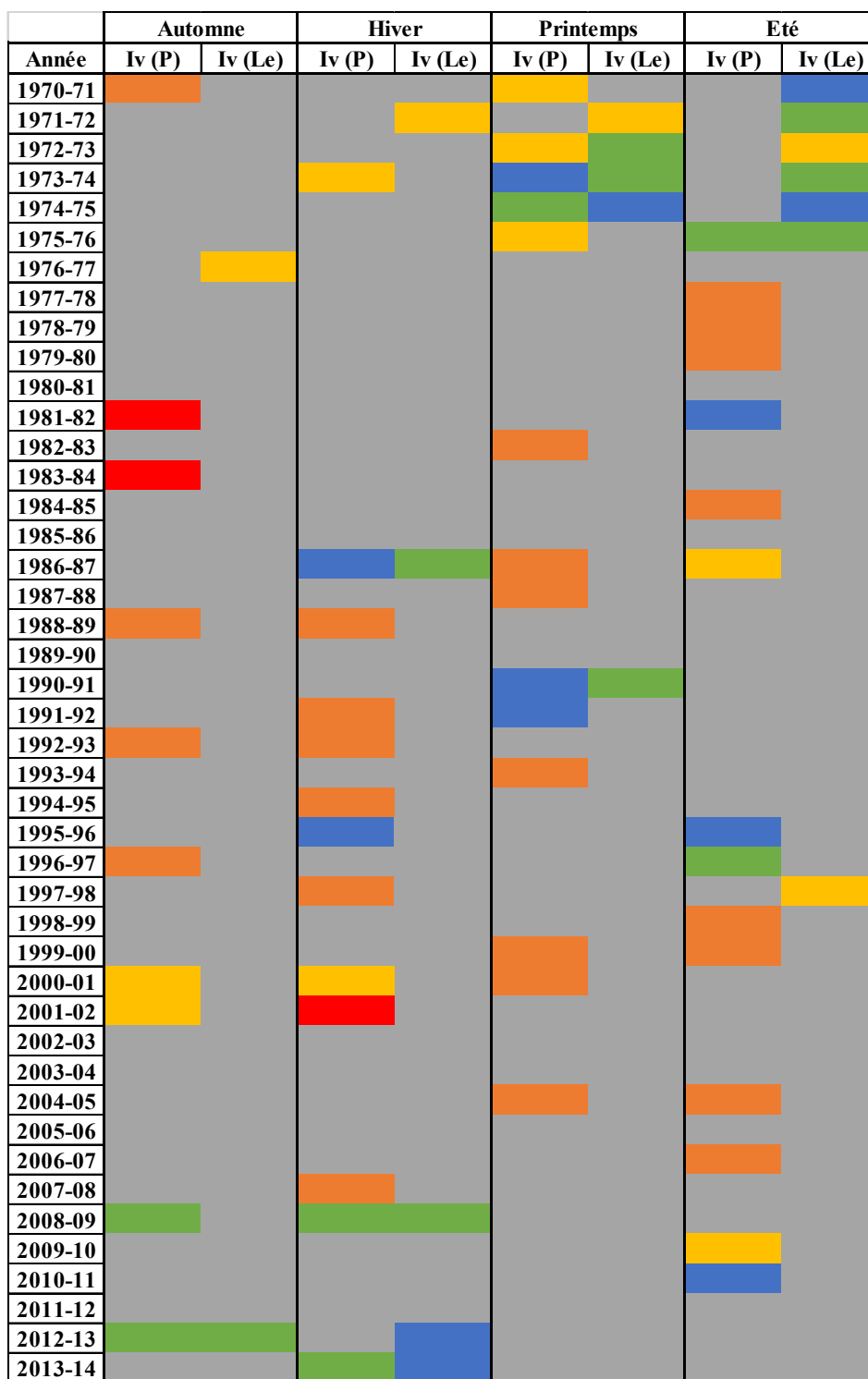


Figure 13. Indices de variabilité saisonniers des précipitations et des lames d'eau écoulées

### II.3. Echelle mensuelle :

De même que les échelles de temps précédentes, les indices de variabilité mensuelles montre que le bassin versant de Oued Chouly a subi au cours de la période d'études des années très peu sèches ou très peu humides ( $-1 < I_p < +1$ ) classées proches de la normale (figure 14). Par contre

les fortes humidités et les fortes sécheresses sont absentes. Les mois qui ont connu des humidités et des sécheresses modérées existent mais leurs nombres sont limitées.

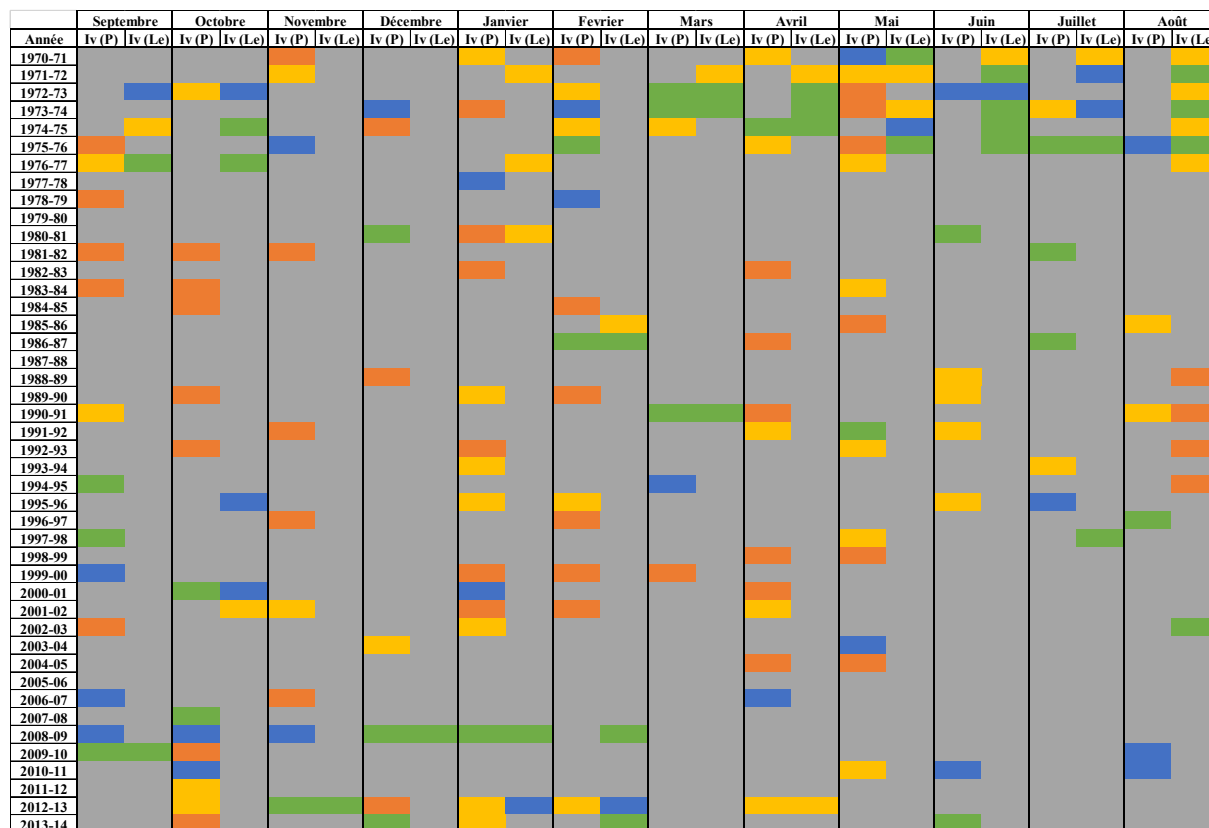


Figure 14. Indices de variabilité mensuels des précipitations et des lames d'eau écoulées

### III. DETERMINATION DES PERIODES HUMIDES ET SECHES EN COMPARAISON AUX MOYENNES

En comparant graphiquement les valeurs des précipitations et des lames d'eau écoulées aux différentes échelles temporelles, on met en évidence les périodes sèches et humides en pluviosité et en écoulements superficiels. Les résultats obtenus sont donnés ci-après.

#### III.1. Echelle annuelle :

Deux groupes d'années occupent la période d'étude. Les années excédentaires (couleur rose) où les précipitations et les lames d'eau écoulées sont supérieures aux moyennes. Cette période se localise principalement entre 1970-71 et 1977-78. La seconde zone est occupée par des années déficitaires en précipitations et les lames d'eau écoulées. Elle s'étale entre 1981-82 jusqu'en 2011-12 entrecoupée par les zones 1 et 3 où l'on enregistre des années singulières ne pouvant constituer des séquences (figure15).

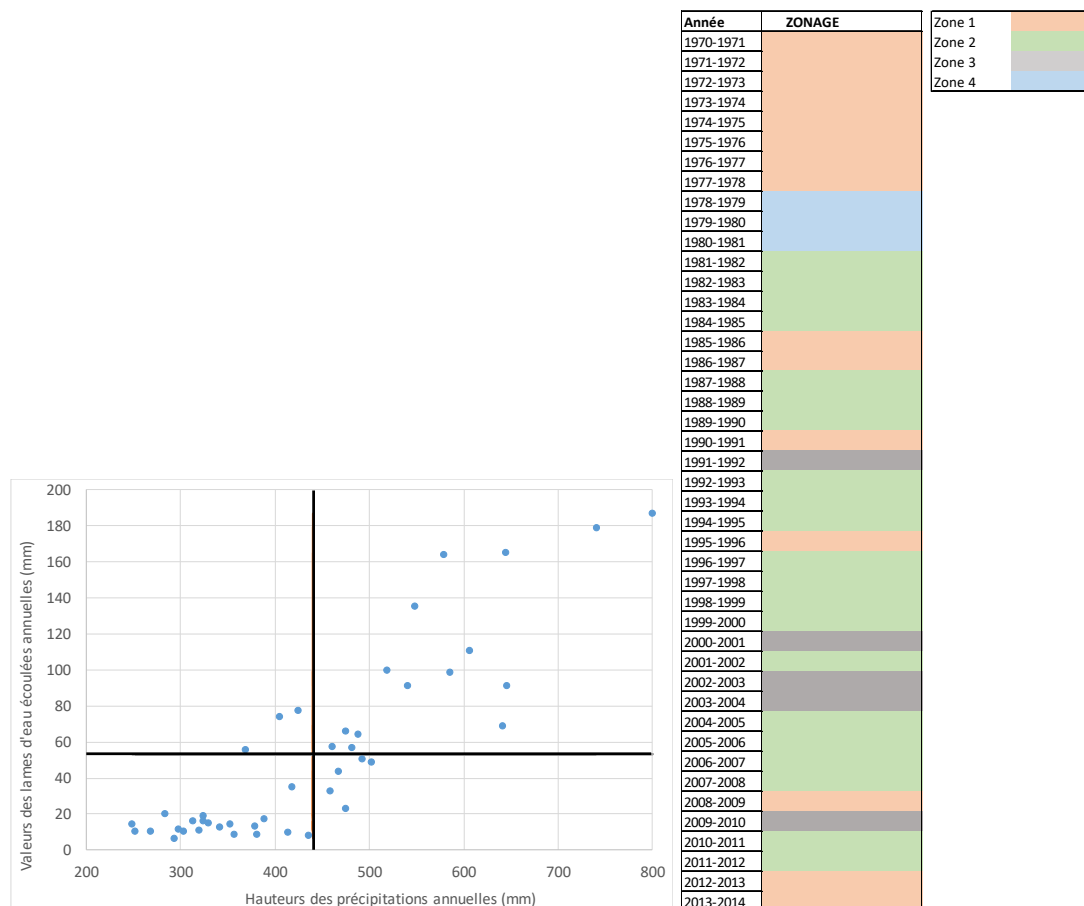


Figure 15. Précipitations et lames d'eau écoulées annuelles comparées aux moyennes (à gauche) et zonage des années hydrologiques (à droite).

