

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Abou bakr Belkaid- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de **Master**

En : **HYDRAULIQUE**

Option : **HYDRAULIQUE URBAINE**

Par :

**DIB Fatima Zohra**

**Application du modèle hydrologique GARDENIA  
sur le bassin versant de l'oued Sebdou (NW Algérien)**

Soutenu publiquement, le 23 / 11 / 2021, devant le jury composé de :

Mme. **BABA HAMED K.**

M. **BOUANANI A.**

Mme. **BENSAOULA F.**

Mme. **BELARBI F.**

Professeur Univ. Tlemcen

Professeur Univ. Tlemcen

Professeur Univ. Tlemcen

Maitre de conférences classe A Univ. Tlemcen

Encadrante de mémoire

Co-encadrant de mémoire

Présidente

Examinatrice

**2020– 2021**

## *Dédicaces*

*A la mémoire de mon amie Hamdi Sara,  
A ma famille et mes amis.*

*Dib Fatima Zohra*

## **Remerciements**

*A l'issue de ce travail, je tiens à remercier professeur **BABA HAMED Kamila** et professeur **BOUANANI Abderrazak** de l'université de Tlemcen de m'avoir donné la chance de travailler avec eux et de m'assurer une excellente formation. Merci du fond du cœur.*

*Je tiens à remercier également les membres du jury, professeur **BENSAOULA Fouzia** et docteur **BELARBI Fadila** de l'université de Tlemcen, d'avoir accepté d'examiner ce travail, malgré leurs obligations professionnelles.*

*J'exprime ma gratitude à Monsieur **ZENNAKI Sid Ahmed**, doctorant au département d'hydraulique pour son temps ainsi que pour ses précieux conseils.*

*Je ne voudrai pas terminer ces remerciements sans avoir une motion particulière au Professeur **BENSALAH Mustapha**, Directeur du laboratoire de recherche n°25, qui m'a permis l'accès au laboratoire pour rencontrer mes encadrateurs durant les moments difficiles de la pandémie (Covid). Qu'il trouve ici mes sincères respects.*

*Je remercie tous mes amies et collègues de ma promotion pour le soutien et les encouragements.*

## Résumé

En situation d'information restreinte concernant les débits, un modèle hydrologique adéquatement calé permet de reconstituer les données manquantes. Dans notre cas l'application du modèle global à réservoirs Gardénia a été faite sur l'oued Sebdou situé au Nord-ouest algérien et qui s'étend sur une superficie de 439,3Km<sup>2</sup>. Le bassin est caractérisé par un climat semi-aride, exposé à une température moyenne annuelle de 17,9°C, des précipitations interannuelles de 354,4mm sur une série de données (1979/80-2019/2020), et un débit annuel de 0,29m<sup>3</sup>/s sur une période de (1980/81-2011/12).

Les résultats ont montré que le modèle arrive bien à reproduire les débits au niveau de l'exutoire. En effet, avec un coefficient de Nash de 81,2% et un coefficient de détermination supérieur à 80% en phase de calage et de validation, le modèle s'avère performant et peut contribuer à la gestion du bassin versant. Aussi, ce modèle offre la possibilité d'analyser les composantes du bilan hydrologique.

**Mots clés :** Algérie, Oued Sebdou, modélisation pluie-débit, modèle Gardénia, simulation.

## Abstract

In a situation of limited flow information, a properly calibrated hydrological model allows the missing data to be reconstructed. In our case, the application of the lumped tank model “Gardenia” was made on the Sebdou wadi located in the North-West of Algeria, which covers an area of 439.3 Km<sup>2</sup>. The basin is characterized by a semi-arid climate, exposed to an average annual temperature of 17.9°C, an annual precipitation of 354.4 mm over a series of data (1979/80-2019/2020), and an annual flow of 0.29 m<sup>3</sup>/s over a period of (1980/81-2011/12).

The results showed that the model successfully reproduces the flows at the outlet. Indeed, with a coefficient of Nash of 81.2% and a coefficient of determination greater than 80% in the calibration and validation phase, the model proves to be effective and can contribute to the management of the watershed. This model also offers the possibility of analysing the components of the hydrological balance.

**Keywords:** Algeria, Wadi Sebdou, Rainfall - Runoff modeling, Gardénia model, simulation.

## ملخص

في حالة محدودية المعلومات عن التدفق، يسمح النموذج الهيدرولوجي معايير بشكل صحيح بإعادة بناء البيانات المفقودة. وفي ما يخص دراستنا هذه، تم تطبيق نموذج خزان غاردينيا العام على وادي سبدو الواقع في الشمال الغربي للجزائر، الذي يغطي مساحة 439.3 كم<sup>2</sup> كما يتميز الحوض بمناخ شبه قاحل، ويتعرض لدرجة حرارة متوسطة تبلغ 17.9 درجة مئوية، وتساقطات تقدر بـ 354.4 ملم مدى سلسلة من المعطيات خلال الفترة (1980/1979 - 2020/2019)، وتدفق يبلغ 0.29 م<sup>3</sup>/ثا على مدى الفترة الزمنية (1981/1980 - 2012/2011).

أظهرت النتائج أن النموذج يستنسخ التدفقات بنجاح على مستوى المنفذ الحوضي. إذ أن، النموذج يثبت مع وجود نسبة ناش 81.2% ومعامل تحديد أكبر من 80% في مرحلة المعايرة والتحقق، فعاليته وتمكنه من المساهمة في إدارة الاحواض المائية، ويتيح هذا النموذج أيضا إمكانية تحليل عناصر معادلة التوازن الهيدرولوجي.

**الكلمات الرئيسية:** الجزائر، وادي سبدو، نموذج هطول الامطار- الجريان السطحي ، نموذج غاردينيا، المحاكاة.

# Sommaire

Dédicaces	
Remerciements	
Résumé	
Table des matières	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Modélisation (Etude bibliographique)</b>	
- Introduction	4
1.1. Notions de l'hydrologie	4
• Définition	4
1.2. Cycle de l'eau	4
1.2.1. L'évaporation	5
1.2.2. L'évapotranspiration	5
1.2.3. La condensation	5
1.2.4. Les précipitations	5
1.2.5. Le ruissellement	5
1.2.6. L'infiltration	6
1.2.7. La circulation souterraine	6
1.3. Notions de modélisation	6
1.3.1. Définition	6
1.3.2. Types de modélisation	6
1.3.2.1. Modèle de données conceptuel	7
1.3.2.2. Modèle de données logique	7
1.3.2.3. Modèle de données physique	7
1.4. Modélisation hydrologique	7
1.4.1. Choix du modèle	8
1.4.2. Etapes d'élaboration d'un modèle	8
1.4.3. Classification des modèles hydrologiques	9
1.4.3.1. Modèle à base physique	11
1.4.3.2. Modèle déterministe	11
1.4.3.3. Modèle stochastique	11
1.4.3.4. Modèle empirique de classe boîte noire	11
1.4.3.5. Modèle quasi déterministe	12
1.5. Modèles hydrologiques	12
1.5.1. Modèle du Génie rural (GR)	12
1.5.1.1. Modèle pluie-débit GR1A	12
• Description mathématique	12
• Paramètres	13
1.5.1.2. Modèle pluie-débit GR2M	13
• Description mathématique	14
• Paramètres	15
1.5.1.3. Modèle pluie-débit GR4J	15
• Description mathématique	16
• Paramètres	19
1.5.2. Modèle HBV Light	19
1.5.3. Modèle GARDENIA	22
1.6. Calage du modèle hydrologique	25
1.7. Conclusion	25

## Chapitre II : Etude du site

-	Introduction	27
2.1.	Morphométrie	28
2.1.1.	Caractéristiques de forme	28
	1) Surface	28
	2) Périmètre	28
	3) Indice de compacité de Gravelius	28
	4) Rectangle équivalent	29
2.1.2.	Réseau hydrographique	30
	1) Densité de drainage	30
	2) Rapport de confluence	30
	3) Rapport des longueurs	31
2.1.3.	Etude du relief	31
	1) Indice de pente	34
	2) Dénivelée spécifique	34
	3) Coefficient de torrentialité	35
	4) Temps de concentration des eaux	35
2.2.	Géologie	36
2.2.1.	Etude lithostratigraphique	37
	1) Jurassique	37
	a) Les marno-calcaires de Raourai	37
	b) Les calcaires de Lato	37
	c) Dolomies de Terny	37
	d) Marno-calcaires de Hariga	37
	e) Marno-calcaires de Ouled Mimoun	37
	2) Crétacé	37
	a) Grès Berthelot (Hauterivien)	37
	3) Plio-Quaternaire	37
2.3.	Hydrogéologie	38
	- Formations à fort potentiel aquifère	39
	- Formations à faible potentiel aquifère	39
2.4.	Sol et végétation	39
2.5.	Conclusion	40

## Chapitre III : Etude hydro-climatologique

	Introduction	43
3.1.	Etude des précipitations	44
3.1.1.	Précipitations moyennes annuelles	44
3.1.2.	Précipitations moyennes mensuelles	45
3.1.3.	Précipitations moyennes saisonnières	46
3.1.4.	Précipitations moyennes journalières	47
3.2.	Etude de température	47
3.2.1.	Température moyenne annuelle	47
3.2.2.	Température moyenne mensuelle	48
3.3.	Etude du climat	49
3.3.1.	Diagramme pluviothermique	49
3.3.2.	Indices climatiques	50
	1) Indice d'aridité de De Martonne	50
	2) Indice de Moral	52
	3) Climagramme d'Emberger	53

3.4.	Etude de l'évapotranspiration	54
3.4.1.	Formule de Turc	54
3.4.2.	Formule de Thornthwaite	55
3.5.	Etude hydrologique	56
3.5.1.	Etude des débits	56
3.5.1.1.	Débits moyens annuels	56
3.5.1.2.	Débits moyens mensuels	57
3.5.1.3.	Débits moyens saisonniers	58
3.5.1.4.	Débits moyens journaliers	59
3.5.2.	Etude des lames d'eau écoulées	60
3.5.2.1.	Lame d'eau moyenne annuelle	60
3.5.2.2.	Lame d'eau moyenne mensuelle	62
3.5.2.3.	Lame d'eau moyenne saisonnière	63
3.5.2.4.	Lame d'eau moyenne journalière	64
3.6.	Etude statistique	64
3.6.1.	Etude statistique des précipitations	65
3.6.1.1.	Ajustement par la loi normale	66
	- Test graphique	66
	- Test numérique	66
3.6.1.2.	Ajustement par la loi log normale	67
	- Test graphique	67
	- Test numérique	67
3.6.1.3.	Résultats de l'ajustement	68
3.6.1.4.	Calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée	69
3.6.2.	Etude statistique des lames d'eau écoulées	69
3.6.2.1.	Ajustement par la loi log normale	70
	- Test graphique	70
	- Test numérique	71
3.6.2.2.	Calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée	72
3.7.	Conclusion	73
<b>Chapitre IV : Application du modèle Gardénia sur oued Sebdou</b>		
-	Introduction	75
4.1.	Application du modèle Gardénia	75
4.1.1.	Calage du modèle gardénia	76
4.1.1.1.	Application du modèle Gardénia pour un pas de temps annuel	76
4.1.2.	Corrélation entre débit simulé et débit observé	78
4.2.	Application du modèle GR1A	80
4.2.1.	Calage du modèle GR1A	80
4.3.	Comparaison des performances des modèles Gardénia et GR1A	83
4.4.	Résultats du bilan hydrologique du modèle Gardénia	83
4.4.1.	Pluie efficace	83
4.4.2.	Recharge	84
4.4.3.	Corrélation entre Pluie, Débit, Pluie efficace et Recharge	86
4.5.	Conclusion	87
<b>Conclusion générale</b>		88
<b>Références bibliographiques</b>		

## Liste des abréviations

**A** : Aire.  
**A.N.R.H** : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.  
**BRGM** : Bureau de recherches géologiques et minières.  
**Ct** : Coefficient de torrentialité.  
**Cv** : Coefficient de variation.  
**DA** : Déficit agricole.  
**Dd** : Densité de drainage.  
**ddl** : Degré de liberté.  
**ETP** : Evapotranspiration Potentielle.  
**ETPcor** : Evapotranspiration Potentielle Corrigée.  
**ETR** : Evapotranspiration Réelle.  
**GARD** : Modèle hydrologique Gardenia.  
**GR** : Génie rural.  
**GR1A** : Modèle du génie rural à 1 paramètre.  
**GR2M** : Modèle du génie rural à 2 paramètres.  
**GR4J** : Modèle du génie rural à 4 paramètres.  
**H5%** : Altitude où s'inscrit 5% de surface cumulée.  
**H50%** : Altitude où s'inscrit 50% de surface cumulée.  
**H95%** : Altitude où s'inscrit 95% de surface cumulée.  
**HBV** : Hydrologiska ByransVattenbalans avdelning: Bureau Hydrologie Section Ressources en eau.  
**I** : Indice d'aridité annuel de De Martonne.  
**Ig** : Indice de pente globale.  
**Ip** : Indice de pente.  
**Le** : Lamme d'eau écoulée en mm.  
**Le obs** : Lamme d'eau écoulée observée  
**Le cal** : Lamme d'eau écoulée calculée  
**Le sim** : Lamme d'eau écoulée simulée  
**MNA** : Modèle numérique d'altitude.  
**l** : Largeur.  
**L** : Longueur.  
**Lp** : Longueur du cours d'eau principal.  
**M.N.A.** : Modèle numérique d'altitude.  
**ORSTOM** : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer.  
**P** : Périmètre en km.  
**P** : Précipitations en mm.  
**Q** : Débit en m<sup>3</sup>/s.  
**R** : Ruissellement (mm).  
**T** : Température.  
**Tc** : Temps de concentration.  
**χ<sup>2</sup>** : Test de Khi deux.  
**π** : 3,14.  
**Σ** : Somme.  
**U** : Variable réduite de Gauss.  
**δ** : Ecart type.  
**σ<sup>2</sup>** : Variance.

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Cycle de l'eau.....	5
<b>Figure I.2</b> : Types de modélisation des données.....	6
<b>Figure I.3</b> : Critères de qualification d'un modèle hydrologique.....	8
<b>Figure I.4</b> : Composantes d'un modèle.....	10
<b>Figure I.5</b> : Classification des modèles hydrologiques.....	10
<b>Figure I.6</b> : Modèle à boîte noire.....	11
<b>Figure I.7</b> : Schéma de la structure du modèle GR2M.....	13
<b>Figure I.8</b> : Schéma de la structure du modèle GR4J.....	16
<b>Figure I.9</b> : Schéma structural du modèle HBV Light.....	21
<b>Figure I.10</b> : Schéma structural du modèle Gardenia.....	23
<b>Figure II.1</b> : Carte de Tlemcen.....	27
<b>Figure II.2</b> : du bassin versant de l'oued Sebdou .....	28
<b>Figure II.3</b> : Réseau hydrographique du bassin de Sebdou. ....	30
<b>Figure II.4</b> : Courbes hypsométriques du bassin versant de Sebdou. ....	32
<b>Figure II.5</b> : Répartition altimétrique du bassin d'oued Sebdou.....	33
<b>Figure II.6</b> : Carte structurale de l'Oranie nord occidentale.....	36
<b>Figure II.7</b> : Colonne stratigraphique des monts de Tlemcen.....	38
<b>Figure II.8</b> : Carte de végétation de la région de Sebdou.....	40
<b>Figure III.1</b> : Situation des stations de mesure au niveau de l'Oued Sebdou.....	44
<b>Figure III.2</b> : Variation des précipitations moyennes annuelles à la station de Sebdou (1979/1980-2019/2020).....	45
<b>Figure III.3</b> : Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Sebdou (1979/1980-2019/2020).....	46
<b>Figure III.4</b> : Variation des précipitations saisonnières moyennes à la station de Sebdou (1979/1980-2019/2020).....	46
<b>Figure III.5</b> : Variation des précipitations journalières moyennes à la station de Sebdou (1979/1980-2019/2020).....	47
<b>Figure III.6</b> : Variation des températures moyennes annuelles à la station de Beni Bahdel (1979/1980-2019/2020).....	48
<b>Figure III.7</b> : Variation moyenne mensuelle de la température de la station Beni Bahdel (1979/1980-2019/2020).....	49
<b>Figure III.8</b> : Courbe pluviothermique (1979/1980-2019/2020).....	50
<b>Figure III.9</b> : Abaque de De Martonne.....	52
<b>Figure III.10</b> : Projection de la zone d'étude dans le climagramme d'Emberger.....	54
<b>Figure III.11</b> : Variation interannuelle de l'évapotranspiration potentielle.....	55
<b>Figure III.12</b> : Variation interannuelle des débits à la station de Sebdou (1980/1981-2011/2012).....	57
<b>Figure III.13</b> : Variation mensuelle des débits à la station de Sebdou (1980/1981-2011/2012).....	58
<b>Figure III.14</b> : Variation saisonnière des débits à la station de Sebdou (1980/1981-2011/2012).....	59
<b>Figure III.15</b> : Variation journalière des débits d'une année moyenne à la station de Sebdou (1980/1981-2011/2012).....	60
<b>Figure III.16</b> : Variation interannuelle des lames d'eau écoulées à la station de Sebdou (1980/1981-2011/2012).....	61
<b>Figure III.17</b> : Variation mensuelle des lames d'eau écoulées à la station de Sebdou (1980/1981-2011/2012).....	62
<b>Figure III.18</b> : Comparaison des variations mensuelles des lames d'eau écoulées et et des précipitations à la station de Sebdou (1980/1981-2011/2012).....	63
<b>Figure III.19</b> : Variation saisonnière des lames d'eau écoulées à la station de Sebdou	

(1980/1981-2011/2012).....	63
<b>Figure III.20</b> : Variation journalière des lames d'eau écoulées d'une année moyenne à la station de Sebdou (1980/1981-2011/2012).....	64
<b>Figure III.21</b> : Ajustement des précipitations à la loi de distribution normale (1979/1980-2019/2020).....	66
<b>Figure III.22</b> : Ajustement des précipitations à la loi de distribution log normale (1979/1980-2019/2020).....	67
<b>Figure III.23</b> : Ajustement à la loi log normale des lames d'eau écoulées de la station de Sebdou (1980/1981-2011/2012).....	71
<b>Figure IV.1</b> : Visualisation des résultats en phase de calage (1980/1981-1999/2000).....	77
<b>Figure IV.2</b> : Visualisation des résultats en phase de validation (2000/2001-2011/2012).....	78
<b>Figure IV.3</b> : Corrélation entre débit simulé et observé (phase de calage) (1980/1981-1999/2000).....	79
<b>Figure IV.4</b> : Corrélation entre débit simulé et observé (phase de validation) (2000/2001-2011/2012).....	79
<b>Figure IV.5</b> : Calage du modèle GR1A.....	81
<b>Figure IV.6</b> : Corrélation entre débit simulé et observé (phase de calage).....	81
<b>Figure IV.7</b> : visualisation de la validation du modèle GR1A.....	82
<b>Figure IV.8</b> : Corrélation entre débit simulé et observé (phase de validation).....	82
<b>Figure IV.9</b> : Variation de la pluie efficace annuelle pour la période de calage (1980/1981-1999/2000).....	84
<b>Figure IV.10</b> : Variation de la pluie efficace annuelle pour la période de validation (2000/2001-2011/2012).....	84
<b>Figure IV.11</b> : Variation de la recharge annuelle pour la période de calage (1980/1981-1999/2000).....	85
<b>Figure IV.12</b> : Variation de la recharge annuelle pour la période de validation (2000/2001-2011/2012).....	85
<b>Figure IV.13</b> : Corrélation entre pluie, débit, pluie efficace et recharge d'oued Sebdou (1980/1981 - 2011/2012).....	86

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Valeurs des paramètres du modèle GR2M.....	15
<b>Tableau I.2</b> : Valeurs des paramètres du modèle GR4J.....	19
<b>Tableau I.3</b> : Quelques exemples de modèles hydrologiques.....	24
<b>Tableau II.1</b> : Classes de l'indice de formes de cuvettes suivant les valeurs de l'indice de Gravelus.....	29
<b>Tableau II.2</b> : Rapport de confluence.....	31
<b>Tableau II.3</b> : Rapport des longueurs.....	31
<b>Tableau II.4</b> : Répartition hypsométrique du sous bassin d'oued Sebdou.....	32
<b>Tableau II.5</b> : Classification du relief selon Ig par l'ORSTOM.....	34
<b>Tableau II.6</b> : Classification du relief selon Ds par l'ORSTOM.....	35
<b>Tableau II.7</b> : Distribution du couvert végétal dans le bassin versant d'oued Sebdou (D.F.N).....	39
<b>Tableau II.8</b> : Caractéristiques morphométriques du bassin versant d'oued Sebdou.....	40
<b>Tableau III.1</b> : Caractéristiques des stations de mesure.....	43
<b>Tableau III.2</b> : Précipitations annuelles moyennes à la station de Sebdou (1979/1980-2019/2020).....	44
<b>Tableau III.3</b> : Données pluviométriques mensuelles de la station de Sebdou (1979/1980-2019/2020).....	45
<b>Tableau III.4</b> : Répartition des précipitations saisonnières.....	46
<b>Tableau III.5</b> : Températures moyennes annuelles à la station de Beni Bahdel (1979/1980- 2019/2020).....	48
<b>Tableau III.6</b> : Températures moyennes mensuelles à la station de Beni Bahdel (1979/1980-2019/2020).....	49
<b>Tableau III.7</b> : Indice d'aridité mensuel de De Martonne.....	51
<b>Tableau III.8</b> : Classification du climat suivant l'indice d'aridité de Martonne.....	51
<b>Tableau III.9</b> : Valeurs mensuelles de l'indice de Moral.....	52
<b>Tableau III.10</b> : Données des débits annuels d'Oued Sebdou de la période (1980/1981-2011/2012).....	56
<b>Tableau III.11</b> : Variation moyenne mensuelle des débits à la station de Sebdou (1980/1981-2011/2012).....	57
<b>Tableau III.12</b> : Variation saisonnière des débits à la station de Sebdou.....	58
<b>Tableau III.13</b> : Variation interannuelle des lames d'eau écoulées à la station de Sebdou (1980/1981-2011/2012).....	61
<b>Tableau III.14</b> : Variation mensuelle des lames d'eau à la station de Sebdou .....	62
<b>Tableau III.15</b> : Variation saisonnière des lames d'eau de la station de Sebdou (1980/1981-2011/2012).....	63
<b>Tableau III.16</b> : Distribution des précipitations moyennes annuelles à la station de Sebdou (1979-1980 à 2019-2020).....	65
<b>Tableau III.17</b> : Paramètres de position et de dispersion des précipitations à la station de Sebdou (1979/1980-2019/2020).....	65
<b>Tableau III.18</b> : Calcul du $K_{hi}^2$ .....	66
<b>Tableau III.19</b> : Paramètres de position et de dispersion des précipitations de la station de Sebdou (1979/1980-2019/2020).....	68
<b>Tableau III.20</b> : Calcul du $K_{hi}^2$ .....	68
<b>Tableau III.21</b> : Résultats du test de Pearson.....	68
<b>Tableau III.22</b> : Calcul des précipitations pour différentes périodes de retour avec la loi log normale.....	69

<b>Tableau III.23</b> : Distribution des lames d'eau écoulées moyennes annuelles à la station de Sebdou (1980-1981 à 2011-2012).....	70
<b>Tableau III.24</b> : Paramètres de position et de dispersion des lames d'eau à la station de Sebdou (1980/1981-2011/2012).....	70
<b>Tableau III.25</b> : Paramètres de position et de dispersion des logarithmes des lames d'eau écoulées.....	71
<b>Tableau III.26</b> : Calcul du $K_{hi}^2$ .....	72
<b>Tableau III.27</b> : Calcul des lames d'eau écoulées pour différentes périodes de retour avec la loi log normale.....	72
<b>Tableau IV.1</b> : Résultats du calage au pas de temps annuel.....	76
<b>Tableau IV.2</b> : Critères de qualité et d'optimisation.....	77
<b>Tableau IV.3</b> : Résultats de la calibration obtenus par le GR1A.....	80
<b>Tableau IV.4</b> : Résultats de la validation obtenus par le GR1A.....	81
<b>Tableau IV.5</b> : Résultats de modélisation par les modèles Gardénia et GR1A.....	83

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Mise à part l'importance et la vitalité de l'eau, elle est une richesse et une force déterminante sur le développement d'une nation. Puisque l'eau devient de plus en plus rare, il est essentiel de l'évaluer et la préserver, d'où l'étude analytique du cycle de l'eau, qui est une partie indivisible de l'étude des eaux superficielles et souterraines car elle constitue l'origine de toute eau sur terre, sans oublier qu'il présente cette dernière sous toute forme existante (liquide, gazeux, et neige).

Tlemcen, une région algérienne connue par ses formations karstiques qui font un meilleur réservoir d'eau naturel et souterrain, aussi l'oued Sebdou affluent du grand Oued de la Tafna qui passe par le Maroc arrivant en Algérie.

La modélisation est un outil de gestion, de dimensionnement, de prévision, et d'aménagements au niveau des bassins versants. Elle se base sur la disponibilité des données de débits mesurés nécessaire au calage.

A travers ce travail, nous essayerons d'appliquer un modèle hydrologique (Gardénia) sur le bassin versant d'oued Sebdou affluent rive gauche de la Tafna. En mettant le point sur :

- La connaissance du comportement hydrologique du bassin versant,
- L'application puis l'expérimentation du modèle Gardénia sur le bassin versant en question, et voir son efficacité,
- L'établissement de l'équation du bilan hydrologique.

Ce mémoire se compose de quatre chapitres :

- **Chapitre 1** : A travers ce chapitre, nous décrirons l'état de l'art de la modélisation hydrologique.
- **Chapitre 2** : Ce chapitre concerne la présentation du bassin versant étudié (Oued Sebdou) à travers la détermination de la situation géographique, la morphométrie, la géologie, et l'hydrogéologie de la région d'étude.
- **Chapitre 3** : Cette partie du travail s'intéresse à l'étude hydro-climatologique, où nous décrirons et analyserons les facteurs climatiques jouant un rôle important dans le cycle de l'eau.
- **Chapitre 4** : Ce chapitre sera consacré à l'application du modèle « Gardénia » sur le bassin versant de l'oued Sebdou, avec un pas de temps choisi (annuel). Nous tenterons de le comparer à un modèle déjà utilisé sur le même terrain.

Enfin, une conclusion permettra de faire la synthèse des résultats trouvés lors de l'établissement de ce mémoire et des recommandations proposées pour un travail futur.

# Chapitre I

---

---

Etude bibliographique de la  
modélisation

**Introduction**

L'hydrologie est la science qui nous donne la faculté de prédire la recharge des ressources hydrauliques, la prévention et la gestion de cette dernière, puis le bon dimensionnement et l'aménagement des ouvrages grâce à la modélisation qui elle-même est un vaste champ qui exige des compétences hydrologiques et informatiques pour transformer la pluie en débit en utilisant les composantes du cycle hydrologique.

**I.1. Notions d'Hydrologie**

- **Définition**

L'hydrologie est la science qui traite des eaux que l'on trouve à la surface de la terre ainsi qu'au-dessus et au-dessous, de leur formation, de leur circulation et de leur distribution dans le temps et l'espace, de leurs propriétés biologiques, physiques et chimiques et de leur interaction avec leur environnement, y compris avec les êtres vivants. Autrement dit, c'est la science qui étudie les processus qui régissent les fluctuations des ressources en eau des terres émergées et traite des différentes phases du cycle hydrologique. (Oberlin et Hubert, 1999).

**I.2. Cycle de l'eau**

C'est le phénomène naturel qui entraîne l'eau dans un circuit fermé depuis des milliards d'années. L'eau des mers s'évapore dans l'atmosphère sous l'effet de la chaleur du soleil, elle forme ensuite des nuages qui vont se déplacer sous l'impulsion des vents. Aidées par l'effet de gravité, les gouttelettes qui constituent les nuages s'alourdissent et retombent sur le sol sous forme de précipitations (pluie, grêle, neige). Ces eaux pluviales vont permettre d'alimenter les nappes phréatiques souterraines qui vont recharger les cours d'eau, lesquels se jeteront à leur tour dans la mer. Et ainsi, le voyage de l'eau se fait de la mer au ciel, du ciel à la terre et de la terre à la mer (fig. I.1).

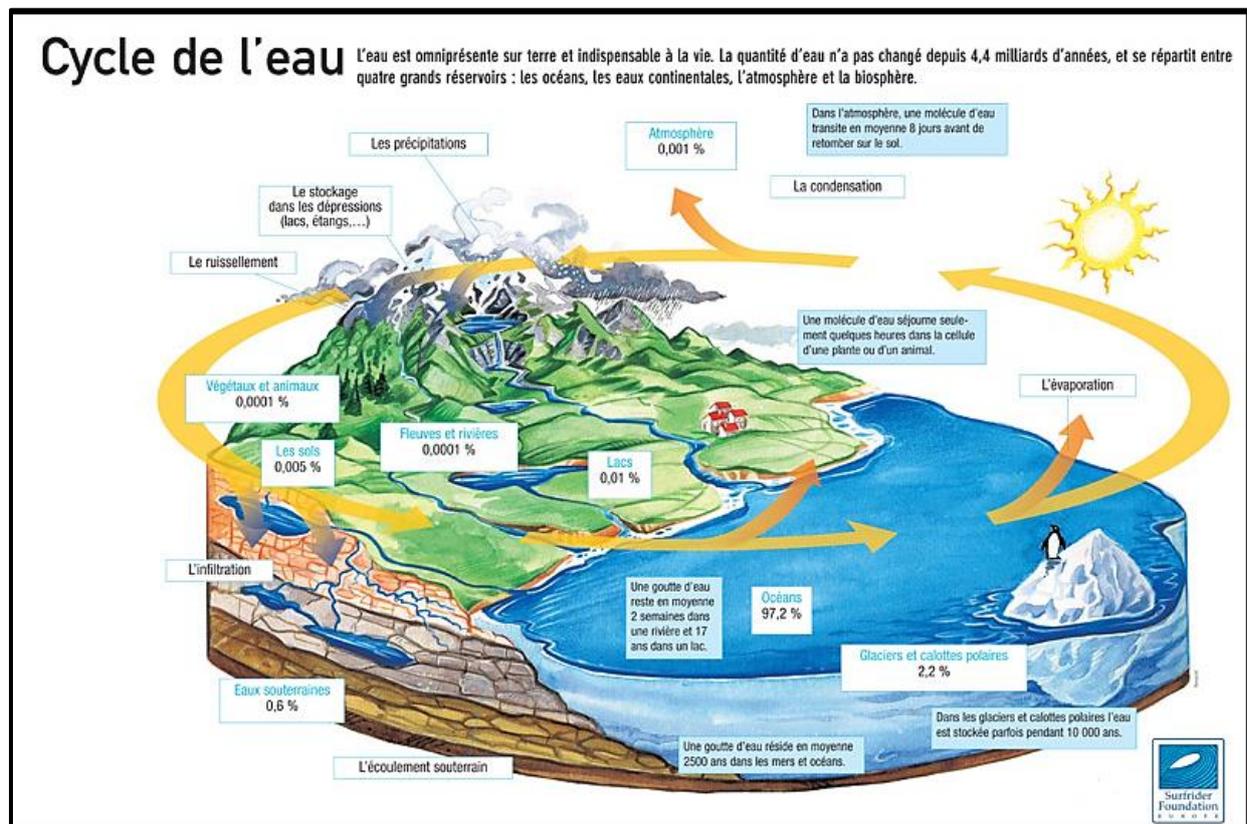


Figure I.1 : Cycle de l'eau (Surfrider foundation, 2010).

Le cycle de l'eau comprend plusieurs étapes :

### I.2.1. L'évaporation

Les eaux de surface (mer, lacs, rivières, ...) s'évaporent sous l'effet de la chaleur (soleil).

### I.2.2. L'évaporation et évapotranspiration

Ces termes désignent tous deux au départ des pertes en eau par retour direct à l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau, d'où l'évapotranspiration est une étape propre à la végétation qui produit de l'humidité grâce à son activité de photosynthèse.

### I.2.3. La condensation

L'eau évaporée et transpirée va se condenser puis former des nuages dans le ciel.

### I.2.4. Les précipitations

La condensation va faire en sorte que les nuages s'alourdissent en provoquant des précipitations (pluie).

### I.2.5. Le ruissellement

Lors des précipitations, l'eau de la pluie tombe sur la surface et ruisselle gravitairement.

### I.2.6. L'infiltration

L'eau de pluie va s'infiltrer dans quelques endroits où le sol sera perméable en pénétrant dans les profondeurs.

### I.2.7. La circulation souterraine

Après l'infiltration, l'eau circulera sous terre dans des nappes ou des aquifères.

## I.3. Notions de modélisation

### I.3.1. Définition

La modélisation des données est un processus de description de la structure, des associations, des relations et des contraintes relatives aux données disponibles. Elle sert à établir des normes et à coder des règles de gestion (modèles).

Les techniques de modélisation de données sont souvent représentées de manière graphique (diagramme) et assurent la portabilité. Le processus encourage la discussion, la collaboration, la relation et permet la transformation des besoins en réalité grâce aux données implémentées (Gnouma, 2006).

### I.3.2. Types de modélisation

Il existe trois types de modèles de données complémentaires qui doivent être générés lors de la mise en place d'un projet de modélisation. Nous résumons dans la figure ci-dessous les trois catégories de modèles, du plus large et abstrait au plus concret et spécifique (Bwira, 2016). (fig.I.2)

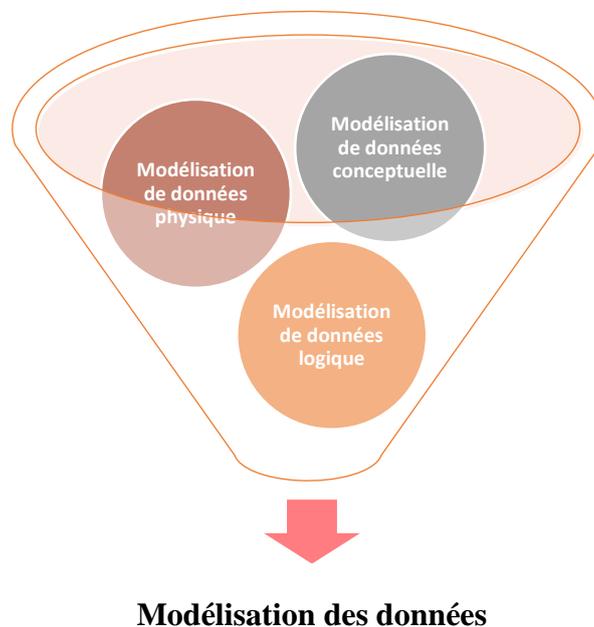


Figure I.2: Types de modélisation des données.

