

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila**

**Institut des Sciences et de Technologie**

**Département de sciences et Technologie**



N° Ref : .....

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de*

**MASTER**

*Spécialité : Hydraulique Urbaine*

**THEME**

**Contribution à la détermination de l'origine des écoulements des crues dans le bassin de l'Oued Rhumel-Smendou (Nord-Est Algérien) : Application de la méthode trigonométrique**

*Réalisé par :*

- CHETIOUI Faddia
- ZERROUKI Ouarda

*Soutenu devant le jury :*

*M. KHELALFA Mohamed  
M. BOUMSENEGH Amel  
M. BERHAIL Sabri*

*Président  
Examineur  
Promoteur*

*Année universitaire : 2019/2020*

## *Remerciements*

*Nous tenons à remercier ALLAH, le tout puissant de nous avoir donné  
courage et volonté pour accomplir ce modeste travail.*

*Nous remercions nos très chers parents pour leurs  
Soutiens et leurs patiences.*

*Nous souhaitons également exprimer notre gratitude aux personnes qui  
Nous ont aidés à effectuer ce travail*

*Et notamment notre encadreur :*

*M. BERHAIL SABRI pour son suivi et ses conseils*

*Durant l'évolution de ce travail.*

*Ainsi qu'à tous les enseignants et personnel administratif du département  
des sciences et techniques de Centre Universitaire ABDELHAFID  
BOUSSOUF- MILA.*

*A tous notre amies proches et à toute la promotion  
2015 de l'hydraulique.*

*En fin, un grand merci à toute personne m'ayant aidé et guidé pour la  
Réalisation de cette étude.*



## *Dédicace*

*Je dédie le fruit de cet effort à :*

*A qui Dieu a immortalisé sa mention dans le Coran, elle sera récitée jusqu'à ce que le Jour du Jugement et du Ciel soit placé sous ses pieds, à ma **chère mère**, puisse Dieu prolonge sa vie.*

*Aux généreux qui m'ont appris son idéalisme et son humilité, à mon **cher père**, que Dieu prolonge sa vie.*

*Aux bougies éclairantes de la maison, **chers frères**.*

*A mon cher binôme Faddia.*

*A tous mes amis.*

*A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.*

*A ma promotion de Master Hydraulique Urbaine 2020.*

*A tous ceux que la plume a oubliés et que le cœur n'a pas oubliés.*

**OUARDA**



## *Dédicace*

*Je rends mes profondes gratitude à ALLAH qui m'a aidé à réaliser ce modeste travail.*

*À MES CHERS PARENTS Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.*

*Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.*

*Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.*

*Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.*

*Une spéciale dédicace à mon fiancé, qui est toujours fier de me voir réussir, merci pour son soutien.*

*A tous les membres de ma famille.*

*A mon chère binôme Ouarda*

*A tous mes amis*

*A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.*

*A ma promotion de Master Hydraulique Urbaine 2020.*

**FADDIA**



## Sommaire

Remerciements .....	I
Dédicaces.....	II
Sommaire.....	IV
Liste des tableaux .....	VIII
Liste des figures.....	X
Résumé .....	XIII
ملخص.....	XIII
Abstract.....	XIV

INTRODUCTION GENERALE .....	1
-----------------------------	---

### *Chapitre 1 : Les processus de génération de crues*

1. INTRODUCTION .....	3
2. PRINCIPAUX CHEMINEMENTS DE L'EAU .....	3
2.1. Les précipitations directes à la surface de l'eau .....	3
2.2. Ecoulement de surface .....	3
2.3. Ecoulement de subsurface .....	5
2.4. Ecoulement souterrains .....	6
3. FORME DE L'HYDROGRAMME .....	7
3.1. Les éléments descriptifs d'un hydrogramme .....	7
4. FACTEURS QUI INFLUENT SUR LA FORME DE L'HYDROGRAMME .....	8
4.1. Condition aux limites (Forçages atmosphérique) .....	8
4.2. Conditions initiales .....	8
4.2.1. Conditions d'humidité initiale du bassin .....	9
4.2.2. Surface du bassin .....	10
4.2.3. Forme du bassin .....	10
5. SYNTHÈSE .....	11

## ***Chapitre 2 : Technique d'analyse des courbes de récession de débits***

1. INTRODUCTION .....	13
2. SEPARATION DES ECOULEMENTS .....	13
2.1. Les méthodes analytiques ou graphiques .....	13
2.2. Approche graphique.....	14
2.3. Approche par filtre.....	15
2.4. Les méthodes physico-chimiques et isotopiques .....	17
3. ANALYSE DE LA COURBE DE RECESSION .....	19
4. UTILISATION DE L'ANALYSE DES COURBES DE RECESSIONS .....	20
5. METHODE D'ANALYSE DES COURBES DE RECESSIONS .....	21
5.1. The Correlation method .....	22
5.2. Matching strip method .....	22
5.3. The tabulation method .....	23
5.4. Wavelet Transform .....	23

## ***Chapitre 3 : Présentation de la zone d'étude***

1. APERÇU GEOGRAPHIQUE .....	25
1.1. Le bassin versant de Kébir el Rhumel .....	25
1.2. Le bassin versant de l'Oued Rhumel-Smendou .....	27
2. DESCRIPTION PHYSIOGRAPHIQUE .....	27
2.1. Lithologie .....	27
2.2. Altimétrie .....	28
3. MORPHOLOGIE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED RHUMEL-SMENDOU .....	30
3.1. Introduction .....	30
3.2. Caractéristiques physiques du bassin .....	30
3.3. Caractéristiques morphométriques du bassin .....	31
3.3.1. Indice de compacité .....	31
3.3.2. Le rectangle équivalent .....	32
3.3.3. Longueurs des talwegs .....	33
3.3.4. Densité de drainage .....	33
3.3.5. Indice de pentes .....	34
3.3.5.1. Indice de pente globale .....	34

3.3.5.2. Indice de pente moyenne .....	35
3.3.5.3. La dénivelé spécifique .....	35
3.3.6. Temps de concentration .....	36
3.3.7. Vitesse de ruissellement .....	36
4. HYDRO-CLIMATOLOGIE .....	37
4.1. Caractéristiques hydrologiques .....	37
4.1.1. Précipitation .....	37
4.1.2. Température .....	38
4.1.3. Climat .....	39
4.1.4. Diagramme Ombrothermique .....	41
4.2. Bilan Hydrique .....	41
4.2.1. Evapotranspiration .....	42
4.2.2. Interprétation du bilan d'eau de C.W. THORNTHWAITE .....	44
4.2.3 Ruissellement (R) .....	46
4.2.4 Infiltration (I) .....	46
5. REGIME PLUVIOMETRIQUE DU BASSIN VERSANT .....	48
5.1. Critique des données hydro - pluviométrique .....	48
5.2. Traitements statistiques des données hydro _ pluviométrique .....	48
5.2.1. Station de bassin de l'Oued Rhumel-Smondou .....	48
5.2.2. Précipitations moyennes annuelles .....	49
5.2.3. Coefficient pluviométrique .....	51
5.2.4. Précipitations moyennes saisonnières .....	53
5.2.5. Précipitations moyennes mensuelles .....	54
6. CONCLUSION .....	56

### *Chapitre 4 : Résultats et discussions*

1. INTRODUCTION .....	57
2. CORRELATION ENTRE LES PRECIPITATIONS ET LES DEBITS MOYENS ANNUELS .....	58
3. CORRELATION ENTRE LES PRECIPITATIONS ET LES DEBITS MOYENS MENSUELS .....	59
4. SEPARATION DES COMPOSANTES DE L'HYDROGRAMME .....	61
4.1. Présentation du programme .....	61
5. CARACTERISTIQUE DES STATIONS HYDROMETRIQUES .....	62

---

6. MISE EN PLACE D'UNE PROCEDURE ANALYTIQUE DE SEPARATION DES COMPOSANTES DE L'ECOULEMENT FONDE SUR LA CONSTANTE DE RECESSION K.....	64
6.1. Séparation de l'hydrogramme des crues du 01/01/1994 à la station de Grarem .....	65
6.2. Séparation de l'hydrogramme des crues du 01/01/1994 à la station de Bouchdira .....	67
6.3. Séparation de l'hydrogramme des crues du 01/01/1994 à la station El kheneg .....	68
7. INTERPRETATION GRAPHIQUE DES COMPOSANTES DE L'ECOULEMENT SUR L'HYROGRAMME DU DEBIT TOTAL .....	74
8. CONCLUSION .....	77
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>78</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>80</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> : Les codes des sous bassins versant de l'Oued Kébir-Rhumel .....	26
<b>Tableau 2</b> : La longueur du talweg .....	33
<b>Tableau 3</b> : Caractéristiques morphométriques de bassin versant de l'Oued Rhumel-Smendou .....	34
<b>Tableau 4</b> : Classification de l'ORSTOM pour différents reliefs .....	36
<b>Tableau 5</b> : Précipitation moyennes mensuelles à la station d'El Kheneg (1990-2012)	37
<b>Tableau 6</b> : Températures moyennes mensuelles de la station d'Ain El Bey (1990-2012) .....	38
<b>Tableau 7</b> : Indice mensuel d'aridité .....	40
<b>Tableau 8</b> : Résultat de l'ETR par la méthode de Turc .....	43
<b>Tableau 9</b> : Bilan hydrique selon la méthode de THORNTHWAITE de la station d'El Kheneg (1990-2012) .....	44
<b>Tableau 10</b> : Résultats du ruissellement .....	46
<b>Tableau 11</b> : Résultats de l'infiltration .....	47
<b>Tableau 12</b> : Estimation de taux d'infiltration .....	48
<b>Tableau 13</b> : Les coordonnées Lambert de la station d'El Kheneg.....	48
<b>Tableau 14</b> : Répartitions des précipitations moyennes annuelles de la station d'El Kheneg.....	50
<b>Tableau 15</b> : Evolution du coefficient pluviométrique (1988-2012) .....	52
<b>Tableau 16</b> : Précipitations saisonnières (1988-2012) .....	53
<b>Tableau 17</b> : L'écart type et le coefficient de variation des pluies mensuelles.....	55
<b>Tableau 18</b> : Résultats des différentes corrélations entre les deux paramètres pluie et la lame d'eau écoulée annuelle (1988/2011) .....	59
<b>Tableau 19</b> : Résultats des différentes corrélations entre les pluies et les lames d'eau écoulées mensuelles.....	59

<b>Tableau 20</b> : Caractéristique des stations hydrométrique retenues .....	63
<b>Tableau 21</b> : Paramètres des courbes de récession à la station Bouchdira durant le période (1972/2010) .....	70
<b>Tableau 22</b> : Paramètres des courbes de récession à la station d'El Grarem durant le période (1973/2001) .....	71
<b>Tableau 23</b> : Paramètres des courbes de récession à la station El Kheneg durant le période (1984/2003) .....	72

## Liste des figures

<b>Figure 1</b> : Ruissellement par dépassement de l'infiltrabilité .....	4
<b>Figure 2</b> : Ruissellement par saturation et exfiltration. ....	5
<b>Figure 3</b> : Mécanismes de formation de l'écoulement de subsurface .....	6
<b>Figure 4</b> : Composante d'un hydrogramme .....	7
<b>Figure 5</b> : Influence des conditions antécédentes d'humidité sur le comportement hydrologique d'un bassin versant .....	9
<b>Figure 6</b> : Exemple de non linéarité des crues dans le petit bassin versant du Mont Lozère... ..	10
<b>Figure 7</b> : Influence de la forme du bassin versant sur l'hydrogramme des crues.....	11
<b>Figure 8</b> : Cycle hydrologique tel qu'il est représenté dans le model HEC-HMS .....	12
<b>Figure 9</b> : Séparation selon ROCHE.....	13
<b>Figure 10</b> : Allure générale d'un hydrogramme de débit de base a) aec ou abc .....	15
<b>Figure 11</b> : Exemple de séparation de l'hydrogramme en deux composantes .....	15
<b>Figure 12</b> : Exemple de séparation de l'écoulement de base selon deux techniques proposées.....	17
<b>Figure 13</b> : Décomposition d'un hydrogramme de crue en trois composantes .....	18
<b>Figure 14</b> : Courbe de la récession, période et segment .....	19
<b>Figure 15</b> : Séparation des composantes à partir de la courbe de récession .....	20
<b>Figure 16</b> : Correlation method pour estimer la constante récession K .....	22
<b>Figure 17</b> : Matching strip method pour l'estimation de la constante de récession K .....	22
<b>Figure 18</b> : Tabulation method pour estimer la constante de récession K .....	23
<b>Figure 19</b> : Exemple d'un évènement de crue et de ses cartes d'ondelettes à Oued Melah et Oued Ressoul .....	24
<b>Figure 20</b> : Réseau hydrographique du bassin du Kébir-Rhumel.....	25
<b>Figure 21</b> : Carte des sous bassins du bassin versant Kébir-Rhumel .....	26

<b>Figure 22</b> : Carte lithologique du bassin versant de l'Oued el Rhumel .....	27
<b>Figure 23</b> : Repartitions des surfaces pour chaque formation lithologique .....	28
<b>Figure 24</b> : Carte du relief du bassin de l'Oued Kebir Rhumel-Smendou .....	28
<b>Figure 25</b> : Carte du relief du bassin de l'Oued Rhumel .....	29
<b>Figure 26</b> : Répartition des surfaces des classe altimétriques sur le bassin versant de l'Oued Rhumel- Smendou .....	30
<b>Figure 27</b> : Variations des précipitations moyennes mensuelles pour la station d'EL Kheneg (1990-2012).....	38
<b>Figure 28</b> : Variations des températures moyennes mensuelles pour la station d'Ain El Bey (1990-2012).....	39
<b>Figure 29</b> : Diagramme Ombrothermique (1990-2013) .....	41
<b>Figure 30</b> : Moyenne pluriannuelle des éléments climatiques .....	45
<b>Figure 31</b> : Bilan de l'eau de C.W THORNTHWAITE de la station d'El Kheneg .....	45
<b>Figure 32</b> : Histogramme des précipitations moyennes annuelles de la station d'El Kheneg (1988-2012) .....	50
<b>Figure 33</b> : Les variations des coefficients pluviométriques à la station d'El Kheneg (1988-2012) .....	52
<b>Figure 34</b> : Histogramme des précipitations moyennes saisonnières interannuelles de la station d'El Kheneg (1988-2012) .....	53
<b>Figure 35</b> : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles interannuelles de la station d'El Kheneg (1988-2012) .....	54
<b>Figure 36</b> : Corrélation Pluie-Débit au pas de temps annuel (1988-2011) .....	58
<b>Figure 37</b> : Corrélation Pluie-Débit au pas de temps mensuel (1988-2010) .....	60
<b>Figure 38</b> : Structure du programme .....	62
<b>Figure 39</b> : Les stations hydrométriques du bassin versant de l'oued Rhumel-Endja jusqu'au Barrage Béni Haroun.....	63
<b>Figure 40</b> : procédure de séparation des composantes de l'écoulement à partir de la courbe de récession .....	64

<b>Figure 41</b> : Hydrogramme enregistré du 01/01/1994 au 02/04/1994 à la station de Grarem.....	65
<b>Figure 42</b> : Séparation des courbes de récession en deux composantes à la station de Grarem.....	66
<b>Figure 43</b> : Séparation des courbes de récession en trois composantes à la station de Grarem .....	66
<b>Figure 44</b> : Hydrogramme enregistré du 01/01/1994 au 02/04/1994 à la station de Bouchdira .....	67
<b>Figure 45</b> : Séparation des courbes de récession en deux composantes à la station de Bouchdira .....	67
<b>Figure 46</b> : Séparation des courbes de récession en trois composantes à la station de Bouchdira .....	68
<b>Figure 47</b> : Hydrogramme enregistré du 01/01/1994 au 02/04/1994 à la station El kheneg. ....	68
<b>Figure 48</b> : Séparation des courbes de récession en deux composantes à la station El kheneg.....	69
<b>Figure 49</b> : Séparation des courbes de récession en trois composantes à la station El kheneg.....	69
<b>Figure 50</b> : Nombre et pourcentage des composantes de l'hydrogramme de crue à la station d'El Grarem .....	73
<b>Figure 51</b> : Nombre et pourcentage des composantes de l'hydrogramme de crue à la station Bouchdira .....	73
<b>Figure 52</b> : Nombre et pourcentage des composantes de l'hydrogramme de crue à la station El Kheneg .....	74
<b>Figure 53</b> : Contribution des deux composantes de l'écoulement séparé à la station de Bouchdira et El kheneg .....	75
<b>Figure 54</b> : La contribution des deux composantes de l'écoulement séparé à la station de Bouchdira .....	76

## Résumé

Ce modeste travail vise à identifier et expliquer les processus qui sont à l'origine de la formation du débit de crue. La connaissance de ses processus est essentielle avant toute modélisation de la transformation pluie-débit. Dans les modèles pluie-débit conceptuel le bassin versant est divisé en un ensemble de réservoirs qui se remplissent et se vidangent de différentes façons selon l'état hydrique du bassin versant et la nature des forçages climatiques.

Nous avons alors essayé de connaître les différents processus tant superficiels que souterrains pouvant contribuer à cette genèse, ainsi que les facteurs du milieu qui les contrôlent. Pour arriver à notre objectif nous avons utilisé une méthode analytique basée sur l'analyse des courbes de récession de débits dans le bassin versant de l'Oued Rhumel-Smendou. Les résultats montrent clairement que la formation des crues dans le bassin de l'Oued Rhumel-Smendou résulte de la conjonction de deux familles de processus, superficiels et souterrains.

**Mots clé :** Processus hydrologiques, Séparation des écoulements, MRC, Récession, Bassin versant l'Oued Rhumel-Smendou.

### ملخص:

يهدف هذا العمل المتواضع إلى تحديد وشرح العمليات التي هي أصل تكوين تدفق الفيضان. معرفة عملياتها ضرورية قبل أي نمذجة لتحويل تدفق المطر. ينقسم مستجمع المياه في النماذج المفاهيمية لتدفق الأمطار إلى مجموعة من الخزانات التي تملأ وتفريغ بطرق مختلفة اعتماداً على الحالة المائية لمستجمع المياه وطبيعة التأثيرات المناخية. لقد حاولنا في هذه الدراسة معرفة المسالك الهيدرولوجية المختلفة سواء السطحية والجوفية التي يمكن أن تساهم في نشأة التدفق، بالإضافة إلى العوامل البيئية التي تتحكم فيها. للوصول إلى هدفنا، استخدمنا طريقة تحليلية تستند إلى تحليل منحنيات انحسار التدفق في حوض نهر الرمال سمندو. النتائج أظهرت بوضوح أن تشكيل الفيضانات تكوين الفيضانات في حوض نهر الرمال سمندو ناتجة عن مزيج من عائلتين من المسالك الهيدرولوجية، السطحية والجوفية.

**الكلمات المفتاحية:** المسالك الهيدرولوجية، التدفقات، الركود، انحسار الفيضان، حوض المياه واد الرمال سمندو،

---

## Abstract:

This modest work aims to identify and explain the processes responsible for streamflow generation. The knowledge of this processes is essential before any rainfall-runoff transformation modelling. In the conceptual rainfall-runoff models the watershed is divided into a set of reservoirs that fill and empty in different ways depending on the water state of the watershed and the natural forcing of the climate.

We then tried to know the various surface and underground processes that could contribute to this genesis, as well as the environmental factors that control them. To achieve our objective we have used an analytical method based on recession curves analysis in the Rhumel-Smendou catchment. The results make clearly that the flood formation in the Rhumel-Smendou catchment result from a combination of two processes, surface and subsurface.

**Keywords:** Hydrological processes, hydrograph separation, MRC, Recession, Oued Rhumel-Smendou watershed.

# *Introduction générale*

## INTRODUCTION GENERALE :

Les processus de formation des crues ont fait l'objet de nombreuses études depuis le début du XXIème siècle. Le concept de Horton (1933) a été durant la première moitié du siècle, la représentation la plus connue de la genèse des débits : dès que l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration du sol, il y a saturation de la surface " par le haut ". Après avoir rempli les dépressions superficielles, l'eau en excès s'écoule par ruissellement sur les versants pour former l'écoulement rapide des crues. Le reste s'infiltrate et contribue à la recharge de nappes et au débit de base. Cependant, de nombreuses études, notamment en milieu tempéré, ont montré que cette représentation constituait un cas particulier (Ambroise, 1998). Ce type de ruissellement est généralement propre aux zones arides et semi-arides. Cappus (1960) montre que dans le cas des zones humides où le sol est déjà saturé jusqu'en surface, la pluie qui tombe ne peut que ruisseler ou libérer par " effet piston " un volume équivalent d'eau préexistante dans le sol. Un troisième type de ruissellement pouvant contribué au débit de crue est alimenté par l'exfiltration d'eau provenant de l'écoulement souterrain là où les nappes affleurent.

Les ruissellements de surface ne sont pas les seules contributions au débit de crue. En effet, dès le début des années 1960, certains hydrologues forestiers proposent des processus alternatifs pour expliquer la formation des débits. Il s'agit des écoulements de sub-surface que l'on peut observer en condition saturée. Ces écoulements résultent d'un ralentissement voire d'un blocage des percolations verticales à un niveau sous-jacent moins perméable. Ces écoulements se déroulent dans les horizons rendus perméables par la colonisation des racines, les fentes de dessiccation et les discontinuités structurales. Dans le cas des parties basses des versants humides, et des bas-fonds, ayant des nappes peu profondes, on peut assister à une remontée rapide de leur niveau due à la recharge de ces nappes par une percolation à travers la faible épaisseur de sol non saturé. En effet, un petit apport d'eau suffit à transformer en eau libre la frange capillaire qui la surmonte. L'onde de perturbation qui en résulte est transmise au ruisseau et draine la nappe à une vitesse bien supérieure à celle du déplacement de l'eau libre. A proximité des cours d'eau, ce phénomène provoque un gradient hydraulique important qui augmente considérablement la contribution de la nappe au cours d'eau : il s'agit du phénomène d'intumescence des nappes.

Dans notre modeste recherche, nous essayons de faire une analyse des processus de production du débit à l'exécutoire du bassin versant par les méthodes analytiques et de faire une analyse des courbes de récession des hydrogrammes enregistrés dans différentes stations du bassin versant de l'Oued Rhumel-Smendou.

Le manuscrit sera organisé comme suit :

- Introduction générale
- Chapitre 01 : Les processus hydrologique de génération de crues
- Chapitre 02 : Techniques d'analyse des courbes de récessions de débits
- Chapitre 03 : Présentation de la zone d'étude
- Chapitre 04 : Résultats et discussions
- Conclusion générale

# *Chapitre 1*

## *Les processus de génération de crues*

## 1. INTRODUCTION :

Avant tout, il semble important de retracer brièvement l'état de l'art de l'hydrologie fondamentale ou plus précisément de l'étude des processus hydrologiques. Cette présentation permettra également de définir les principaux termes utilisés tout au long de cette étude pour décrire les processus hydrologiques.

En s'inspirant de la classification de [1,2] distinguent quatre cheminements principaux que l'eau emprunte pour rejoindre la rivière.

- les précipitations directes à la surface de l'eau ("direct precipitation")
- les écoulements de surface ("overland flow")
- les écoulements de proche subsurface ("throughflow")
- les écoulements souterrains ("groundwater flow")

## 2. PRINCIPAUX CHEMINEMENTS DE L'EAU :

### 2.1. Les précipitations directes à la surface de l'eau :

C'est la fraction des pluies qui précipitent directement sur le réseau hydrographique. La contribution de cette composante est relativement limitée étant donné que le réseau hydrographique, à l'exception des lacs, recouvre une très faible partie des bassins versants. Il faut cependant relever que, lors d'événements pluvieux prolongés, le réseau hydrographique peut fortement s'étendre et ainsi augmenter sensiblement la contribution de ce mécanisme à la génération des crues.

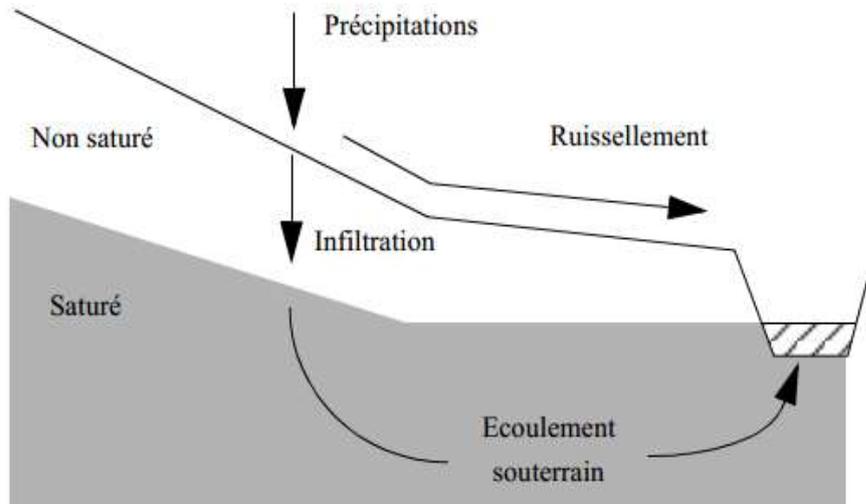
### 2.2. Ecoulement de surface :

Les écoulements de surface sont composés soit d'eau ne pouvant pas s'infiltrer dans le sol (ruissellement) soit d'eau d'exfiltration. Ces eaux suivent alors des cheminements de surface pour rejoindre la rivière. Le ruissellement apparaît quand l'eau ne peut plus s'infiltrer dans le sol soit parce que l'intensité des pluies dépasse l'infiltrabilité du sol soit parce que le sol est saturé. L'exfiltration se déclenche quand la capacité du sol à transmettre un flux latéral est dépassée, l'eau de subsurface rejoint alors la surface du sol.

La théorie de [3] a été longtemps acceptée par la communauté hydrologique comme étant l'explication principale de la génération des crues. Le concept de [3] est basé sur la notion de limite d'infiltrabilité des sols. En effet, la théorie est basée sur le principe que tant que la

capacité d'infiltration du sol n'est pas dépassée la totalité de la pluie s'infiltré, mais dès que les précipitations dépassent cette capacité le surplus d'apport d'eau ruisselle à la surface du sol. L'eau qui ruisselle forme ainsi l'écoulement rapide de crue, par contre l'eau infiltrée contribue beaucoup plus lentement à la recharge des nappes et au maintien du débit de base (Figure 1).

Écoulement par dépassement de la capacité d'infiltration Ra.



**Figure 1** : Ruissellement par dépassement de l'infiltrabilité [1].

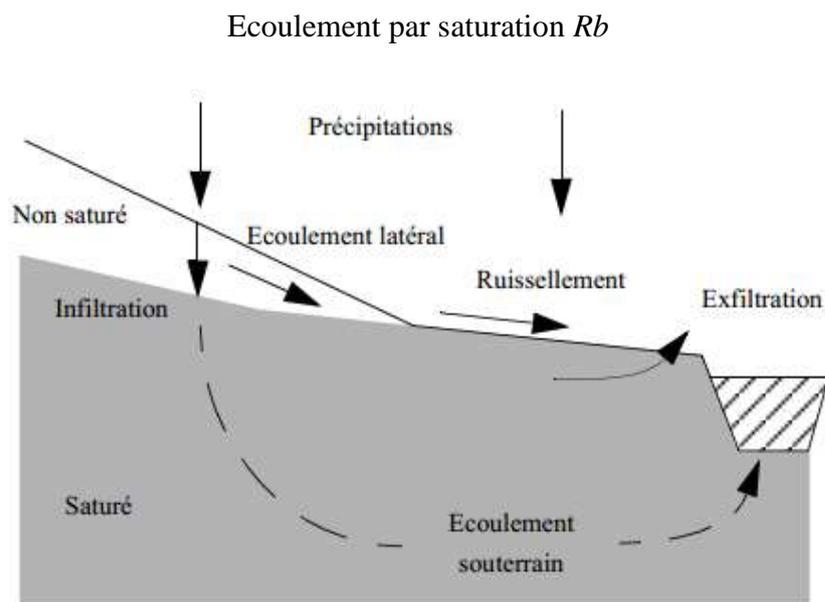
Cette représentation correspond en fait à un cas particulier. Le principe du ruissellement hortonien est valable par exemple dans le cas de sols dépourvus de couvert végétal sous climat aride ou dans le cas des zones urbaines. Cependant, dans les régions à climat tempéré, en particulier où la forêt domine, la capacité d'infiltration des sols est souvent très élevée. De nombreuses études ont montré qu'en climat tempéré les crues sont fréquemment générées par des pluies dont l'intensité est inférieure à l'infiltrabilité des sols. [4,5] Dans un tel cas le mécanisme du ruissellement hortonien ne permet pas d'expliquer la génération des crues. Le ruissellement par dépassement de l'infiltrabilité ("*infiltration excess surface runoff*") n'est apparemment pas un mécanisme majeur de la génération des crues en climat tempéré. Toutefois, il ne doit pas être totalement réfuté.

En effet, il peut être actif dans des zones spécifiques du bassin versant. A ces endroits, l'eau ruisselant à la surface du sol contribue soit directement à la génération des crues soit s'infiltré plus en aval sur le versant [6].

[7] est certainement le précurseur des concepts de *ruissellement par saturation* ("*saturation overland flow*") et des *surfaces contributives variables* ("*variable source area*"). Toutefois, sa contribution a eu peu d'écho auprès de la communauté des hydrologues. Ces deux concepts ont

été reconnu plus tard suite aux travaux de [4] Ces derniers suggèrent que l'eau transitant à travers le sol par infiltration ou par écoulements de proche subsurface alimente les zones adjacentes à la rivière où la nappe est proche de la surface du sol. Ainsi, les fonds de vallées se saturent au fur et à mesure que le niveau de la nappe atteint la surface du sol. Par conséquent, la pluie arrivant sur ces surfaces ne peut plus s'infiltrer et ruisselle à la surface du sol (Figure 2).

[4] suggèrent que seules ces surfaces saturées contribuent à l'écoulement rapide de crues. Dans le reste du bassin versant, ils supposent que la pluie s'infiltrate dans le sol où elle transite ou s'accumule. Les surfaces contributives varient au cours du temps. Si les pluies sont prolongées, les surfaces saturées peuvent alors s'étendre à l'intérieur du bassin. L'extension des surfaces contributives dépend d'une façon générale de la topographie du bassin versant et des conditions hydriques de ce dernier.



