

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة ابي بكر بلقايد - تلمسان -  
Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie



معهد الري

Département d'Hydraulique

Mémoire de Magister

**DEBIT PLUVIAL ET EROSION SPECIFIQUE :  
QUANTIFICATION EN ABSENCE DE JAUGEAGES  
DANS UNE ZONE SUJETTE AUX INONDATIONS**

**W. TIPASA**

Présenté Par :  
**TOUAIBIA IMANE**

**Devant les membres de jury:**

Mr HABI Mohamed	Professeur	Président de Jury
Mr BOUANANI Abderrezak	Professeur	Examineur
Mr MEGNOUNIF Abdesselam	M.C.A	Examineur
Mr GHENIM Abderrahmane Nekkache	M.C.A	Encadreur
Mr SEDDINI Abdelali	Professeur	Invité

## Remerciements

Au terme de ce travail, il m'est agréable d'exprimer mes sincères remerciements à mon encadreur Mr Ghenim Abderrahmane Nekkache, maître de conférences A à l'université de Tlemcen

Je tiens à remercier Professeur Habi Mohammed, enseignant à l'université de Tlemcen, d'avoir accepté de présider mon jury de soutenance.

Je tiens également à remercier Professeur Bouanani Abderrezak, enseignant à l'université de Tlemcen, pour le temps consacré à l'évaluation du présent document.

Je remercie également Monsieur Megnounif Abdesselam, Maître de conférences A, à l'université de Tlemcen d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Je remercie également Professeur Seddini Abdelali à l'université de Tlemcen, d'avoir accepté de faire partie du jury.

Mes sincères remerciements et ma profonde gratitude vont au Professeur Touaibia Benina, enseignante à l'École Nationale Supérieure d'Hydraulique (ENSH, Blida), pour ses encouragements et ses précieux conseils qui m'ont aidé à finaliser ce document.

Tous mes sincères remerciements vont également à Monsieur et Madame Boukli Hacène, pour leur hospitalité, leur soutien et leur aide durant toute la période de mes études.

Mes remerciements vont également à mes enseignants de Post Graduation de l'université de Tlemcen.

Que tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, trouvent l'expression de mes remerciements.

Je remercie mes chers parents pour leurs encouragements, ainsi que toute ma famille et mes ami(e)s.

Ainsi je ne saurais oublier la période vécue à Tlemcen, ville chaleureuse que j'ai découvert grâce à ce Magister.

IMANE TOUAIBIA

## RESUME

L'Algérie a connu ces dernières années plusieurs catastrophes liées aux inondations ayant touché plusieurs villes du Nord comme du Sud. La cause de ces catastrophes est la sous-estimation des débits pluviaux, lors du dimensionnement des ouvrages d'évacuation qui, en milieu urbain, se trouve confronté au manque de données quant à la mesure aussi bien des averses que des débits qui en découlent. Un autre phénomène se greffe lors de ses événements, il s'agit du transport des sédiments causés par l'érosion hydrique en amont des villes, suite au martellement des eaux de pluies. Compte tenu de ces deux aspects, la ville de Sidi Rached est prise comme champ expérimental vu sa vulnérabilité aux inondations et les pertes en sols qui y sont engendrés en amont de la ville et les désagréments qui y surviennent sur la route nationale, limitrophe de la ville. De ce fait, cette étude a pour but de déterminer le débit pluvial probable et la quantité de sédiments pouvant être arrachée et déposée.

La quantification du débit pluvial, nécessite non seulement la détermination des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) mais aussi l'exposant climatique. La méthodologie adoptée a consisté en un dépouillement des 744 averses pour différentes durées d'agrégation variant de 15mn à 24h en se fixant un seuil de 5mm. Les quantiles générés ont été calculés pour un intervalle de confiance de 95% pour les périodes de retour de 2, 5, 10, 20, 50 et 100ans d'où l'exposant climatique est déduit. La modélisation pluie-débit des événements pluvieux extrêmes est établie pour différentes périodes de retour, 10, 50 et 100 ans. Parmi les modèles existant dans la littérature, trois sont retenus car ils ne nécessitent pas de calage : HEC-HMS, SCS Curve Number et l'hydrogramme synthétique. Ce dernier a été retenu, il répond aux conditions des sous bassins versants et donnent des résultats satisfaisants.

Pour la quantification de l'érosion spécifique, l'Équation Universelle des Pertes en Sol l'USLE originelle est appliquée où seul l'index d'érosivité R est calculé. Ce facteur ayant un poids très important dans l'équation, repose sur les intensités de la pluie déclenchant l'érosion. Il est calculé sur l'ensemble des averses observées afin d'estimer l'apport en sédiments pouvant être déposé durant la période d'observations. De même, une relation fonctionnelle s'est dégagée entre l'index d'érosion R et la précipitation annuelle  $P_{an}$  donnant des résultats satisfaisants.

**Mots clefs :** Débit pluvial, érosion spécifique, modèles, HEC-HMS, SCS Curve Number, hydrogramme synthétique, Sidi Rached, Tipasa.

## ABSTRACT

In recent years Algeria has experienced several disasters related to floods, indeed; this later has affected several cities in North and South. These disasters were caused by the underestimation of storm water flow. In the design of spillways, which is faced in urban environment with the lack of data on the extent of both showers (flood) and flow that resulted from. From the other hand, there is another phenomenon that is grafted in it during these events, it is the sediment discharge caused by water erosion in upstream cities, after the pounding rain water.

Taking into account these two aspects, the town of Sidi Rached is taken as an experimental field because of his vulnerability to floods and soil losses that are caused by upstream of the city as well as its inconvenience to occur on the highway, bordering the city. Therefore, this study aims to determine the storm water flow, and the probable amount of sediment that can be torn out and filed.

Quantification of storm water flow requires not only the identification of Curves Intensity-Duration-Frequency (IDF), but also climatic exhibitor. The methodology to be adopted consisted of an examination of the 744 showers (storms) for different durations of aggregation varying from 15mn to 24h by setting a threshold of 5mm. The generated quantities were calculated for confidence interval of 95% about partial duration of 2, 5, 10, 20, 50 and 100 years hence climatic exhibitor is deducted. The rainfall-runoff modeling of extreme rainfall events is established for different return periods, 10, 50 and 100 years. Among some models in the existing literature, three of them are selected because they do not require any calibration: HEC-HMS, SCS Curve Number and synthetic hydrograph. Thus, the latter was chosen; it meets the requirements of catchments areas and gives satisfactory results.

For the erosion quantify specific, universal soil loss equation USLE original is applied where only the rainfall erosion index R is calculated. This factor has a considerable weight in the equation, based on the intensity of rainfall triggering erosion. It is calculated on the total rainfall has been observed to estimate supply sediment that can be filed during the observation period. Similarly, a functional relationship emerged between rainfall erosion index R and Pan annual precipitation (annual rainfall) giving satisfactory results.

**Keywords:** Storm water flow, specific erosion, models, HEC-HMS, SCS Curve Number, synthetic hydrograph, Sidi Rached, Tipasa.

## ملخص

شهدت الجزائر في السنوات الأخيرة عدة كوارث متعلقة بالفيضانات اثرت على عدة مدن في الشمال و الجنوب راجع ذلك الى سوء التقدير لحجم مياه الأمطار المتدفقة عند حساب قنوات صرف المياه ذلك بسبب افتقار المعطيات الخاصة بحجم مياه الامطار و العواصف، في المناطق الحضرية. هناك ظاهرة أخرى تتعلق بنقل الرواسب الناجمة عن التعرية المائية للمدن. نظرا لهذا الانشغال فقد اهتمت بهذين الجانبين، حيث قامت بلدية سيدي راشد بجعله كحقل تجريبي يبين آثار تعرضها للفيضانات والخسائر التي تسببها للتربة أثناء سقوطها على الطريق الوطني و لذلك، فإن هذه الدراسة تهدف إلى تحديد كميات التدفق المحتملة للأمطار وكمية الرواسب التي يمكن ان تقتلع وتتحول إلى مكان آخر. التحديد الكمي لتدفق الأمطار، يتطلب ليس فقط تحديد منحنيات الشدة لمدة الترددات (IDF) ، لكننا نجد أيضا العارض المناخي.

إن المنهجية المعتمدة هي تحليل 744 عاصفة تختلف من حيث المدة وتتراوح من 15 دقيقة لمدة 24 ساعة مع تحديد عتبة 5 مم. تم حساب الفارق المتولد بين معطيين منتظمين والمقدر ب 95% من الأمن . بالنسبة لفترات العودة من 5، 2، 10، 20، 50 و 100 سنة من حيث المناخ يستخلص الأس. يتم تأسيس النمذجة هطول الأمطار والسيول من الأمطار الغزيرة لفترات مختلفة مقابل، 10، 50 و 100 سنة. من بين النماذج الحالية في الأدب، تختار ثلاثة منها لأنها لا تتطلب المعايير HEC-HMS: كيرف SCS ، منحني التدفق للتوليفة . وقد تم اختيار هذا الأخير، لأنه يفي بمتطلبات مستجمعات المياه الفرعية وتعطي نتائج مرضية. من أجل تقدير حجم التآكل النوعي ، يتم تطبيق معادلة فقدان التربة العالمي في USLE الأصلي حيث لا يوجد سوى مؤشر erosivity يتم احتساب R. هذا العامل له وزن كبير في المعادلة، استنادا إلى شدة المطر مما يؤثر سلبا ويزيد من التآكل. يتم حسابها من خلال مجموع الكميات المتدفقة الملاحظة بعد تقدير كمية الرواسب التي يمكن أن تطرح أثناء مدة الملاحظة. العلاقة الوظيفية التي تكون بين دليل التآكل والكمية المترسبة السنوية الذي يحقق لنا نتائج مرضية .

## كلمات ال بحث

حددة الاصطناعية المائي المندني، عدد SCS ، HEC-HMS ، تآكل نموذج، العاصفة تدفق  
ت. ي. بازة، راشد سيدي

# TABLE DES MATIÈRES

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I- Étude bibliographique</b> .....	5
1. Introduction.....	6
2. Précipitations.....	6
2.1. Différents types de précipitations.....	6
2.1.1. Précipitation par convection.....	7
2.1.2. Précipitation orographique.....	7
2.1.3. Précipitation cyclonique.....	7
2.2. Caractéristiques des événements pluvieux.....	8
3. Modélisation hydrologique.....	8
3.1. Objectifs de la modélisation.....	9
3.2. Classification des modèles hydrologiques.....	10
3.3. Caractérisation des modèles utilisés.....	11
3.3.1. Modèle HEC-HMS.....	12
3.3.2. Modèle du SCS-CN.....	14
3.3.3. Méthode de l'hydrogramme synthétique.....	17
4. Érosion.....	18
4.1. Définition.....	19
4.2. Différents types d'érosion.....	20
4.3. Formes d'érosion.....	20
4.3.1. Érosion en nappe.....	20
4.3.2. Érosion en rigole.....	20
4.3.3. Ravinement.....	20
4.3.4. Mouvement en masse.....	21
4.4. Érosion en nappe.....	21
4.4.1. Formes et symptômes de l'érosion en nappe.....	21
4.4.2. Cause et le processus d'érosion en nappe.....	22
4.5. Quantification de l'érosion.....	23
4.5.1. Équation Universelle des Pertes en Sols.....	24
4.5.1.1. Limites intrinsèques de la formule USLE.....	28

4.5.2.	Autres travaux sur l'indice d'érosion.....	29
4.5.2.1.	Indice de Fournier (1960).....	29
4.5.2.2.	Formule de Tixeront (1960).....	29
4.5.2.3.	Indice de Heusch (1970).....	29
4.5.2.4.	Indice de $(K_e > 1)$ de Hudson (1971).....	30
4.5.2.5.	Indice de Roose (1977).....	30
4.5.2.6.	Indice de $(AI_m)$ de Lal (1976).....	31
4.5.2.7.	Formule de Touaibia et al (2003).....	31
	Conclusion.....	32
	<b>Chapitre II- Présentation de la zone d'étude</b> .....	33
1.	Introduction.....	34
2.	Situation géographique.....	34
3.	Évolution historique.....	35
4.	Analyse du site naturel.....	35
4.1.	Aperçu général sur la région.....	35
4.2.	Caractéristiques de la zone d'étude.....	38
4.3	Aperçu climatologique du milieu d'étude.....	43
4.3.1.	Introduction.....	43
4.3.2.	Vents et température.....	43
4.3.3.	Pluviométrie.....	45
4.3.4.	Classification du climat.....	46
	Conclusion.....	48
	<b>Chapitre III- Étude des événements pluvieux</b> .....	49
1.	Introduction.....	50
2.	Présentation de la banque de données.....	50
2.1.	Étude statistique des précipitations.....	51
2.1.1.	Étude statistique des précipitations annuelles.....	51
2.1.2.	Étude statistique des précipitations maximales journalières.....	52
2.2.	Étude des pluies de courtes durées.....	54
2.2.1.	Contrôle de la qualité de la série pluviométrique.....	54
2.2.2.	Contrôle de la qualité des séries des enregistrements pluviographiques.....	56
3.	Modélisation des courbes Intensité Durée Fréquence (IDF).....	61
3.1.	Définition de la courbe IDF.....	62

3.2.	Élaboration des courbes IDF pour la totalité des averses avec seuil.....	62
3.2.1.	Test de Kolmogorov.....	63
3.2.2.	Pluies probables pour différentes durées.....	64
3.2.3.	Courbes intensité durée fréquence IDF.....	67
3.3.	Élaboration des courbes HDF.....	69
Conclusion.....		70
<b>Chapitre IV- Modélisation du débit pluvial.....</b>		<b>72</b>
1.	Introduction.....	73
2.	Précipitations.....	73
3.	Modélisation de la transformation pluie-débit.....	74
3.1.	Modèle HEC-HMS.....	74
3.1.1.	Préparation des entrées du modèle HEC-HMS.....	75
3.1.1.1.	Modélisation du bassin versant.....	75
3.1.1.2.	Modélisation des précipitations par la méthode de la pluie synthétique basée sur la fréquence.....	76
3.1.2.	Simulation hydrologique et visualisation des résultats.....	76
3.2.	Modèle du SCS Curve Number.....	77
3.3.	méthode des isochrones ou de l'hydrogramme synthétique.....	80
3.3.1.	Construction des courbes isochrones.....	80
3.3.2.	Calcul du débit maximum décennal.....	83
3.3.3.	Calcul du temps de base.....	84
3.4.	Synthèse des résultats.....	86
Conclusion.....		92
<b>Chapitre V- Estimation de l'érosion spécifique.....</b>		<b>94</b>
1.	Introduction.....	95
2.	Procédé de calcul.....	96
3.	Traitement.....	97
4.	Interprétation des résultats.....	102
Conclusion.....		103
<b>Conclusion générale.....</b>		<b>104</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>		<b>108</b>



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau	2.1.	Caractéristiques physiographiques et hydromorphométriques des bassins.....	41
Tableau	2.2.	Identification de la station de Mouzaia.....	44
Tableau	2.3.	Températures moyennes interannuelles en °C (1988/89-2008/09).....	44
Tableau	2.4.	Vitesse des vents (km/h) et évapotranspiration (mm) moyennes mensuelles....	45
Tableau	2.5.	Identification de la station de Sidi Rached.....	45
Tableau	2.6.	Paramètre d'EMBERGER pour la station de Mouzaia.....	47
Tableau	3.1.	Caractéristiques des stations pluviométriques.....	50
Tableau	3.2.	Quantiles des précipitations annuelles.....	52
Tableau	3.3.	Quantiles des précipitations maximales journalières.....	53
Tableau	3.4.	Valeurs des paramètres de Wilcoxon.....	56
Tableau	3.5.	Nombre d'averses par mois et par an (sans seuil de rejet).....	57
Tableau	3.6.	Nombre d'averses par mois et par an à partir du seuil considéré.....	58
Tableau	3.7.	Nombre d'averses par durée d'agrégation.....	59
Tableau	3.8.	Nombre d'averses pour toute la série avec seuil.....	60
Tableau	3.9.	Nombre d'averses par classe d'intensité.....	60
Tableau	3.10.	Coefficient de détermination $R^2$ pour les différentes lois de régression.....	61
Tableau	3.11.	Critère de concordance de Kolmogorov.....	63
Tableau	3.12.	Exemple d'application du test pour une durée d'agrégation de 15 minutes.....	63
Tableau	3.13.	Nombre de valeurs n.....	64
Tableau	3.14.	Période de retour des valeurs extrêmes.....	64
Tableau	3.15.	Pluies probables (mm).....	67
Tableau	3.16.	Intensités moyennes maximales $\bar{I}_t$ (mm).....	67
Tableau	3.17.	Modèles des courbes IDF pour chaque période de retour.....	69
Tableau	3.18.	Hauteur de pluie des différentes périodes de retour.....	70
Tableau	4.1.	Indice de ruissellement CN pour différentes occupation du sol (condition antécédentes d'humidité moyenne, $I_a = 0,2 S$ (adapté de Chow et al, (1988), Rivard, 2005).....	78
Tableau	4.2.	Détermination du numéro de la courbe de saturation en fonction des caractéristiques du bassin versant.....	79
Tableau	4.3.	Surfaces débitantes $Km^2$ .....	82

Tableau	4.4.	Détermination du débit maximum décennal (Bassin versant de Oued Djer)....	84
Tableau	4.5.	Débit maxima obtenus par la méthode des isochrones pour le Bassin Versant d'Oued Djer.....	84
Tableau	4.6.	Ordonnées de l'hydrogramme de crue décennal.....	85
Tableau	4.7.	Débit maxima obtenu par HEC-HMS, SCS et isochrones.....	86
Tableau	4.8.	Volume ruisselé et lame précipitée pour une période de retour de 10 ans.....	91
Tableau	4.9	Volume ruisselé et lame précipitée pour une période de retour de 50 ans.....	91
Tableau	4.10.	Volume ruisselé et lame précipitée pour une période de retour de 100 ans.....	92
Tableau	5.1.	Exemple de dépouillement d'un pluviogramme.....	98
Tableau	5.2.	Répartition mensuelle et annuelle de l'index d'érosion R pour 744 averses enregistrées sur la période de 1985/86 à 2005/06.....	99
Tableau	5.3.	Coefficient de détermination $R^2$ pour les différents modèles régressifs.....	100
Tableau	5.4.	Coefficient de détermination $R^2$ pour les différentes modèles régressifs.....	102