### 1.3.2.1. Modèle de données conceptuel

Ce modèle, également appelé schéma conceptuel exprime une vue d'ensemble des objectifs initiaux, sans entrer dans la précision. Il est de ce fait totalement indépendant des technologies, systèmes et logiciels. Dans ce modèle, on classe les données qui sont basées sur des cas concrets. (Bwira, 2016).

### 1.3.2.2. Modèle de données logique

Le schéma peut être transformé en un modèle de données logique dans lequel des spécifications et des propriétés plus détaillées sont formulées et traitées. Ce data model se focalise plutôt sur la structure des données requises et sur la manière dont elles peuvent être représentées dans un référentiel réel. Un modèle conceptuel peut aboutir à plusieurs modèles logiques, cela dépend de la complexité des informations sous-jacentes et de la sophistication des exigences (Bwira, 2016).

### 1.3.2.3. Modèle de données physique

Enfin, les spécifications peuvent être encodées dans des modèles de données physiques. Ils décrivent les tableaux et tables des bases de données individuelles, les colonnes et les types de composants. Ce modèle physique tient également compte des performances, de l'accès et de l'utilisation des ressources par les entités de l'organisation (Bwira, 2016).

Brièvement, on pourra dire :

- **Conceptuel** : interprétable par tout le monde et traite exclusivement des besoins de l'utilisateur.
- **Logique** : relie les entités et les attributs aux structures de données.
- **Physique** : concerne la réalisation et l'implantation.

**Remarque** : dans la pratique, certains outils et fonctionnements gomme peu à peu les phases de modèle et combinent le conceptuel et le logique ou le logique et le physique.

## I.4. Modélisation hydrologique

Lorsqu'on s'intéresse à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire, ou à l'une des différentes facettes du risque hydrologique, la modélisation du comportement hydrologique du bassin versant s'avère inéluctable. Elle doit pouvoir décrire les différentes étapes de la transformation pluie-débit et en particulier les processus liés à la formation des crues et l'apparition des étiages. Elle est censée aussi fournir des informations exploitables pour le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques, de protection de crues ou pour la gestion hydrologique et écologique du bassin versant étudié. A chaque stade de la modélisation des approximations sont réalisées : perception du phénomène, formalisation en un cadre conceptuel.

Il existe de nombreux modèles hydrologiques de bassin versant ayant chacun sa spécificité et son domaine d'application. Une fois le modèle choisi, il faut évaluer sa capacité à représenter la réalité. Ceci se fait le plus souvent en comparant les résultats du modèle avec les observations (Gnouma, 2006).

Un bon modèle doit remplir les critères du schéma suivant :

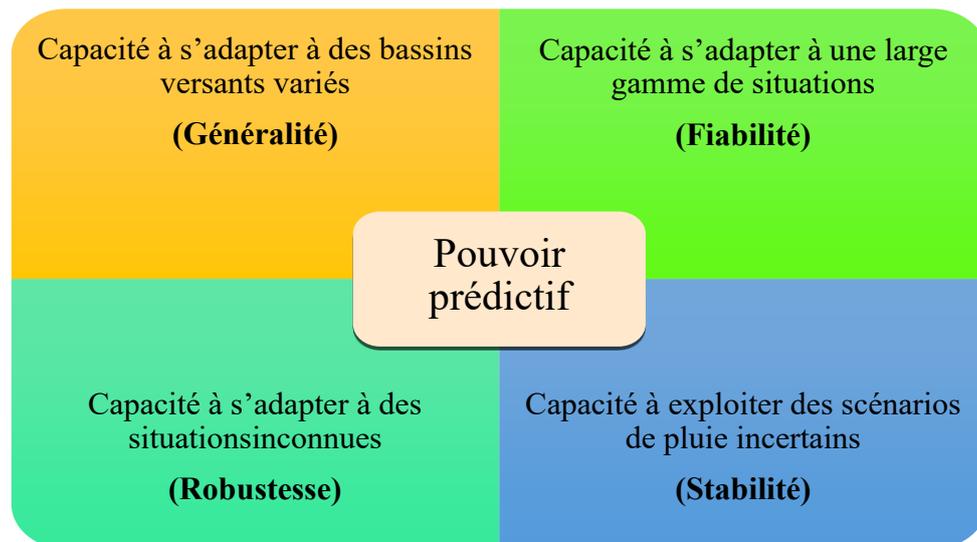


Figure I.3: Critères de qualification d'un modèle hydrologique (Oudin et al., 2006 *in* Perrin et al., 2008).

#### I.4.1. Choix du modèle

Le choix d'un modèle hydrologique se fait en fonction des éléments suivants :

- **Objectif de l'étude hydrologique** : Les objectifs sont multiples selon lesquels, on peut négliger ou simplifier certains paramètres dans la modélisation,
- **Disponibilité de données** : En dépit des incertitudes que présentent des modèles par rapport à d'autres, le manque de données nous contraint à les utiliser,
- **Nature du modèle** : la robustesse et la simplicité du modèle influencent le choix en particulier dans le cas où le temps ou le coût présentent une contrainte (Gherissi, 2018).

#### I.4.2. Etapes d'élaboration d'un modèle

Selon Ambroise, 1998, l'élaboration d'un modèle hydrologique comporte certaines étapes essentielles :

- ❖ **Définir** le modèle et ses objectifs en termes de précision. Cette définition permettra de déterminer les choix à faire par la suite et donc de préciser les chemins à suivre dans l'élaboration des étapes suivantes.
- ❖ **Identifier** le modèle, pour pouvoir définir et caractériser le système, ses frontières et sa structure, définir l'événement, les variables et les paramètres et émettre les hypothèses et le choix des échelles de temps et d'espace caractéristiques des processus de base.
- ❖ **Elaborer** l'algorithme à incorporer dans un outil informatique capable de procéder aux instructions. Cet algorithme doit être suivi de la vérification du logiciel lui-même (De Marsily et Ambroise, 1998, Iles, 2019).
- ❖ **Caler** le modèle, par estimation des paramètres du modèle, non mesurables, selon des critères déductifs ou des observations des entrées et des sorties. Il existe deux façons d'estimer les paramètres à partir d'un échantillon :

- La méthode passive (on prend tous les couples entrées-sorties disponibles, et par des Méthodes statistiques, on évalue les coefficients des équations),
- La méthode active (en donnant un poids spécifique plus grand à certaines observations ou groupe d'observations). Le calage peut être manuel ou automatique.

❖ **Evaluer** le modèle, en comparant la réponse simulée par le modèle à une sollicitation expérimentale et la réponse réelle, à partir de données différentes de celles utilisées pour le calage.

❖ **Définir** le domaine de validité du modèle élaboré. La formulation mathématique du modèle est basée sur des équations simplifiées, selon certaines hypothèses concernant les conditions initiales et conditions aux limites. Dans chaque modèle, On distingue quatre types de variables qui peuvent se trouver en totalité ou en partie dans chaque modèle :

- **Variables d'entrée** : il s'agit des entrées du modèle, qui dépendent du temps et/ou de l'espace (pluie, ETP, caractéristiques physiques et hydrodynamiques du milieu, ...),
- **Variables de sortie** : le modèle répond par un ensemble de variables qui sont généralement les débits simulés à l'exutoire du bassin versant, mais qui peuvent parfois être aussi l'ETR, des niveaux piézométriques,... etc.
- **Variables d'état** : il s'agit des variables internes au système, elles permettant de caractériser l'état du système modélisé et peuvent évoluer en fonction du temps. Précisément, ces variables sont les niveaux de remplissage des différents réservoirs (neige / production / routage), taux de saturation des sols, profondeur des sols, pentes, ...),
- **Paramètres** : servent à adapter la paramétrisation des lois régissant le fonctionnement du modèle, au bassin versant étudié, et fait intervenir des variables dont la valeur doit être déterminée par calage (conductivité hydraulique à saturation, ...).

#### I.4.3. Classification des modèles hydrologiques

Un modèle est toujours caractérisé par 5 éléments principaux : la géométrie du bassin versant, les entrées dans le système (bassin versant), les sorties dans le système, puis les lois de formalisation de processus, et enfin les conditions aux limites du système (Singh, 1995. (Gnouma, 2006).

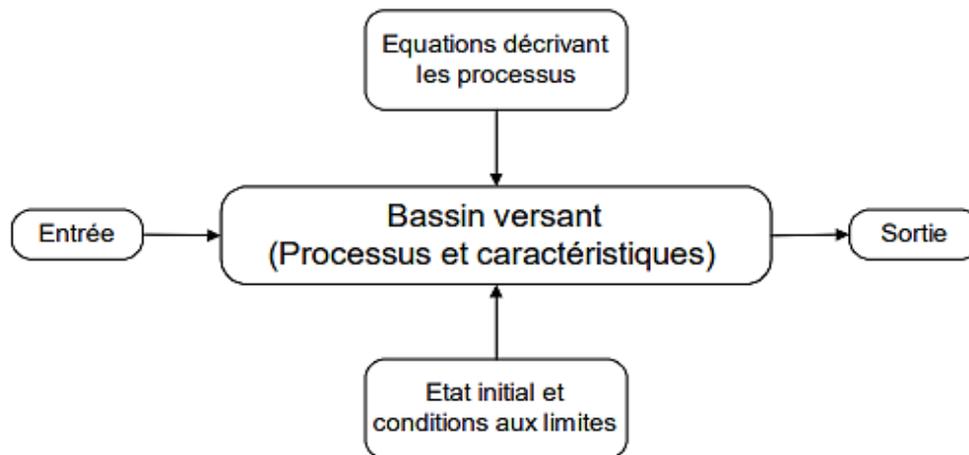


Figure I.4: Composantes d'un modèle (Singh, 1995)

Donc, les modèles hydrologiques sont classés selon trois critères et qui sont : la description des processus, l'échelle spatio-temporelle et la méthode utilisée pour résoudre les lois de formalisation.

Nous avons repris la classification de Kauark Leite (1990), basée sur la description des processus hydrologiques dans le modèle et sa liaison avec les caractéristiques du bassin versant, et l'avons résumé dans la figure qui suit :

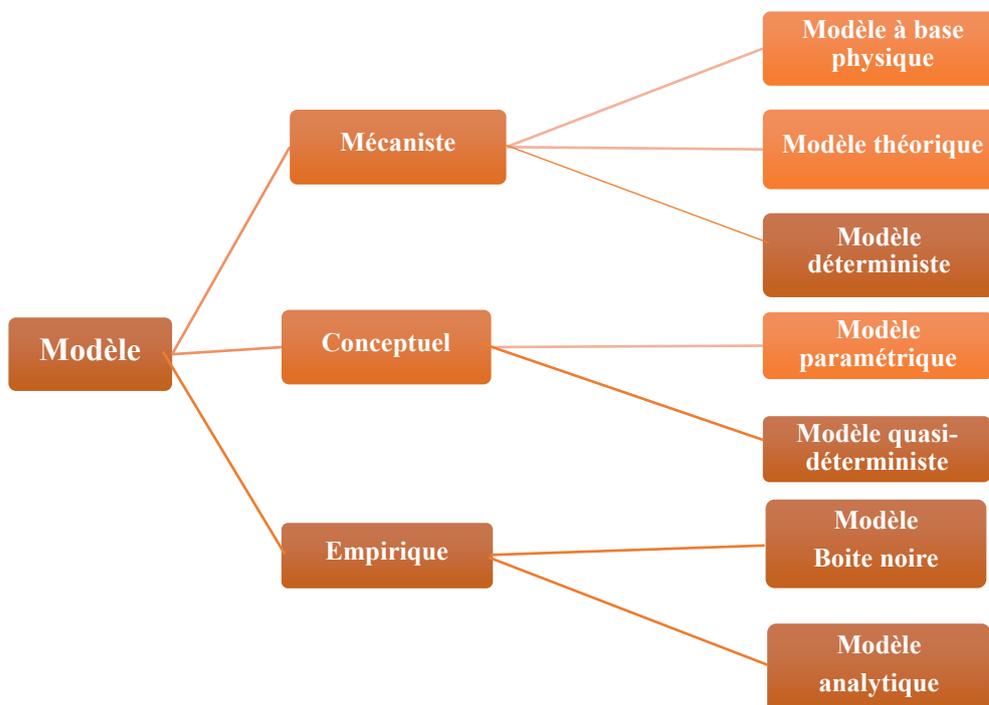


Figure I.5: Classification des modèles hydrologiques (Kauark Leite, 1990),

### I.4.3.1. Modèle à base physique

Selon Mailhot (1998) *in* (Yérima, 2002), le modèle à base physique est un modèle dont les équations ont été déduites à partir des principes de base de la physique (conservation de masse, quantité de mouvement, quantité d'énergie...), et dont la forme finale simplifiée contient des paramètres qui ont un sens physique. Ces paramètres peuvent être estimés à priori à partir des différentes caractéristiques physiques, et éventuellement un calage (Loumagne et al, 1991 *in* Iles, 2019).

### I.4.3.2. Modèle déterministe

Dans un modèle déterministe, nous supposons que les variables d'entrée et les paramètres du système sont parfaitement déterminés ou déterminables (Gnouma, 2006).

### I.4.3.3. Modèle stochastique

Jensen (1992) considère qu'une approche stochastique est un moyen rationnel de traiter la caractérisation spatiale de la variabilité, et d'établir un lien entre les incertitudes des paramètres et celles des prédictions (Iles, 2019). Ce modèle consiste plutôt à distribuer des probabilités qui sont associées aux variables d'entrée et les paramètres du système. L'approche probabiliste est utilisée soit parce que le phénomène étudié est aléatoire soit parce que nous cherchons à représenter des permanences difficilement explicites physiquement (Chocat, 1997).

### I.4.3.5. Modèle empirique de classe boîte noire

Ce type de modèle cherche à reproduire la dynamique des variables de sortie en fonction des variables d'entrée sans tenter de décrire les processus élémentaires (Gnouma, 2006). Selon Ambroise (1991), le modèle empirique caractérise globalement la relation pluie-débit par des traitements de séries chronologiques (fig. I. 6).



Figure I.6: Modèle à boîte noire (M. Abtini, 2018).

### I.4.3.6. Modèle quasi-déterministe

Dans ce modèle, l'espace est discrétisé en sous-unités que l'on considère comme 'homogène' en termes de caractéristique physique et/ou en termes de fonctionnement hydrologique (Ambroise, 1991). Plusieurs approches ont été développées pour mieux découper l'espace et intégrer ainsi une description de la variabilité spatiale des caractéristiques physiographiques du bassin dans la connaissance des processus hydrologiques (Gnouma, 2006).

## I.5. Exemples de modèles hydrologiques utilisés dans la littérature

### I.5.1. Modèle du génie rural

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

#### 1.5.1.1. Modèle pluie-débit GR1A

Le modèle GR1A (modèle du Génie Rural à 1 paramètre Annuel) est un modèle pluie-débit global à un seul paramètre. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1990, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications d'évaluation et de gestion de la ressource en eau (Perrin et al., 2007).

#### ❖ Description mathématique

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

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{X.E} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\} \quad (\text{Eq. 1.1})$$

Où :  $X$  est l'unique paramètre du modèle.

Cette formule dérive de la formule de Turc (1955), qui donne l'écoulement moyen interannuel. Une recherche systématique de la meilleure manière de prendre en compte l'état antérieur du système a montré que l'on devait se limiter à prendre en compte la pluie de l'année précédant l'année en cours. Le paramètre  $X$  traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique (par exemple échange avec des nappes profondes ou avec des

bassins adjacents dans le cas d'une non-superposition des limites topographiques et géologiques) : si  $X$  est supérieur à 1, le système perd de l'eau et si  $X$  est plus petit que 1, le système en gagne, le tout exprimé en fraction de l'ETP (Perrin et al., 2007).

#### ❖ Paramètre

Le modèle ne comporte qu'un paramètre optimisable, le paramètre  $X$  adimensionnel, qui apparaît comme un coefficient modulateur de l'évapotranspiration potentielle. Sur un large échantillon de bassins versants, la médiane de  $X$  vaut 0.7 et un intervalle de confiance à 90% est donné par [0.13; 3.5] (Perrin et al., 2007).

#### I.5.1.2. Modèle pluie-débit GR2M

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1980, avec des objectifs d'application dans le domaine des ressources en eau et des étiages (Perrin et al., 2007).

Sa structure, bien qu'empirique, l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage ainsi qu'une ouverture sur l'extérieur autre que le milieu atmosphérique. Ces trois fonctions permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin (fig. I.7).

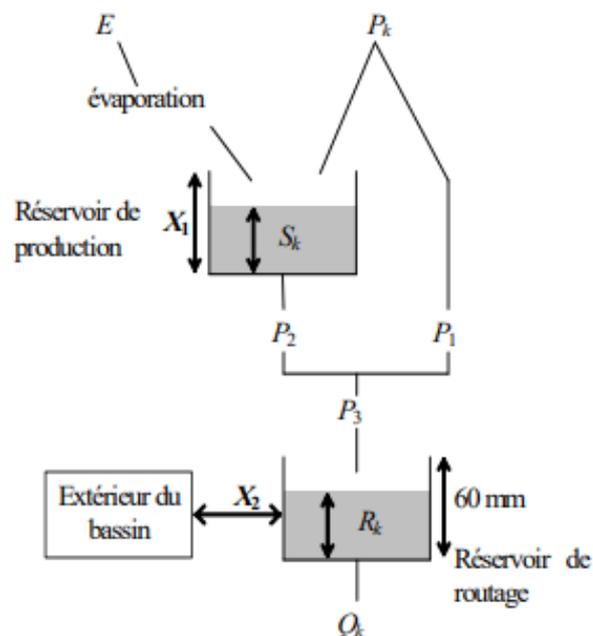


Figure I.7: Schéma de la structure du modèle GR2M (Perrin, 2003).

## ❖ Description mathématique

D'où :

P<sub>k</sub> : Pluie mensuelle du mois,

K et E : Evapotranspiration potentielle moyenne pour le même mois calendaire.

Les équations qui régissent le modèle sont les suivantes :

## • Production

La fonction de production du modèle repose sur un réservoir de suivi d'humidité du sol. Une partie P<sub>s</sub> de la pluie P<sub>k</sub> va être ajoutée au contenu S<sub>k</sub> dans le réservoir en début de pas de temps :

$$P_s = \frac{X_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_k}{X_1}\right)}{1 + \frac{S}{X_1} \cdot \tanh\left(\frac{P_k}{X_1}\right)} \quad (\text{Eq. I.1})$$

Le paramètre X<sub>1</sub>, capacité du réservoir, est positif et exprimé en mm. La pluie en excès, P<sub>1</sub>, est donnée par :

$$P_1 = P - P_s' \quad (\text{Eq. I.2})$$

et le contenu du réservoir est actualisé :

$$S' = S_k + P_s \quad (\text{Eq. I.3})$$

Du fait de l'évapotranspiration, une quantité E<sub>s</sub> est prélevée du réservoir :

$$E_s = \frac{S' \cdot \left(2 - \frac{S'}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S'}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)} \quad (\text{Eq. I.4})$$

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

$$S'' = S' - E_s \quad (\text{Eq. I.5})$$

## • Percolation

Le réservoir de suivi d'humidité du sol se vidange ensuite selon une percolation P<sub>2</sub> :

$$P_2 = S'' \quad (\text{Eq. I.6})$$

et son niveau S<sub>k+1</sub>, prêt pour les calculs du mois suivant, est alors donné par :

$$S_{k+1} = S'' - P_2 \quad (\text{Eq. I.7})$$

## • Routage et échange avec l'extérieur non atmosphérique

La quantité d'eau totale P<sub>3</sub> qui atteint le réservoir de routage est donnée par :

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad (\text{Eq. I.8})$$

Le niveau R<sub>k</sub> dans le réservoir devient alors R' :

$$R' = R_k + P_3 \quad (\text{Eq. I.9})$$

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

$$F = (X_2 - 1) \cdot R' \quad (\text{Eq. I.10})$$

Le paramètre X<sub>2</sub> est positif et adimensionnel. Le niveau dans le réservoir devient :

$$R'' = X_2 \cdot R' \quad (\text{Eq. I.11})$$

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

$$Q_k = \frac{R''^2}{R''+60} \text{ (Eq. I.12)}$$

Le contenu du réservoir est enfin actualisé par :

$$R_{k+1} = R'' - Q_k \text{ (Eq. I.13)}$$

#### ❖ Paramètre

Le modèle a deux paramètres optimisables :

X1 : capacité du réservoir de production (mm)

X2 : coefficient d'échanges souterrains (-)

Sur un large échantillon de bassins versants, on obtient les valeurs données dans le tableau I.1.

Tableau I.1 : Valeurs des paramètres du modèle GR2M (Perrin, 2000).

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 90%
X1 (mm)	380	140--2640
X2 (-)	0.92	0.21—1.31

#### I.5.1.3. Modèle pluie-débit GR4J

Le modèle est un modèle pluie-débit global à quatre paramètres, journalier, développé au début des années 1980, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications de gestion de la ressource en eau et d'ingénierie (dimensionnement d'ouvrage, prévision des crues et des étiages, gestion de réservoirs, détection d'impact...).

C'est un modèle ayant une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui permet de tenir compte des conditions antérieures et d'en assurer un fonctionnement en continu. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage, des hydrogrammes unitaires ainsi qu'une fonction d'ouverture sur l'extérieur non atmosphérique permettant de simuler le gros du comportement hydrologique du bassin (fig.I.8).

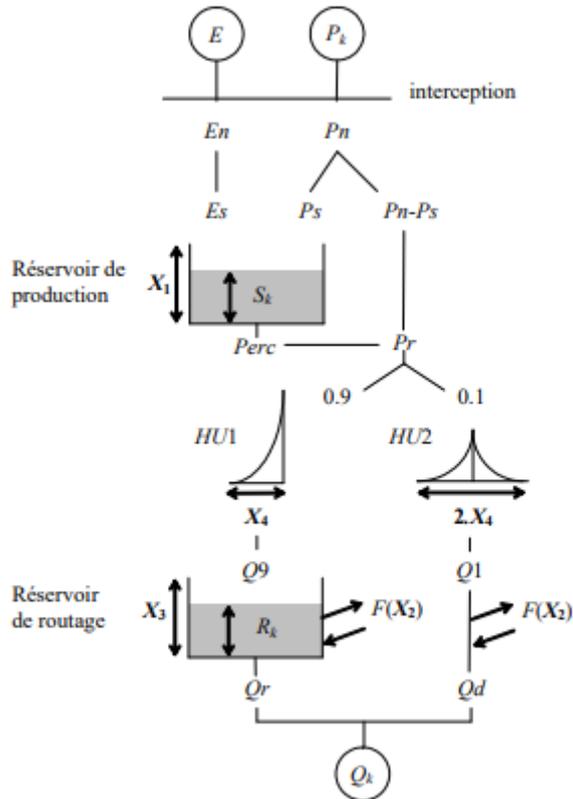


Figure I.8 : Schéma de la structure du modèle GR4J (Perrin, 2003).

❖ **Description mathématique**

Pk est la pluie journalière du jour K et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même jour calendaire.

• **Neutralisation**

La première opération est la neutralisation de Pk par E pour déterminer une pluie nette Pn et une évapotranspiration nette En calculée par :

$$\text{Si } P_k \geq E, \rightarrow P_n = P_k - E \quad \text{et } E_n = 0 \quad (\text{Eq. I.14})$$

$$\text{Si } P_k < E, \rightarrow P_n = 0 \quad \text{et } E_n = E - P_k \quad (\text{Eq. I.15})$$

• **Fonction de rendement**

Dans le cas où Pn est différente de zéro, une partie Ps de Pn alimente le réservoir de production et est calculée par :

$$P_s = \frac{X_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)}{1 + \frac{S_k}{X_1} \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)} \quad (\text{Eq. I.16})$$

Où :

X1 (mm) : Capacité maximum du réservoir de production,

Sk : Contenu du réservoir de production au début du jour k.

Dans le cas contraire, lorsque (En) est différent de zéro, une quantité d'évaporation (Es) est retirée du réservoir de production. Elle est donnée par :

$$E_s = \frac{S_k \cdot \left(2 - \frac{S_k}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S_k}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)} \text{ (Eq. I.17)}$$

Le contenu du réservoir qui résulte de ces opérations est donnée par :

$$S' = S_k + P_s - E_s \text{ (Eq. I.18)}$$

• **Percolation**

Une percolation Perc issue du réservoir de production est alors calculée par l'équation suivante :

$$\text{Perc} = S' \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{4}{9} \frac{S'}{X_1} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \text{ (Eq. I.19)}$$

Par suite, le contenu du réservoir devient :

$$S_{k+1} = S' - \text{Perc} \text{ (Eq. I.20)}$$

et la quantité d'eau Pr qui atteint finalement la partie routage du modèle est donnée par :

$$Pr = \text{Perc} + (P_n - P_s) \text{ (Eq. I.21)}$$

• **Hydrogrammes unitaires**

Pr est divisé en deux composantes d'écoulement, 90 % étant routés par un hydrogramme unitaire HU1 et un réservoir de routage et 10 % par un hydrogramme unitaire symétrique HU2. HU1 et HU2 dépendent du même paramètre X4, temps de base de HU1 exprimé en jours. Les ordonnées des hydrogrammes sont calculées à partir des courbes en S notées respectivement SH1 et SH2, qui correspondent aux fonctions cumulées de l'hydrogramme. SH1 est définie en fonction du temps par :

$$\text{Pour } t \leq 0, \quad SH1(t) = 0 \text{ (Eq. I.22)}$$

$$\text{Pour } 0 < t < X_4, \quad SH1(t) = \left( \frac{t}{X_4} \right)^{\frac{5}{2}} \text{ (Eq. I.23)}$$

$$\text{Pour } t \geq X_4, \quad SH1(t) = 1 \text{ (Eq. I.24)}$$

SH2 est définie de façon similaire par :

$$\text{Pour } t \leq 0, \quad SH2(t) = 0 \text{ (Eq. I.25)}$$

$$\text{Pour } 0 < t \leq X_4, \quad SH2(t) = \frac{1}{2} \left( \frac{t}{X_4} \right)^{\frac{5}{2}} \text{ (Eq. I.26)}$$

$$\text{Pour } X_4 < t < 2 \cdot X_4, \quad SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left( 2 - \frac{t}{X_4} \right)^{\frac{5}{2}} \text{ (Eq. 1.27)}$$

$$\text{Pour } t \geq 2 \cdot X_4, \quad SH2(t) = 1 \text{ (Eq. I.28)}$$

Les ordonnées de HU1 et HU2 sont alors calculées par :

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j-1) \text{ (Eq. I.29)}$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j-1) \text{ (Eq. 1.30)}$$

Où : j est un entier.

A chaque pas de temps k, les sorties Q9 et Q1 des deux hydrogrammes correspondent à la convolution des pluies antérieures par la clé de répartition donnée par l'hydrogramme discrétisé et sont calculées par :

$$Q9(k) = 0.9. \sum_{j=1}^l UH1(j). Pr (k - j + 1) \quad (\text{Eq. I.31})$$

$$Q1(k) = 0.1. \sum_{j=1}^m UH2(j). Pr (k - j + 1) \quad (\text{Eq. I.32})$$

Où : l = int(X4) + 1 et m = int(2.X4) + 1, avec int(.) désignant la partie entière.

**• Fonction d'échange avec l'extérieur non atmosphérique**

Un échange souterrain en eau est calculé par :

$$F = X2. \left( \frac{Rk}{X3} \right)^{\frac{7}{2}} \quad (\text{Eq. I.33})$$

Où :

Rk : Niveau dans le réservoir en début de pas de temps,

X3 : Capacité à un jour du réservoir,

X2 : Coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas de pertes vers des nappes profondes ou nul. En fait, l'interprétation physique de cette fonction d'échange n'est pas directe.

**• Réservoir de routage**

Le niveau dans le réservoir de routage est modifié en ajoutant la sortie Q9 de l'hydrogramme HU1 et F :

$$R' = \max (0 ; Rk + Q9(k) + F) \quad (\text{Eq. I.34})$$

Il se vidange ensuite en une sortie Qr donnée par :

$$Qr = R'. \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{R'}{X3} \right)^4 \right]^{-\left(\frac{1}{4}\right)} \right\} \quad (\text{Eq. I.35})$$

Le niveau dans le réservoir devient :

$$R_{k+1} = R' - Qr \quad (\text{Eq. I.36})$$

**• Ecoulement total**

La sortie Q1 de l'hydrogramme HU2 est soumise au même échange pour donner la composante d'écoulement Qd :

$$Qd = \max (0 ; Q1(k) + F) \quad (\text{Eq. I.37})$$

Le débit total Q est alors donné par :

$$Qk = Qr + Qd \quad (\text{Eq. I.38})$$

## ❖ Paramètres

Le modèle GR4J ne comporte que quatre paramètres à caler :

X1 : Capacité du réservoir de production (mm)

X2 : Coefficient d'échanges souterrains (mm)

X3 : Capacité à un jour du réservoir de routage (mm)

X4 : Temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (j)

Sur un large échantillon de bassins versants, on obtient les valeurs données dans le Tableau I.2.

Tableau I.2 : Valeurs des paramètres du modèle GR4J (Perrin, 2004).

Paramètres	Médiane	Intervalle de confiance à 90%
X1 (mm)	350	100 - 1200
X2 (mm)	0	-5 - 3
X3 (mm)	90	20 - 300
X4 (j)	1,7	1,1- 2,9

## I.5.2. Modèle HBV Light

(Hydrologiska Byråns Vattenbalans avdelning : Bureau Hydrologie Section Ressources en eau) c'est un Modèle simple pour conditions hydrologiques avec forte influence neigeuse dans les pays nordiques, prévision des crues, gestion des ressources hydroélectriques. Ce modèle hydrologique était conçu par Bergström et Forsman (1973). « Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), Norrköping, Suède » (Perrin, 2000).

## • Réservoir d'accumulation de la neige

L'accumulation est la fonte de la neige s'effectue par une simple procédure en degré-jour par rapport à une température seuil de fonte TT. La quantité de neige fondue MELT est exprimée par :

$$\text{MELT} = \text{CMELT} \cdot (T - \text{TT}) \quad (\text{Eq. I.39})$$

Où :

T est la température et CMELT le facteur de fonte. Un paramètre de correction de la quantité de neige CSF est utilisé pour tenir compte des erreurs de mesure de la hauteur de neige.

## • Réservoir sol

Le réservoir sol reçoit la pluie et les fontes neigeuses. Un indice d'humidité est calculé et le débit Q est donné par la relation :

$$dQ/dP = (S_{sm}/F_c) \beta \quad \text{Pour } S_{sm} < F_c \quad (\text{Eq. I.40})$$

$$dQ/dP = 1 \quad \text{Pour } S_{sm} \geq F_c \quad (\text{Eq. I.41})$$

Où :

S<sub>sm</sub> : Humidité du réservoir sol,

F<sub>c</sub> : Capacité maximale du réservoir sol,

P : Entrée du réservoir,

$\beta$  : Constante.

L'évapotranspiration agit à un régime potentiel pour  $S_{sm} > LP$  et l'évapotranspiration décroît ensuite linéairement de l'ETP jusqu'à 0 pour  $LP \geq S_{sm} \geq 0$ .

(Une correction peut être effectuée sur l'évapotranspiration potentielle pour tenir compte des inversions de température, avec un paramètre supplémentaire).

- **Réservoir intermédiaire**

Il reçoit le débit du réservoir sol et se vidange en trois composantes : des percolations profondes constantes PERC (si elles peuvent être satisfaites), un débit de surface  $Q_0$  au-dessus d'un seuil UZL et un débit de subsurface  $Q_1$ , tous deux exprimés par :

$$Q_0 = K_0 \cdot (Suz - UZL) \quad (\text{Eq. I.42})$$

$$Q_1 = K_1 \cdot Suz \quad (\text{Eq. I.43})$$

Où :

Suz : Niveau du réservoir,

$K_0$  et  $K_1$  : Constantes.

- **Réservoir eau-souterraine**

Il reçoit les percolations PERC et se vidange linéairement en un débit de base  $Q_2$  suivant :

$$Q_2 = K_2 \cdot Slz \quad (\text{Eq. I.44})$$

Où :

Slz : Niveau du réservoir profond,

$K_2$  : Constante.

- **Concentration des écoulements**

Les trois débits  $Q_0$ ,  $Q_1$  et  $Q_2$  sont additionnés et la réponse est lissée par un hydrogramme unitaire triangulaire, de durée MAXBAS. Dans le cas où le modèle est utilisé en mode semi-distribué avec identification de plusieurs sous bassins, une méthode Muskingum de concentration des écoulements est utilisée.

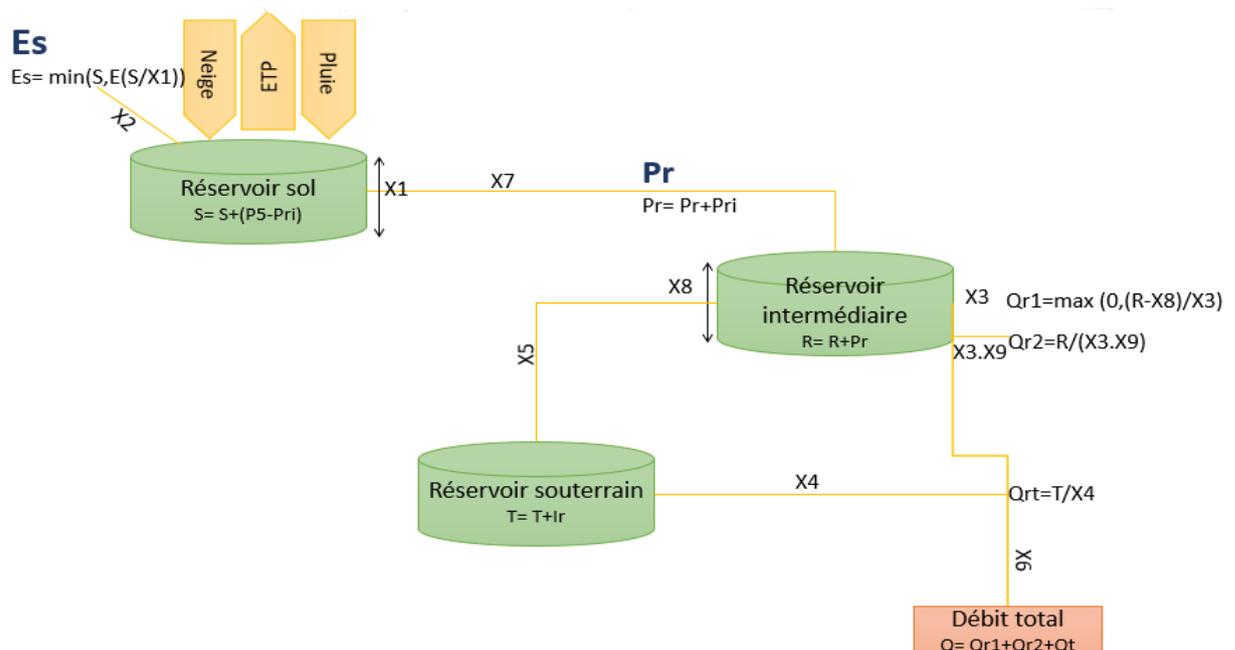


Figure I.9 : Schéma structural du modèle HBV Light.

avec :

- X1 : (Fc) Capacité maximale du réservoir sol,
- X2 : (LP) Seuil pour l'ETP,
- X3 : Constante de vidange supérieure du réservoir intermédiaire,
- X4 : Constante de vidange du réservoir souterrain,
- X5 : (PERC) Coefficient de percolation,
- X6 : (MAXBAS) Constante de temps de l'hydrogramme triangulaire,
- X7 : ( $\beta$ ) Exposant de vidange du réservoir,
- X8 : Seuil d'écoulement du réservoir intermédiaire,
- X9 : (K2) Constante de vidange inférieure du réservoir intermédiaire.