**Figure 2** : Ruissellement par saturation et exfiltration. [1]

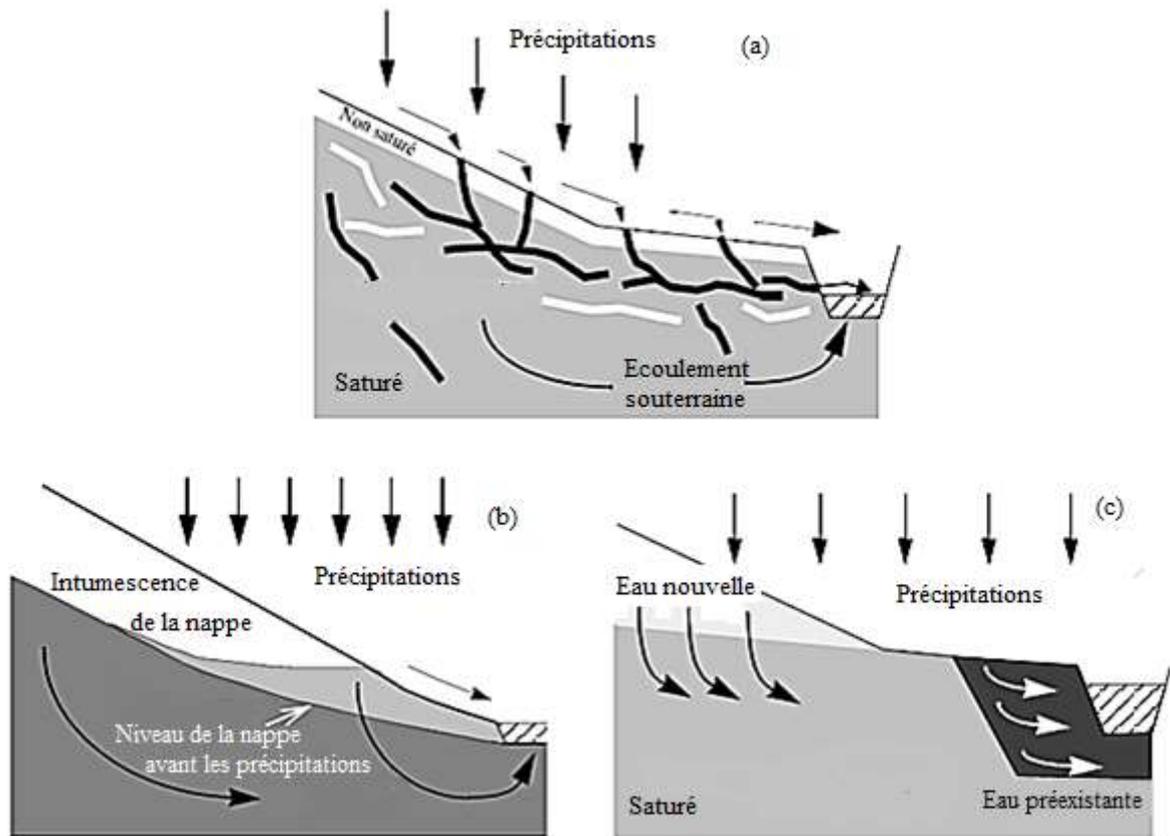
### 2.3. Ecoulement de subsurface :

La contribution des écoulements de subsurface (hypodermique) à la génération des crues a été mise en avant par [8] pour ainsi dire à la même époque que la publication des travaux de Horton. Mais au contraire du mécanisme de ruissellement par dépassement de l'infiltrabilité proposé par ce dernier, il a fallu beaucoup plus de temps à la communauté scientifique pour concevoir et reconnaître la contribution des eaux souterraines à l'écoulement rapide de crues.

Ceci est probablement dû au fait que les mécanismes permettant d'expliquer le rapide transfert de l'eau à travers le sol sont beaucoup plus difficiles à concevoir et identifier [6].

L'écoulement de subsurface peut être généré par les mécanismes suivants :

- Ecoulements par macropores ;
- Effet piston ("translatory flow") ;
- Intumescence de la nappe ("groundwater ridging").



**Figure 3** : mécanismes de formation de l'écoulement de subsurface  
(a) Ecoulements macropores, (b) Effet piston, (c) Intumescence de la nappe

#### 2.4. Ecoulement souterrains :

D'une façon générale, exception faite des zones à forte pente où les écoulements de proche subsurface dominent, la majorité des pluies s'infilte dans le sol, percole et rejoint la nappe profonde. Une partie de cette eau rejoint alors la rivière par des écoulements souterrains à travers la zone saturée.

Etant donné que l'eau circule très lentement à travers le sol, l'alimentation de la rivière par les écoulements souterrains est retardée de plusieurs jours, mois voire même de plusieurs années par rapport aux pluies. Les écoulements souterrains sont en général très réguliers, ce qui est caractéristique de la lente vidange de l'eau stockée dans le sol et dans la roche.

### 3. FORME DE L'HYDROGRAMME :

#### 3.1. Les éléments descriptifs d'un hydrogramme :

La forme de l'hydrogramme provenant d'un seul orage de courte durée sur un bassin versant, suit un modèle général. Ce modèle présente une période de montée, ou d'accroissement du débit qui atteint un maximum ou une crête selon l'importance de l'écoulement souterraine. La figure 4 illustre un hydrogramme typique avec ses éléments descriptifs.

L'hydrogramme se divise en 3 segments distincts :

1. **La courbe de concentration** : du début du ruissellement au point A jusqu'au point d'inflexion B.
2. **Le segment de pointe** : le segment BCD, i.e. le segment entre les 2 points d'inflexion B et D.
3. **La courbe de décrue** : le segment entre le point d'inflexion D et la fin du ruissellement au point E.

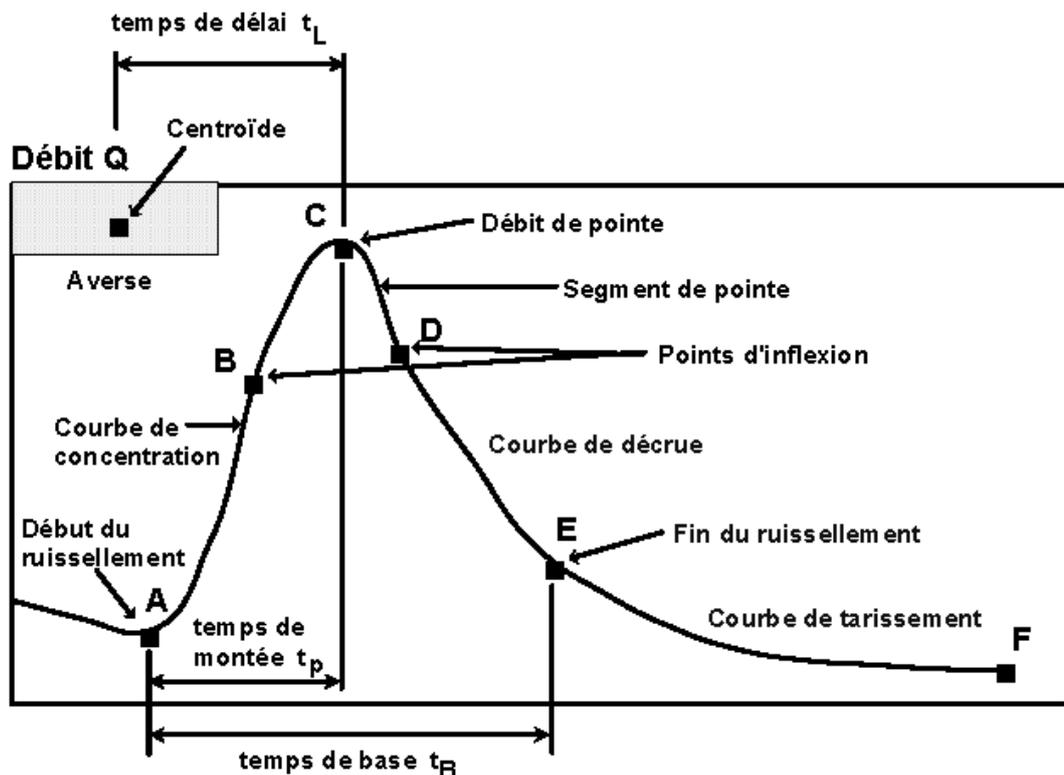


Figure 4 : composante d'un hydrogramme.

L'hydrogramme fait appel à certaines caractéristiques de temps. Nous y retrouvons les définitions suivantes :

- ✚ **Le temps de montée,  $t_p$**  : le temps écoulé entre le début du ruissellement et le débit de pointe.
- ✚ **Le temps de délai,  $t_L$**  : l'intervalle de temps entre le centroïde de l'averse et le débit de pointe.
- ✚ **Le temps de concentration,  $t_c$**  : le temps requis par la goutte d'eau hydrauliquement la plus éloignée pour parvenir à l'exutoire du bassin.

#### 4. FACTEURS QUI INFLUENT SUR LA FORME DE L'HYDROGRAMME :

##### 4.1. Condition aux limites (Forçages atmosphérique) :

Ce sont les facteurs climatologiques [9], soit l'apport en eau ou l'apport en énergie. Les précipitations forment le principal apport d'eau à un bassin versant. Celles-ci participent directement aux crues lorsqu'il s'agit de pluies, ou après fonte lorsqu'il s'agit de neige.

En effet pour un évènement pluvieux donné, les caractéristiques de l'hydrogramme de crue dépendent :

- Du volume d'eau apportée par la précipitation ;
- De l'intensité de la précipitation ;
- De la durée de la précipitation.

On peut trouver le détail concernant ces différents facteurs dans le travail [6,10].

De la même manière que les précipitations, l'apport en énergie, influe lui aussi sur les débits de crue et cela en participant à l'évaporation de l'eau se trouvant sur le sol, ainsi une importante quantité est évaporée et va influencer la redistribution de l'eau dans le sol. [6]

Ainsi la quantité d'eau rejoignant le sol se voit diminuée de façon importante, et ne participe plus aux débits d'écoulement.

##### 4.2. Conditions initiales :

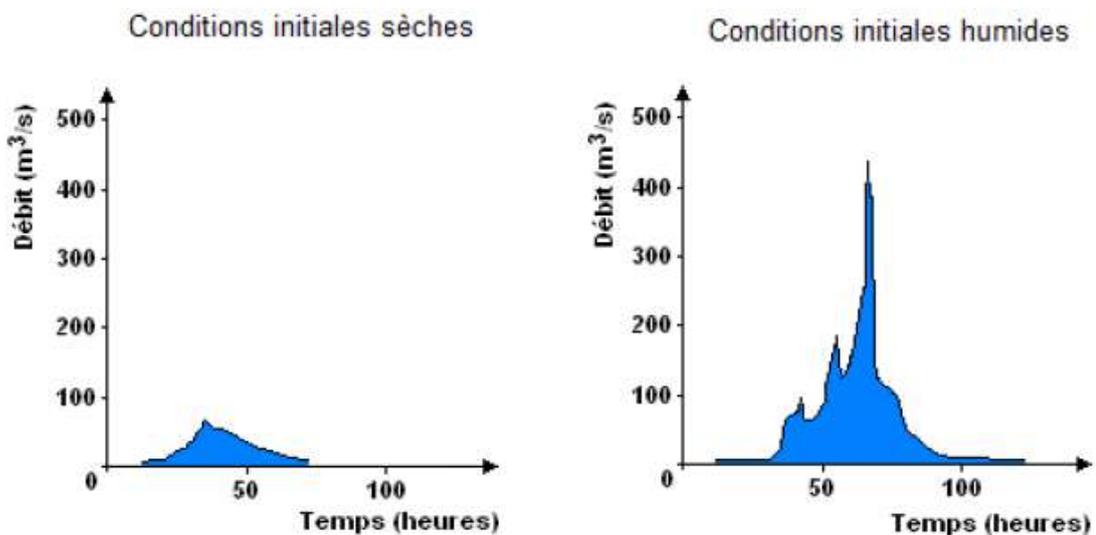
Ce sont les facteurs en rapport avec le bassin versant [9] appelées aussi conditions initiales [6], on en cite :

#### 4.2.1. Conditions d'humidité initiale du bassin :

A un même apport d'eau et d'énergie ne correspond pas forcément la même réponse en débit [6].

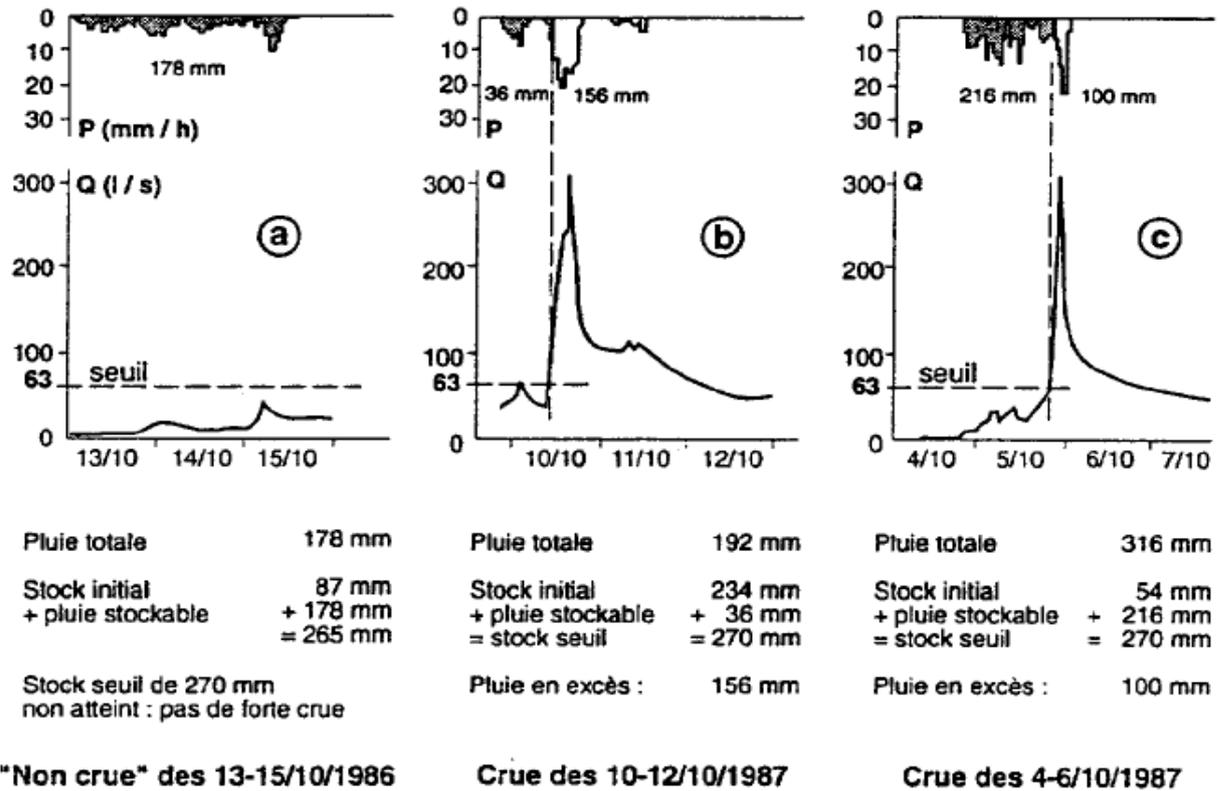
La réponse d'un bassin versant à une sollicitation pluvieuse dépend fortement des conditions d'humidité initiales de ce dernier (figure 5), qui montre la soumission d'un même bassin versant à une même sollicitation pluvieuse simulée, mais à des conditions d'humidité différentes (à gauche condition initiale sèche, à droite condition initiale humide).

La non linéarité de la réponse du bassin versant est mise en évidence, avec une valeur de débit de pointe ne dépassant pas les 100 m<sup>3</sup>/s pour la condition sèche et un débit de pointe de presque 500 m<sup>3</sup>/s pour la condition initiale humide.



**Figure 5 :** Influence des conditions antécédentes d'humidité sur le comportement hydrologique d'un bassin versant [11]

[6], donne un exemple réel de différentes réponses d'un même bassin versant, soumis à des différentes sollicitations pluvieuses à des états d'humidité initiaux différents (figure 6) :



**Figure 6 :** Exemple de non linéarité des crues dans le petit bassin versant du Mont Lozère [12,6].

Où :

(a) et (b) : représentent deux réponses très différentes à deux sollicitations pluvieuses semblables et à deux états d'humidité initiaux différents.

(b) et (c) : représentent deux réponses semblables à des sollicitations pluvieuses différentes et à des conditions d'humidité initiales différentes.

#### 4.2.2. Surface du bassin :

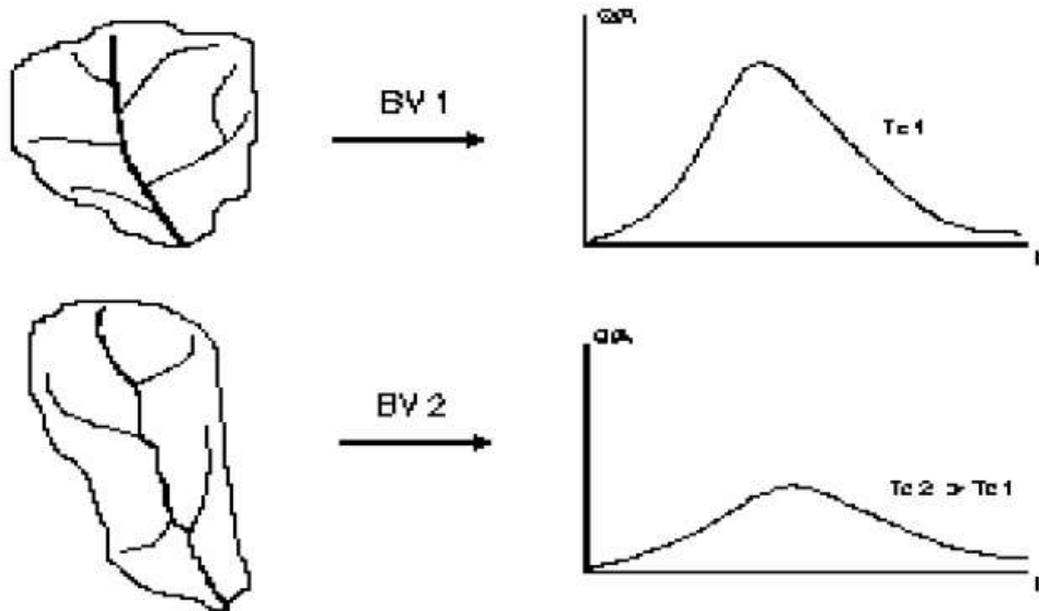
En général le débit de crue augmente si la surface du bassin augmente, plusieurs formules donnent le débit de crues en fonction de la surface de bassin dont celle donnée par [13] pour des bassins versants de surface (A) allant de 100 à 96 600 km<sup>2</sup>:

$$Q = 1.61 A^{0.70} \quad (1)$$

#### 4.2.3. Forme du bassin :

La forme d'un bassin versant influence l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire. Par exemple, une forme allongée favorise, pour une même pluie, les faibles débits de pointe de crue, et vice versa, la crue est d'autant plus pointue que le bassin est ramassé sur lui-même, ceci en raison

des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus importants. Ce phénomène est lié à au temps de concentration (figure7) :



**Figure 7 :** Influence de la forme du bassin versant sur l'hydrogramme des crues.

De même que les paramètres cités précédemment, la réponse d'un bassin versant dépend aussi du relief ou de la topographie du bassin (des pentes spécialement au sens de la vitesse d'écoulement), de la géologie (au sens de l'infiltration) ainsi que de la végétation et du taux d'interception des précipitations par les végétaux.

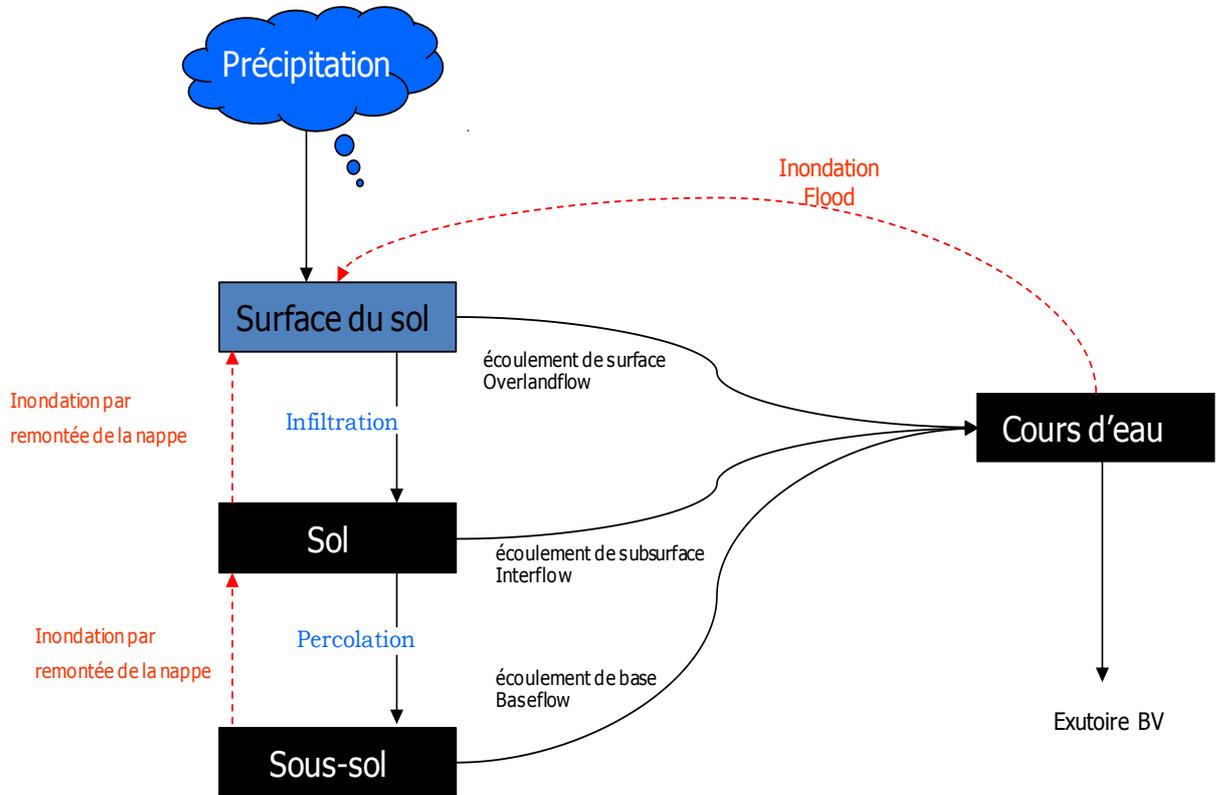
## 5. SYNTHÈSE :

L'ensemble des processus de genèse des débits présentés dans cette partie forme un cycle de l'eau dans les bassins versants qui s'avère être d'une grande complexité.

La connaissance de ses processus est nécessaire à toute modélisation de la transformation pluie-débit. Dans les modèles pluie-débit conceptuels le bassin versant est divisé en un ensemble de réservoirs qui se remplissent et se vidangent de différentes façons selon l'état hydrique du bassin versant et la nature des forçages climatiques.

L'évidence de la diversité des processus hydrologiques de production à l'intérieur du bassin versant s'est posée tout au long de ce chapitre. Ces mécanismes n'agissent pas de manière isolée mais forment un domaine continu de processus. Il s'ensuit que sur un même bassin versant, plusieurs processus concomitants peuvent intervenir durant un même événement pluvieux. De la même manière, il se peut que le type de processus change selon le type d'événement.

Les crues générées durant l'été ou l'hiver ne font pas nécessairement appel au même type de processus. On comprend ainsi qu'il est difficile de caractériser l'ensemble des processus de génération de crue.



**Figure 8** : Cycle hydrologique tel qu'il est représenté dans le modèle HEC-HMS

## *Chapitre 2*

# *Technique d'Analyse des courbes de récession de débits*

## 1. INTRODUCTION :

Le choix de la méthode de décomposition des écoulements dépend de la taille du bassin versant et de la zone climatique, des objectifs de l'étude et de l'école hydrologique de l'opérateur, les méthodes d'individualisation des crues et de séparation des écoulements sont presque aussi nombreuses que les hydrologues qui se sont trouvés confrontés avec cette problématique.

Afin d'étudier le cycle de l'eau, les hydrologues ont tenté de décomposer les hydrogrammes de crue selon les différentes contributions de l'écoulement. Des techniques graphiques, géochimiques, isotopiques et analytiques sont utilisées pour réaliser cette séparation des écoulements. Ces techniques de séparation sont d'autant plus difficiles à mettre en œuvre de façon opérationnelle qu'elles tentent de serrer de plus près la réalité physique des phénomènes étudiés.

## 2. SEPARATION DES ECOULEMENTS :

### 2.1. Les méthodes analytiques ou graphiques :

Les méthodes analytiques ou graphiques sont le plus fréquemment utilisées, et l'élément déterminant de ce succès tient sans aucun doute au fait que leur mise en œuvre ne requiert pas d'autre information que la chronique des débits instantanés.

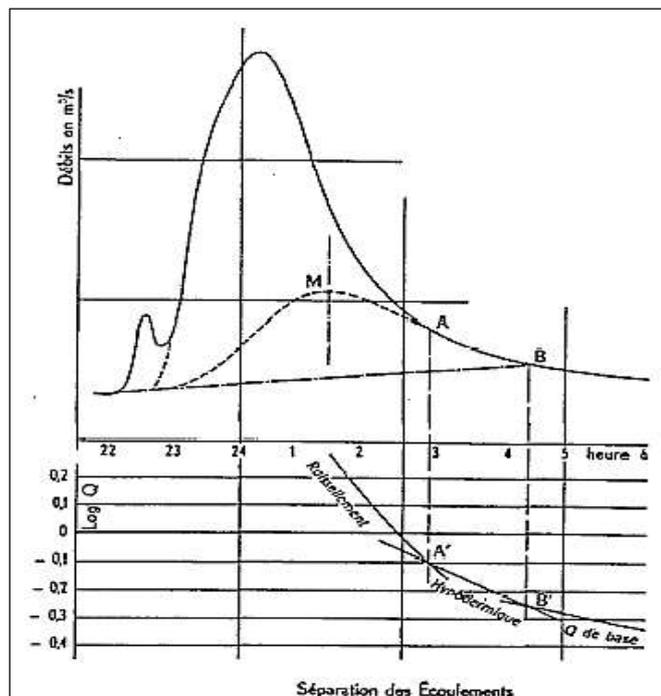


Figure 9 : séparation selon ROCHE [14].

- ✚ Le premier postulat implicite de cette technique est qu'à partir d'une analyse de forme de l'hydrogramme, il est possible de déterminer l'instant de la décrue où le débit n'est plus constitué que par de l'écoulement de base.
- ✚ Le second principe est d'admettre que l'on puisse alors représenter de façon acceptable la variation de cet écoulement de base, entre les points de début et de fin de crue, au moyen d'une fonction analytique, linéaire ou curviligne.

La plupart des procédés s'attachent à rechercher des ruptures de pente dans une figuration de la courbe de décrue en coordonnées semi-logarithmiques : trois segments de droite s'individualisent pendant la décrue, qui marquent les périodes de contribution du ruissellement, de l'écoulement dit hypodermique et du débit de base [14].

## 2.2. Approche graphique :

Dans l'approche graphique, on assume qu'entre deux événements pluvieux, le débit de base est équivalent au débit total du cours d'eau. Cette approche devient toutefois problématique lors d'événements pluvieux qui se chevauchent [15, 16]. Les techniques graphiques de séparation des débits de base sont nombreuses.

L'allure générale d'un hydrogramme de débit de base (figure 10a) peut se caractériser comme suit : 1) point de départ de l'hydrogramme (point a) correspondant à la fin de la courbe de récession de la pluie précédente; 2) la récession du débit de base se continue après le début de la courbe de crue; 3) l'augmentation du débit de base, dont la pointe a lieu après celle de l'hydrogramme du débit total dû à l'effet de stockage-cheminement (point b ou e) et 4) le point final correspond au point où l'hydrogramme du débit de base rejoint l'hydrogramme du débit total lorsque l'écoulement de surface cesse (point c). Ce point coïncide avec la fin de la courbe de récession exponentielle.

Une méthode simplifiée couramment employée est illustrée à la figure 10b. Elle consiste à identifier les points de départ et d'arrêt du ruissellement. Le point de départ correspond au début de l'augmentation du débit (point A) et le point final à l'endroit où la courbe de récession devient exponentielle point B [17]. Une fois ces deux points établis, différentes techniques peuvent être appliquées pour tracer l'hydrogramme du débit de base. Celles-ci incluent une ligne droite reliant ces deux points et la détermination du point intermédiaire C, situé sous le sommet de l'hydrogramme de débit total, qui peut être placé en poursuivant la courbe de récession de l'hydrogramme total.

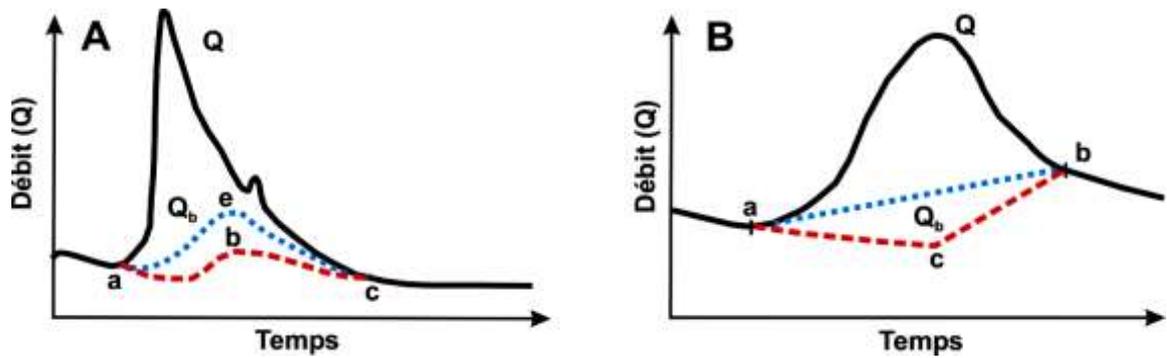


Figure 10 : Allure générale d'un hydrogramme de débit de base a) aec ou abc [17]

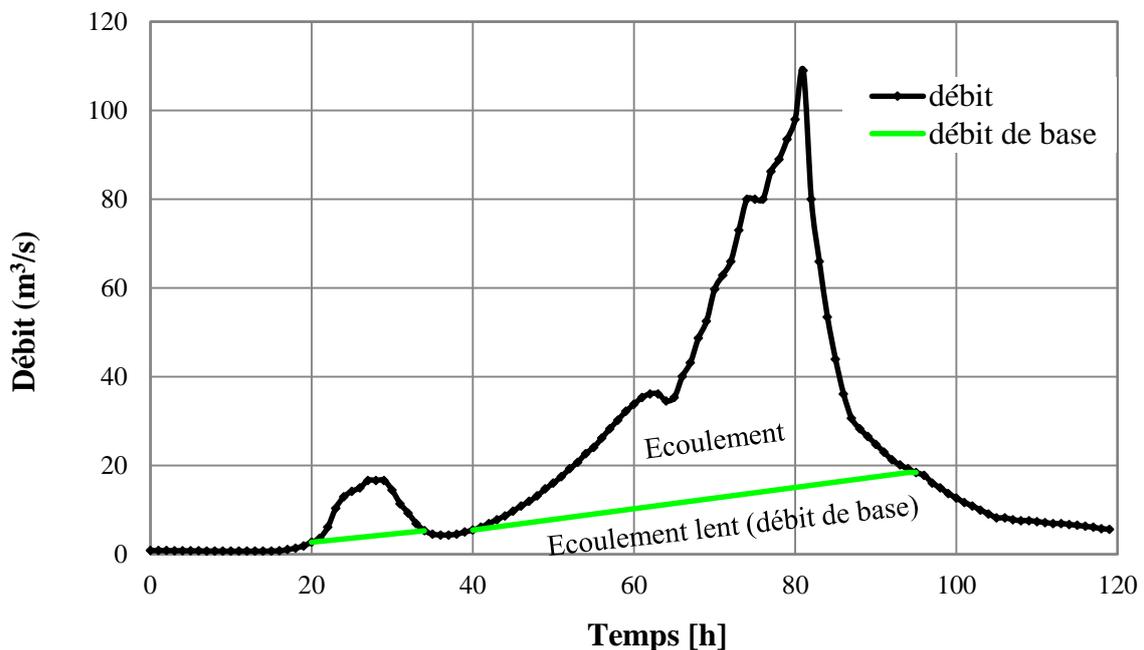


Figure 11 : Exemple de séparation de l'hydrogramme en deux composantes.