## LISTE DES FIGURES

Figure	1.1.	Principaux mécanismes de précipitations (Rivard, 2005).....	7
Figure	1.2.	Composantes d'un modèle (Singh, 1995).....	11
Figure	1.3.	Différents types d'érosion.....	20
Figure	2.1.	Situation de la zone d'étude.....	35
Figure	2.2.	Géologie de la région d'étude.....	37
Figure	2.3.	Bassins versants urbains et périurbains et cours d'eau.....	39
Figure	2.4.	Réseau hydrographique du bassin versant d'Oued Djer.....	40
Figure	2.5.	Vue 3D du MNT de la zone d'étude.....	42
Figure	2.6.	Variation mensuelle de la température.....	44
Figure	2.7.	Précipitations annuelles sur la période d'observations (1973/74-2010/11).	45
Figure	2.8.	Précipitation à l'échelle saisonnière sur la période d'observations (1973/74-2010/11).....	46
Figure	2.9.	Répartition intra-annuelle des précipitations sur la période d'observations (1973/74-2010/11).....	46
Figure	2.10.	Diagramme bioclimatique d'EMBERGER.....	48
Figure	3.1.	Ajustement de la précipitation annuelle à la loi de Gauss.....	52
Figure	3.2.	Ajustement de la précipitation maximale journalière à la loi Gumbel.....	53
Figure	3.3.	Nombre d'averses par durée d'agrégation (1985/86 - 2005/06).....	59
Figure	3.4.	L'intensité moyenne en fonction de l'intensité maximale.....	61
Figure	3.5.	Ajustement à la loi Log-Normale pour une durée d'agrégation de 15 minutes.....	64
Figure	3.6.	Ajustement à la loi Log-Normale pour une durée d'agrégation de 30 minutes.....	65
Figure	3.7.	Ajustement à la loi Log-Normale pour une durée d'agrégation de 45 minutes.....	65
Figure	3.8.	Ajustement à la loi Log-Normale pour une durée d'agrégation de 60 minutes.....	65
Figure	3.9.	Ajustement à la loi Log-Normale pour une durée d'agrégation de 90 minutes.....	66
Figure	3.10.	Ajustement à la loi Log-Normale pour une durée d'agrégation de 120 minutes.....	66

Figure	3.11.	Ajustement à la loi Log-Normale pour une durée d'agrégation de 150 minutes.....	66
Figure	3.12.	Ajustement à la loi Log-Normale pour une durée d'agrégation de 180 minutes.....	67
Figure	3.13.	Courbes IDF dérivées des averses de toute la série.....	68
Figure	3.14.	Courbes HDF pour les différentes périodes de retour.....	71
Figure	4.1.	Bassin versant en isochrones de Oued Djer.....	81
Figure	4.2.	Hydrogramme de crue obtenu par la méthode des isochrones pour le Bassin Versant de Oued Djer pour les différentes périodes de retour (10, 50 et 100 ans).....	86
Figure	4.3.	Hydrogramme de crue obtenu par le modèle HEC-HMS pour une période de retour de 10 ans pour le sous bassin 01.....	87
Figure	4.4.	Hydrogramme de crue obtenu par la méthode SCS pour une période de retour de 10 ans pour le sous bassin 01.....	88
Figure	4.5.	Hydrogrammes des crues obtenus par la méthode du modèle HEC-HMS pour une période de retour de 10 ans.....	89
Figure	4.6.	Hydrogrammes des crues obtenus par la méthode du modèle HEC-HMS pour une période de retour de 50 ans.....	89
Figure	4.7.	Hydrogrammes des crues obtenus par la méthode du modèle HEC-HMS pour une période de retour de 100 ans.....	89
Figure	4.8.	Hydrogrammes des crues obtenus par la méthode SCS pour une période de retour de 10 ans.....	90
Figure	4.9.	Hydrogrammes des crues obtenus par la méthode SCS pour une période de retour de 50 ans.....	90
Figure	4.10.	Hydrogrammes des crues obtenus par la méthode SCS pour une période de retour de 100 ans.....	90
Figure	5.1.	Pluviogramme reconstitué de l'averse du 19/09/2001.....	97
Figure	5.2.	Modèle puissance pour la relation $R=f(P_{an})$ .....	101
Figure	5.3.	Relation $R = f(I_{max})$ des 744 averses.....	101

## **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Les inondations observées cette dernière décennie dénotent d'une variation climatique notable, qui, cependant, n'est pas encore justifiée par un changement climatique confirmé par les différents modèles globaux élaborés par les chercheurs sur la scène internationale.

Les inondations sont des événements extrêmes causées par des événements pluvieux intenses, rapides et de courtes durées. Selon White (1999), elles sont classées parmi les catastrophes naturelles qui causent des pertes humaines et des dégâts matériels importants, constituant le risque le mieux distribué sur la planète.

Si le débordement des cours d'eau est souvent maîtrisé par une hydrologie appropriée, l'hydrologie urbaine est complexe et reste d'autant plus délicate lorsque les voies de communication deviennent des vecteurs d'écoulement. La nature orographique du terrain complique davantage la maîtrise de ces inondations, c'est ce qui a été observé par exemple dans les inondations de Bab-El-Oued du 10 Novembre 2001.

En Algérie, aussi bien au Nord qu'au Sud, les inondations en milieu urbain ne cessent de se manifester causant des dégâts naturels voire humains considérables, notons pour mémoire celles de Ghardaïa du 01-10-2008 et de Taref du 25-02-2012 et constituent une contrainte majeure dans leur gestion, en terme d'évacuation et d'impact sur leur environnement. Une politique adaptée devient impérative quant à leur maîtrise et à l'identification des zones vulnérables.

Pour y remédier, l'Algérie vient de lancer un programme d'action (2013) pour toutes les communes, de mise en place d'un support cartographique pour une aide à la décision.

Les études prévisionnelles sont nécessaires voire obligatoires, malheureusement le manque d'information quand au débit ruisselé rend la tâche difficile aux gestionnaires locaux.

La question qui est posée et qui reste problématique: Comment estimer le débit de ruissellement en milieu urbain en absence de jaugeages, suite à une averse torrentielle, pour dimensionner et maintenir le réseau d'évacuation des eaux pluviales sans compromettre la sécurité de la population en biens matériels et en vies humaines? Pour y répondre, seul le

recours à la modélisation par la recherche d'une relation pluie-débit, peut apporter une solution à court terme.

Par ailleurs, tout débit ruisselé met en action la force érosive de l'eau, par l'arrachage, les mouvements de masse et le transport des sédiments causant ainsi, des dégâts de diverses natures tels que les dépôts solides sur voies de communication, l'obstruction des avaloirs, l'éclatement des conduites, etc. Cet apport de sédiments provenant des bassins périurbains pose aussi problématique quant à sa quantification et aux aménagements qui s'y imposent.

C'est dans ce contexte que notre travail s'inscrit dont l'objectif consiste en la modélisation de la relation Pluie – Débit pluvial– Érosion Spécifique dans une zone vulnérable aux inondations. Le choix a porté sur la commune de Sidi Rached, dans la wilaya de Tipaza en plein cœur de la Mitidja. La localité de Sidi Rached connaît, à chaque averse torrentielle automnale, des inondations, marquées par les dépôts de sédiments importants observés sur la route nationale, délimitant la partie avale de la localité. Il y a lieu de noter que, cette zone d'étude, que nous avons jalonné, est dominée par une agriculture fruitière et maraîchère conséquente, marquée par une érosion en nappe visible, une érosion verticale (ravinement) quasi inexistante et un reboisement formant un couvert végétal ancré dans les hauteurs de la localité.

De ce fait, nous avons jugé de structurer ce travail en :

- Le chapitre I est une revue bibliographique traitant la problématique des travaux réalisés dans le monde et en Algérie ;
- Le chapitre II est consacré à la présentation de la zone d'étude, la détermination des caractéristiques morphométriques du Bassin Versant, et la description de l'état actuel d'évacuation des eaux pluviales.
- Le chapitre III est dédié aux données disponibles, leur mise en forme et leur traitement. L'élaboration des courbes IDF reste le point clé de ce chapitre.
- Le chapitre IV est consacré à la modélisation, trois modèles sont utilisés à titre comparatif pour la détermination de la relation pluie-débit.
  - Le modèle HEC-HMS.
  - La méthode des SCS des Curve Number.
  - La méthode classique des Isochrones.

Le modèle HEC-HMS permet de déterminer le débit pluvial en combinant deux modèles, un modèle de transfert basé sur la méthode de l'hydrogramme unitaire de Clark et un modèle de production basé sur la méthode des Curve Number. Aussi l'interprétation des résultats est discutée dans ce chapitre.

La méthode SCS des « Curve Number » a permis de déterminer le débit pluvial en se basant sur la nature du sol et l'occupation des bassins versant.

La méthode des isochrones a permis de tracer les hydrogrammes de crues probables et de définir en tout point du bassin le débit pluvial maximum probable.

- Le chapitre V est consacré à la quantification de l'érosion spécifique. L'Équation Universelle des Pertes en Sol « USLE » est appliquée où seul l'index d'érosivité des pluies est calculé. L'érosion est quantifiée et comparée aux dépôts de sédiments déposés que nous avons souvent observés sur la route nationale (RN 67), limitrophe de la zone d'étude.

En conclusion, il y a lieu de noter que plusieurs modèles existent qui requièrent beaucoup de données. De ce fait, compte tenu de la disponibilité de l'information existante, nous avons pris la décision de travailler avec les modèles les plus utilisés pour répondre à un besoin urgent en termes d'études et d'aménagements appropriés, que d'avoir recours aux formules empiriques souvent non adaptables aux conditions algériennes.



**CHAPITRE I**  
**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

## **CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

### **1. INTRODUCTION**

L'étude bibliographique revêt un aspect très important dans tout travail de recherche. Elle permet non seulement d'approfondir les connaissances théoriques mais aussi de se familiariser avec les méthodes de traitement des phénomènes à travers les différents travaux publiés.

La quantité du ruissellement générée sur un bassin versant et sa répartition dans le temps est fonctions de plusieurs phénomènes dont la nature du bassin versant. Sa réponse hydrologique en particulier est en effet fonction de variables météorologiques (caractéristiques de la pluie) et de variables physiographiques (dimensions, pente et forme du bassin, type de canalisation, type de sol et sa perméabilité).

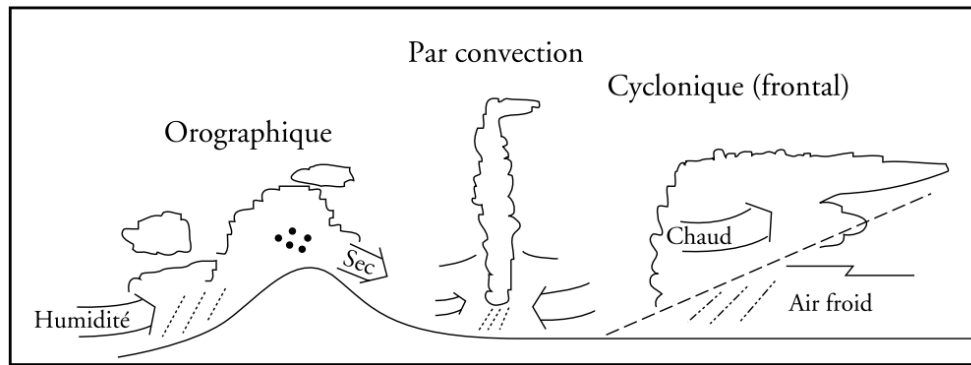
Toutefois, l'utilisation de l'outil informatique permet actuellement en analysant les différents paramètres de ruissellement d'obtenir rapidement des débits maximum de crues. Le seul problème est que les différents logiciels et les différentes techniques de calcul permettent d'obtenir des résultats divergents. Ces divergences peuvent provenir aussi de données différentes (pluie de conception, types de sol, occupation et perméabilité). Généralement, on vise à utiliser la méthode de calcul la plus simple qui permet d'obtenir les informations requises pour la conception.

### **2. PRÉCIPITATIONS**

Pour des systèmes hydrologiques urbains, la précipitation est sans conteste le paramètre le plus important, sous forme de neige ou de pluie, elle constitue l'élément moteur générant les débits et volumes de ruissellement (Reminieras, 1986).

#### **2.1. Différents types de précipitations**

Selon, Rivard (2005), il existe trois principales catégories de précipitation, par convection, orographique et cyclonique comme le montre la figure 1.1.



**Figure 1.1.** Principaux mécanismes de précipitation (Rivard, 2005)

### 2.1.1. Précipitation par Convection

Ce type de précipitation est le résultat du réchauffement de l'air à l'interface avec le sol; l'air en se réchauffant se dilate et s'élève, produisant ainsi de forts courants verticaux ascendants. L'air se refroidit ensuite au cours de l'ascension et la précipitation se produit lorsque le point de condensation est atteint. Les précipitations par convection peuvent prendre la forme d'une faible averse ou d'un orage de très forte intensité. Ce processus est celui produisant généralement les forts orages qu'on peut observer vers la fin de l'après-midi, après une journée d'été chaude et humide. Ces orages produisent typiquement des pluies de durée relativement courte mais avec potentiellement de très fortes intensités, générant ainsi des débits de ruissellement importants mais un volume de ruissellement relativement faible. Ce type de précipitation peut donc être contraignant pour la conception d'un réseau de conduites (Où le débit de pointe est déterminant pour le dimensionnement) mais pas pour la conception d'un bassin de rétention, où le volume d'eau ruisselé devient le facteur clé.

### 2.1.2. Précipitation Orographique

La précipitation survient lorsque l'air chargé d'humidité est poussé par le vent contre une zone montagneuse et qu'il est alors élevé mécaniquement, ce qui produit un refroidissement. L'autre versant de la zone montagneuse tend à être plus sec et chaud.

### 2.1.3. Précipitation Cyclonique

La précipitation est associée avec un mouvement des masses d'air d'une zone de haute pression vers une zone de basse pression. Les précipitations cycloniques peuvent être de plus classifiées comme étant produites par le mouvement d'un front froid ou par celui d'un front chaud. On retrouve plus souvent ce type de précipitation en automne, où les pluies uniformes et de longue durée peuvent produire des volumes ruisselés importants qui

seront par exemple utilisés pour valider la conception d'un bassin de rétention. Cette catégorisation générale des types d'événements pluvieux peut se révéler utile lorsqu'on désire évaluer si une transposition d'événements pluvieux d'une région à une autre est réaliste ou pour l'application d'une pluie mesurée à un endroit précis à l'ensemble d'un grand bassin.

## **2.2. Caractéristiques des événements pluvieux**

Un événement pluvieux possède des caractéristiques internes et des caractéristiques externes. Les caractéristiques internes sont très nombreuses et complexes (Rivard, 2005). Elles incluent par exemple le temps requis pour atteindre les pointes à fortes intensités, le nombre de pointes à l'intérieur de l'événement pluvieux, la distribution de la quantité de pluie totale par rapport aux pointes, etc. Les caractéristiques externes sont la quantité totale de pluie, sa durée, l'intensité moyenne et la durée entre deux événements ou le temps écoulé depuis la pluie précédente. Plusieurs références ont été proposées pour établir quelle est la période de temps minimum entre deux périodes de pluie à partir de laquelle on pouvait affirmer que les deux événements pluvieux avaient été produits par deux systèmes météorologiques indépendants. On s'entend généralement pour dire qu'une durée minimale de 3 à 6 heures entre deux événements pluvieux est suffisante pour assurer l'indépendance entre les événements (Koutsoyiannis et al, 1998)

Les caractéristiques pluviométriques sont souvent présentées sous la forme de courbes « Intensité-Durée-Fréquence » (IDF). Ces courbes IDF nécessitent les enregistrements pluviographiques à partir desquels une étude détaillée des pluies de courtes durées sur des intervalles de référence donnés est entreprise.

La notion de série maximale annuelle (SMA) et série de durée partielle (SDP) est souvent utilisée, notamment par Hubert, (1995) et Koutsoyiannis, (1998), selon l'objectif à atteindre et l'opportunité de l'étude.

## **3. MODELISATION HYDROLOGIQUE**

Les recherches sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants ont conduit à plusieurs grands types de modèles (statistiques, globaux ou semi distribués, à base physique ayant chacun leurs avantages et limitations (Ambroise 2012). L'idée de transformer les pluies en débit par un modèle simulant la réalité d'un bassin versant est ancienne. Au dix septième siècle, les physiciens Français Edmé Mariotte et Pierre Perrault ont mesuré le débit de la

Seine à Paris (France) et la pluie tombant sur le bassin versant et ont réalisé qu'une pluie fournit suffisamment d'eau pour alimenter les cours d'eau (Makhlouf, 1994).

Pour expliquer la formation de l'écoulement à l'exutoire d'un bassin, certains hydrologues ont utilisé des méthodes pratiques, visant à décomposer l'hydrogramme du bassin en ses différentes composantes. En ingénierie hydrologique, la méthode la plus utilisée est la décomposition graphique de l'hydrogramme de crue en écoulement rapide, écoulement retardé et écoulement de base (Linsley et al, 1982).

La mesure directe des différents écoulements de l'hydrogramme qui nécessite un déploiement de matériel expérimental souvent lourd et coûteux n'a fait l'objet que d'essais dans certains bassins expérimentaux, et reste donc spécifiquement dans un cadre de recherche (Linsley et al, 1982).

Selon Moles (1995), la modélisation est la troisième attitude de la recherche scientifique après l'observation et l'expérimentation.

### **3.1. Objectifs de la modélisation**

Selon l'utilisateur, l'usage de la modélisation peut avoir diverses fonctions. Le modèle est destiné à aider à répondre à des questions, il est conçu en fonction de celles-ci, et ne peut être utilisé que dans ce champ particulier, son objectif principal est la réduction de la complexité naturelle. Les modèles hydrologiques servent en premier lieu à représenter dans le temps le cycle de l'eau, et permettent de transposer l'information climatique en information sur les écoulements (Roche, 1988). Les fonctions des modèles Pluie-Débit peuvent être résumées en :

- Extrapolation des débits ;
- Prévision des débits ;
- Gestion des ressources en eau ;
- Modèle comme outil de recherche ;

Le modèle choisi doit avoir un certain nombre de qualité selon son utilisation (Cudennec, 2000) et doit répondre à des critères à savoir :

- La précision : qualité fondamentale.
- La robustesse : la précision reste valable dans les conditions extrêmes.
- La généralité : le modèle reste valable pour tous types de conditions extrêmes.

- L'universalité : le modèle peut être transposé à des cas différents d'un même type de système.
- L'adaptation : le modèle peut être corrigé pour tenir compte de nouvelles informations sur le système modélisé.

Il est important de signaler que les modèles ne respectent en général que quelques une de ces qualités (Cudennec, 2000).

### 3.2. Classification des modèles hydrologiques

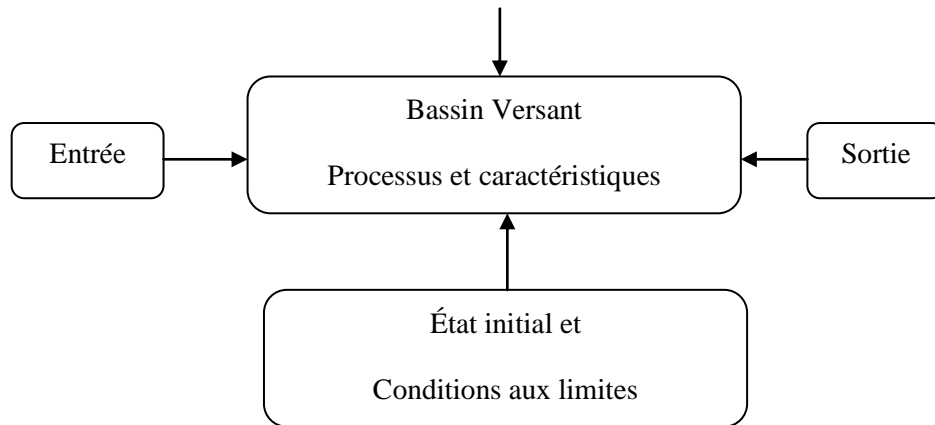
Il existe actuellement un grand nombre de modèles, parmi lesquels on trouve les modèles conceptuels ou empiriques globaux qui représentent un lien entre la pluie et le débit, (Bouanani, 2011). Plusieurs auteurs ont proposé une classification des modèles hydrologiques (Singh, 1995 ; Ambroise, 1999). A titre d'exemple, Refsgaard et Storm (1996) classent les modèles hydrologiques en trois catégories : les modèles empiriques, les modèles conceptuels et les modèles distribués à base physique. D'après Refsgaard (1997), les modèles hydrologiques peuvent être classés selon la description spatiale des processus physiques en tant que conceptuel ou physique et selon la description spatiale des processus au niveau du bassin versant en tant que globaux ou distribués. En raison de l'ambiguïté de certains critères (notion de conceptuel ou physique) une certaine confusion règne sur l'appartenance de tel ou tel modèle à une famille de données (Payraudeau, 2002).