### III.2. Echelle saisonnière :

Durant les saisons, la classe où les précipitations et les écoulements sont inférieures aux moyennes (couleur verte) est majoritaire. Elle occupe entre 45% et 55% du temps total. La période excédentaire est en deuxième position avec un temps d'occurrence allant de 16% à 32% (figure 16). La classe où seuls les débits sont supérieurs aux moyennes n'est significative que pour les saisons estivales (automne et été), ce qui est logique puisque l'on assiste à la vidange des nappes. Par contre, pour la classe où seules les précipitations sont supérieures aux moyennes, les fréquences d'apparition sont de 18% à 25% ce qui conduit à penser que l'infiltration et l'évaporation empêchent souvent les eaux de pluie de ruisseler. On note aussi que les saisons d'hiver et de printemps demeurent les plus humides de l'année moyenne.

### III.3. Echelle mensuelle :

Mensuellement, les précipitations et les débits sont inférieurs aux moyennes pendant plus de 50% du temps annuel (figure 16). Ceci indique que le bassin versant subit des épisodes de sécheresse plus étalés dans le temps que les périodes d'humidité. Durant le mois de juillet, on enregistre la fréquence maximale de cette classe. On relève aussi que la classe où les précipitations sont abondantes contrairement aux débits a un taux d'occurrence de près de 21%.

Ceci indique que l'infiltration pendant la saison humide et l'évaporation pendant la saison estivale empêchent les eaux de pluie d'arriver jusqu'au réseau hydrographique. La période humide (couleur rose) n'occupe que la troisième position avec un taux de 17%.

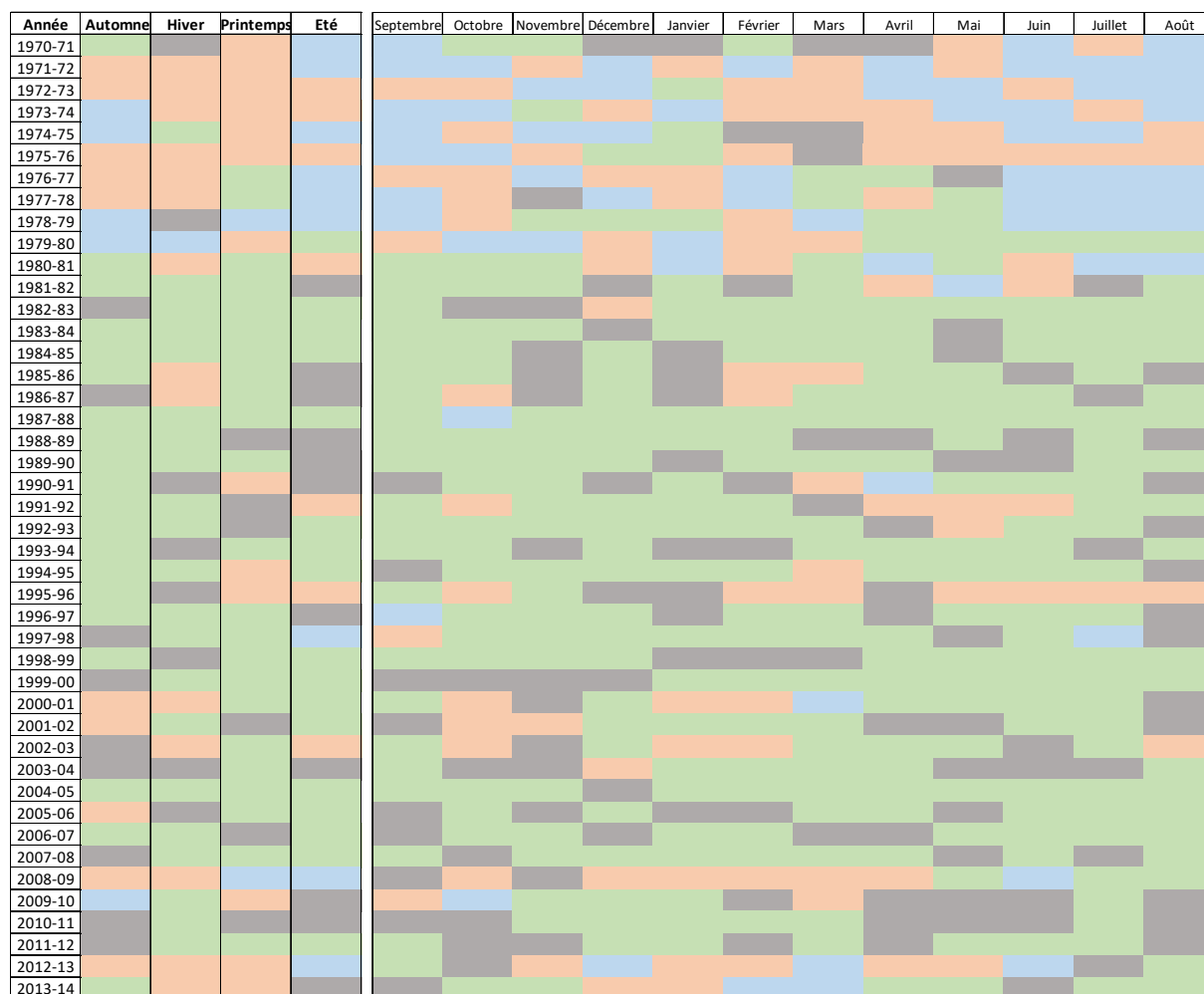


Figure 16. Zonage saisonnier (à gauche) et mensuel (à droite) pour l'ensemble des années hydrologiques.

#### IV. EVOLUTION TEMPORELLE DES COEFFICIENTS D'ÉCOULEMENT :

Le coefficient d'écoulement étant le rapport du débit transformé en lame d'eau écoulee (pour avoir la même unité que celle des pluies) aux précipitations. L'étude de la variation temporelle de ce paramètre révèle la variation conjointe des précipitations et des débits dans la zone d'étude. Le coefficient d'écoulement qui représente la proportion des pluies qui s'écoule en surface dans le réseau hydrographique se trouve parfois faussé par d'autres apports en eau en dehors des précipitations tels que les lâchages de barrages (lorsque la station hydrométrique se trouve à l'aval d'un barrage) et les apports de sources (vidange des nappes). Ceci est la raison pour laquelle on a trouvé certaines valeurs, en période estivale surtout, supérieures à 1 (100%). Ces valeurs ont été retirées d'où des valeurs manquantes dans les graphes mensuels.

#### IV.1. Echelle annuelle :

La variation du coefficient d'écoulement en fonction des années (figure 17) montre que le bassin de Oued Chouly a connu des valeurs fortes entre 1971-72 et 1974-75 où le coefficient d'écoulement a atteint sa valeur maximale de 28,13% (1972-73). Cette période est suivie d'un épisode déficitaire depuis la fin des années 1970 jusqu'à l'année 2007-08 où une période sèche s'est installée dans le bassin. Les années 2008-09 et 2013-14 sont excédentaires aussi. Globalement durant toute la période d'étude, la tendance des coefficients d'écoulement est à la baisse avec un taux moyen de -0,24.

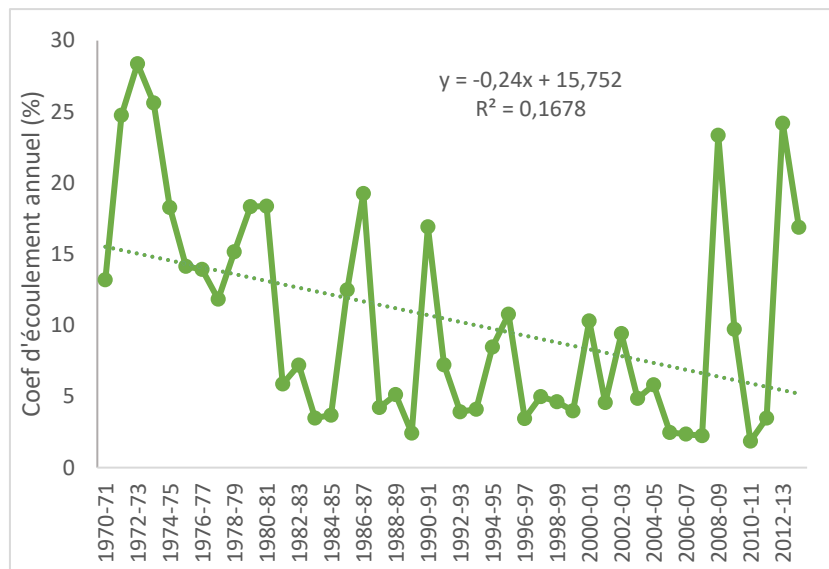


Figure 17. Variation annuelle des coefficients d'écoulement.

#### IV.2. Echelle saisonnière :

Les coefficients d'écoulements saisonniers de la période (1970-2014) consignés dans la figure 18, sont faibles dans l'ensemble avec l'existence de certains pics parfois très élevés.

En automne, les coefficients d'écoulement sont en majorité très faibles, en moyenne de 4,58%. En effet, malgré que les précipitations ne soient pas négligeables, les débits qui s'écoulent dans le réseau hydrographique sont très faibles. On explique la baisse des coefficients d'écoulement par l'effet de l'évaporation du sol puisque la terre est chaude en cette période estivale qui a duré plusieurs mois.

En hiver, la réponse hydrologique n'est pas proportionnelle aux chutes de pluie d'où de faibles valeurs des coefficients d'écoulement et une tendance globale à la baisse. La quantité d'eau précipitée s'est probablement infiltrée dans le sol ainsi que l'absorption d'une partie des eaux précipitées par les racines de plantes, ce qui explique la faible quantité des lames d'eau écoulées.

Au printemps, les coefficients d'écoulements sont plus importants avec une valeur maximale de 72% en 2000-01, ceci est probablement dû à la saturation du sol en hiver.

En été, les coefficients d'écoulements sont importants avec des valeurs qui dépassent 100% ne reflétant pas la réalité, ce qui veut dire que la quantité des lames d'eau écoulées est plus



importante que la quantité des précipitations. Ceci est expliqué par l'existence probable de sources (vidange de nappes souterraines).

Pour les quatre saisons, la tendance générale est à la baisse impliquant une séquence sèche qui s'est installée dans la région d'étude.

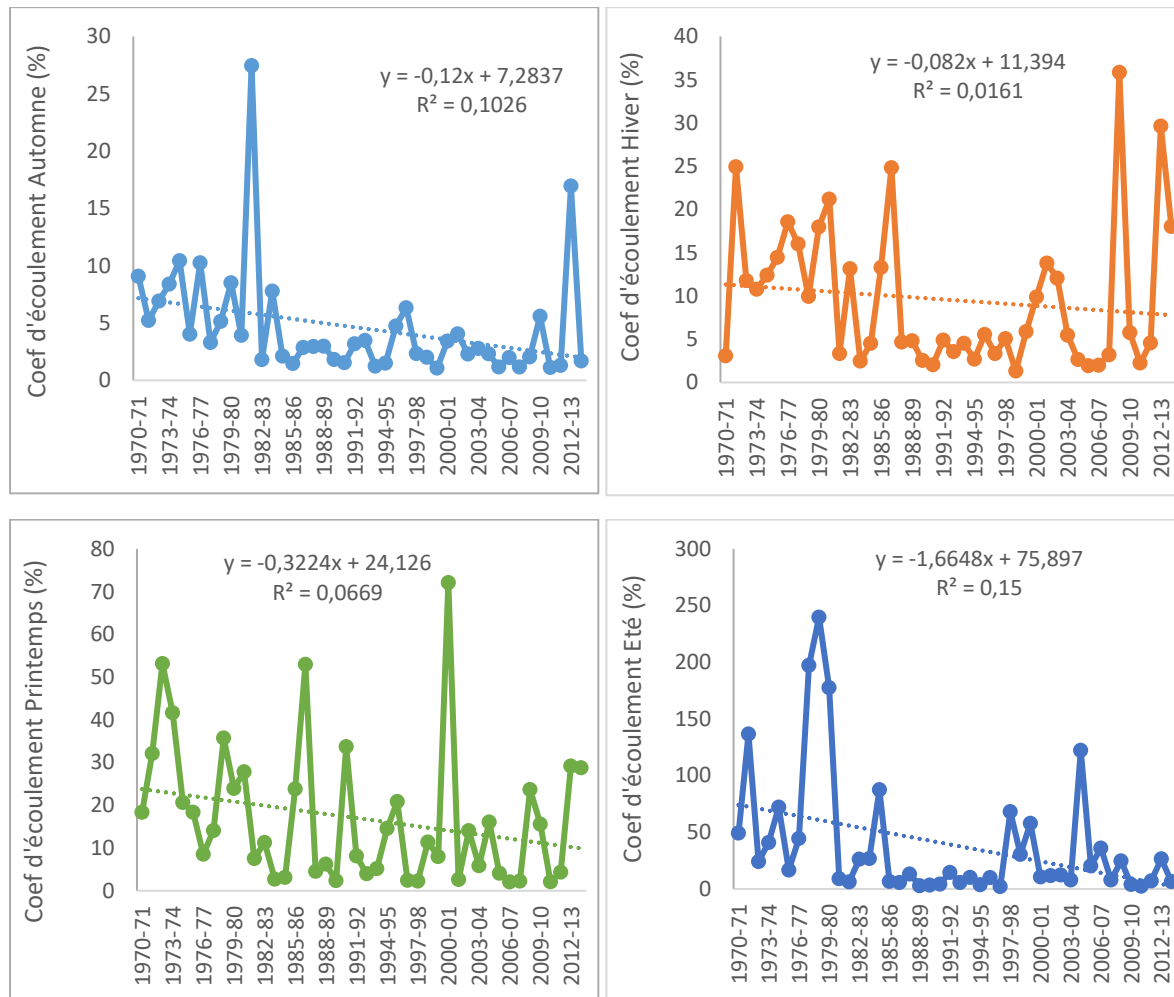


Figure 18. Variation saisonnière des coefficients d'écoulement.