On réalise une boucle sur chaque pas de temps en décomposant le pas de temps en cinq sous pas de temps. On considère sur chacun d'eux un cinquième de la pluie et un cinquième de l'ETP.

#### • Données

En entrée, données de pluie (chronique de débit pour le calage des paramètres) ; données d'ETP - utilisation de la formule de Priestley-Taylor par Gardelin et Lindström (1997), température pour le module neige, Travaux de Andersson (1992) sur ETP – température. Le modèle était développé initialement avec un pas de temps journalier.

- **Application du modèle**

Le modèle a été testé sur de très nombreux bassins (Cf. revue bibliographique par Bergström, 1995) et a été utilisé dans de nombreuses applications hydrologiques: dimensionnement d'ouvrages (Bergström et al., 1992; Lindström et Harlin, 1992), prédétermination, détection d'effets de changement climatique (Vehviläinen et Lohvansuu, 1991) ou d'occupation des sols (Brandt et al., 1988), modélisation du pH et de l'alcalinité (Bergström et al., 1985), modélisation de réponses de nappes (Bergström et Sandberg, 1983), Travaux sur les incertitudes sur les paramètres du modèle par Harlin et Kung (1992), Seibert (1997), Uhlenbrook et al. (1999), voir également article de réflexion de Bergström (1991) 14. Travaux en Suisse (Braun et Renner, 1992), en Allemagne (Uhlenbrook et al., 1998) et en Suède (Johansson, 1994 ; Seibert, 1999).

### I.5.3. Modèle à réservoirs GARDENIA

Le modèle GARDENIA (modèle Global A Réservoirs pour la simulation des Débits et des Niveaux Aquifères) a été mis au point au BRGM (Bureau de Recherche en Géologie Minière) à la fin des années 1988 (Roche et Thiery, 1984) avec des objectifs d'application dans le domaine des ressources en eau (Bendjema, 2020). La description du modèle est comme suit :

- **Réservoir de surface**

Le réservoir de surface reçoit la pluie brute et est soumis à l'évapotranspiration ETR qui correspond à l'évapotranspiration potentielle ETP corrigée d'un coefficient PETC. Le réservoir est caractérisé par sa capacité maximale RUMAX. L'excès de pluie alimente le réservoir sol sous-jacent. (Perrin, 2000)

- **Réservoir sol**

Le réservoir sol reçoit l'excédent du réservoir de surface et se vidange d'une part dans le réservoir eau-souterraine par percolations de façon linéaire (constante THG) et d'autre part de façon quadratique en un débit de surface QS (constante k), de telle sorte qu'à la hauteur RUIPER dans le réservoir, la vidange en percolation soit égale à la vidange de ruissellement de surface. La constante de vidange k peut donc être exprimée de la façon suivante :

$$RUIPER / THG = k \cdot RUIPER^2 \quad (\text{Eq. I.45})$$

$$D'où : k = 1 / (RUIPER \cdot THG) \quad (\text{Eq. I.46})$$

$$\text{Soit } QS = H^2 / (RUIPER \cdot THG) \quad (\text{Eq. I.47})$$

- **Réservoir eau-souterraine**

Il est alimenté par les percolations du réservoir intermédiaire et se vidange de façon linéaire en un débit de base QB (constante K1).

- **Débit total**

Le débit total est la somme des débits de surface et du débit de base.

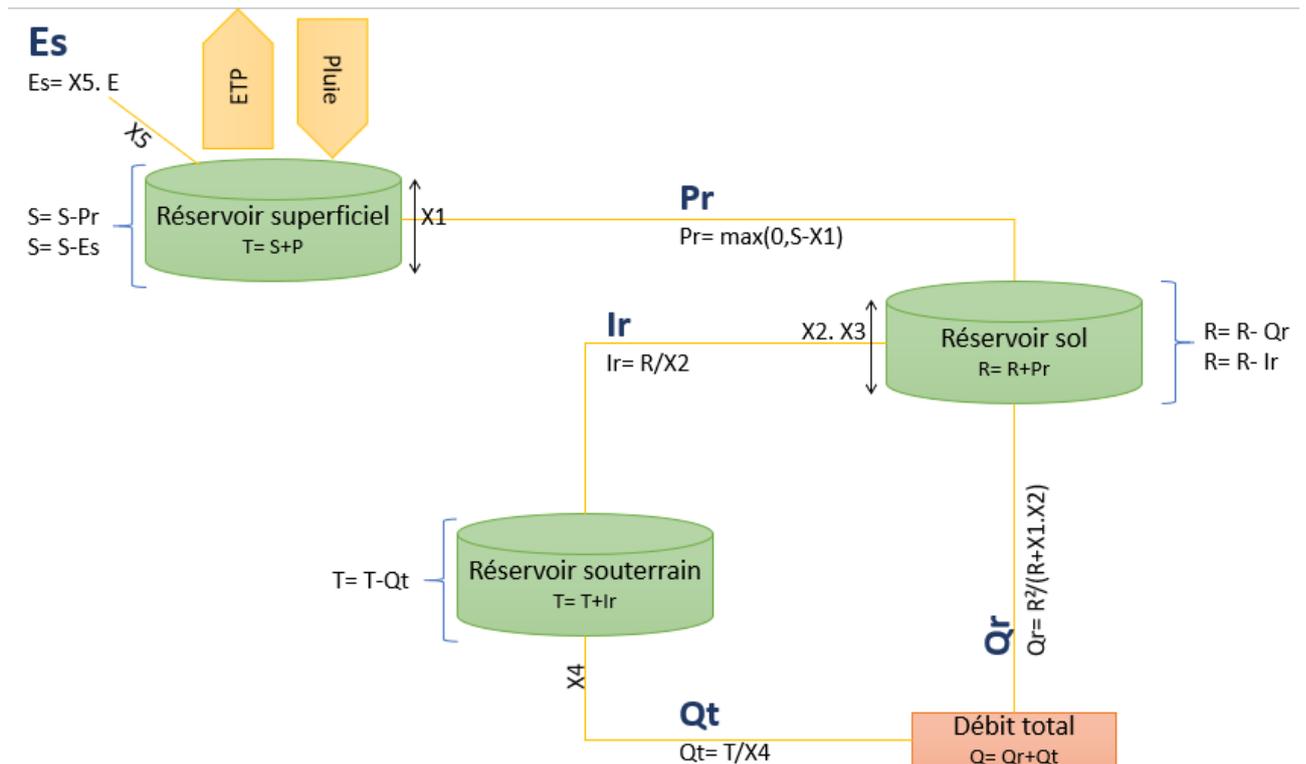


Figure I.10 : Schéma structural du modèle Gardenia.

Avec :

- X1 : (RUMAX) Capacité du réservoir de surface,
- X2 : (THG) Constante de percolation linéaire,
- X3 : (RUIPER) Hauteur du ruissellement-percolation,
- X4 : (K1) Constante de vidange du réservoir souterrain,
- X5 : (PETC) Coefficient de correction de l'ETP,
- X6 : Pas de temps.

• **Données**

En entrée, chronique de pluie (+ débits en calage), Evapotranspiration (formule de Turc). Le modèle donne en sortie, niveau piézométrique et débit. Ce modèle utilise un pas de temps journalier.

• **Application du modèle**

Sur des bassins en France (BRGM, 1996), bassins au Burkina-Faso (Filippi et al., 1990), pour la prévision des niveaux des nappes (Thiery, 1988), mise en évidence d'effets d'activités humaines (Thiery, 1982). Le niveau du réservoir souterrain est lié aux variations des niveaux de nappe.

On site d'autres modèles utilisés dans le domaine de l'hydrologie dans le tableau suivant (Perrin, 2000) :

Tableau 1.3 : Quelques exemples de modèles hydrologiques

Modèle	Auteur/ Année	Institut	Type du modèle
BOORMAN	BONVOISION et BOORMAN (1992)	Institute of Hydrology, Wallingford, UK	
CREC	CORMARY et GUILBOT (1973)	Laboratoire d'Hydrologie Mathématique, Université des Sciences, et ORSTOM, Montpellier, France	Modèle conceptuel global
CEQUEAU	GIRARD (1972)	Institut National de la Recherche Scientifique INRS-Eau Québec, Canada	Modèle conceptuel distribué
GIBSI	MAILHOT (1997)	INRS-Eau du Québec (1995)	Modèle conceptuel distribué
MIKE-SHE	ABBOTT (1986)	DanishHydrologic Institute, le British Institute of hydrology et la SOGREAH	Modèle mécanique
SWAT	ARNOLD (1994)	US Environmental Protection Agency, USA USDA, Agricultural Research Service, USA.	Modèle conceptuel distribué Modèle physique distribué
WATERWARE	JAMIESON et FEDRA (1996)	'Université de Bologne en Italie, l'Université de Collège Cork en Irlande, l'Université de Newcastle en Angleterre, l'International Institute for Applied Systems Analysis en Australie, Thames Water International, en Angleterre, Ansaldo Industria Spa en Italie	Modèle conceptuel distribué
TOPMODEL	BEVEN et KIRBY (1979)	Institute of Environmental and Biological Sciences, University of Lancaster, Lancaster, Royaume-Uni School of Geography, University of Leeds, Leeds, Royaume-Uni	Modèle conceptuel distribué

**I.6. Calage du modèle hydrologique**

Le calage est une étape fondamentale dans la démarche de toute modélisation hydrologique. Elle consiste à rechercher les valeurs optimales des paramètres des différentes équations (régissant l'écoulement) utilisées dans le modèle hydrologique (Kingumbi, 2006).

Le calage a pour objectifs de :

- Compenser les erreurs de mesures de données fournies aux modèles.
- Forcer les paramètres vers des valeurs dont l'interprétation ne correspond pas à la physique du modèle.

Pour vérifier le calage d'un modèle, une méthode commune est le split-sample test (Klemes, 1986). On découpe en deux parties la période de données observées, une partie appelée période de calage sur laquelle nous calons le modèle, et une période de validation où le modèle réalise sa simulation avec les paramètres calés sur la période de calage, et qui nous servira de validation (Gosset, 2014).

**I.7. Conclusion**

La modélisation hydrologique est la principale cause du développement du domaine de l'hydrologie qui a permis de transformer la liaison entre le réservoir naturel (aquifère) et le milieu naturel (climat, temps, terre) en graphes et schémas afin de mieux gérer les ressources dans l'espace et le temps. Par conséquent, plusieurs modèles sont mis au point par des chercheurs en fonction de la région, climat, et des paramètres physiques, et qui ont donné des résultats admissibles.

# Chapitre II

---

---

Etude du site

## Introduction

La ville de Sebdou située à 36 km au Sud de la wilaya de Tlemcen (Nord-Ouest de l'Algérie à 909m d'altitude, constitue le relais entre les zones steppiques et la chaîne atlasique tellienne (Aziz, 2014). Elle est caractérisée par un climat méditerranéen avec un été chaud (classification de Koppen : csa) (fr.db-city.com/Algérie-Tlemcen-Sebdou).

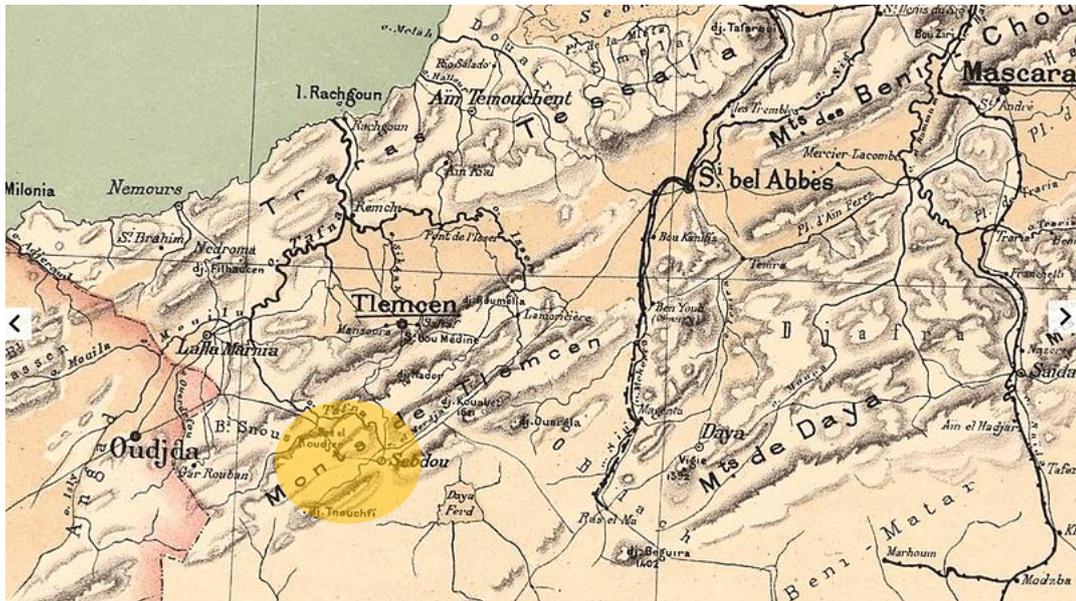


Figure II.1: Carte de Tlemcen (Algérie, la carte du commandant Niox (1884), in association études coloniales (2006)).

Le bassin versant d'oued Sebdou (bassin contrôlé par la station hydrométrique située au centre de Sebdou) occupe une superficie de 439,3 Km<sup>2</sup> (fig. II.2), avec une altitude maximale de 1465 m. La longueur du thalweg principal est de 24,85 km. Le bassin est caractérisé par deux ensembles distincts :

- au Nord et au Nord-ouest par un Horst, essentiellement formé de roches carbonatées dolomitiques et de grés du Jurassique.

- au Sud et à l'Est par un graben rempli de sédiments plio - quaternaires correspondant au fossé de Sebdo (Baba Hamed & Kerzabi, 1991).

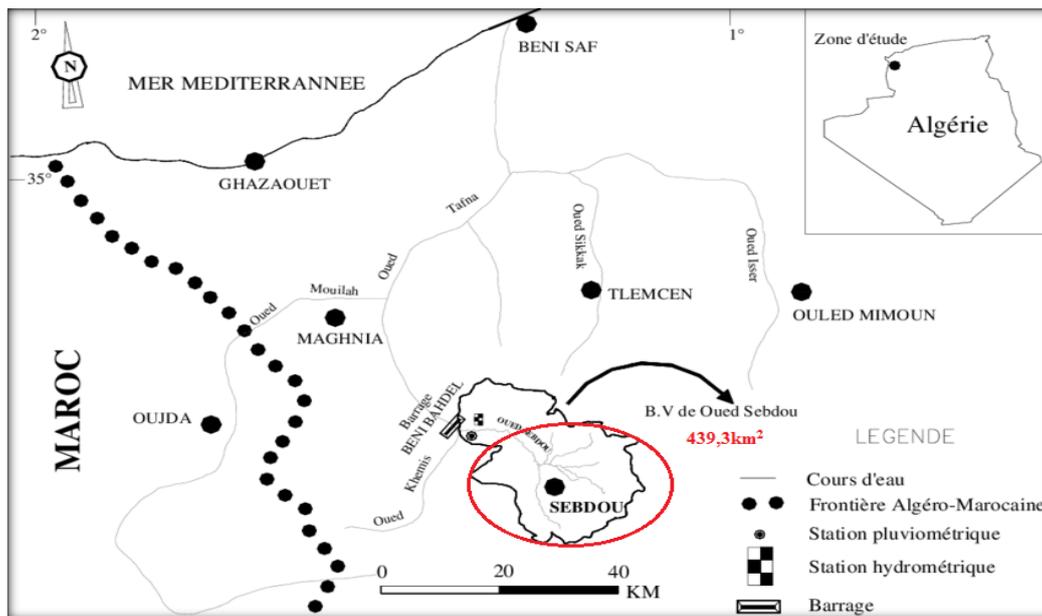


Figure II.2 : Situation du bassin versant de l’oued Sebdo (Bougara, 2021).

## 2.1. Morphométrie

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 à une sollicitation des précipitations (régime des écoulements) mais aussi, en amont et pour certaines d’entre elles (altitude, exposition...), 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 réseau 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.). Ces facteurs, d’ordre purement géométrique ou physique, s’estiment aisément à partir de cartes topographiques ou en recourant à un modèle numérique d’altitude (MNA). La difficulté réside dans l’identification de paramètres qui expriment l’influence de ces caractéristiques. Nous considérons dans notre travail le bassin versant contrôlé par la station de Sebdo à Sebdo.

### 2.1.1. Caractéristiques de forme

1) **Surface** : Dans le cas du bassin versant d’oued Sebdo contrôlé à la station hydrométrique de Sebdo :  $A=439,3 \text{ km}^2$

2) **Périmètre** : c’est la longueur de la ligne de contour du bassin, pour le bassin versant d’oued Sebdo à Sebdo :  $P = 153,88 \text{ km}$ .

3) **Indice de compacité de Gravelius** : Le "coefficient  $K_c$  de Gravelius" se définit comme le rapport du périmètre du bassin versant au périmètre du cercle ayant même surface (appelée aussi coefficient de compacité) :

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi.A}} \quad (\text{Eq. II.1})$$

Avec :

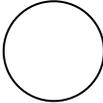
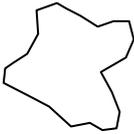
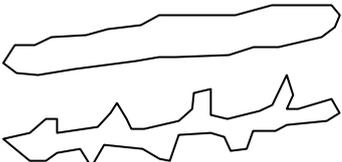
P : Périmètre (km),

A : Surface (km<sup>2</sup>).

Dans notre cas, Kc = 2,07

D'après l'indice de compacité, le bassin versant en question appartient à la classe des bassins versants allongés, très étirés à tendance amiboïde selon les formes indiquées par Karimou Barké et al. (2017).

Tableau II.1 : Classes de formes de cuvette suivant les valeurs de l'indice de Gravelius. (Karimou Barké et al. 2017).

Forme	Valeurs de l'indice	Définition	Schéma stylisé
<b>Circulaire</b>	1 à 1.03	Cuvettes ayant la forme de cercle	
<b>Ovoïde</b>	1.03 à 1.3	Cuvettes ovoïdes	
<b>Amiboïde</b>	1.3 à 1.4	Cuvettes caractérisées par une association de plages irrégulières, lobées, d'aspect amiboïde, à contours nets, très contrastés	
<b>Étirée</b>	1.4 à 1.7	Cuvettes allongées	
<b>Très étirée à tendance amiboïde</b>	>1.7	Cuvettes plus étirées que les précédentes. Elles présentent souvent des fragments amiboïdes c'est-à-dire des contours lobés	

4) **Rectangle équivalent** : c'est le rectangle de longueur L et de largeur l qui a même surface et même périmètre que le bassin versant. Les dimensions du rectangle équivalent sont données par les relations suivantes :

- **Longueur** :  $L = \frac{Kc.\sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2} \right]$  (Eq. II.2)

Avec :

Kc : Coefficient de compacité,

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

Dans le cas d'oued de Sebdu, L = 71,32 km.

- **Largeur** :  $l = \frac{Kc.\sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2} \right]$  (Eq. II.3)

Avec :

Kc : Coefficient de compacité,

A : Surface (km<sup>2</sup>).

Dans le cas d'oued de Sebdu, l = 6.15 km.

### 2.1.2. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est défini par l'ensemble des chenaux de drainage naturels où s'écoulent les eaux provenant du ruissellement ou restituées par les nappes souterraines soit sous forme de sources, soit par restitution continue le long du lit du cours d'eau (Roche, 1963). La figure II.3, représente le réseau de l'oued Sebdu contrôlé par la station hydrométrique de Sebdu :

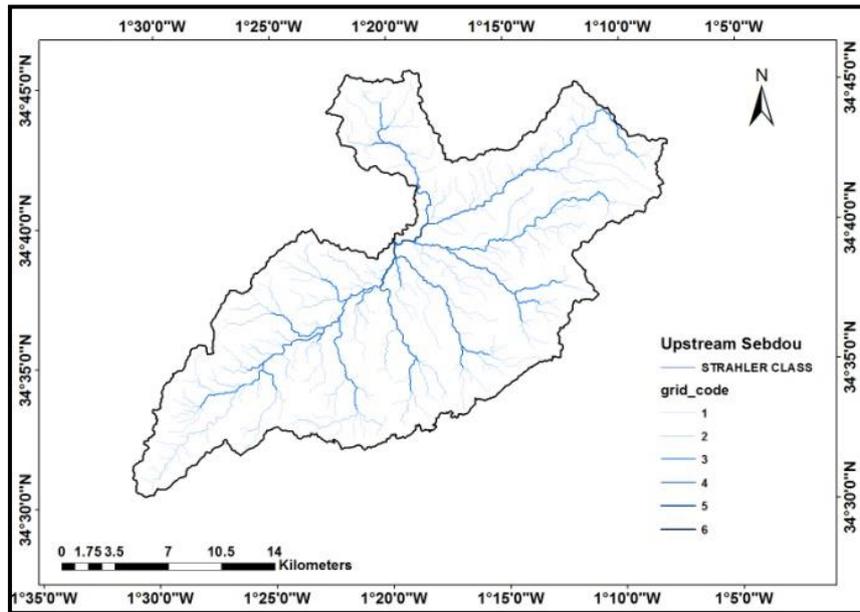


Figure II.3 : Réseau hydrographique du bassin d'oued Sebdu (Bougara, 2021).

**1) Densité de drainage :** C'est un paramètre qui permet de caractériser l'organisation du chevelu hydrographique et le degré de drainage du bassin versant donnée par la relation :

$$Dd = \frac{\Sigma L}{A} \quad (\text{km/km}^2) \quad (\text{Eq. II.4})$$

Avec :

$\Sigma L$  : Longueur cumulée des thalwegs du bassin (km),

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

Dd= 1,33 km/km<sup>2</sup>.

**2) Rapport de confluence :** C'est le quotient du nombre de thalwegs d'ordre n par celui des thalwegs d'ordre supérieur (n+1) donnée par la relation :

$$Rc = \frac{Nn}{Nn+1} \quad (\text{Eq. II.5})$$

Avec :

n : Ordre du thalweg,

N : Nombre des thalwegs.

Tableau II.2 : Rapport de confluence.

Ordre	Rc	Nombre (Ni)
1	2.74	589
2	1.89	215
3	1.01	114
4	3.77	113
5	30	30
6	/	1

Rc= 7,88.

**3) Rapport des longueurs :** C'est le quotient de la longueur moyenne des thalwegs d'ordre (n+1) par celles des thalwegs d'ordre (n). Les valeurs sont comprises entre 0,3 et 3,16, elles sont pour la plupart approximatives (Chikh, 2011).

$$R_L = \frac{L(n+1)}{L_n} \text{ (Eq. II.6)}$$

Avec :

L<sub>n</sub> : Longueur du cours d'eau d'ordre n,

L(n+1) : Longueur du cours d'eau d'ordre n+1.

Tableau II.3 : Rapport des longueurs.

Ordre	R <sub>L</sub>	Longueur moyenne (L <sub>a</sub> )
1	/	0,5
2	0.49	0,66
3	0.51	0,64
4	0.78	0,5
5	0.13	0,24
6	0.04	0,26

R<sub>L</sub> = 0,39.

### II.1.3. Etude du relief

La zone étudiée est caractérisée par deux ensembles distincts :

- Au Nord et au Nord-Ouest, un horst.
- Au Sud et à l'Est, un graben rempli de sédiments plio-quaternaires correspondant au fossé de Sebdu.

La zone montagneuse comprend au Nord, le Djebel Bou-chouk culminant à 1382 m, au Sud le Djebel El Hamar (1314 m) et le Djebel Nouffai (1185 m) à l'Ouest et le Djebel El Guern (1307 m) à l'Est.

Aux limites du fossé s'observent quatre massifs : Djebel Maiter (1217 m), Djebel Lato (1371m), Djebel El Arbi (1239 m) et Djebel Si Abdellah (1368m) (Baba Hamed & Kerzabi, 1990).

Le relief est un facteur essentiel, il détermine en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains, l'infiltration et l'évaporation. C'est un élément capital dans le comportement hydrologique d'un bassin.

Nous avons essayé de tracer la courbe hypsométrique (fig.II.4) et l'histogramme des fréquences altimétriques (fig. II.5) à partir des résultats des travaux de Bougara (2021).

Tableau II.4 : Répartition hypsométrique du sous bassin d'oued Sebdou.

Tranches d'altitudes (m)	Surfaces partielles (km <sup>2</sup> )	Surfaces partielles cumulées (km <sup>2</sup> )	Surfaces partielles (%)	Surfaces partielles cumulées (%)
1616-1600	0,01	0,01	0,002	0,002
1600-1500	1,11	1,12	0,25	0,25
1500-1400	8,32	9,44	1,89	2,15
1400-1300	39,64	49,08	9,02	11,17
1300-1200	67,59	116,67	15,39	26,56
1200-1100	124,23	240,9	28,28	54,83
1100-1000	127,38	368,28	28,99	83,83
1000-900	67,8	436,08	15,43	99,26
900-852	3,24	439,32	0,74	100

La courbe hypsométrique du bassin de l'oued Sebdou indique une concavité vers le bas, avec une pente importante vers les hautes altitudes indiquant la présence d'un plateau. La faible pente de la courbe aux basses altitudes explique la présence d'une vallée encaissée représentant le lit d'oued Sebdou.

La forme de la courbe est caractéristique d'un bassin à l'état de jeunesse allant vers l'équilibre, d'où un potentiel érosif assez important.

L'altitude la plus fréquente se situe dans la plage d'altitude de 1100-1000m, elle représente le maximum du diagramme des fréquences altimétriques égal 28,99%, et correspond à la plaine de Sebdou (fig.II.6).

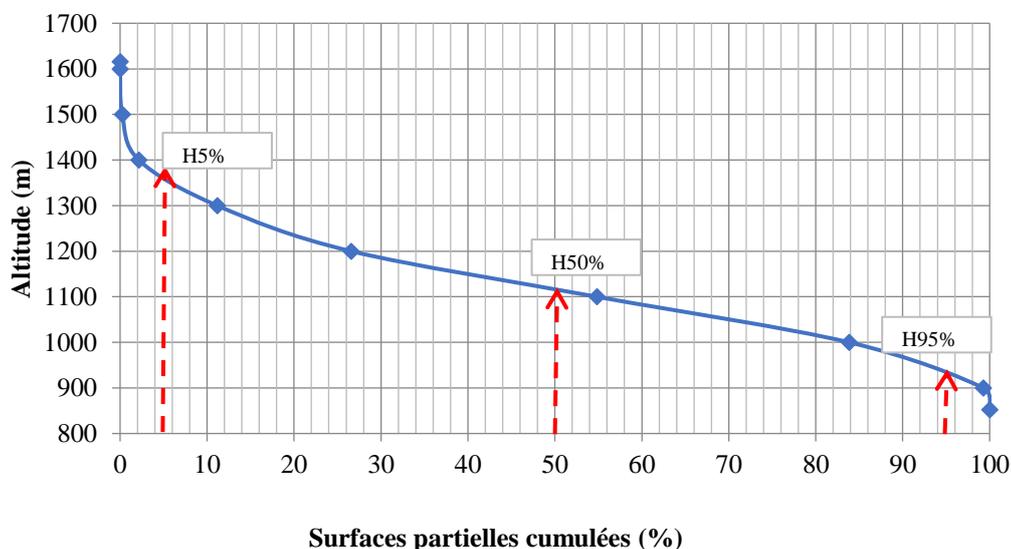


Figure II.4 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l’oued Sebdu

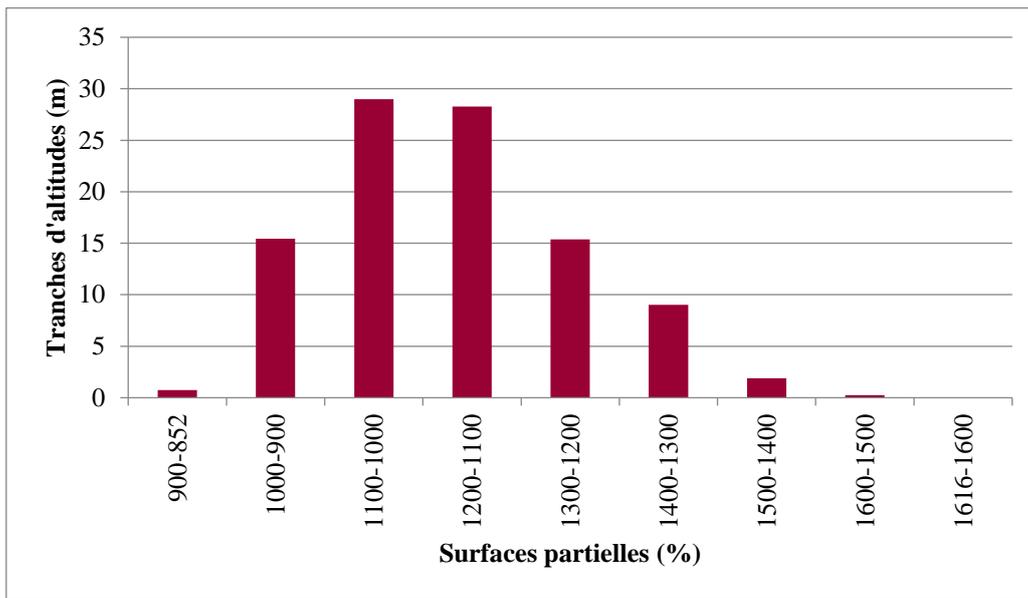


Figure II.5 : Histogramme des fréquences altimétriques du bassin versant de l’oued Sebdu

La courbe hypsométrique du bassin de l’oued Sebdu indique une concavité vers le bas, avec une pente importante vers les hautes altitudes indiquant la présence d’un plateau. La faible pente de la courbe aux basses altitudes explique la présence d’une vallée encaissée représentant le lit d’oued Sebdu.

La forme de la courbe est caractéristique d'un bassin à l'état de jeunesse allant vers l'équilibre, d'où un potentiel érosif assez important.

L’altitude la plus fréquente se situe dans la plage d’altitude de 1100-1000m, elle représente le maximum du diagramme des fréquences altimétriques égal 28,99%, et correspond à la plaine de Sebdu (fig.II.6).

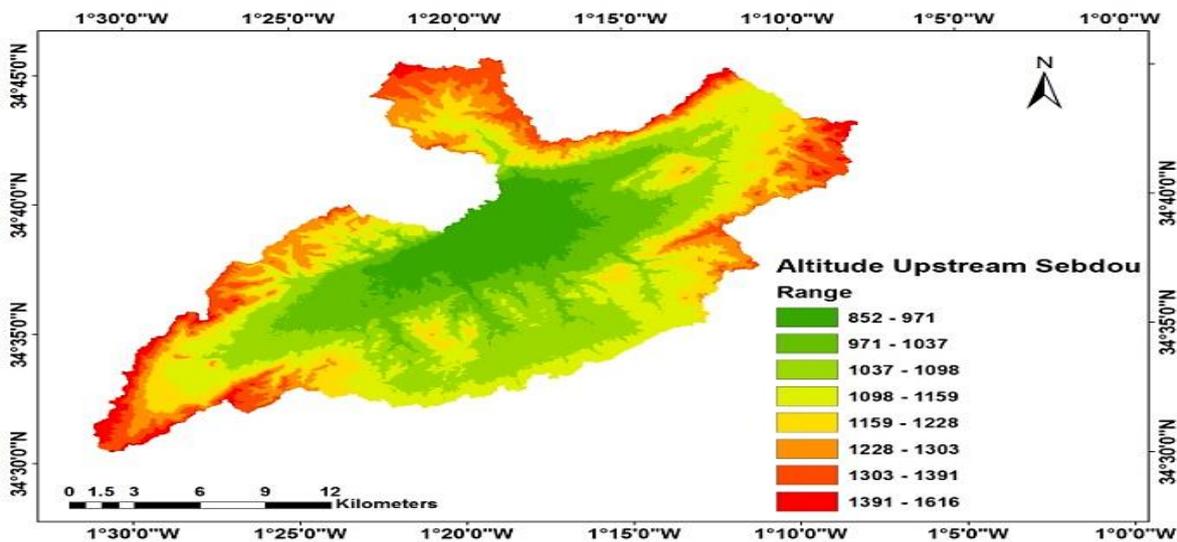


Figure II.6 : Répartition altimétrique du bassin d’oued Sebdu (Bougara, 2021).

### II.1.4. Indice de pente

Le relief joue un rôle important, car il commande en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains. Son appréhension peut être faite à l'aide de l'indice de pente global  $I_g$  donné par la relation :

$$I_g = D / L \quad (\text{Eq. II.8})$$

Avec :

$I_g$  : Indice de pente global

D : Dénivelée (m)

L : Longueur du rectangle équivalent (km)

Sur la courbe hypsométrique déjà tracée, on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5% de la surface totale. H5% et H95% sont les altitudes entre lesquelles s'inscrivent 90% de la surface du bassin.

Dans notre cas de l'oued Sebdou,  $I_g = 0,016$  m/km.

Les résultats du tableau II.5 montrent d'après la classification de l'Orstom que le bassin de Sebdou a un relief modéré à cause vraisemblablement de l'influence de la surface.

Tableau II.5 : Classification du relief selon  $I_g$  par l'ORSTOM.