Étant donné la subjectivité de ces méthodes, plusieurs auteurs ont essayé de les automatiser pour rendre les résultats moins « aléatoires » et leur utilisation plus facile. Trois méthodes sont proposées dans le logiciel HYSEP (*HYdrograph Separation Program*), développé par l'USGS (Institut d'études géologiques des États-Unis), pour calculer le débit de base, soit l'intervalle fixe, l'intervalle glissant et le minimum local [18].

### 2.3. Approche par filtre :

Dans la seconde approche, un filtre mathématique de type « passe-bas » est défini dans le domaine du temps et/ou des fréquences et il est appliqué par la suite aux séries quotidiennes des débits de rivières [19]. Différents filtres ont été utilisés en se basant sur celui élaboré par

[15, 16] qui considèrent que le débit est la somme de deux composantes : une composante basse fréquence représentant le débit de base et une composante haute fréquence représentant l'écoulement de surface. Les débits de base sont calculés en additionnant une grande proportion du débit de base du temps précédent à un terme tenant compte du débit des rivières actuel et/ou passé. Les deux filtres employés et décrits ci-dessous sont ceux de Chapman [16, 17], qui utilisent des relations basées sur des caractéristiques physiques pour déterminer les coefficients de proportionnalité. Ces deux méthodes n'utilisent pas de contrainte sur les équations (ex :  $0 < Q_{base} < Q_{total}$ , etc.).

[17] a proposé une amélioration du filtre développé par [19], qui présentait l'inconvénient majeur de nécessiter plusieurs passages du filtre de façon à ce que le débit de base ne dépasse pas le débit de rivière vers la fin de la courbe de récession (fin du ruissellement). Le filtre amélioré par [17], qui nécessite un seul passage, est le suivant :

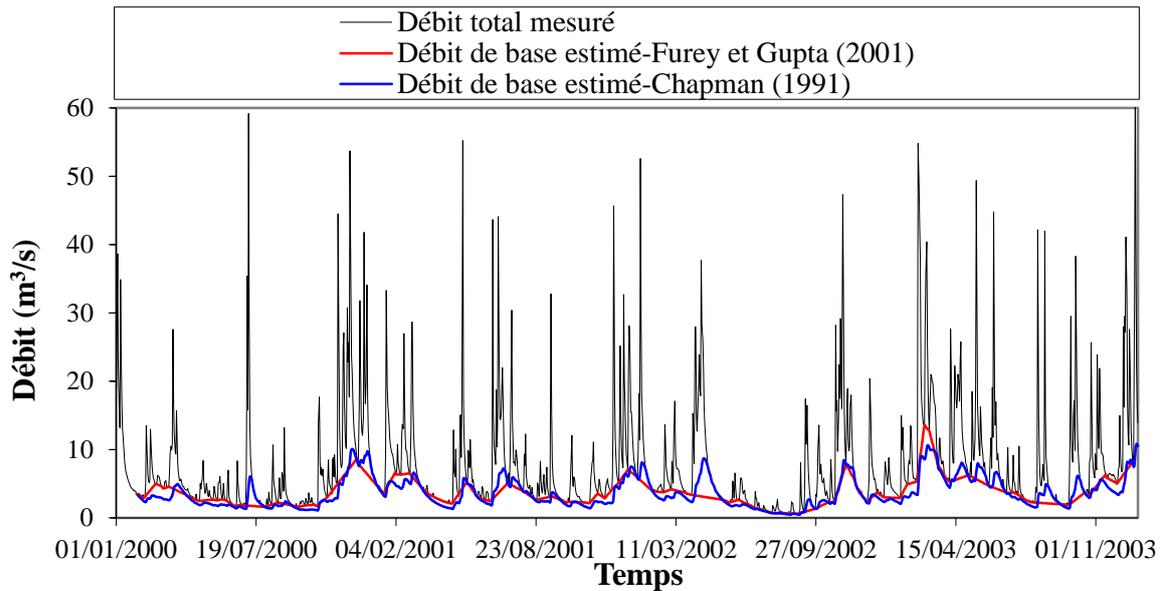
$$Q_k = \frac{3\alpha - 1}{3 - \alpha} Q_{k-1} + \frac{1 - \alpha}{3 - \alpha} (Y_k + Y_{k-1}) \quad (2)$$

Où  $Y_k$  est le débit de rivière au jour k,  $Q_k$  le débit de base au jour k et  $\alpha = 0,925$ . [16] ont quant à eux proposé un filtre basé sur quatre paramètres physiques qui ont été estimés à partir de données de débits de rivières et de précipitations. L'équation proposée par [16] s'écrit :

$$Q_k = (1 - \gamma) Q_{k-1} + \gamma \frac{C_s}{C_1} (Y_{k-3} - Q_{k-3}) \quad (3)$$

$$\text{Où } 1 - \gamma = 0,97 \quad \text{et} \quad \frac{C_s}{C_1} = 1.1$$

Le décalage des courbes issues du filtre de [16] provient du fait que cette méthode considère que le facteur retard des eaux souterraines par rapport au ruissellement est de 3 jours (débit de base au jour k calculé en fonction du débit de base des jours k-1 et k-3, et du débit total au jour k-3). Dans certains bassins versants et dépendant de l'événement pluvieux (intensité, durée), une ou deux journées pourraient suffire pour drainer toute l'eau souterraine vers l'exutoire du bassin, d'où le problème du dépassement du débit total par le débit de base sur une base quotidienne. De plus, à cause du grand nombre de stations (situées dans des bassins dont les caractéristiques sont très différentes) à traiter et surtout pour avoir un outil facile à appliquer, les paramètres du filtre, qui sont fonction du débit total et des précipitations, ont été fixés. Les valeurs moyennes attribuées à ces paramètres contribuent probablement au problème de dépassement du débit total par le débit de base dans certains cas.



**Figure 12 :** Exemple de séparation de l'écoulement de base selon deux techniques proposées [15, 16].

#### 2.4. Les méthodes physico-chimiques et isotopiques :

Les méthodes graphiques simples de séparation des écoulements, très subjectives, ont été remplacées ensuite par les méthodes de séparation physico-chimiques et isotopiques ayant pour objectif de cerner la réalité des phénomènes. Au début la variation de la conductivité de l'eau a été utilisée. Cette dernière reflète la charge globale en éléments dissous. Ensuite ces méthodes ont été affinées en étudiant les variations des concentrations de certains éléments majeurs. Enfin, les méthodes isotopiques ont été largement appliquées avec un certain succès. Ces méthodes reposent sur le traçage intrinsèque de la molécule d'eau qui permet une analyse plus rigoureuse des hydrogrammes de crue.

Le principe de calcul des méthodes chimique et isotopique de décomposition de l'hydrogramme de crue est le suivant.

En période d'étiage, le débit total de la rivière ( $Q_t$ ) est uniquement dû à la vidange des aquifères du bassin versant.

$$Q_t = Q_s \quad (4)$$

La concentration ( $C_t$ ) de la rivière correspond alors à la concentration ( $C_s$ ) de l'écoulement souterrain.

En période de crue, l'écoulement total ( $Q_t$ ) provient de la superposition de l'écoulement souterrain ( $Q_s$ ) et du ruissellement total lié à la pluie ( $Q_p$ ). Le ruissellement retardé sera en effet inclus dans l'une ou l'autre des composantes.

$$Q_t = Q_s + Q_p \quad (5)$$

Avec ( $t$ ) l'écoulement de la rivière, ( $s$ ) l'eau souterraine préexistante et ( $p$ ) la pluie.

Chaque composante a sa concentration chimique ou isotopique qui reste plus ou moins constante durant la crue, ( $C_s$ ) pour la composante souterraine et ( $C_p$ ) pour le ruissellement.

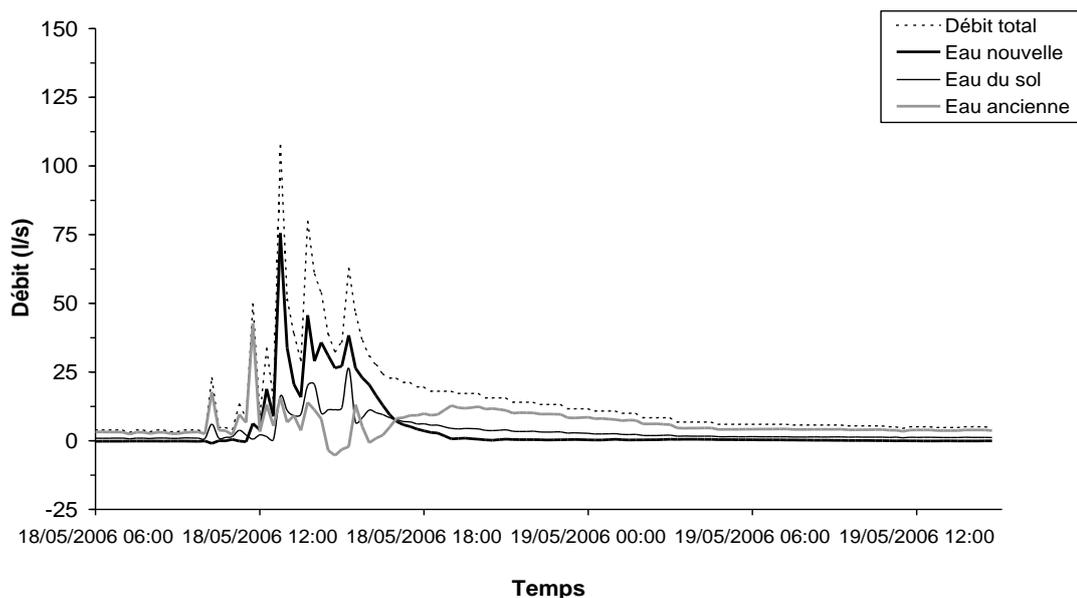
$$Q_t C_t = Q_s C_s + Q_p C_p \quad (6)$$

En éliminant ( $Q_p$ ) entre les équations 5 et 6, on obtient :

$$Q_s = Q_t \frac{C_t - C_p}{C_s - C_p} \quad (7)$$

Donc la proportion de l'eau souterraine dans l'écoulement de crue est :

$$\frac{Q_s}{Q_t} = \frac{C_t - C_p}{C_s - C_p} \quad (8)$$



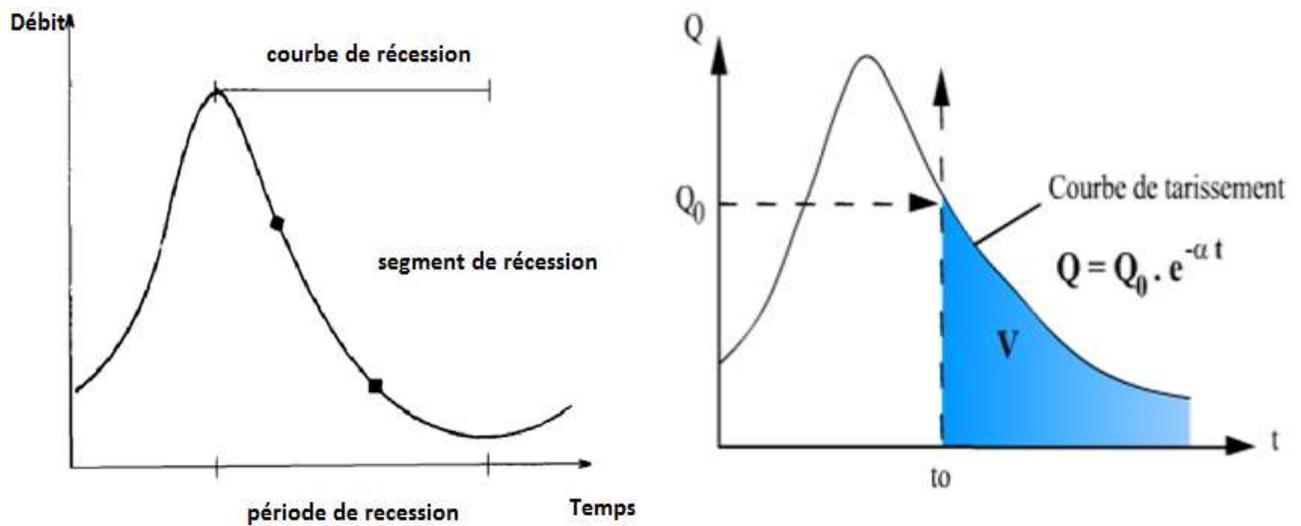
**Figure 13** : Décomposition d'un hydrogramme de crue en trois composantes [20].

### 3. ANALYSE DE LA COURBE DE RECESSION :

La courbe de récession est la partie d'un hydrogramme qui s'étend d'un pic de débit à la base de l'élévation du prochain pic en absence de nouvelles précipitations.

Horton [3] a montré que la courbe de récession peut être définie par une relation représentant dans le temps la vidange d'un réservoir linéaire :

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad \text{or} \quad Q_t = Q_0 e^{-\frac{t}{T_c}} \quad (1)$$



**Figure 14 :** Courbe de la récession, période et segment.

Où  $Q_t$  est le débit au temps  $t$ ,  $Q_0$  est le débit initial au début du segment de la récession,  $\alpha$  est une constante aussi connu comme la fréquence de coupure ( $f_c$ ) et  $T_c$  est une période de récession.

Le terme  $e^{-\alpha}$  dans cette équation peut être remplacée par  $k$ , appelé le facteur ou constante de la récession, qui est couramment utilisé comme indicateur de l'étendue de débit de base [19].

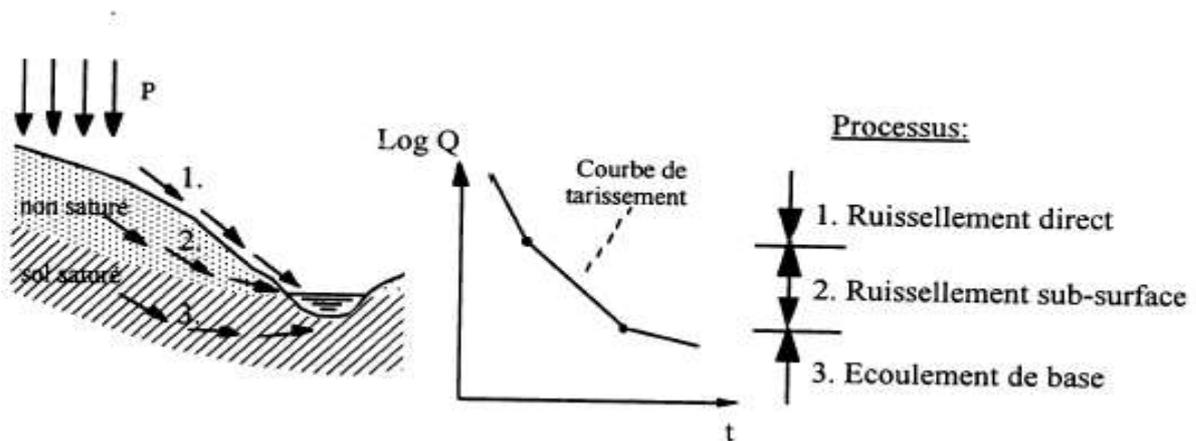
L'équation ci-dessus s'écrit alors [21, 22] :

$$Q = Q_0 K^t \quad (9)$$

Basé sur les équations (1) et (2), une relation entre le ( $f_c$ ) et  $K$  peut être expliqués sous la forme suivante

$$K = e^{-f_c} \quad \text{or} \quad f_c = -\ln(K) \quad (10)$$

Les fourchettes typiques des constantes de récession pour les composantes de l'écoulement à savoir : le ruissellement de surface de (0,2 à 0,8), l'écoulement hypodermique (0,85 à 0,94) et l'écoulement de base de (0,95 à 0,995) ne se chevauchent [19]. Cependant, les constantes élevées de récession (par exemple > 0,9) tendent à indiquer la position dominante du débit de base de l'écoulement fluvial.



**Figure 15 :** Séparation des composantes à partir de la courbe de récession [21].

#### 4. UTILISATION DE L'ANALYSE DES COURBES DE RECESSIONS :

L'analyse des courbes de récession d'hydrogramme est un outil bien connu dans les recherches hydrologiques et la planification de gestion des ressources en eau [21, 23].

L'application la plus courante est la prévision des débits d'étiage, l'estimation de ressources en eau souterraine dans un bassin versant, les modèles pluie-débit et l'analyse d'hydrogramme.

[24] a utilisé le paramètre de récession de débit de base en un modèle régionale de prévision pour l'estimation de faibles débits. Ce paramètre dans le modèle de prédiction représente à la fois la conductivité hydraulique du bassin et de la porosité du sol de drainage. Dans la modélisation pluie-débit, certains auteurs ont inclus la caractéristique de récession dans leur modèle. [25] utilise le paramètre de la récession pour la séparation d'hydrogramme et la modélisation de ruissellement de surface. Plus récemment, [26] a appliqué le paramètre de récession à la génération de la série chronologique quotidienne de débit. Le paramètre de la récession a été également adopté dans la méthode de l'hydrogramme unitaire, pour [27] utilise la constante de récession pour délimiter la partie de la récession de l'hydrogramme. Le paramètre de récession est également nécessaire pour la séparation d'hydrogramme en utilisant le filtre numérique pour la technique de séparation du débit de base [22].

En raison de l'importance de la récession de l'hydrogramme en hydrologie, de nombreux chercheurs ont essayé d'analyser la caractéristique de récession. Barnes en 1939 a introduit une technique graphique pour la séparation de l'hydrogramme. La technique est connue comme un tracé semi-logarithmique de la récession du débit pour séparer un hydrogramme en composantes linéaires de l'écoulement de surface, hypodermique et de débit de base. Le tracé semi-logarithmique est appliqué à l'origine d'un seul segment de récession. Pour analyser un ensemble des récessions d'hydrogramme à un bassin versant particulier simultanément, la courbe maîtresse de récession est couramment utilisée [19]. En plus de la méthode graphique, le processus d'ajustement pourrait aussi être réalisé par des calculs. Récemment, [28] ont proposé une méthode pour analyser les caractéristiques de la récession basée sur la méthode de la transformée en ondelettes.

## 5. METHODE D'ANALYSE DES COURBES DE RECESSIONS :

De nombreux auteurs [21, 26] se sont intéressés aux méthodes de construction d'une courbe moyenne de tarissement, qualifiée dans la bibliographie de courbe maîtresse (traduction de l'expression anglophone « *Master Recession Curve* »). Parmi les méthodes plus courantes, utilisées on recense la méthode des tabulations [21], la méthode des corrélations [29], la méthode de transformation en ondelette « *wavelet transform* ».et la méthode de « *matching strip method* » [30, 31].

### 5.1. The Correlation method :

La méthode des corrélations [26] pour laquelle les auteurs proposent de corrélérer des valeurs de débits à pas de temps différents entre eux. Selon les auteurs, cette méthode est appliquée, soit pour déterminer la pente moyenne d'un épisode de tarissement, soit pour calculer le rapport  $k = Q_t / (Q_0)$ , en corrélant les débits  $Q_0$  et  $Q$  à  $t$  jours ( $Q_t$ ), à partir de toutes les phases observées : sur le graphique de corrélation, il est possible, en effet, de faire passer une droite de régression dans le nuage de points, aboutissant à une fonction affine d'équation :  $Q_t = k.Q_0$ .

Où  $K$  est une fonction de la pente de l'enveloppe de la ligne de corrélation ( $Q / Q_0$ ) et l'intervalle de retard  $t$ .

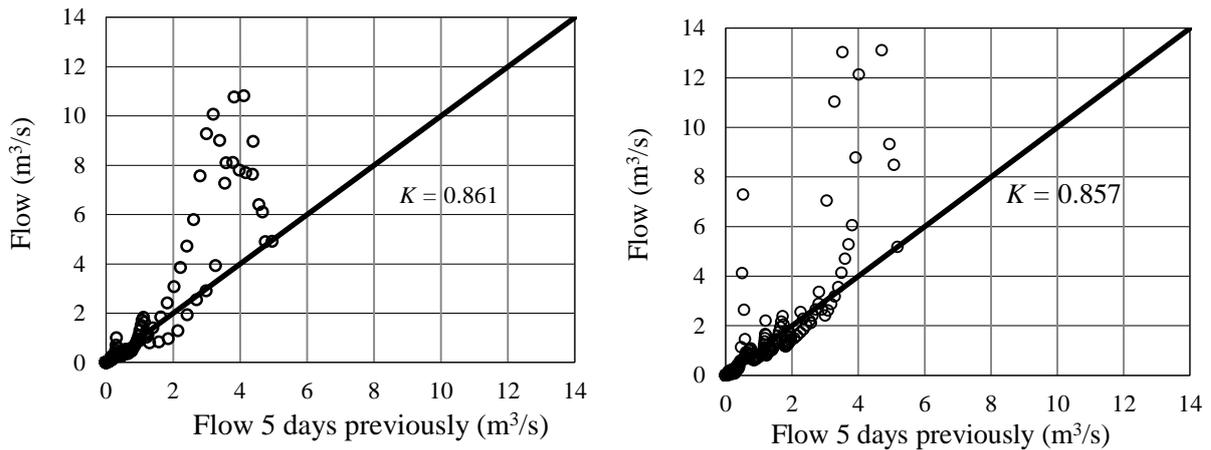


Figure 16 : Correlation method pour estimer la constante récession K [32].

5.2. Matching strip method :

La méthode du Matching strip implique de tracer tous les différents segments de récession individuels provenant de l'hydrogramme. Les segments sont superposés et ajustés horizontalement pour produire une séquence chevauchante. La courbe maîtresse de récession est interprétée comme l'enveloppe de cette séquence, et la constante de récession K tirés de sa pente [19,21], comme le montre la Figure 17.

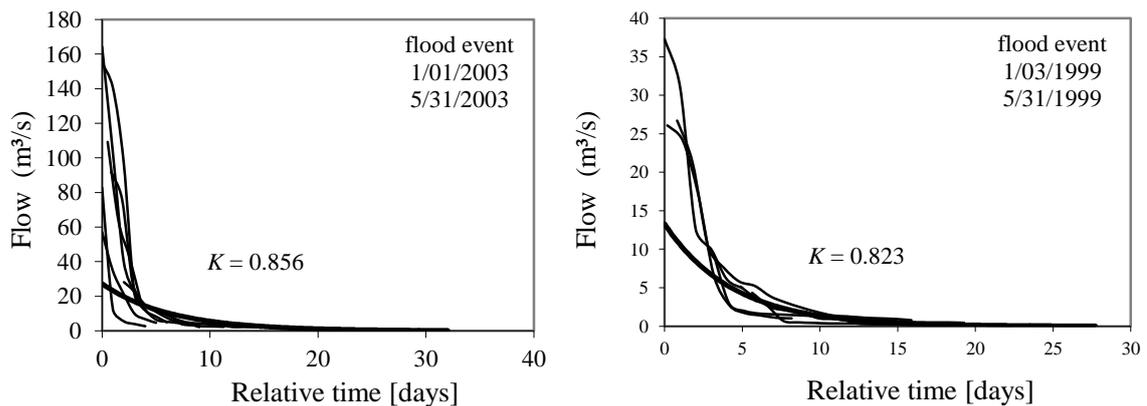
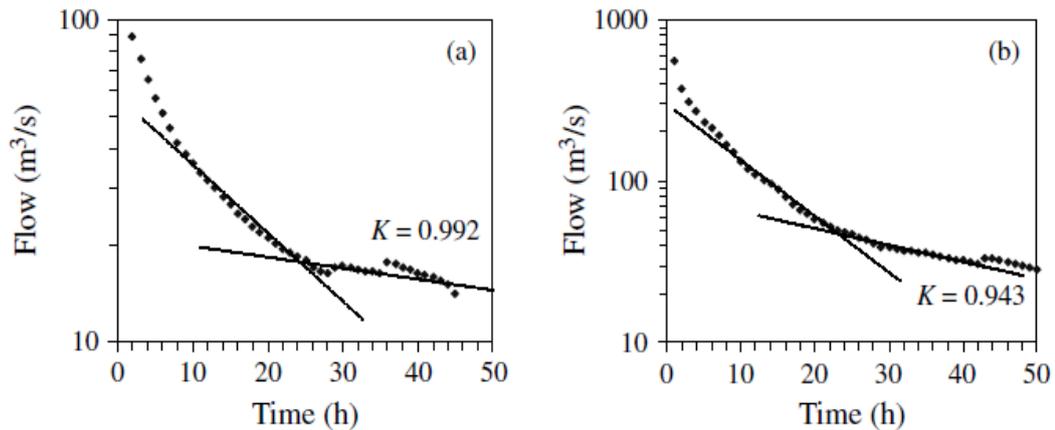


Figure 17 : Matching strip method pour l'estimation de la constante de récession K [32].

### 5.3. The tabulation method :

Où les données à partir des courbes de récessions multiples sont utilisées pour établir la courbe maîtresse de récession et pour faire la moyenne des débits calculée pour la période de mesure hydrométrique. Des Périodes de récession sont tabulées et triés, et des débits moyens calculés pour chaque pas de temps. Ceci est fait soit de calcul [33] ou par une solution analytique [34].

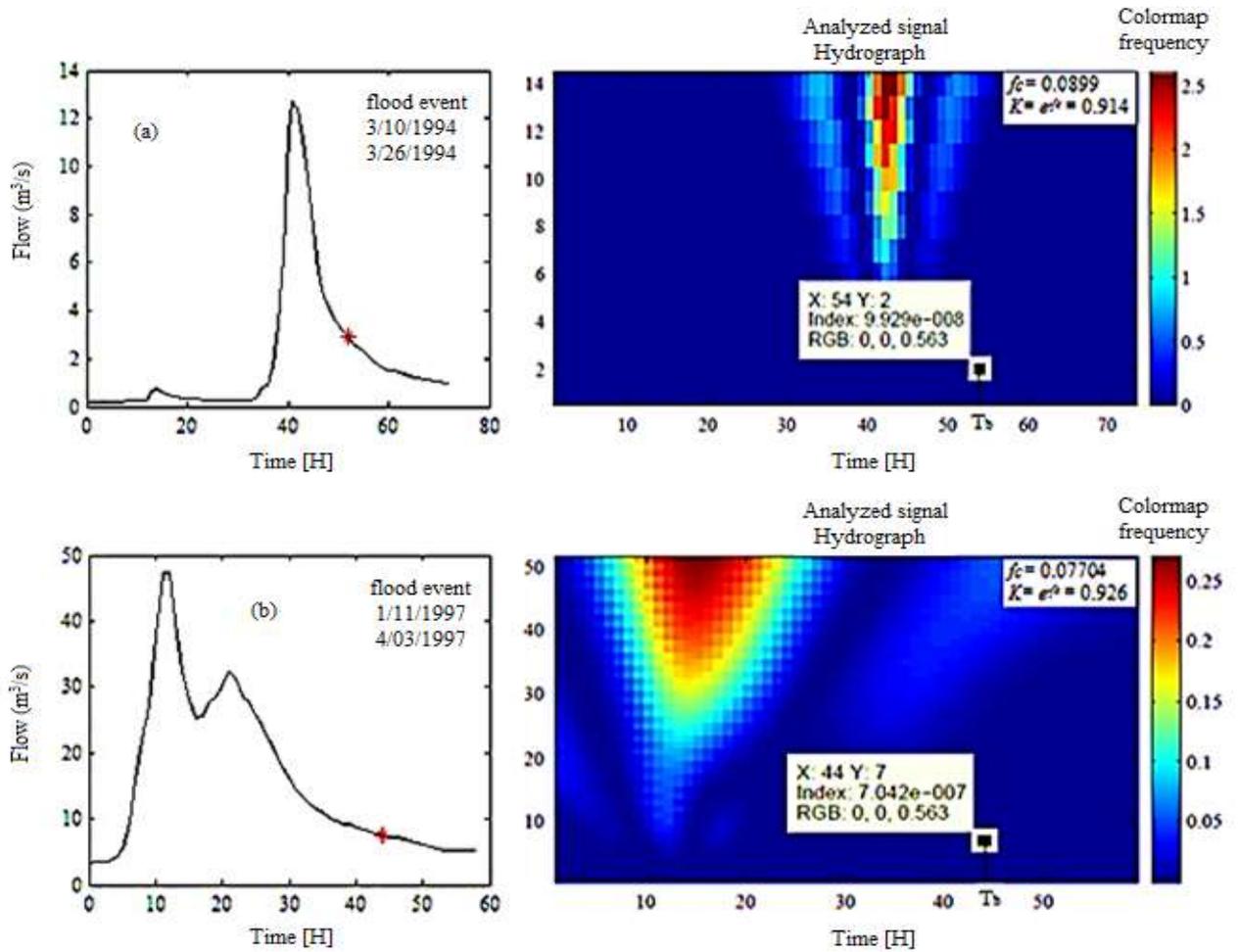


**Figure 18** : Tabulation method pour estimer la constante de récession  $K$  [28].

### 5.4. Wavelet Transform :

Est une technique pour décomposer un signal en ses composantes. Elle est appliquée dans des champs tels que le traitement d'images et la géophysique. La technique peut également être utilisée dans l'analyse de la récession d'hydrogramme en termes pour séparer la signature de basse fréquence du débit de base [28].

La courbe de récession de l'hydrogramme se compose habituellement de différentes composantes de l'écoulement, c.-à-d. écoulement de surface, écoulement hypodermique et écoulement de base, ce qui signifie que les changements de la ligne de récession d'un composant à un autre composant et la fréquence.



**Figure 19 :** Exemple d'un évènement de crue et de ses cartes d'ondelettes à Oued Melah (a) et Oued Ressoul (b) [32].

La composante du débit de base est donc la fréquence la plus basse qui peut être considérée comme une fréquence de coupure ( $f_c$ ). En connaissant la fréquence  $f_c$ , le paramètre de la récession  $K$  peut être calculé en utilisant l'équation (10).

**N.B.**

Vu La diversité des méthodes d'analyse des courbes de récessions qui existe, dans la suite de notre recherche on va utiliser la méthode du Matching Strip.