#### IV.3. Echelle mensuelle :

A l'échelle mensuelle, les coefficients d'écoulements sont globalement faibles surtout aux mois de septembre et octobre (figure 19). Les tendances globalement à la baisse ainsi que les moyennes, sont faussées par des valeurs singulières très élevées ne reflétant l'état réel du bassin versant. Notons que pour certains mois tels que ceux de décembre, mars et avril, les coefficients d'écoulement présentent une certaine régularité temporelle.

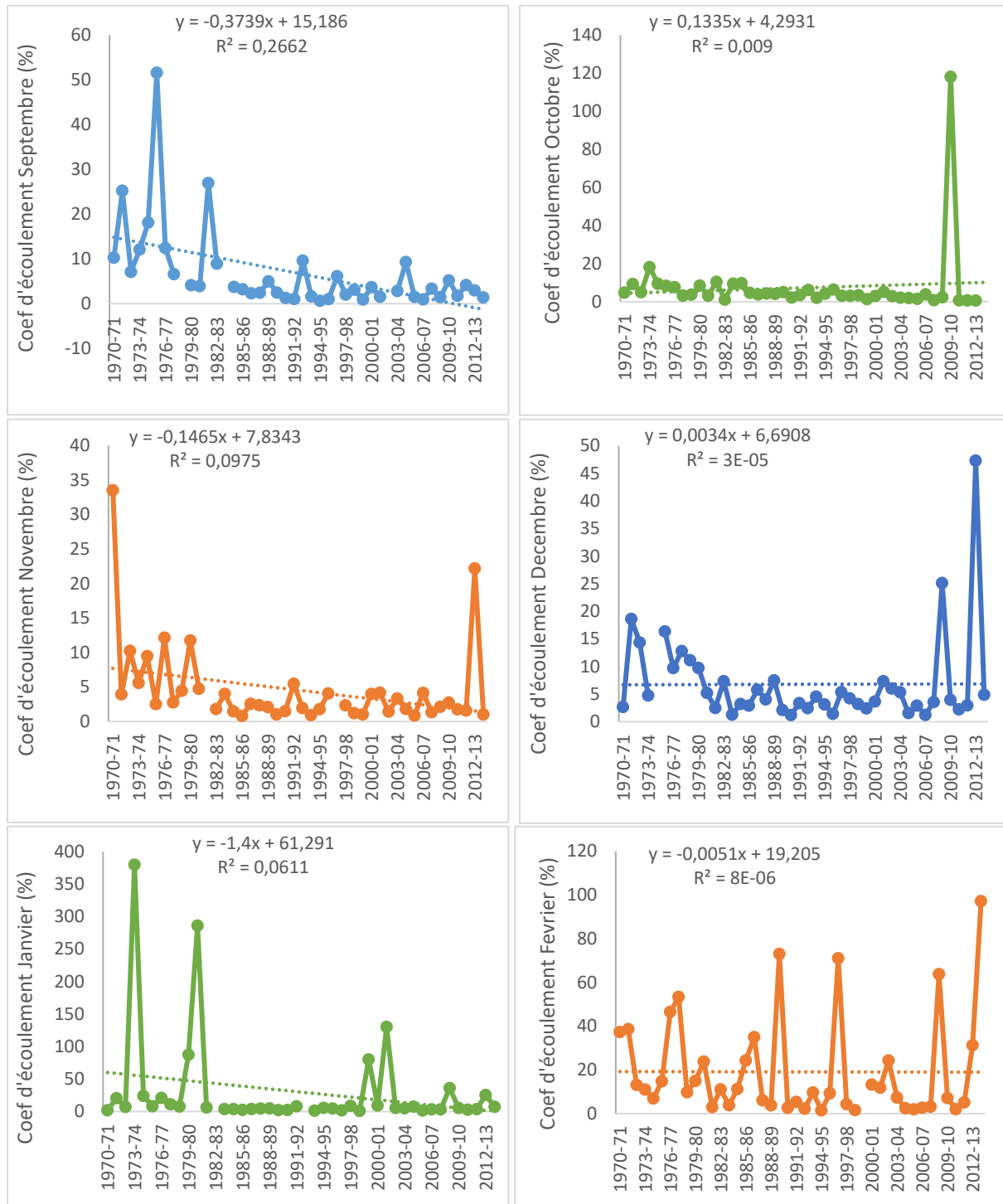


Figure 19a. Variation mensuelle des coefficients d'écoulement (septembre à février)

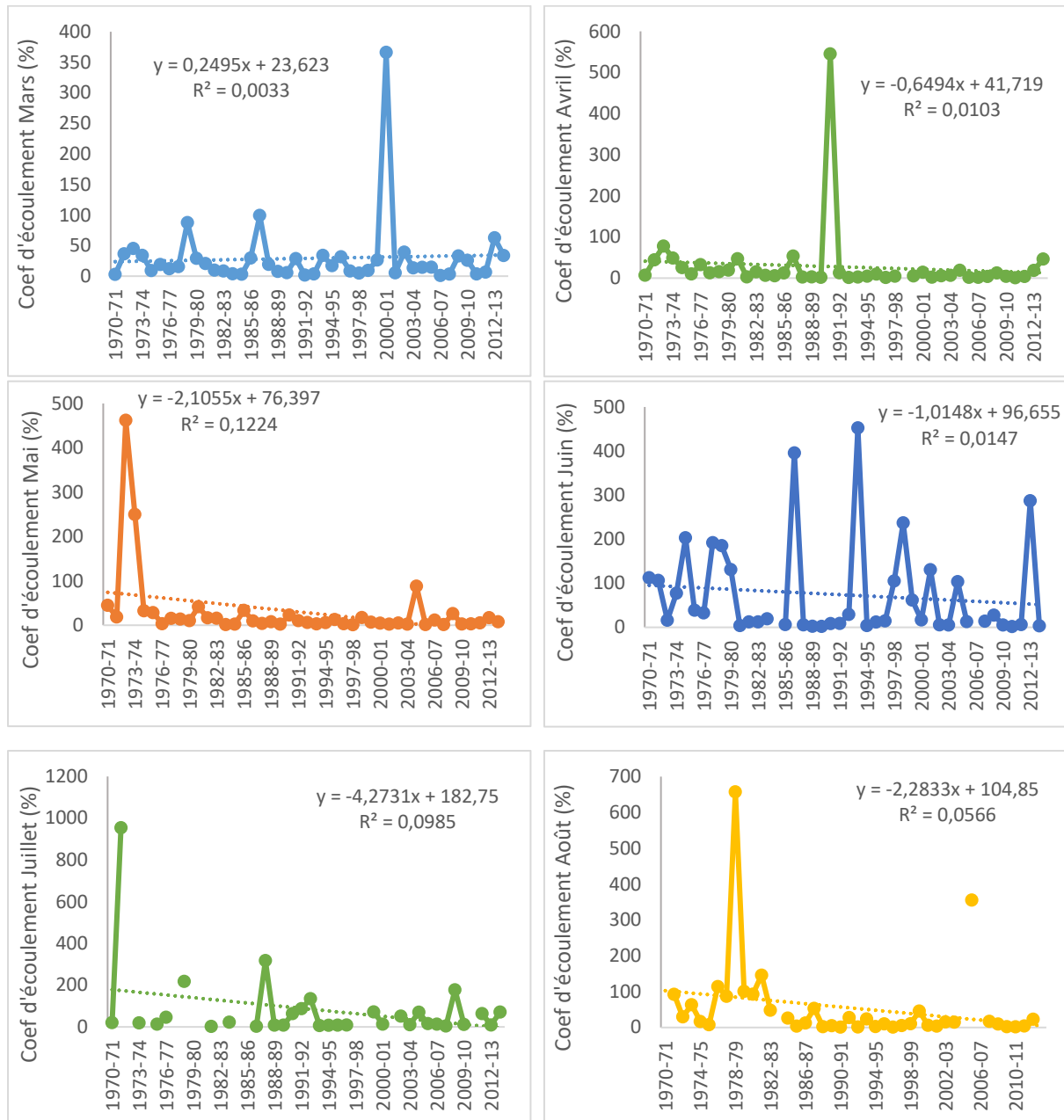


Figure 19b. Variation mensuelle des coefficients d'écoulement (mars à décembre)

**V. TENDANCE DES PRECIPITATIONS ET DES DEBITS PAR LA METHODE DE MAN-KENDALL :**

L'analyse des tendances des précipitations et des écoulements du bassin versant de Oued Chouly basée sur le test de Mann-Kendall a donné les résultats suivants :

**V.1. Echelle annuelle :**

Les tendances annuelles, aussi bien pour les pluies que pour les débits traduisent des diminutions dans le temps (tableau7). Le tau de Kendall n'est pas significatif pour les précipitations et significatif au taux de 90% pour les débits. La pente de  $\hat{\tau}_{sen}$  est plus accentuée

pour les précipitations que pour les débits d'où une tendance à la baisse plus marquée pour les pluies.

Tableau 7. Test de Mann-Kendall et pente de  $\zeta_{en}$  pour les précipitations et les débits annuels

Test Mann-Kendall	Précipitations	Débits
Sens	↘	↘
$\tau$	-0.093	-0.307 <sup>^</sup>
$\alpha$	-1.366	-0.007

### V.2. Echelle saisonnière :

A l'échelle saisonnière, la tendance à la baisse est significative à 95% pour les débits durant toutes les saisons, par contre, elle n'est significative que pour les mois d'automne et de printemps à 90% pour les précipitations (tableau 8). On remarque que les précipitations sont en hausse pendant la saison estivale (automne et été) et à la baisse pendant la saison pluvieuse (hiver et printemps). Pour les débits, la baisse est générale et significative au seuil de 95%. Les pentes de  $\zeta_{en}$  pour les débits sont très faibles indiquant des taux de diminution saisonniers presque négligeables sauf pour la saison de printemps.

Au regard des valeurs consignées dans le tableau 8, on remarque un changement de comportement des pluies dans le bassin versant. Les précipitations ont tendance à se déplacer de la saison pluvieuse vers la saison estivale. Les débits par contre ne suivent pas puisque d'autres considérations entrent en jeu tels que l'état du sol, la nature et la densité de la végétations, l'évaporation etc...

Tableau 8. Test de Mann-Kendall et pente de  $\zeta_{en}$  pour les précipitations et les débits saisonniers

	Test Mann-Kendall	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Pluies	Sens	↗	↘	↘	↗
	$\tau$	0,175 <sup>^</sup>	-0,104	-0,188 <sup>^</sup>	0,042
	$\alpha$	1,078	-0,961	-1,705	0,067
Débit	Sens	↘	↘	↘	↘
	$\tau$	-0,252*	-0,239*	-0,273*	-0,359*
	$\alpha$	-0,001	-0,004	-0,012	-0,002

### V.3. Echelle mensuelle :

Le traitement mensuel nous indique qu'une forte progression des précipitations se déroule au mois de septembre par contre une forte diminution est enregistrée au mois de mars (tableau 9). Les tau\_s de Kendall sont significatifs à 95% pour ces deux mois de l'année. Pour le reste des mois, on note une légère hausse pour le mois de janvier malgré que l'ensemble de la saison d'hiver soit à la baisse. Les mois de juillet et août quoiqu'ils soient positifs, n'enregistrent pas généralement une pluviométrie conséquente. Pour les débits, les tendances sont significatives à la baisse pour tous les mois. Le sens opposé de la tendance entre les précipitations et les débits en mois de Janvier est probablement dû à l'absorption de l'eau par les plantes.