Chocat (1997), propose, de classer les modèles hydrologiques par type d'utilisation (modèles cognitifs, modèles prévisionnels, modèles décisionnels et modèles normatifs) et par type d'approche (physique/ analogique/ symbolique, axiomatique / heuristique, déterministe/ probabiliste (stochastique), microscopique (réductionniste/ macroscopique (holistique, conceptuelle), empirique/ théorique et spéculative / pragmatique).

Selon Singh (1995) un modèle est caractérisé par cinq éléments constitutifs comme le montre la figure 1.2:

- La géométrie du système (bassin versant) ;
- Les entrées dans le système ;
- Les lois de formalisation des processus ;
- L'état initial et les conditions aux limites du système ;
- Les sorties du système.

Équations décrivant les processus



**Figure 1.2.** Composantes d'un modèle (Singh, 1995)

Musy et Higy (1998) et Higy (2000) ont proposé la classification suivante des modèles:

- Modèle déterministe ;
- Modèle stochastique ;
- Modèle mécaniste ou à base physique ;
- Modèle paramétrique ;
- Modèle analytique ;
- Modèle empirique ;
- Modèle conceptuel.

Perrin (2000), a proposé une classification simplifiée en trois catégories de modèles, les modèles 'boîte-noire', les modèles 'à réservoir' conceptuels ou empiriques et les modèles fondés sur la physique.

Cependant certains modèles ont vu leur utilisation se répandre dans le domaine de l'hydrologie urbaine et l'hydrologie fluviale tel que le modèle HEC-HMS.

### 3.3. Caractérisation des modèles utilisés

Trois modèles ont été utilisés, à savoir :

- Modèle HEC-HMS ;
- Modèle SCS Curve Number ;
- Méthode de l'hydrogramme synthétique appelée communément la méthode des isochrones (Bourrier 1997, Dubreuil 1974).

### 3.3.1. Modèle HEC-HMS

Le HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) est un code de calcul qui simule le comportement hydrologique d'un bassin versant suite à des événements pluvieux prédéterminés. Il a été développé par Hydrologic Engineering Center (HEC) du corps de l'armée américaine des ingénieurs. Ce code de calcul permet de calculer des hydrogrammes de crues pour plusieurs objectifs, à savoir les études de drainage urbain, la prévision des crues et leur impact, la conception des réservoirs, la réduction des effets des inondations. Le programme présente une interface graphique, des composantes hydrologiques intégrées, un système spécifique de stockage de données (DSS) et des outils de gestion, etc.

Le programme HEC-HMS permet de traiter ou de simuler simultanément les différentes données, à savoir :

- Les précipitations : Ces données peuvent correspondre à des relevés pluviométriques réels d'événements pluvieux ordinaires ou exceptionnels mais aussi à des événements pluvieux théoriques basés sur une étude statistique ;
- Les pertes ou déficit d'écoulement (par infiltration, retenue ou évapotranspiration) qui permettent d'évaluer le ruissellement à partir des précipitations et des caractéristiques du bassin versant ;
- Les ruissellements directs qui prennent en compte les écoulements de surface, les stockages et les pertes de charge.

Ces différents paramètres sont modélisés mathématiquement par un ensemble de modèles intégrés dans HEC-HMS et qui permettent d'obtenir la réponse du système hydrologique global suite à un changement de condition hydrométéorologique.

- **Schématisation du bassin versant**

Avec le HEC-HMS, le bassin versant est découpé en plusieurs sous-bassins délimités par les lignes de partage des eaux. Chacun est représenté par un élément appelé « Sub-Bassin » pour la simulation, à savoir : la surface et le nom du sous-bassin, les méthodes de calcul des « pertes » et des « écoulements ». De même que les sous bassins, les cours d'eau sont aussi modélisés et représentés par des éléments hydrologiques appelés « reach ». L'ensemble des éléments doit être relié pour former un réseau en incluant des jonctions, des bifurcations, des sources et des puits.



- **Données météorologiques**

En plus du modèle du bassin, le modèle requiert des données des précipitations sur chacun des sous-bassins. Il existe plusieurs modèles de précipitations disponibles dans HEC-HMS. L'utilisateur doit choisir un modèle convenable pour le calcul. Ces modèles sont :

- Méthode de pondération des données ;
- Inverse du carré de la distance ;
- Les précipitations en grille ;
- La pluie hypothétique ;
- La méthode des hyétographes.

- **Exemples de sites d'application du Modèle HEC-HMS**

Ce modèle est largement utilisé dans le monde sur plusieurs sites d'application :

- **En France (Cas des bassins versants de la Nère et du ruisseau de Serremezan)**

L'objectif est d'évaluer les apports en eau qui serviront à alimenter le lac à la construction du barrage de Charlas. Cette quantification nécessite une étude hydrologique des bassins versants en amont de la retenue : ceux de la Nère et du ruisseau de Serremezan (CACG, 1989 et Benaouadj, 2011). Pour ce faire, le modèle pluie/débit sous HEC-HMS a été appliqué au bassin versant global de la retenue. La simulation par HEC-HMS a permis de voir que les apports de l'ensemble du bassin versant de la Nère ne peuvent suffire pour le remplissage du barrage en projet.

- **Au Maroc (Cas du bassin versant de Bouregreg)**

Le modèle HEC-HMS a été appliqué, avec le Modèle SWAT, dans le bassin versant de Bouregreg pour étudier le régime hydrologique de ce dernier. Ce modèle a donné de bons résultats (Fadil et al, 2011).

- **En Algérie**

Ce modèle a été utilisé dans l'étude des crues de la vallée de M'zab (Benaouadj, 2011). Il a été aussi appliqué, lors de l'implantation de l'autoroute Est-Ouest sur le comportement hydrologique des cours d'eau, (Benkaci, 2010) et dans certaines études d'hydraulique fluviale.

Pour mieux modéliser les crues, le modèle HEC-HMS a donné de bons résultats pour la ville de Sidi Bel Abbes (Merabet, 2008, Yahiaoui, 2012).

### 3.3.2. Modèle du SCS-CN

Le modèle SCS-CN a été proposé aux États-Unis en 1954 par l'US Soil Conservation Service (SCS). C'est l'aboutissement de plus de 20 années d'études théoriques et expérimentales. Ce modèle fût développé par trois consultants privés, Horner, Horton (fondateur de la théorie, portant son nom, des écoulements par infiltration dans le sol) et Sherman (fondateur de la théorie de l'hydrogramme unitaire) (Musy et al, 1998).

Ce modèle a été initialement développé pour la prévision des crues en milieu rural ou naturel (SCS, 1972 ; NRCS, 1986 ; Bertrand-Krajewski, 2006). Toutefois, son utilisation a été adaptée pour les bassins versants urbains en 1975 (NRCS, 1986 ; Hjelmfelt, 1987; CERTU, 2003). Utilisable à la fois pour des bassins versants urbains et ruraux, ce modèle peut donc être utilisé pour des bassins versants mixtes et périurbains. Ce modèle a été appliqué à la ville de Tipasa donnant de bons résultats (Boukhelifa, 2011).

Le concept essentiel du modèle est de résumer les propriétés hydrodynamiques de la couverture du sol à l'aide de courbes auxquelles sont attribués des numéros selon le sol. Ces courbes sont dites courbes numérotées (CN) (*Curve Number*). Le CN est aussi décrit comme étant un coefficient d'aptitude au ruissellement (Gaume, 2002). Le paramètre CN est directement déterminé à partir d'un tableau à triple entrées : le groupe hydrologique (A, B, C, D) du sol (par ordre de diminution de perméabilité) ; les modes d'occupation du sol et les conditions d'humidité antécédente du sol (sec, moyen, mouillé) (Aron et al, 1977).

L'hypothèse principale de cette méthode est que le rapport de la perte cumulée instantanée  $F$ , à la perte maximale potentielle  $S$ , est égal au rapport du ruissellement  $Q$  à la pluie  $P$  moins la perte initiale,  $I_a$ . La relation mathématique est formulée en 1.1.

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P - I_a} \quad (1.1)$$

L'équation principale du modèle SCS pour estimer le ruissellement est donnée par (SCS, 1972 ; NRCS, 1986 ; Musy et al, 1998 ; Radojevic, 2002 ; Gaume, 2002 ; McCuen, 2004), elle est formulée en 1.2.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) - S} \quad (1.2)$$

Avec:

Q: Ruissellement cumulé ou pluie nette (en mm).

P : Précipitation cumulée ou pluie brute (en mm).

$I_a$  : Perte initiale (en mm).

S : Perte maximale potentielle (en mm).

$I_a$  représente les pertes avant le début du ruissellement. Elle inclue, la rétention par les dépressions du sol, l'interception par la végétation, l'évaporation et l'infiltration. La valeur de  $I_a$  est très variable, mais elle est généralement reliée avec le type de sol et le type de revêtement du sol (NRCS, 1986). A la suite de nombreuses études expérimentales, le SCS a proposé la relation empirique donnée en 1.3 (SCS, 1972 ; NRCS, 1986 ; Musy et al, 1998).

$$I_a = 0.2 S \quad (1.3)$$

Certains auteurs (Radojevic, 2002) estiment que l'équation (1.3) n'est correcte que pour des événements forts, et qu'elle sous estime habituellement les résultats de l'écoulement superficiel pour les événements pluvieux petits et moyens, et proposent de réduire la perte initiale à  $I_a = 0.1S$ , voire une valeur inférieure. Toutefois, il est à signaler que les pertes initiales sont plus élevées pour les surfaces imperméables (Bertrand-Krajewski, 2006). Ces dernières représentent une fraction considérable des bassins versants urbains étudiés. Dans le contexte Algérien où les dépressions du sol sont conséquentes, il a été retenu la relation originelle (1.3) du SCS pour l'estimation des pertes initiales.

La rétention potentielle S est reliée aux conditions de couverture du sol (revêtement pour les sols imperméables, et le couvert végétal et la pratique pour les sols perméables). Ces dernières étant représentées par la CN. La relation entre S et CN est en système métrique (Musy et al, 1998 ; McCuen, 2004), et est donnée en 1.4.

$$CN = \frac{25400}{S + 254} \quad (1.4)$$

Aussi, les CN prennent leurs valeurs en fonction des conditions d'humidité antécédente du sol ou de son revêtement. La nature du sol s'exprime en fonction d'un classement en

quatre groupes hydrologiques (HSG :Hydrologic soil group) d'après son aptitude à l'infiltration (SCS, 1972 ; NRCS, 1986 ; CERTU, 2003 ; McCuen, 2004 ; Bertrand-Krajewski, 2006) :

**Groupe A :** Sols présentant des taux élevés d'infiltration. Il comprend des sols sableux contenant une faible fraction de limon et d'argile.

**Groupe B :** Sols avec des taux d'infiltration moyen. Composés essentiellement de sols sableux-limoneux de texture moyennement grossière à moyennement fine.

**Groupe C :** Sols présentant des taux d'infiltration lents.

**Groupe D :** Sols avec de très faible taux d'infiltration. Constitués principalement d'argile en surface.

La relation originelle (1.2) du SCS-CN permet d'estimer le ruissellement d'une manière globale, c'est-à-dire pour la valeur totale de la hauteur d'eau précipitée pendant l'averse. En effet, cette relation ne contient pas d'expression de temps. Elle ne peut être appliquée sur une distribution temporelle de la pluie afin d'obtenir l'évolution du ruissellement (pluie nette) au cours du temps. Cependant, les relations de base (1.1 et 1.2) de cette méthode peuvent être manipulées pour obtenir une relation donnant la perte au ruissellement formulée en 1.5.

$$F = \frac{S(P - I_a)}{P - I_a + S} \quad (1.5)$$

Or, dans cette équation,  $S$  et  $I_a$  sont des constantes tandis que  $P$  et  $F$  sont des fonctions dépendantes du temps. Il s'ensuit que le taux d'infiltration  $F(t)$  s'obtient en dérivant l'équation (1.5) par rapport à la variable temporelle  $t$  (Musy et al, 1998 ; Radojevic, 2002) ce qui donne la formule 1.6.

$$F(t) = \frac{df}{dt} = \frac{S^2}{(P - I_a + S)^2} \frac{dp}{dt} \quad (1.6)$$

Où :  $\frac{dp}{dt}$  représente l'évolution de l'intensité de la pluie au cours de l'averse, cette valeur est facilement déductible des hyétogrammes de pluies ou directement des courbes IDF.

Ainsi, en considérant le hyétogramme de la pluie brute et la relation (1.6), il est possible de déduire l'évolution dans le temps de la pluie nette au cours de l'averse. La pluie nette peut

être exprimée sous la forme d'un débit en multipliant l'intensité moyenne maximale (sur le temps de référence) par la surface du bassin versant. Cet hydrogramme fictif de ruissellement ayant la même durée que l'averse, représente la variable d'entrée de la fonction de transfert. Une étude récente utilisant le modèle SCS Curve Number, et HEC-HMS a été réalisée en Arabie Saoudite par El-Hames et al (2012), en cherchant le débit pluvial d'une averse qui a fait des inondation le 25 Novembre 2009 à Jeddah.

### 3.3.3. Méthode de l'hydrogramme synthétique

Développée par Lariou, elle est basée sur la conception des eaux du bassin versant et le tracé des isochrones. Certaines hypothèses sont admises quant à son application (Touaibia, 2004) :

- Répartition uniforme de l'averse génératrice de la crue sur le bassin versant ;
- Vitesse de transfert des eaux constante de l'amont à l'aval ;
- Formule de Giandotti reste valable pour le calcul du temps de concentration ;
- Pluie efficace est calculée à partir d'une réduction des pertes.

#### • Construction d'un réseau d'isochrones

L'isochrone est une ligne, un lieu géométrique de points tels que le temps de parcours d'une goutte d'eau depuis chacun de ces points jusqu'à l'embouchure est le même. L'isochrone de la pluie éloignée représente le temps de concentration du bassin, c'est-à-dire que le temps mis pour que toute la surface du bassin contribue à l'écoulement dans l'exutoire après une averse supposée homogène. Le tracé du réseau consiste :

- Diviser le réseau d'écoulement en segments de longueur constante à partir de l'exutoire jusqu'à la partie amont des plus petits talwegs tributaires ;
- Après numérotation, chacun des points est caractérisé par trois paramètres :
  - . La distance à l'exutoire ;
  - . L'élévation relative ;
  - . Le temps de parcours de l'eau ; c'est ce paramètre qui apparaît sur la carte topographique du bassin versant.
- La vitesse de transfert des eaux

Le temps de parcours de l'eau du point  $i$ , jusqu'à l'exutoire est donné par la formule 1.7.

$$t_i = \frac{d_i}{V_m} \quad (1.7)$$

Avec :

- $d_i$  : Distance mesurée suivant le trajet de l'eau (Km);
  - $V_m$  : Vitesse moyenne de l'eau (Km/h).
- Tracer de façon aléatoire un certain nombre de points éparpillés sur le bassin et à partir de chacun, on dessine le parcours probable de l'eau jusqu'à la rencontre du cours d'eau ou de l'un des talwegs. Une fois tous les points sont identifiés par le temps de parcours, le tracé du réseau d'isochrones est déterminé par interpolation.

#### • Calcul du débit maximum

Pour l'application de la méthode, il faut représenter le bassin versant en isochrones et déterminer les surfaces partielles entre deux isochrones consécutives.

Le débit maximum probable  $Q_{\max,p\%}$  ( $m^3/s$ ) est donné par la formule 1.8.

$$Q_{\max,p\%} = \frac{S_{\max} \cdot I_{\text{eff}}}{3.6} \quad (1.8)$$

Avec :

$S_{\max}$  : Surface maximale débitante ( $Km^2$ ) ;

$I_{\text{eff}}$  : Intensité efficace (mm/h), donnée par la formule 1.9.

$$I_{\text{eff}} = \frac{P_{\text{eff}}}{t_{\text{eff}}} \quad (1.9)$$

Où :

$P_{\text{eff}}$  : Pluie efficace (mm) ;

$t_{\text{eff}}$  : Temps efficace (h).

Les surfaces débitantes  $S_i$  sont déterminées par planimétrie, correspondants à deux isochrones consécutives.

## 4. EROSION

L'érosion façonne la terre depuis qu'elle est émergée. Et depuis plus de 7000 ans, l'homme s'acharne à lutter contre l'érosion pour protéger ses terres contre l'agressivité des

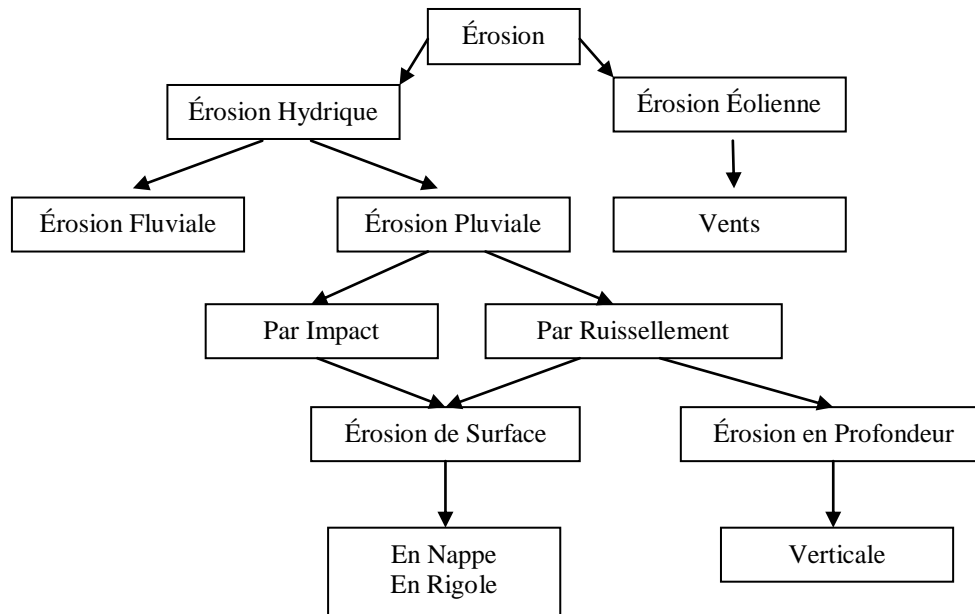
pluies et du ruissellement (Lowdermilk, 1953). Les études scientifiques sur l'érosion n'ont commencé qu'au début du 20<sup>ème</sup> siècle ; d'abord en Allemagne (Wollny, 1877), puis 40 ans plus tard, aux États Unis d'Amérique, à l'époque de la grande crise économique. Ce n'est que dans les années 1950, après le Congrès de Madison de l'Association Internationale de Science du Sol, que les méthodes américaines de mesures du ruissellement et de l'érosion sur petites parcelles se sont répandues en Afrique francophone (Fournier, 1960) et anglophone (Hudson, 1992), puis en Amérique latine, en Asie et en Europe. L'Amérique avait donc 20 ans d'avance sur le reste du monde pour collecter des données et développer un premier modèle empirique de prévision des pertes en terre à l'échelle de la parcelle (Wischmeier et Smith, 1960 à 1978). Ainsi est née la gestion conservatoire de l'eau et du sol (Roose, 1999). La seule prétention de ce modèle (USLE) est d'aider, à la décision, les ingénieurs qui doivent définir des systèmes de conservation des sols pour des conditions particulières de sol, de climat, de topographie et de couvert végétal. Il a déçu bien des chercheurs qui l'ont utilisé à tort, hors de son domaine de validité. Bien qu'il soit apparu finalement que l'équation USLE ne soit pas universelle, mais que son application est limitée là où l'énergie érosive ne parvient pas seulement des pluies (mais aussi du ruissellement comme en montagne et sur les sols riches en argiles gonflantes – ou de la gravité en cas de glissement de terrain) (FAO, 1999).