## *Chapitre 3*

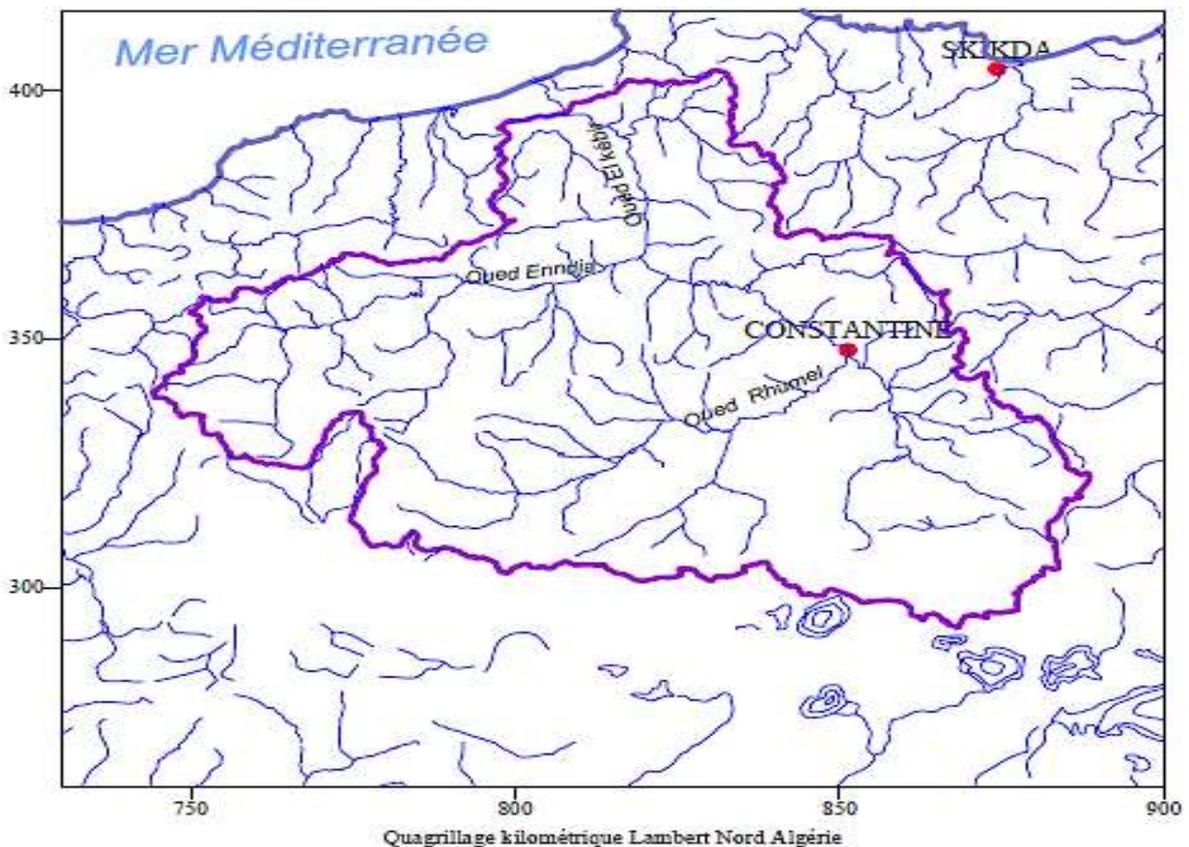
### *Présentation de la zone d'étude*

## 1. APERÇU GEOGRAPHIQUE :

### 1.1. Le bassin versant de Kébir el Rhumel :

Situé au Nord Est Algérien, ce bassin représente environ 20% du territoire du grand bassin constantinois-Seybouse-Mellegue, s'étend sur une superficie de 8815 Km<sup>2</sup> et englobe dans sa surface plusieurs villes et agglomérations, on distingue comme principales : Constantine, Mila, EL Khroub, Ain Mila, Chelghoum el Aid, Ain Fakroune, El Milia, Hamma Bouziane et Tadjanant [35]. Ce dernier possède une façade maritime d'environ 7 km, Il est centré 36° de latitude Nord, de 7° de longitude Est [36].

Le bassin de Kebir-Rhumel présente un chevelu hydrographique très dense totalisant plus de 4200 km. Quarante-trois oueds ont une longueur supérieure à 10 km. Ce bassin de Kebir-Rhumel est constitué de plusieurs oueds : Oued El Rhumel, Endja, El Kebir et Boumerzoug sont les principaux cours d'eau du bassin.

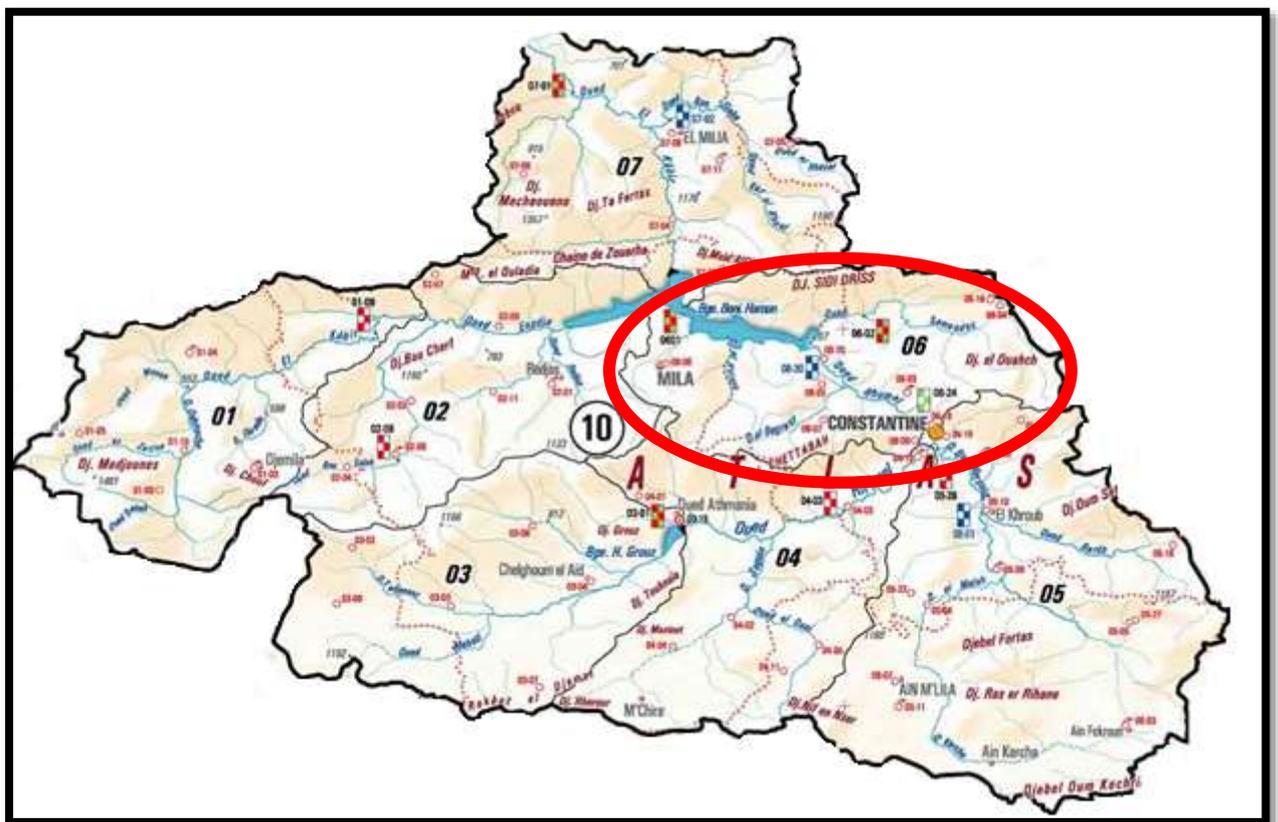


**Figure 20 :** Réseau hydrographique du bassin du Kébir-Rhumel [37].

D'après les services de l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrique), le bassin versant de Kebir Rhumel est découpé en 7 sous bassin dont le sous bassin de l'Oued Rhumel – Smendou qui constitue notre sujet d'étude ce bassin est codifié selon l'ANRH par le code 1006.

**Tableau 1:** Les codes des sous bassins versant de l'Oued Kebir-Rhumel.

Code du sous bassin	Noms du sous bassin
10 01	Oued Dehamcha-Kebir Amont
10 02	Kebir Amont-Endja
10 03	Kebir Amont
10 04	Rhumel-Seguen
10 05	Boumerzoug
10 06	Rhumel-Smendou
10 07	Kebir –Martime



**Figure 21 :** Carte des sous bassins du bassin versant Kébir-Rhumel [38].

## 1.2. Le bassin versant de l'Oued Rhumel-Smendou :

Le bassin versant de l'Oued El Rhumel est un sous bassin du grand bassin de kebir Rhumel son nom est assimilé à l'Oued qui le traverse et qui constitue le plus grand Oued du Kebir Rhumel. Ce bassin possède une superficie de 1089 Km<sup>2</sup>, par contre son Oued est long d'environ 123 Km, cet Oued est celui le plus important du bassin, il prend naissance dans les hautes plaines Sétifiennes, entaille les gorges de Constantine jusqu'à la confluence d'Oued Enjat.

## 2. DESCRIPTION PHYSIOGRAPHIQUE :

### 2.1. Lithologie :

La nature de la roche joue un rôle important dans l'influence sur le régime du cours d'eau, la lithologie de notre zone d'étude présente peu de variétés. Ce bassin comporte quatre principales formations de roches.

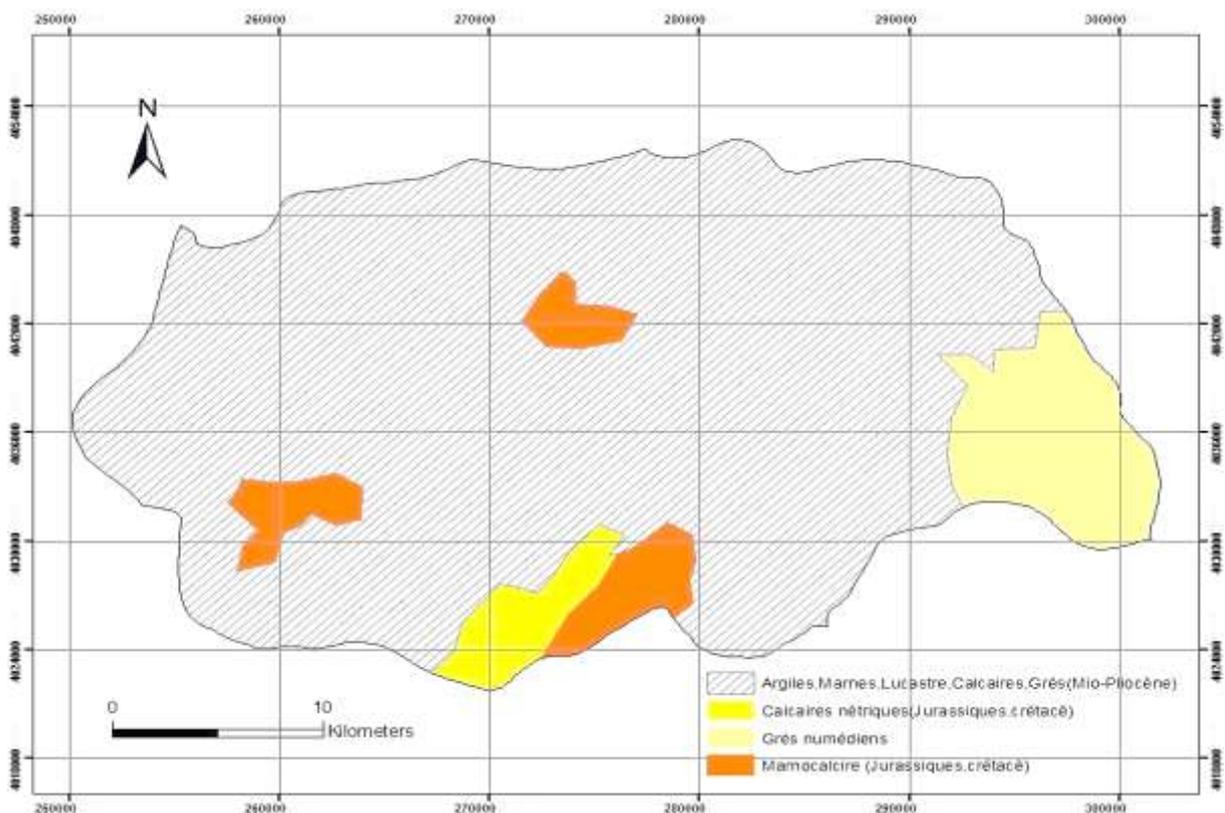
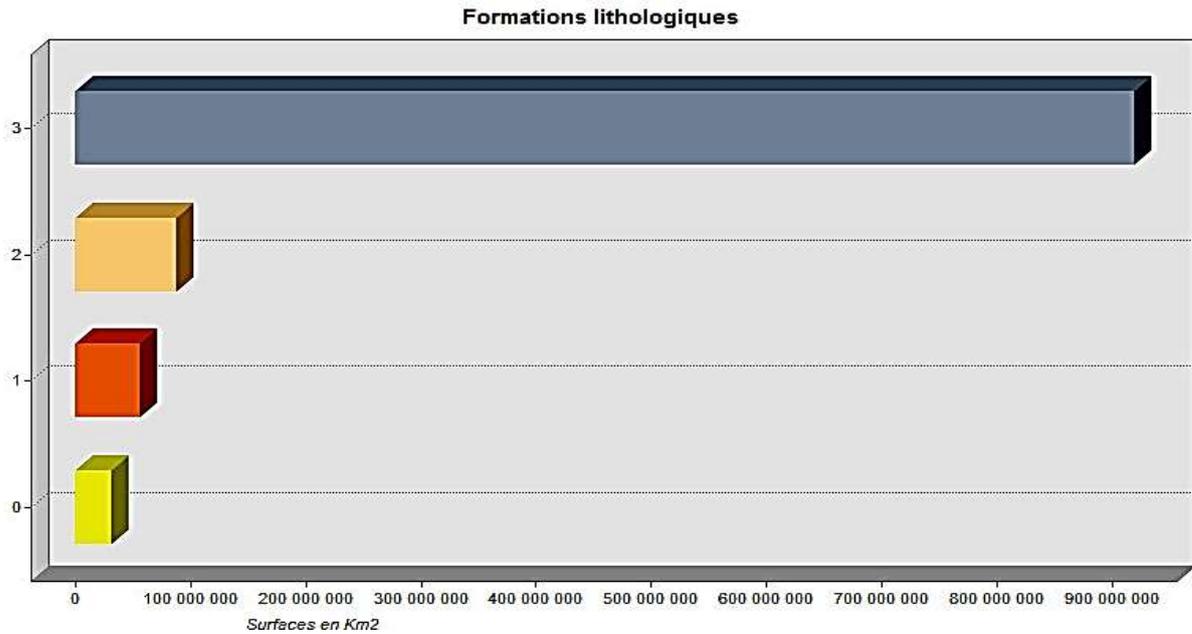


Figure 22 : Carte lithologique du bassin versant de l'Oued Rhumel- Smendou [35].

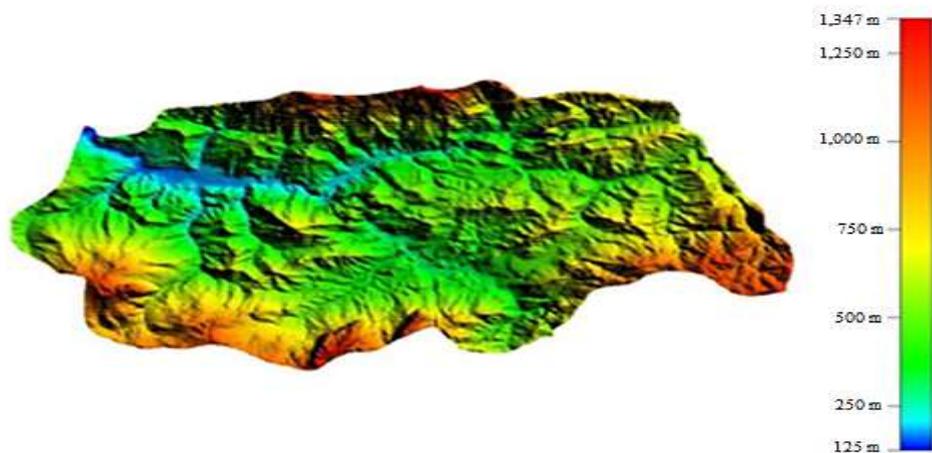


**Figure 23** : Répartitions des surfaces pour chaque formation lithologique [35].

D'après la carte ci-dessous on remarque la formation lithologique du bassin est principalement formée d'Argiles et de des marnes. Un ensemble de grés et de calcaire qui date du jurassique constituent une minorité comme le montre le graphique ci-dessous.

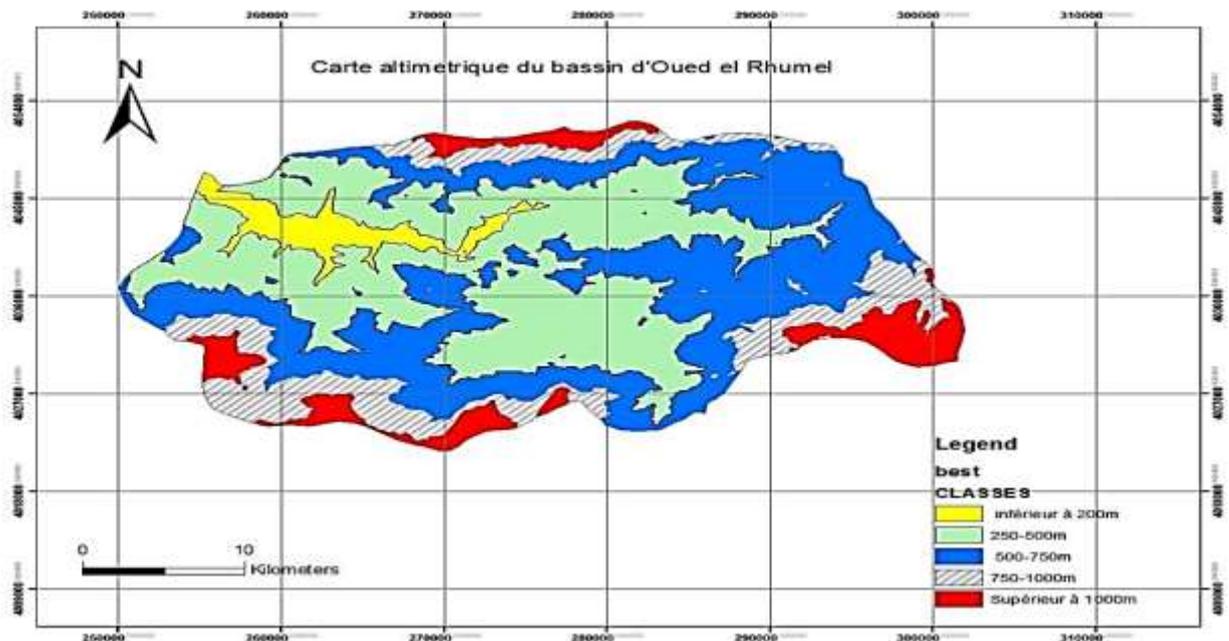
## 2.2. Altimétrie :

D'après la figure ci-dessous le modèle numérique de terrain au niveau du bassin versant de l'Oued El Rhumel-Smendou montre un gradient altimétrique qui varie entre 125m et 1347m.



**Figure 24** : Carte du relief du bassin de l'Oued Rhumel-Smendou [35].

Ceci témoigne d'une variabilité importante des valeurs d'altitude au niveau de notre zone d'étude. Afin de mieux analyser le paramètre altimétrique dans ce bassin nous avons procédé à la classification du gradient altimétrique en plusieurs tranches d'altitude ce qui nous a permis d'établir une carte altimétrique plusieurs tranches d'altitudes qui reflète la situation dans le bassin.

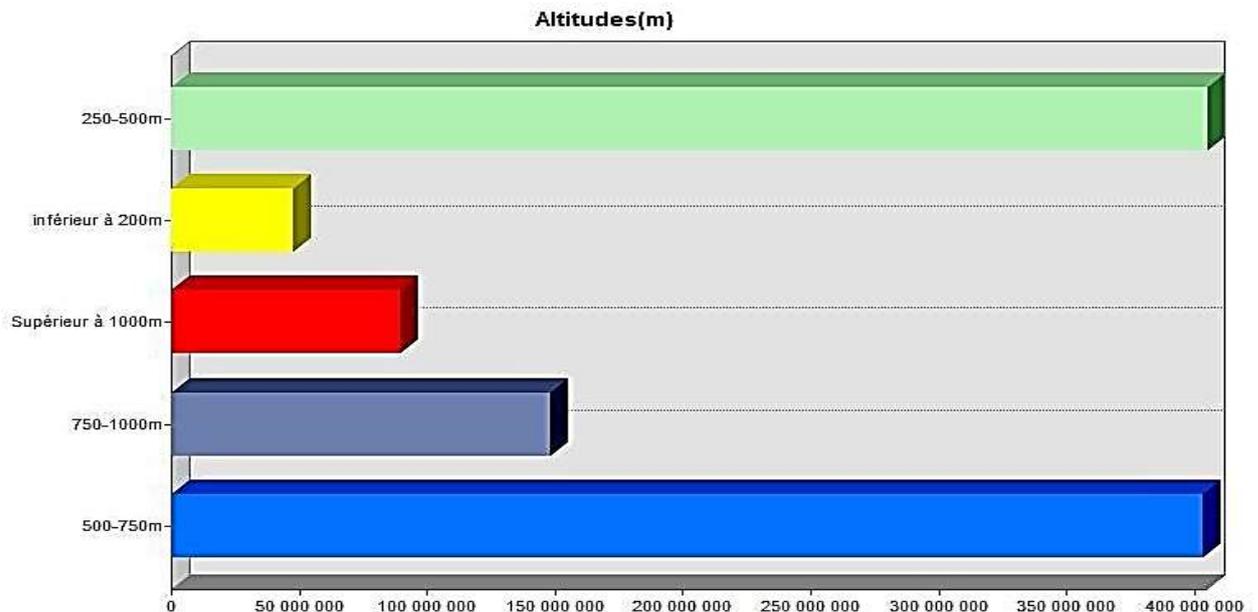


**Figure 25** : Carte du relief du bassin de l'Oued Rhumel-Smendou [35].

D'après la carte altimétrique, on peut dire que les altitudes dans notre zone d'étude sont représentées par 5 importantes classes :

- Une première classe qui caractérise les Altitudes inférieure à 200m,
- Une Deuxième classe qui caractérise les Altitudes entre 250 et 500m,
- Une troisième classe qui caractérise les Altitudes entre 500 et 750m,
- Une quatrième classe qui caractérise les Altitudes entre 750 et 1000m,
- Une cinquième classe qui caractérise les Altitudes supérieurs à 1000m.

Ces classes ont été représentés dans le graphique suivant par rapport aux surfaces qu'elles occupent pour permettre de mieux étudier la morphologie du terrain.



**Figure 26 :** Répartition des surfaces des classe altimétriques sur le bassin versant de l'Oued Rhumel- Smendou [35]

D'après la répartition surfacique de ces classes, nous constatons que la superficie du bassin versant de l'Oued Rhumel est en majorité occupé par des altitudes supérieur à 500 m. Les régions des points culminants qui possèdent des altitudes supérieurs à 1000 m occupent plus de surface que celle des plaines d'altitudes inférieures à 200 m.

### 3. MORPHOLOGIE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED RHUMEL-SMENDOU :

#### 3.1. Introduction :

Le bassin versant fonctionne comme un collecteur de précipitations qui vont se transforme en plusieurs types d'écoulements tout dépend des conditions climatiques, des caractéristiques morpho métriques (forme, relief, altitude, pente, réseau de drainage...etc) et la nature du sol ainsi que le couvert végétal. Les caractéristiques qui interviennent de façon combinée pour expliquer les modalités de l'écoulement, s'appêtent à une analyse quantitative.

#### 3.2. Caractéristiques physiques du bassin :

Le bassin versant est un objet complexe dont l'ensemble des caractéristiques (géométriques, géologiques, physiographiques, humaines, etc...) joueront un rôle non seulement dans la réponse hydrologique du bassin (régime des écoulements) mais aussi, en amont et pour certains d'entre elles (altitude), directement dans le processus de formation de la pluie. Il faut noter

l'existence, à la surface du bassin versant, d'un système longitudinal, le réseau de drainage ou hydrographique, défini comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels.

Permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Ce réseau est plus ou moins développé selon différents facteurs (géologie, climat, pente du terrain, etc...) il ne manque pas dans la littérature scientifique de paramètres quantifiés destinés à mesurer telle ou telle caractéristique des bassins versants. Ces facteurs d'ordre purement géométrique ou physique, s'estiment à aisément à partir de carte topographique ou en recourant à un modèle numérique de terrain.

### 3.3. Caractéristiques morphométriques du bassin :

Pour mieux comprendre le comportement hydrologique du bassin versant de l'Oued Rhumel Smendou, il est impératif de connaître ces caractéristiques morphométriques (forme, relief, altitude, pente, densité de drainage) qui expliquent le cycle de transformation des pluies en écoulements et s'approprient à une analyse quantifiée.

➤ **La surface du bassin versant :**

La surface du bassin égale à 1089 km<sup>2</sup> environ.

➤ **Le périmètre du bassin versant :**

Le périmètre du bassin versant estimé à 170.1 km.

#### 3.3.1. Indice de compacité :

La forme du bassin versant qui influe sur l'écoulement globale et l'allure de l'hydrogramme des pluies est exprimée par l'indice ou le coefficient de compacité.

De Gravellus donné par la formule suivante :

$$C = 0.28 P / \sqrt{S}$$

Avec :

C : Indice de compacité ;

P : Périmètre du bassin versant en km.

S : Superficie du bassin versant en km<sup>2</sup>.

Ce coefficient est égal 1 lorsque le bassin versant est parfaitement circulaire. Il est égal à 1.12 dans le cas d'un bassin versant carré, et il peut atteindre la valeur 3 pour des bassins versants allongés.

Dans notre cas  $C=1.44$  donc le bassin versant de l'Oued Rhumel-Smendou caractérise par la forme allongée. Cette valeur favorise de temps de concentration d'eau de ruissellement.

### 3.3.2. Le rectangle équivalent :

Le rectangle équivalent est défini comme étant le rectangle de longueur (L) et de largeur (B) qui a la même surface (S) même périmètre (P), même indice de compacité (C) et même hypsométrie que le bassin versant étudié.

Ce paramètre facilite la comparaison entre les bassins versants du point de vue de leur influence sur l'écoulement.

$$L = \frac{C \cdot \sqrt{S}}{1.128} \cdot \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.128}{C} \right)^2} \right]$$

Avec :

C : indice de compacité ;

S : Superficie du bassin versant en  $\text{km}^2$  ;

L : longueur du rectangle équivalent en km.

On obtient :

$$L = 68.49 \text{ km}$$

La largeur du rectangle "B" est déterminée en fonction de la surface du bassin versant "S" et la longueur du rectangle "L" :

$$B = \frac{C \cdot \sqrt{S}}{1.128} \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.128}{C} \right)^2} \right]$$

On obtient :

$$B = 15.59 \text{ Km.}$$

### 3.3.3. Longueurs des talwegs :

La longueur du talweg du bassin de l'oued Rhumel-Smendou figure dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 2 :** La longueur du talweg.

	<b>L (Km)</b>	<b>Lp (Km)</b>	<b>Lt (Km)</b>
<b>Oued Rhumel- Smendou</b>	81.74	649.2	263.6

Avec :

**L** : longueur total du cours d'eau en km,

**Lp** : Longueur du talweg permanent en km,

**Lt** : Longueur du talweg temporaire en km.

### 3.3.4. Densité de drainage :

Elle se définit comme étant le rapport de la longueur totale des cours d'eau à la surface du bassin versant. Elle est aussi la somme des densités de drainage temporaire et permanente.

$$D_d = L/S$$

Avec :

**D<sub>d</sub>** : Densité de drainage (Km/Km<sup>2</sup>),

**L** : longueur totale des cours d'eau (Km),

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

On obtient :

$$D_d = 0.84 \text{ Km/Km}^2$$

**Tableau 3 :** Caractéristiques morphométriques de bassin versant de l'Oued Rhumel-Smendou.

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Surface	S	1089	Km <sup>2</sup>
Périmètre	P	170.1	M
Indice de compacité	C	1.44	-
Longueur du rectangle équivalent	Lé	68.49	Km
Largueur du rectangle équivalent	B	15.59	Km
Altitude minimale	H <sub>min</sub>	125	M
Altitude maximale	H <sub>max</sub>	1347	M
Indice de pente de roche	Ip	0.15	-
Longueur du thalweg principal	Loued	160	M
Densité de drainage	Dd	0.84	Km/km <sup>2</sup>
Coefficient de torrentialité	Ct	25.2	-

### 3.3.5. Indice de pentes :

La détermination de la pente topographique permet la comparaison et la classification d'un bassin versant. Ces indices de la pente sont calculés à partir de la connaissance et de la répartition hypsométrique.

#### 3.3.5.1. Indice de pente globale :

Il est défini comme étant le rapport du dénivelé simple et de la longueur du rectangle équivalent.

$$I_g = D/L$$

I<sub>g</sub> : Indice de pente globale en m/km

D : dénivelé simple séparant les altitudes ayant 5% et 95% de la surface du bassin

L : longueur du rectangle équivalent en km

Avec : Altitude à 5% de la surface du bassin = 1118 m et l'Altitude à 95% de la surface du bassin = 295 m.

Ce qui donne :

$$I_g = 12.01 \text{ m/km}$$

### 3.3.5.2. Indice de pente moyenne :

$$I_{moy} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L}$$

Elle ne tient compte pas de la forme de la courbe hypsométrique

$H_{max}$  : altitude maximale du bassin (m) ;

$H_{min}$  : altitude minimale du bassin (m) ;

$L$  : longueur du rectangle équivalent en (m) ;

Ce qui donne :

$$I_{moy} = 17.84 \text{ m}$$

### 3.3.5.3. La dénivelé spécifique :

La dénivelé spécifique ne dépend que de l'hypsométrie et de la forme du bassin versant.

Elle est estimée à partir de la formule suivante :

$$D_s = I_g \sqrt{S}$$

$D_s$  : dénivelé spécifique en m

$I_g$  : Indice de pente globale en m/km

$$D_s = 396.34$$

D'après la deuxième classification de l'ORSTOM (Office de Recherche Scientifique de Territoire d'Outre-Mer), la dénivelé spécifique du bassin de l'Oued Rhumel-Smendou se trouve dans la classe R6, donc on a un relief fort.

**Tableau 4 :** Classification de l'ORSTOM pour différents reliefs.

Classe	Type de relief	Intervalle de DS
R1	Relief très faible	Ds < 10 m
R2	Relief faible	10 m < Ds < 25 m
R3	Relief assez faible	25 m < Ds < 50 m
R4	Relief modéré	50 m < Ds < 100 m
R5	Relief assez fort	100 m < Ds < 250 m
R6	Relief fort	250 m < Ds < 500 m
R7	Relief très fort	Ds > 500 m

**3.3.6. Temps de concentration :**

Le temps nécessaire à l'eau pour s'écouler depuis l'élément hydrologiquement le plus éloigné (en amont) du bassin versant jusqu'à l'exutoire est appelé temps de concentration du bassin. Pour sa détermination on utilise souvent la formule de GIANDOTTI car elle tient compte des paramètres morphologiques utilisés :

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

Tc : temps de concentration (heure) ;

L : Longueur du cours principal du thalweg (L=160km) ;

S : Surface du bassin versant (km<sup>2</sup>) ;

Hmoy : altitude moyenne (m) ;

Hmin : altitude minimale (m).