Tableau 9. Test de Mann-Kendall et pente de Şen pour les précipitations et les débits mensuels

M-K	Précipitations			Débits		
	Sens	$\tau$	$\alpha$	Sens	$\tau$	$\alpha$
Sept	↗	+0,234*	+0,362	↘	-0,358*	-0,0007
Oct	↗	+0,135	+0,424	↘	-0,305*	-0,001
Nov	↗	+0,068	+0,260	↘	-0,312*	-0,002
Dec	↘	-0,055	-0,187	↘	-0,260*	-0,002
Jan	↗	+0,066	+0,288	↘	-0,296*	-0,003
Fév	↘	-0,047	-0,229	↘	-0,207*	-0,004
Mars	↘	-0,230*	-0,994	↘	-0,216*	-0,006
Avril	↘	-0,030	-0,119	↘	-0,279*	-0,007
Mai	↘	-0,015	-0,045	↘	-0,349*	-0,005
Juin	↘	-0,037	-0,017	↘	-0,396*	-0,003
Juil	↗	+0,080	+0,009	↘	-0,335*	-0,002
Aôu	↗	+0,136	+0,067	↘	-0,341*	-0,0008

Avec :

$\tau$  : Tau de Kendall.

$\alpha$  : Pente de Şen.

\* : Test significatif à 95%.

^ : Test significatif à 90%.

## VI. RUPTURES DANS LES PRÉCIPITATIONS ET LES DÉBITS PAR LA METHODE DE SEGMENTATION :

Les résultats de la procédure de segmentation appliquée aux séries de précipitations et des débits correspondant au bassin versant de Oued Chouly sont présentés dans le tableau ci-dessous.

La procédure de segmentation initiée par Hubert (Hubert et al, 1989 ; Hubert, 2000) à travers le logiciel Khronostat (<http://www.hydrosciences.org/spip.php?article1000>) donne plusieurs possibilités de rupture dans les séries chronologiques. Les séquences proposées sont parfois très courtes dans le temps mais très importantes ou très faibles au point de faire croître ou chuter considérablement la moyenne. Il importe donc à l'utilisateur de choisir l'une des propositions du logiciel qui serait la plus représentative du phénomène. En effet, ces cassures peuvent être considérées comme des ruptures instantanées. Elles peuvent apparaître plusieurs fois dans une même série sans que cela signifie une rupture définitive (Perreault et al., 1999 ; Hubert et al., 2005).

### VI.1. Echelle annuelle :

La première rupture, où l'on passe d'une période humide à une période sèche, s'est déroulée au cours de l'année 1975-76 aussi bien pour les précipitations que pour les débits. Le déficit pluviométrique est estimé à 33% pour les pluies alors qu'il atteint 70% pour les débits. La seconde rupture de passage de séquences sèche à humide est localisée en 2007-08 pour les précipitations avec un retard de quatre années pour les débits (2011-12). Ce retard se justifie

par l'état des nappes plus ou moins vides à cause du manque de pluie et des pompages d'eau par forages. Il faut noter que nos séries de mesure s'étalent jusqu'en 2013-14.

Une séquence de trois années, relative aux débits est à considérer avec prudence. Cette durée courte peut constituer une fausse séquence humide. Il serait intéressant d'attendre quelques années supplémentaires pour confirmer ou non cette séquence humide. Il faut noter aussi que les taux d'accroissement sont plus importants que les déficits aussi bien pour les pluies que pour les écoulements.

### VI.2. Echelle saisonnière :

L'année 1975-76 se confirme pour les précipitations au printemps avec un déficit important de 54%. Par contre la saison d'automne gagne 63% de plus de pluie à partir de 1998-99. Les saisons d'hiver et d'été n'enregistrent pas de ruptures. Pour les débits, c'est le même scénario au printemps où le déficit est plus important que celui des pluies (81%). On retrouve un accroissement important à partir de 2011-12 (713%). Un autre accroissement en hiver (210%) à partir de 2007-08 et un déficit en été (81%) depuis 1974-75.

### VI.3. Echelle mensuelle :

Mensuellement, il faut souligner que la baisse des précipitations s'est faite depuis le milieu des années 1970 principalement en mars et avril. Les accroissements de pluie, par contre n'ont commencé qu'à la fin des années 1990 principalement en septembre et octobre. Les autres ruptures enregistrées pour les mois de novembre, décembre et juin ne semblent pas très significatifs vu les séquences trop courtes. Pour les débits, les ruptures les plus significatives sont celles relatives aux mois de mars à juin qui semblent être la conséquence de la baisse des pluies en mars et avril. Les autres ruptures tardives sont moins sûres quoiqu'on enregistre un accroissement très important en novembre à partir de 2011-12.

Tableau 10. Résultats de la méthode de segmentation appliquée aux précipitations et aux débits aux échelles annuelle, saisonnière et mensuelle

Précipitations					Débits						
Echelle	Date de rupture	Moy avant rupture	Moy après rupture	Déficit ou accroissement	Echelle	Date de rupture	Moy avant rupture	Moy après rupture	Déficit ou accroissement		
Annuelle	1975-76	584,9	389,0	-0,33	Annuelle	1975-76	0,677	0,206	-0,70		
	2007-08	389,0	566,1	0,46		2011-12	0,206	0,750	2,64		
Saisonn nière	A	1998-99	90,1	147,0	0,63	Saisonn nière	A	2011-12	0,0738	0,600	7,13
	H	-	163,5	0	H		2007-08	0,339	1,050	2,10	
	P	1975-76	274,6	125,2	-0,54		P	1974-75	1,960	0,382	-0,81
	E	-	20,1	0	E		1981-82	0,141	0,021	-0,85	
Mensuelle	Sep	1993-94	15,0	28,6	0,90	Mensuelle	Sep	1979-80	0,120	0,011	-0,91
	Oct	1999-00	27,8	49,8	0,79		Oct	1980-81	0,136	0,045	-0,67
	Nov	2011-12	52,6	141,0	1,68		Nov	2011-12	0,102	1,700	15,67
	Dec	2012-13	48,0	172,8	2,60		Dec	2007-08	0,152	0,583	2,84
	Jan	-	57,0	0	Jan		2007-08	0,281	1,100	2,91	
	Fev	-	58,7	0	Fev		2011-12	0,595	2,650	3,45	
	Mars	1974-75	148,2	53,1	-0,64		Mars	1973-74	3,300	0,725	-0,78
	Avr	1975-76	89,6	39,8	-0,55		Avr	1974-75	1,900	0,241	-0,87
	Mai	-	36,1	0	Mai		1975-76	1,233	0,126	-0,90	
	Juin	2012-13	8,8	35,8	3,08		Juin	1975-76	0,317	0,047	-0,85
	Juil	-	5,9	0	Juil		1980-81	0,127	0,030	-0,76	
	Août	-	7,8	0	Août		1978-79	0,100	0,006	-0,94	

## VII. RUPTURES DANS LES COEFFICIENTS D'ÉCOULEMENT PAR LES METHODES DES CUMULS ET LA SEGMENTATION :

La méthode des cumuls permet d'estimer graphiquement les dates de rupture dans les séries chronologiques. Afin d'appuyer les résultats de cette méthode, on a soumis les valeurs des coefficients d'écoulements aux échelles annuelle, saisonnière et mensuelle à la procédure de segmentation.

### VII.1. Echelle annuelle :

Les résultats des méthodes des cumuls et de segmentation, appliquées aux coefficients d'écoulement annuels sont présentés dans la figure 20 et le tableau 11. La cassure principale se situe en 1980-81 pour les deux procédures. Il est à noter que cette date est différente que celle des précipitations et des débits. Le déficit enregistré est estimé à 58%. A partir de 2006-07, les cumuls ne présentent plus de continuité parfaite (figure 20), mais la durée est jugée faible pour pouvoir annoncer une nouvelle séquence.

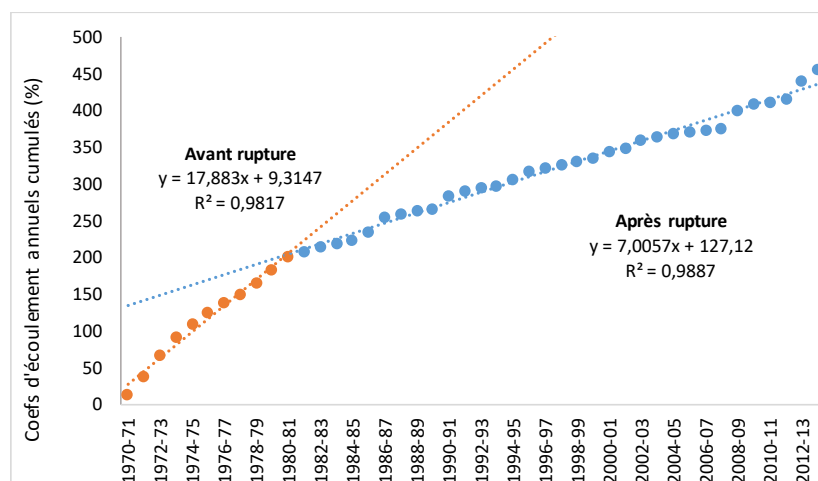


Figure 20. Rupture dans les coefficients d'écoulement annuels par la méthode des cumuls.

### VII.2. Echelle saisonnière :

Pour les quatre saisons, à part l'automne où la rupture est claire (figure 21) enregistrée à la même année qu'à l'échelle annuelle (1980-81), les autres saisons sont plutôt complexes. Pour ces saisons les résultats des cumuls et de la segmentation sont différents.

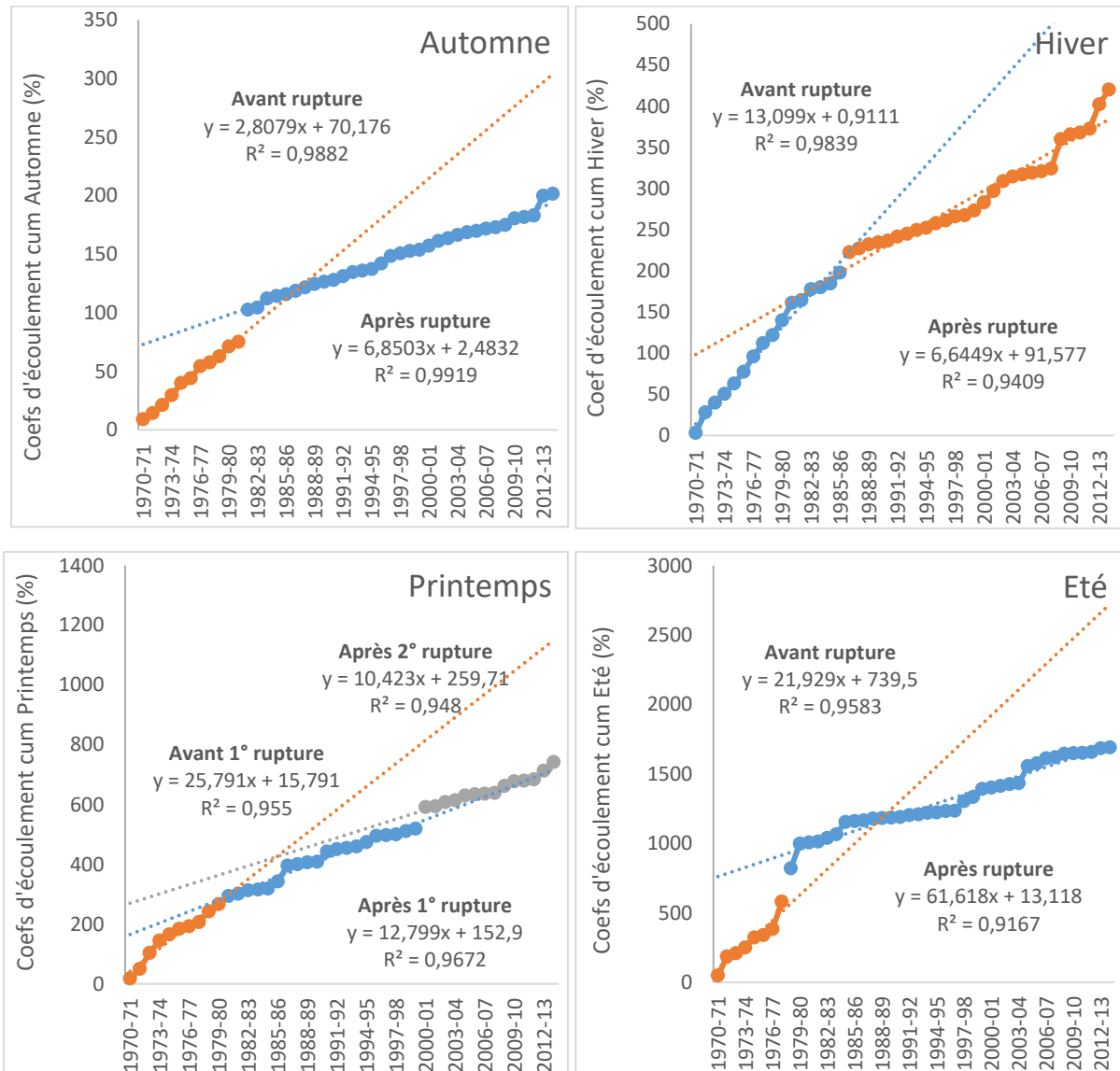


Figure 21. Rupture dans les coefficients d'écoulement saisonniers par la méthode des cumuls