Type de relief	$I_g$
Relief très faible	$I_g < 0,002$ m/km
Relief faible	$0,002 < I_g < 0,005$
Relief assez faible	$0,005 < I_g < 0,01$
<b>Relief modéré</b>	<b><math>0,01 &lt; I_g &lt; 0,02</math></b>
Relief assez fort	$0,02 < I_g < 0,05$
Relief fort	$0,05 < I_g < 0,5$
Relief très fort	$0,5 \text{ m/km} < I_g$

L'indice de pente  $I_p$  est également défini par Roche à partir du rectangle équivalent, la formule est la suivante :

$$I_p = \frac{1}{L} \sum \left( x_i \sqrt{\frac{d}{x_i}} \right) (\text{Eq. II.9})$$

Avec :

$x_i$  : distance séparant deux courbes de niveau sur le rectangle équivalent (m)

L : longueur du rectangle équivalent (m)

d : pente partielle (%)

Dans notre cas de l'oued Sebdou,  $I_p = 0,9$  m/km.

### II.1.4. Dénivelée spécifique

Plus la surface du bassin versant est grande, plus l'indice de pente  $I_g$  est petit, il sera donc difficile de comparer deux bassins versants de tailles différentes. La dénivelée spécifique

ne dépend que de l'hypsométrie ( $D = H5\% - H95\%$ ) et de la forme du bassin ( $1/L$ ). Elle donne lieu à une deuxième classification de l'O.R.S.T.O.M, Indépendante des surfaces des bassins (tableau II.6).

$$D_s = I_g \sqrt{A} = D \sqrt{\frac{l}{L}} \quad (\text{Eq. II.10})$$

Dans notre cas,  $D_s = 130,16\text{m}$ .

Les résultats du tableau II.3 montrent d'après la classification de l'Orstom que le bassin de Sebdou a un relief assez fort. Cela traduit bien l'importance du volume montagneux et la forte incision du relief.

Tableau II.6 : Classification du relief selon  $D_s$  par l'ORSTOM.

Type de relief	$D_s$
Relief très faible	$D_s < 10$
Relief faible	$10 < D_s < 25$
Relief assez faible	$25 < D_s < 50$
Relief modéré	$50 < D_s < 100$
<b>Relief assez fort</b>	<b><math>100 &lt; D_s &lt; 250</math></b>
Relief fort	$250 < D_s < 500$
Relief très fort	$D_s > 500$

### II.1.5. Coefficient de torrentialité

C'est un coefficient qui tient compte à la fois de la densité des thalwegs élémentaires par la densité de drainage :

$$CT = D_d \cdot F1 \quad (\text{Eq. II.11})$$

Avec :

$D_d$  : Densité de drainage ( $\text{km}/\text{km}^2$ ),

$F1$  : Fréquence des thalwegs élémentaires d'ordre 1.

Dans le cas d'oued Sebdou,  $CT = 1,74$ .

Le coefficient de torrentialité est dû à plusieurs paramètres en particulier la pente et le chevelu hydrographique. Au niveau du bassin versant de Sebdou, la valeur élevée du CT (1,74) est expliquée par son caractère montagneux et sa densité de drainage élevée.

### II.1.6. Temps de concentration

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

$$T_c = \frac{4\sqrt{A+1.5L}}{0.8\sqrt{H_{moy}-H_{min}}} \quad (\text{Eq. II.12})$$

Avec :

$H_{moy}$  : Altitude moyenne (m),

Hmin : Altitude minimale (m),  
 L : Longueur du cours d'eau principal (km),  
 A : Surface du bassin versant (km<sup>2</sup>).

Le temps de concentration des eaux est non seulement fonction de la surface mais aussi d'autres paramètres tels que la lithologie, la pluviométrie et le relief ainsi l'occupation du sol. En effet, deux bassins ayant la même superficie ne se comportent pas forcément de la même façon (Roche 1963).

Dans notre cas  $T_c = 9,11h$ .

## 2.2. Géologie

Les Monts de Tlemcen constituent un édifice régulier comportant essentiellement des terrains mésozoïques et cénozoïques. Les assises sédimentaires attribuées au Jurassique supérieur et au Crétacé inférieur sont principalement formées de carbonates. Cet ensemble constitue la bordure méridionale des Monts de Tlemcen, situé dans le couloir délimité à l'Ouest par l'accident de la Tafna et à l'Est par celui d'Oued Chouly (Baba-Hamed & Kerzabi, 1991).

Le Nord et le Nord-Est du bassin versant correspondent à un horst jurassique principalement carbonaté. Au Sud et à l'Est, s'y trouve un graben rempli de sédiments plio-quatérnaires représentant le fossé de Sebdou (Baba-Hamed et Kerzabi 1991, Megnounif *et al.* 2004).

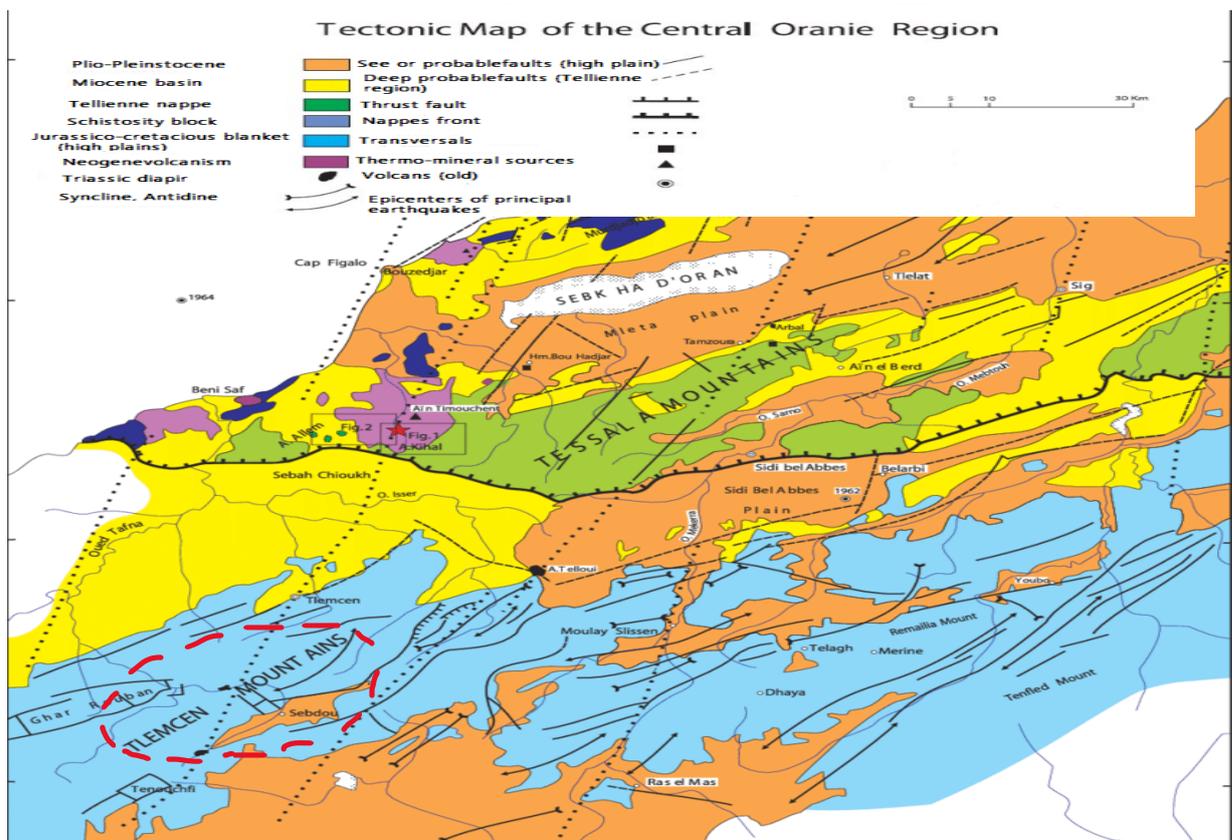


Figure II.7 : Carte structurale de l'Oranie nord occidentale (Benabdellah, 2011).

### 2.2.1. Etude litho stratigraphique

Le grand bassin de la Tafna est caractérisé par une géologie très complexe et qualifiée de grande tectonique. Sachant que l'évolution des terrains rencontrés dans le bassin de l'oued Sebdu va du Jurassique moyen jusqu' au Plio-Quaternaire (fig.II.8). Ce bref aperçu est tiré des travaux de Baba Hamed et Kerzabi (1991) :

### 1) Jurassique

a) **Les marno-calcaires de Raourai** : Ce sont des marnes grises, blanchâtres en surface, intercalées de nombreux lits et bancs de calcaires marneux durs, cette formation est limitée à sa base par les lits calcaires de Stah et au sommet par les calcaires de Lato, ou les premières assises des dolomies de Terny.

b) **Les calcaires de Lato** : Ce sont des calcaires massifs en bancs épais, leur épaisseur est d'environ 50 m au djebel Lato.

c) **Dolomies de Terny** : Elles correspondent à des dolomies parfois vacuolaires avec de nombreuses stratifications obliques et un aspect très massif, qui permet de bien les distinguer des dolomies de Tlemcen, leur épaisseur est de l'ordre de 100 m dans le plateau de Terny. Ces trois formations précédentes sont attribuées au Tithonique inférieur.

d) **Marno-calcaires de Hariga** : D'âge Tithonique moyen, il s'agit d'une alternance de marnes et de Calcaires. Elles sont bien exposées au djebel Hariga avec une épaisseur de 165 m dans le bassin du Sebdu, ainsi qu'au Bled El Gliia à 270m.

e) **Marno-calcaires d'Ouled Mimoun** : d'âge Tithonique supérieur, cette formation renferme les couches de passage du Jurassique au Crétacé, elle est limitée à sa base par les "grès de Merchich", dans le secteur de Merchich, sur le rebord sud du plateau de Terny. Elle affleure nettement dans le secteur d'Ouled Mimoun, ainsi qu'au niveau de la bordure nord du fossé de Sebdu.

### 2) Crétacé

a) **Grès de Berthelot (Hauterivien)** : La base est riche en stratifications obliques, marquée par des bancs de dolomies pulvérulentes, ils sont bien représentés au Sud-ouest du fossé de Sebdu.

3) **Plio-Quaternaire** : Représenté par des sédiments continentaux d'âges comparables, bien que de natures variables. Il s'agit d'une série complexe de dépôts discontinus formés d'éléments hétérométriques et hétérogènes. On y rencontre les faciès suivants :

- Le complexe de sédiments plio-villafrachiens : la bordure des massifs secondaires est soulignée par des éboulis de piémont plus ou moins encroûtés et remaniés, d'épaisseur très variable mais toujours assez faible.
- Des anciennes alluvions allant des marnes alluvionnaires verdâtres aux galets en passant par les limons et les graviers.

Ces formations occupent principalement la plaine du fossé de Sebdu ainsi que le lit des oueds.

Age	Colonne lithologique	Formations rencontrées	Description
Quaternaire		Formation conglomératique	Alluvions, croûte calcaires et dépôts continentaux avec au sommet des couches marneuses
Plio-Quaternaire		Formation de Sebdou	Dépôts de conglomérats redressés Calcaires lacustres vacuolaires
Barremien		Grès de Berthelot	Grès avec de la chlorite
Berriasién supérieur		Argiles de Lamoricière	Argiles avec des passées gréseuses
Tithonique supérieur Berriasién inférieur		Marno-calcaires d'Ouled Mimoun Grès de Merchiche	Grès, calcaires et marnes souvent biodétritiques
Kimmeridgien		Marno-calcaires de Hariga Dolomies de Terny Calcaire de Lato Marno-calcaires de Raourai Calcaires de Staâb	Alternance de marnes et calcaires Dolomies vacuolaires à patine rousse avec des stratifications obliques Micrite et pelmicrite, alternance de marnes grises verdâtres et de calcaires
		Dolomies de Terny Dolomies de Tlemcen	Dolomies cristallines grises à patine rousse, dans les dolomies on observe des lentilles stromatolitiques
		Calcaires de Zarifet	Calcaires bleux
		Grès de Boumédine	Grès bruns en gros bancs séparés par des interlits argileux Au sommet, on trouve quelques passées marneuses et calcaires
		Grès de Boumédine	Grès bruns en gros bancs séparés par des interlits argileux Au sommet, on trouve quelques passées marneuses et calcaires
Oxfordien supérieur		Grès de Boumédine	Grès bruns en gros bancs séparés par des interlits argileux Au sommet, on trouve quelques passées marneuses et calcaires

Figure II.8: Colonne stratigraphique des monts de Tlemcen (Baba Hamed, Kerzabi, 1991).

### 2.3. Hydrogéologie

Cette partie est consacrée aux caractéristiques hydrogéologiques des formations qui entourent et forment le bassin versant d’oued Sebdu afin de déterminer le potentiel de l’aquifère du site. Subséquemment, on va regrouper les couches lithologiques en deux catégories hydrogéologiques en fonction de leur perméabilité d’interstices et des fissures ou chenaux présents sur les formations :

- **Formations à fort potentiel aquifère :** Ce sont les formations calcaréo-dolomitiques (dolomie de Tlemcen et de Terny), les formations gréseuses (grès de Merchiche) et les formations du Plio-Quaternaire. Il s’agit là d’ensembles lithologiques forts tant en ce qui concerne leur structure physique, que leur composition chimique, mais ils ont pour caractère

commun une capacité d'accumulation en eau élevée, surtout en ce qui concerne les massifs dolomitiques qui donnent naissance à de nombreuses émergences karstiques. (Aziz, 2013)

- **Formations à faible potentiel aquifère :** Cet ensemble regroupe un ensemble de formations de nature lithologique très variée, mais où les séries à dominance argileuse ou marneuse occupent une place prépondérante. L'ensemble des formations concernées présente une faible perméabilité d'interstices ou de fissures, il n'y existe donc pas d'aquifères notables. (Baba Hamed & Kerzabi, 1991). Citons de ce fait les grès de Bou-Médine, les marno-calcaire de Raourai, de Hariga, et d'Ouled Mimoun, les argiles de Lamoricière, ....

#### 2.4. Sol et végétation

La végétation est un facteur déterminant de la rapidité du ruissellement superficiel, du taux d'évaporation et de la capacité de rétention du bassin. Donc la présence de végétation va jouer le rôle de « Régulateur » dans le régime d'écoulement. La résistance à l'écoulement est d'autant plus grande que le couvert végétal est plus dense.

Tableau II.7: Distribution du couvert végétal dans le bassin versant d'oued Sebdu (D.F.N).

Types d'occupation	Surface (km <sup>2</sup> )	Surface (%)
<b>Agricole</b>	235,53	33,9
<b>Alfa</b>	38	5,47
<b>Forêts</b>	44	6,33
<b>Improductif</b>	3,67	0,53
<b>Maquis</b>	144,74	20,83
<b>Maquis arboriculture</b>	130,23	18,74
<b>Parcours</b>	85,32	12,28
<b>Parcours steppique</b>	0,17	0,02
<b>Plan d'eau</b>	1,63	0,23
<b>Reboisement</b>	8,47	1,22
<b>Urbain</b>	5,44	0,78

La végétation est étroitement liée à la distribution des précipitations dans la région, à la nature, à la texture du sol et aux activités anthropiques. Presque 33,9% de la surface du bassin versant est d'un couvert végétal agricole et 6,33% d'un couvert forestier. Il résulte que 0,53% du bassin versant est improductif. Les terres alfa occupent une aire de 5,47% et les maquis arboriculture sont pratiqués dans 18,74% de la superficie. La partie restante du bassin versant est occupée dans sa grande partie par un maquis (20,83). L'urbain occupe 0,78% de la superficie totale (fig. II. 9).

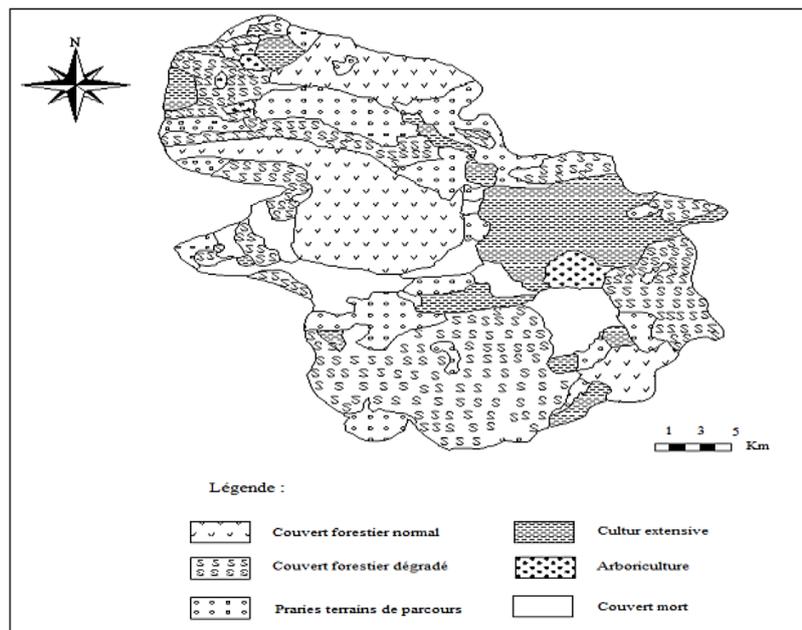


Figure II.9 : Carte de végétation de la région de Sebdu (Bouanani, 2004).

## 2.5. Conclusion

L'étude morphométrique du bassin versant d'oued Sebdu, a permis de se renseigner sur les caractéristiques suivantes :

Tableau II.8: Caractéristiques morphométriques du bassin versant d'oued Sebdu.

Paramètres	Symboles	Unités	Valeurs
Superficie	A	km <sup>2</sup>	439,3
Périmètre	P	km	153,88
Indice de compacité	Kc	-	2,07
Longueur	L	km	71,38
Largeur	l	km	6,15
Densité de drainage	Dd	km/km <sup>2</sup>	1,3
Rapport de confluence	Rc	-	7,88
Rapport de longueur	Rl	-	0,39
Altitude maximale	Hmax	m	1616
Altitude minimale	Hmin	m	852
Altitude moyenne	Hmoy	m	1128
Indice de pente	Ip	m/km	0,9
Indice de pente global	Ig	m/km	0,016
Dénivelée spécifique	Ds	m	130,16
Coefficient de torrentialité	Ct	-	1,74
Temps de concentration	Tc	h	9,11

Le bassin versant d'oued Sebdou est un bassin de forme allongée.

L'indice de pente et l'indice de pente global montrent que le bassin possède un relief modéré avec une tendance forte liée au volume montagneux.

La végétation a une influence faible à très faible sur l'écoulement fluvial dans le bassin versant de Sebdou.

La région est dominée essentiellement par les alluvions, les calcaires, et les dolomies comme formations géologiques.

# Chapitre III

---

---

Etude hydro-climatologique

## Introduction

Le climat, c'est l'ensemble des conditions météorologiques d'un lieu donné. Omniprésentes dans nos vies, ses manifestations (pluie, neige, soleil, etc.) influencent inévitablement l'organisation de nos activités.

Le climat c'est aussi la manifestation de ces phénomènes sur de longues périodes, selon les saisons, et en fonction de l'endroit où l'on se situe sur Terre. Les différentes zones climatiques (climat tropical, arctique, tempéré, désertique, etc.) déterminent :

- L'environnement naturel qu'on trouve dans un endroit donné (arbres, plantes, animaux, etc.),
- Les conditions d'existence et les besoins des humains (chauffage, climatisation, protection contre les intempéries, etc.),
- Le type d'activités économiques qu'on y mène (agriculture, foresterie, production d'énergie, navigation, etc.) (Bouaoune et al 2010).

En raison de leurs répercussions immédiates et durables sur le milieu naturel et sur l'homme, les questions de changement et de variabilité climatiques sont placées depuis quelques temps au centre des préoccupations des scientifiques et des décideurs politiques dans le monde. Le cycle de l'eau étant l'une des composantes majeures du climat, les implications de ces changements sur les régimes pluviométriques sont importantes. Les précipitations représentent le facteur le plus important du climat tant pour les populations que pour les écosystèmes.

Le but de l'étude hydro-climatique est de mieux connaître les mécanismes de la circulation générale atmosphérique et les échanges énergétiques au niveau du système : Terre – atmosphère afin de mieux comprendre les variabilités ainsi que les changements du climat à longue échéance.

Pour ce faire, l'étude est réalisée sur la base des données de précipitations et de débits mesurées au niveau de la station de Sebdou et des données de température collectées à la station de Beni Bahdel (tabl. III.1) et (fig. III.1).

Tableau III.1 : Caractéristiques des stations de mesure.

Station	Code	Coordonnées			Paramètre	Période d'observation
		X (km)	Y (km)	Z (m)		
Sebdou	160401	131.25	158.55	875	P (mm)	1979/1980-2019/2020
Beni Bahdel	160403	115.00	164.6	666	T(°C)	1979/1980-2019/2020
Sebdou	160401	131.25	158.55	875	Q (m <sup>3</sup> /s)	1980/1981-2011/2012

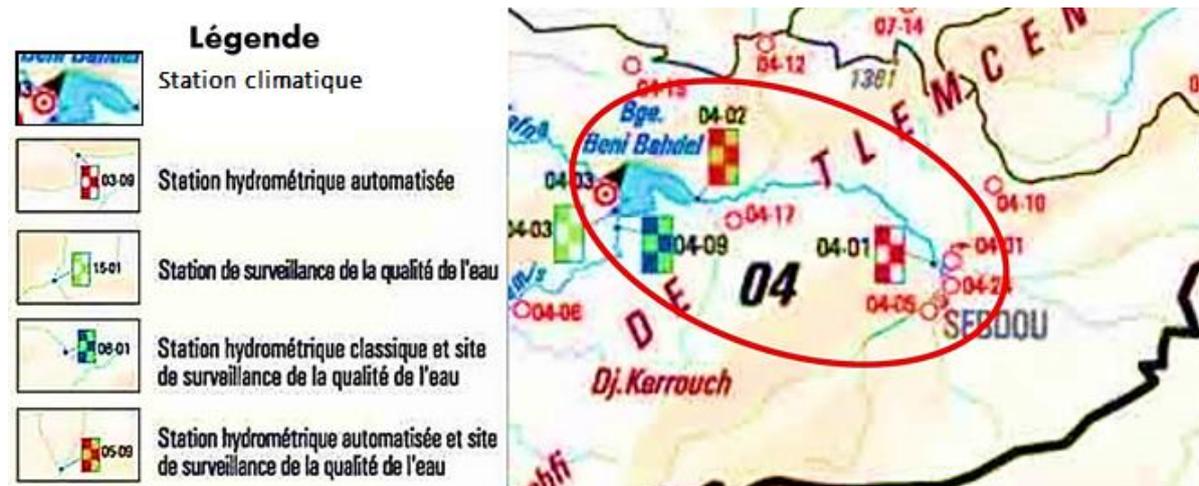


Figure III.1 : Situation des stations de mesure au niveau de l'Oued Sebdu.  
(Extraite de la carte au 1/500 000 établie par l'A.N.R.H., 2005)

### 3.1. Etude des précipitations

#### 3.1.1. Précipitations moyennes annuelles

Les données utilisées recueillies au niveau de la station de Sebdu s'étendent sur une période de 41 ans allant de 1979/1980 jusqu'au 2019/2020. Les précipitations annuelles moyennes sont représentées sur le tableau III.2 et la figure III.2.

Tableau III.2 : Précipitations annuelles moyennes à la station de Sebdu  
(1979/1980-2019/2020).

Années	P (mm)	Années	P (mm)	Années	P (mm)
1979-1980	475,2	1993-1994	290,4	2007-2008	272,4
1980-1981	497,5	1994-1995	351,1	2008-2009	668,9
1981-1982	339,9	1995-1996	694,0	2009-2010	389,2
1982-1983	279,4	1996-1997	232,5	2010-2011	360,9
1983-1984	247,6	1997-1998	296,7	2011-2012	293,7
1984-1985	329,1	1998-1999	251,9	2012-2013	548,3
1985-1986	390,6	1999-2000	198,4	2013-2014	331,4
1986-1987	430,7	2000-2001	411,4	2014-2015	306,2
1987-1988	231,5	2001-2002	433,3	2015-2016	274,4
1988-1989	337,8	2002-2003	463,1	2016-2017	388,9
1989-1990	272,2	2003-2004	351,1	2017-2018	248,4
1990-1991	455,1	2004-2005	217,0	2018-2019	329,4
1991-1992	483,7	2005-2006	394,5	2019-2020	197,5
1992-1993	237,4	2006-2007	327,0	<b>P<sub>moyenne</sub> = 354,4 mm</b>	

En vue d'apprécier l'évolution de la pluviométrie durant la période 1979/1980-2019/2020, nous avons tracé la courbe des précipitations annuelles en fonction des années. Cette courbe met en évidence le caractère irrégulier des pluies avec une moyenne annuelle de 354,4mm. Le maximum a été observé en 1995/1996 avec 694mm, tandis que le minimum a été enregistré en 2019/2020 avec 197,5mm. Le rapport d'immodération exprimé par le quotient des

précipitations maximales sur les précipitations minimales confirme cette irrégularité, il est de 3.51.

La station a enregistré seize années humides, le reste des années est déficitaire accusant des valeurs inférieures à la moyenne sur la période d'étude.

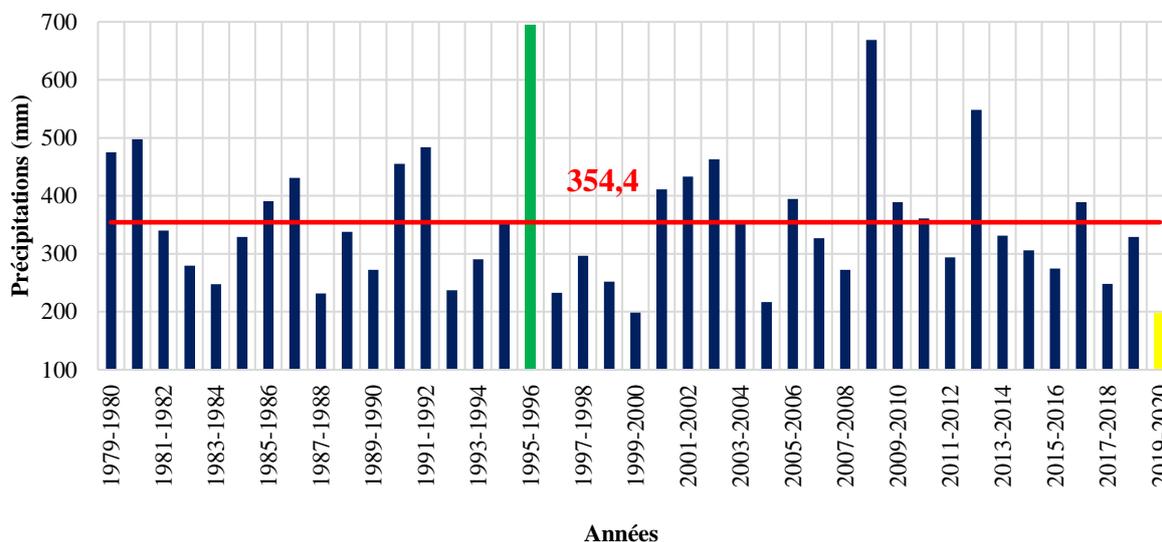


Figure III.2 : Variation des précipitations moyennes annuelles à la station de Sebdu (1979/1980-2019/2020).

### 3.1.2. Précipitations moyennes mensuelles

Le tableau (III.3) présente les valeurs moyennes mensuelles des précipitations à la station de Sebdu.

Tableau III.3 : Données pluviométriques mensuelles de la station de Sebdu (1979/1980-2019/2020).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
P (mm)	20.5	28.9	40.8	45.6	45.0	42.1	44.2	33.8	30.2	10.8	5.3	7.3

L'analyse de la répartition des précipitations moyennes mensuelles pour la période (1979/1980-2019/2020) (fig.III.3), montre un maximum observé au mois de Décembre avec (45.6mm) (mois le plus pluvieux) suivi de Janvier (45.0mm), et un minimum au mois de Juillet (5.31mm) (mois le plus sec).

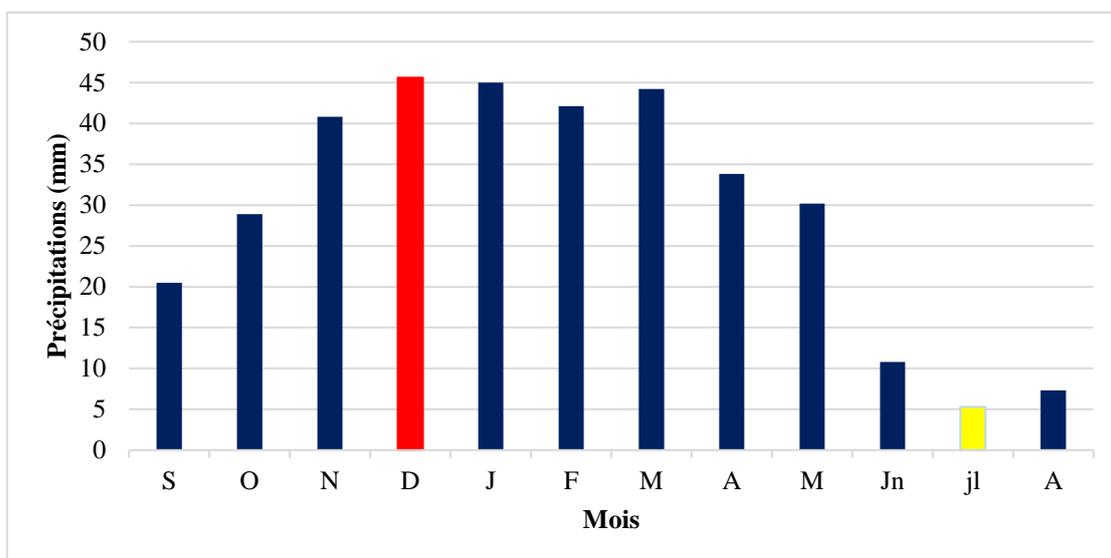


Figure III.3 : Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Sebdou (1979/1980-2019/2020).

### 3.1.3. Précipitations moyennes saisonnières

Les quatre saisons de l’année et leurs précipitations équivalentes sont données au tableau suivant :

Tableau III.4 : Répartition des précipitations saisonnières.

Saison	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
Moyenne	90.2			132.6			108.2			23.4		

D’après La variation des précipitations moyennes saisonnières (fig.III.4), l’Hiver est la saison la plus humide avec une sécheresse en période d’Eté.

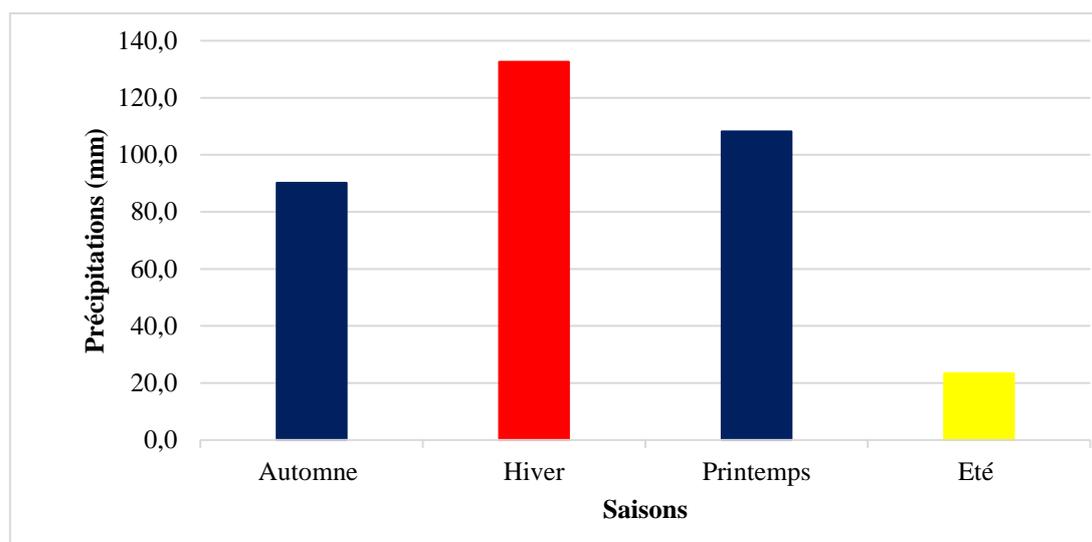


Figure III.4 : Variation des précipitations saisonnières moyennes à la station de Sebdou (1979/1980-2019/2020).

### 3.1.4. Précipitations moyennes journalières

L'analyse des précipitations moyennes journalières, permet de distinguer les jours où il y avait de la pluie et les jours sans pluie.

La figure III.5, représente la distribution des précipitations journalières durant une année moyenne sur la période (1979/1980-2019/2020), nous remarquons des augmentations suivies des diminutions continues et progressives d'un jour à un autre avec des pics importants. La valeur des précipitations journalières maximales d'une année moyenne observées est de 4.03mm mm. Le jour le plus pluvieux de la série correspond au 19 mars 1988 avec 7.6 mm de précipitations.

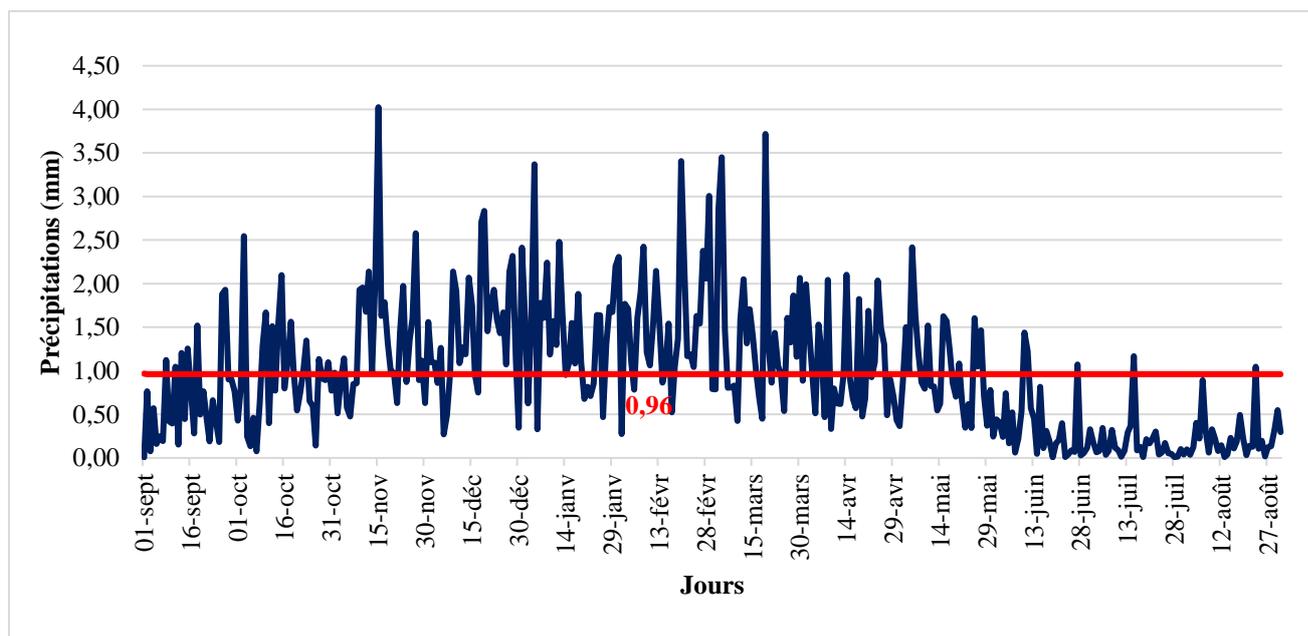


Figure III.5 : Variation des précipitations journalières moyennes à la station de Sebdu (1979/1980-2019/2020).