Avec : Hmoy = 641m. Donc : Tc= 20h 47min

**3.3.7. Vitesse de ruissellement :**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$V_r = \frac{L_p}{T_c}$$

Lp : longueur de talweg principale en Km ;

Tc : temps de concentration en h ;

D'où :  $V_r = 7,81 \text{ Km/h}$ .

#### 4. HYDRO-CLIMATOLOGIE :

Toute étude hydrologique passe principalement par un traitement détaillé des mesures hydro-climatique permettant d'établir le bilan hydrique et par conséquent de comprendre les mécanismes d'alimentation et circulation des eaux de surfaces et souterraines.

Ayant déterminé les caractéristiques du complexe physique du bassin versant de l'Oued Rhumel-Smendou, nous essayons d'étudier les facteurs climatiques de cette région.

De ce fait, l'analyse des facteurs climatiques s'impose. Elle permet de mettre à jour les facteurs les plus importants qui régissent le climat et enfin d'établir le bilan hydrique.

L'établissement d'un bilan hydrique nécessaire pour le fonctionnement d'un système hydraulique de surface, implique la connaissance des paramètres suivants : Les précipitations, l'évaporation, l'infiltration et le ruissellement qui conditionnent ce bilan.

Cette étude climatique débouchera sur un calcul de bilan en exploitant les données météorologique disponible et utilisant la méthode adaptée à la région.

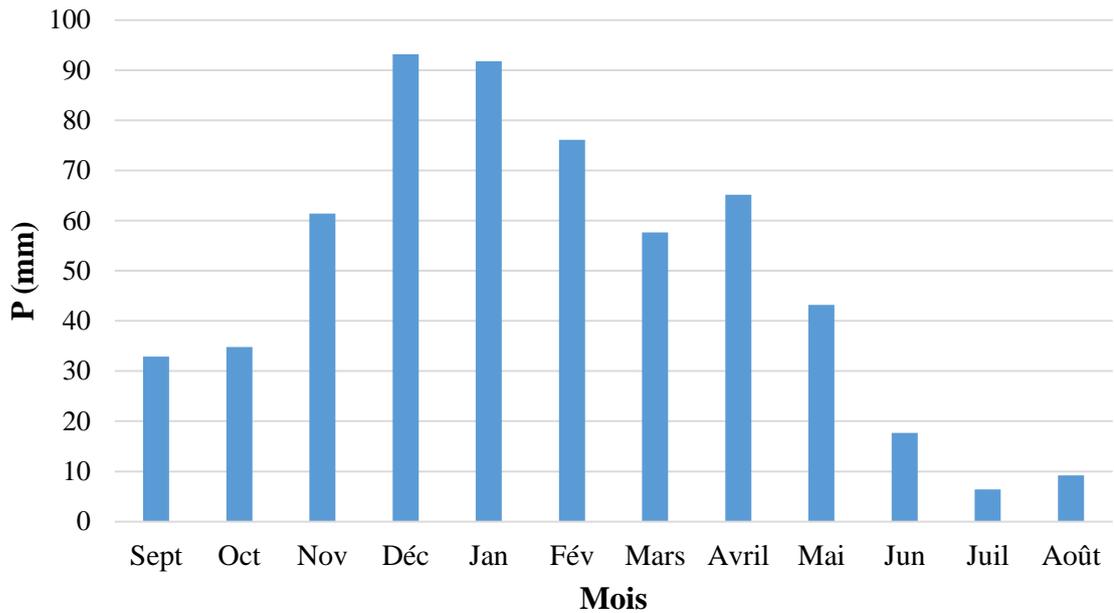
#### 4.1. Caractéristiques hydrologiques :

##### 4.1.1. Précipitation :

Les précipitations constituent une composante essentielle du cycle de l'eau. Elles permettent le renouvellement total ou partiel des nappes par le biais des infiltrations et elles conditionnent l'écoulement saisonnier et le régime des cours d'eaux.

**Tableau 05** : Précipitation moyennes mensuelles à la station d'El Kheneg.  
(1990-2012).

<b>MOIS</b>	<b>Sept</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Déc</b>	<b>Jan</b>	<b>Fév</b>
<b>P (mm)</b>	32,90	34,78	61,39	93,19	91,75	76,13
<b>MOIS</b>	<b>Mars</b>	<b>Avril</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Juil</b>	<b>Août</b>
<b>P (mm)</b>	57,65	65,20	43,19	17,70	6,39	9,24



**Figure 27** : Variations des précipitations moyennes mensuelles pour la station d'EL Kheneg (1990-2012).

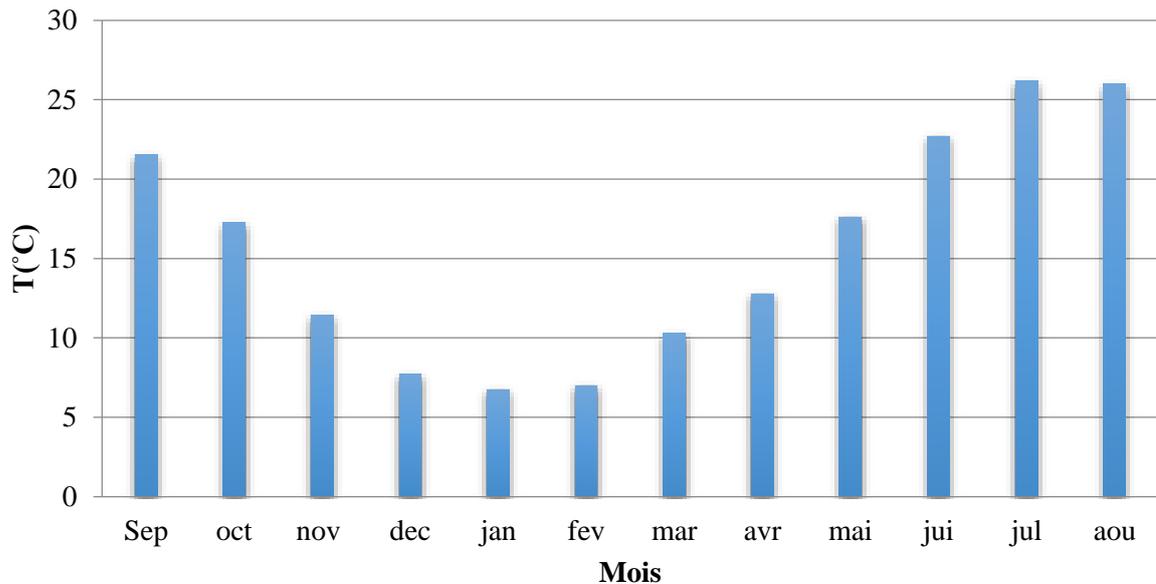
#### 4.1.2. Température :

Les températures ont une grande influence sur l'écoulement ainsi que les données relatives à l'évaporation favorisant le déficit d'écoulement. Nous avons eu recours aux données à la station d'Ain El Bey.

**Tableau 06** : Températures moyennes mensuelles de la station d'Ain El Bey (1990-2012).

<b>MOIS</b>	<b>Sept</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Déc</b>	<b>Jan</b>	<b>Fév</b>
<b>T (°c)</b>	21,51	17,22	11,35	7,73	6,74	7,04
<b>MOIS</b>	<b>Mars</b>	<b>Avril</b>	<b>Mai</b>	<b>Juin</b>	<b>Juil</b>	<b>Août</b>
<b>T (°c)</b>	10,25	12,75	17,67	22,81	26,21	26,08

Selon le tableau 6, on remarque le mois le plus froid est celui de janvier avec une température moyenne de l'ordre de 6.74 °C, et le mois le plus chaud est celui d'Juillet avec une température moyenne de 26.21 °C.



**Figure 28** : Variations des températures moyennes mensuelles pour la station d'Ain El Bey (1990-2012).

#### 4.1.3. Climat :

Joue un rôle capital dans le fonctionnement hydrologique du bassin versant. En plus des paramètres morphogénique de la connaissance des facteurs hydro climatologiques s'avère indispensable pour mieux comprendre les phénomènes d'écoulement superficiel et par là, le rôle régulateur du bassin versant des divers éléments du bilan hydrologique.

- **L'indice d'aridité annuelle :**

Pour déterminer le type du climat utilisant l'indice d'aridité " I " de Demartone qui donne les caractéristiques du climat régional.

Où :

$$I = \frac{P}{T + 10}$$

Avec :

P : Précipitation moyenne annuelle (mm) ;

T : Température moyenne annuelle (C°) ;

I : Indice d'aridité annuelle ;

Selon Demartonne :

$I < 5$  : le climat est hyper-aride.

$5 < I < 7.5$  : le climat est désertique.

$7.5 < I < 10$  : le climat est steppique.

$10 < I < 20$  : le climat est semi-aride.

$20 < I < 30$  : le climat est tempéré.

$I > 30$  : le climat est humide.

La valeur obtenue pour le paramètre I est de 23.01, ce qui implique que le climat de la région est tempéré pour une température moyenne de 15.61°C et une précipitation de 589.50 mm.

- **L'indice d'aridité mensuel :**

L'indice mensuel (i), donné par la formule :

$$i = \frac{12P}{T + 10}$$

Avec :

P : Précipitation moyenne mensuelle (mm).

T : Température moyenne mensuelle (C°).

i : Indice d'aridité mensuel.

**Tableau 07 : Indice mensuel d'aridité.**

<b>MOIS</b>	<b>Sept</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Déc</b>	<b>Jan</b>	<b>Fév</b>
<b>T (°c)</b>	21,51	17,22	11,35	7,73	6,74	7,04
<b>P (mm)</b>	32,90	34,78	61,39	93,19	91,75	76,13
<b>L</b>	12.53	15.33	34.50	63.07	65.77	53.61
<b>MOIS</b>	<b>Mars</b>	<b>Avril</b>	<b>Mai</b>	<b>Juin</b>	<b>Juil</b>	<b>Août</b>
<b>T (°c)</b>	10,25	12,75	17,67	22,81	26,21	26,08
<b>P (mm)</b>	57,65	65,20	43,19	17,70	6,39	9,24
<b>L</b>	34.16	34.39	18.73	6.47	2.12	3.07

Le tableau 7 montre une répartition mensuelle du climat. Les mois de Juillet et Août présentent un climat hyper-aride. Le mois de Juin présente un climat désertique. Les mois de

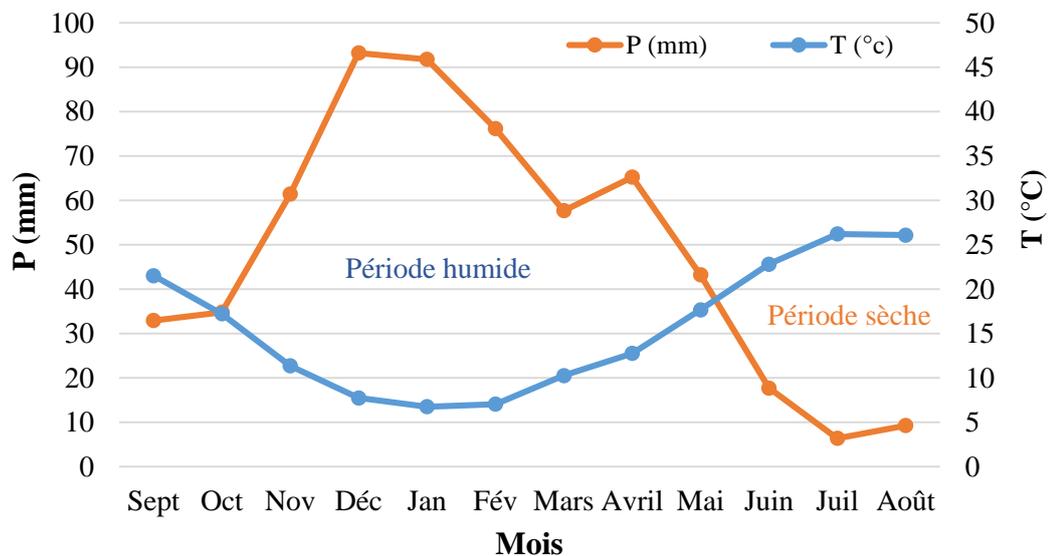
Septembre, octobre et mai jouissent d'un climat semi-aride. Les mois de Novembre, Mars et Avril présentent un climat tempéré alors que le climat humide marque le reste des mois de l'année.

#### 4.1.4. Diagramme Ombrothermique :

Le Diagramme Ombrothermique est la combinaison des températures et des précipitations mensuelles moyennes.

Le Diagramme Ombrothermique illustré dans la figure 29 fait ressortir deux périodes :

- Une période sèche qui s'étend entre le mois de Juin jusqu'au mois de Septembre.
- Une période humide qui dure huit mois donc du mois de Octobre jusqu'au mois de Mai.



**Figure 29 :** Diagramme Ombrothermique (1990-2013).

#### 4.2. Bilan Hydrique :

Les rapports est perte ainsi que la connaissance des variations des réserves en eau dans la méthode du bilan hydrique s'applique principalement pour établir la relation entre partie, le bilan d'eau est calculé par l'évaluation de l'évapotranspiration. Disposant des C.W THORNTHWAITE basée sur notion de RFU (réserve facilement utilisable).

#### 4.2.1. Evapotranspiration :

Dans les études hydrogéologiques, les deux éléments principaux du bilan, évaporation et transpiration sont réunis en un seul :

L'évapotranspiration ou l'évaporation totale (ET) est l'ensemble des phénomènes d'évaporation (phénomène physique) et de transpiration (phénomène biologique).

On distingue :

- L'évapotranspiration potentielle (ETP) concerne le milieu saturé.
- L'évapotranspiration réelle (ETR) concerne le milieu non saturé.

##### ❖ Evapotranspiration potentielle (ETP) :

L'évapotranspiration potentielle correspond à l'évapotranspiration d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour évaporer la quantité d'eau maximale permise par les conditions climatiques.

Pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle nous avons utilisé la formule de THORNTHWAITE qui a établi une correction entre la température moyenne mensuelle et l'évapotranspiration mensuelle.

##### • Méthode de THORNTHWAITE :

$$ETP = 16 \left( 10 \times \frac{T}{I} \right)^a \times K$$

$$a = \left( \frac{1.61}{100} \right) I + 0.5$$

$$I = \sum_{1}^{12} i$$

$$i = \left[ \frac{T}{5} \right]^{1.51}$$

Avec :

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm).

T : Température moyenne mensuelle du mois (°C).

I : Indice thermique annuel.

i : Indice thermique mensuel.

K : Coefficient d'ajustement.

❖ **Évapotranspiration réelle (ETR) :**

On appelle évapotranspiration réelle effective actuelle ou encore déficit d'écoulement (ETR) la somme de l'évaporation et de la transpiration réelle pour une surface donnée et une période définie.

Pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR), nous avons essayé d'estimer l'évapotranspiration réelle par les Méthodes suivantes :

- Méthode de TURC.
- Méthode de COUTAGNE.
- Méthode de THORNTHWAITE.

• **Méthode de TURC :**

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

$$L = 300 + 25 \times T + 0.05 \times T^3$$

Avec :

ETR : Évapotranspiration réelle (mm).

P : Précipitation moyenne annuelle (mm).

T : Température moyenne annuelle (°C).

L : Pouvoir évaporant, est une limite vers laquelle tend l'ETR lorsque P devient grand.

**Tableau 08 :** Résultat de l'ETR par la méthode de Turc.

<b>P (mm)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>L</b>	<b>ETR (mm)</b>
589.50	15.61	880.44	507.68

• **Méthode de THORNTHWAITE :**

Les résultats de calcul du bilan d'eau par la méthode de THORNTHWAITE au niveau de la station d'EL KHENEG sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau 09** : Bilan hydrique selon la méthode de THORNTHWAITE de la station d'El Kheneg (1990-2012).

MOIS	P (mm)	T (°C)	L	K	ETP (mm)	ETR (mm)	RFU (mm)	EXC (mm)	DA
SEP	32.90	21.51	9.11	1.03	101.03	32.90	0	0	68.13
OCT	34.78	17.22	6.50	0.96	64.95	34.78	0	0	30.17
NOV	61.39	11.35	3.46	0.84	28.34	28.34	33.05	0	0
DEC	93.19	7.73	1.93	0.83	14.76	14.76	100	0	0
JAN	91.75	6.74	1.57	0.86	12.18	12.18	100	79.57	0
FEV	76.13	7.04	1.68	0.84	12.78	12.78	100	63.35	0
MAR	57.65	10.25	2.96	1.03	29.32	29.32	100	28.33	0
AVR	65.20	12.75	4.12	1.10	45.07	45.07	100	20.13	0
MAI	43.19	17.67	6.76	1.22	86.17	86.17	57.02	0	0
JUIN	17.70	22.81	9.95	1.23	133.01	74.71	0	0	58.30
JUIL	6.39	26.21	12.28	1.25	170.42	6.39	0	0	164.03
AOU	9.24	26.08	12.19	1.17	158.22	9.24	0	0	148.98
ANNUEL	589.50	Moy = 15.61	72.53	/	856.26	386.64	/	191.38	469.61

#### 4.2.2. Interprétation du bilan d'eau de C.W. THORNTHWAITE :

Le bilan d'eau établi par la méthode de THORNTHWAITE a montré que l'ETP atteint son maximum au mois de Juillet (170.35 mm) et son minimum au mois de janvier (12.18 mm). La reconstitution de la RFU s'effectue au mois d'Octobre et atteint son maximum (100 mm) à partir du mois de Janvier jusqu'au mois d'avril, puis elle commencée à être épuisée, vide complètement au mois de juin.

L'écoulement commence après que le RFU (100 mm) soit janvier et se terminer en Avril avec un maximum au mois de Janvier (79.57 mm) et un minimum au mois d'avril (20.13 mm) l'excédent égal à 191.38 mm représentant 32.46 % des précipitations annuelles, alors que l'ETR est de l'ordre de (386.64 mm) présentant 65.6 % des précipitations annuelles.

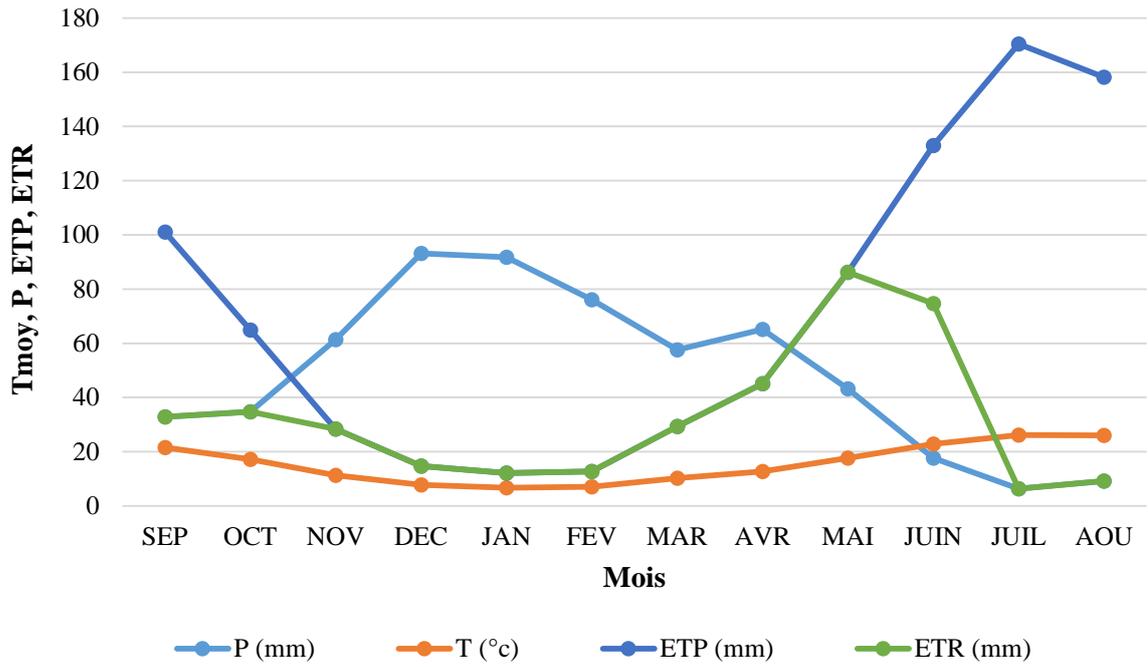


Figure 30 : Moyenne pluriannuelle des éléments climatiques.

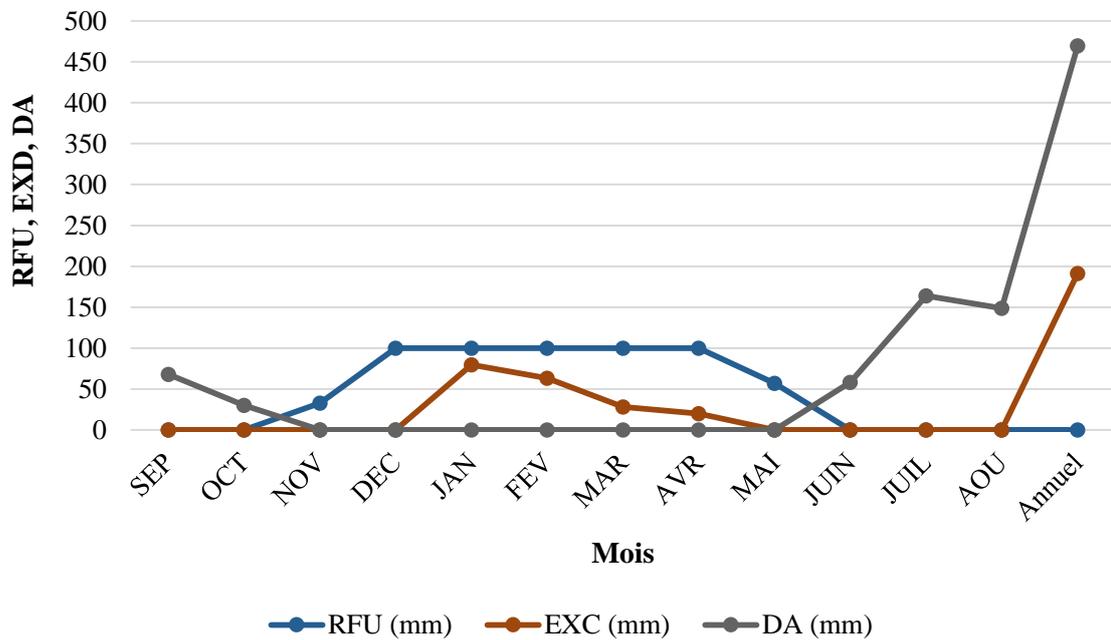


Figure 31 : Bilan de l'eau de C.W THORNTHWAITTE de la station d'El Kheneg.

### 4.2.3 Ruissellement (R) :

Le ruissellement dépend de plusieurs facteurs : nature du sol, pente et végétation, cette dernière a un rôle important dans la diminution du ruissellement. Le coefficient de ruissellement peut être calculé par deux formules :

- Tixeront Berkhalof par Romantchouk (1974), pour  $P > 600$  mm.

$$R = \frac{P^3}{3}$$

- Tixeront Berkhalof, pour  $P < 600$  mm.

$$R = \frac{P^3}{3ETP^2}$$

Avec :

R : Ruissellement (mm).

P : Précipitation moyenne annuelle (mm).

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm).

$$R(\%) = \frac{R \times 100}{P}$$

Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 10 : Résultats du ruissellement.**

<b>P (mm)</b>	<b>ETP (mm)</b>	<b>R (mm)</b>	<b>R (%)</b>
589.50	856.26	93.13	15.79

### 4.2.4 Infiltration (I) :

Pour déterminer l'infiltration on utilise l'équation du bilan hydrologique qui s'écrit :

$$P = ETR + R + I$$

Donc :

$$I = P - ETR - R$$

Avec :

I : Infiltration (mm).

R : Ruissellement (mm).

P : Précipitation moyenne annuelle (mm).

ETR : Evapotranspiration réelle (mm).

Si :  $I > 0$  Les entrées sont supérieures aux sorties.

$I < 0$  Les entrées sont inférieures aux sorties.

$$I(\%) = \frac{I \times 100}{P}$$

Les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau suivant :

**Tableau 11** : Résultats de l'infiltration.

<b>P (mm)</b>	<b>ETR (mm)</b>	<b>R (mm)</b>	<b>I (mm)</b>	<b>I (%)</b>
589.50	386.64	93.13	109.73	18.61

- **Taux d'infiltration ( $\tau$ ) :**

$$\tau = \frac{I}{PE}$$

Avec :

$$PE = P - ETR$$

$\tau$  : Taux d'infiltration (mm)

PE : Pluie efficace (mm).

I : Infiltration (mm).

P : Précipitation moyenne annuelle (mm).

ETR : Evapotranspiration réelle (mm).

**Tableau 12** : Estimation de taux d'infiltration.

<b>P (mm)</b>	<b>ETR (mm)</b>	<b>I (mm)</b>	<b>PE (mm)</b>	<b><math>\tau</math> (mm)</b>
589.50	386.64	109.73	202.86	0.54

## 5. REGIME PLUVIOMETRIQUE DU BASSIN VERSANT :

### 5.1. Critique des données hydro - pluviométrique :

Les données pluviométriques ont été fournies par la station d'El Kheneg pour une période de 1988-2012.

Les relevés pluviométriques journalier font défaut, mais nous disposons des relevés mensuels ainsi qu'annuels.

La continuité et la durée de ces relevés variant selon la station d'El Kheneg, certaines séries montrent des continuités importantes.

Les données des précipitations mensuelles en (mm) qui couvrent la période de septembre 1988 jusqu'au janvier 2012.

### 5.2. Traitements statistiques des données hydro \_ pluviométrique :

Pour le traitement de ces données hydro pluviométriques, nous avons choisi de travailler à différents pas de temps pour aboutir à une comparaison aux échelles mensuels, saisonnière et annuels.

#### 5.2.1. Station de bassin de l'Oued Rhumel-Smondou :

Le bassin de l'Oued Rhumel-Smondou est pourvu de la station hydraulique dont les coordonnées sont les suivantes :

**Tableau 13** : Les coordonnées Lambert de la station d'El Kheneg.

<b>Nom de la station</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
EL KHENEG	838.5	357.45	300

**Paramètre de la série pluviométrique :**

- La moyenne annuelle :

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N}$$

- L'écart type :

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N}}$$

$X_i$  = précipitation annuelle en (mm).

$N$  = nombre d'année d'observation.

- La variance : c'est la puissance carrée de l'écart type.

$$V = \delta^2$$

- Le coefficient de variation :

$$CV = \frac{\delta}{\bar{X}}$$

**5.2.2. Précipitations moyennes annuelles :**

La quantité d'eau reçue par le bassin versant est un élément de base importante pour caractériser son climat.

Les précipitations moyennes annuelles peuvent être déterminées par trois méthodes principales :

- La méthode de la moyenne arithmétique.
- La méthode des polygones de THIESSEN.
- La méthode d'isohyètes.

Pour notre cas nous avons utilisé la méthode arithmétique.

Cette méthode consiste à calculer la moyenne des arithmétiques des valeurs obtenues au niveau de la station étudiées.

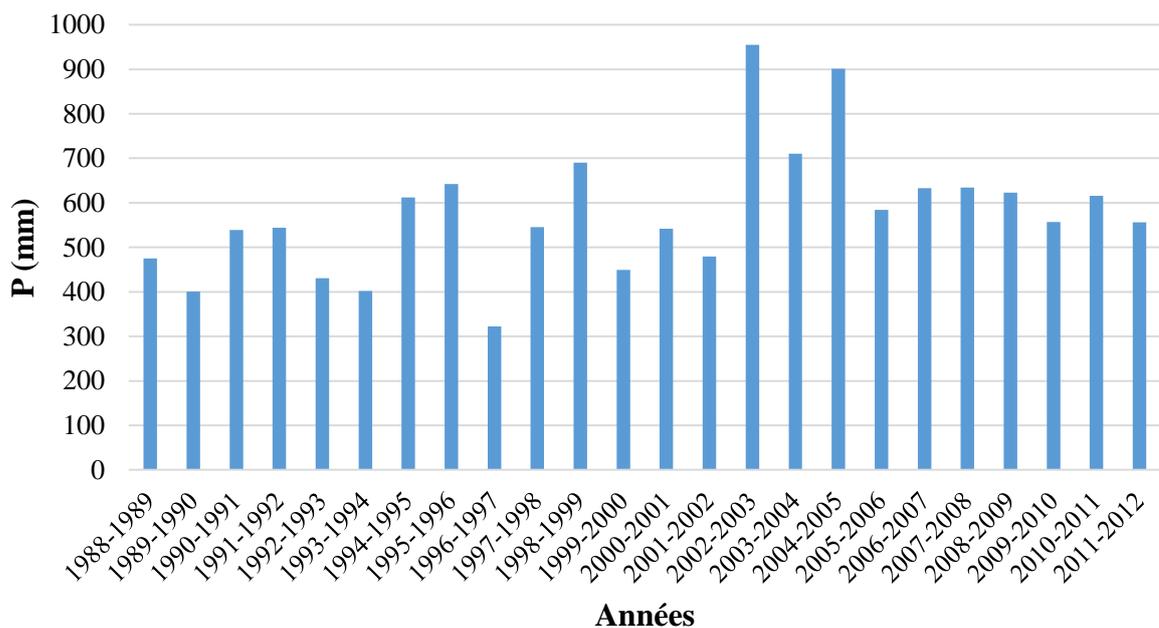
• **Méthode arithmétique :**

La méthode la plus simple consiste à calculer la moyenne arithmétique des hauteurs des précipitations, enregistrées sur la station d'El Kheneg, son efficacité est meilleur pour petits bassins ou l'influence de l'altitude, de l'exposition de l'attitude sur les précipitations est partout identique.

Les résultats de calcul des précipitations moyennes annuelles sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau 14 :** Répartitions des précipitations moyennes annuelles de la station d'El Kheneg.

Station	Période d'observation	Précipitation annuelle
EL KHENEG	1988-2012	576.87



**Figure 32 :** Histogramme des précipitations moyennes annuelles de la station d'El Kheneg (1988-2012).

L'interprétation de l'histogramme fait ressortir, que d'une manière générale la précipitation se caractérise par leur irrégularité interannuelle.

La figure 32 montre que les précipitations varient d'une année à l'autre pour la période (1988-2012) d'une moyenne interannuelle de 576.87mm.

On observe des années pluvieuses dont la hauteur dépasse largement la moyenne à savoir les années : 1994-1995, 1995-1996, 1998-1999, 2002-2003, 2003-2004, 2004-2005, 2005-2006, 2006-2007, 2007-2008, 2008-2009, 2010-2011 et d'autre de pluviosité très faible, telles: 1988-1989, 1989-1990, 1990-1991, 1991-1992, 1992-1993, 1996-1997, 1997-1998, 1999-2000, 2001-2002, 2009-2010, 2011-2012.