#### 4.1. Définition

L'Érosion vient de « **ERODER** », verbe latin qui signifie « ronger » (Rampon, 1987). L'érosion ronge la terre comme un chien qui s'acharne sur un os. D'où, l'interprétation pessimiste de certains auteurs qui décrivent l'érosion comme une lèpre qui ronge la terre jusqu'à ne laisser qu'un squelette blanchi : les montagnes calcaires qui entourent la Méditerranée illustrent bien ce processus de décharnement des montagnes dès lors qu'on les défriche et que l'on brûle leur maigre végétation (ex, Grèce). En réalité, c'est un processus naturel qui certes, abaisse toutes les montagnes (d'où le terme de « dénudation rate », vitesse d'abaissement du sol des géographes anglophones) mais en même temps, l'érosion engraisse les vallées, forme les riches plaines qui nourrissent une bonne partie de l'humanité. Il n'est donc pas forcément souhaitable d'arrêter toute érosion, mais de la réduire à un niveau acceptable, tolérable (Roose, 1999). L'érosion est un phénomène spatial et temporel (Rampon, 1987), consistant en un transport et en un dépôt des particules du sol sous l'effet d'agent externes : pluie ; vent ; température ; homme (Gréco, 1966).

## 4.2. Différents types d'érosion

Il y a deux types d'érosion, érosion hydrique et érosion éolienne. La figure 1.3 montre les différents types d'érosion



**Figure 1.3.** Différents types d'érosion

## 4.3. Formes d'érosion

L'érosion des sols passe par différentes phases et se manifeste par de multiples façons.

### 4.3.1. Érosion en Nappe

Elle résulte d'un détachement d'éléments constitutifs du sol par la pluie et le ruissellement qui est relativement homogène dans l'espace. Le mélange d'eau et de terre s'écoule le long des pentes comme une nappe, et le sol se trouve décapé par des couches successives, ce qui provoque un appauvrissement de terre en éléments nutritifs et une mauvaise rétention en eau.

### 4.3.2. Érosion en Rigole

Consiste essentiellement à un entrainement des particules du sol par les eaux de ruissellement qui se concentrent en filets liquides dont le débit est apte à engendrer une action érosive. C'est l'action de ces filets d'eau qui provoquent les rigoles dans le sol.

### 4.3.3. Ravinement



Le ravinement est dû à un ruissellement concentré qui se produit lorsque les rigoles convergent, le ravin prend une forme V car il se forme dans un matériau dont la résistance est relativement homogène et il prend la forme U dès qu'il se situe au niveau supérieur de la roche mère.

#### **4.3.4. Mouvement en masse**

Il résulte de l'action de l'eau qui s'étend à la partie interne du sol. On constate que les loupes de terres, plus ou moins importantes se détachent. Ces masses terreuses sont susceptibles de se transformer en un fluide plus ou moins visqueux. Cette action peut s'exercer à différents niveaux et de différentes manières ; ceci détermine les différentes formes des mouvements de masse : coulée boueuse, reptation des sols, éboulement, glissement de terrain et érosion souterrains.

#### **4.4. Érosion en nappe**

On parle d'érosion en nappe ou aréolaire (sheet erosion) parce que l'énergie des gouttes de pluie s'applique à toute la surface du sol et le transport des matériaux détachés s'effectue par le ruissellement en nappe. C'est le stade initial de la dégradation des sols par érosion

##### **4.4.1. Formes et symptômes de l'érosion en nappe**

L'érosion en nappe entraîne la dégradation du sol sur l'ensemble de sa surface. De ce fait, elle est peu visible d'une année à l'autre puisqu'une érosion importante de 15 à 30 t/ha/an correspond à une perte de hauteur de 1 à 2mm (Roose, 1999). Celle-ci est peu significative par rapport au foisonnement des terres, à la rugosité du sol après les travaux culturaux ou par rapport à la respiration. L'érosion en nappe peut entraîner un décapage de la majorité de l'horizon humifère en quelques dizaines d'années. Le signe le plus connu de l'érosion en nappe est la présence de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés, les plus agressés des champs (haut de collines, et rupture de pente). Le deuxième symptôme est la remontée des cailloux en surface par les outils de travail du sol. Il s'agit d'une fonte de l'horizon humifère et d'un travail profond du sol qui remonte en surface les cailloux. Après quelques pluies, les terres fines sont entraînées par les pluies soit par drainage en profondeur, soit par érosion sélective, tandis que les cailloux trop lourds pour être emportés s'accumulent à la surface du sol (Roose, 1973 ; Poesen, 1987). Si le sol contient du sable, la battance des gouttes de pluie va détacher des particules des mottes, les raboter et former d'une part des

pellicules structurales de battance ou d'érosion (réarrangement superficiel des mottes) et des croûtes de sédimentation (FAO, 1999).

Les conséquences de l'érosion en nappe sont :

- Nivellement de la surface du sol par dégradation des mottes et remplissage des creux. Il s'ensuit des croûtes diverses, lisses et blanchies.
- Squelettisation des horizons superficiels par perte sélective des matières organiques et des argiles, laissant en place une couche de sable et de gravier, plus claire que l'horizon humifère sous-jacent.
- Décapage de l'horizon humifère laissant des plages de couleur claire : l'horizon minéral sous-jacent apparaît à l'air libre.

#### **4.4.2. Cause et les processus d'érosion en nappe**

La cause de l'érosion en nappe est l'énergie de battance des pluies sur les sols dénudés (Ellison, 1944). L'arrachement des particules de terre vient de l'énergie des gouttes de pluie, lesquelles sont caractérisées par une vitesse de chute (fonction de leur hauteur de chute et de la vitesse du vent) et par un certain poids, fonction de leurs diamètres. Au bout de 10m de chute, la vitesse des gouttes de pluie atteint 90% de la vitesse finale, déterminée par l'équilibre entre l'attraction universelle et la résistance à l'air de la surface portante de la goutte (FAO, 1999). Le vent peut augmenter l'énergie des gouttes de pluie de 20 à 50% (Lal, 1975) mais les turbulences réduisent la taille des gouttes de pluie à 3-5 mm de diamètre. Sous la cime des grands arbres, l'énergie des gouttes de pluie est souvent plus forte que dans la parcelle cultivée car les gouttes se réunissent sur les ligules des feuilles, formant des gouttes plus grosses (Valentin, 1982). En absence de données régionales sur l'énergie des pluies, on peut utiliser les données de Wischmeier et Smith, 1978.

Le déplacement des particules se fait d'abord par effet « Splash » à courte distance et ensuite par le ruissellement en nappe formant des stries visibles. La battance des gouttes de pluie envoie des gouttelettes et des particules dans toutes les directions mais, sur les pentes, la distance parcourue vers l'amont est inférieure à la distance parcourue vers l'aval, si bien que dans l'ensemble, les particules migrent par saut vers l'aval. Les expériences de Christoï, 1961 à la station IRHO de Niangoloko, au sud du Burkina Faso ont montré que les particules de sol peuvent sauter jusqu'à 50cm de haut et jusqu'à plus de 2m de distance durant les gros orages de fin de saison sèche. Ce n'est qu'après formation des flaques et débordement de l'eau non

infiltrée d'une flaque à l'autre, que naît le ruissellement en nappe. Celui-ci s'étalant à la surface du sol gardera une faible vitesse même sur des pentes de 5 à 10% à cause de la rugosité du sol (mottes, herbes, feuilles, racines, cailloux, etc...) qui l'empêchent de dépasser la vitesse limite de 25cm. Au delà de 25cm, le ruissellement, peut non seulement transporter des sédiments fins, mais aussi attaquer le sol et creuser des rigoles hiérarchisées où la vitesse augmente rapidement. On passe alors à l'érosion linéaire (griffes, rigoles et ravins).

#### 4.5. Quantification de l'érosion

L'ampleur de l'érosion, la dégradation spécifique et les charges sédimentaires des bassins versants, ont une interaction complexe entre la topographie, la géologie, le climat et la végétation du sol. Plusieurs chercheurs : Heuch (1970), Roose (1976), Morgan (1986), Vogt (1991) et Julien et al (2009), ont démontrés que la pluie est l'agent principal de l'érosion.

L'équation universelle des pertes en sols a été mise au point par Wischmeier et Smith en 1978, ensuite elle a été révisée et modifiée par Renard & Simanton (1990), dans le projet (Water Erosion Prediction Project WEPP) afin d'apporter des modifications en hydrologie, érosion de surface et en informatique. D'après Julien et al (2009), l'USLE a été proposée pour les petits bassins versants, mais elle peut être aussi utilisable d'une façon simple pour les grands bassins versants. L'utilisation étendue sur de grandes échelles a été utilisée par Williams & Berndt (1972), Boyce (1975), Renfro (1975), Frenette & Julien (1986) et Julien (2009) qui a même démontré que cette équation peut être applicable dans le bassin Méditerranéen.

La mesure exacte de l'érosion est difficile. Elle porte aussi bien sur les matières solides dissoutes que sur celles en suspension dans l'eau ainsi que sur les matériaux charriés au fond du lit des rivières. On peut tout au plus arriver à une appréciation relative subjective des vitesses d'érosion. Or l'amélioration des connaissances exige de passer d'un stade descriptif et qualitatif à un stade quantitatif. Des mesures précises de perte en terre effectuées en différents points rendent possible une approche quantitative.

Les problèmes posés par le ruissellement et l'érosion sont nombreux et variés. Selon Roose (1997), trois hypothèses sont posées quant au ruissellement et à son origine, qui sont :

- Le ruissellement se développe lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration de la surface du sol ;

- Le ruissellement ne se déclenche que par saturation de l'horizon supérieur ;
- Le ruissellement dépend de la contribution d'une partie du bassin.

L'érosivité des pluies est la capacité de la pluie à causer des pertes en sol par ruissellement, donc à provoquer un détachement et un transport des particules. L'action de la pluie sur le sol est également appelée « agressivité » (Hudson, 1981). L'analyse des pluies ne peut être réalisée qu'après une séparation en séquence pluvieuses (Wischmeier et Smith, 1960, Boiffin, 1984).

#### 4.5.1. Équation Universelle des Pertes en Sols

Le procédé de WISCHMEIER et SMITH pour la détermination de l'érosion moyenne annuelle du sol est plus connue sous le nom d'USLE (Universal Soil Loss Equation). Cette équation développée dans les années 1930 à 1952 sur la base de plus de 10.000 années de visualisation de plusieurs lieux des USA, est aujourd'hui utilisée dans le monde entier malgré sa base empirique. Cette formule d'évaluation n'est cependant adaptée qu'à la description de l'érosion en nappe ; l'érosion en ravine linéaire et les différentes formes d'érosion des récepteurs ne peuvent pas être saisies. De plus, pour la validation des résultats ainsi obtenus, des mesures parallèles qui ne livrent pas absolument d'information sur une zone plus grande doivent être effectuées durant des années. L'USLE est cependant tout à fait utile pour la description de différents versants utilisés pour l'agriculture puisqu'elle a été développée à cet effet.

Dans les parcelles dites standard de WISCHMEIER, l'érosion naturelle de longues années est mesurée. Ces parcelles standards ont une longueur de 22.12 m et une pente uniforme de 9%. Ces parcelles sont travaillées en direction de la pente conformément à la préparation du lit de semence pour céréales, ne sont pas cultivées. Un encroûtement de la surface doit en outre être empêché. WISCHMEIER et SMITH sont arrivés au résultat que seul six facteurs influencent considérablement l'érosion du sol:

- Index d'érosion « **R** »
- L'érodibilité du sol « **K** »
- Indice de longueur et raideur de la pente « **L.S** »
- Indice de culture « **C** »
- Indice de conservation des eaux et des sols « **P** ».

La formule U.S.L.E. cités dans l'équation 1.10.

$$A = 1,3 R K (L.S) C P \quad (1.10)$$

- **Perte de terre « A »**

Exprimée en T /ha pour une période donnée

- **Index d'érosion « R »**

Appelé aussi facteur de pluviosité, l'index d'érosivité de la pluie ou l'index de pluie, caractérise l'agressivité de la pluie et permet d'estimer à partir d'une averse, la quantité de terre pouvant être arrachée à un sol. Selon Touaibia (1999), le facteur R de Wischmeier est le plus universel et le plus connu, Zahar et al (2001) confirment cette étude. Il peut être calculé pour une pluie ou pour des pluies d'une période donnée. Il s'obtient en sommant pour la période considérée, les sommes des valeurs R caractérisant chaque épisode pluvieux. Généralement, on utilise un index de pluie moyen annuel calculé d'après les pluies de plusieurs années. Il est donné par la formule 1.11.

$$R = E_g \cdot I_{30mn} \quad (1.11)$$

Il peut être calculé dans le système métrique ou en unités américaines. Il existe une expression permettant le passage d'un système à l'autre.

Le calcul de R nécessite la connaissance de deux facteurs à savoir :

- Énergie globale «  $E_g$  » de la pluie en m.T/ha ;
- Intensité maximale «  $I_{30mn}$  » observée en 30 mn en cm/h.

Le procédé de calcul de l'index R consiste à :

- **Calcul de l'énergie globale  $E_g$**
- Dépouiller les pluviogrammes ;
- Déterminer les intensités homogènes de la pluie «  $I_h$  », en cm/h, à partir du pluviogramme correspondant ;
- Calculer l'énergie unitaire de la pluie par unité d'eau tombée «  $E_u$  » en m.T/ha/cm ;  
 $E_u$  est donnée par Wischmeier dans la formule 1.12.

$$E_u = 210 + 89 \log I_h \quad (1.12)$$

- Calculer l'énergie de la pluie d'intensité homogène  $E_h = E_u \cdot h$  en m.T/ha où h est la lame d'eau précipitée pendant la durée d'intensité homogène ;
- Calculer l'énergie globale  $E_g$  (formule 1.13)

$$E_g = \sum(E_U \cdot h_i) \quad (1.13)$$

- **Détermination de l'intensité maximale  $I_{30\text{mn}}$**

- Déterminer sur pluviogramme l'intensité maximale «  $I_{30\text{mn}}$  » observée pour une durée de 30mn.

- **L'érodibilité du sol « K »**

Il caractérise la plus ou moins grande résistance relative d'un sol à l'érosion. Les valeurs obtenues expérimentalement représentent la perte de terre en T (US)/acre/unité de R quand tous les autres coefficients du second terme de l'équation ont la valeur de 1 ; il correspond à une parcelle en jachère nue, continuellement travaillée, longue de 22.12m avec une pente standard de 9%, n'ayant pas reçue de matière organique depuis au moins 3 ans (C=1), avec un travail du sol effectué dans le sens de la pente (P=1).

La première difficulté pour la mesure de « K » consiste à reconnaître sur place les sols susceptibles d'avoir un comportement différents vis-à-vis de l'érosion.

Les types extrêmes de sols n'ont pas fait l'objet d'études américaines. Il s'agit pour les sols fortement sensibles à l'érosion, de marnes salées et pour les plus résistants de Rendzines qui n'ont plus guère à perdre de l'érosion. Les valeurs de K ont été déterminées pour 23 types de sol sur lesquels des mesures continues d'érosion ont été prises. Selon le monogramme de Wischmeier (Wischmeier, 1978), la valeur de K varie de 0 à 70%.

- **Indice de longueur et raideur de la pente « L.S »**

Il permet de comparer les conditions topographiques observées à des conditions standards. Il caractérise la pente et la longueur de pente. C'est le rapport des pertes de sol d'un champ ayant une certaine dimension de pente, aux pertes de terre d'un champ de pente et longueur de pente standard, toutes les autres conditions étant égales par ailleurs.

Une pente de 9% sur une longueur de 22.12m représente le standard de longueur et le degré de pente, donc l'unité.

Wischmeier a établi la relation (1.14) existant entre les valeurs du facteur LS et les paramètres de pente.

$$LS = \frac{\sqrt{f}}{100} (0.76 + 0.53p + 0.76 p^2) \quad (1.14)$$

Où :

- f : longueur de pente ;
- p : pente exprimée (%).

Pour faciliter l'utilisation de cette équation, les auteurs ont établi un graphique donnant LS en fonction du pourcentage (%) et de la longueur de pente, il varie entre 0.1 et 20 selon Wischmeier (1978).

- **Indice de culture « C »**

Il permet de tenir compte du fait que les pluies agissent proportionnellement plus sur un sol nu qu'un sol couvert. Il caractérise la culture : nature et succession des cultures, degré de fertilisation minérale (niveau de productivité) ou souvent la nature de la protection du sol au moment où les pluies sont intenses. C'est un facteur qui évolue selon l'âge de la plante (effet de couverture). Les américains l'évaluent pour les différentes périodes culturales F, 1, 2, 3, 4 où :

- Période F : jachère nue (du labour qui précède le semis jusqu'à semailles) ;
- Période 1 : lit de semence (du semis à 1 mois plus tard) ;
- Période 2 : de 1 à 2 mois après le semis de printemps ou d'été ;
- Période 3 : végétation (période de germination et de maturation), elle se termine l'ors de la récolte ;
- Période 4 : résidus ou chaume ou période d'éteule (elle sépare la récolte des nouvelles préparations)

C'est le rapport des pertes de sol d'une terre cultivée dans des conditions bien définies, aux pertes de sol d'une jachère travaillée ( $C=1$ ), toutes les autres conditions étant égales par ailleurs. Les valeurs de C sont données par les tables américaines et ils varient de 0 à 1 (Wischmeier, 1978).

- **Indice de conservation des eaux et des sols « P ». C.E.S (Service Conservation des Sols).**

Il caractérise les pratiques de C.E.S qui retiennent une certaines proportion de terre. C'est le rapport des pertes de sol d'un champ sur lequel on utilise des pratiques conservatrices aux pertes de terre d'un champ cultivé en ligne suivant la plus grande pente, toutes autres conditions étant égales par ailleurs, selon Wischmeier (1978), il varie de 0.3 à 90.

En conclusion, l'équation de Wischmeier permet de quantifier l'érosion en nappe des terres cultivées.