## 3.2. Etude des températures

La température est un élément fondamental du climat. Elle est liée à la radiation solaire. Sa variation influe sur la transformation des eaux en vapeur, que ce soit à la surface ou dans le sous-sol.

### 3.2.1. Température moyenne annuelle

Le tableau III.5, représente les données de température annuelles enregistrées au niveau de la station de Béni Bahdel durant la période (1979-1980/2019-2020)

Tableau III.5 : Températures moyennes annuelles à la station de Béni Bahdel (1979/1980-2019/2020).

Années	T (°C)	Années	T (°C)	Années	T (°C)
1979-1980	16,2	1993-1994	16,1	2007-2008	16,5
1980-1981	17,1	1994-1995	16,0	2008-2009	16,0
1981-1982	19,5	1995-1996	21,5	2009-2010	17,2
1982-1983	18,0	1996-1997	16,1	2010-2011	17,4
1983-1984	18,6	1997-1998	17,0	2011-2012	17,1
1984-1985	18,8	1998-1999	16,0	2012-2013	16,9
1985-1986	19,1	1999-2000	16,5	2013-2014	17,7
1986-1987	17,0	2000-2001	16,6	2014-2015	20,0
1987-1988	16,8	2001-2002	22,3	2015-2016	19,8
1988-1989	16,6	2002-2003	16,8	2016-2017	20,2
1989-1990	20,6	2003-2004	16,4	2017-2018	19,0
1990-1991	19,9	2004-2005	16,2	2018-2019	19,5
1991-1992	20,8	2005-2006	16,5	2019-2020	20,1
1992-1993	15,6	2006-2007	16,3	<b>T<sub>moyenne</sub> = 17,9 °C</b>	

La figure III.6, montre que la température moyenne annuelle fluctue irrégulièrement. Nous notons une température minimale de 15,6°C enregistrée durant l'année 1992/1993 et une température maximale de 22,3°C observée durant l'année 2001/2002. La température moyenne annuelle est égale à 17,9°C.

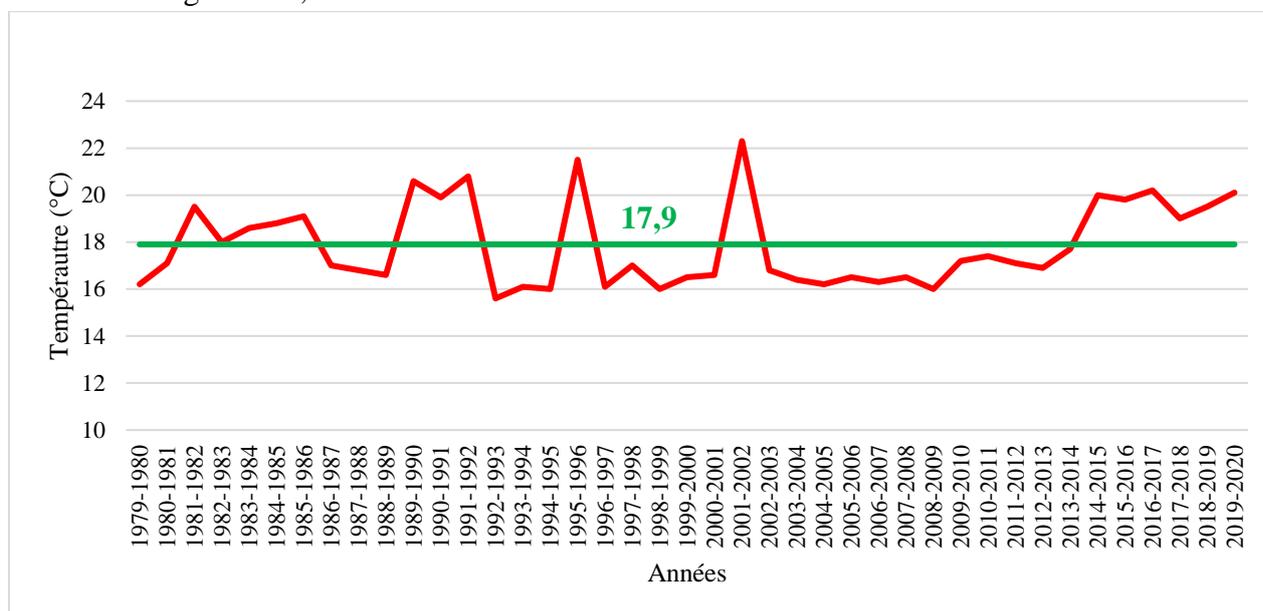


Figure III.6 : Variation des températures moyennes annuelles à la station de Beni Bahdel (1979/1980-2019/2020).

### 3.2.2. Température moyenne mensuelle

La série des données des températures moyennes mensuelles d'une période de 41 ans (1979/1980-2019/2020) sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau III.6 : Températures moyennes mensuelles à la station de Beni Bahdel (1979/1980-2019/2020).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
T(°C)	23,4	19,0	14,0	10,8	9,7	10,7	13,2	15,1	18,7	23,4	28,0	28,6

La figure III.7, représente bien la distribution de la température moyenne mensuelle de la série étudiée, et nous confirme que le mois d’Août est le mois le plus chaud avec une température 28,6°C, et le mois de Janvier est le mois le plus frais avec une température équivalente à 9,7°C.

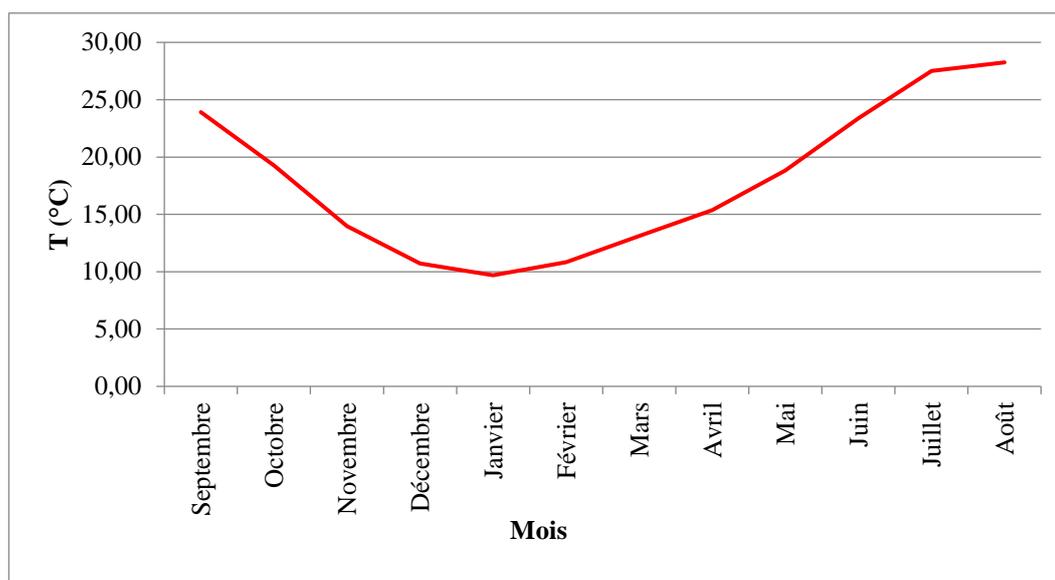


Figure III.7 : Variation moyenne mensuelle de la température de la station Beni Bahdel (1979/1980-2019/2020).

### 3.3. Etude du climat

Le climat est un ensemble de conditions temporelles (précipitations, température, ...) infligés à un endroit précis, il est analysé en période assez longue afin de pouvoir observer les changements possibles dans un climat de cet endroit (Sebdou, l'étude de cas). L'étude du climat se fait en 2 parties :

- Etablissement d'un diagramme pluviothermique (méthode de Gaussen et Bagnouls, 1952), qui nous permet de visualiser l'étendu des périodes humides et sèches.
- Calcul de l'indice climatique (indice d'aridité de De Martonne par exemple), qui permet la caractérisation du climat dominant.

#### 3.3.1. Diagramme pluviothermique

D'après Bagnouls et Gaussen (1953), un mois sec est un mois où les précipitations sont inférieures à 2 fois la température moyenne mensuelles ( $P < 2T$ ).

La période humide commence du mois de Novembre jusqu'au mois de Mai, le reste des mois de l'année couvre une période sèche.

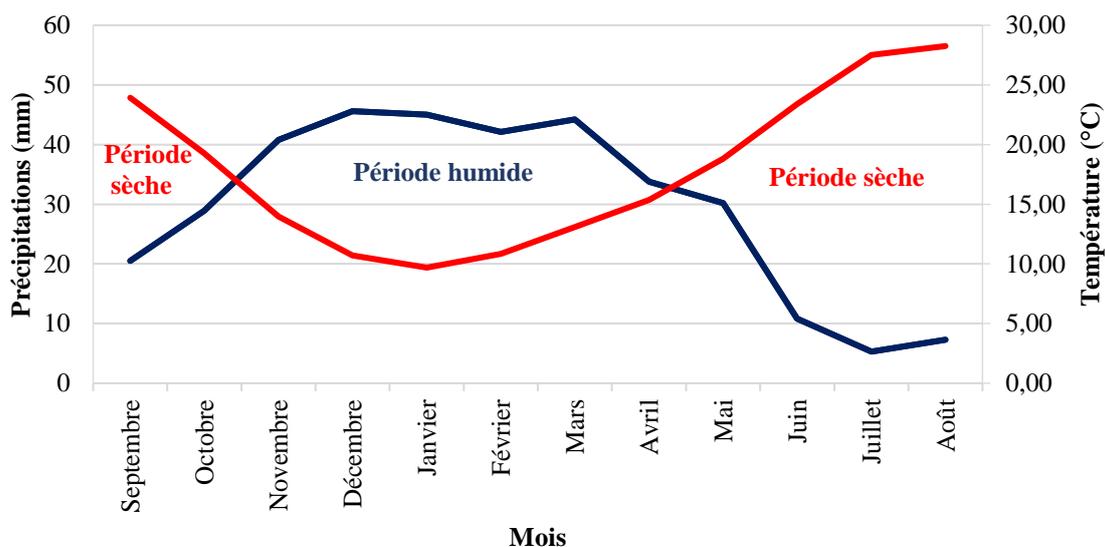


Figure III.8 : Courbe pluviothermique (1979/1980-2019/2020).

### 3.3.2. Indices climatiques

#### 1) Indice d'aridité de De Martonne

Cet indice se calcul par la formule suivante :

$$I = \frac{P}{T+10} \tag{Eq. III.1}$$

Avec :

P : Précipitations annuelles moyennes (mm),

T : Température annuelle moyenne (°C),

I : indice d'aridité = 12.7

- **Indice d'aridité mensuel** : on le calcule par la formule suivante :

$$I = \frac{12p}{t+10} \tag{Eq.III.2}$$

Les résultats sont dressés dans le tableau suivant :

Avec :

p : Précipitations moyennes mensuelles (mm),

t : Température moyennes mensuelles (°C).

Tableau III.7 : Indice d'aridité mensuel de De Martonne.

Mois	Précipitations (mm)	T (°C)	Aridité (I)
<b>Septembre</b>	20,5	23,92	7,25
<b>Octobre</b>	28,9	19,28	11,84
<b>Novembre</b>	40,8	13,99	20,41
<b>Décembre</b>	45,6	10,72	26,42
<b>Janvier</b>	45	9,69	27,42
<b>Février</b>	42,1	10,84	24,24
<b>Mars</b>	44,2	13,10	22,96
<b>Avril</b>	33,8	15,36	16,00
<b>Mai</b>	30,2	18,83	12,57
<b>Juin</b>	10,8	23,39	3,88
<b>Juillet</b>	5,3	27,51	1,70
<b>Août</b>	7,3	28,26	2,29

Le tableau suivant donne une classification de De. Martonne du type de climat en fonction de son indice d'aridité :

Tableau III.8 : Classification du climat suivant l'indice d'aridité de Martonne (Iles, 2018).

Valeurs de I	Type du climat	Type de végétation
0 à 5	Hyper aride	Désert absolu
5 à 10	Aride	Désert
10 à 20	Semi-aride	Steppe
20 à 30	Tempéré	Prairie naturelle, forêt
>30	Humide	Forêt

D'après l'abaque de De Martonne (fig. III.9) et le tableau III.8, le climat d'oued Sebdou présente un régime semi-aride avec un écoulement temporaire et des formations herbacées.

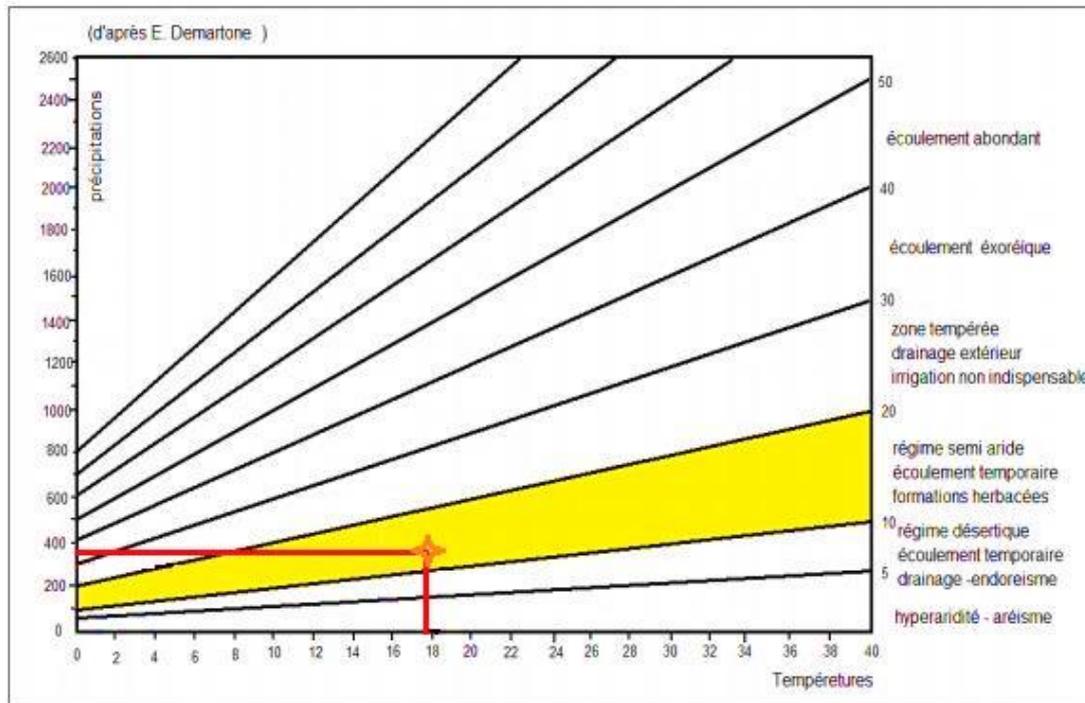


Figure III.9 : Abaque de De Martonne.

2) **Indice de Moral** : cet indice se calcule comme suit :

$$Im = \frac{P}{0.1T^2 - T + 20} \quad (\text{Eq. III.3})$$

Les résultats sont dressés dans le tableau suivant :

Tableau III.9 : Valeurs mensuelles de l'indice de Moral.

Mois	Précipitations (mm)	Température (°C)	Im	Type du climat
Septembre	20,5	23,92	0,385	Sec
Octobre	28,9	19,28	0,763	Sec
Novembre	40,8	13,99	1,595	Pluvieux
Décembre	45,6	10,72	2,196	Pluvieux
Janvier	45	9,69	2,284	Pluvieux
Février	42,1	10,84	2,013	Pluvieux
Mars	44,2	13,10	1,837	Humide
Avril	33,8	15,36	1,197	Sec
Mai	30,2	18,83	0,825	Sec
Juin	10,8	23,39	0,210	Aride
Juillet	5,3	27,51	0,078	Aride
Août	7,3	28,26	0,102	Aride

Les types de mois indiqués par Moral sont :

- Pour  $P > 0,1 T^2 - T + 30$ , un mois pluvieux.
- Pour  $0,1 T^2 - T + 30 > P > 0,1 T^2 - T + 20$ , un mois humide.
- Pour  $0,1 T^2 - T + 20 > P > 0,05 T^2 - T + 10$ , un mois sec.
- Pour  $P < 0,05 T^2 - T + 10$ , un mois aride.

### 3) Climagramme d'Emberger

A travers le climagramme d'Emberger, on peut déterminer l'étage bioclimatique d'une station donnée (station de Sebdoou dans notre cas) et à partir de la formule suivante :

$$Q_2 = \frac{2000.P}{(M^2 - m^2)} \quad (\text{Eq. III.4})$$

Avec :

P : Précipitations moyennes annuelles (mm),

M : Température maximale du mois le plus chaud (°K),

m : Température minimale du mois le plus frais (°K).

Dans notre cas  $Q_2 = 41,03$

En appliquant la formule suivante élaborée par (Stewart, 1968) pour l'Algérie et le Maroc, on trouve :

$$Q_2 = \frac{3,43.P}{M - m} \quad (\text{Eq. III.5})$$

Avec :

P : Précipitations moyennes annuelles (mm),

M : Température maximale du mois le plus chaud (°C),

m : Température minimale du mois le plus frais (°C),

Dans notre cas  $Q_2 = 41,49$

Après application de cette formule ( $Q_2 \approx 41,49$ ) (fig. III.10), la zone d'étude se trouve soumise à l'étage bioclimatique semi-aride à hiver tempéré.

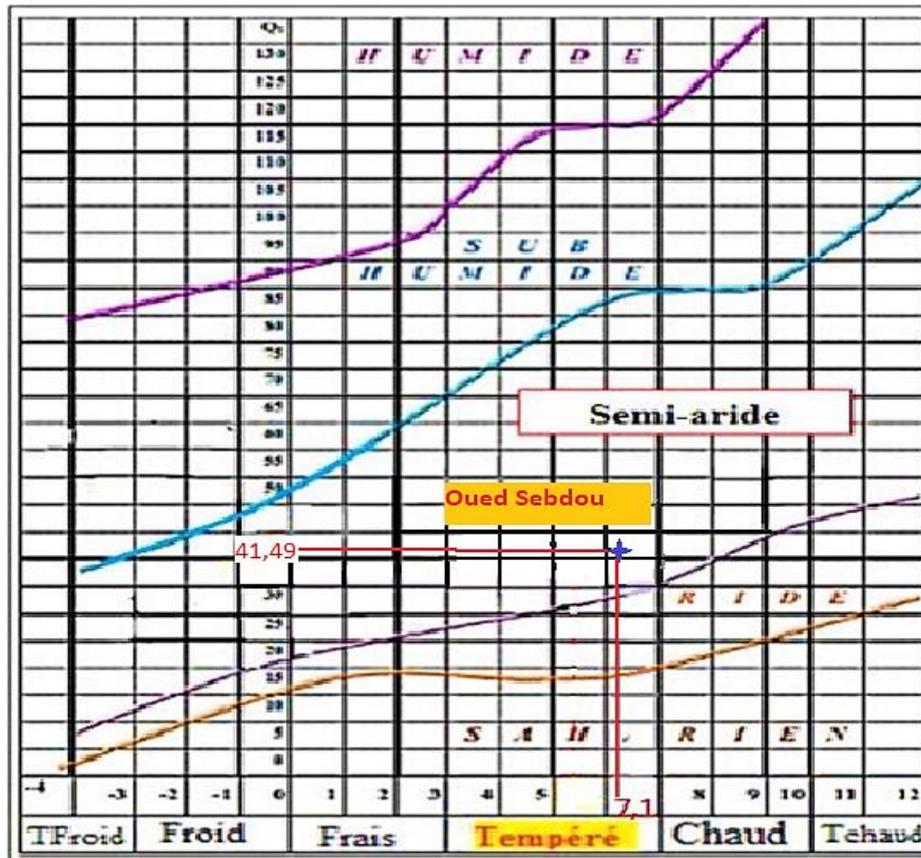


Figure III.10 : Projection de la zone d'étude dans le climagramme d'Emberger.

### 3.4. Etude de l'évapotranspiration

C'est la quantité d'eau évaporée par une surface aquatique libre (un lac, une rivière, ...), ou transpirée par un couvert végétal. On peut l'estimer soit par un évaporomètre, soit par des formules empiriques comme la formule de Turc (1960) ou Thornthwaite (1946).

#### 3.4.1. Formule de Turc

La formule de Turc est la suivante :

$$ETP = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \text{ (Eq. III.6)}$$

Avec :

P : Précipitations moyennes annuelles (mm)

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3$$

Avec :

T : Température moyenne annuelle (°C)

Donc : ETP = 902,2mm

3.4.2. Formule de Thornthwaite

Cette méthode permet le calcul ponctuel du bilan hydraulique mensuel et annuel à partir de la température et des précipitations. La formule est la suivante :

$$ETP = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot T}{I}\right)^a \cdot K \quad (\text{Eq. III.7})$$

Avec :

T : Température moyenne mensuelle (°C),

I : indice thermique annuel.

En remplaçant ces deux paramètres dans le programme adapté par L. Benadda, on trouve l'évapotranspiration calculée par la méthode de Thornthwaite égale à 802mm.

En utilisant le programme d'Oudin et al (2005), celui qui permet de calculer l'évapotranspiration annuelle et journalière en introduisant la température journalière de l'endroit en question, on a pu établir le graphe suivant :

La figure III.11, représente la variation annuelle de l'évapotranspiration enregistrée dans les stations de Beni Bahdel (1979/1980-2019/2020). On remarque une certaine ressemblance d'allure entre les trois graphes des évapotranspirations potentielles, en revanche la courbe de l'ETP calculée par la méthode de Thornthwaite marque des pics largement supérieurs à celles des courbes des ETP calculées par les méthodes de Turc et d'Oudin. Cela, nous mène à dire que la méthode de Thornthwaite surestime l'évapotranspiration par rapport à celle de Turc ou de Oudin.

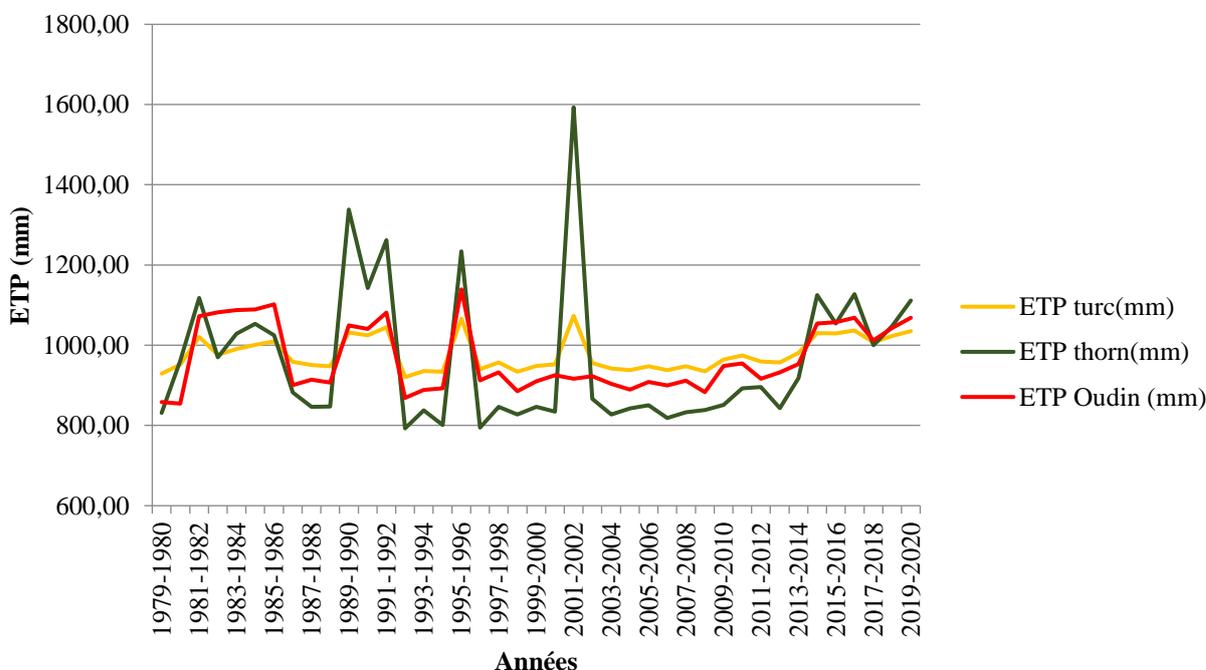


Figure III.11 : Variation interannuelle de l'évapotranspiration potentielle . (1979/1980-2019/2020).

### 3.5. Etude hydrologique

Le comportement hydrologique d'un bassin versant est souvent analysé en étudiant la réaction hydrologique des précipitations en fonction du climat de la région. Cette réaction est la quantité d'eau qui s'écoule à l'exutoire du système.

A cet égard, nous proposons une étude hydrologique, en vue d'évaluer les caractéristiques des écoulements superficiels (débit et lame d'eau) du sous bassin, pour divers pas de temps. Dans cette partie, nous prenons en considération les données de la station de Sebdou en amont du bassin plus précisément au niveau de la ville de Sebdou avec une période s'étendant sur 32 ans de (1980/1981-2011/2012).

#### 3.5.1. Etude des débits

##### 3.5.1.1. Variation des débits moyens annuels

Le tableau suivant, montre les données de débits annuels enregistrés au niveau de la station Sebdou durant la période 1980/1981-2011/2012.

Tableau III.10 : Données des débits annuels d'Oued Sebdou durant la période (1980/1981-2011/2012).

Année	Q (m <sup>3</sup> /s)	Année	Q (m <sup>3</sup> /s)	Année	Q (m <sup>3</sup> /s)
1980-1981	0,58	1991-1992	0,22	2002-2003	0,49
1981-1982	0,09	1992-1993	0,07	2003-2004	0,16
1982-1983	0,14	1993-1994	0,09	2004-2005	0,09
1983-1984	0,05	1994-1995	0,28	2005-2006	0,31
1984-1985	0,09	1995-1996	0,70	2006-2007	0,09
1985-1986	0,41	1996-1997	0,04	2007-2008	0,14
1986-1987	0,88	1997-1998	0,09	2008-2009	1,32
1987-1988	0,07	1998-1999	0,13	2009-2010	0,28
1988-1989	0,11	1999-2000	0,13	2010-2011	0,03
1989-1990	0,05	2000-2001	1,18	2011-2012	0,08
1990-1991	0,60	2001-2002	0,20	<b>Q<sub>moyen</sub> = 0.29m<sup>3</sup>/s</b>	

Les résultats du tableau précédent et la figure III.12, indiquent que la moyenne de cette série est égale à 0,29 tandis qu'il y a deux années qui se démarquent, l'une (2008-2009) avec un débit max de 1,32m<sup>3</sup>/s et une autre (2010-2011) avec un débit min (0.03m<sup>3</sup>/s). Puis, parmi 32 années, on trouve 9 années qui ont un débit supérieur à la moyenne marquant le déficit d'écoulement accusé lors de cette période d'observation.

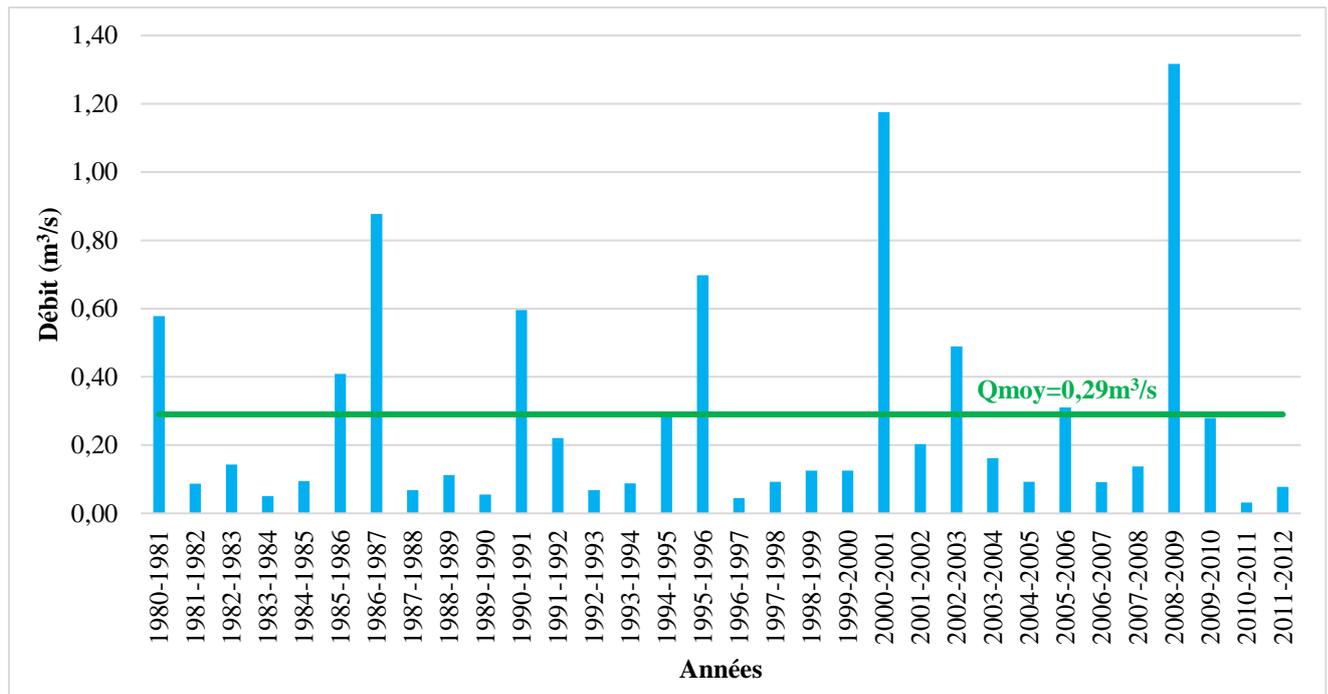


Figure III.12 : Variation interannuelle des débits à la station de Seb dou (1980/1981-2011/2012).

### 3.5.1.2. Débits moyens mensuels

Le tableau III.11, présente les valeurs moyennes mensuelles des débits à la station de Seb dou.

Tableau III.11 : Variation moyenne mensuelle des débits à la station de Seb dou (1980/1981-2011/2012).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
Q (m³/s)	0,14	0,33	0,11	0,2	0,49	0,65	0,97	0,23	0,2	0,06	0,03	0,05

La figure III.13, montre un maximum qui s’observe au mois de Mars avec 0,97m³/s bien qu’il ne soit pas le plus pluvieux dû probablement à la fonte de la neige et/ou le soutien à partir des sources durant ce mois. Le mois de Juillet enregistre un débit minimal de 0,03m³/s.

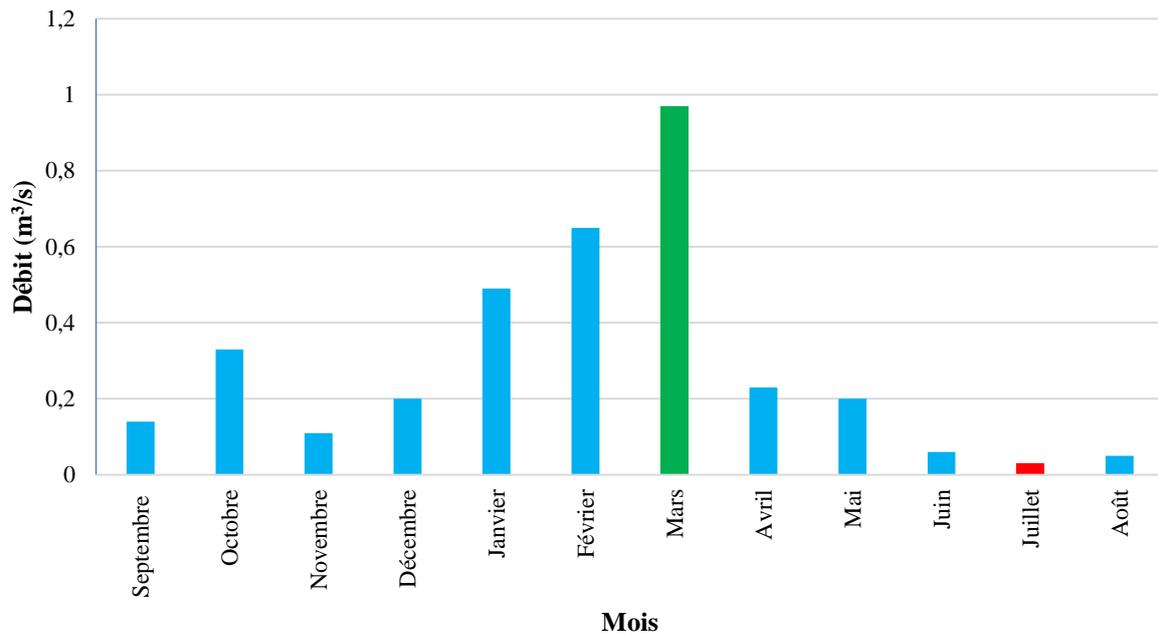


Figure III.13 : Variation mensuelle des débits à la station de Seb Dou (1980/1981-2011/2012).

### 3.5.1.3. Débits moyens saisonniers

La figure III.14 et le tableau III.12 montrent la répartition des débits moyens saisonniers de la série (1980/1981 à 2011/2012). Le maximum des débits moyens saisonniers est de  $0,47\text{m}^3/\text{s}$ , il est enregistré au Printemps, et en Été, nous enregistrons un faible écoulement avec une valeur de  $0,04\text{ m}^3/\text{s}$ .

Tableau III.12: Variation saisonnière des débits à la station de Seb Dou.