Les précipitations montrent donc une irrégularité interannuelle frappante.

Le maximum de pluviométrie a été observé en 2002-2003 avec une valeur de 955.3 mm, et alors que le minimum a été enregistré en 1996-1997 avec une valeur 322.4 mm.

### 5.2.3. Coefficient pluviométrique :

Le coefficient pluviométrique (CP) correspond à l'évolution interannuelle des précipitations et permet de différencier les années excédentaires ( $CP > 1$ ) des années déficitaires ( $CP < 1$ ). Le coefficient pluviométrique est donné par la formule suivante :

$$CP = \frac{P}{\bar{P}}$$

Avec :

P : Pluviométrie de l'année considérée.

$\bar{P}$  : Pluviométrie moyenne pour la période d'étude, qui est donnée par l'équation suivante :

$$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum P_i$$

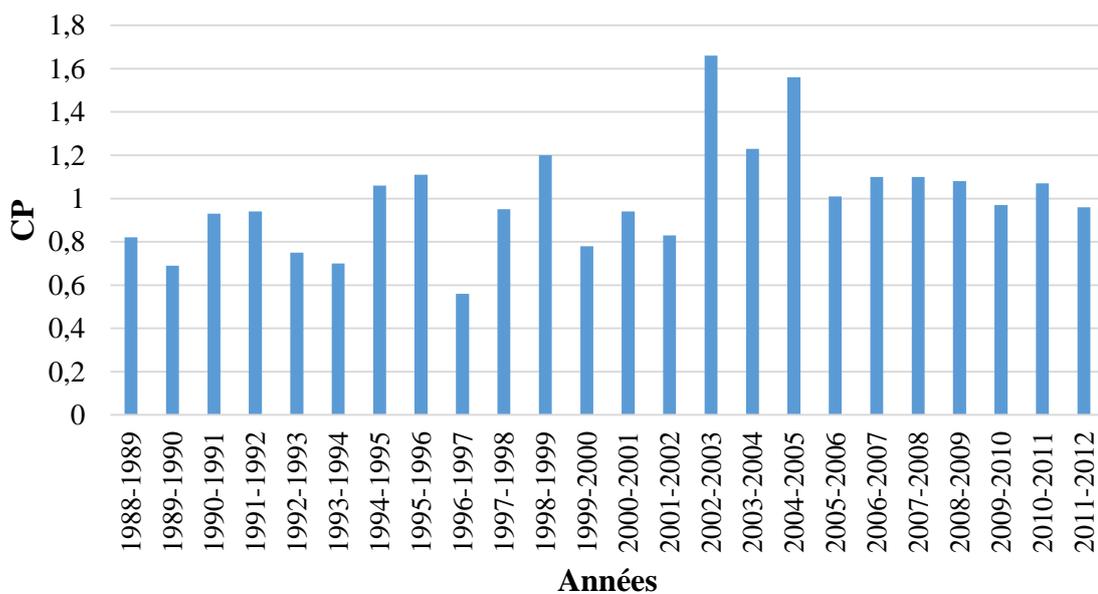
$\bar{P} = 576.87$  mm.

Où :  $i = 1 \div 24$  et  $N = 24$

**Tableau 15** : Evolution du coefficient pluviométrique (1988-2012).

Année	P (mm)	CP	Type de l'année	Année	P (mm)	CP	Type de l'année
1988-1989	475.3	0.82	D	2000-2001	542.1	0.94	D
1989-1990	400.7	0.69	D	2001-2002	479.1	0.83	D
1990-1991	538.9	0.93	D	2002-2003	955.3	1.66	E
1991-1992	543.7	0.94	D	2003-2004	710.6	1.23	E
1992-1993	430.7	0.75	D	2004-2005	901.2	1.56	E
1993-1994	402.2	0.70	D	2005-2006	584.4	1.01	E
1994-1995	612.2	1.06	E	2006-2007	632.9	1.10	E
1995-1996	642.3	1.11	E	2007-2008	634.2	1.10	E
1996-1997	322.4	0.56	D	2008-2009	622.7	1.08	E
1997-1998	545.2	0.95	D	2009-2010	557.2	0.97	D
1998-1999	690.3	1.20	E	2010-2011	615.4	1.07	E
1999-2000	449.5	0.78	D	2011-2012	556.4	0.96	D

**E** : excédentaire, **D** : déficitaire.



**Figure 33** : Les variations des coefficients pluviométriques à la station d'El Kheneg (1988-2012).

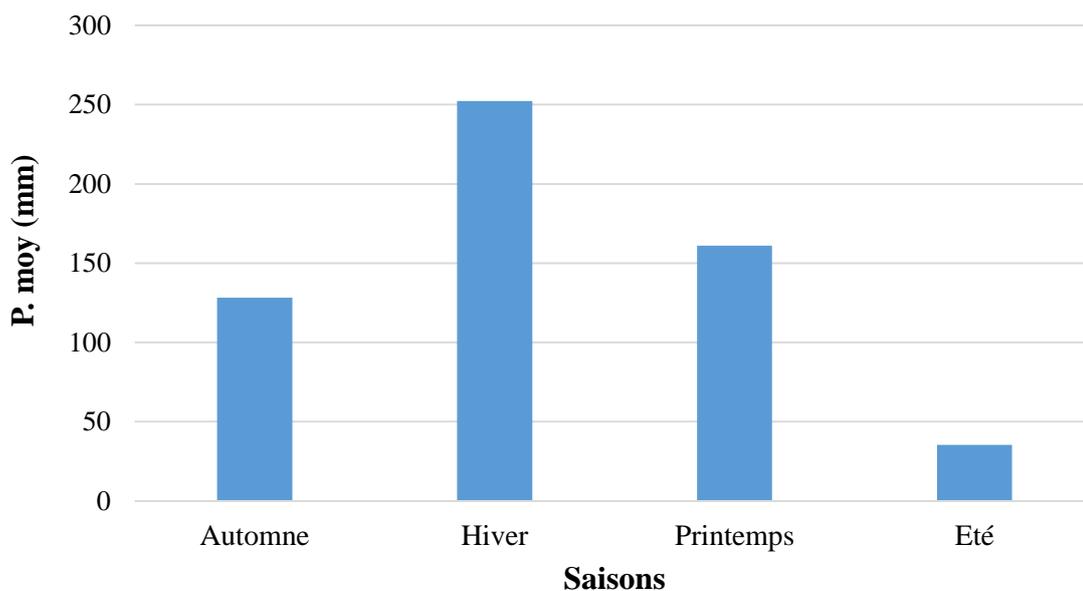
D'après ce diagramme, on remarque que les années excédentaires de la station d'El Kheneg sont légèrement supérieures que les années déficitaires.

#### 5.2.4. Précipitations moyennes saisonnières :

**Tableau 16** : Précipitations saisonnières (1988-2012).

Saison	Automne			Hiver		
Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév
<b>P.moy mensuelle</b>	33.45	34.52	60.19	92.61	88.70	71.03
<b>P.moy saisonnière</b>	128.15			252.34		
Saison	Printemps			Eté		
Mois	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
<b>P.moy mensuelle</b>	55.57	63.48	41.93	19.03	6.46	9.91
<b>P.moy saisonnière</b>	160.97			35.41		

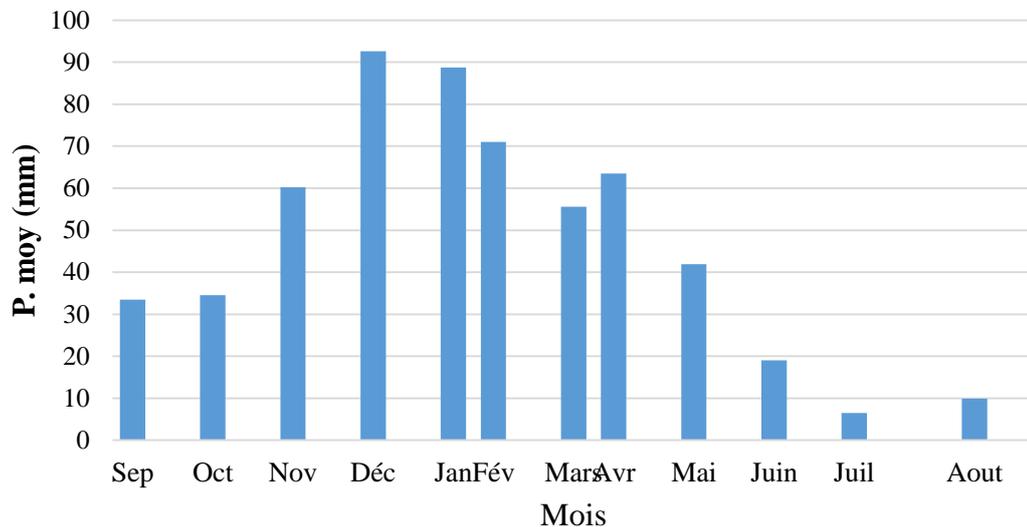
Les précipitations saisonnières pour la période étudiée, se caractérisent par le fait que toutes les saisons de l'année participent aux précipitations annuelles, avec un taux variable.



**Figure 34** : Histogramme des précipitations moyennes saisonnières interannuelles de la station d'El Kheneg (1988-2012).

On observe que l'Hiver est la saison la plus pluvieuse avec précipitation maximale 252.34 mm est après le printemps, et l'automne. On remarque aussi que l'Eté qui consiste la saison sèche avec précipitation minimale de 35.41 mm.

### 5.2.5. Précipitations moyennes mensuelles :



**Figure 35 :** Histogramme des précipitations moyennes mensuelles interannuelles de la station d'El Kheneg (1988-2012).

D'après la figure 35, on remarque que les mois de Novembre, Décembre, Janvier, Février, Mars, Avril dépassent la moyenne, par contre le mois de Septembre, Octobre, Mai, Juin, Juillet, Août qui correspondent l'inférieur à la moyenne mensuelle.

L'analyse de la figure relative à la variation des précipitations mensuelles montre que le début des précipitations est enregistré avec une précipitation maximale de mois de Décembre (92.61mm), alors que le minimum enregistré au mois de Juillet (6.46 mm).

La précipitation moyenne mensuelle est obtenue de la manière suivante :

$$\bar{P} = \frac{\sum P_i}{N}$$

Avec :

$P_i$  = la hauteur de la pluie mensuelle exprimée en mm.

$N$  = nombre de mois au cours de l'année.

- **Ecart type :**

Il s'obtient de la manière suivante, et il exprime la variabilité du paramètre en question autour la moyenne.

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum(P - \bar{P})^2}{n}}$$

Avec :

$\delta$  : Ecart-type.

P : Précipitation mensuelle.

$\bar{P}$  : Précipitation moyenne mensuelle.

- **Coefficient de variation :**

Ce paramètre traduit l'ampleur de variation du paramètre entre le minimum et maximum, il est défini à l'aide de la formule suivante :

$$CV = \frac{\delta}{\bar{P}}$$

Avec :

$\delta$  : Ecart-type.

P : Précipitation moyenne mensuelle.

**Tableau 17 :** L'écart type et le coefficient de variation des pluies mensuelles.

MOIS	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév
<b>ECART TYPE</b>	31,20	24,22	49,91	50,41	64,35	47,67
<b>CV</b>	0,93	0,70	0,83	0,54	0,73	0,67
MOIS	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août
<b>ECART TYPE</b>	33,81	40,57	29,68	20,12	8,17	10,00
<b>CV</b>	0,61	0,64	0,71	1,06	1,26	1,01

Les coefficients de variations (Tableau 17), varient entre 0.54 et 1.26 montre que les mois les plus secs enregistrent des coefficients supérieurs (Juin et Juillet) en revanche les mois humide démontrent des coefficients de variations inférieurs.

## **6. CONCLUSION :**

Les précipitations dans le bassin versant d'Oued Rhumel-Smendou varient entre (300-1000 mm).

La précipitation moyenne annuelle est de l'ordre de 576.87 mm.

D'après les calculs des précipitations moyennes saisonnières on trouve que la saison la plus pluvieuse est l'Hiver avec une précipitation maximale (92.61 mm) dans le mois de Décembre par contre l'Eté est la saison sèche avec une précipitation minimale (6.46mm) dans le mois de juillet.

## *Chapitre 4*

### *Résultats et discussions*

## 1. INTRODUCTION :

La corrélation entre les pluies et les débits pour la mise en évidence de part des pluies et des débits afin de mieux comprendre la réponse hydrologique des bassins. Nous allons effectuer des corrélations à des pas de temps mensuel et annuel.

Sur les graphiques, les débits mensuels et les hauteurs de pluie moyennes mensuels forment un nuage de point incliné.

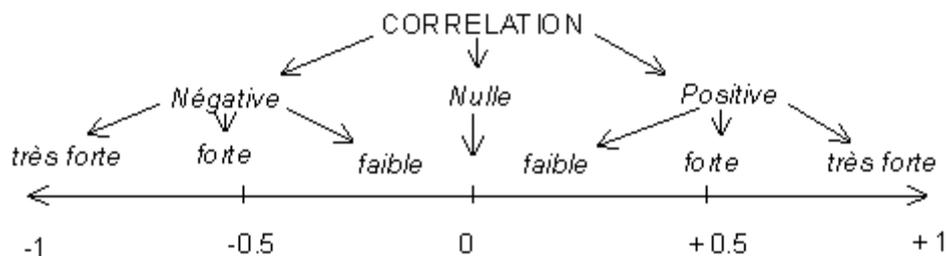
Un coefficient de corrélation est affecté à chaque droite, il montre la relation entre les deux paramètres étudiés.

L'existence d'une corrélation linéaire entre deux variables ayant été décelée graphiquement, on se doit de mesurer l'intensité de cette corrélation.

La mesure de corrélation peut se faire au coefficient de corrélation « R ».

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Le coefficient de corrélation varie de -1 à +1. Son interprétation est la suivante :



- **R= -1** : la corrélation entre les deux variables est négative et parfaite (relation fonctionnelle entre y et x).
- **R=1** : la corrélation entre les deux variables est positive et parfaite (relation fonctionnelle entre y et x).
- **R=0** : les deux variables sont indépendantes.
- **0< R <1** : plus la valeur de R est proche de 1, plus l'hypothèse d'une corrélation entre x et y envisageable.

## 2. CORRELATION ENTRE LES PRECIPITATIONS ET LES DEBITS MOYENS ANNUELS :

Le tableau 18 montre les différents résultats du coefficient de corrélation et les modèles qui relient les paramètres pluies- débits.

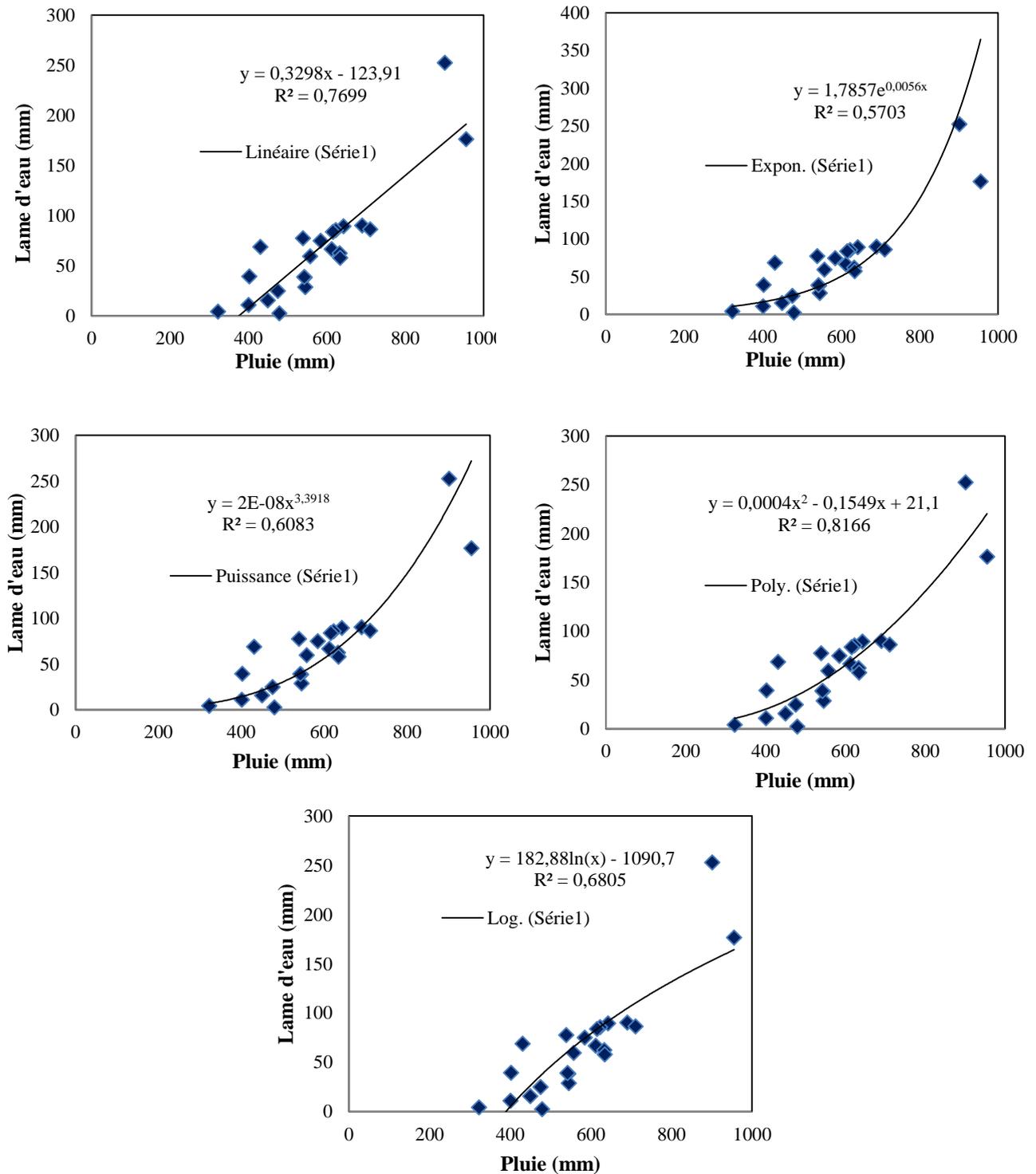


Figure 36 : Corrélation Pluie-Débit au pas de temps annuel (1988-2011).

**Tableau 18 :** Résultats des différentes corrélations entre les deux paramètres pluie et la lame d'eau écoulée annuelle (1988/2011).

Type de regression	Coefficient de corrélation R
Linéaire	R = 0,88
Exponentielle	R = 0,75
Logarithmique	R = 0,82
Polynomiale	R = 0,90
Puissance	R = 0,78

On remarque que la corrélation entre les données annuelles (pluies et les lames d'eau écoulées) donne des coefficients de corrélation moyenne comprise entre 0.75 et 0.90 pour les différents types de relations choisies. La corrélation débit-pluie à l'échelle annuelle est très bonne puisque son coefficient est proche de 1.

Les précipitations sont étroitement liées aux débits, seule la pluie qui contribue à l'écoulement au niveau de l'exutoire du bassin.

Les figures de corrélation montrent, que les débits augmentent quand les précipitations augmentent et que tous les couples de point P-Q forment un nuage autour de droit de régression.

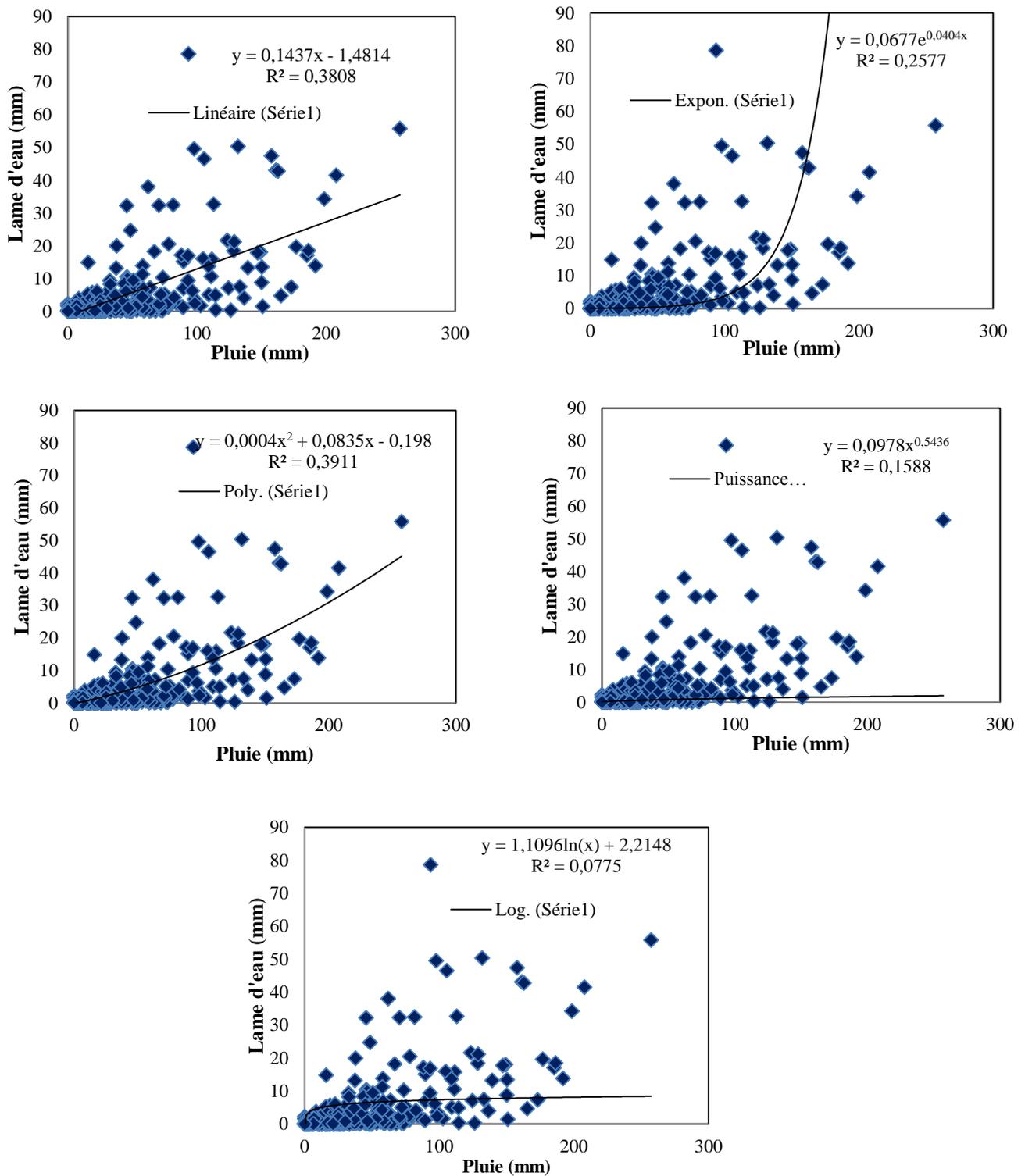
### 3. CORRELATION ENTRE LES PRECIPITATIONS ET LES DEBITS MOYENS MENSUELS :

Nous avons utilisé des séries des données mensuelles sur une période de 1988 à 2011.

Le tableau 19, présente les différentes corrélations pluie et lame d'eau écoulée mensuelles. Les résultats obtenus, permettent de constater que la corrélation mensuelle donne des coefficients moyens compris entre 0.27 et 0.62 pour les différents types de relations choisies.

**Tableau 19 :** Résultats des différentes corrélations entre les pluies et les lames d'eau écoulées mensuelles.

Type de regression	Coefficient de corrélation
Linéaire	R = 0,61
Polynomiale	R = 0,62
Exponentielle	R = 0,51
Puissance	R = 0,51
Logarithmique	R = 0,27



**Figure 37 :** Corrélation Pluie-Debit au pas de temps mensuel (1988-2010).

Les corrélations entre les pluies et les lames d'eau écoulées donnent des relations mensuelles non significatives avec des coefficients de corrélation inférieures à 0.7. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'écoulement enregistré dans le mois K ne correspond pas forcément aux pluies

tombées au même mois et que les écoulements de surface peuvent en effet être soutenus par les écoulements souterrains dus aux pluies du mois ou des mois précédents.

L'examen des tableaux (1,2) et les figures (1 et 2), montre que les corrélations entre les lames d'eau écoulées et les pluies donnent des coefficients de corrélation (R) au pas de temps annuel supérieur à ceux calculés au pas de temps mensuel. La fonction polynomiale reste tout de même la plus adaptée avec les différents pas de temps adoptés.

#### 4. SEPARATION DES COMPOSANTES DE L'HYDROGRAMME :

##### 4.1. Présentation du programme :

Une macro en Visual basic sous MS Excel, nous a été aimablement fournie par le Pr. Kristijan Posavec de l'université de Zagreb (Croatie) pour construire une courbe maitresse de récession (MRC) en utilisant **Matching strip method** pour l'analyse des courbes de récessions.

Après avoir défini la période de traitement de données et le stockage de l'ensemble de données dans une feuille de calcul, la première étape de calcul est la segmentation des séries chronologiques dans laquelle la série continue, est divisé en courts segments correspondant à des événements individuels de la récession.

Les segments de récession sont ensuite triés de rang du plus haut au plus bas en fonction de la valeur initiale de chaque segment de la récession est suivi de la date de conversion qui convertit le temps absolu en temps relative qui égal à zéro au début de chaque segment.

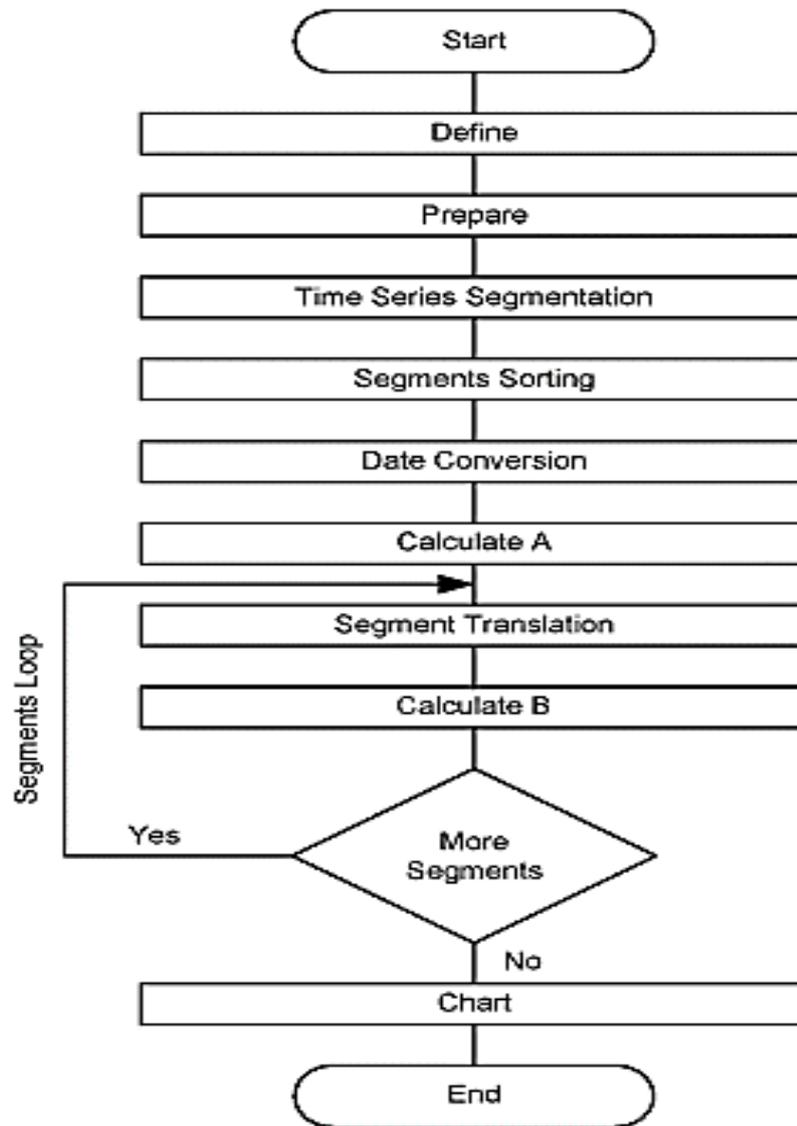
L'organigramme de calcul est le suivant :

Le segment de la récession avec la plus grande valeur initiale, ci-après dénommé le segment première de la récession, est testé avec cinq différents modèles de régression (les lignes de tendance) pour ajuster les segments individuels de la récession de leurs position correctes dans MRC disponibles en format Excel soit :

- Linéaire ( $y = ax + b$ ),
- Logarithmique ( $y = a \ln x + b$ ),
- Puissance ( $y = bx^a$ ),
- Exponentielle ( $y = be^{ax}$ ).

Il est noté que  $y$  désigne le niveau des eaux souterraines et  $x$  le temps

Le modèle qui correspond le mieux au premier segment de la récession est choisi et désigné comme la courbe de régression en premier.



**Figure 38 :** Structure du programme.

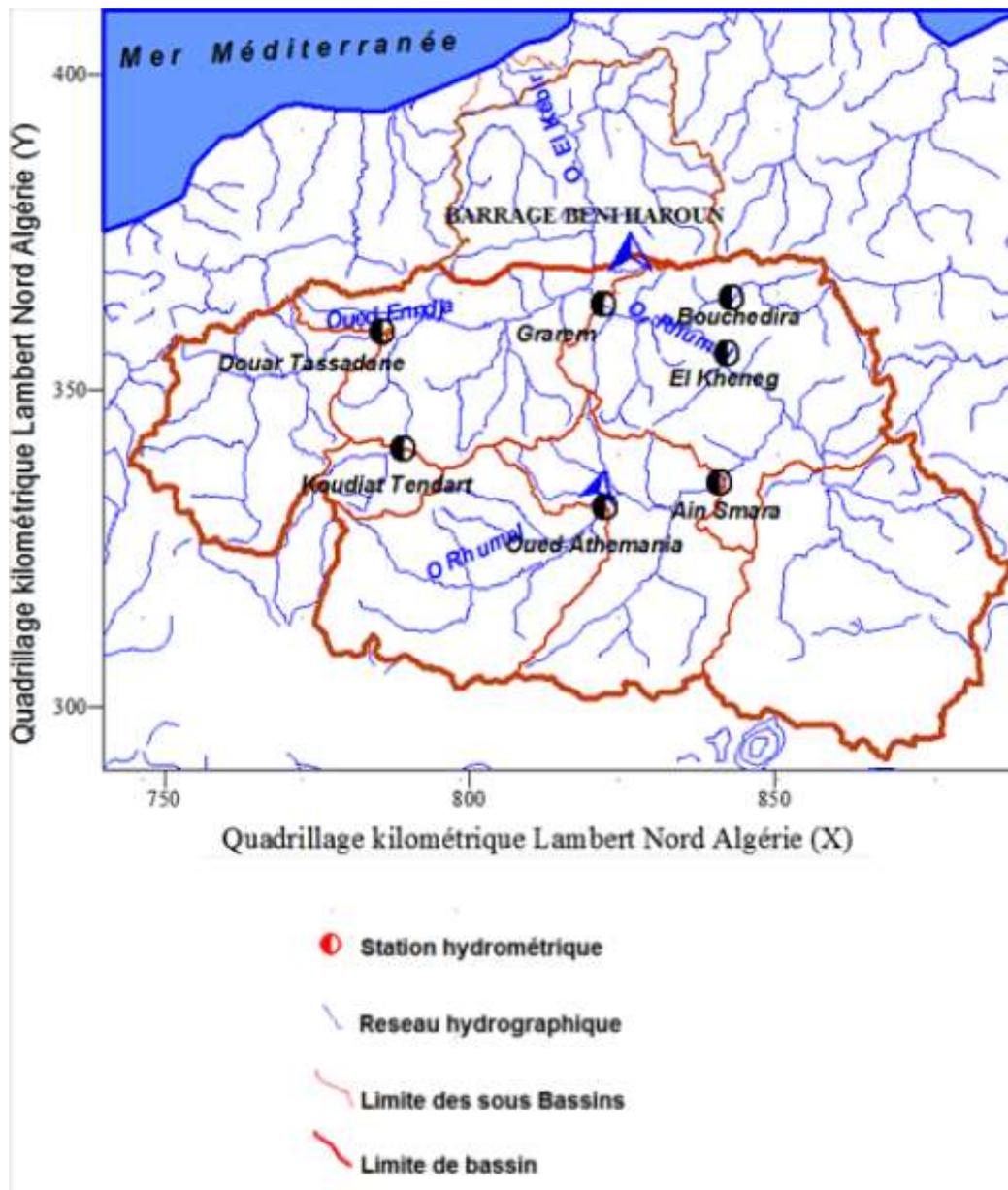
Le critère utilisé dans le programme pour sélectionner le modèle le plus approprié est le coefficient de détermination  $R^2$ . Avec les valeurs de la gamme  $R^2$  entre 0 et 1 et indiquer la façon dont la ligne de tendance décrit les données. La ligne de tendance est plus fiable lorsque  $R^2$  est proche de 1.