#### **4.5.1.1. Limites intrinsèques de la formule USLE**

- Cette formule ne s'applique qu'à l'érosion en nappe puisque la source d'énergie est la pluie
- Le type de paysage : ce modèle a été testé et vérifié dans des paysages de pénéplaines et de collines sur des pentes de 1 à 20% à l'exclusion des montagnes jeunes, en particulier des pentes supérieures à 40% où le ruissellement est une source d'énergie plus grande que les pluies et où les mouvements de masse sont importants.
- Les types de pluies : les relations entre l'énergie cinétique et l'intensité des pluies utilisées généralement dans cette formule ne sont valables que dans les plaines américaines. Elles ne sont pas valables en montagnes mais on peut l'utiliser pour des différents indices d'érosivité des pluies R.
- Elle ne s'applique que pour des données moyennes sur 20 ans.
- Elle néglige certaines interactions entre les facteurs.

Plusieurs travaux ont été réalisés sur l'équation universelle des pertes en sols, en Algérie et dans d'autres pays dans le monde. Elle a été appliquée en Algérie dans le Constantinois (Sarab, 1978), les résultats obtenus quant à la valeur de l'érosion sont très variés allant de 2 à 12 T/ha.an, selon la nature et la profondeur du sol. La durée d'expérimentation étant très courte (4 mois) les résultats obtenus restent en conséquence pris avec précaution quant à leur interprétation. Les travaux de Gomer (1996), dans le bassin versant de la Mina dans le cadre de la coopération Algéro-Allemande, de même que les travaux de Touaibia (1999) sur ce même bassin ont abouti à un résultat similaire fixant le seuil tolérable de l'érosion à 10 T/ha, rejoignant les conclusions de Tixeront (1960) réalisé sur le transport solide en Algérie et en Tunisie. Roose et al (1997) se sont perchés sur la problématique de l'érosion en Algérie mais en s'intéressant à la gestion conservatoire des eaux et des sols. A l'échelle internationale citons les travaux de Bergaoui et al (1996) à l'échelle d'un micro-bassin en Tunisie ; les travaux de Dogan et al (1997) sur la lutte antiérosive en Turquie ; les travaux de Zahar et al (2001) en Tunisie, où ils ont travaillé



uniquement avec l'index d'érosivité R en suppose que les autres paramètres sont constants, simulant les averses dans un champ expérimental.

#### 4.5.2. Autres travaux sur l'indice d'érosion

##### 4.5.2.1. Indice de Fournier (1960)

A la suite des travaux effectués sur 140 rivières en Europe, Fournier et Henin (1959) définissent un coefficient ou un indice qui exprime l'action érosive de la pluie à l'échelle d'un bassin versant. Fournier, en 1960, a montré que le sol et la végétation ont pour déterminant le climat et que ce dernier est suffisant pour estimer l'érosion des grands bassins versants.

Cet indice est simple à utiliser mais il ne peut pas remplacer le facteur (R) de Wischmeier car ce dernier prend en compte tous les paramètres qui provoquent l'érosion pluviale.

Cet indice met en corrélation la dégradation spécifique avec un paramètre exprimant la concentration pluviale.

$$C = \frac{N_m^2}{N_a} \quad (1.15)$$

Avec :

$N_m$  : Hauteur de pluie du mois le plus humide (mm)

$N_a$  : Hauteur de pluie annuelle (mm)

##### 4.5.2.2. Formule de Tixeront (1960)

Tixeront (1960), dans ses travaux sur le transport solide en Algérie et en Tunisie, a classifié les bassins versants selon le degré d'érosion spécifique  $E_s$ :

Si $E_s = 0 \div 3,2$ T/ha.an	Bassin Versant à faible érosion
Si $E_s = 3,2 \div 10$ T/ha.an	Bassin Versant à moyenne érosion
Si $E_s = 10 \div 32$ T/ha.an	Bassin versant à forte érosion
Si $E_s \geq 32$ T/ha.an	Bassin Versant à érosion excessive

##### 4.5.2.3. Indice de Heusch (1970)

Des mesures de concentration en matière solide dans les oueds et leurs débits ont été effectuées durant plusieurs années (4 à 10 ans) sur 13 stations du bassin de Sebou (Maroc). Heusch a travaillé sur l'érosion au Pré-Rif (Maroc) utilisant plusieurs méthodes : analytique et synthétique.

A partir des cartes des différents facteurs de l'érosion, il a été possible de calculer l'érosion au champ pour différents secteurs du Pré-Rif. Les résultats de ce calcul sont comparés dans des tableaux d'une part l'index pluie « R » de Wischmeier et d'autre part l'érosion spécifique mesuré sur la rivière la plus proche.

Il a constaté que les pertes en terre calculées par cette méthode sont extrêmement fortes et d'une telle importance qu'un examen sommaire du terrain que ces valeurs calculées sont fausses par excès, cet échec était prévisible.

Une lecture attentive des travaux de Wischmeier montre que l'auteur exclut explicitement de la zone d'application de sa formule

- La Californie au climat méditerranéen ;
- Les montagnes rocheuses dont les pentes dépassent 25%.

Ainsi, pour remédier à cet état de chose, quatre stations ont été créées au Pré-Rif.

Ces stations auront pour but de permettre, dans une première étape, l'élaboration d'une formule locale de calcul de l'érosion et de sa quantification des différents facies de l'érosion quelque soit le type, de façon à donner des équivalents chiffrés entre les divers facies dû à la solifluxion, au ravinement et au sapement.

#### **4.5.2.4. Indice de ( $K_e > 1$ ) de Hudson (1971)**

Après ses travaux effectués au Zimbabwe, Hudson (1971) trouve que l'index  $K_e > 1$  convient mieux que l'index d'érosivité « R » de Wischmeier. L'indice  $K_e > 1$  représente l'énergie cinétique de la pluie tombant à des intensités supérieures à 1 inch (1 inch/h = 25mm/h).  $K_e$  est exprimé en ( $j/m^2$ ) ou (T.m/ha). Hudson trouve un coefficient de corrélation de 0.94 entre  $K_e > 25$  : et l'érosion du sol.

Son calcul est semblable à l'index « R » de Wischmeier pour : ( $I > 25$  mm/h).

#### **4.5.2.5. Indice de Roose (1977)**

Roose (1977), en travaillant en Afrique de l'Ouest constate qu'il existe une relation simple entre l'indice moyen ( $R_{am}$ ) sur pluie annuelle ( $H_{am}$ ) durant la même période.

L'erreur commise sur cet indice est de 5%. D'autres auteurs (in Roose, 1977) ont trouvés une régression qui permet d'estimer « R » en fonction de la hauteur de pluie (H) et de

son intensité maximale en 30 minutes ( $I_{30}$ ). Il paraît qu'elle ne s'applique que pour l'Afrique de l'Ouest.

Les indices de Fournier, Roose, ont l'avantage d'être simples à utiliser et ne demandent pas le dépouillement pluviographique. Cet indice s'écrit dans la formule 1.16.

$$\frac{R_{am}}{H_{am}} = 0.5 \pm 0.05 \quad (1.16)$$

#### 4.5.2.6. Indice ( $AI_m$ ) de Lal (1976)

A la suite des travaux effectués à l'Ouest du Nigeria, Lal (1976) développe un indice où il réunit comme paramètre, la quantité totale de la pluie  $A$  en cm et l'intensité maximale  $I_m$  en cm/h. Lal fait remarquer que cet indice a de considérables avantages par rapport aux indices  $EI_{30}$ , de Wischmeier.

De même, Lal (1976), a montré que le test d'efficacité des indices  $KE > 25$ ,  $R$  et  $AI_m$  ne donne pas une grande différence dans la valeur du coefficient de corrélation établi entre eux et les pertes en sol.

Roose (1977) remarque qu'aucun de ces indices d'érosivité climatique ne convient vraiment dans le cas des sols gonflants, des fortes pentes, de l'érosion en ravine, et que l'énergie cinétique et l'intensité maximale en 30 minutes sont les paramètres climatiques qui permettent d'interpréter au mieux l'érosion en nappe.

L'index  $AI_m$  s'écrit dans la formule 1.17.

$$AI_m = [\sum_1^{12} (\sum_1^n a i_m)] \quad (1.17)$$

Avec:

- $AI_m$  exprimé en cm/h;
- $a$ : Hauteur de pluie (cm) ;
- $i_m$ : Intensité de pluie maximale cm/h ;
- $n$  : Nombre de jours pluvieux / mois.

#### 4.5.2.7 Formule de Touaibia et al (2003)

Une étude approfondie sur l'érosion hydrique à différentes échelles dans le bassin versant de l'Oued Mina, a permis de trouver une relation fonctionnelle entre l'érosion

spécifique, la surface et le couvert végétal. Cette équation formulée en (1.18), n'est transposable qu'en zone semi-aride où elle a été élaborée.

$$E_s = 19,36 S^{-0.134} C_{veg}^{-0.308} \quad (1.18)$$

## **CONCLUSION**

Une bonne étude de la transformation pluie-débit et une bonne connaissance de l'érosivité du sol, aident à mieux connaître le phénomène et bien centrer le problème pour trouver une solution aux phénomènes d'érosion connus dans la région.

Cette revue bibliographique a permis de mieux comprendre la problématique qui en découle, de mieux connaître les modèles utilisés de par le monde et en Algérie. Cependant, de tous les modèles consultés, nous avons retenu ceux les plus utilisés et qui peuvent être appliqués dans le contexte algérien et particulièrement en climat sub-humide.

**CHAPITRE II**  
**PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE**

---

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

### 1. INTRODUCTION

Ce chapitre décrit la zone d'étude qu'est la Commune de Sidi Rached, en présentant le milieu physique, la localisation géographique ainsi que les caractéristiques morphologiques comme le relief, la géologie, les caractéristiques climatologiques et l'ensemble des données disponibles et retenues pour la transformation pluie-débit.

La commune de Sidi Rached a été choisie pour différentes raisons :

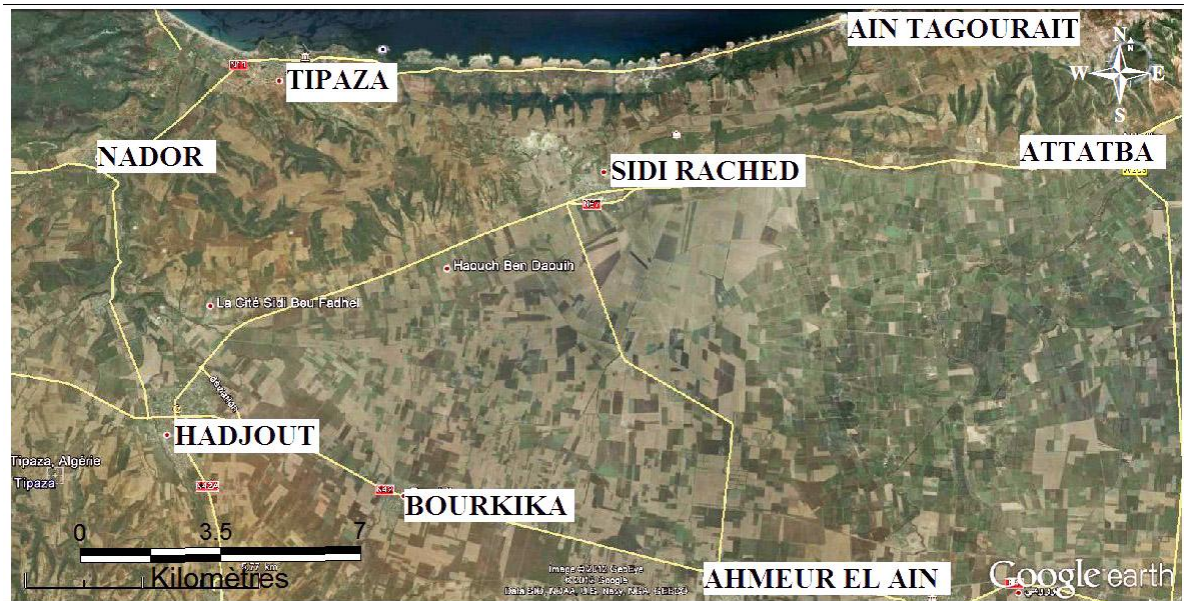
- Sujette aux inondations, elle présente un bombement en amont et un terrain plat en aval (lac Halloula).
- C'est une région agricole, lors des averses, il y a de grandes quantités de sédiments qui sont transportées d'amont en aval et déposés sur la route nationale, bloquant la circulation.

### 2. SITUATION GÉOGRAPHIQUE

La commune de Sidi Rached se trouve à 80 Kms au Nord-Ouest de la capitale Alger. Son territoire s'étend sur une surface de 4128.74ha. Elle est située géographiquement à cheval (figure 2.1), sur les collines du Sahel qui surplombent le littoral et la plaine de la Mitidja, dans sa partie Nord-Ouest. Elle appartient administrativement à la Daïra de Ameer El Ain, (wilaya de Tipaza) dont elle est équidistante par rapport aux deux chefs-lieux (Tipaza et Ameer El Ain) d'une dizaine de kilomètres environ. La zone d'étude est traversée dans sa partie médiane par la route nationale RN67 qui la relie à Hadjout à l'Ouest et à Attatba puis Koléa à l'Est. Elle communique avec le littoral au Nord par le chemin de wilaya CW106, qui la relie à Tipaza et le chemin de wilaya CW40 à Ain Tagourait au travers du relief collinaire qui forme le bourrelet côtier du Sahel (URBAB, 2007).

Elle est limitée par:

- Communes de Tipaza et Ain Tagourait au Nord.
- Commune d'Attatba à l'Est.
- Commune de Hadjout à l'Ouest.
- Communes de Bourkika et Ameer El Ain au Sud.



**Figure 2.1.** Situation de la zone d'étude  
(Image satellitaire non traitée, Landsat, 2012, Algérie N-32-35)

### 3. ÉVOLUTION HISTORIQUE

Sidi Rached, autrefois MONTEBELLO, est une agglomération de création coloniale qui remonte à 1869. Bien avant les Français, les Romains se sont intéressés à cette région puisqu'ils sont les premiers à penser à l'assèchement du Lac Halloula en creusant un Tunnel vers la mer drainant ce lac pour le rendre cultivable.

Cette œuvre est reprise et achevée par les colons en 1930 en y apportant les aménagements nécessaires. L'intérêt purement agricole de cette région n'a jamais été démenti. La multitude de fermes coloniales sur le territoire communal en est la preuve. Leurs activités consistant en l'exploitation de ces terres à hautes potentialités et dont les richesses étaient destinées à la métropole. Après l'indépendance, la ville s'est quelque peu densifiée avec la construction de quelques infrastructures et habitats (URBAB, 2007).

### 4. ANALYSE DU SITE NATUREL

#### 4.1. Aperçu général sur la région

- **Du point de vue morphologique :** La région d'étude est marquée par deux types de reliefs :
  - **Le Sahel :** Occupe longitudinalement la partie Nord du site, soit 35% de la superficie. La partie Ouest, montre des escarpements plus ou moins prononcés par rapport à la partie Est où une régularité en forme de mamelons donnant naissance à des collines assez larges mais

avec des pentes plus douces. Ce phénomène s'explique par les manifestations tectoniques (orogéniques) qui ont donné naissance au Djebel Chenoua dont les premiers contreforts se manifestent à 7 Km à l'Ouest de la limite communale. La plus haute altitude rencontrée dans la zone d'étude est de 293 m, située vers le Nord-Est de la ville, lieu choisi par JUBA II pour inhumer son épouse, dont le nom est le Tambour de la Chrétienne.

- **La plaine** : représente 65% de la superficie de la commune. Elle se distingue par un relief très plat, et dont la dénivelée n'est que de 5m environ. C'est au sud immédiat de là, que se trouve le lac Halloula dont l'assèchement est du à la diminution de la pluviométrie observée ces dernières décennies. Pendant les grandes crues, les eaux du lac sont drainées par un système de canaux vers un tunnel de 3 Km de long qui évacue les eaux recueillies à l'extrême Nord de la plaine vers la mer.
- **Du point de vue géologique** : Une lecture sur la carte géologique de la région de Tipasa à l'échelle 1/50000 (figure 2.2) permet de décrire la géologie: la région de Sidi Rached est représentée par des roches sédimentaires d'âge Tertiaire, sur lesquelles se sont installées les formations superficielles d'âge quaternaire. La série stratigraphique reconnue montre la succession géologique suivante :

#### - Le Tertiaire

- Le Pliocène inférieur : Les dépôts sont développés au Nord-Ouest de la région d'étude. Ils sont constitués à la base par des formations gréseuses. Cette série est surmontée par des marnes et des argiles brunâtres.
- Le Pliocène supérieur : Les dépôts se rencontrent au Nord-Est de la zone d'étude. Ils sont constitués du bas vers le haut par :
  - Des roches calcaires à calcaro-gréseuses,
  - Un faciès gréseux à argilo-gréseux.
  - Une formation argileuse ou argilo-sableuse.

#### - Le Quaternaire

- Le Pléistocène : Cette formation occupe une grande surface dans notre région d'étude. Elle est développée au centre, à l'Est et à l'Ouest. Les dépôts sont constitués principalement par des alluvions anciennes (argiles brunes rougeâtres) provenant du comblement de la Mitidja.



- Formations récentes : Les dépôts sont principalement développés à l'extrémité Nord-Est de la zone d'étude. Ils sont constitués essentiellement par un faciès sablo-argileux plus au moins rubéfiés.
- Formations actuelles : Elles sont principalement développées au Sud de la région et constituées par des limons et des dépôts de marais (lac Halloula). A l'extrémité Sud-Ouest, se trouvent des dépôts torrentiels.

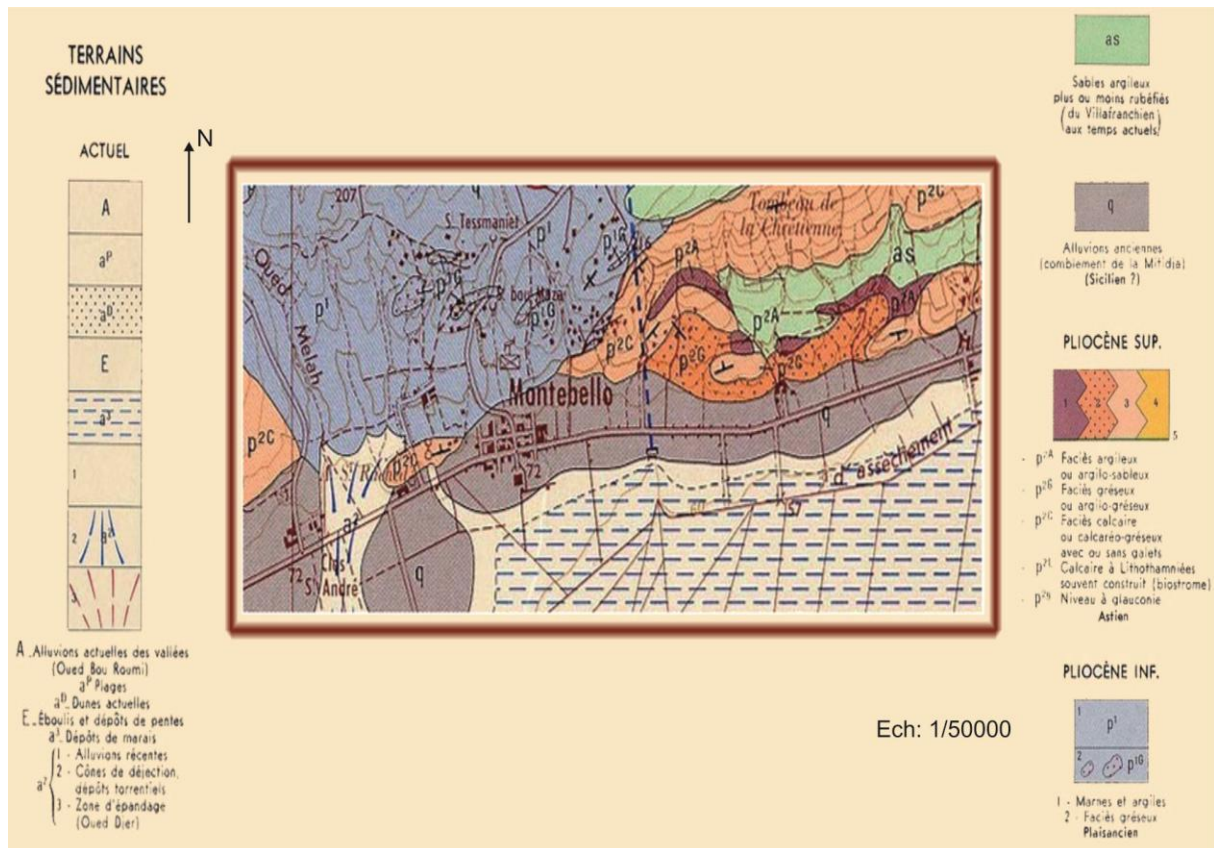


Figure 2.2. Géologie de la région d'étude

Extrait de la carte géologique 1/50 000 de Tipaza (d'après Ayme A, 1962)

- **Du point de vue hydrologique :** Les processus hydrodynamiques externes ont permis le remplissage en matériaux détritiques de la zone Nord de la plaine Mitidjienne. Ces derniers ont été arrachés de la roche mère du flanc bourrelet, puis transportés vers l'aval où ils ont été déposés. Le degré de ravinement des lits d'oued est plus accentué à l'Ouest du site urbain du fait que le terrain est très accidenté. Vers la partie basse, plusieurs oueds sillonnent la plaine (Oued Sidi Ahmeur, Oued Djer, Oued Rassoula, Oued Ouerian). Leurs lits se confondent avec le relief et leur eau s'infiltré ou alimente le lac, tandis que d'autres oueds rejoindront plus bas l'Oued Ouérien dont le lit est calibré pour permettre le drainage des eaux recueillies le long de son parcours.