### VII.3. Echelle mensuelle :

A l'échelle mensuelle, les dates de rupture sont désordonnées. Tout d'abord, la méthode des cumuls montre que les points, pour la majorité des mois, ne présentent pas de continuité parfaite ou encore présentent des cassures brusques. De même, la procédure de segmentation ne donne pas les mêmes résultats que la méthode des cumuls (figure 22 et tableau 11). Si l'on peut tirer une conclusion globale, c'est que le système qui gère le bassin versant de Oued Chouly est complexe.



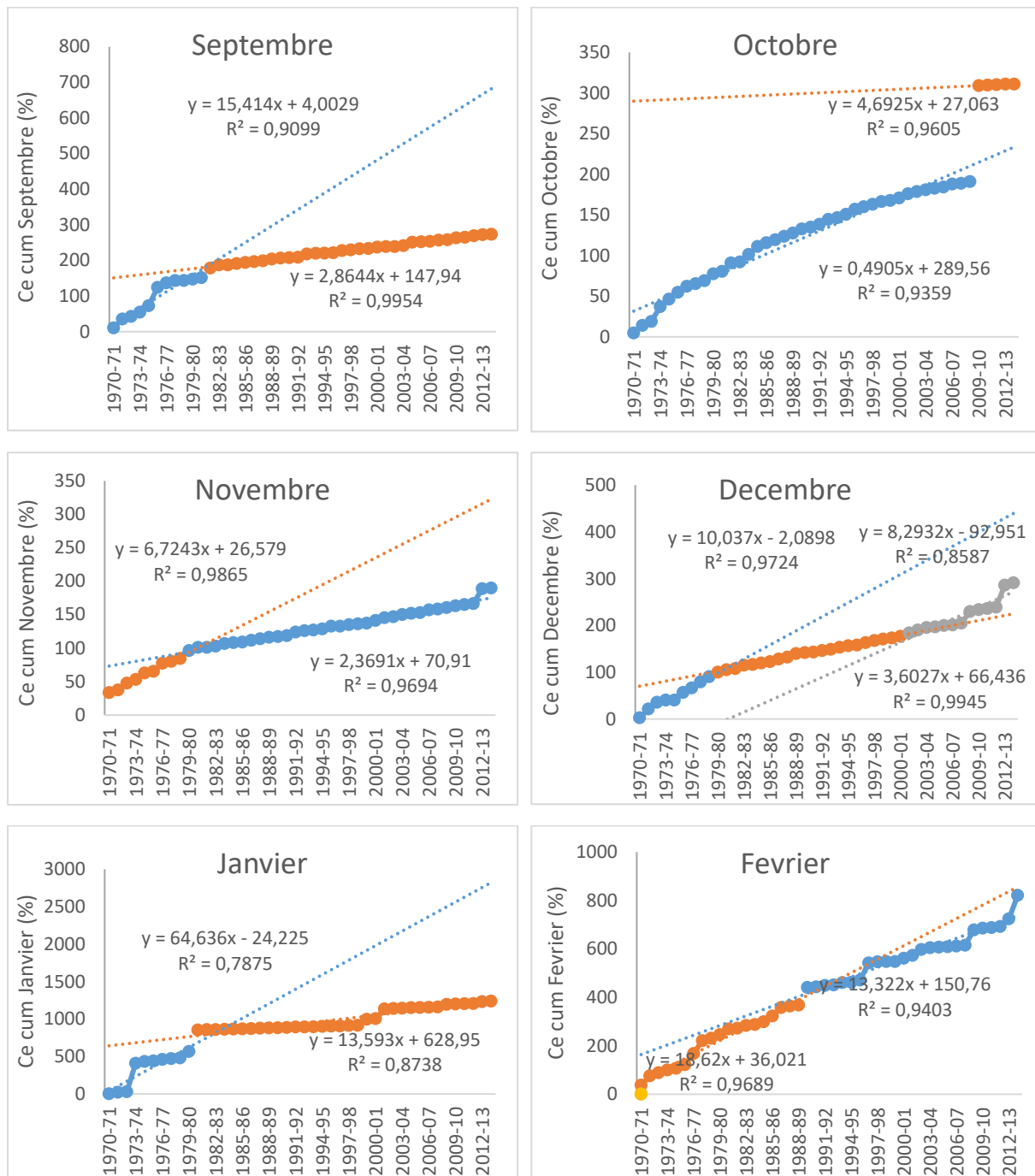


Figure 22a. Rupture dans les coefficients d'écoulement mensuels par la méthode des cumuls (septembre à février)

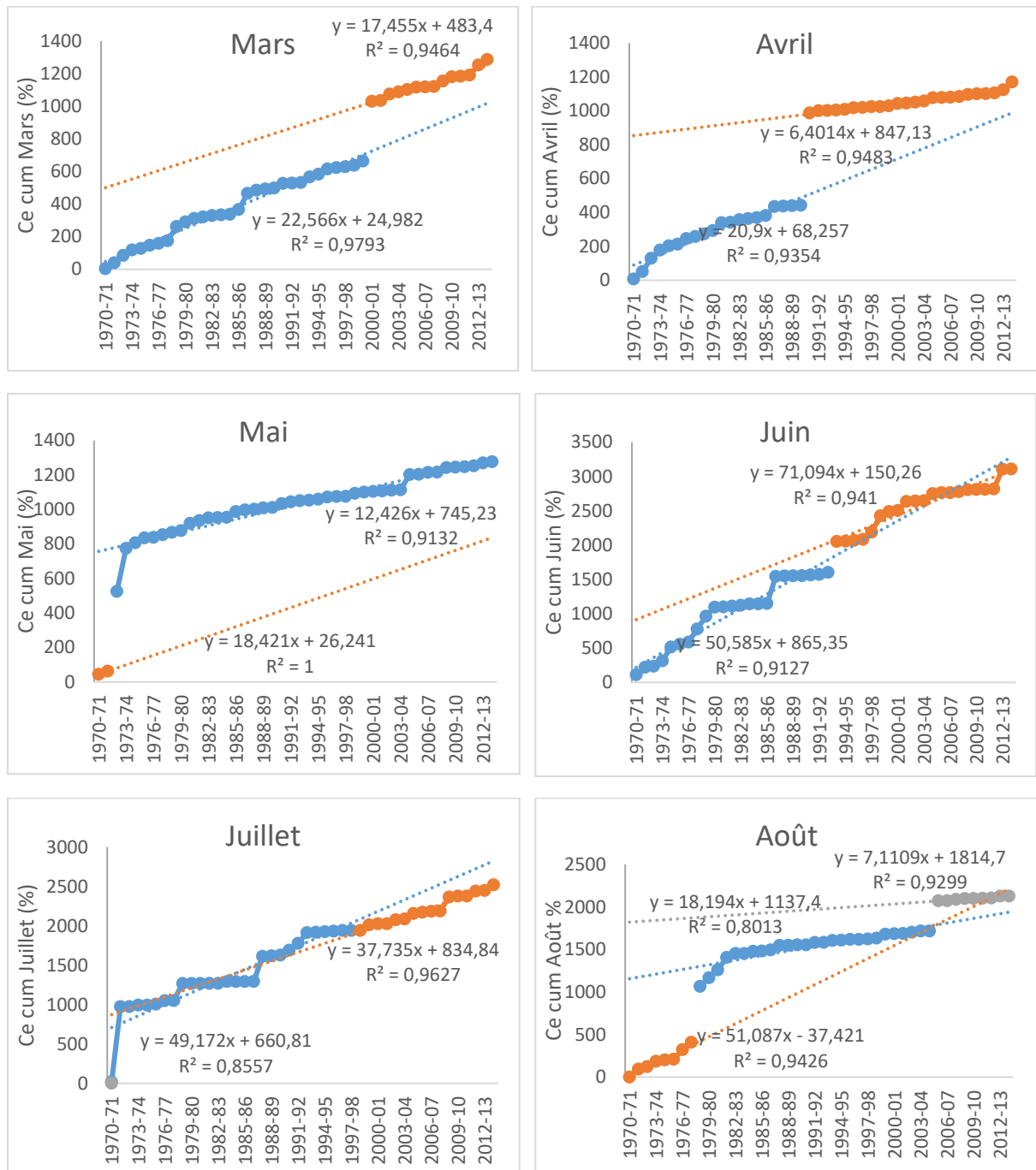


Figure 22b. Rupture dans les coefficients d'écoulement mensuels par la méthode des cumulés (mars à décembre)

Tableau 11. Résultats des méthodes des cumuls et de segmentation appliquées aux coefficients d'écoulement aux échelles annuelle, saisonnière et mensuelle

Méthode des cumuls (Coefficients d'écoulement)					Segmentation (Coefficients d'écoulement)						
Echelle	Date de rupture	Moy avant rupture	Moy après rupture	Déficit ou accroissement	Echelle	Date de rupture	Moy avant rupture	Moy après rupture	Déficit ou accroissement		
Annuelle	1980-81	18,3	7,7	-0,58	Annuelle	1980-81	18,3	7,7	-0,58		
Saisonnière	A	1980-81	6,8	3,8	-0,44	Saisonnière	A	1980-81	6,8	3,8	-0,44
	H	1985-86	12,4	7,9	-0,36		H	-	9,5	-	-
	P	1979-80	26,7	12,6	-0,53		P	1973-74	36,3	14,9	-0,59
		1999-00	12,6	15,9	0,12		E	1979-80	99,9	20,4	-0,80
	E	1977-78	72,6	30,8	-0,58		Mensuelle	Sep	1976-77	19,5	4,0
Mensuelle	Sep	1980-81	15,1	3,9	-0,74	Oct		2008-09	4,9	30,0	5,10
	Oct	2008-09	4,9	24,4	3,99	Nov		1970-71	33,5	3,8	-0,89
	Nov	1978-79	9,4	3,2	-0,66	Dec		2010-11	5,8	26,1	3,48
	Dec	1978-79	11,3	26,2	1,32	Jan		-	29,5	-	-
		2000-01	26,2	18	-0,31	Fev		2011-12	17,2	97,1	4,64
	Jan	1979-80	24,6	21	-0,15	Mar		-	29,2	-	-
	Fev	1988-89	25,9	18,9	-0,27	Avr		-	27,2	-	-
	Mar	1999-00	22,1	44,5	1,01	Mai		1973-74	193,6	12,6	-0,94
	Avr	1989-90	22,1	31,7	0,43	Juin		-	74,0	-	-
	Mai	1971-72	31,5	28,9	-0,08	Juil		1971-72	486,9	51,5	-0,89
	Juin	1992-93	72,8	75,3	0,04	Août		-	54,5	-	-
	Juil	1997-98	102,2	44,4	-0,57						
	Août	1977-78	58,4	52,3	-0,10						
		2004-05	52,3	58,7	0,12						

### VIII. CONCENTRATIONS DES PRECIPITATIONS (PCI) ET DES LAMES D'EAU ECOULEES (RCI) :

Les concentrations des précipitations et des lames d'eau écoulées calculées aux échelles annuelle et saisonnières sont représentées dans les figures 24 et 25.