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Été
Q (m³/s)	0,19	0,45	0,47	0,04

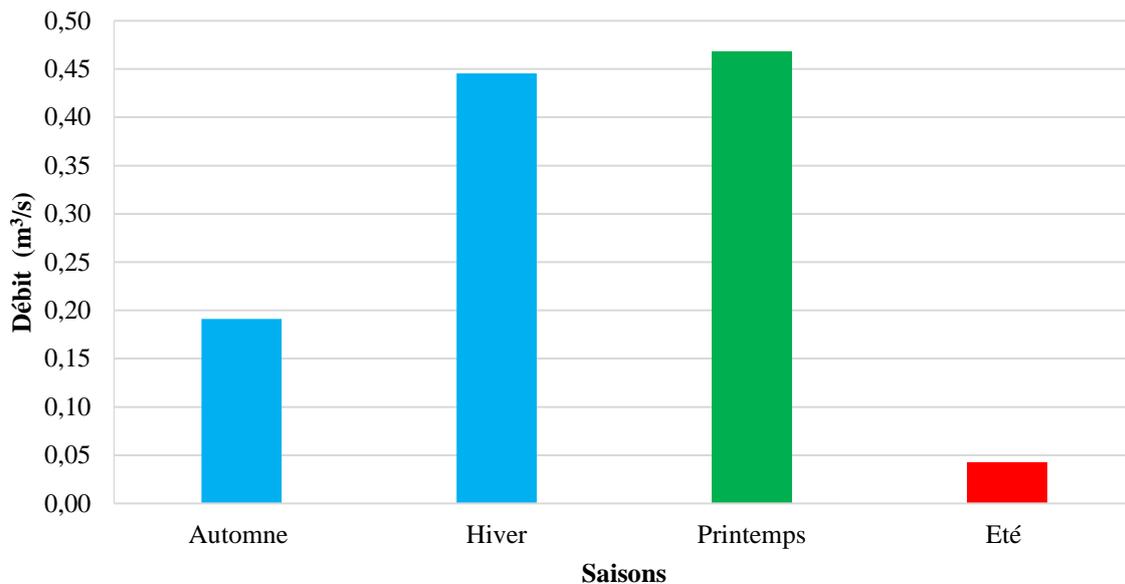


Figure III.14: Variation saisonnière des débits à la station de Seb Dou (1980/1981-2011/2012).

#### 3.5.1.4. Débits moyens journaliers

L'analyse des écoulements d'une année moyenne journalière, nous permet de distinguer les jours qui enregistrent les débits maximaux et minimaux.

La figure III.15, met en évidence la variation des débits journaliers au cours d'une année moyenne de la série (1980/1981-2011/2012). En effet, sur 365 jours, nous trouvons 251 jours avec un débit inférieur à la moyenne, 03 jours enregistrant un débit égal à la moyenne ( $0,29\text{m}^3/\text{s}$ ), et le reste (111 jours) un débit supérieur à la moyenne. Nous notons aussi la présence de deux pics, le premier relevé le 22 Mars avec une valeur maximale de  $6,43\text{m}^3/\text{s}$ , et un second enregistré le 03 Octobre avec une valeur de  $4,17\text{m}^3/\text{s}$ . Par contre, la valeur minimale de  $0,02\text{m}^3/\text{s}$  se répète sur plusieurs jours de l'année.

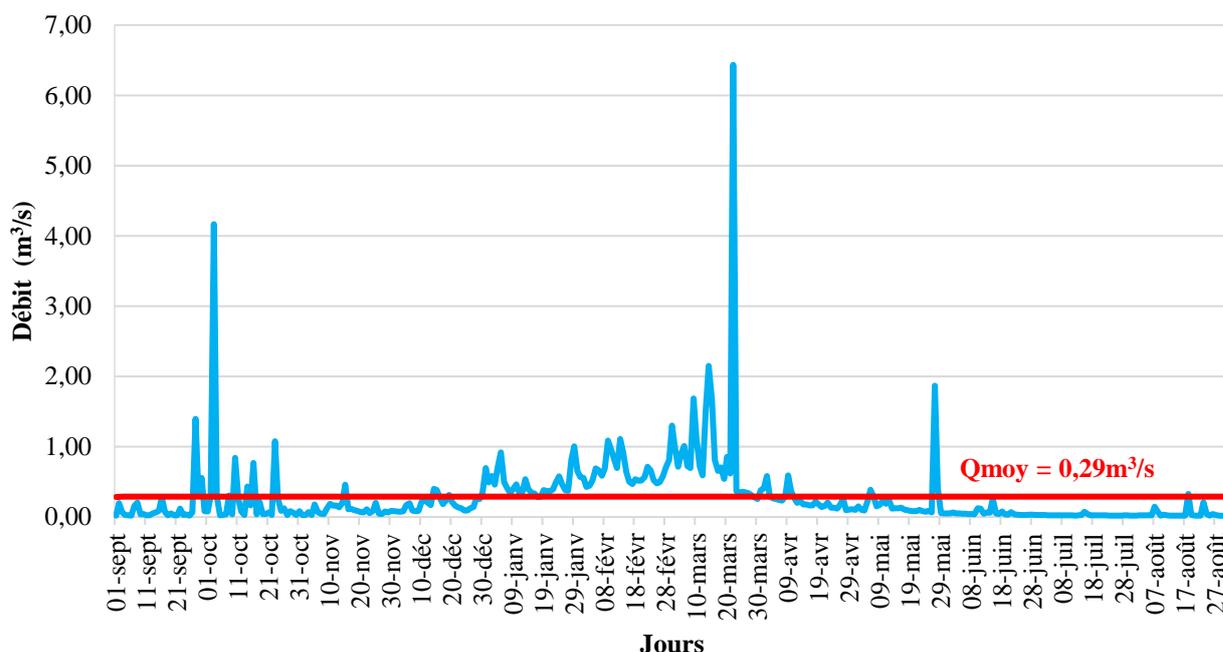


Figure III.15: Variation des débits journaliers d’une année moyenne à la station de Sebdo. (1980/1981-2011/2012).

### 3.5.2. Etude des lames d’eau écoulées

La lame d’eau est un débit exprimé en mm, pour l’obtenir on multiplie le débit exprimé en m<sup>3</sup>/s par le temps respecté (année, mois, jour) et on divise sur la surface du bassin versant contrôlé. La lame d’eau écoulée exprimée en mm nous donne le privilège de la comparer avec les précipitations puisqu’elles ont la même unité.

#### 3.5.2.1.Lame d’eau moyenne annuelle

Sur le tableau suivant, sont consignées les valeurs des lames d’eau écoulées annuelles de la station de Sebdo durant la période (1980/1981-2011/2012).

Tableau III.13 : Variation interannuelle des lames d'eau écoulées à la station de Sebdou (1980/1981-2011/2012).

Année	Q (m <sup>3</sup> /s)	Année	Q (m <sup>3</sup> /s)	Année	Q (m <sup>3</sup> /s)
1980-1981	41,6	1991-1992	15,8	2002-2003	35,2
1981-1982	6,5	1992-1993	5,0	2003-2004	11,5
1982-1983	10,1	1993-1994	6,5	2004-2005	6,5
1983-1984	3,6	1994-1995	20,1	2005-2006	22,3
1984-1985	6,5	1995-1996	50,3	2006-2007	6,5
1985-1986	29,4	1996-1997	2,9	2007-2008	10,1
1986-1987	63,2	1997-1998	6,5	2008-2009	94,8
1987-1988	5,0	1998-1999	9,3	2009-2010	20,1
1988-1989	7,9	1999-2000	9,3	2010-2011	2,2
1989-1990	3,6	2000-2001	84,7	2011-2012	5,7
1990-1991	43,1	2001-2002	14,4	Lame d'eau écoulée moyenne = 20.6mm	

La figure III.16 représente la variation interannuelle des lames d'eau écoulées de la station de Sebdou durant la période allant de 1980/1981 jusqu'à 2011/2012. On peut lire une tendance centrale égale à 20.6 mm de lame d'eau écoulée avec une lame d'eau maximale de 94,8mm enregistrée en 2008/2009, la minimale est soulevée en 2010/2011 avec une valeur égale à 2,2mm.

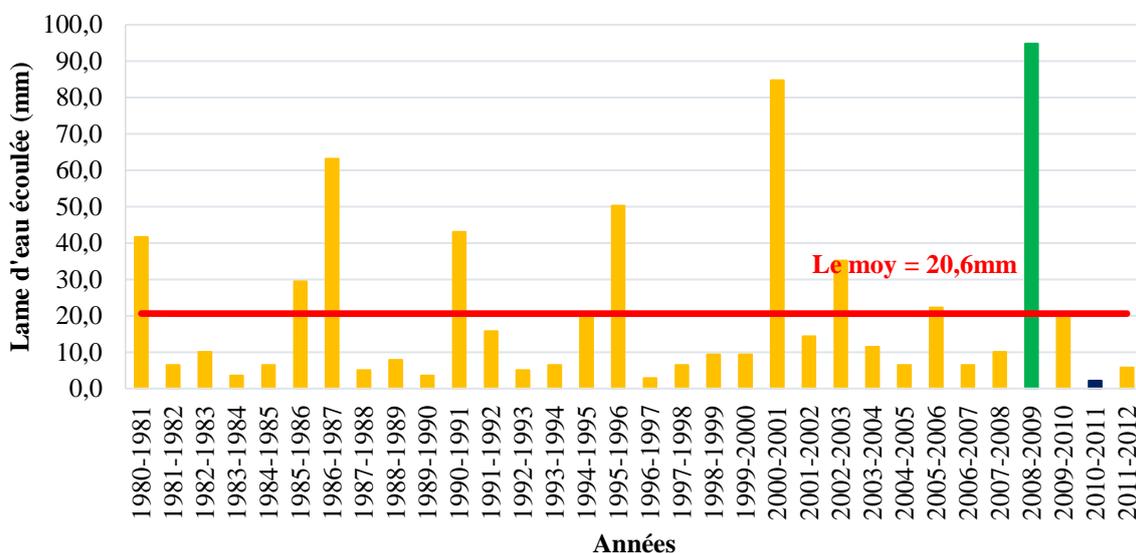


Figure III.16 : Variation interannuelle des lames d'eau écoulées à la station de Sebdou. (1980/1981-2011/2012).

## 3.5.2.2. Lame d'eau moyenne mensuelle

Les résultats des lames d'eau écoulées mensuelles sont dressés dans le tableau suivant :

Tableau III.14: Variation mensuelle des lames d'eau à la station de Sebdu (1980/1981-2011/2012).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
Le (mm)	0,8	2,0	0,6	1,2	3,0	3,6	5,9	1,4	1,2	0,4	0,2	0,3

La figure ci-dessous représente la variation mensuelle des lames d'eau écoulées dans la station de Sebdu durant la période 1980/1981-2011/2012, on enregistre un écoulement maximal de 5,9mm en Mars, puis un écoulement minimal de 0,2mm en Juillet.

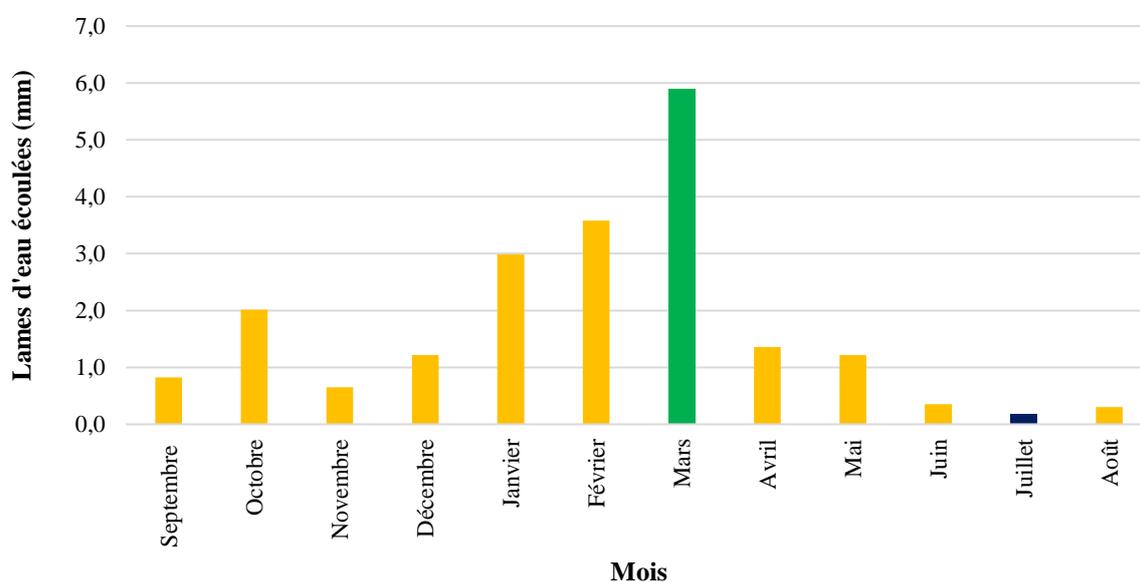


Figure III.17: Variation mensuelle des lames d'eau écoulées à la station de Sebdu (1980/1981-2011/2012).

Le graphe comparatif entre les lames d'eau précipitées et les lames d'eau écoulées sur la période synchrone (1980/1981-2011/2012) (fig. III.18), nous permet de remarquer que les précipitations et les lames d'eau n'évoluent pas proportionnellement, c'est-à-dire que si la valeur des précipitations est élevée, la valeur de la lame d'eau ne sera pas forcément élevée à son tour. On peut expliquer ce fait par la saturation des réservoirs naturels (nappes et aquifères) ou alors la nature du sol qui est en fait karstique dans notre zone d'étude.

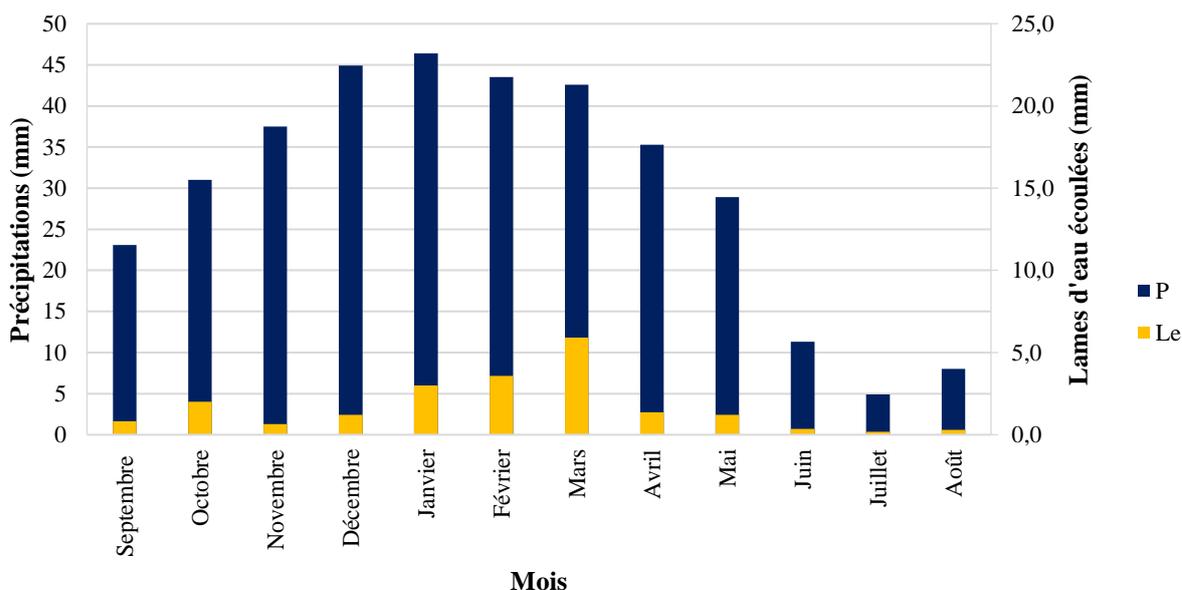


Figure III.18: Comparaison des variations mensuelles des lames d’eau écoulées et précipitations à la station de Sebdu (1980/1981-2011/2012).

### 3.5.2.3.Lame d’eau moyenne saisonnière

Le tableau et la figure suivants englobent les observations prises à partir de la station de Sebdu.

Tableau III.15: Variation saisonnière des lames d’eau de la station de Sebdu (1980/1981-2011/2012).

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Le (mm)	3,5	7,8	8,5	0,8

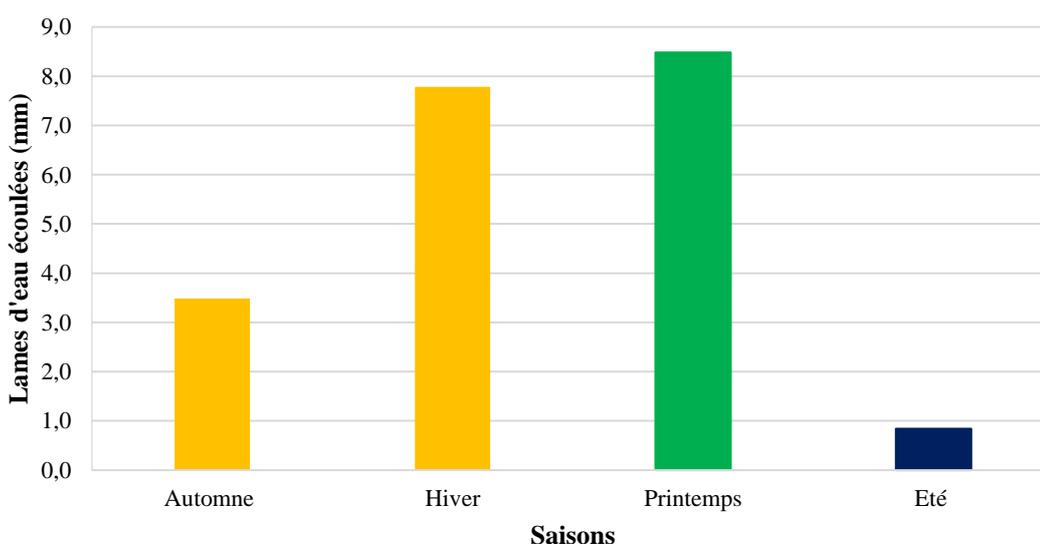


Figure III.19: Variation saisonnière des lames d’eau écoulées à la station de Sebdu (1980/1981-2011/2012).

On remarque un écoulement important au printemps (8,5mm) et un faible écoulement en été égal à 0,8mm.

### 3.5.2.4. Lame d'eau moyenne journalière

La figure III.20 exprime les variations journalières des lames d'eau écoulées durant une année moyenne, elle met en évidence un écoulement maximal (2,176mm) enregistré le 22 Mars, alors qu'un écoulement minimal de 0,006mm qui se répète 9 fois pendant le mois d'Août. On remarque que la majorité des écoulements supérieurs à la moyenne (0,096mm) sont enregistrés entre la fin du mois de Décembre et le début du mois de Avril, et c'est parce qu'il est connu que durant cette période de l'année hydrologique la saturation des nappes aquifères en eau est optimale.

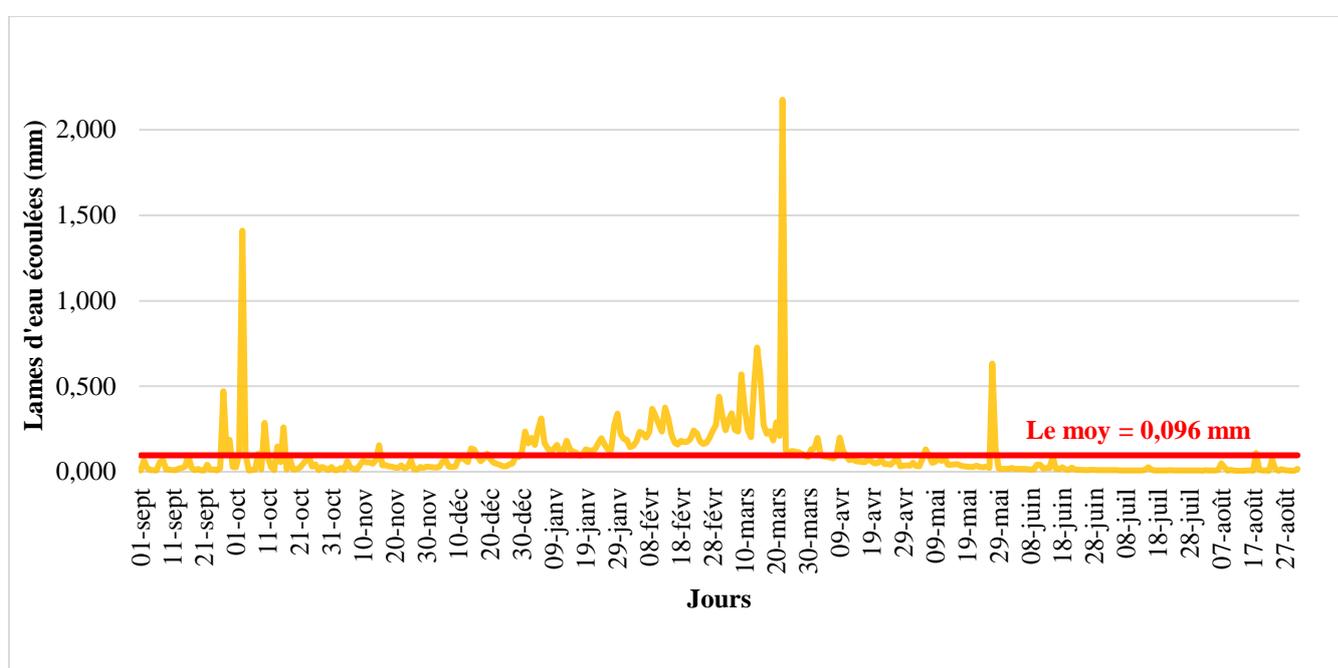


Figure III.20 : Variation des lames d'eau écoulées journalières d'une année moyenne à la station de Sebduou (1980/1981-2011/2012).

## 3.6. Etude statistique

L'étude statistique est une étude qui vise l'ajustement d'une série de données afin de vérifier la meilleure superposition possible entre les valeurs aléatoires (tabulées) et les valeurs calculées. Cette étude s'applique en trois tests : le test de normalité, graphique (la comparaison de la courbe théorique et empirique sur du papier Gauss), et analytique (on a choisi le test du Khi deux puisqu'il a le pouvoir de mesurer l'écart qu'il y a entre les fréquences observées et les fréquences théoriques).

On procédera par l'étude statistique des précipitations sur une période de 41 ans (1979/1980-2019/2020) et la lame d'eau écoulée sur une période de 32 ans (1980/1981-2011/2012).

3.6.1. Etude statistique des précipitations

Le tableau qui suit résume les données de l’ajustement des précipitations :

Tableau III.16: Distribution des précipitations moyennes annuelles à la station de Sebdou (1979-1980 à 2019-2020).

Rang	Année	P (mm)	F	Log P	Rang	Année	P (mm)	F	Log P
1	2019/2020	197,5	0,024	5,29	22	1988/1989	337,8	0,524	5,82
2	1999/2000	198,4	0,048	5,29	23	1981/1982	339,9	0,548	5,83
3	2004/2005	217,0	0,071	5,38	24	1994/1995	351,1	0,571	5,86
4	1987/1988	231,5	0,095	5,44	25	2003/2004	351,1	0,595	5,86
5	1996/1997	232,5	0,119	5,45	26	2010/2011	360,9	0,619	5,89
6	1992/1993	237,4	0,143	5,47	27	2016/2017	388,9	0,643	5,96
7	1983/1984	247,6	0,167	5,51	28	2009/2010	389,2	0,667	5,96
8	2017/2018	248,4	0,190	5,51	29	1985/1986	390,6	0,690	5,97
9	1998/1999	251,9	0,214	5,53	30	2005/2006	394,5	0,714	5,98
10	1989/1990	272,2	0,238	5,61	31	2000/2001	411,4	0,738	6,02
11	2007/2008	272,4	0,262	5,61	32	1986/1987	430,7	0,762	6,07
12	2015/2016	274,4	0,286	5,61	33	2001/2002	433,3	0,786	6,07
13	1982/1983	279,4	0,310	5,63	34	1990/1991	455,1	0,810	6,12
14	1993/1994	290,4	0,333	5,67	35	2002/2003	463,1	0,833	6,14
15	2011/2012	293,7	0,357	5,68	36	1979/1980	475,2	0,857	6,16
16	1997/1998	296,7	0,381	5,69	37	1991/1992	483,7	0,881	6,18
17	2014/2015	306,2	0,405	5,72	38	1980/1981	497,5	0,905	6,21
18	2006/2007	327,0	0,429	5,79	39	2012/2013	548,3	0,929	6,31
19	1984/1985	329,1	0,452	5,80	40	2008/2009	668,9	0,952	6,51
20	2018/2019	329,4	0,476	5,80	41	1995/1996	694,0	0,976	6,54
21	2013/2014	331,4	0,500	5,80					

Les résultats du calcul des paramètres de position et de distribution sont comme suit :

Tableau III.17: Paramètres de position et de dispersion des précipitations à la station de Sebdou (1979/1980-2019/2020).

	Formule	Valeurs
Moyenne	$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^a P_i$	354,4
Ecart-type	$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$	115,42
Variance	$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^a (P_i^2 - P)$	13322,6
Coefficient de variation	$C_v = \frac{\sigma}{P}$	0,33

Nous avons eu un coefficient de variation inférieur à 0,5 ( $Cv=0,33$ ), cela dit que l'ajustement de cette série suit une loi normale ou une loi log normale.

3.6.1.1. Ajustement par la loi normale

- Test graphique

Le logiciel HYFRAN 1.1 est utilisé pour représenter la formule  $P=\bar{P} + \delta u$  de l'ajustement de la série pluviométrique étudiée. Donc pour cela, on transfère les données de précipitations pour représenter l'axe des ordonnées (Y), puis sur l'axe des abscisses (X) on reporte « u » une variable réduite de Gauss. On a obtenu une droite dite droite d'Henry (fig.III.21).

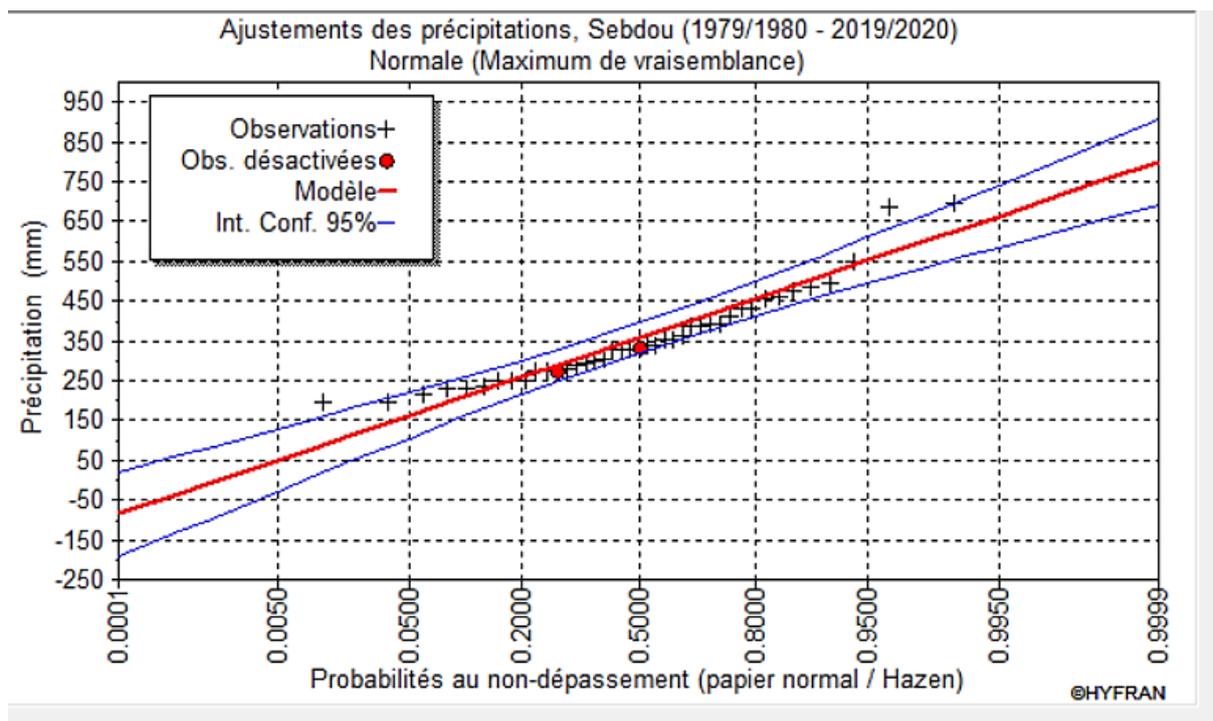


Figure III.21: Ajustement des précipitations à la loi de distribution normale (1979/1980-2019/2020).

- Test numérique

Afin de calculer le  $\text{Khi}^2$ , il est nécessaire de dresser le tableau suivant :

Tableau III.18: Calcul du  $\text{Khi}^2$ .

N	Classes	Effectif (Ni)	Fréquence de classe	Fréquence de classe	Fréquence tabulée	Fréquence théorique (Npi)	$\text{Khi}^2$
1	[197,5-280,2[	13	-0,643	1,64	0,9495	12,3435	0,035
2	[280,2-363,0[	13	0,074	0,07	0,5279	6,8627	5,489
3	[363,0-445,7[	7	0,791	0,79	0,7852	5,4964	0,411
4	[445,7-528,5[	6	1,508	1,51	0,9345	5,607	0,028
5	[528,5-694,0]	2	2,225	2,23	0,9868	1,9736	0,0004
<b>Total</b>		41					<b>5,96</b>

Le  $\chi^2$  est calculé par la formule suivante :

$$\chi^2 = \frac{(N_i - N p_i)^2}{N p_i} \text{Eq (III.8)}$$

$$\chi^2_{\text{cal}} = 5,96$$

Pour un seuil de probabilité de 5% (0,05), le degré de liberté est :

ddl = n - k - 1 avec :

n : Nombre de classe ;

k : Nombre de paramètre.

$$\text{Ddl} = 5 - 2 - 1 \rightarrow \text{ddl} = 2$$

Donc :  $\chi^2_{\text{tab}} = 5,99$ .

$\chi^2_{\text{cal}} (5,96) < \chi^2_{\text{tab}} (5,99) \rightarrow$  l'ajustement par loi normale est acceptable.

### 3.6.1.2. Ajustement par la loi log normale

#### - Test graphique

Le logiciel HYFRAN 1.1 est utilisé pour représenter la formule  $\log P = \overline{P} \log + \delta \log u$  de l'ajustement de la série pluviométrique étudiée. Donc pour cela, on transfère les données logarithmiques des précipitations pour représenter l'axe des ordonnées (Y), puis sur l'axe des abscisses (X) on reporte « u » une variable réduite de Gauss.

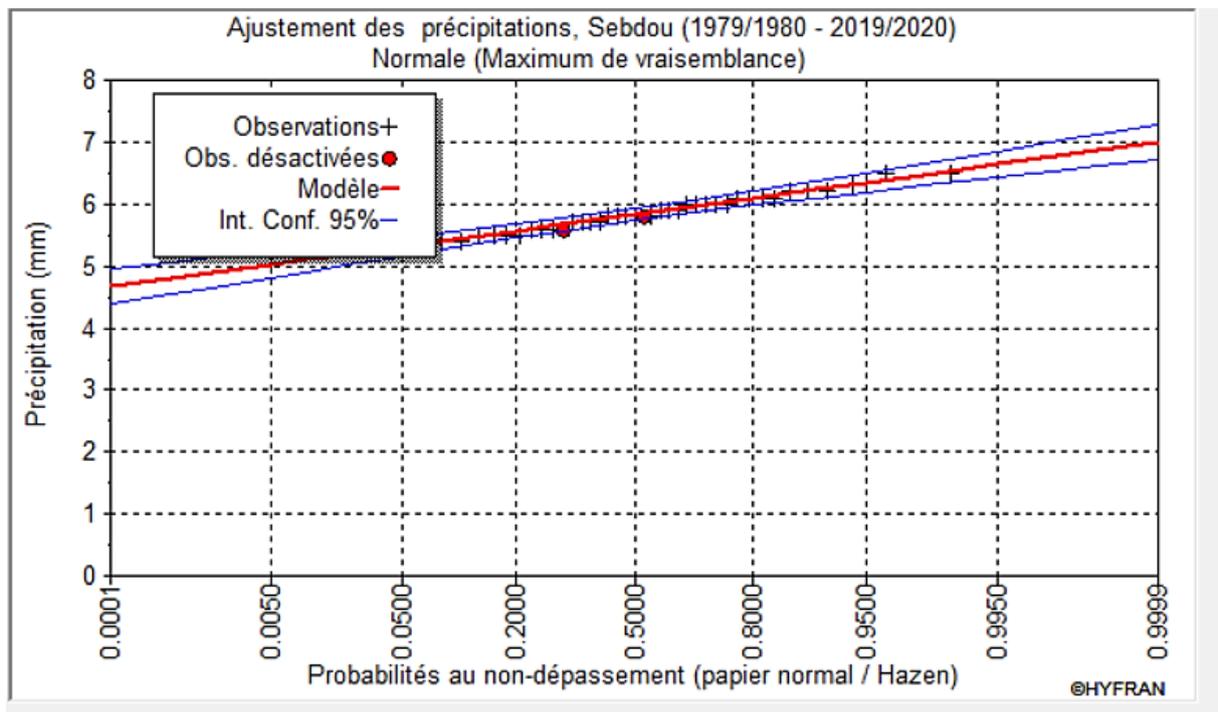


Figure III.22: Ajustement des précipitations à la loi de distribution log normale (1979/1980-2019/2020).

#### - Test numérique (test de Pearson ou $\chi^2$ )

Le tableau suivant résume les paramètres de position et de distribution de la série qu'on doit ajuster par la loi log normale :

Tableau III.19: Paramètres de position et de dispersion des précipitations à la station de Sebdou (1979/1980-2019/2020).

	Formule	Valeurs
Moyenne	$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^a P_i$	5,82
Ecart-type	$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$	0,31
Variance	$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^a (P_i^2 - P)$	0,126
Coefficient de variation	$Cv = \frac{\sigma}{P}$	0,053

Tableau III.20: Calcul du Khi<sup>2</sup>.

N	Classes	Effectif (Ni)	Fréquence de classe	Fréquence de classe	Fréquence tabulée	Fréquence théorique (Npi)	Khi <sup>2</sup>
1	[5,29-5,50[	6	-1,072	2,07	0,9808	5,8848	0,002
2	[5,50-5,70[	10	-0,388	1,39	0,9177	9,177	0,074
3	[5,70-5,91[	10	0,298	0,30	0,6179	6,179	2,363
4	[5,91-6,12[	7	0,984	0,98	0,8365	5,8555	0,224
5	[6,12-6,33[	6	1,670	1,67	0,9525	5,715	0,014
6	[6,33-6,54]	2	2,355	2,36	0,9909	1,9818	0,0002
<b>Total</b>		41					2,677

$\chi^2_{cal} = 2,677$

Pour un seuil de probabilité de 5% (0,05), le degré de liberté doit être :

ddl= n-k-1 avec :

n : nombre de classe ;

k : nombre de paramètre.

ddl= 6-2-1 → ddl=3

Donc :  $\chi^2_{tab} = 7,81$ .