Un important réseau de drainage sillonne le lac HALLOULA et sa direction converge vers le tunnel qui évacue toutes les eaux vers la mer désengorgeant ainsi le lac. Il existe également plusieurs sources disséminées, d'Est en Ouest, au niveau de la zone médiane des collines, quoique la plupart soient tarées suite à une insuffisance de la pluviométrie.

- **Du point de vue agricole :** La partie accidentée du territoire que représente le flan Sud du bourrelet Sahélien est couverte dans sa partie la plus pentue, par les forêts et maquis. Sur les pentes plus douces, la céréaliculture est pratiquée occupant une grande part du plan culturel. En troisième priorité vient la culture arboricole qui occupe quelques parcelles. Le maraîchage se pratique aussi quelques peu sur la bande longitudinale à la route nationale ; entre la route nationale et les premières pentes. La partie plaine de la commune est considérée comme zone à très fortes potentialités agricoles

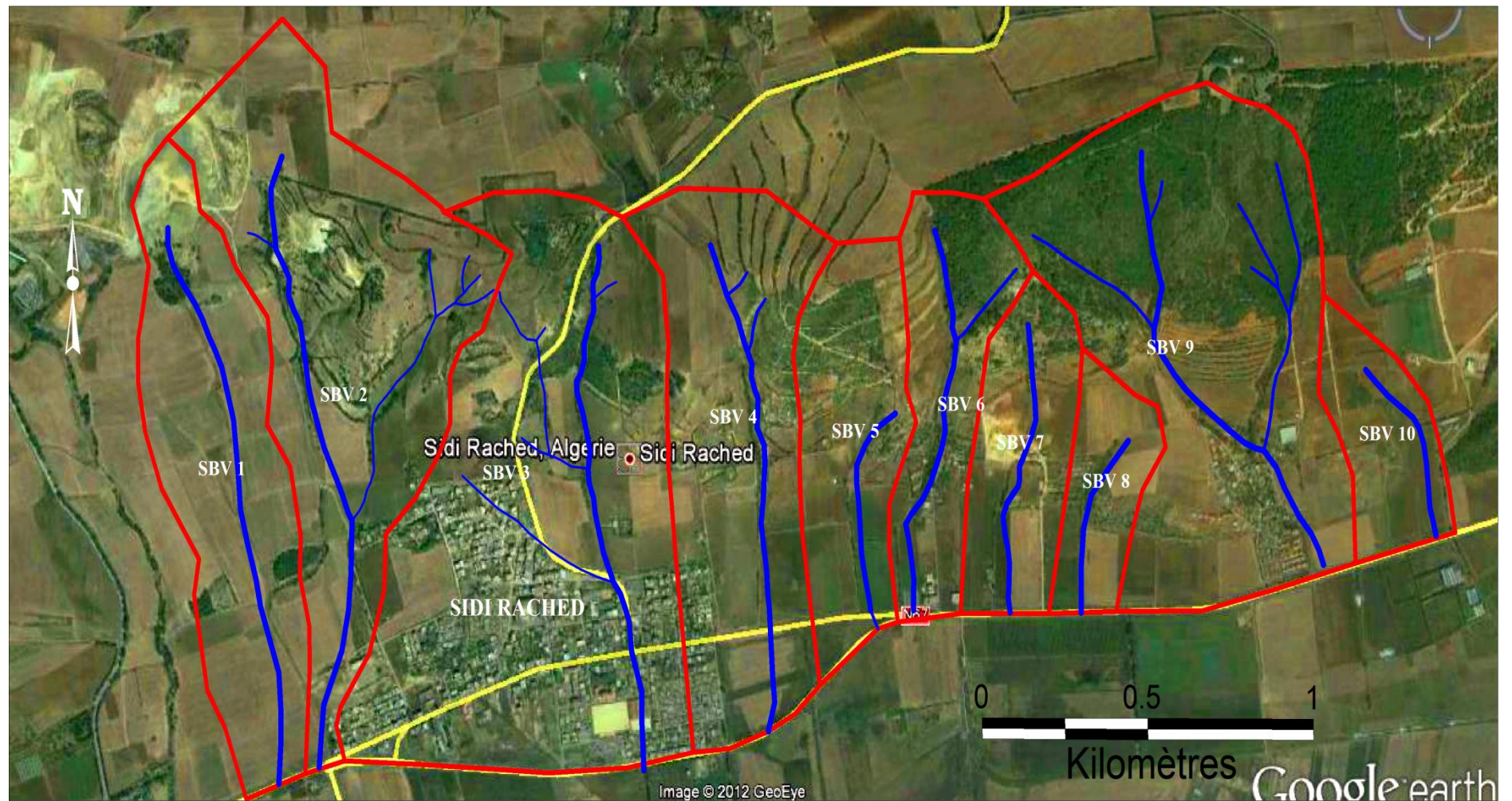
#### 4.2. Caractéristiques de la zone d'étude

L'identification d'un bassin versant est tributaire des données topographiques (levés et cartes topographiques,...) et du réseau hydrographique. D'une façon générale, un bassin versant ou un bassin d'alimentation est une entité topographique délimitée par la ligne de partage des eaux. Il est défini comme la totalité de la surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents en amont de cette section (Touaibia, 2004).

Dans cette étude, on ne s'intéresse qu'à une partie de la commune de Sidi Rached qui s'étend sur 14Kms et une surface de 500ha. Cette partie comprend 10 sous bassins versants (figure 2.3) déversant tous sur la route nationale RN67. Le sous bassin N°3 est occupé par l'agglomération de Sidi Rached, les autres sont des bassins périurbains. L'aire concernée par cette étude appartient au bassin versant d'Oued Djer (figure 2.4).

- **Caractéristiques physiographiques et hydromorphométriques**

Les caractéristiques physiques d'un bassin versant jouent un rôle essentiel dans l'étude de certaines composantes du cycle hydrologique (écoulement, infiltration, etc.) (Llamas, 1993). Les plus importantes sont : la surface **S**, le périmètre **P**, l'indice de capacité de Gravelius **Kc**, longueur du bassin versant **L<sub>H</sub>**, la pente moyenne du bassin versant **I<sub>m</sub>**, la pente du cours d'eau principal **I<sub>cp</sub>**, la densité de drainage **D<sub>a</sub>**, le temps de concentration **T<sub>c</sub>** et la vitesse moyenne du ruissellement **V<sub>r</sub>**. Les résultats sont résumés dans le tableau 2.1.



**Figure 2.3.** Bassins Versants Urbains et Périurbains et Cours d'eau  
Image satellitaire non traitée, Landsat, 2012, Algérie N-32-35)

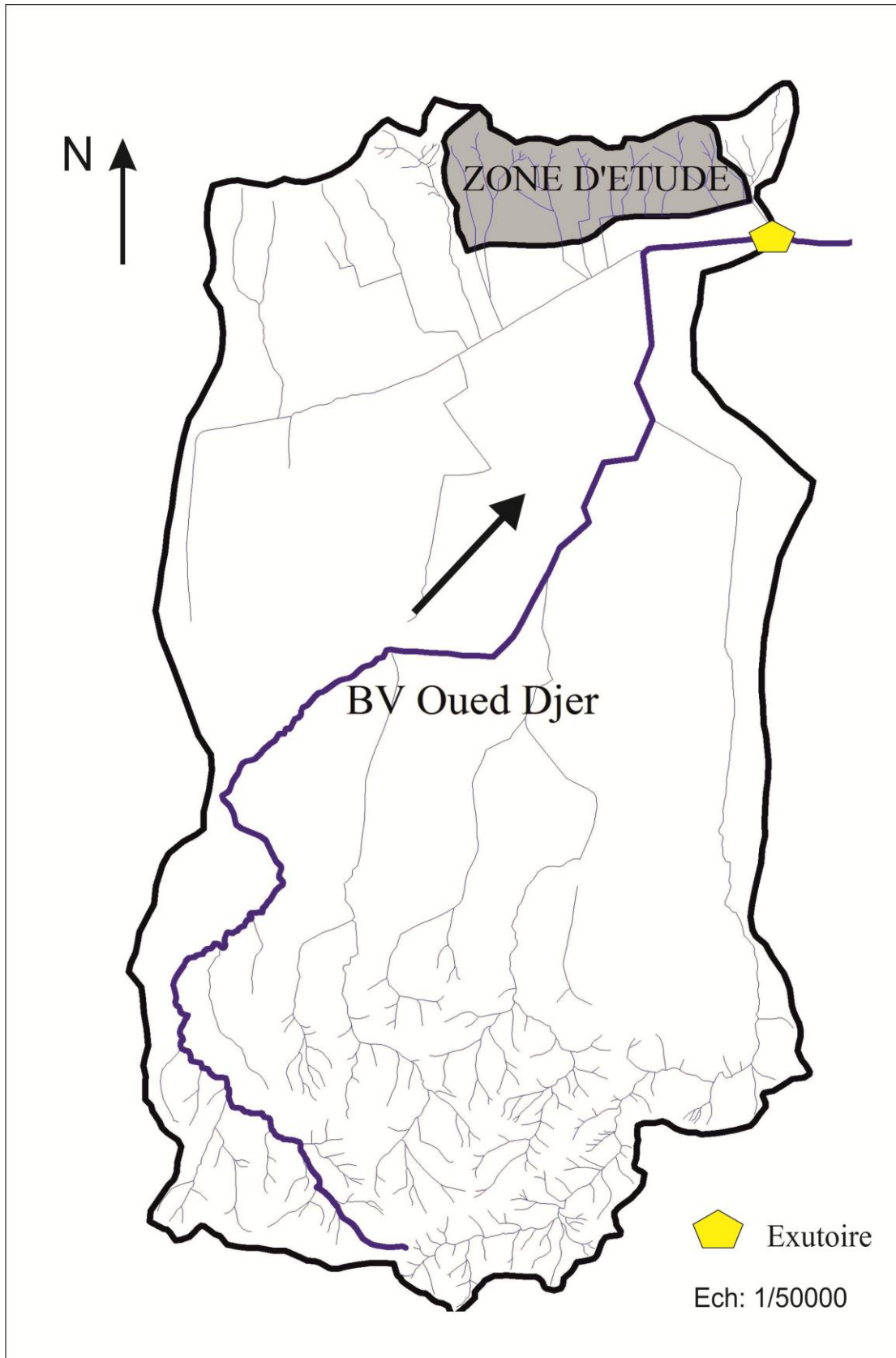


Figure 2.4. Réseau hydrographique du Bassin Versant d'Oued Djer

**Tableau 2.1.** Caractéristiques physiographiques et hydromorphométriques des bassins versants

Caractéristiques	Sous Bassins (Zone d'étude)										BV (Oued Djer)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>S (Km<sup>2</sup>)</b>	0.5	0.8	1.1	0.6	0.3	0.3	0.2	0.1	0.9	0.2	110.9
<b>P (Km)</b>	3.6	4.7	4.4	3.2	2.4	2.6	2.1	1.7	4.2	1.8	52.0
<b>Kc</b>	1.5	1.5	1.2	1.2	1.2	1.4	1.2	1.3	1.3	1.3	1.4
<b>L<sub>H</sub> (Km)</b>	1.6	1.9	1.5	1.4	1	1.1	0.9	0.6	1.3	0.7	14.6
<b>Altitude maximale (m)</b>	201	205	205	210	212	228	180	140	293	130	740
<b>Altitude minimale (m)</b>	73	69	69	58	64	64	64	64	64	68	50
<b>Altitude moyenne (m)</b>	107	139	102	113	121	133	103	92	145	90	143.5
<b>H<sub>5%</sub></b>	169	195	176	187	208	219	164	123	254	122	421
<b>H<sub>50%</sub></b>	106	147	96	108	117	132	103	99	136	95	88
<b>H<sub>95%</sub></b>	79	87	69	69	69	72	69	68	71	71	59
<b>I<sub>m</sub> (m/Km)</b>	1.4	2.0	1.5	4.5	2.3	3.4	1.4	0.7	4.5	0.5	(68%)
<b>I<sub>g</sub> (m/km)</b>	67.7	62.4	79.9	121.5	183.0	154.5	140.8	96.9	132.3	87.2	19.6
<b>L<sub>cp</sub> (Km)</b>	1.4	1.6	1.4	1.2	0.6	1	0.7	0.5	1.3	0.5	22.1
<b>I<sub>cp</sub> (m/km)</b>	53.9	63.9	0.8	82.3	100	137.4	116.2	80.9	138.6	78.4	31.6
<b>D<sub>d</sub> (Km/Km<sup>2</sup>)</b>	2.9	3.7	2.5	2.7	2.0	4.7	3.3	3.5	3.4	3.3	10
<b>T<sub>c</sub> (h)</b>	0.3	0.3	1.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	10
<b>V<sub>r</sub> (km/h)</b>	5.3	5.8	1.0	6.1	5.5	7.0	6.1	4.8	7.4	4.8	2.2

### • Morphologie et topographie

La région de Sidi Rached, se trouve sur la colline qui surplombe la Mitidja, avec des pentes importantes. Un Modèle Numérique de Terrain est élaboré, en tenant compte de la topographie et des coordonnées géographiques de la région d'étude, comme nous l'avons illustré en figure 2.5. Les eaux de ruissellement se déversent sur la route nationale pour s'acheminer et stagner dans le lac HALLOULA, plus à l'aval que la zone d'étude. Il y a lieu de noter, que lors d'une visite de la zone en temps pluvieux, les buses qui y sont installées sous la route, ne supportent pas les eaux pluviales et se sont obstruées, nécessitant un curage permanent après chaque averse.

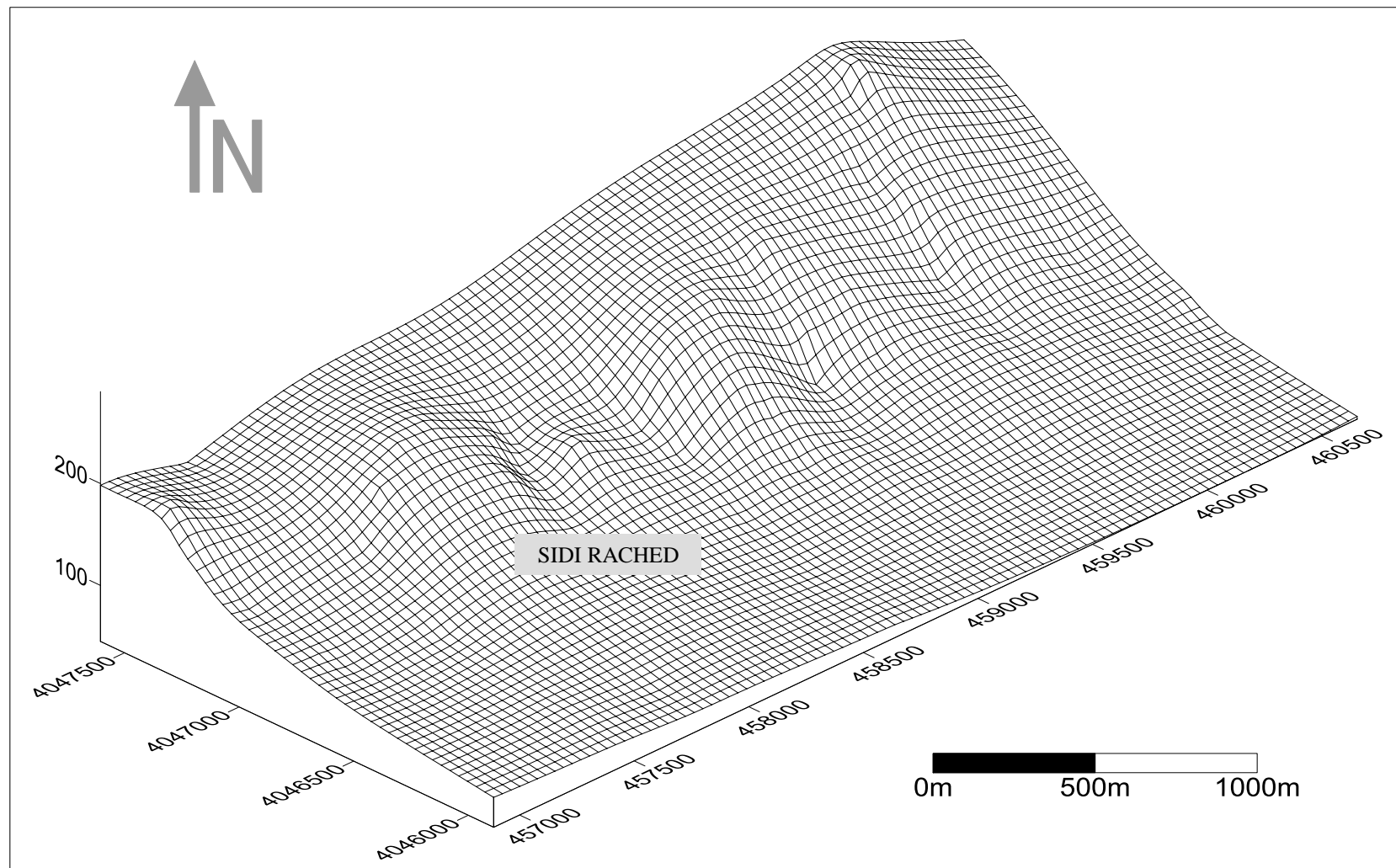


Figure 2.5. Vue 3D du MNT de la zone d'étude

Les sous bassins ont une faible superficie avec des pentes assez importantes. La forme des sous bassins est plus ou moins allongée avec un Kc variant de 1,2 à 1,5.