#### VIII.1. Echelle annuelle :

La concentration annuelle à base de précipitations mensuelles durant les 44 années d'étude varie de 11,8 à 25,2 avec une moyenne interannuelle de 17. 2010-11 est l'année où l'on a enregistré la pluie la mieux répartie dans l'année par contre, 1990-91 est l'année où la pluie a été la plus concentrée (45% des précipitations annuelles ont été enregistrées en mars). Pendant 30% des années, la pluie est saisonnière. Elle est irrégulière pendant 52% des années et fortement irrégulière pendant 18% de la période d'étude.

L'irrégularité des lames d'eau écoulées est beaucoup plus prononcée que celle des précipitations. En effet, on a enregistré des valeurs très fortes du RCI. En 1994-95, il vaut 68,5. Au cours de cette année 82% du ruissellement annuel s'est écoulé en mars. 2007-08 est l'année où l'écoulement est le plus régulier (RCI=8,5). Sur les 44 années d'étude, 7% des années ont connu un écoulement régulier, 27% un écoulement saisonnier, 18% un écoulement irrégulier et 48% un écoulement très irrégulier (figure 23).

Il est à noter qu'un certain degré de régularité des lames d'eau écoulées ne correspond pas au même degré précipitations et vice-versa. En effet, les écoulements de surface ne dépendent pas

uniquement des précipitations mais d'autres paramètres tels que la nature du sol, son degré de saturation, l'existence ou non de végétation ainsi que de l'évaporation.

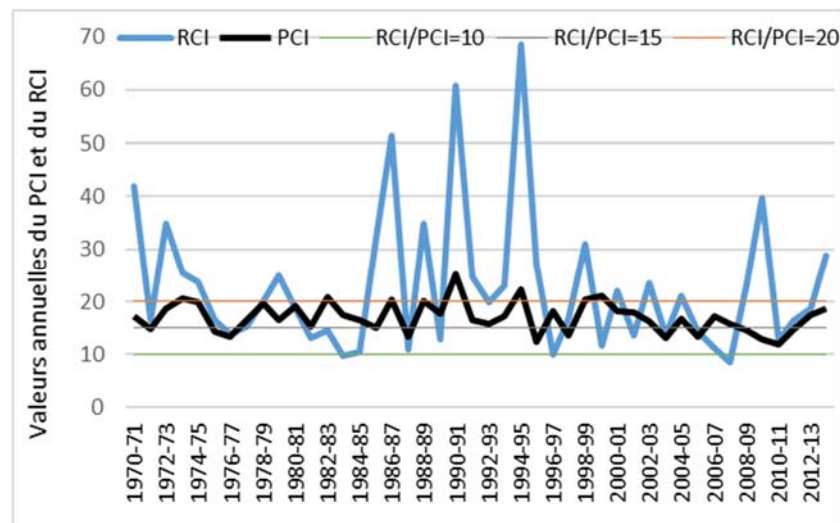


Figure 23. Concentrations annuelles des précipitations (PCI) et des lames d'eau écoulées (RCI)

### VIII.2. Echelle saisonnière :

En réduisant la période de calcul de 12 à 3 mois, les écarts entre les valeurs diminuent d'où des concentrations moins prononcées (figure 24). On remarque aussi contrairement à l'échelle annuelle que les concentrations des précipitations sont généralement plus élevées que celles des lames d'eau écoulées principalement pendant la saison estivale. Au cours de cette période, les débits dans les cours d'eau sont généralement des étiages provenant de la vidange des nappes alors que les précipitations sont issues d'orages brefs, localisés et souvent intenses.

Les résultats des quatre saisons montrent que dans une même saison, la répartition des précipitations change parfois considérablement d'une année à une autre. D'une saison à répartition uniforme, on passe parfois à une saison très irrégulière l'année de suite et vice-versa. Cette forte variabilité surtout des pluies est une caractéristique de l'ensemble du bassin Méditerranéen, le sud en particulier (Bakreti et al., 2013).

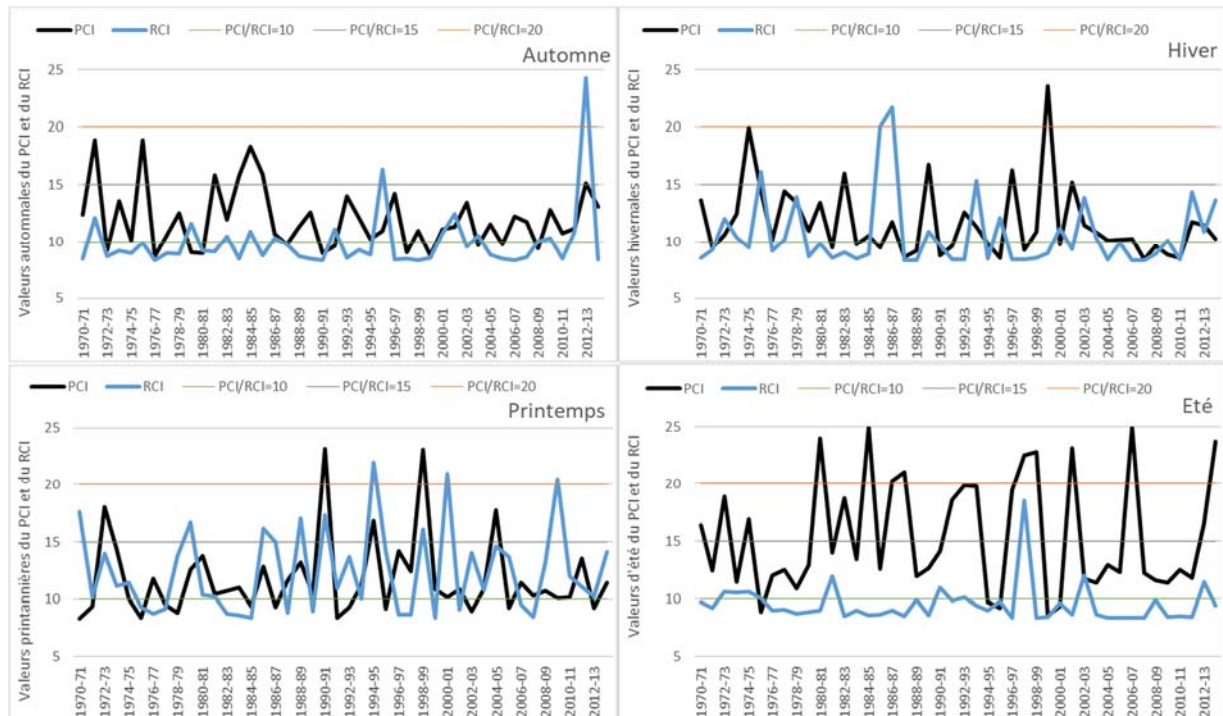


Figure 24. Concentrations saisonnières des précipitations (PCI) et des lames d'eau écoulées (RCI)

## IX. DEGRES ET PERIODES DE CONCENTRATION DES PRECIPITATIONS ET DES LAMES D'EAU ECOULEES :

Les valeurs annuelles du PCD (Precipitation Concentration Degree) varient de 0,02 à 0,60 avec une moyenne de 0,27. Ceci indique qu'en moyenne, la saison des pluies est très courte dépassant légèrement le quart du temps annuel. Pendant trois années seulement (1983, 1987 et 2001), le PCD est supérieur à 0,50 (figures 25 et 26). Pour les lames d'eau écoulées, les valeurs du RCD (Runoff Concentration Degree) sont légèrement supérieures. Elles varient de 0,07 à 0,80 avec une moyenne de 0,37. Ceci veut dire que pendant près de 63% du temps annuel, le réseau hydrographique du bassin versant de Oued Chouly est à sec. Les pluies et les débits se concentrent généralement entre octobre et avril. La fréquence d'occurrence des fortes pluies accompagnées d'inondation se localise au mois de novembre de l'année (figures 25 et 26). Au cours de la période entre le mois de mai jusqu'au mois de septembre, les pluies et les débits sont généralement faibles.

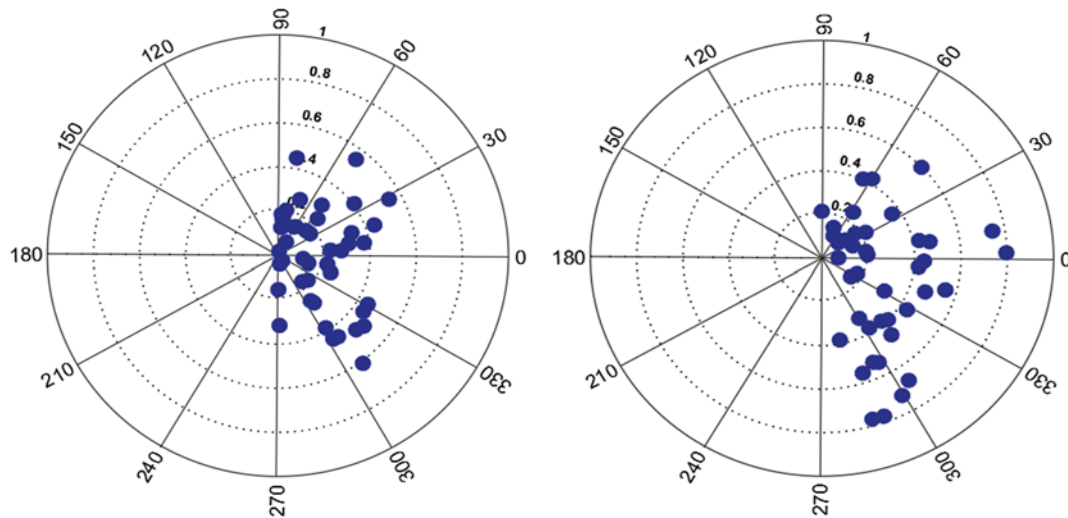


Figure 25. Représentation graphique PCD/PCP pour les précipitations (à gauche) et RCD/RCP pour les lames d'eau écoulées (à droite)

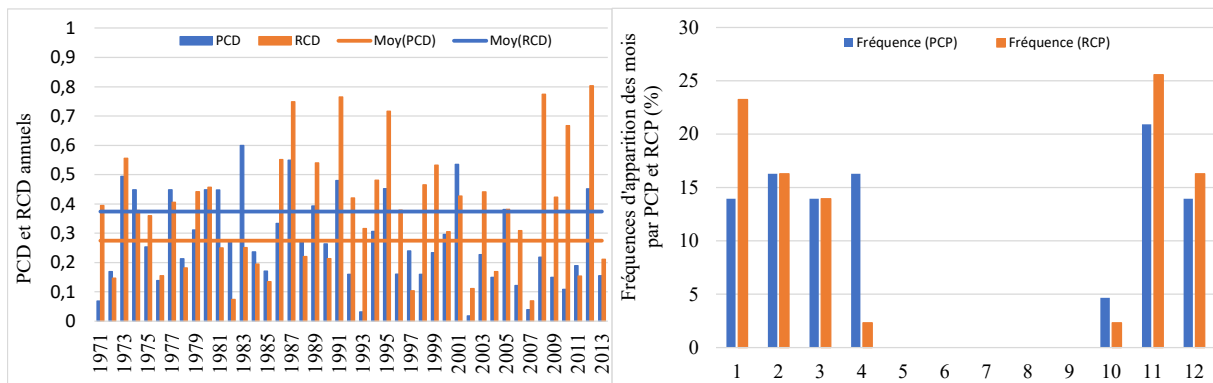


Figure 26. PCD et RCD annuels (à gauche) et fréquences PCP et RCP (à droite)