$\chi^2_{cal} (2,677) < \chi^2_{tab} (7,81) \rightarrow$  l'ajustement par la loi normale est aussi accepté.

### 3.6.1.3. Résultats de l'ajustement

A travers le tableau suivant, on peut comparer les résultats de l'ajustement :

Tableau III.21: Résultats du test de Pearson.

	$\chi^2_{calculé}$	$\chi^2_{tabulé}$	Comparaison	Résultat
Loi normale	5,96	5,99	$\chi^2_{tab} > \chi^2_{cal}$	Acceptée
Loi log normale	2,68	7,81	$\chi^2_{tab} > \chi^2_{cal}$	Acceptée

On constate que la loi log normale est plus adéquate pour l'ajustement car elle a un  $K_{hi}^2$  calculé inférieur, en plus la figure I.6.1.2 montre que toutes les observations sont à l'intérieur de l'intervalle.

### 3.6.1.4. Calcul des Précipitations pour une période de récurrence donnée

Pour calculer les précipitations, on utilise l'équation de la loi log normale qui est la suivante :

$$\text{Log}P = \overline{P \text{ log}} + \delta \log.u \text{Eq (III.9)}$$

Tableau III.22 : Calcul des précipitations pour différentes périodes de retour avec la loi log normale.

Période	Précipitations	Log P	P(mm)
Humide	Décennale (u=1,28)	6,2168	501,1
	50 ans (u=2,05)	6,4555	636,2
	Centenaire (u= 2,33)	6,5423	693,9
	Millénaire (u= 3,29)	6,8399	934,4
Sèche	Décennale (u= -1,28)	5,4232	226,6
	50 ans (u= -2,05)	5,1845	178,4
	Centenaire (u=-2,33)	5,0977	163,6
	Millénaire (u= -3,29)	4,8001	121,5

### 3.6.2. Etude statistique des lames d'eau écoulées

Nous avons représenté sur le tableau III.23 les données de l'ajustement des lames d'eau écoulées de la série des précipitations au niveau de la station de Sebdou de 1980/1981 à 2011/2012.

Tableau III.23: Distribution des lames d'eau écoulées moyennes annuelles à la station de Sebdou (1980/1981- 2011/2012).

Rang	Années	Le (mm)	F	Log Le	Rang	Années	Le (mm)	F	Log Le
1	2010/2011	2,15	0,030	0,77	17	1982/1983	10,05	0,515	2,31
2	1996/1997	2,87	0,061	1,06	18	2007/2008	10,05	0,545	2,31
3	1983/1984	3,59	0,091	1,28	19	2003/2004	11,49	0,576	2,44
4	1989/1990	3,59	0,121	1,28	20	2001/2002	14,36	0,606	2,66
5	1987/1988	5,03	0,152	1,61	21	1991/1992	15,80	0,636	2,76
6	1992/1993	5,03	0,182	1,61	22	1994/1995	20,11	0,667	3,00
7	2011/2012	5,74	0,212	1,75	23	2009/2010	20,11	0,697	3,00
8	1981/1982	6,46	0,242	1,87	24	2005/2006	22,26	0,727	3,10
9	1984/1985	6,46	0,273	1,87	25	1985/1986	29,44	0,758	3,38
10	1993/1994	6,46	0,303	1,87	26	2002/2003	35,19	0,788	3,56
11	1997/1998	6,46	0,333	1,87	27	1980/1981	41,65	0,818	3,73
12	2004/2005	6,46	0,364	1,87	28	1990/1991	43,09	0,848	3,76
13	2006/2007	6,46	0,394	1,87	29	1995/1996	50,27	0,879	3,92
14	1988/1989	7,90	0,424	2,07	30	1986/1987	63,19	0,909	4,15
15	1998/1999	9,34	0,455	2,23	31	2000/2001	84,74	0,939	4,44
16	1999/2000	9,34	0,485	2,23	32	2008/2009	94,79	0,970	4,55

Les résultats du calcul des paramètres de position et de distribution sont comme suit :

Tableau III.24: Paramètres de position et de dispersion des lames d'eau à la station de Sebdou (1980/1981- 2011/2012).

	Formule	Valeurs
Moyenne	$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^a P_i$	20,62
Ecart-type	$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$	23,74
Variance	$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^a (P_i^2 - P)$	563,71
Coefficient de variation	$Cv = \frac{\sigma}{P}$	1,15

Nous avons un coefficient de variation supérieur à 0,5 (Cv=1,15), cela dit que l'ajustement de cette série suit forcément une loi log normale.

### 3.6.2.1. Ajustement par la loi log normale

#### - Test graphique

Le logiciel HYFRAN 1.1 est utilisé pour représenter la formule  $\text{LogLe} = \overline{Le \log} + \delta \log.u$  de l'ajustement de la série hydrométrique étudiée. Donc pour cela, on transfère les données logarithmiques des lames d'eau écoulées pour représenter l'axe des ordonnées (Y), puis sur l'axe des abscisses (X) on reporte « u » une variable réduite de Gauss.

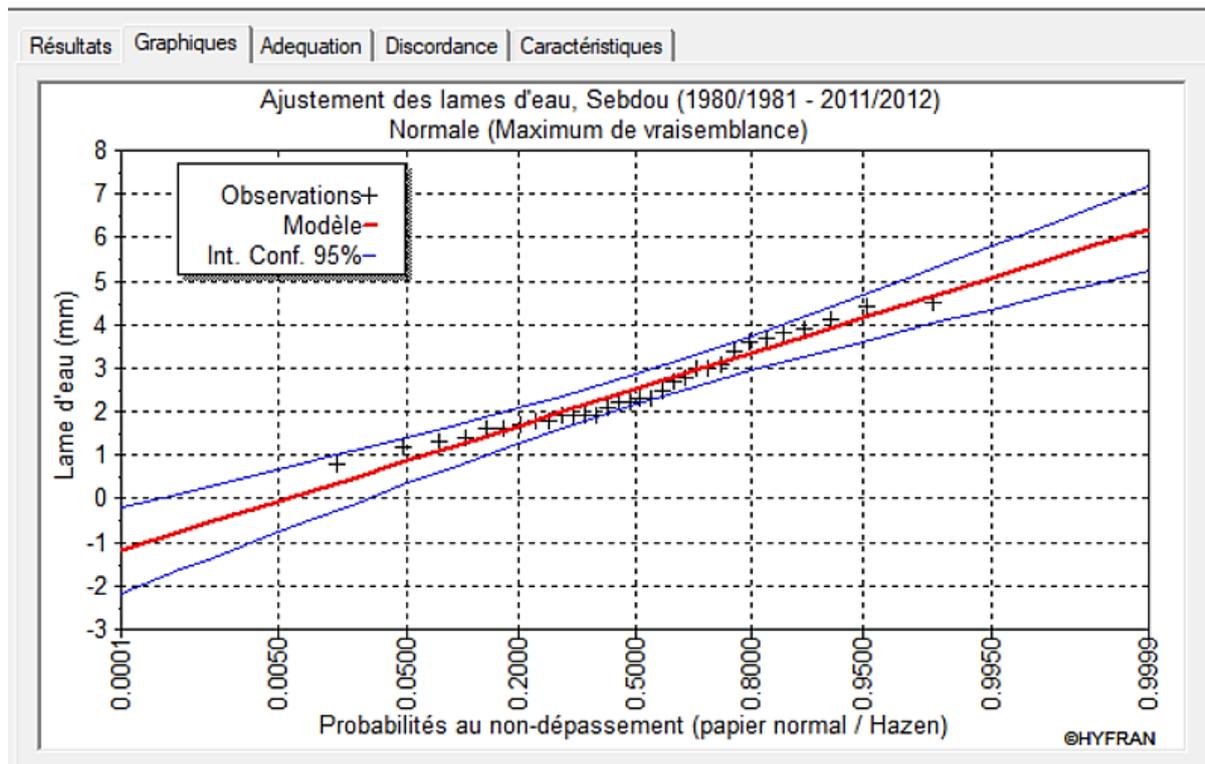


Figure III.23: Ajustement à la loi log normale des lames d'eau écoulées de la station de Sebdu (1980/1981-2011/2012).

- **Test numérique**

Le tableau III.24 résume les paramètres de position et de distribution de la série qui sera ajustée qu'on doit ajuster par la loi log normale :

Tableau III.25: Paramètres de position et de dispersion des logarithmes des lames d'eau écoulées

	<b>Formule</b>	<b>Valeurs</b>
<b>Moyenne</b>	$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^a P_i$	2,51
<b>Ecart-type</b>	$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$	1,01
<b>Variance</b>	$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^a (P_i^2 - P)$	1,02
<b>Coefficient de variation</b>	$Cv = \frac{\sigma}{P}$	0,40

Tableau III.26: Calcul du Khi<sup>2</sup>.

N	Classe	Effectif	Fréquence de classe	Fréquence de classe	Fréquence tabulée	Fréquence théorique (Np <sub>i</sub> )	Khi <sup>2</sup>
1	[0,77-1,4[	4	-1,095	2,09	0,9817	3,9268	0,001
2	[1,4-2,03[	9	-0,472	1,47	0,9292	8,3628	0,049
3	[2,03-2,66[	6	0,151	0,15	0,5596	3,3576	2,080
4	[2,66-3,29[	5	0,775	0,77	0,7793	3,8965	0,313
5	[3,29-3,92[	4	1,398	1,40	0,9192	3,6768	0,028
6	[3,92-4,55]	4	2,021	2,02	0,9788	3,9152	0,002
<b>Total</b>		32					2,472

$$\chi^2_{\text{cal}} = 2,472$$

Pour un seuil de probabilité de 5% (0,05), le degré de liberté doit être :

ddl = n - k - 1 avec :

n : Nombre de classes,

k : Nombre de paramètres.

Ddl = 6 - 2 - 1 → ddl = 3

Donc :  $\chi^2_{\text{tab}} = 7,81$ .

$\chi^2_{\text{cal}} (2,472) < \chi^2_{\text{tab}} (7,81) \rightarrow$  ajustement par loi log normale acceptée.

### 3.6.2.2. Calcul des lames d'eau écoulées pour des périodes de récurrence données

Pour calculer la lame d'eau écoulée, on utilise l'équation de la loi log normale qui est la suivante :

$$\text{LogLe} = \overline{\text{Le log}} + \delta \log.u \text{Eq (III.10)}$$

Tableau III.27: Calcul des lames d'eau écoulées pour différentes périodes de retour avec la loi log normale.

Période	Précipitations	Log Le	Le(mm)
<b>Humide</b>	Décennale (u=1,28)	3,80	44,8
	50 ans (u=2,05)	4,58	97,6
	Centenaire (u= 2,33)	4,86	129,5
	Millénaire (u= 3,29)	5,83	341,3
<b>Sèche</b>	Décennale (u= -1,28)	1,22	3,4
	50 ans (u= -2,05)	0,44	1,6
	Centenaire (u=-2,33)	0,16	1,2
	Millénaire (u= -3,29)	-0,81	0,4

**3.7. Conclusion**

A l'issue de ce chapitre, nous retenons les résultats qui suivent :

- La pluviométrie de la région étudiée est irrégulière, cela dit qu'elle est de type méditerranéen avec un coefficient d'immodération de 3,51.
- Durant la série d'étude (41 ans) (1979/1980-2019/2020), le mois le plus humide est le mois de Décembre et le mois le plus sec est Juillet, avec une pluie moyenne de 354.4mm.
- La région de Sebdou appartient à l'étage bioclimatique semi-aride à hiver tempéré avec un écoulement temporaire et une formation herbacée.
- La température moyenne est de 17,9°C avec Août le mois le plus chaud et Janvier, le mois le plus frais.
- L'analyse de la lame d'eau écoulée et les précipitations nous ont permis de souligner une déficience qui est sûrement dû à la nature du milieu karstique.
- Les précipitations et les lames d'eau écoulées suivent une loi log normale.

# Chapitre IV

---

Application du modèle  
Gardénia sur oued Sebdou

**Introduction**

Nombreux sont les modèles qui font l'approche pluie-débit, en revanche nous proposons d'élaborer une simulation sur l'oued de Sebdou avec le modèle Gardénia.

Le modèle Gardénia conçu par Thiery (1982) (Bureau de Recherche Géologique et Minière, Orléans, France) est appliqué sur plusieurs bassins en France (1996), en Burkina-Faso (1990) etc...En Algérie, il est appliqué sur de nombreux bassins versants, citons à titre d'exemple : oued el Hammam (Djellouli, 2017), oued Lakhdar (Gherissi, 2018), oued Mekkera (Otmane, 2019), oued Boukiou (Iles, 2019), oued el Mellah, (Boudjema, 2020), (Amiar, 2021) et autres dans le but de simuler le modèle pluie-débit, ou expérimenter le niveau piézométrique, ou pour étudier d'autres fonctions hydrogéologiques.

**4.1. Application du modèle Gardénia**

Le modèle Gardénia est un modèle global à réservoirs pour la simulation hydrologique des bassins versants, Il simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) par des lois physiques simplifiées qui correspondent à un écoulement à travers une succession de réservoirs (Iles, 2019).

La modélisation des relations pluie-débit et/ou pluie-niveau piézométrique fait intervenir 4 à 6 paramètres globaux (réserve utile, temps de tarissement, etc.) définis pour un bassin versant ou une entité homogène au sein d'un bassin versant. Ces paramètres doivent être ajustés sur une période d'observation commune des pluies et des débits de cours d'eau (et/ou des niveaux aquifères). Cette phase de calibration du modèle est réalisée automatiquement par le logiciel sous contrôle de l'utilisateur ou manuellement. (Thiéry, 2011).

A travers ce travail, nous allons simuler une série de 32 ans de pluie, débit, et évapotranspiration potentielle avec un pas de temps annuel pour un seul réservoir à considérer, nous allons évaluer uniquement le débit. On utilise une version du logiciel du BRGM. Gardénia 8.7b mise à jour en Septembre 2019.

Pour introduire les données dans le logiciel on a suivi les instructions suivantes :

- Enregistrer les données sur 3 blocs notes (1 pour les précipitations, un autre pour le débit, et le troisième pour les ETP). Ces données sont des données mensuelles de formats séquentiels.
- On fait entrer les paramètres de descriptions tels que le nombre d'unité (bassins) à modéliser, type de donnée à optimiser (débits, niveau piézométrique, ...), pour notre cas on s'intéresse au débit, le pas de temps (annuel, pour notre étude).
- On fait entrer l'année du début, et la surface du bassin versant.
- Enfin, on laisse le calcul des autres paramètres aléatoires au modèle.

#### 4.1.1. Calage du modèle Gardénia

La calibration consiste à ajuster les paramètres du modèle de telle sorte qu'ils permettent de calculer des chroniques de débit et/ou de niveaux piézométriques aussi proches que possible de celles qui ont été effectivement observées. La calibration se fait par une méthode semi-automatique. L'utilisateur fournit un jeu de paramètres initiaux et indique ceux qui doivent être optimisés selon un algorithme non-linéaire adapté de la méthode de Rosenbrock. Le logiciel fait alors varier ces paramètres jusqu'à trouver un jeu fournissant la meilleure adéquation entre séries calculées et observées. (Thierry D. 2011)

Dans une série de 32ans on a choisi 20ans pour faire la calibration (1980/1981-1999/2000). Cette étape sert à optimiser des paramètres par un critère d'évaluation après le passage par un certain nombre de simulations que nous avons opéré manuellement.

Le résultat de la simulation par Gardénia consiste en un bilan hydrologique bien détaillé et un graphique des débits observés et débits simulés ensemble.

##### 4.1.1.1. Application du modèle Gardénia pour un pas de temps annuel

Après plusieurs tentatives de calage, on a pu obtenir les résultats dressés sur le tableau IV.1:

Tableau IV.1: Résultats du calage au pas de temps annuel.

Correction globale des pluies (%)	-10
Correction globale de l'ETP (%)	15
Capacité du réservoir sol (réserve utile) (mm)	44,417
Capacité du réservoir sol progressif (mm)	0,00
Hauteur de répartition ruissellement-percolation (mm)	9998,9
Temps ½ percolation vers la nappe (mois)	0,658
Temps ½ tarissement du débit souterrain (mois)	0,654
Temps de réaction (retard du débit) (pas de temps)	0,621
Facteur d'échange souterrain externe (%)	35,62
Déficit initial du réservoir sol (réserve utile) (mm)	0,408
Déficit initial du réservoir sol progressif (mm)	0,00
Seuil de ruissellement par débordement (mm)	234,05
Temps de ½ ruissellement par débordement (pas de temps)	9999
Temps ½ décroissant maximal du ruissellement (mois)	400
Facteur de correction de la superficie du bassin (-)	0,098

Les critères de qualité et d'optimisation pris en compte pour l'évaluation de notre modèle sont le critère de Nash et le coefficient de corrélation (R). Ils sont représentés dans le tableau IV.2 :

Tableau IV.2: Critères de qualité et d'optimisation.

Critère	Nash (%)	R (%)
Calibration	81,2	90,1
Validation	65,95	80,6

Le calage et la validation sont représentés graphiquement par les figures IV.1 et IV.2:

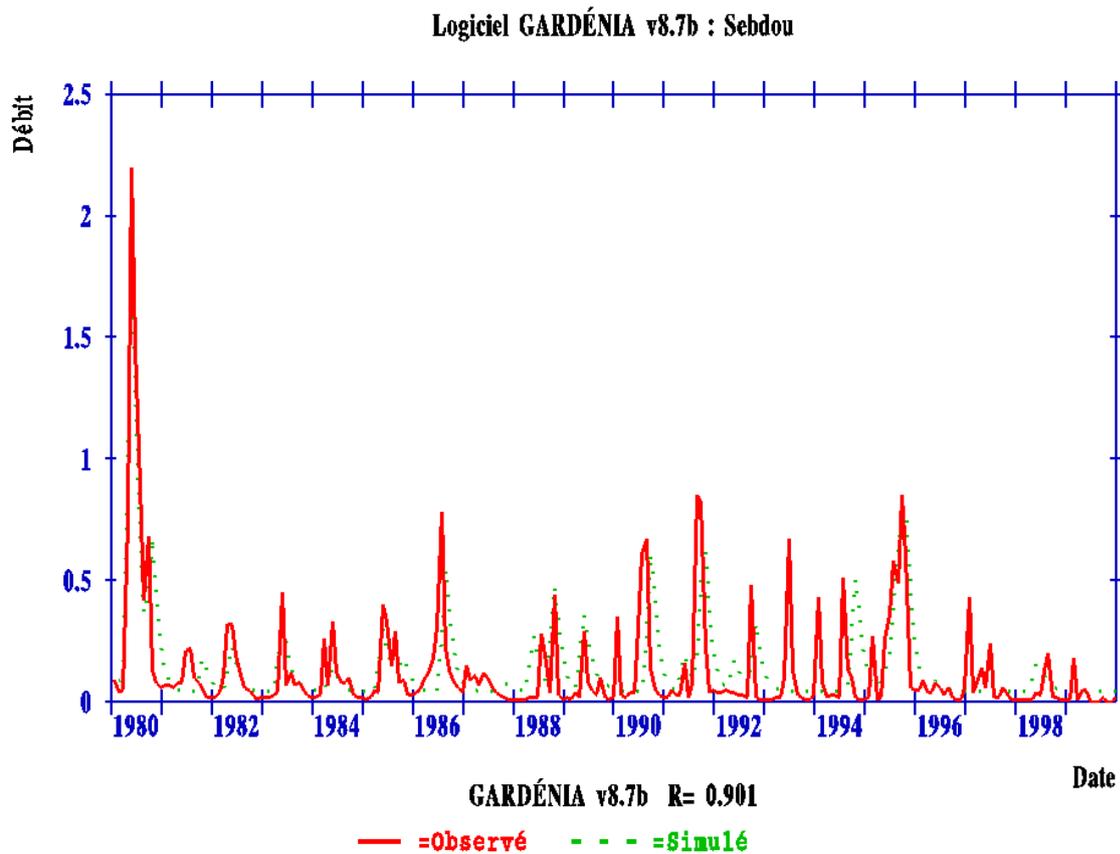


Figure IV.1: Visualisation des résultats en phase de calage (1980/1981-1999/2000).

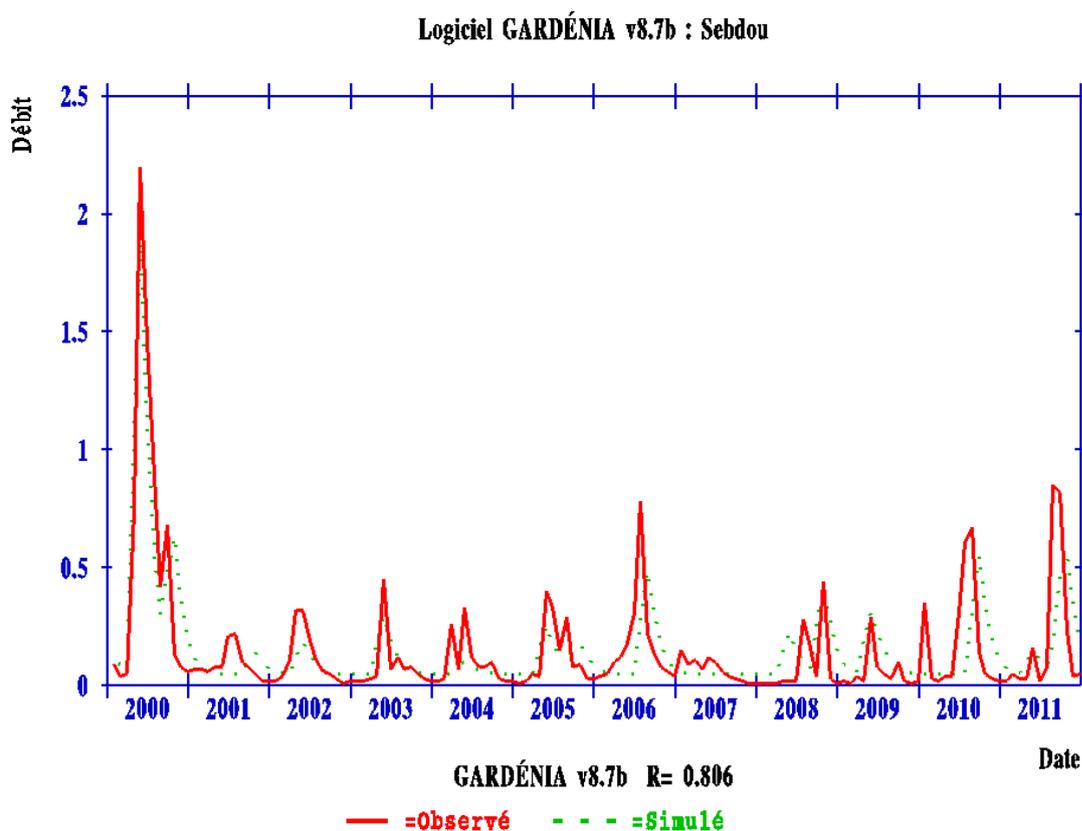


Figure IV.2: Visualisation des résultats en phase de validation (2000/2001-2011/2012).

L'analyse des critères de qualité et d'optimisation ainsi que la superposition des courbes des débits observés et simulés montrent que le modèle est assez bien calé et montre une certaine performance en phase de calage et de validation.

#### 4.1.2. Corrélation entre débit simulé et débit observé

A travers cette corrélation, nous allons pouvoir analyser le degré de fiabilité du calage et de la validation avec le modèle Gardénia (fig. IV.3 et IV.4).

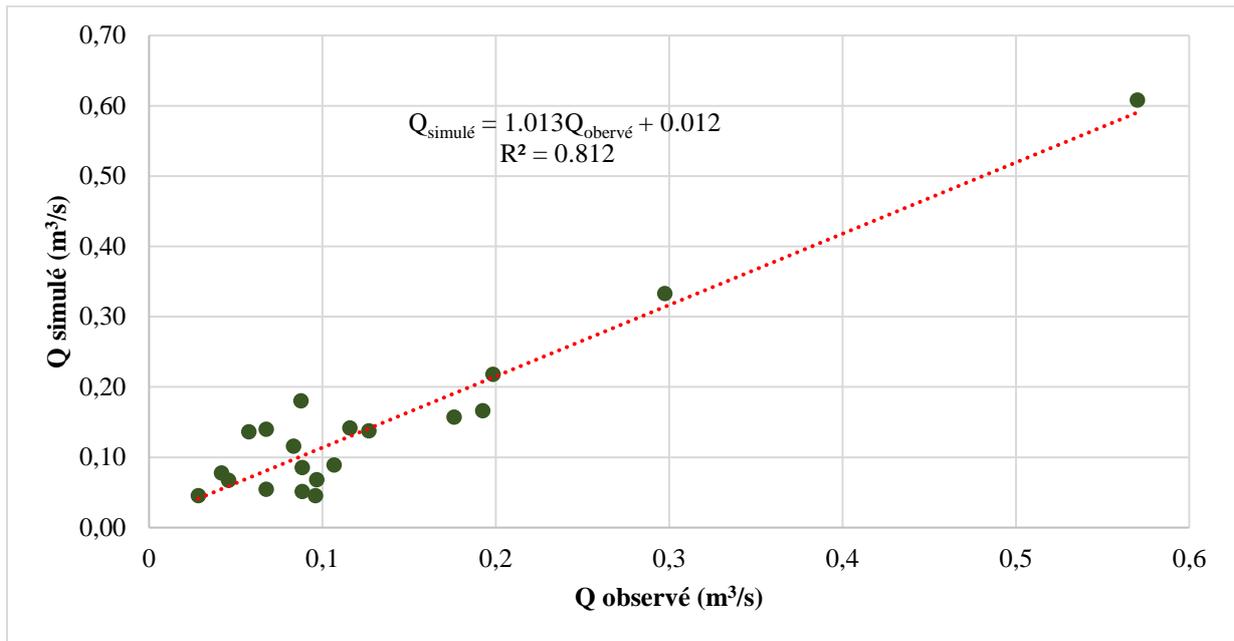


Figure IV.3: Corrélation entre débit simulé et observé (phase de calage) (1980/1981-1999/2000).

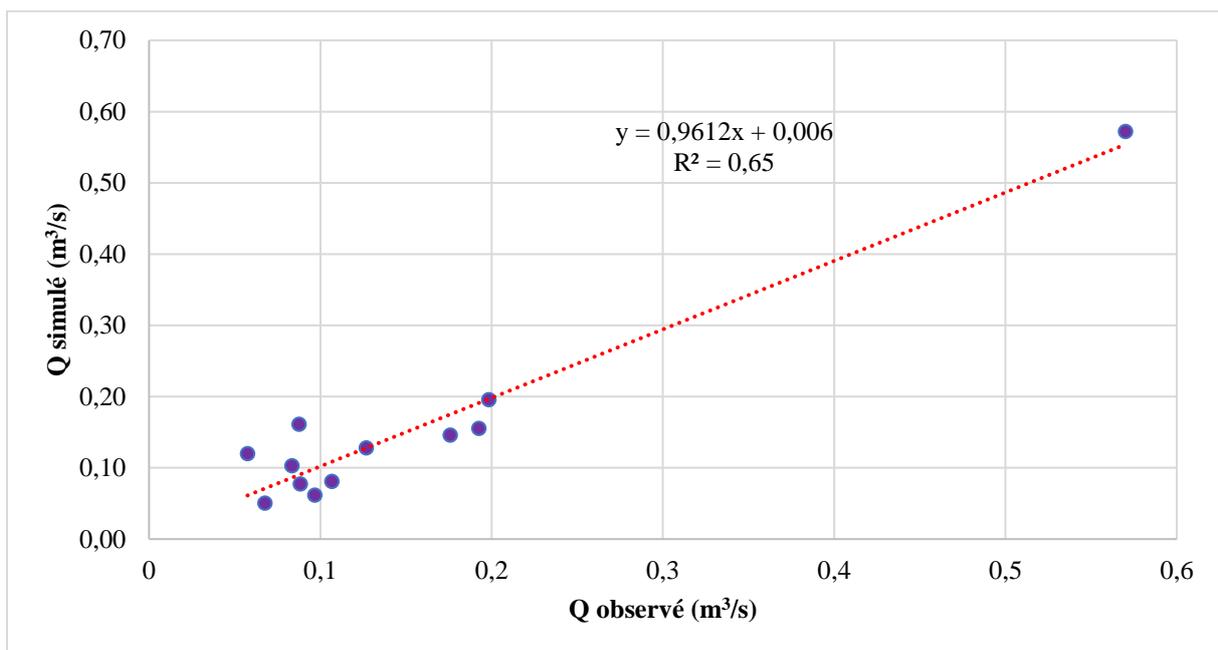


Figure IV.4: Corrélation entre débit simulé et observé (phase de validation) (2000/2001-2011/2012).

Nous remarquons une bonne corrélation concernant le calage avec un,  $R=0,901$  ainsi qu'une assez bonne corrélation dans la validation avec un  $R= 0,806$ .

Les paramètres du modèle Gardénia à pas de temps annuel caractéristiques du bassin versant d'oued Sebdou ont été déterminés. Leur optimisation a été obtenue pour des valeurs plus élevées des critères de qualité. La phase de validation a donné de bons résultats confirmant ainsi le bon calage du modèle sur le bassin versant d'oued Sebdou.

## 4.2. Application du modèle GR1A

Dans le but de juger la performance de notre modèle, nous avons pensé à le comparer avec un autre modèle hydrologique ayant été employé sur le bassin de la Tafna et ayant prouvé sa robustesse.

Le modèle pluie-débit GR1A est un modèle global à un seul paramètre (un paramètre annuel). Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1990, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications d'évaluation et de gestion de la ressource en eau (Perrin, 2007).

### 4.2.1. Calage du modèle GR1A

Pour une série d'étude de 32ans (20ans pour faire le calage, et le reste pour la validation), qui commence de l'année hydrologique 1980/1981 jusqu'à 2011/2012, le calage se fait manuellement en changeant à chaque fois le paramètre X (coefficient de correction de l'ETP) dans un intervalle [0,13-0,35]. Les résultats du calage sont mentionnés dans le tableau IV.3 :

Tableau IV.3 : Résultats de la calibration obtenus par le GR1A.

X	Nash (Q)	Bilan (%)	R <sup>2</sup> (%)
0,16	83,0	86,5	94,6

On observe que les courbes des débits simulés et les débits observés sont superposées d'une manière assez satisfaisante (fig.IV.5), par conséquent nous avons un bon calage du modèle que nous pourrions vérifier à partir de la corrélation débit simulé et débit observé (fig.IV.6).

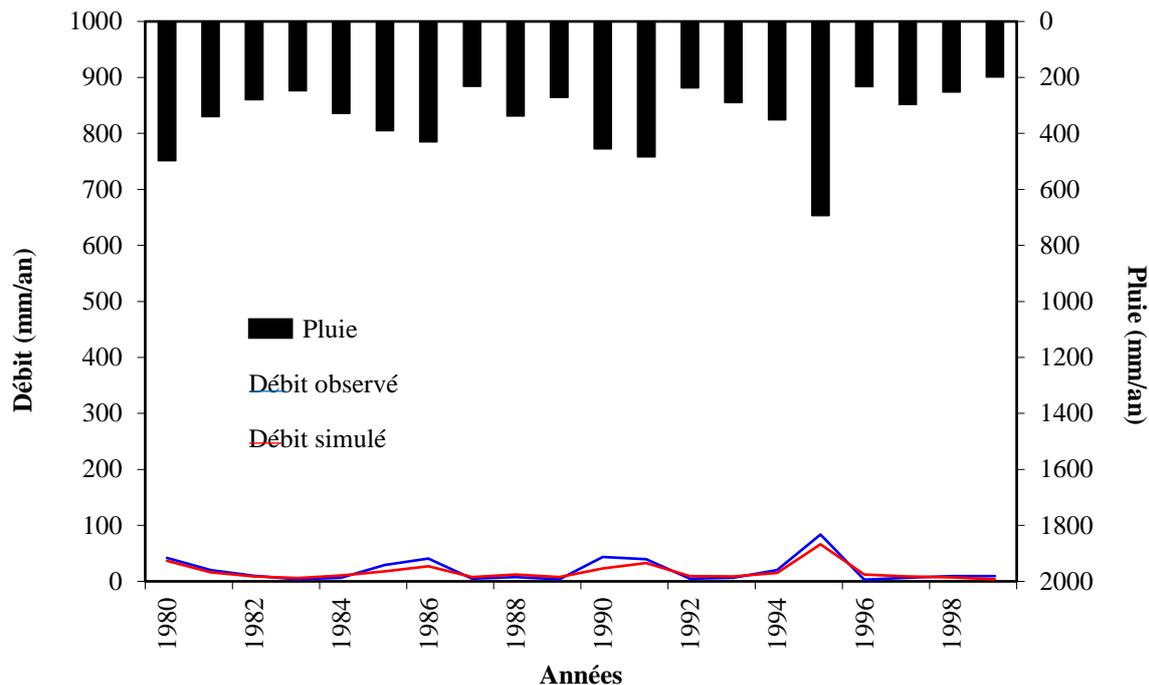


Figure IV.5: Calage du modèle GR1A.

La figure ci-dessus illustre une très bonne corrélation avec un R supérieur à 0.8.

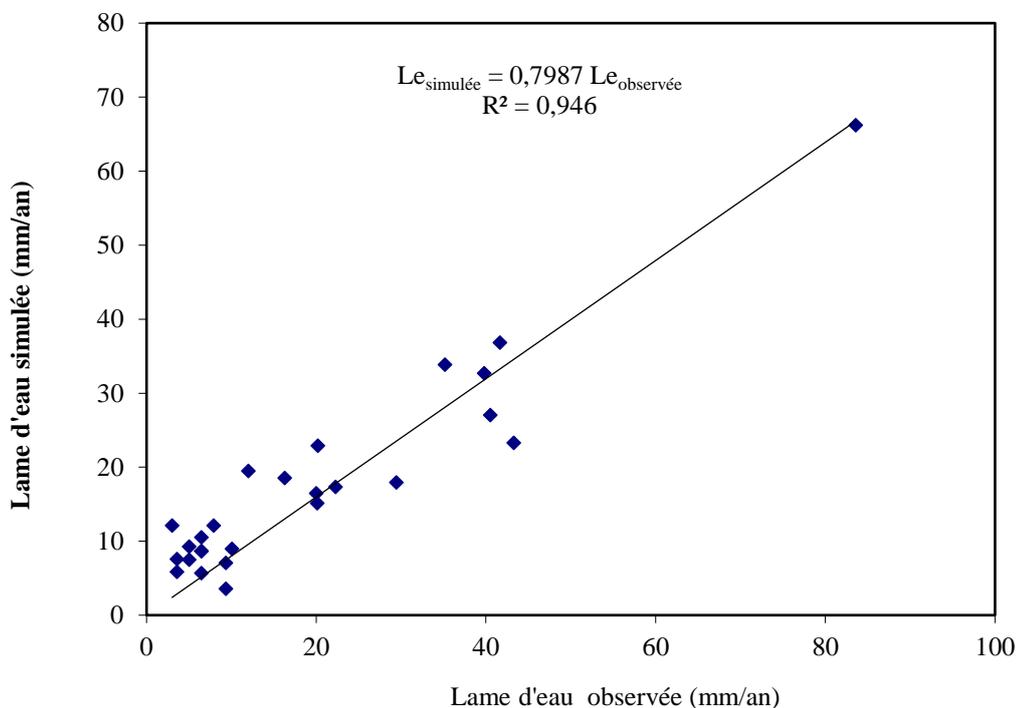


Figure IV.6: Corrélation entre débit simulé et observé (phase de calage).