Le temps de concentration est de l'ordre de minutes sauf pour le SBV3, qui est de 1h22mn.

Il est à remarquer que la zone est agricole, et que la pente est forte. Les cours d'eau suivent les pistes agricoles et les sillons laissés par les labours réalisés dans le sens de la pente favorisant ainsi, le ruissellement et le transport des sédiments.

- **Hydrographie**

Le réseau d'écoulement ou réseau hydrographique est très lâche et les cours d'eau sont temporaires, (figure 2.3). Les sous bassins appartiennent au bassin versant de l'Oued Djer d'une surface de 110.9 Km<sup>2</sup>. Les sous bassins représentent un pourcentage de 4.5% de la surface drainée par le cours d'eau principal.

### **4.3. Aperçu climatologique du milieu d'étude**

#### **4.3.1. Introduction**

Il convient d'envisager l'intégration des paramètres tels que la température, le vent, l'humidité, le gel, etc., dans les simulations des phénomènes complexes de comportement des sols à l'infiltration, à la saturation et au ruissellement, ainsi que l'évaluation du stock hydrique du sol, du pouvoir humidifiant et de l'évapotranspiration potentielle (Satin et al, 2006). L'idéal serait d'avoir à disposition l'ensemble de ces paramètres pour mener convenablement des études portant sur la génération et le transfert du ruissellement des eaux à l'exutoire. Dans le contexte Algérien, il est assez rare que tous ces paramètres soient mesurés par insuffisance ou manque de stations climatologiques. Cependant seule, la pluviométrie est observée à travers les grands bassins versants gérés par l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques).

#### **4.3.2. Vents et température**

La zone d'étude ne dispose que d'une station pluviométrique. Pour la description des autres paramètres climatologiques (vents et température), nous nous sommes basés sur celle de Mouzaia, (tableau 2.2) sise à 20 Kms au Sud-Est du milieu étudié.

**Tableau 2.2.** Identification de la station de Mouzaia

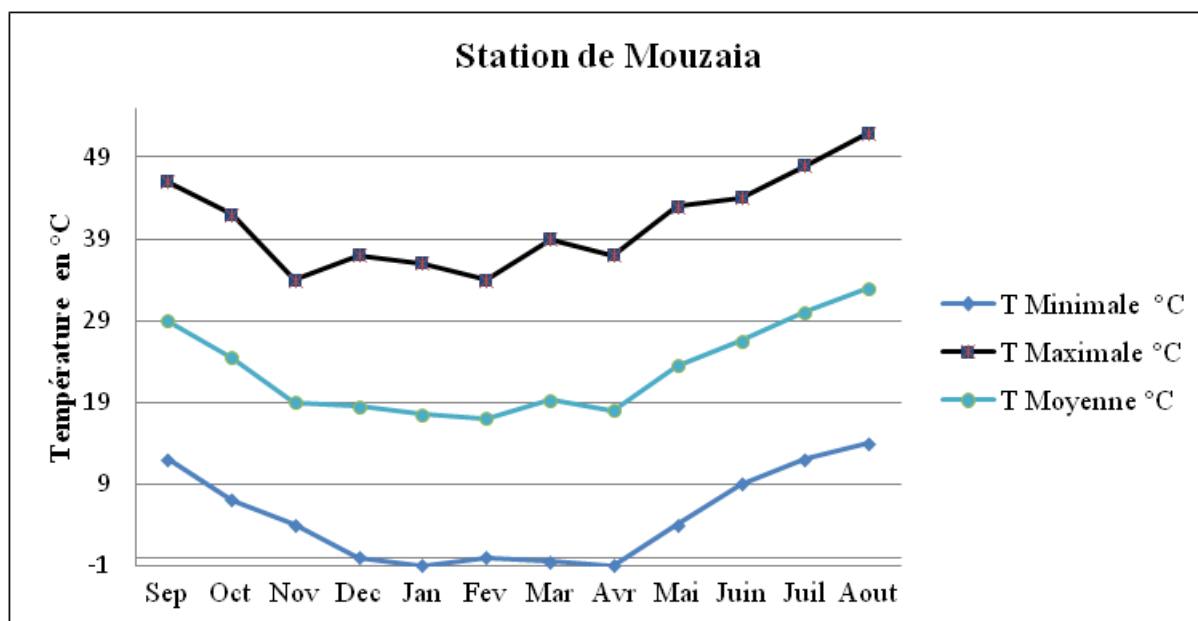
Station	Code	X (Km)	Y (Km)	Z (m)	Années d'observation
Mouzaia	021132	301	4053	150	1988/89-2008/09

Les températures moyennes interannuelles enregistrées sur une période de 20ans (1988/89-2008/09) sont données dans le tableau 2.3 et leur variation est représentée par la figure 2.6. Les vents et l'évapotranspiration sont donnés dans le tableau 2.4.

**Tableau 2.3.** Températures moyennes interannuelles en °C (1988/89-2008/09).

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin.	Juil.	Aout.	Moyenne
T <sub>moy</sub>	29	24.5	19	18.5	17.5	17	19	18	23.5	26.5	30	33	23
T <sub>min</sub>	12	7	4	0	-1	0	-0.5	-1	4	9	12	14	5
T <sub>max</sub>	46	42	34	37	36	34	39	37	43	44	48	52	41

Source ANRH (2012)

**Figure 2.6.** Variation mensuelle de la température

Le tableau 2.3 montre que, les températures entre Novembre et Mai sont inférieures à la moyenne annuelle, mettant en évidence deux périodes :

- Une période chaude de Juin à Octobre ;
- Une période froide caractérisée par des températures basses, le reste de l'année

Les enregistrements des vents, donnent les vitesses moyennes mensuelles de ces derniers sans préciser quelles en sont les directions dominantes.



**Tableau 2.4.** Vitesse des vents (Km/h) et évapotranspiration (mm) moyennes mensuelles.

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin.	Juil.	Aout.	Moyenne
<b>Vents</b>	2.8	2.8	2.9	3.2	3.1	3.3	3.2	3.2	3.0	3.2	3.1	3	3.1
<b>Evapo.</b>	132	96	48	48	60	60	60	72	108	144	180	192	100

Source ANRH (2012)

Au vu du tableau 2.4, les vents soufflent plus ou moins à la même vitesse pendant toute l'année, variant entre 2.8 et 3.3 Km/h. L'Évapotranspiration présente des valeurs assez élevées de Mai jusqu'à Septembre concordant avec la période chaude, pour atteindre presque 200 mm par mois au cours de l'été surtout au mois d'Août.

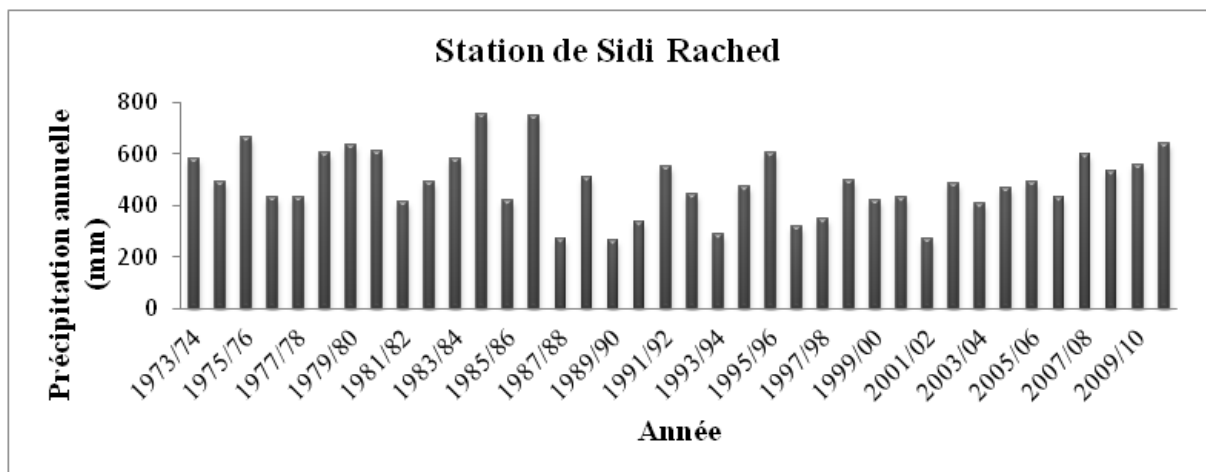
### 4.3.3. Pluviométrie

La description de la pluviométrie de la zone d'étude est basée sur les données recueillies à la station de Sidi Rached (Tableau 2.5).

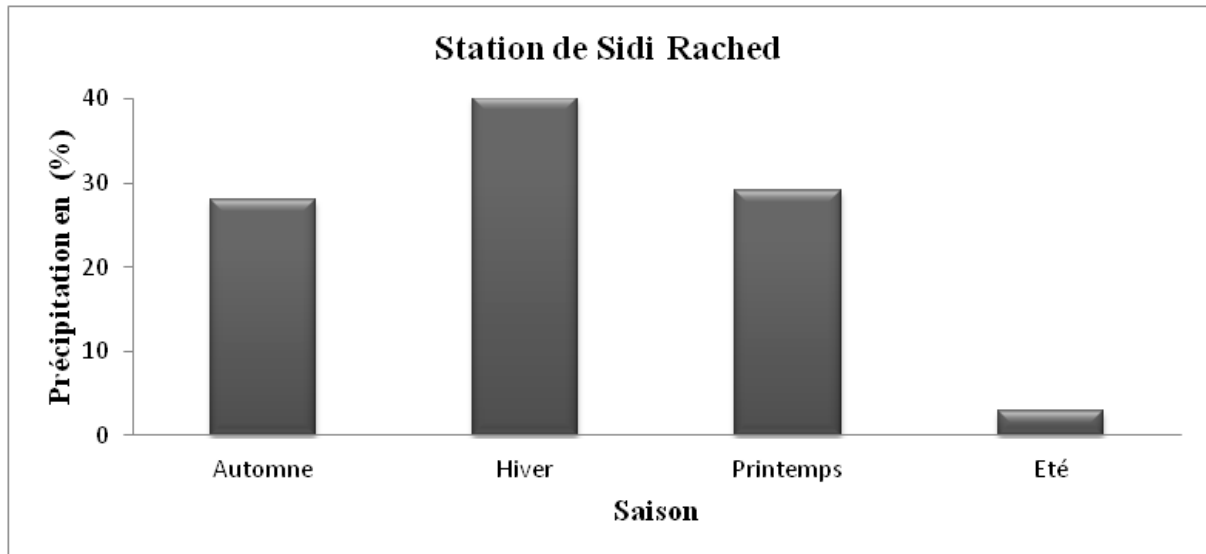
**Tableau 2.5.** Identification de la station de Sidi Rached

Station	Code	X (Km)	Y (Km)	Z (m)	Années d'observation
<b>Sidi Rached</b>	021024	283	4065	57	1973/74-2010/11

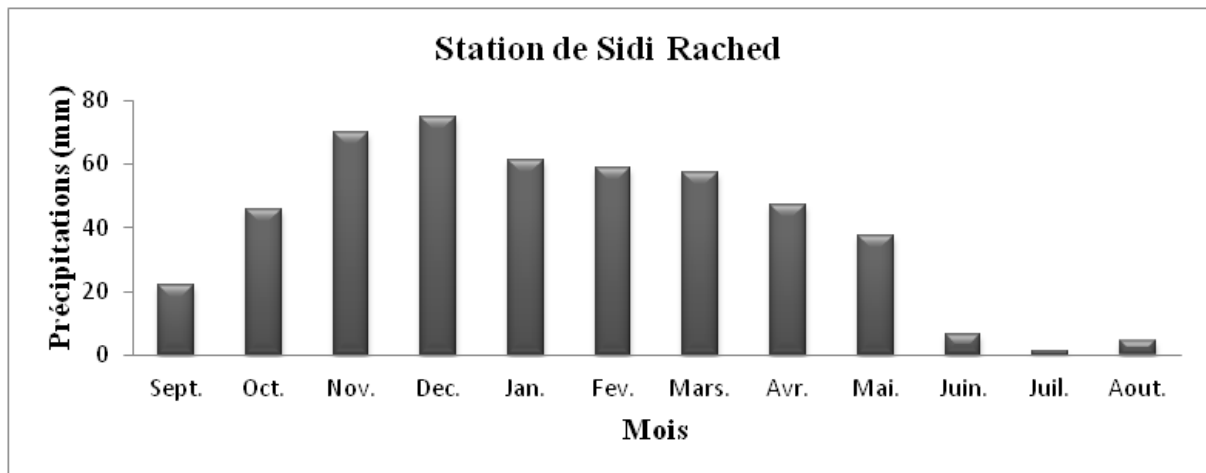
La pluviométrie moyenne interannuelle est estimée sur la période 1973/74 à 2010/11 à 486 mm, enregistrant des valeurs minimale et maximale de 266 mm et 755 mm respectivement pour les années 1989/90 et 1984/85 (figure 2.7). Le 10/10/1984, est le jour le plus pluvieux enregistrant une lame de 74 mm, considérée comme la précipitation maximale journalière de cette année.

**Figure 2.7.** Précipitations annuelles sur la période d'observations (1973/74-2010/11).

La commune reçoit plus de 76% de pluie entre Octobre et Avril. La répartition saisonnière est assez régulière, il pleut en hiver et beaucoup moins en été, à peine 3% de la précipitation totale moyenne annuelle (figures 2.8 et 2.9).



**Figure 2.8.** Précipitation à l'échelle saisonnière sur la période d'observations (1973/74-2010/11).



**Figure 2.9.** Répartition intra-annuelle des précipitations sur la période d'observations (1973/74-2010/11)

#### 4.3.4. Classification du climat

Les étages bioclimatiques ont été définis par le diagramme d'EMBERGER. Cette technique renseigne sur le climat, ainsi que le type d'hiver dominant d'une région. Il s'agit d'exprimer la sécheresse globale d'un climat et comparer la dépendance en eau (évaporation et transpiration) au gain (précipitation) par le rapport (P/E) dans lequel l'évaporation est exprimée par une fonction de la température. Pour cela, l'expression 2.1 est calculée, le

quotient d'EMBERGER est projeté sur le diagramme bioclimatique (figure 2.10). Le tableau 2.7 résume le résultat.

L'expression du quotient Q est donnée en 2.1 :

$$Q = \frac{1000 P}{\left(\frac{M+m}{2}\right)(M-m)} \quad (2.1)$$

Avec :

P : précipitation moyenne annuelle (m) ;

M : moyenne des températures maximales en °(kelvin) ;

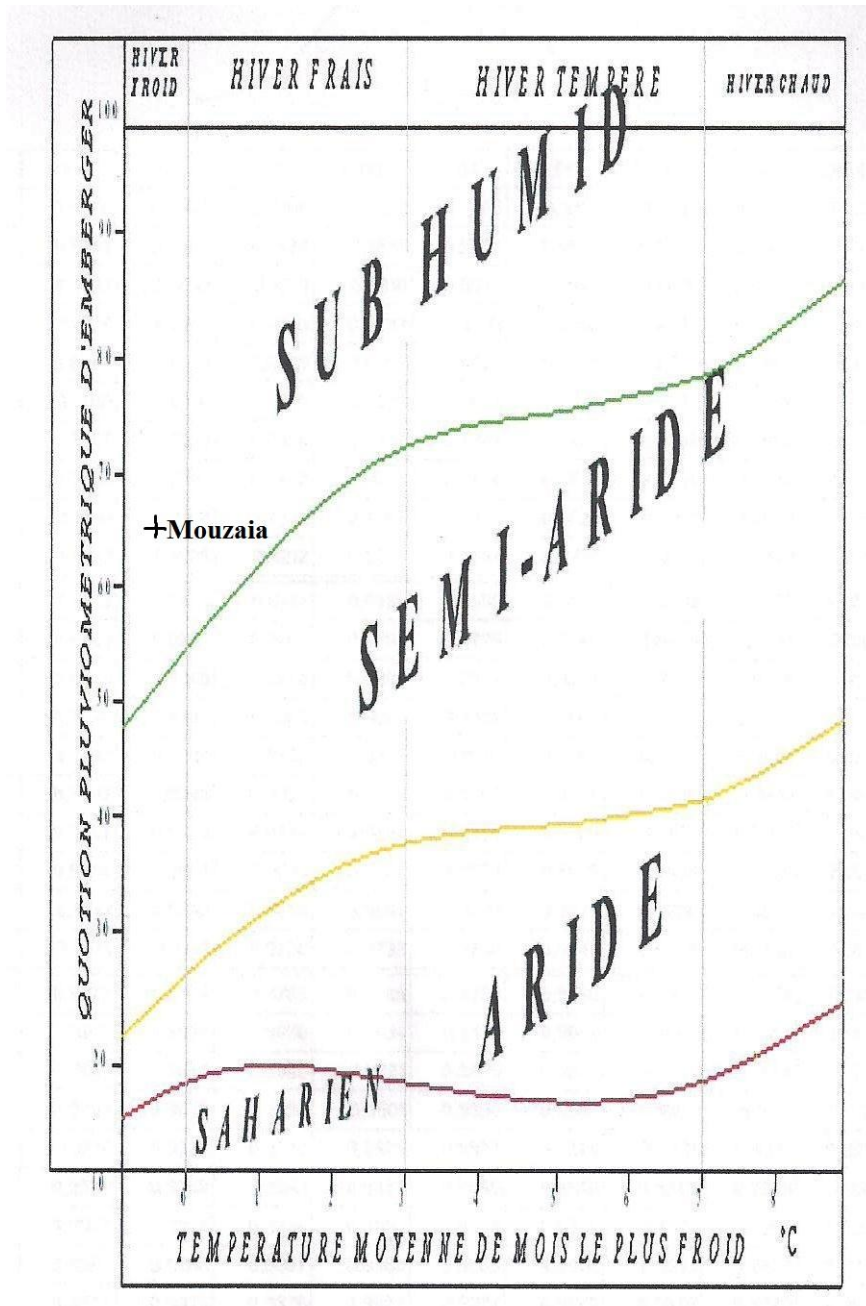
m : moyenne des températures minimales en °(kelvin).

D'après le diagramme d'EMBERGER, l'étage climatique de la station de Mouzaia est Subhumide avec un hiver froid. Cette zone, définit le climat, comme étant de type méditerranéen à été chaud et aride, alors que le reste de l'année est pluvieux et moins chaud.

**Tableau 2.6.** Paramètre d'EMBERGER pour la station de Mouzaia

<b>Paramètre d'EMBERGER</b>	<b>Station de Mouzaia</b>
<b>P (mm)</b>	692
<b>M° (Kelvin)</b>	314
<b>m° (Kelvin)</b>	278
<b>Q</b>	65

Il est à noter que par manque de données climatiques à la station de Sidi Rached, la station de Mouzaia est prise en référence, dans la mesure où elle se trouve dans les mêmes conditions climatiques de par sa topographie.



**Figure 2.10.** Diagramme Bioclimatique D'EMBERGER

## CONCLUSION

L'analyse détaillée de la morphologie a permis de mieux cerner la zone d'étude. Celle-ci laisse apparaître, une zone vulnérable aux inondations de par son relief, la nature de sol, une agriculture annuelle intensive, caractéristique de la région.