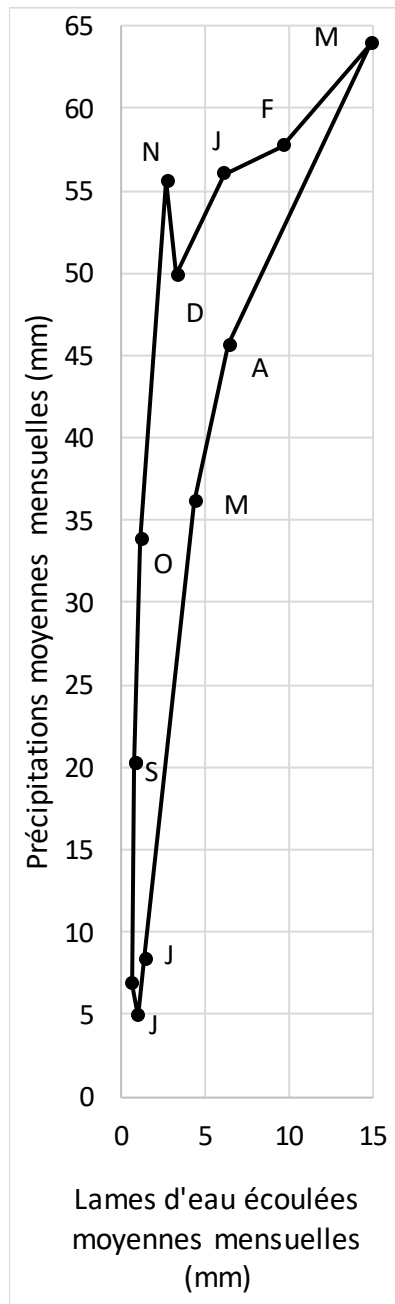
### X. POLYGONE PLUIE-DEBIT MENSUELS ET COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT MOYENS :

La forme du polygone mettant en relief la variation simultanée des précipitations et des lames d'eau moyennes mensuelles relatives à la période d'étude (figure 26) ainsi que les valeurs moyennes mensuelles des coefficients d'écoulement (tableau 12), on peut tirer les conclusions suivantes :

Tableau 12. Valeurs des coefficients d'écoulement moyens mensuels et annuel (%).

S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Annuel
4,0	3,5	4,9	6,7	11,0	16,7	23,3	14,1	12,1	16,9	20,1	9,7	11,9

- Les coefficients d'écoulement moyens mensuels sont faibles variant de 3,5 à 20,1% et une moyenne annuelle de 11,9%. Ces valeurs indiquent que le bassin versant est très peu urbanisé. La proportion des eaux de pluies destinée à l'infiltration et l'évaporation est beaucoup plus importante que le ruissellement.



- L'examen visuel du polygone permet de constater que ce dernier est raide et étroit. L'étroitesse du polygone implique que la réponse du bassin versant aux précipitations est presque la même chaque mois sans variation significative.
- Les côtés du polygone pour les quantités de précipitations d'avril à juillet et de juillet à novembre sont presque verticaux, ce qui signifie que toute précipitation au cours de ces mois n'entraîne qu'un ruissellement négligeable, mais une évaporation importante et dans une moindre mesure, la recharge des eaux souterraines durant les mois de la saison estivale et vis-versa durant ceux de la saison humide.
- Durant la période entre décembre et mars, un changement de pente s'opère où elle devient relativement plus douce d'où une contribution de plus en plus au ruissellement. Au cours de ce mois, les précipitations ainsi que les écoulements enregistrent leurs valeurs maximales. Le mois de mars constitue un tournant pour les deux paramètres. On assiste alors une baisse simultanée des précipitations et du ruissellement. Il faut noter la cassure observée entre novembre et décembre montrant que la réponse hydrologique est plus importante en décembre qu'en novembre.
- Entre janvier et février, on assiste à la réponse hydrologique la plus rapide aux précipitations car entre ces deux mois, le côté du polygone a la pente la plus faible.
- De mars à avril, on assiste à une diminution importante du taux d'écoulement. On peut alors conclure qu'à partir de la fin mars, la couverture végétale consomme une bonne partie des pluies tombées.

Figure 27. Polygone précipitations-lames d'eau moyennes mensuelles à Oued Chouly.

## XI. ELASTICITE PLUVIOMETRIQUE DU DEBIT :

Les valeurs annuelles de l'estimateur non paramétrique consignées dans la figure 28 n'ont pas de signification physique. La figure 28 montre juste la variation de ces valeurs annuelles d'une année à une autre. Le seul paramètre important dans cette procédure est l'estimateur  $\varepsilon_p$  appelé : paramètre d'élasticité des précipitations vis-à-vis du débit dans un bassin versant. Pour Oued Chouly entre 1970-71 et 2013-14, il vaut 2,62. Cette valeur indique que lorsque l'on enregistre un changement de pluviométrie de l'ordre de 1%, les débits subissent un changement de 2,62%. Cette valeur montre la dépendance importante des débits aux précipitations. Des valeurs élevées est une caractéristique des bassins relativement arides.

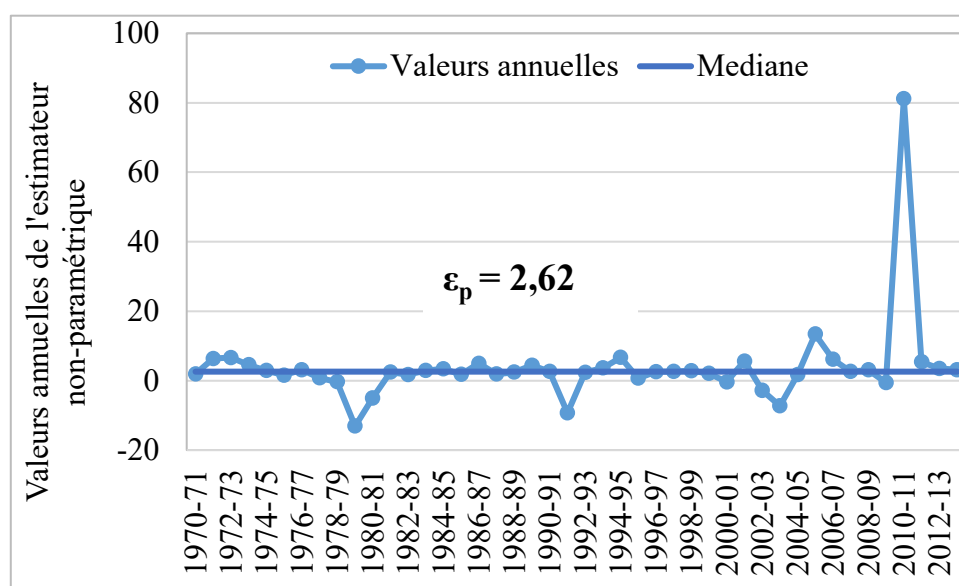


Figure 28. Valeurs annuelles de l'estimateur non paramétrique et valeur de l'estimateur de d'élasticité des précipitations aux écoulements superficiels



## Discussion et conclusion

Au terme de ce travail où l'on s'est intéressé à l'étude simultanée des précipitations et des écoulements superficiels dans le bassin versant de Oued Chouly entre 1970-71 et 2013-14, plusieurs méthodes et procédures permettant d'apprécier la variabilité et la tendance temporelles des deux paramètres ont été utilisées. Il est vrai que plusieurs autres méthodes n'ont pas été traitées dans ce travail. Néanmoins, on a essayé d'aborder les procédures les plus répandues dans la littérature et les plus significatives quant à l'objectif du mémoire. Un autre problème concerne les données puisque l'on a disposé juste de séries de précipitations (dont certaines au pas mensuel) et de débits. La disponibilité d'autres paramètres climatiques tels que les températures, l'évaporation et les caractéristiques des sols aurait permis d'arriver à des résultats plus descriptifs du phénomène. De même, la disponibilité de données journalières ou instantanées aurait permis de mieux apprécier l'évolution temporelle des deux paramètres hydro-climatiques.

La première caractéristique des deux paramètres concerne la variabilité temporelle. En effet, la variabilité forte est une caractéristique du bassin Méditerranéen (Apaydin et al., 2006 ; De Luis et al., 2010 ; Bakreti et al., 2013). Cette variabilité est traduite par :

1. Le coefficient de variation pour lequel les valeurs enregistrées sont relativement fortes (Hare, 2003). Elles sont en moyenne respectivement de 30%, 58% et 59% pour les précipitations aux échelles annuelles, saisonnières et mensuelles. Elles sont de 96%, 83% et 99% aux mêmes échelles temporelles pour les débits.
2. Les coefficients d'asymétrie positifs montrent que la majeure partie des valeurs des deux paramètres sont inférieures aux moyennes interannuelles surtout à l'échelle annuelle. Pour les autres échelles de temps, les valeurs ne sont pas très significatives puisqu'elles représentent des valeurs moyennes.
3. Les écarts entre les valeurs maximales et minimales quoiqu'ils ne soient pas très significatifs sont relativement forts. Ces écarts dépassent les 300% dans le meilleur des cas.
4. Quoique les valeurs déficitaires sont plus importantes que les valeurs excédentaires pour les précipitations que pour les débits, il demeure que ces valeurs sont proches de la normale. Ceci a été confirmé par les valeurs de l'indice de variabilité puisque la majeure partie des valeurs est comprise entre -1 et +1.

La seconde caractéristique des deux paramètres concerne la tendance temporelle. Celle-ci a été testée par plusieurs procédures :

1. La variation temporelle des coefficients d'écoulement montre qu'à toutes les échelles temporelles, ces coefficients ont une tendance négative.
2. La méthode de Man-Kendall ainsi que la pente de Şen permettent de tirer certaines constatations intéressantes :
  - La tendance à la baisse est plus importante pour les précipitations que pour les débits.
  - Les précipitations subissent la baisse principalement durant la saison humide (hiver et printemps) par contre durant la période estivale, elles sont en hausse. Cette hausse est importante en automne principalement au mois d'octobre.

- Les débits sont en baisse le long de l'année hydrologique mais les déficits sont légers. La plus forte baisse est occasionnée au printemps principalement en mars et avril.
- De ce qui précède, on peut constater que la saison de printemps subit un déficit pluviométrique important conjugué à une baisse des écoulements dans le cours d'eau.

La troisième procédure adoptée pour tester l'évolution chronologique des paramètres est la recherche de cassures (ruptures) dans les séries. Celle-ci a été réalisée au moyen de la segmentation de Hubert testée pour les précipitations et les débits et par la méthode des cumuls appuyée par la segmentation pour les coefficients d'écoulement. Les résultats obtenus sont significatifs :

1. La confirmation d'une date très importante pour le début de la tendance baissière dans le régime pluviométrique. Le milieu des années 1970 (Ghenim et al., 2010 ; Bakreti et al., 2013 ; Achite et Ouillon, 2016). Cette même date est trouvée pour l'échelle annuelle, au printemps pour l'échelle saisonnière et en mars et avril pour l'échelle mensuelle. Ceci confirme les résultats précédents notamment le test de Mann-Kendall.
2. L'absence de rupture en hiver malgré sa tendance baissière d'où l'on peut déduire que les valeurs moyennes n'ont pas été très affectées.
3. En automne, on enregistre un taux d'accroissement important depuis la fin des années 1990 principalement en septembre et octobre.
4. Pour les débits, à part les ruptures enregistrées au milieu des années 1970, le reste des ruptures est très désordonné ne reflétant pas fidèlement le comportement du bassin car les séquences sont trop courtes (Perreault et al., 1999 ; Ghenim et Megnounif, 2013).
5. En faisant le rapport entre les précipitations et les lames d'eau écoulées, la date de rupture change principalement à l'échelle annuelle. Elle se situe au début des années 1980.
6. Les dates de rupture détectées au moyen de la méthode des cumuls ne coïncident pas avec celles données par la segmentation.
7. Quoique la tendance globale est à la baisse, on enregistre un fort taux d'accroissement des débits au mois d'octobre à partir de 2008-09.