Pour la validation, nous avons pris la même valeur du paramètre X obtenu pendant le calage et appliqué sur le reste des années non utilisées dans la calibration (2000/2001-2011/2012). Les résultats apparaissent sur le tableau IV.4

Tableau IV.4: Résultats de la validation obtenus par le GR1A.

X	Nash (Q)	Bilan (%)	R <sup>2</sup> (%)
0,16	84,0	107,3	91,2

Les résultats trouvés pour la validation confirment la performance du modèle GR1A avec un Nash et un coefficient de détermination élevés (tabl. IV.4, fig.IV.7 et fig.IV.8).

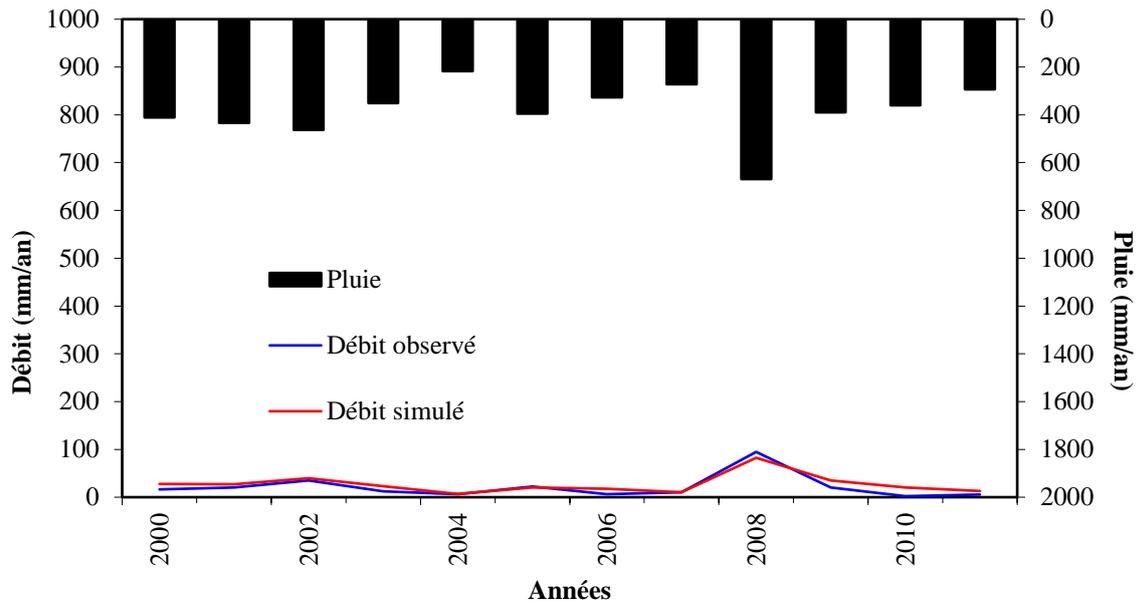


Figure IV.7: Visualisation de la validation du modèle GR1A.

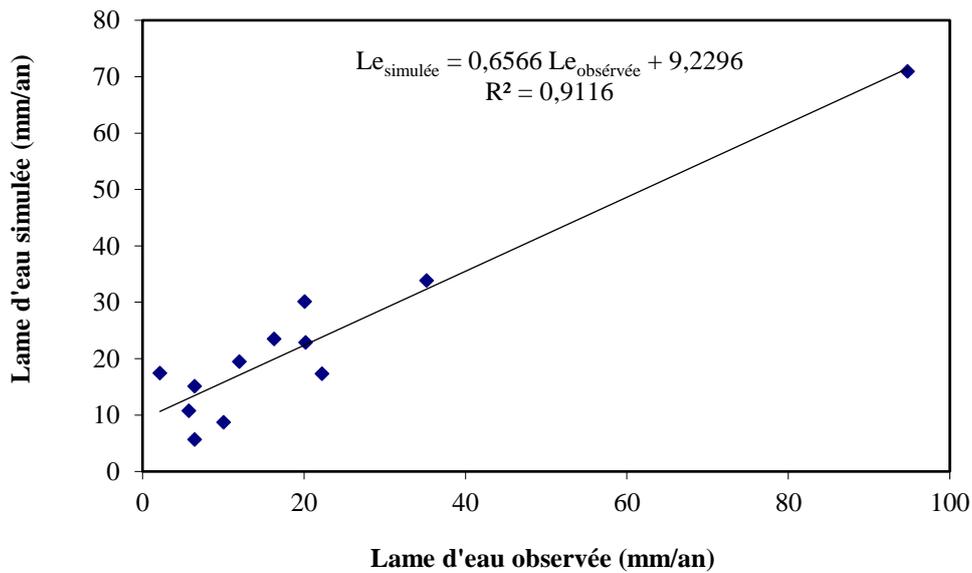


Figure IV.8: Corrélation entre débit simulé et observé (phase de validation).

### 4.3. Comparaison des performances des modèles Gardénia et GR1A

Nous avons pu déterminer les paramètres hydrologiques et physiques ainsi que les critères de qualité et d'optimisation suite à l'utilisation des modèles Gardénia et GR au pas de temps annuel (tabl. IV.5). En effet, ce sont ces critères qui nous permettront de déterminer le meilleur modèle appliqué pour le bassin versant d'oued Sebdo.

Tableau IV.5 : Résultats de modélisation par les modèles Gardénia et GR1A.

Modèle	Calage		Validation	
	Nash (%)	R (%)	Nash (%)	R (%)
<b>Gardénia</b>	81,2	90,1	65,95	80,6
<b>GR1A</b>	83,0	97,3	84,0	95,5

Delà, on peut dire que la modélisation hydrologique exécutée avec ces deux modèles (GR1A et Gardénia) n'est pas mal du tout, en revanche le modèle GR1A reste le meilleur dans l'application sur le bassin versant de l'oued Sebdo qui se trouve dans une région à climat semi-aride.

### 4.4. Résultats du bilan hydrologique du modèle Gardénia

Afin de faire l'étude du bilan hydrologique, nous sommes contraint d'analyser la recharge et la pluie efficace de l'oued Sebdo ainsi que les différentes relations qui existent entre les différents termes du bilan (pluie, pluie efficace, recharge et débits).

#### 4.4.1. Pluie efficace

La pluie efficace, est la fraction de la pluie restant après l'action de l'évapotranspiration dans le réservoir sol. Elle est enregistrée automatiquement lors du calage et de la validation dans un fichier du nom « gardpef.out » qui contient les valeurs de la pluie efficace.

Les résultats sont dressés dans les figures IV.9 et IV.10.

Le graphe de la figure IV.9, illustre la variation de la pluie efficace exprimée en mm pour la période de calage (de 1980/1981 à 1999/2000). La moyenne trouvée est de 45,8mm, la valeur maximale est de 156,8mm elle est enregistrée durant l'année 1995/1996, elle correspond à l'année où a été enregistré la pluie maximale. Par contre on prélève trois valeurs nulles pour les années 1993/1994, 1997/1998, et 1999/2000 elles correspondent aux années de sécheresse. On relève aussi 7 années excédentaires ce qui représente exactement le tiers de cette série de calibrage.

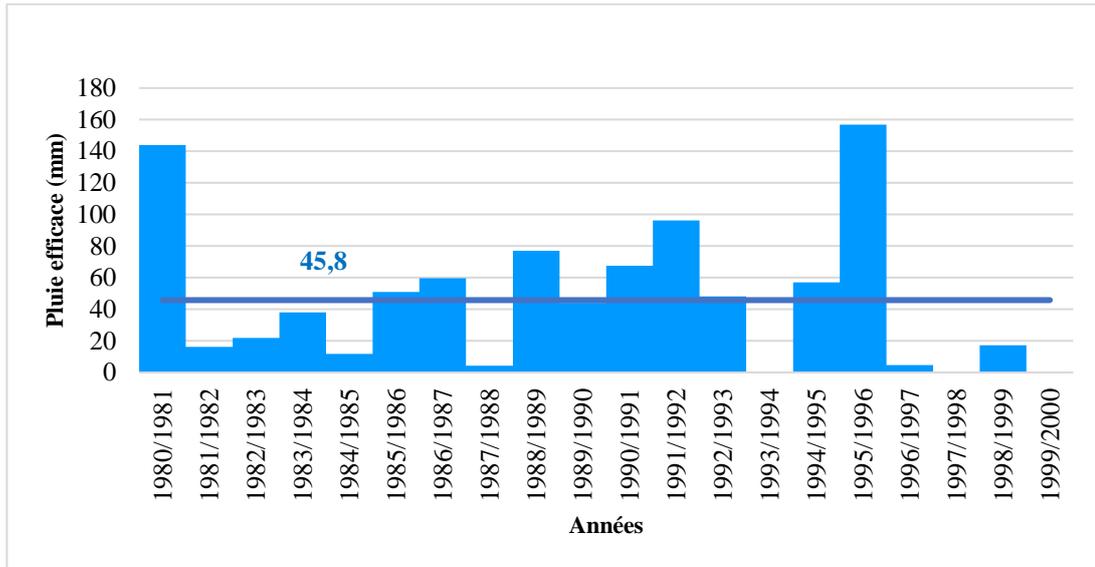


Figure IV.9 : Variation de la pluie efficace annuelle pour la période de calage (1980/1981-1999/2000).

Le graphe de la figure IV.10, illustre la variation de la pluie efficace exprimée en mm pour la période de validation (de 2000/2001 à 2011/2012). La moyenne trouvée est de 42,8mm, elle a diminué à cause de la sècheresse qu'a connue la région dans les années 2000. On prélève une valeur nulle pour l'année 2007/2008.

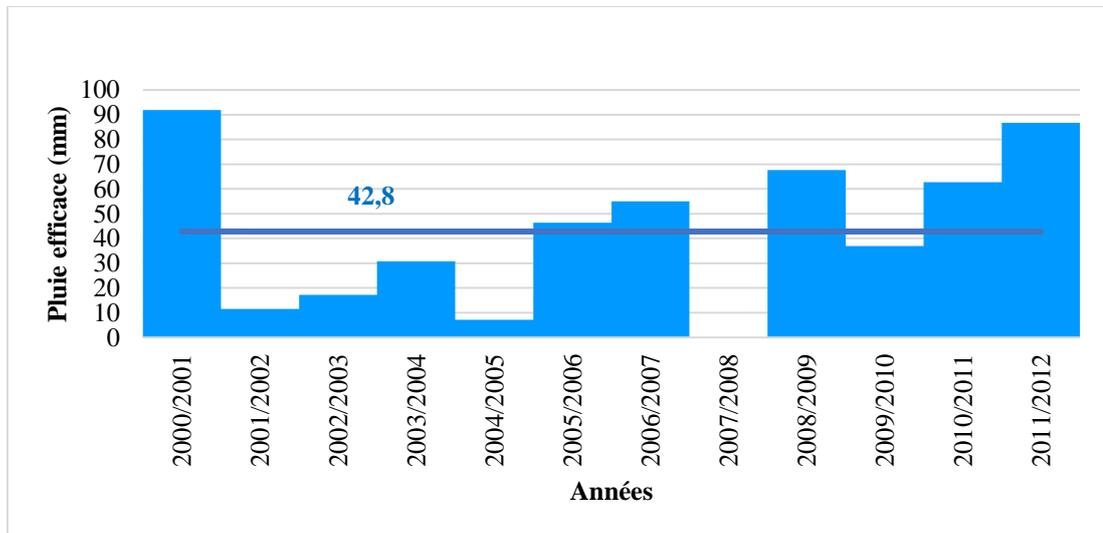


Figure IV.10 : Variation de la pluie efficace annuelle pour la période de validation (2000/2001-2011/2012).

#### 4.4.2. Recharge

La recharge est le processus qui permet le renouvellement de l'eau souterraine. Elle correspond à la quantité d'eau qui alimente l'aquifère depuis l'infiltration des précipitations à la surface. À l'échelle régionale, il est nécessaire de déterminer les zones de recharge importantes pour mieux les protéger. Elle est enregistrée automatiquement lors du calage et de la validation dans un fichier du nom « gardrech.out » qui contient les valeurs de la recharge.

Les résultats sont illustrés sur les figures IV.11 et IV.12.

La moyenne de la recharge de la nappe d'oued Sebdo est de 78,1mm pour la période interannuelle en phase de calage (fig IV.11) et de 72,1mm en phase de validation (fig IV.12).

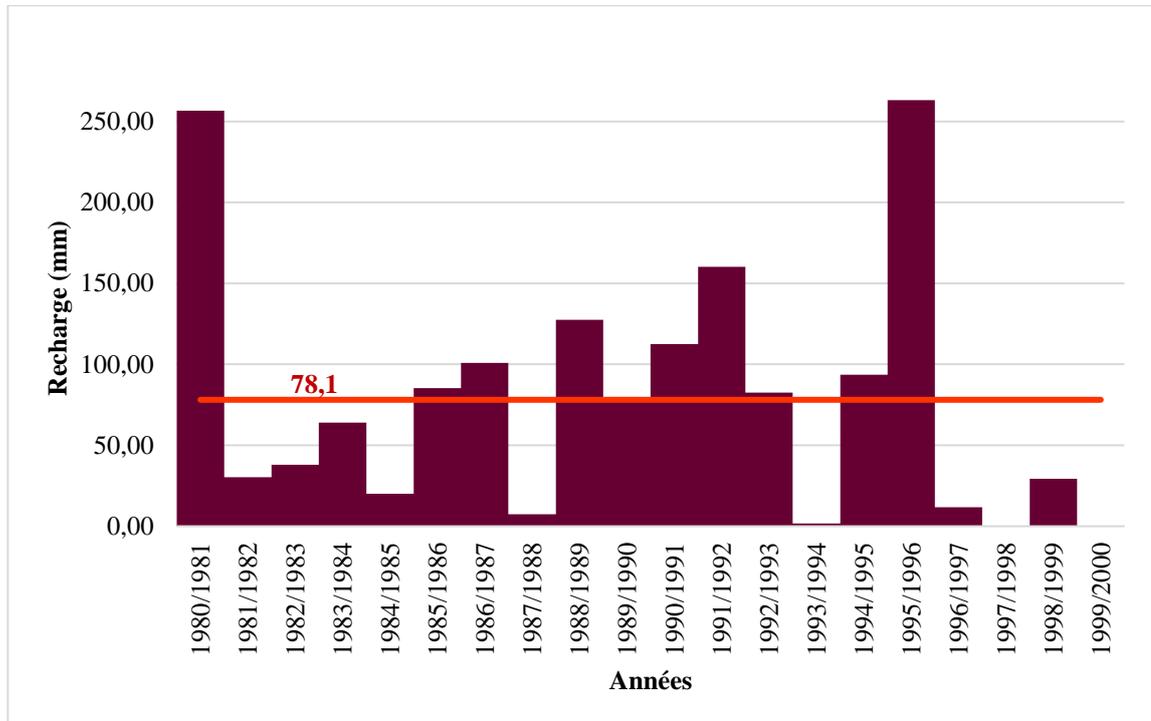


Figure IV.11 : Variation de la recharge annuelle pour la phase de calage (1980/1981-1999/2000).

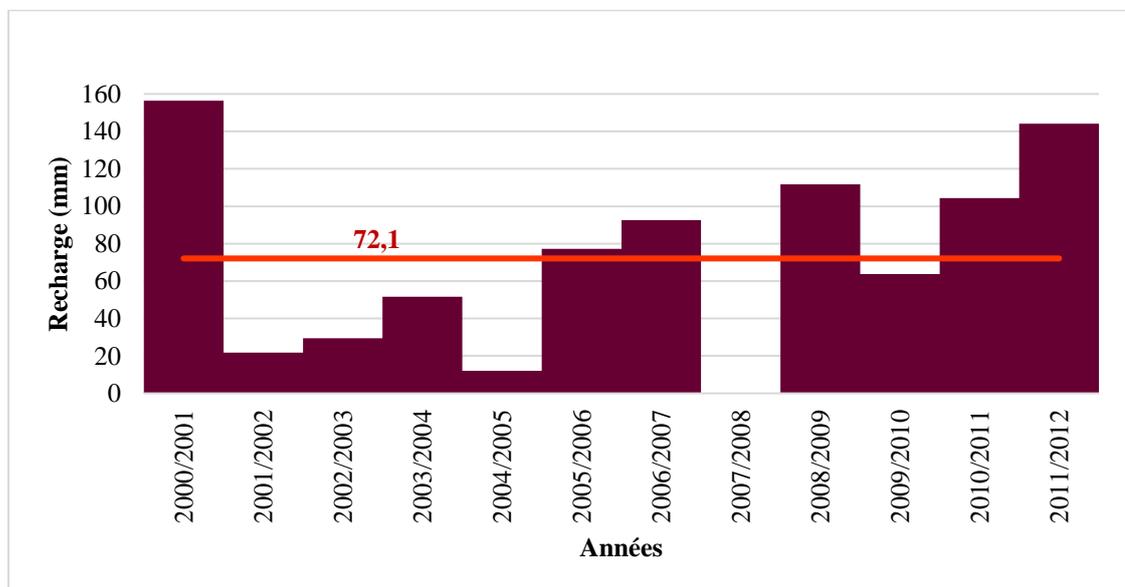


Figure IV.12 : Variation de la recharge annuelle pour la phase de validation (2000/2001-2011/2012).

Les graphes de la pluie efficace et ceux de la recharge se ressemblent par allure, en revanche la moyenne de la recharge est supérieure à celle de la pluie efficace. Par conséquent la nappe du bassin versant tient ses eaux des précipitations principalement et du déversement souterrain des formations carbonatées voisines.

**4.4.3. Corrélation entre Pluie, Débit, Pluie efficace et Recharge**

La figure IV.13 révèle une certaine concordance entre la pluie, la recharge, et la pluie efficace, et donc, là où les précipitations sont fortes, la recharge est optimale. Néanmoins, il existe des phénomènes externes qui influencent la corrélation tel que la nature karstique fissurée de la nappe.

Les années 1993/1994, 1997/1998, 1999/2000, et 2007/2008 enregistre une pluie efficace nulle, et l'année 1997/1998 enregistre une valeur de recharge nulle.

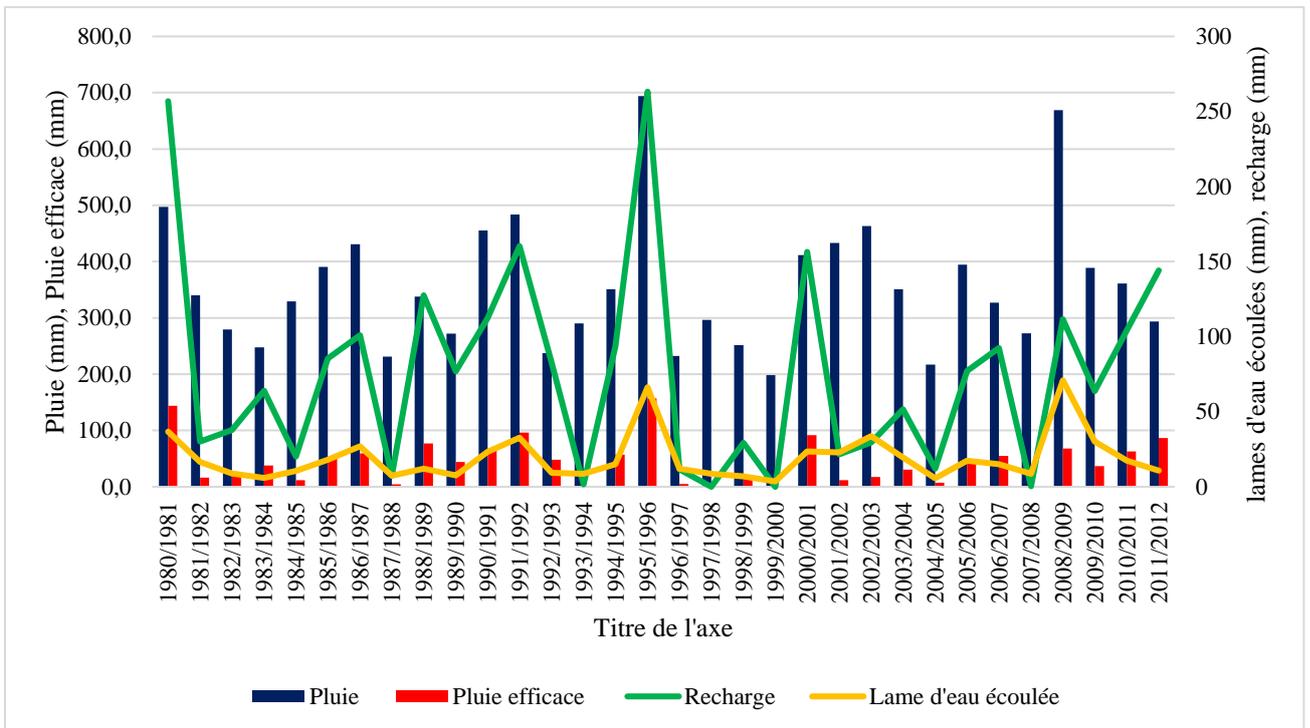


Figure IV.13 : Corrélation entre pluie, débit, pluie efficace et recharge d'oued Sebdo (1980/1981 - 2011/2012).

#### **4.5. Conclusion**

Dans ce dernier chapitre, nous avons testé la performance du modèle Gardénia (établi par D. Thiery en 1982) en l'appliquant sur le bassin versant d'oued Sebdou et nous avons pu percevoir son comportement hydrologique grâce à la relation pluie-débit durant une période de 32ans (1980/81-2011/12).

On a eu le privilège de comparer les résultats du modèle Gardénia aux résultats du modèle GR1A afin d'apporter une analyse sur l'adaptation de ces deux derniers. Alors les deux modèles ont prouvé leur performance soulignée par une bonne représentation graphique, un coefficient de Nash (%), et un coefficient de corrélation appréciables.

On a eu l'avantage avec le logiciel Gardénia d'établir un bilan hydrologique qui démontre la performance du modèle en quantifiant les composants hydrologiques tels que la pluie efficace, la recharge, l'évapotranspiration, la pluie et le stock des réservoirs et débits simulés.

Nous concluons que le GR1A a un meilleur rendement sur le bassin versant d'oued Sebdou relativement par rapport à Gardénia. Nous avons en effet, obtenu un bon calage et une bonne validation pour le GR et un bon calage et une validation de moindre qualité pour Gardénia tout en gardant à l'esprit que nous avons testé les deux modèles sur les mêmes périodes.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail était l'application du modèle global à réservoirs « Gardénia » afin d'effectuer une approche pluie-débit sur le bassin versant de l'oued Sebdou, un oued dérivé de la Tafna qui se situe dans le Nord-ouest de l'Algérie.

Oued Sebdou qui se distingue par son climat continental de type semi-aride à hiver tempéré et une superficie de 439,3km<sup>2</sup>, se trouve dans la commune de Sebdou, Tlemcen (Nord-ouest Algérien). Ce bassin versant qui est considéré comme très étiré à tendance amiboïde est dans un état de jeunesse allant vers l'équilibre avec un potentiel érosif assez important.

Sur la série de données prise pour cette étude (1979/80-2019/20), nous enregistrons une moyenne interannuelle des précipitations équivalente à 354,4mm, un coefficient d'immodération  $C= 3,51$ , permettant de caractériser la région par le type méditerranéen. La température moyenne est de 17,9°C et le module interannuel est évalué à 0,29 m<sup>3</sup>/s.

La période humide s'étend généralement du mois de Novembre jusqu'au mois de Mai. Le climat est semi-aride avec un écoulement temporaire et des formations herbacées.

L'ajustement des précipitations moyennes suit une loi normale et une loi log normale tandis que l'ajustement des lames d'eau écoulées moyennes suit une loi log normale.

Le travail est basé sur l'évolution des débits simulés par le modèle Gardénia et de les comparer avec ceux obtenus par le modèle du Génie Rural GR, qui a déjà fait l'objet de nombreux travaux au niveau de la Méditerranée, plus particulièrement au niveau de la Tafna.

Le logiciel Gardénia fournit un bilan hydrologique qui démontre la performance du modèle en quantifiant les composants hydrologiques tels que la pluie efficace, la recharge, l'évapotranspiration, la pluie et le stock des réservoirs et débits simulés.

L'application d'un modèle pluie-débit à pas de temps annuel sur le bassin versant d'oued Sebdou donne des résultats assez convaincants : le GR1A donne une bonne calibration et une bonne validation alors que le Gardénia donne un bon calage et une validation moyenne. En revanche la corrélation entre les débits observés et les débits simulés est fort satisfaisante.

Il serait souhaitable dans le futur, d'améliorer les résultats de cette étude en utilisant des pas de temps plus fins (mensuel et journalier) et en testant des modèles spatialisés, plus robustes vue la diversité des types de sol, des classes d'occupation des sols et de la topographie.

## Références bibliographiques

**AMBROISE B.** (1991) Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré, processus et modèles. Séminaire du Conseil Scientifique du département « Science du sol » de l'Institut National de Recherches Agronomiques de Dijon.

**AMBROISE B.** (1998) La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant -Processus, Facteurs, Modèles. \*H\*G\*A\* (Ed.), Bucarest.

**AMIAR S.** (2021). Modélisation hydrologique pluie – débit et l'impact du changement climatique sur le cycle de l'eau. Cas Oued Cheliff. Bassin versant du Haut et Moyen Cheliff. Thèse de Doctorat. Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen. 244p.

**AZIZ H.** (2014) Application de quelques traitements statistiques aux données hydro-chimiques de la nappe alluviale du fossé de Sebdu (Nord-ouest de l'Algérie). Mémoire de Master, université de Tlemcen, département des sciences de la terre et de l'univers.

**BABA HAMED K. KERZABI R.** (1991) Contribution à l'Etude hydrogéologique de la Haute Tafna en amont du barrage Béni Bahdel (Monts de Tlemcen). Mémoire d'ingénieur d'Etat, Université d'Oran, département des Sciences de la Terre. 285p.

**BARKE K.** (2017). Caractérisation morphologique des cuvettes oasiennes du Centre-Est du Niger. Revue Physio-Géo n°11.[doi.org/10.4000/physio-geo.5607](https://doi.org/10.4000/physio-geo.5607). 255-276pp.

**BENDJEMA L.** (2020). Contribution de la modélisation hydrologique a l'évaluation de l'impact de la variabilité climatique sur la ressource en eau. Cas du bassin versant d'oued Mellah (NE algérien). Thèse de Doctorat. Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen. 215p.

**BOUAOUNE D. DAHMANI-MEGREROUCH M.** (2010) Reconstitution de données climatiques pour l'Algérie du Nord : application des réseaux neuronaux. Laboratoire écologie et environnement, faculté des sciences biologiques, université des sciences et technologie, Alger, Algérie.

**BOUANANI A.** (2004) hydrologie, transport solide et modélisation, étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie). Mémoire de doctorat, Université de Tlemcen, département des sciences de la terre et de l'univers.

**BOUGARA H. BABA HAMED K. BORGEIMESTER C. TISHBEIN B. KUMAR N.** (2020). Analyzing Trend and Variability of Rainfall in the Tafna Basin (Northwestern Algeria). Atmosphere 2020, 11, 347; [doi:10.3390/atmos11040347](https://doi.org/10.3390/atmos11040347). 24p.

**BOUGARA H. BABA HAMED K. BORGEIMESTER C. TISHBEIN B. KUMAR N.** (2021). Comparative Assessment of Meteorological drought in the Tafna Basin (Northwestern Algeria). Journal of Water and Land Development. (JWLD-00804-2020). 21p.

**BWIRA J-P.** (2016) Modélisation hydrologique conceptuelle GR : Cas du bassin versant de Nsimi au Cameroun. Rapport de stage effectué au Laboratoire Géosciences Environnement Toulouse, Université Paul Sabatier Master Eau, Sol, Environnement.

**CHIKH M.** (2011) Modélisation hydrologique par l'approche connexionniste : Cas du bassin de l'Oued Sebdu (Tafna-Nord-Ouest Algérien). Mémoire de Magister, Université de Tlemcen.

- DJELLOULI F. (2017).** Persistance de la variabilité climatique et occurrence de la sécheresse : La modélisation « Pluie-Débit » outil d'identification. Application à un bassin versant d'oued El Hammam. (Nord-ouest algérien). Thèse de Doctorat. Université Abou BekrBelkaid - Tlemcen. 185p.
- GHENIM A. (2010)** Fluctuations hydro-pluviométrique du bassin versant de l'oued Tafna à Béni-Bahdel (Nord-Ouest algérien). Sécheresse.
- GHENIM A. TERFOUS A. SEDINI A. (2007)** Etude du transport solide en suspension dans les régions semi-arides méditerranéennes : cas du bassin versant de l'oued Sebdou (Nord-Ouest algérien). Sécheresse, 18 (1) 39-44.
- GHENIM A. MEGNOUNIF A. (2013).** Ampleur de la sécheresse dans le bassin d'alimentation du barrage Meffrouche (Nord-Ouest de l'Algérie). Géographie Physique et Environnement. Vol. 7. p. 35-49. DOI 10.4000/physio-geo.3173.
- GHERISSI R. (2018)** Modélisation hydrologique d'un bassin versant en climat méditerranéen par l'approche conceptuelle globale. Cas de l'Oued Lakhdar (ex : Chouly) (Tafna Nord-ouest algérien). Thèse de Doctorat. Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen. 212 p.
- GNOUMA R. (2006)** Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : Application au bassin versant de l'Yzeron. LGCIE INSA Lyon.
- ILES S.N. (2019)** Application du modèle hydrologique GARDENIA. Cas du bassin versant de l'oued Boukiou (NW algérien). Mémoire de Master, Université de Tlemcen, département d'hydraulique.
- KINGUMBI A. (2006)** Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation : cas du Merguellil en Tunisie centrale. Thèse de Doctorat, Université de Tunis El Manar, Génie hydraulique.
- KAUARK LEITE L-A (1990)** Réflexions sur l'utilité des modèles mathématiques dans la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole. Marne la vallée, ENPC.
- KOUKI S. (2010)** Apprentissage multi-objectifs de réseaux de neurones pour la prévision des crues. Mémoire de master, université Pierre et Marie curie, école des mines de paris, école nationale du génie rural des eaux et des forêts, sciences de l'univers, environnement, écologies, parcours hydrologie-hydrogéologie.
- LOUMAGNE C. (1991)** Etat hydrique du sol et prévision des débits. Journal of Hydrology, 1 (23). Pp 1-17.
- MARSILY et AMBROISE B. (1998)** La Dynamique du Cycle de l'Eau dans un Bassin Versant : Processus, Facteurs, Modèles. Programme TEMPUS S-JEP 09781/95 (coord. : R. Drobot, J.R Carbonnel), HGA, Bucarest (RO).
- MEGNOUNIF A. (2004)** Rôle des crues dans la production des sédiments transportés en suspension dans un cours d'eau des bassins versants méditerranéen. VIII journée nationales Génie civil.

**MEGNOUNIF A. TERFOUS A. BOUANANI A.** (2003) Production et transport des matières solides en suspension dans le bassin versant de la Haute-Tafna (Nord-Ouest Algérien). Revue des sciences de l'eau.

**MICHEL C.** (1983) - Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un Seul paramètre ? La Houille Blanche (1), 39-44.

**OBERLIN G., HUBERT P.** (1999) Refondation du concept de régime hydrologique. CNFGG Rapport quadriennal, XXIIe Assemblée Générale de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale, Birmingham, Angleterre.

**OTMANE A. (2019).** Impacts de la variabilité climatique sur l'hydrologie et la gestion des ressources en eau du bassin versant de l'oued Mekerra. (Nord-ouest algérien). Thèse de Doctorat. Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen. 254 p.

**UDIN L.** (2006) Une formule simple d'évapotranspiration potentielle pour la modélisation pluie-débit à l'échelle du bassin versant, Université Pierre-et-Marie Curie, Revue internationale de l'eau, La Houille Blanche.

**OUCI F.** (2018) Etude de la performance du modèle hydrologique HBV appliqué au bassin versant d'oued Sebdou (Tafna, Algérie). Mémoire de Master, Université de Tlemcen.

**PERRIN C.** (2000) Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble.

**PERRIN C.** (2003) Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology 279(1-4), 275-289.

**PERRIN C. MICHEL C. ANDREASSIAN V.** (2007) Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR). CEMAGREF.

**REMENIERAS G.** (1986) L'hydrologie de l'ingénieur, 2ème édition, Eyrolles, Paris.

**ROCHE M.** (1963) Hydrologie de surface, Gauthier-Villars ORSTOM, Paris.

**SINGH V.P.** (1995) Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resource Publications, Colorado.

**SURFRIDER FOUNDATION** (2010) Développement durable et protection de l'environnement, depuis 1958, Agadir (Maroc).

**TERFOUS A. MEGNOUNIF A. BOUANANI A.** (2001) Etude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord-Ouest Algérien). Revue des sciences de l'eau.

**THIERY D.** (2011) Plaquette de présentation du code de calcul du BRGM GARDENIA v8.1, Géosciences pour une terre durable (BRGM).

**THIERY D.** (2014) Analyse comparative des modèles hydrologiques pour la simulation et la prévision des étiages sur les bassins versants français. Revue hydrologie et sciences du système terrestre.

**YERIMA B.** (2002) Méthodologie d'évaluation quantitative des ressources en eau dans un bassin versant de la Medjerda, Mémoire de diplôme d'études approfondies à l'institut national agronomique de Tunisie.

**ZENASNI S.** (2013) Modélisation de la qualité des eaux d'oued Mouilah jusqu'au barrage Boughrara, application de HEC-RAS-, Mémoire de Magister, Université d'Oran Mohamed Boudiaf.