## 5. CARACTERISTIQUE DES STATIONS HYDROMETRIQUES :

Selon la disponibilité et la fiabilité des données 03 stations hydrométriques ont été retenues dans le cadre de cette étude, leur répartition géographique sur le site du bassin de l'Oued Smendou est représentée sur la figure ci-après :

**Tableau 20** : Caractéristique des stations hydrométrique retenues.

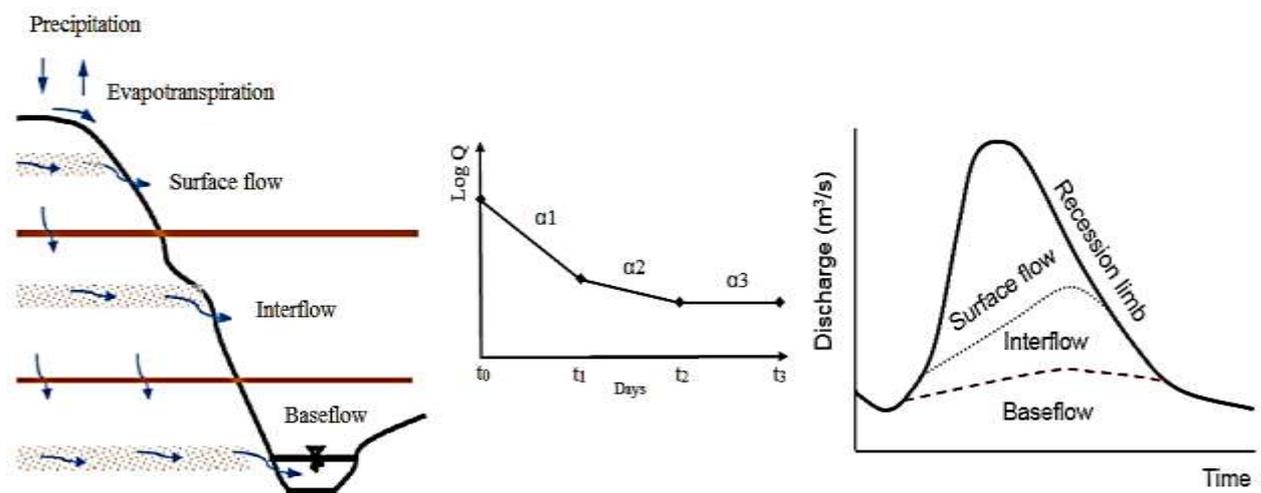
Station	Code	X	Y	Période
Bouchdira	100602	821.993	332.078	1972-2010
El kheneg	100620	847.209	351.327	1984-2003
Grarem	100601	821.532	363.572	1973-2001

**Figure 39** : Les stations hydrométriques du bassin versant de l'oued Rhumel-Endja jusqu'au Barrage Béni Haroun [37].

## 6. MISE EN PLACE D'UNE PROCEDURE ANALYTIQUE DE SEPARATION DES COMPOSANTES DE L'ÉCOULEMENT FONDE SUR LA CONSTANTE DE RECESSION K :

Nous l'avons fondée sur la séparation des hydrogrammes de crue, sachant qu'ils sont constitués d'une branche montante souvent très redressée, et d'une branche descendante, moins inclinée et d'allure concave.

Leur séparation fait apparaître les phases de ruissellement et d'écoulement, et, pour l'ensemble de nos travaux, nous avons adopté la méthode du Matching strip pour faire la décomposition en deux et en trois composantes, on se base sur les valeurs typiques de la constante de récession  $K$  pour caractériser le type d'écoulement pendant la crue.

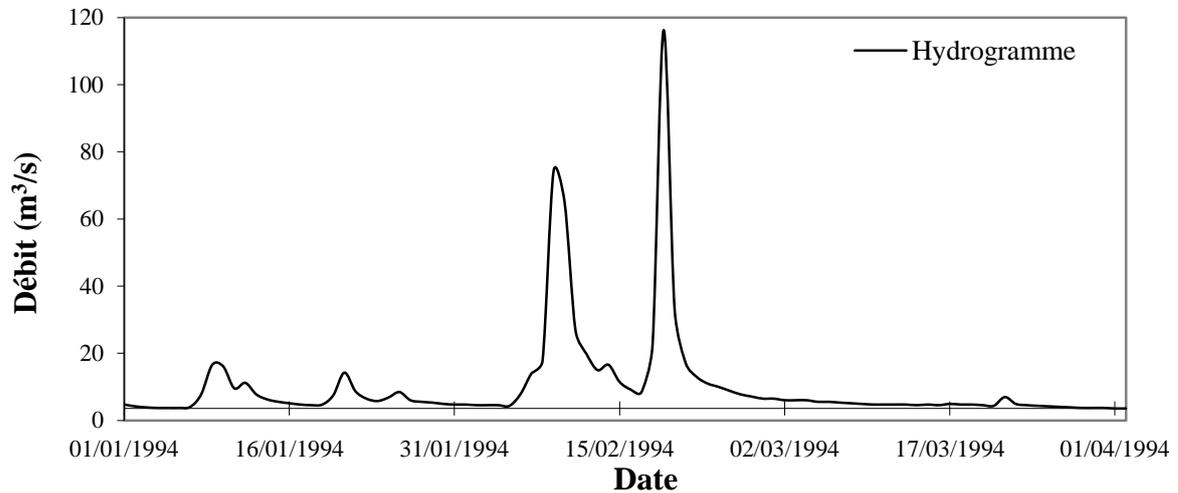


**Figure 40** : procédure de séparation des composantes de l'écoulement à partir de la courbe de récession.

L'emploi de cette procédure permet d'extraire successivement une composante de ruissellement superficiel, puis d'écoulement de subsurface et enfin, une composante d'écoulement souterrain. Ce mode de décomposition peut largement surestimer la contribution du ruissellement superficiel à la crue. Il s'agit d'un problème qui reste relativement secondaire, tant que l'objectif de l'hydrologue est la reconstitution ou la prévision des débits.

### 6.1. Séparation de l'hydrogramme des crues du 01/01/1994 à la station de Grarem :

Dans cette analyse nous essayons de retrouver la composition et l'origine des écoulements de chaque crue. A cet effet, nous prenons une période des crues du 01/01/1994 au 02/04/1994 qui contient plusieurs pics successifs de crue enregistré à la station de Grarem.



**Figure 41** : Hydrogramme enregistré du 01/01/1994 au 02/04/1994 à la station de Grarem.

La procédure de séparation de l'hydrogramme des crues s'est faite en deux façons :

1. Séparation en deux composantes
2. Séparation en trois composantes

Les résultats sont comme suit :

La figure 42 montre la séparation des courbes de récession du crue en deux composantes (2 segment de récession) indiquent deux sorties totalement différent, la ligne noire du premier segment représente la composante de ruissellement de surface avec une valeur de  $K_1 = 0.69$  ( $\alpha_1=0.376$ ), et la ligne bleu avec une valeur de  $K_2 = 0.97$  ( $\alpha_2=0.0352$ ) représente la composante de l'écoulement de base.

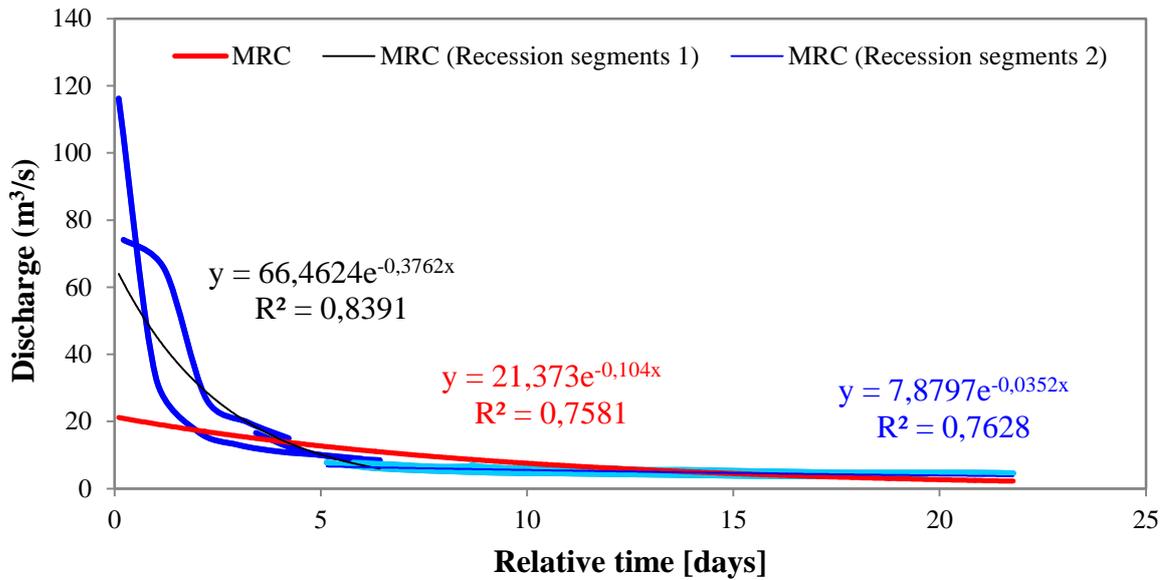


Figure 42 : Séparation des courbes de récession en deux composantes à la station de Grarem.

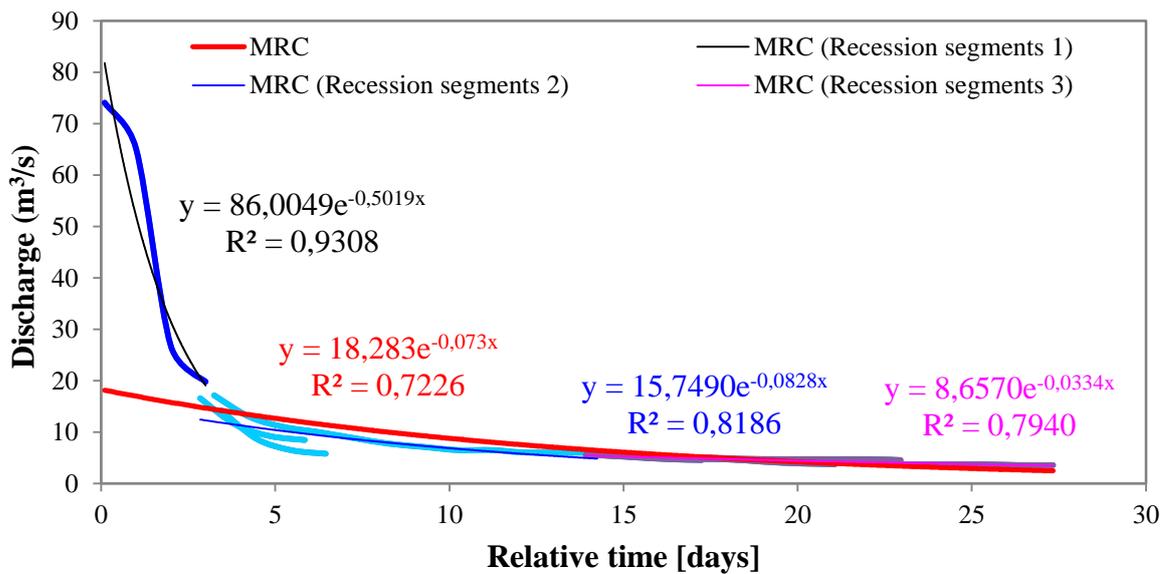
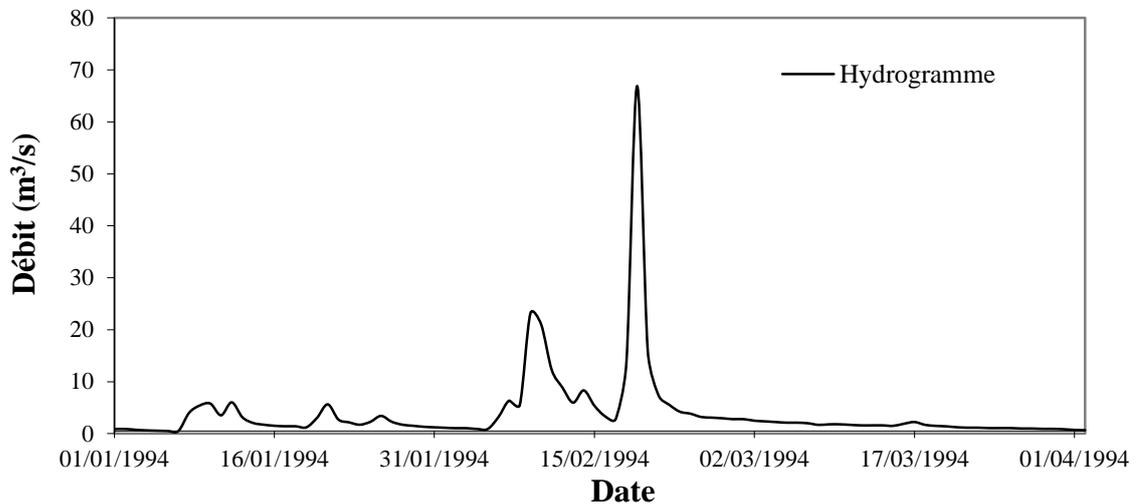


Figure 43 : Séparation des courbes de récession en trois composantes à la station de Grarem.

La figure 43 montre la séparation des courbes de récession en trois composantes (3 segment de récession) est le résultat de trois différents type de l'écoulement à savoir : le ruissellement de surface, l'écoulement subsurface et l'écoulement de base selon les valeurs typiques de la constante de récession K.

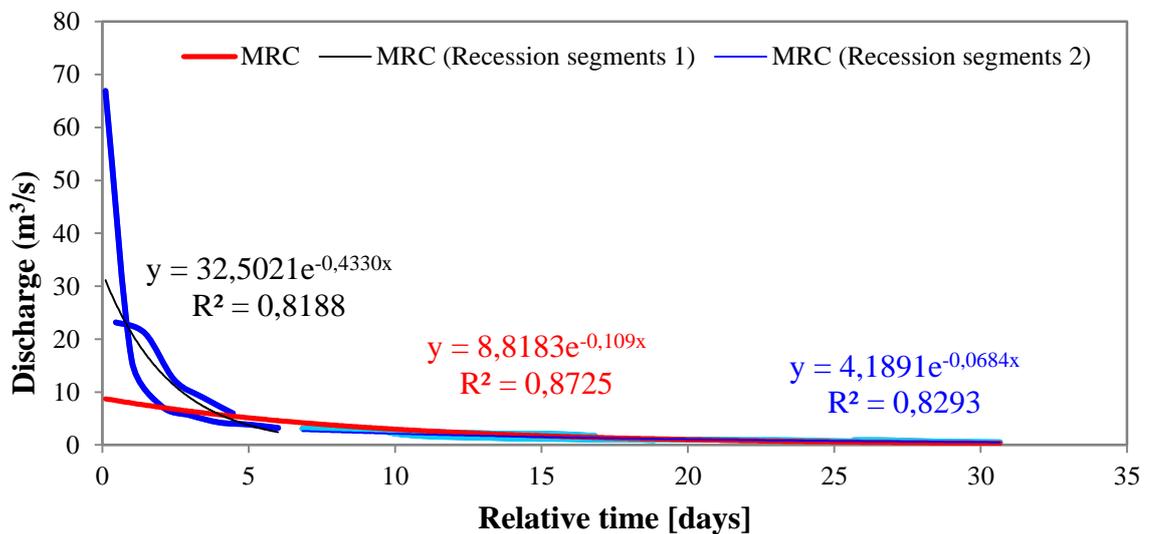
## 6.2. Séparation de l'hydrogramme des crues du 01/01/1994 à la station de Bouchdira :

Dans cette analyse nous essayons de faire connaître la contribution de chaque composante de l'écoulement dans la formation de ces crues, durant la même période du 01/01/1994 au 02/04/1994 enregistré à la station de Bouchdira.



**Figure 44 :** Hydrogramme enregistré du 01/01/1994 au 02/04/1994 à la station de Bouchdira.

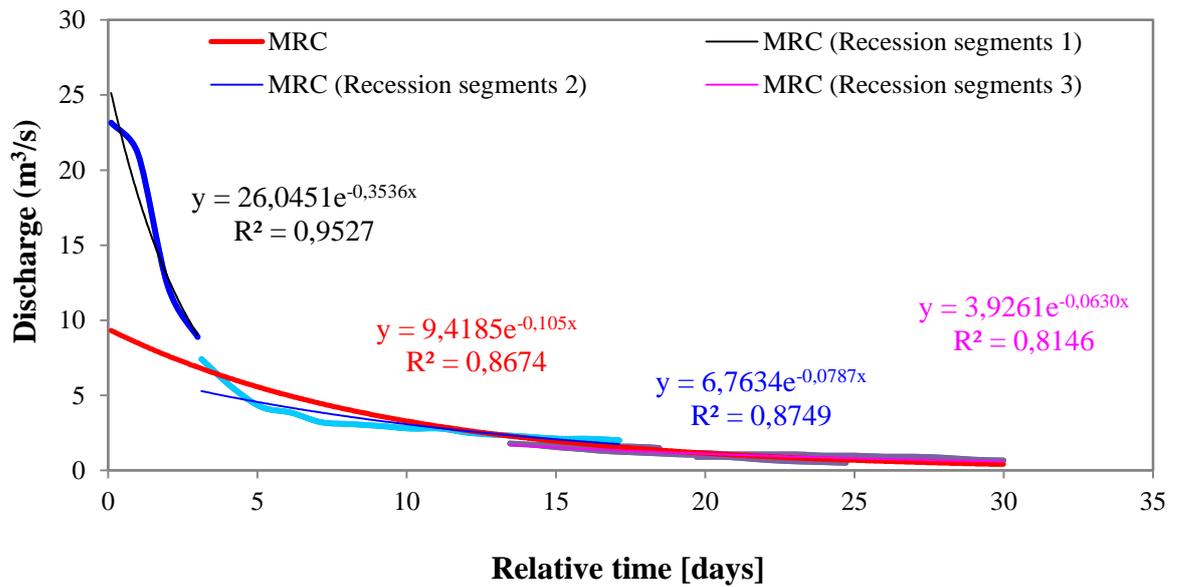
Les résultats de la séparation des crues du 01/01/1994 au 02/04/1994 en deux et en trois composantes sont illustrés dans les figures 45 et 46.



**Figure 45 :** Séparation des courbes de récession en deux composantes à la station de Bouchdira.

La figure 45 montre deux courbes de récession contient une composante différente à celle de la station de Bouchdira, la ligne noire du premier segment représente la composante du ruissellement de surface avec une valeur de  $K_1 = 0.65$ , et la ligne bleu avec une valeur de  $K_2 =$

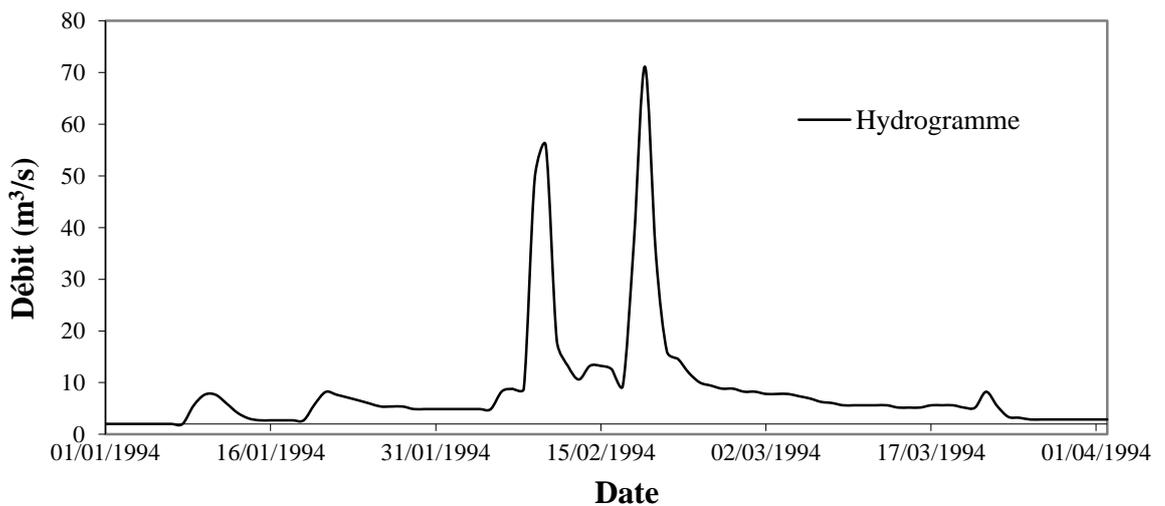
0.93 représente la composante de l'écoulement de subsurface en absence de l'écoulement de base. Cela démontre un processus différent de formation de ces crues.



**Figure 46 :** Séparation des courbes de récession en trois composantes à la station de Bouchdira.

La figure 46 illustre le résultat de trois composantes de l'écoulement : ruissellement de surface, écoulement de subsurface et écoulement de base selon les valeurs typiques de la constante de récession K.

**6.3. Séparation de l'hydrogramme des crues du 01/01/1994 à la station El kheneg :**



**Figure 47 :** Hydrogramme enregistré du 01/01/1994 au 02/04/1994 à la station El kheneg.

Dans cette analyse nous essayons de faire connaître la contribution de chaque composante de l'écoulement dans la formation de ces crues, durant la même période du 01/01/1994 au 02/04/1994 enregistré à la station El kheneg.

Les résultats de la séparation des crues du 01/01/1994 au 02/04/1994 en deux et en trois composantes sont illustrés dans les figures 48 et 49.

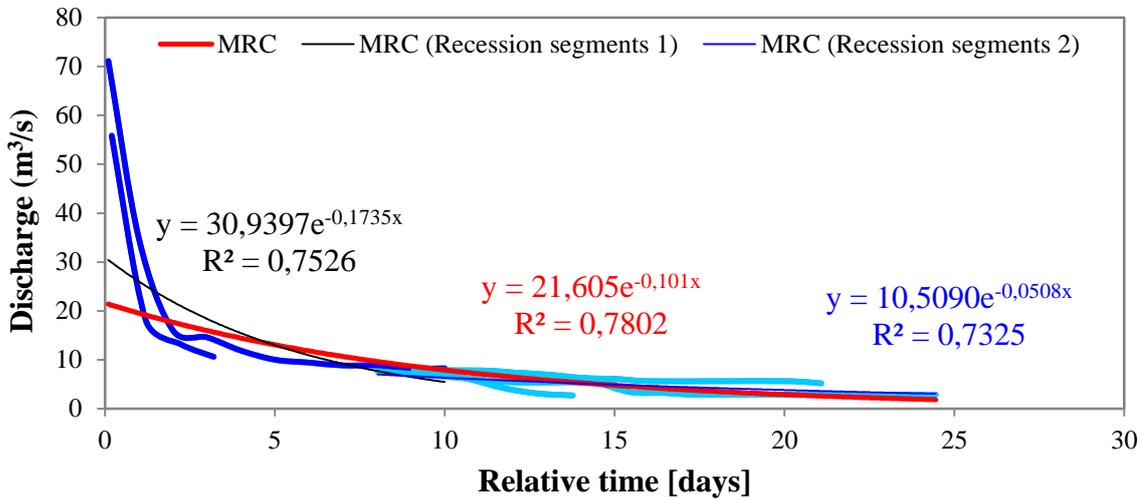


Figure 48 : Séparation des courbes de récession en deux composantes à la station El kheneg.

La figure 48 montre deux courbes de récession contient une composante différente à celle de la station de El kheneg, la ligne noire du premier segment représente la composante du ruissellement de surface avec une valeur de  $K_1 = 0.84$ , et la ligne bleu avec une valeur de  $K_2 = 0.95$  représente la composante de l'écoulement de base en absence de l'écoulement de subsurface. Cela démontre aussi un processus différent de formation de ces crues.

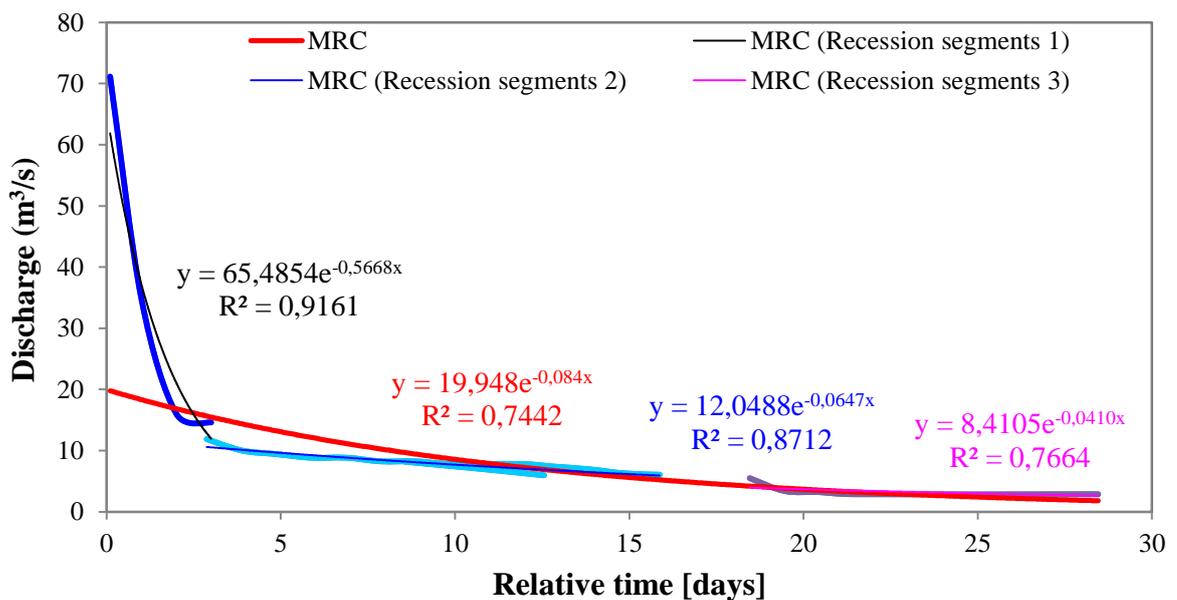


Figure 49 : Séparation des courbes de récession en trois composantes à la station El kheneg.

La figure 49 illustre le résultat de trois composantes de l'écoulement : ruissellement de surface, écoulement de subsurface et écoulement de base selon les valeurs typiques de la constante de récession  $K$ .

Les résultats du paramètre de la courbe de récession  $K$  estimées par la technique MRC sont regroupés dans les tableaux 21, 22 et 23, respectivement.