La quatrième procédure adoptée pour apprécier la répartition temporelle des précipitations et des lames d'eau écoulées au cours de l'année hydrologique a été réalisée au moyen de l'estimation des concentrations des deux paramètres. Pour cela, on a utilisé le PCI/RCI et les PCD-PCP/RCD-RCP :

1. Les résultats des PCI/RCI obtenus montrent que les précipitations ont un régime irrégulier alors que les écoulements sont très irréguliers. A l'échelle de saisons, cette irrégularité diminue peut-être parce que l'échelle de temps est plus courte.
2. Les résultats PCD-PCP/RCD-RCP indiquent que l'irrégularité des précipitations vient principalement du caractère très court de la saison des pluies. Les écoulements quant à eux n'occupent que 37% du temps annuel et ainsi montrent leur dépendance vis-à-vis

des précipitations. Les mois où la concentration est forte sont avril et surtout novembre. C'est pendant ce mois qu'on enregistre les crues les plus dévastatrices. L'autre résultat important est que pendant six mois de l'année, les pluies et les ruissellements ont une répartition plutôt homogène car les volumes sont faibles.

Pour les deux procédures PCI/RCI et les PCD/RCD, les résultats montrent que les degrés de concentration sont plus élevés pour les débits que pour les pluies.

Dans la cinquième procédure proposée pour apprécier la dépendance des débits aux précipitations, on a utilisé le polygone pluie-débit mensuels et la notion d'élasticité pluviométrique du débit. Les résultats obtenus montrent :

1. Les coefficients d'écoulement moyens mensuels sont inférieurs à 12%, caractéristique d'un bassin très peu urbanisé. La proportion des eaux de pluies destinée à l'infiltration et l'évaporation est beaucoup plus importante que le ruissellement.
2. La réponse du bassin versant aux précipitations est presque constante le long de l'année hydrologique montrant encore une fois la dépendance des débits aux pluies.
3. Cette dépendance accrue des débits aux pluies et à l'influence des fluctuations de précipitations sur les écoulements est traduite par la valeur du paramètre d'élasticité. La valeur forte calculée caractérise les bassins à climat semi-aride et aride à écoulement temporaire. La valeur forte obtenue montre que les débits annuels observés utilisés pour calculer  $\varepsilon_p$  reflètent les impacts des facteurs naturels et des activités anthropiques. En effet, ce type de bassins versants sont fortement réglementés par des processus tels que les détournements d'eau ou les barrages de contrôle. Par conséquent,  $\varepsilon_p$  calculé en utilisant la méthode non paramétrique reflète les effets combinés des facteurs climatiques anthropiques (Zhou et al., 2015).

En conclusion, on estime que l'étude de la variabilité, de la tendance et de la dépendance des deux paramètres les plus importants du bilan hydrologique qui sont les précipitations et les débits dans le réseau hydrographique est une tâche des plus intéressantes pour mieux connaître le fonctionnement des bassins versants. Les résultats obtenus peuvent être exploités par les gestionnaires de ces entités productrices d'eau superficielle. Le caractère très irrégulier, la tendance négative et les cassures dans les séries ne sont pas nouveaux mais plutôt connus et démontrés par des études antérieures. D'autres procédures et méthodes pas très répandues ont permis de mieux caractériser le système. Enfin ce travail aurait pu être plus descriptif du phénomène si plus de données avaient été disponibles.

### Recommandations

Le travail effectué dans le cadre d'un mémoire de Master concerne un petit sous bassin de la Tafna. En prenant en considération des données fournies par l'A.N.R.H, on est conscient que ces données ne reflètent pas la réalité à 100% surtout pour les débits. En effet, les agriculteurs à travers diverses sections des cours d'eau de la Tafna ont installé des pompes ou des fosses pour s'approvisionner en eau d'irrigation en périodes de hautes eaux principalement. Ainsi, les débits mesurés au niveau de la station hydrométrique ne prennent pas en considération ces volumes d'eau. Pour cela, on recommande que des sujets de fin d'étude soient orientés vers des enquêtes de terrain pour évaluer les volumes des eaux pompées du réseau hydrographique pour pouvoir les intégrer dans les calculs.

D'un autre côté, on recommande que ce type d'étude soit généralisé à l'ensemble des sous bassins de la Tafna afin de mieux connaître et caractériser le bassin versant.

Enfin, devant les contraintes liées aux données hydroclimatiques rencontrées lors de l'accomplissement de ce mémoire de fin d'étude, on invite notre département d'hydraulique à contracter des accords avec l'A.N.R.H afin que les étudiants puissent disposer de l'information requise à leurs travaux.

**Références bibliographiques**

- Achite M., Ouillon S. (2016): Recent changes in climate, hydrology and sediment load in the Wadi Abd, Algeria (1970–2010), *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 1355–1372.
- Apaydin H., Erpul G., Bayramin I., Gabriels D. (2006): Evaluation of indices for characterizing the distribution and of precipitation: A case for the region of Southeastern Anatolia Project, Turkey. *Journal of Hydrology*, 328, 726–732.
- Bakreti A., Braud I., Leblois E., Benali A. (2013) : Analyse conjointe des régimes pluviométriques et hydrologiques dans le bassin de la Tafna (Algérie Occidentale), *Hydrological Sciences Journal*, 58, 1, 133–151.
- Bernier J. (1977). Etude de la stationnarité des séries hydrométéorologiques, *LA Houille Blanche/ N° 4-1977*.
- Bouanani A. (2004) : Hydrologie, transport solide et modélisation, étude de quelques sous bassins de la tafna (NW – Algérie), Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 250 pages.
- Carbonnel J.P., Hubert P. (1994) : Etude statistique de quelques séries pluviométriques bulgares et roumaines ; incidences sur l'évolution climatique récente. *Romanian Journal of Hydrology and Water Resources*, 1, 107-13.
- Cervigni R., Morris M. (2016): *Confronting Drought in Africa's Drylands: Opportunities for Enhancing Resilience*, World Bank Publications.
- Chen J., Wu X., Finlayson B.L., Webber M., Wei T., Li M., Chen Z. (2014): Variability and trend in the hydrology of the Yangtze River, China: Annual precipitation and runoff, *Journal of Hydrology*, 513, 403–412.
- Clover J. (2003): Food security in sub-saharan Africa: feature, *African security review*, 12, 5-15.
- Cosgrove W.J., Loucks D.P. (2015): Water management: Current and future challenges and research directions, *Water Resources Research*, 51, 4823-4839, 10.1002/2014wr016869.
- Dahmani A., Meddi M. (2011): Impact of rainfall deficiency on water resources in the plain Ghriss Wilaya of Mascara (West of Algeria), *American Journal of Scientific and Industrial Research*, 2, 5, 755–760.
- De Luis M., González-Hidalgo J.C., Longares L.A. (2010): Is rainfall erosivity increasing in the Mediterranean Iberian Peninsula, *Land Degradation & Development* 21, 2, 139–144. DOI: 10.1002/ldr.918.
- Djellouli F. (2017) : Persistance de la variabilité climatique et occurrence de la sécheresse : La modélisation « Pluie-Débit » outil d'identification. Application à un bassin versant d'oued El Hammam (Nord-ouest algérien), Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 189 pages.
- Dwarakish G.S., Ganasri B.P. (2015): Impact of land use change on hydrological systems: A review of current modeling approaches, *Cogent Geoscience*, 1:1, 1-18, 1115691, DOI: 10.1080/23312041.2015.1115691.
- Elagib N.A. (2011): Changing rainfall, seasonality and erosivity in the hyperarid zone of Suda., *Land Degradation & Development*, 22, 505–512. DOI: 10.1002/ldr.1023
- Francis H., Chiew S. (2006) Estimation of rainfall elasticity of streamflow in Australia, *Hydrological Sciences Journal*, 51:4, 613-625.
- Ghenim A.N., Megnounif A. (2013) : Ampleur de la sécheresse dans le bassin d'alimentation du barrage Meffrouche (Nord-Ouest de l'Algérie), *Géographie Physique et Environnement (Physio-Géo)*, 7, 35–49.
- Gherissi R. (2012) : Hydrologie et modélisation pluie-débit : Cas du bassin versant de l'oued Lakhdar (ex : Chouly) Tafna-NW Algérien, Mémoire de magister, Université de Tlemcen, 156 pages.

- Gocic M., Trajkovic S. (2014): Spatiotemporal characteristics of drought in Serbia, *Journal of Hydrology*, 510,110–123
- Hare W (2003) Assessment of Knowledge on Impacts of Climate Change, Contribution to the Specification of Art, 2 of the UNFCCC, WBGU
- Hubert P., Carbonnel J.P., Chaouche A. (1989) : Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l’Afrique de l’Ouest. *Journal of Hydrology*, 110, 349-67.
- Hubert P. (2015): Segmentation des séries de débits moyens annuels de grands fleuves africains, International Conference on African Large River Basins Hydrology Hammamet, Tunisia, October 26-30th 2015.
- Hubert P. (2000): The segmentation procedure as a tool for discrete modeling of Hydrometeorological regimes, *Stoch Environ Res Risk Assess*, 14, 297-304.
- Hubert P., Bader J.C., Bendjoudi H. (2005) : Un siècle de débits annuels du fleuve Sénégal. Montpellier, France : Séminaire HSM Montpellier.
- Kadioglu M., Sen Z. (2001): Monthly precipitation-runoff polygons and mean runoff coefficients, *Hydrological Sciences Journal*, 46:1, 3-11, DOI: 10.1080/02626660109492796.
- Kallel R, Kingumbi A., Bergaoui Z., Bourges Jacques., Hubert P. (2001) : Etude de l’évolution des séries pluviométriques de la Tunisie Centrale, Montpellier (FRA) ; Montpellier : Unesco ; IRD, 341-350.
- Karamage F., Zhang C., Fang X., Liu T., Ndayisaba F., Nahayo L., Kayiranga A., Nsengiyumva J. B. (2017): Modeling rainfall-runoff response to land use and land cover change in Rwanda (1990–2016), *Water*, 9, 147.
- Li E., Mu X., Zhao G., Gao P., Shao H. (2014): Variation of Runoff and Precipitation in the Hekou-Longmen Region of the Yellow River Based on Elasticity Analysis, *Hindawi Journal*, 929858, 11 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2014/929858>.
- Lubes-Niel H., Masson J.M., Paturol J.E., Servat E. (1998) : Variabilité climatique et statistique. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l’homogénéité des chroniques. *Revue des Sciences de l’Eau*, 11, 383-408.
- Michiels P., Gabriels D., Hartmann R. (1992): Using the seasonal and temporal precipitation concentration index for characterizing the monthly rainfall distribution in Spain. *Catena* 19:1, 43–58. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(92\)90016-5](https://doi.org/10.1016/0341-8162(92)90016-5).
- Perreault L., Hache M., Slivitzky M., Bobee B. (1999): Detection of changes in precipitation and runoff over Eastern Canada and U.S. using a Bayesian approach. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 13, 201-16.
- Rhissa Ag B. (2018) : Etude de changement climatique au Nord-Est algérien, Mémoire de master, Université de Annaba, 85 pages.
- Sabzevari A.A., Zarenistanak M., Tabari H., Moghimi S. (2015): Evaluation of precipitation and river discharge variations over southwestern Iran during recent decades, *J. Earth Syst. Sci*, 124, 335–352.
- Shi H., Wang G., Li T., Wei J., Fu W. (2016), Spatial and temporal characteristics of precipitation over the Three-River Headwaters region during 1961–2014, *Journal of Hydrology: Regional Studies* 6, 52–65.
- Singh V.P. (1997): Effect of spatial and temporal variability in rainfall and watershed characteristics on stream flow hydrograph, *Hydrological Processes*, 11, 1649-1669.
- UNISDR (2015): Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction (GAR 2015). <https://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/>. Consulté le 20 Février 2020.
- Yin Y., Xu C., Chen H., Li L., Xu H., Li H., Jain S.K. (2016), Trend and concentration characteristics of precipitation and related climatic teleconnections from 1982 to 2010 in the Beas River basin, India, *Global and Planetary Change* 145, 116–129.

Zamani R., Mirabbasi R., Nazeri M., Meshram S.G, Ahmadi F. (2018): Spatio-temporal analysis of daily, seasonal and annual precipitation concentration in Jharkhand State, India. *Stoch Environ Res Risk Assess* 32: 4, 1085–1097.

Zhang L., Qian Y. (2003): Annual distribution features of precipitation in China and their interannual variations, *Acta meteorologica sinica*, 17:2, 146-163.

Zhou X., Zhang Y., Yang Y. (2015): Comparison of Two Approaches for Estimating Precipitation Elasticity of Streamflow in China's Main River Basins, *Hindawi Journal, Advances in Meteorology*, ID 924572, 8 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/924572>