**Tableau 21** : Paramètres des courbes de récession à la station Bouchdira durant le période (1972/2010).

N°	Evènement de crue		Paramètre de la courbe de récession			
	Début	Fin	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$K_1$	$K_2$
1	01/01/1972	14/05/1972	0.355	0.162	0.701	0.851
2	01/01/1973	23/05/1973	0.397	0.066	0.672	0.936
3	01/01/1974	31/12/1974	0.188	0.064	0.829	0.938
4	01/01/1975	06/05/1975	0.252	0.052	0.778	0.949
5	01/01/1976	04/06/1976	0.284	0.040	0.753	0.961
6	01/01/1977	16/05/1977	0.104	0.016	0.901	0.984
7	01/01/1978	19/06/1978	0.219	0.063	0.804	0.939
8	01/01/1979	13/05/1979	0.370	0.073	0.690	0.930
9	19/02/1980	22/04/1980	0.172	0.085	0.842	0.919
10	22/02/1981	30/04/1981	0.423	0.098	0.655	0.907
11	01/01/1982	09/05/1982	0.371	0.145	0.690	0.865
12	14/02/1983	22/05/1983	0.214	0.055	0.808	0.946
13	13/01/1984	25/02/1984	0.294	0.094	0.745	0.910
14	01/01/1985	16/06/1985	0.286	0.048	0.751	0.953
15	25/11/1986	24/12/1986	0.539	0.117	0.583	0.890
16	01/01/1987	27/05/1987	0.278	0.131	0.757	0.877
17	01/01/1988	26/04/1988	0.243	0.056	0.785	0.945
18	01/01/1989	02/06/1989	0.268	0.049	0.765	0.952
19	01/01/1990	03/03/1990	0.174	0.052	0.840	0.949
20	01/01/1991	13/07/1991	0.183	0.101	0.832	0.904
21	01/01/1992	19/05/1992	0.345	0.129	0.708	0.879
22	01/01/1993	04/05/1993	0.124	0.036	0.883	0.965
23	01/01/1994	02/04/1994	0.433	0.068	0.649	0.934
24	05/01/1995	24/03/1995	0.184	0.099	0.832	0.906

25	01/01/1996	14/05/1996	0.267	0.147	0.765	0.863
26	01/01/1997	30/06/1997	0.259	0.024	0.772	0.977
27	01/01/1998	21/04/1998	0.339	0.051	0.713	0.950
28	01/01/1999	31/12/1999	0.195	0.113	0.823	0.893
29	27/05/2000	23/06/2000	0.485	0.180	0.616	0.835
30	01/01/2001	15/03/2001	0.448	0.163	0.639	0.850
31	01/01/2002	31/12/2002	0.345	0.152	0.708	0.859
32	01/01/2003	16/05/2003	0.346	0.134	0.707	0.875
33	01/01/2004	22/03/2004	0.240	0.119	0.787	0.887
34	01/01/2005	23/05/2005	0.286	0.091	0.751	0.913
35	01/01/2006	08/07/2006	0.152	0.051	0.859	0.950
36	01/01/2007	02/06/2007	0.291	0.124	0.747	0.883
37	20/01/2008	08/05/2008	0.177	0.036	0.838	0.965
38	01/01/2009	31/12/2009	0.151	0.020	0.860	0.980
39	01/01/2010	16/04/2010	0.206	0.033	0.81	0.97

**Tableau 22 :** Paramètres des courbes de récession à la station d'El Grem durant le période (1973/2001).

N°	Evènement de crue		Paramètre de la courbe de récession			
	Début	Fin	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$K_1$	$K_2$
1	01/01/1973	04/06/1973	0.309	0.037	0.734	0.963
2	01/01/1974	06/06/1974	0.141	0.055	0.868	0.946
3	01/01/1975	03/05/1975	0.161	0.029	0.851	0.971
4	01/01/1976	15/06/1976	0.629	0.055	0.533	0.946
5	01/01/1977	20/07/1977	0.084	0.044	0.919	0.957
6	01/01/1978	24/07/1978	0.122	0.015	0.884	0.985
7	11/03/1979	31/05/1979	0.230	0.034	0.794	0.966
8	01/01/1980	17/07/1980	0.153	0.025	0.858	0.975
9	01/01/1981	24/06/1981	0.258	0.054	0.772	0.947
10	01/01/1982	19/03/1982	0.327	0.161	0.721	0.851
11	01/01/1983	31/12/1983	0.896	0.130	0.408	0.877
12	01/01/1984	31/12/1984	0.123	0.017	0.884	0.983
13	01/01/1985	04/05/1985	0.402	0.084	0.669	0.919
14	01/01/1986	31/12/1986	0.194	0.106	0.823	0.899

15	01/01/1987	29/03/1987	0.383	0.052	0.681	0.949
16	01/01/1988	26/04/1988	0.215	0.025	0.806	0.975
17	01/01/1989	27/05/1989	0.191	0.026	0.825	0.973
18	01/01/1990	19/07/1990	0.091	0.046	0.912	0.955
19	01/01/1991	13/05/1991	0.317	0.041	0.728	0.960
20	16/03/1992	25/06/1992	0.376	0.055	0.687	0.946
21	01/01/1993	05/05/1993	0.164	0.053	0.848	0.948
22	01/01/1994	02/04/1994	0.376	0.035	0.686	0.965
23	01/01/1995	06/06/1995	0.159	0.024	0.853	0.976
24	01/01/1996	10/06/1996	0.228	0.042	0.796	0.959
25	01/01/1997	29/06/1997	0.071	0.031	0.931	0.969
26	01/01/1998	15/04/1998	0.371	0.038	0.690	0.963
27	01/01/1999	22/05/1999	0.179	0.080	0.836	0.923
28	24/04/2000	30/07/2000	0.279	0.043	0.756	0.957
29	01/01/2001	30/04/2001	0.439	0.017	0.644	0.983

**Tableau 23 :** Paramètres des courbes de récession à la station El Kheneg durant le période (1984/2003).

N°	Evènement de crue		Paramètre de la courbe de récession			
	Début	Fin	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$K_1$	$K_2$
1	19/01/1984	01/04/1984	0.208	0.018	0.812	0.982
2	01/02/1985	03/05/1985	0.202	0.046	0.817	0.955
3	01/01/1986	31/12/1986	0.178	0.068	0.837	0.935
4	19/01/1987	29/03/1987	0.220	0.076	0.802	0.927
5	01/01/1988	25/04/1988	0.083	0.027	0.920	0.973
6	01/01/1989	06/07/1989	0.076	0.013	0.927	0.988
7	01/01/1990	31/12/1990	0.144	0.056	0.866	0.945
8	01/01/1991	11/05/1991	0.172	0.070	0.842	0.932
9	18/03/1992	22/05/1992	0.273	0.039	0.761	0.962
10	01/01/1993	04/05/1993	0.080	0.050	0.923	0.951
11	01/01/1994	02/04/1994	0.174	0.051	0.841	0.950
12	01/01/1995	05/06/1995	0.106	0.032	0.900	0.969
13	01/01/1996	04/07/1996	0.245	0.056	0.782	0.946
14	10/08/1997	22/10/1997	0.534	0.087	0.587	0.917

15	23/10/1998	20/12/1998	0.593	0.039	0.552	0.961
16	01/01/1999	31/07/1999	0.075	0.051	0.928	0.950
17	01/01/2000	24/10/2000	0.453	0.071	0.636	0.931
18	01/01/2001	18/03/2001	0.625	0.096	0.535	0.909
19	01/01/2002	31/12/2002	0.741	0.119	0.477	0.888
20	01/01/2003	31/12/2003	0.410	0.150	0.664	0.861

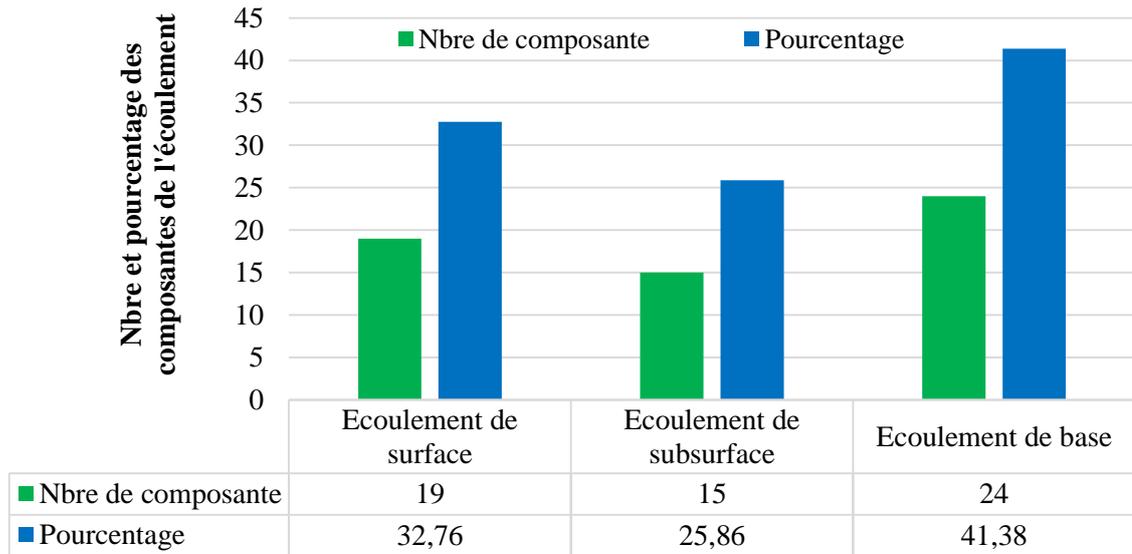


Figure 50 : Nombre et pourcentage des composantes de l'hydrogramme de crue à la station d'El Grarem.

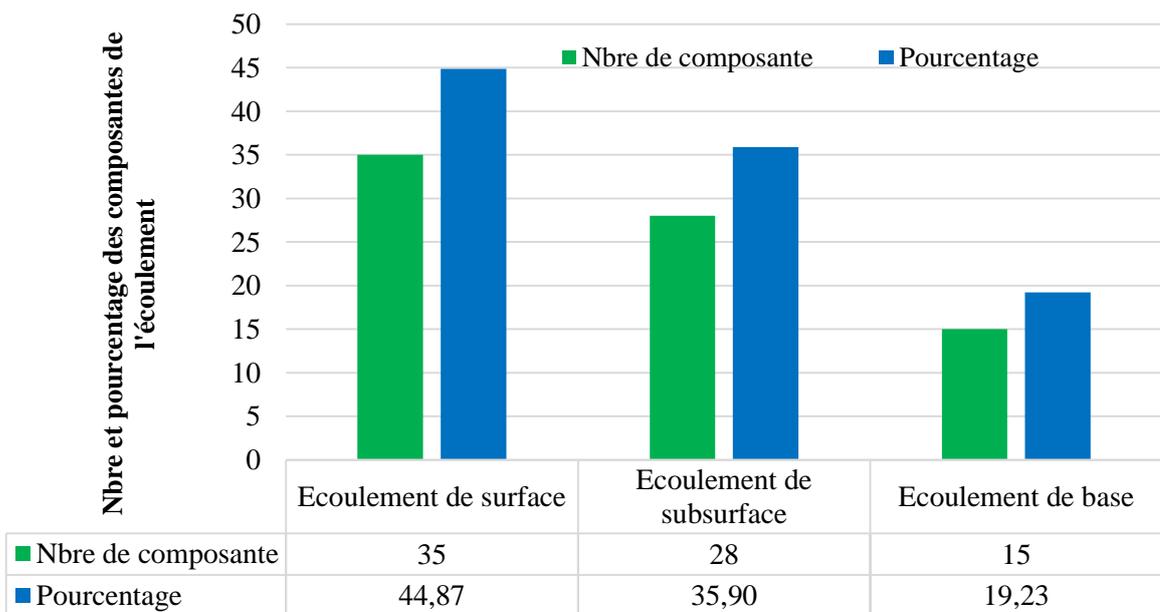
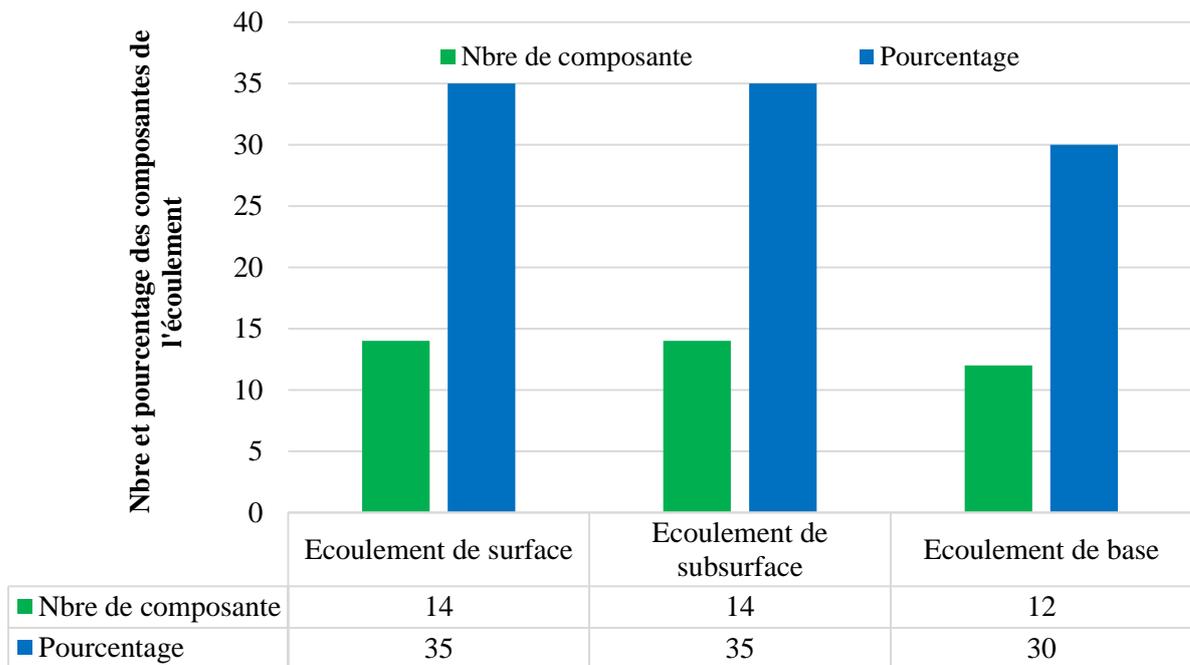


Figure 51 : Nombre et pourcentage des composantes de l'hydrogramme de crue à la station Bouchdira.



**Figure 52 :** Nombre et pourcentage des composantes de l'hydrogramme de crue à la station El Kheneg.

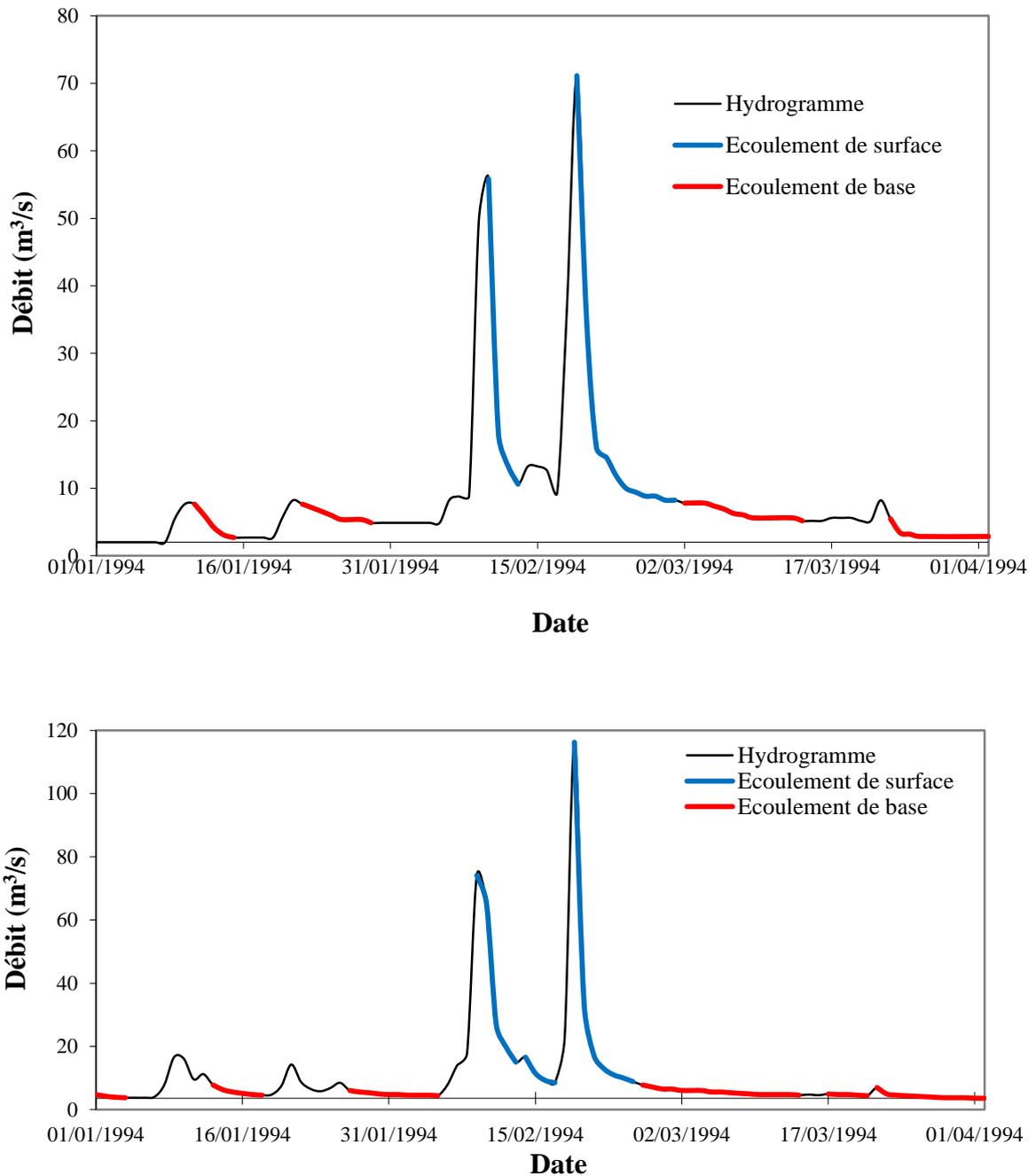
En examinant les figures (50, 51 et 52), nous pouvons voir que les crues enregistrés à la station d'El Grarem sont générés par des processus souterrains, c'est la composante de l'écoulement de base qui domine avec 41.38% et pour 24 crues. Tandis que, à la station El Kheneg c'est la composante de ruissellement de surface qui domine avec 35% des crues, et cela démontre un processus totalement différent à celle de la station d'El Grarem.

Pour la station de Bouchdira on remarque que les crues enregistrés de 1972 à 2010 sont générés par des processus superficiels, avec environ 45% du composante de ruissellement de surface et pour 35 crues.

Ces résultats confirment ce que nous avons trouvé précédemment dans la partie de corrélation débit-pluie à l'échelle annuelle et que les précipitations sont étroitement liées aux débits, seule la pluie qui contribue à l'écoulement au niveau de l'exutoire du bassin.

## **7. INTERPRÉTATION GRAPHIQUE DES COMPOSANTES DE L'ÉCOULEMENT SUR L'HYDROGRAMME DU DÉBIT TOTAL :**

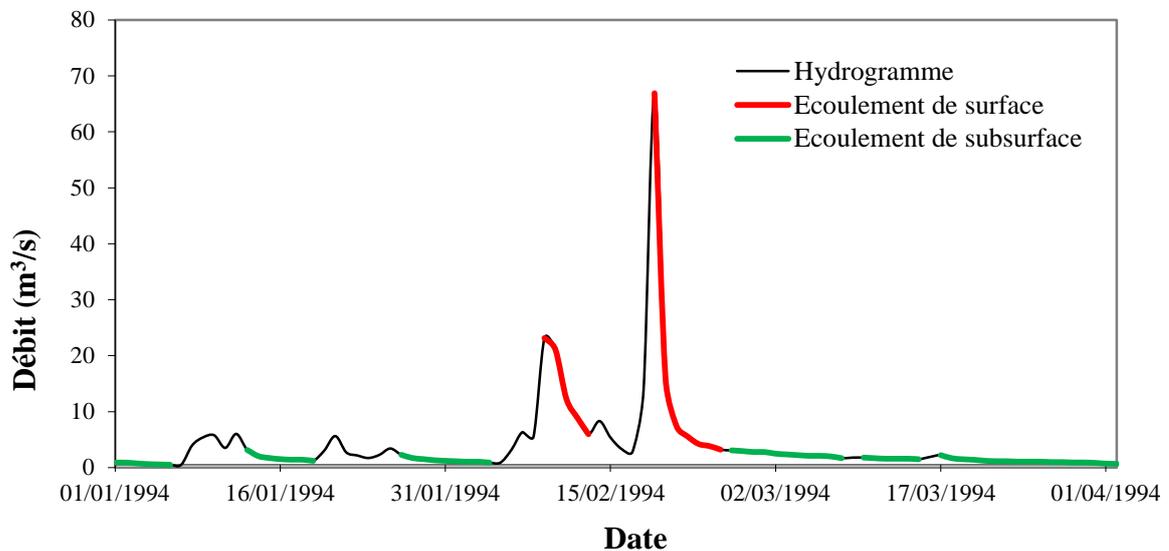
Basé sur les figures 42, 45 et 48 nous pouvons représenter sur l'hydrogramme du débit total la contribution de chaque composante de l'écoulement dans la formation des crues.



**Figure 53 :** Contribution des deux composantes de l'écoulement séparé à la station de Grarem et El kheneg.

Conformément à la figure 53, nous observons que le débit mesuré à la pointe de crue est principalement assuré par de l'eau issue des couches superficielles du sol (49%) à la station Grarem et (38%) à la station El kheneg, et au cours du tarissement, la participation de l'écoulement de base cesse d'augmenter et finit par atteindre une proportion de 18.83 % et 26% pour deux stations par rapport au débit total.

En revanche, à la station de Bouchdira (figure 54) la participation de l'écoulement de surface au pic de crue est importante (49.60%) pendant la décrue, tandis que la participation de l'écoulement de subsurface lors du tarissement est de 22 % par rapport au débit total.



**Figure 54 :** La contribution des deux composantes de l'écoulement séparé à la station de Bouchdira.

Les figures (53 et 54) illustrent les différentes composantes de l'hydrogramme. Pour la phase de crue, les deux composantes qui alimentent le débit de pointe sont le ruissellement de surface et l'écoulement de subsurface. Tandis que pour la phase de décrue, c'est le tarissement de l'écoulement de subsurface et l'écoulement de base qui y participent.

Nous relevons que l'hydrogramme des crues enregistré à la station de Bouchdira durant la période du 01/01/1994 au 02/04/1994 provoquée par des processus superficiels, c'est la composante du ruissellement de surface qui domine (12 jours) avec une participation de 49% du débit total.

En revanche, on observe que l'hydrogramme de crues enregistré à la station de Grarem et El kheneg provoquée par des processus souterrains, la participation de l'écoulement de subsurface et de l'écoulement de base est important.

Signalons que le pic de crue enregistré à la station de Bouchdira et El kheneg et d'environ  $70 \text{ m}^3/\text{s}$  (19 février 1994), tandis que pour la même date le pic de crue était de  $117 \text{ m}^3/\text{s}$  à la station d'El Grarem. Notant que la station de Grarem (région de Mila) est située à environ 70 km du barrage à l'aval de la retenue de Hammam Grouz, donc une attention particulière doit être prise en considération, en ce qui concerne les observations allant au-delà de l'année 1987.

Selon Mebarki [37], cette station dispose de données dans l'ensemble fiables, confirmées par la stabilité du lit du cours d'eau à l'endroit où les mesures sont effectuées.

Ce qu'on peut dire pour conclure sur la contribution de chaque composante de l'écoulement pour les trois hydrogrammes enregistré à la station de Bouchdira, la station El kheneg et à la station de Grarem, c'est que la formation des crues résultent la conjonction de deux familles de processus, superficiels et souterrains.

## **8. CONCLUSION :**

La séparation des composantes de l'hydrogramme est reliée à la compréhension des processus générateurs d'écoulement de crue dans les bassins versants. Dans notre étude nous avons fondé la séparation de ces composantes à partir de la courbe de récession, l'utilisation des valeurs typiques des constantes de récession nous a permis de retrouver la composition de chaque crue et l'origine des écoulements de la crue.

L'importance de ces résultats vient du fait qu'il n'existe pas de méthode rapide permettant simultanément de séparer les hydrogrammes de crue en deux et trois composantes. Cette nouvelle technique allie justement fiabilité et rapidité dans l'indentification de ces composantes pendant la crue. Elle pourrait de ce fait rapidement devenir un outil indispensable, en particulier lorsqu'il s'agit de grands ensembles de données par rapport aux méthodes traditionnelles.

## Conclusion générale

Dans cette recherche nous avons abordé le sujet des processus hydrologiques de production à l'intérieur du bassin versant et les méthodes de leurs analyses. Nous avons fait une recherche bibliographique sur les principaux processus d'écoulement ainsi que les facteurs contrôlant leur apparition. Il apparaît dans la littérature scientifique qu'il existe plusieurs processus et cheminement que prend l'eau dans un bassin versant avant d'arriver à son exutoire.

La connaissance de ses processus est essentielle avant tout modélisation de la transformation pluie-débit. Dans les modèle pluie-débit conceptuel le bassin versant est divisé en un ensemble de réservoirs qui se remplit et se vidange de différentes façons selon l'état hydrique du bassin versant et la nature des forçages climatiques.

La séparation des composantes de l'hydrogramme de crue a pour objectif de quantifier la participation des différents types d'écoulement aux débits mesurés à l'exutoire d'un bassin versant lors d'une crue. Dans notre étude nous avons fondé la séparation de ces composantes à partir de la courbe de récession, l'utilisation de la technique du *Master Récession Curves* et la constante de récession  $K$  nous a permis de retrouver la composition de chaque crue et l'origine des écoulements dans le bassin versant de l'Oued Rhumel-Smendou.

L'emploi de cette procédure permet d'extraire successivement une composante de ruissellement superficiel, puis d'écoulement hypodermique et enfin, une composante d'écoulement souterrain. Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- L'analyse des Master Recession Curves nous a permis de déterminer les composantes de la courbe de récession.
- Dans certaine situation il y a deux composantes dans l'écoulement : écoulement hypodermique et écoulement de base la crue est dite de fond.
- D'autres événements présentent des courbes de récessions à trois composantes : ruissellement de surface, écoulement hypodermique et écoulement de base.
- Le modèle de transformation pluie-débit sera un modèle à trois composantes.
- Certaine mesure donne des résultats aberrants, c'est probablement dû à la qualité des mesures (erreur de mesure ou de stockage).

L'importance de ces résultats vient du fait qu'il n'existe pas de méthode rapide permettant simultanément de séparer les hydrogrammes de crue en trois composantes. Cette nouvelle technique allie justement fiabilité et rapidité dans l'identification de ces composantes pendant

la crue. Elle pourrait de ce fait rapidement devenir un outil indispensable, en particulier lorsqu'il s'agit de grands ensembles de données par rapport aux méthodes traditionnelles.

Ce qu'on peut dire pour conclure sur les mécanismes de genèse des écoulements pour l'ensemble du bassin versant de l'Oued Rhumel-Smendou, c'est que la formation des crues résulte la conjonction de deux familles de processus, superficiels et souterrains.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Ward R.C ET Robinson M.**,1990; Principles of hydrology, McGraw-Hill Book Company, London.365 pp
- [2] **Musy A et Higy C.**,1998 ; Hydrologie appliquée, HGA, Bucarest. 366 pp
- [3] **Horton R.E.**,1933; the role of infiltration in the hydrologic cycle. Transactions, American Geophysical Union.14: 446-460
- [4] **Hewlett J.D ET Hibbert A.R.**, 1967; Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In: W.E. Sopper ET H.W. Lull (Editors), International Symposium on Forest Hydrology, Pergamon Oxford. Pp 275-290
- [5] **Jordan J.P.**, 1994a ; Bassin de recherche et modélisation des processus de formation des crues, proposition d'une approche couplée. La Houille Blanche. 3 : 15-22
- [6] **Ambroise B.**,1998 ; Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré, 1 - Processus et facteurs. Revue des Sciences de l'Eau.11 : 471-495
- [7] **Cappus P.**,1960; Bassin expérimental d'Alrance, Etude des lois de l'écoulement. Application au calcul et à la prévision des débits. La Houille Blanche. A : 493-520
- [8] **Hursh C R.**, 1936; Storm-water and absorption. Transactions, American Geophysical Union. 17: 301-302
- [9] **BOISP.**, (2000) ; Hydrologie générale, Institut National Polytechnique de Grenoble
- [10] **Latron J.**, 2003 ; Etude du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant méditerranéen de montagne (Vallcebre, Pyrénées Catalanes), Thèse de doctorat.,Université de Barcelone
- [11] **Benkhaled A Remini B & Mhaiguene M.**, (2004); Influence of antecedent precipitation index on the hydrograph shape. Hydrology Science and Practice for the 21st Century. 1, 81-87
- [12] **Cosandey C & Didon-Lescot J.**, (1990) ; Etude des crues cévenoles : conditions d'apparition dans un petit bassin forestier sur le versant sud du Mont Lozère, France. Regionalisation in Hydrology, IAHS Publication, Ljubljana, Slovenia. 191, 103-115
- [13] **Remenerias G.**, (1976) ; Hydrologie de l'ingénieur, Ed Eyrolies, Paris
- [14] **Roche, M.**, 1963. Hydrologie de surface. Paris : Gauthier Villars éditeur. 430 p.

- [15] **Linsley RK, Kohler MA, Paulhus JLH., 1958.** Hydrology for Engineers. McGraw-Hill: New York.
- [16] **Furey, Peter R. et Gupta, Vijay K., 2001.** A physically based filter for separating base flow from streamflow time series. *Water Resources Research*, 37(11): 2709-2722.
- [17] **Chapman, T. G. and Maxwell, A. I., 1996.** Baseflow separation-comparison of numerical methods with tracer experiments. 23<sup>rd</sup> Hydrology and Water Resources Symposium, 539-545.
- [18] **Sloto R.A. et Crouse M.Y., 1996.** Hysep: a computer program for streamflow hydrograph separation and analysis, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 96-4040, 42 p.
- [19] **Nathan, R.J. and McMahon, T.A., 1990.** Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis. *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 7, pp. 1465–1473.
- [20] **Gnouma R., 2002.** Etude du fonctionnement hydrologique du bassin versant de Grézieu-La-Varenne à l'aide de traceurs isotopiques (oxygène 18). Rapport de DEA, 51 p.
- [21] **Tallaksen L M., 1995;** A review of baseflow recession analysis, *Journal of Hydrology*, Vol. 165, No. 1–4. Pp.349–370
- [22] **Chapman T., 1999;** a comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation, *Hydrological Processes* 13: 701–714
- [23] **Smakhtin VU., 2001;** Low flow hydrology a review, *Journal of Hydrology* 240: 147–186
- [24] **Vogel R M and Kroll C. N., 1992;** Regional hydrologic and geomorphologic relationships for estimation of low-flow statistics. *Water Resource Research*.28(9), 2451–2458
- [25] **Bates BC, Davies PK., 1988;** Effect of baseflow separation procedures on surface runoff models, *Journal of Hydrology* 103: 309–322
- [26] **Kottegoda NT, Natale L, Raiteri E., 2000.** Daily streamflow simulation using recession characteristics. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(1): 17–24.
- [27] **Sri Harto Br., 1985.** A study of the unit hydrograph characteristics of rivers on the island of Jawa for flood estimation. Doctoral Thesis, Gadjah Mada University, Yogyakarta, Indonesia.
- [28] **Sujono J Shikasho S Hiramatsu K., 2001;** Hydrograph recession analysis using wavelet transforms, *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University* 45(2): 557–564
- [29] **Langbein WB., 1938;** some channel-storage studies and their application to the determination of infiltration, *Trans Am Geophysics. Union.* 19 435-445

- [30] **Toebes C Strang DD.**, 1964; on recession curves 1 Recession equations, J. Hydrology, New Zealand 3(2), 2-15
- [31] **Posavec K Parlov J and Bačani A.**, 2009; A Visual Basic spreadsheet macro for estimating groundwater recharge, Rud-geol.-naft. Zb, Vol. 21, No. 1. Pp.19–23
- [32] **S. Berhail, L. Ouerdachi, H. Boutaghane, 2012.** The use of the recession index as indicator for components of flow. *Energy Procedia journal –Elsevier*, Volume 18, pp: 741–750.
- [33] **Boughton WC.**, 1995; Baseflow recessions, Australian Civil Engineering Transactions CE37 (1): 9–13
- [34] **Singh VP.**, 1989; Hydrologic Systems, Vol. II: Watershed Modeling. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ
- [35] **A. Mouslim, H.Mezaache, et al.** Etude climatique et morphométriques du bassin versant de l’Oued El Rhumel Nord Est Algérien-Mila, Projet de Fin d’étude en Hydraulique. Centre universitaire de Mila, Institut des Sciences et de Technologie, 2014,42P.
- [36] **MELGHIT MERIEM.** Qualité physico-chimique, pollution organique et métallique des compartiments Eau / Sédiments de l’Oued Rhumel, et des barrages Hammam Grouz et Beni Haroun, Mémoire de Magistère en Ecologie. Université Mentouri de Constantine, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, 2006.175P.
- [37] **MEBARKI A.**, 2005. Hydrologie des bassins de l’Est Algérien : Ressources en eau, aménagement et environnement, Thèse de doctorat d’état, Université de Mentouri Constantine.
- [38] **Agence National des Ressources Hydraulique.**, 2005. Carte du réseau hydroclimatologique et de la surveillance de la qualité des eaux, Echelle 1 :500 000.