**CHAPITRE III**  
**ETUDE DES EVENEMENTS PLUVIEUX**

## CHAPITRE III : ÉTUDE DES ÉVÈNEMENTS PLUVIEUX

### 1. INTRODUCTION

L'étude des événements pluvieux requiert une importance particulière dans les études d'assainissement et de protection contre les crues. Ces événements sont caractérisés par de fortes intensités provoquant des lames d'eau ruisselées conséquentes.

Les événements ou épisodes pluvieux ne peuvent être maîtrisés que si une étude approfondie des pluies de courte durée est établie.

Ceci permettra d'établir les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) dont leur modélisation permettra de déterminer l'exposant climatique. Les IDF restent un outil indispensable à la gestion du risque pluvial pour tout aménagement hydraulique. Elles nécessitent l'exploitation des pluviogrammes enregistrés dans une station pluviographique.

### 2. PRESENTATION DE LA BANQUE DES DONNEES

La collecte et la mise en forme des données a été une phase très fastidieuse dans laquelle la qualité de l'information a été vérifiée minutieusement. Deux fichiers bruts sous format numérique sont mis à notre disposition par les services de l'ANRH. Le premier fichier concerne les précipitations journalières et le second les enregistrements pluviographiques. Ces fichiers ont permis d'élaborer les séries annuelles, les séries des maxima annuels ( $P_{\max,j}$ ) et les pluies de courtes durées où 744 averses ont été dépouillées manuellement par nos soins. La mise en fichier a permis de reproduire les pluviogrammes considérés comme originaux pour différentes durées d'agrégation ou intervalles de référence (15, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 360 et 720min.).

Quatre stations pluviométriques sont prises en considération, celles de Sidi Rached, Djbbabra, Boukerdane et Barrage de Meured, dont leur identification est présentée dans le tableau 3.1.

**Tableau 3.1.** Caractéristiques des stations pluviométriques

Station	Code	X (Km)	Y (Km)	Z (m)	Nombre d'années d'observation	Période d'observations
<b>Sidi Rached</b>	021024	283	4065	57	38	1973/74-2011/12
<b>Barrage de Meured</b>	020306	268	4052	300	107	1899/00-2010/11
<b>Boukerdane</b>	020329	255	4061	110	24	1987/88-2011/12
<b>Djbbabra</b>	020307	272	4047	440	41	1967/68-2010/11

Pour l'étude des pluies de courtes durées, les données pluviographiques entre 1985/86 et 2005/06 de la station située au niveau du Barrage de Meured (même coordonnées données dans le tableau 3.1) est prise comme station de référence de la zone d'étude.

## 2.1. Étude statistique des précipitations

En tenant compte de la situation géographique, la station pluviométrique de Sidi Rached est représentative de la zone d'étude.

L'ajustement de la série des précipitations annuelles répond à la loi de Gauss et celui des maxima journaliers à la loi de Gumbel afin de déterminer les quantiles c'est-à-dire les valeurs extrêmes pour différentes périodes de retour.

### 2.1.1. Étude statistique des précipitations annuelles

La fonction de répartition de la loi de Gauss est représentée dans la formule 3.1.

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{1}{2}u^2} du \quad (3.1)$$

Avec :

u: Variable réduite de Gauss

$$u = \frac{x - \bar{X}}{\sigma} \quad (3.2)$$

L'équation de la droite de Henri, sur papier Gaussien est donnée par l'expression 3.3.

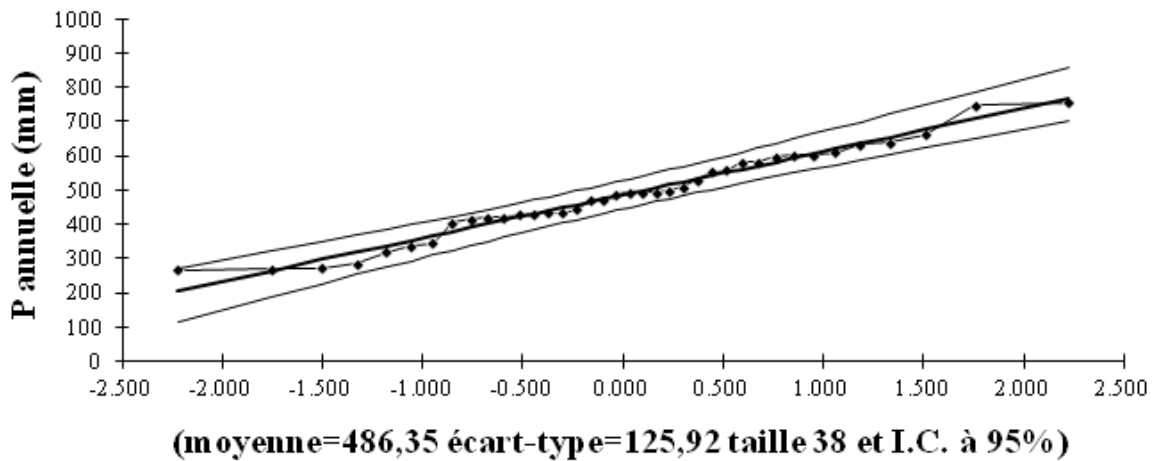
$$X = \bar{X} + \sigma \cdot u \quad (3.3)$$

Soit:

$$P_{an,p\%} = 486.35 + 126.92 u_{p\%} \quad (3.4)$$

L'ajustement graphique de la droite de Henri est illustré dans la figure 3.1.

De l'équation 3.4, sont déduits les quantiles (tableau 3.2).



**Figure 3.1.** Ajustement de la précipitation annuelle à la loi de Gauss

**Tableau 3.2.** Quantiles des précipitations moyennes annuelles

Période de retour (an)	Quantile : $p_{an, p\%}$ (mm)
2	486
5	592
10	648
20	694
50	745
100	779

### 2.1.2. Étude statistique des précipitations maximales journalières

La fonction de répartition de la loi de Gumbel  $F(x)$  est donnée par la formule 3.5.

$$F(x) = e^{-e^{-y}} \quad (3.5)$$

Où :

$y$  : Variable réduite de Gumbel, donnée par l'expression 3.6.

$$y = \frac{X - X_0}{\alpha} : \text{Variable réduite de Gumbel} \quad (3.6)$$

Avec :

$\alpha, X_0$  : Coefficient d'ajustement (méthode des moindres carrés) ;

$X_0$  : Paramètre de position (Ordonnée à l'origine)

$\alpha$  : Paramètre d'échelle différent de zéro et positif appelé aussi « Gradex »



$\frac{1}{\alpha}$  : Pente de la droite

X : Variable étudiée,  $P_{\max,j}$

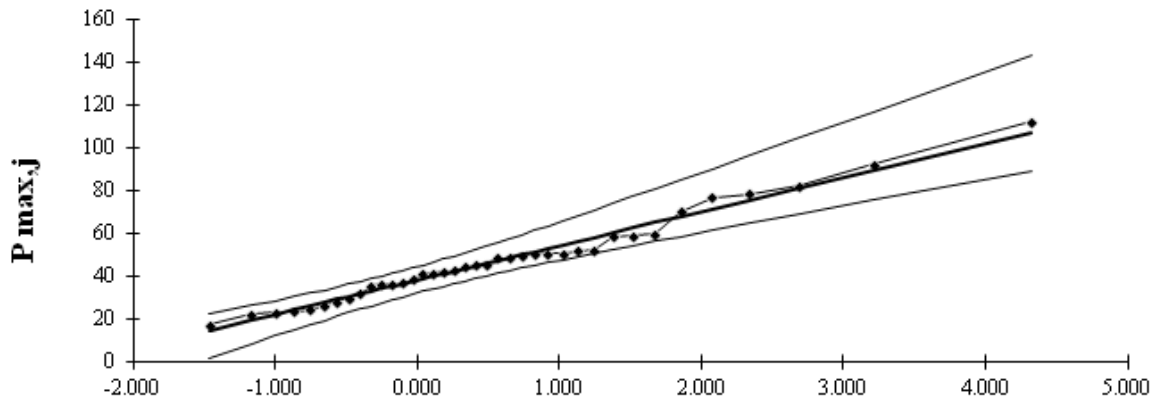
L'équation de la droite de Gumbel est donnée dans l'expression 3.7.

$$X = \frac{1}{\alpha} y + X_0 \quad (3.7)$$

Soit :

$$P_{\max,j,p\%} = 15.97 y + 38.24 \quad (3.8)$$

L'ajustement graphique de la loi Gumbel est illustré dans la figure 3.2.



(mode=38,24 gradex=15,97 taille=38 et I.C. à 95%)

**Figure 3.2.** Ajustement de la précipitation maximale journalière à la loi Gumbel

De l'expression 3.8 sont déduits les quantiles (tableau 3.3).

**Tableau 3.3.** Quantiles des précipitations maximales journalières

Période de retour (an)	Quantile : $P_{\max,j,p\%}$ (mm)
2	44
5	62
10	74
20	86
50	101
100	112

## 2.2. Étude des pluies de courtes durées

Les pluies de courtes durées sont analysées en considérant uniquement les séries provenant des enregistrements pluviographiques (hauteur de la pluie en fonction du temps pour un épisode pluvieux). Elle sera aussi utilisée comme série de référence pour vérifier la fiabilité de la série pluviométrique.

Les données sont organisées en deux fichiers, le premier est composé d'une série de données pluviométriques provenant d'un pluviomètre du barrage Meured sur une période de 1899/1900 jusqu'à 2010/11, avec une rupture entre 1962/63 à 1966/67. Le second fichier consiste en une série de données pluviographiques de la même station, sur une période allant de 1985/86 à 2005/06 enregistrant 744 épisodes pluvieux 13/04/1986 au 14/08/2006 avec des lames précipitées de 0.5 mm à 91mm respectivement pour des durées de 1minute à 24h. Les enregistrements se font à des pas de temps variables de l'ordre d'une minute à quelques minutes en fonction de l'intensité de la pluie.

### 2.2.1. Contrôle de la qualité de la série pluviométrique

La série pluviométrique journalière retenue pour cette étude compte 6.32% lacunes, ce qui correspond à l'absence de mesures des années 1962/63 jusqu'à 1966/67. Ceci ne constitue en aucun cas une contrainte. D'après Muller (2006), dans l'étude du comportement de la distribution des pluies extrêmes pour la ville de Marseille (France), celle-ci disposait de longues séries de mesures avec moins de 10% de lacunes. De même Roudier et al (2010), dans une étude sur les pluies maximales journalières annuelles au Sud du Mali, ont considéré 51 stations de mesures pluviométriques avec 10% de lacunes. Cet obstacle a été contourné par l'application de méthodes spécifiques (comblement, analyse saisonnière...) sans que cela n'altère la précision du résultat final.

#### • Comblement de lacunes

Très souvent, dans l'enregistrement continu des précipitations, il existe des périodes où certaines données sont manquantes. Pour ne pas perdre la continuité de l'information, il est possible d'estimer les lacunes à partir de l'information obtenue dans les stations voisines selon 3 méthodes (Laborde, 1995) :

- Remplacer la valeur manquante par celle de la station la plus proche ;
- Remplacer la valeur manquante par la moyenne des stations voisines. Cette méthode est utilisée lorsque les précipitations annuelles de la station à compléter ne diffèrent pas de plus de 10% ;

- Remplacer la valeur manquante par une moyenne pondérée par la tendance annuelle des stations pluviométriques.

Dans le cas de la station du Barrage de Meured, pour corriger les lacunes des mois manquants, la deuxième possibilité est appliquée, qui consiste à remplacer la valeur manquante par la moyenne des stations voisines. Pour cela, deux stations ont été choisies, celle de Boukerdane et la station de Djbbabra.

Après avoir comblé les lacunes, l'erreur est passée de 6.32 à 5.65%. Vu la taille de la série d'observations de la station de Barrage de Meured qui est opérationnelle depuis 1899/00, il a été difficile de trouver les données des stations voisines avant 1967/68. Les lacunes ont été comblées qu'à partir de cette date.

#### • Homogénéisation des séries : Test de Wilcoxon

L'homogénéité de la série des côtes pluviométriques journalières est vérifiée en appliquant le Test de Wilcoxon, en comparant les pluies moyennes annuelles des deux stations. Ce test est systématiquement utilisé pour vérifier l'homogénéité pour un seuil de signification de 95% (Mailhot et al, 2007). C'est un test qui présente davantage de robustesse par rapport à d'autres tests (Mestre 2000, Lamboley, 2006).

Soient deux variables aléatoires X et Y respectivement de taille  $N_2$  et  $N_1$ . Y étant la série à étudier et X étant la série de base avec  $N_2 > N_1$ . Si l'échantillon Y est issu de la même population que l'échantillon X, l'échantillon nouveau YUX est également issu de la même population. On classe les éléments de ce nouvel échantillon YUX par ordre croissant et on associe à chacune des valeurs le rang qu'elle occupe dans cette nouvelle série. Si une valeur se répète plusieurs fois, il faut lui associer le rang moyen qu'elle détermine. On calcule les quantités  $W_Y$  et  $W_X$ , selon l'expression (3.9). L'hypothèse nulle  $H_0$  posée : Est-ce que la série est homogène ?

$$W_Y = \sum_{i=1}^{N_1} \text{Rang } Y_i \quad (3.9)$$

L'hypothèse nulle  $H_0$  de ce test est vérifiée si :

$$W_{\min} < W_Y < W_{\max} \quad (3.10)$$

Avec :

$$W_{\min} = \frac{(N_1 + N_2 + 1) \times N_{1-1}}{2} - U_{1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{N_1 N_2 (N_1 + N_2 + 1)}{12}} \quad (3.11)$$

$U_{1-\frac{\alpha}{2}}$  : Variable réduite de Gausse

Et :

$$W_{\max} = (N_1 + N_2 + 1) \cdot N_1 - W_{\min} \quad (3.12)$$

Pour l'homogénéisation de la série pluviométrique de la station du Barrage de Meured, la série est divisée en deux échantillons, X et Y. Les résultats sont résumés dans le tableau 3.4.

**Tableau 3.4.** Valeurs des paramètres de Wilcoxon

X	Y	$W_{\min}$	$W_{\max}$	$W_Y$
$N_2 = 57$	$N_1 = 50$	2332	3981	3046

L'hypothèse nulle  $H_0$  du test de Wilcoxon est vérifiée ( $2332 < W_Y < 3980$ ). La station pluviométrique de Barrage de Meured est considérée comme homogène.

### 2.2.2. Contrôle de la qualité des séries des enregistrements pluviographiques

Tous les pluviogrammes tracés ont été dépouillés un à un manuellement pour les 744 épisodes pluvieux enregistrés. Ce dépouillement a permis de déterminer, pour chaque événement pluvieux ; la lame d'eau précipitée, son intensité et sa durée. De même, des fichiers sont élaborés pour les différentes durées d'agrégation (15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 360, 720 et 1440min). Les séries ainsi constituées n'ont pas toutes la même taille, vu que les épisodes pluvieux n'ont pas tous la même durée.

Le nombre d'averses étant très important, pour considérer celles qui peuvent provoquer réellement un ruissellement, un seuil est choisi. Celui-ci a été pris par rapport au maximum de lame précipitée de 5mm pour une durée minimale 1mn. De 744 averses, seules 390 sont retenues et étudiées, c'est à qui dire ayant une lame égale ou supérieure ( $\geq$ ) à 5mm, constituant les séries de durées partielles (Koutsoyiannis, 1978), appelée SDP dans la littérature.

Les tableaux 3.5 et 3.6 montrent respectivement l'ensemble des averses et celles de type de durées partielles (SDP).

**Tableau 3.5.** Nombre d'averses par mois et par an (sans seuil de rejet)

Année	Mois												Total
	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin.	Juil.	Aout.	
1985/86	-	-	-	-	-	-	-	2	1	1	1	0	5
1986/87	3	5	5	6	6	9	5	0	-	1	1	0	41
1987/88	1	2	4	3	3	2	1	4	1	3	0	-	24
1988/89	3	3	3	11	5	3	4	7	-	3	-	1	43
1989/90	1	2	2	1	8	0	6	5	2	0	1	-	28
1990/91	1	2	4	5	5	5	4	3	2	1	0	-	32
1991/92	-	4	3	1	3	8	6	4	3	4	1	0	37
1992/93	-	1	4	6	1	-	2	5	1	0	-	-	20
1993/94	2	-	2	2	2	3	-	6	1	0	0	0	18
1994/95	1	-	3	2	4	3	5	-	-	1	0	1	20
1995/96	3	2	1	4	2	6	1	2	1	1	-	0	23
1996/97	-	-	-	-	-	-	-	4	-	0	0	-	4
1999/00	-	-	5	-	-	4	4	6	6	0	1	0	26
2000/01	1	10	9	9	13	8	1	5	11	1	0	0	68
2001/02	7	2	10	8	7	7	8	6	6	0	1	6	68
2002/03	2	4	11	10	20	14	5	9	6	1	1	0	83
2003/04	4	9	9	9	7	7	11	11	11	2	1	2	83
2004/05	5	4	8	12	9	11	-	-	2	3	0	1	55
2005/06	2	4	12	-	15	10	4	5	10	3	0	1	66
	36	54	95	89	110	100	67	84	64	25	8	12	744

Les cases (-) signifie qu'il y a pas d'enregistrement.

**Tableau 3.6.** Nombre d'averses par mois et par an à partir du seuil considéré

Année	Mois												Total
	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin.	Juil.	Aout.	
1985/86	-	-	-	-	-	-	-	1	0	1	1	0	3
1986/87	3	5	5	6	6	6	2	0	-	1	1	0	35
1987/88	1	0	3	3	2	2	1	3	1	3	0	-	19
1988/89	1	3	2	7	3	3	3	5	-	1	-	1	29
1989/90	0	1	2	1	6	0	5	3	2	0	1	-	21
1990/91	0	1	4	3	5	4	3	1	2	0	0	-	23
1991/92	-	4	2	0	3	6	6	2	3	1	1	0	28
1992/93	-	1	3	4	1	-	2	5	1	0	-	-	17
1993/94	1	-	2	2	2	3	-	4	0	0	0	0	14
1994/95	1	-	3	2	2	2	5	-	-	0	0	1	16
1995/96	3	2	1	2	1	5	1	1	1	1	-	0	18
1996/97	-	-	-	-	-	-	-	4	-	0	0	-	4
1999/00	-	-	2	-	-	1	1	2	2	0	0	0	8
2000/01	1	2	6	1	8	3	0	3	1	0	0	0	25
2001/02	2	1	4	3	4	3	2	1	2	0	1	0	23
2002/03	2	1	6	3	9	5	1	3	1	0	0	0	31
2003/04	2	1	3	3	3	0	2	3	6	0	0	1	24
2004/05	2	1	3	11	7	4	-	-	0	0	0	0	28
2005/06	0	2	5	-	8	4	2	0	3	0	0	0	24
	19	25	56	51	70	51	36	41	25	8	5	3	390

Les cases (-) signifie qu'il y a pas d'enregistrement.

Au vu du tableau 3.6, il en ressort que la plupart des averses se produisent à partir du mois de Novembre jusqu'au mois de Mai.

Deux types de classification sont faites, l'une considérant les averses de durées réelles (tableau 3.7), l'autre considère l'ensemble des averses où chacune d'elle a une durée égale au moins à 15 minutes (tableau 3.8).

Les différentes averses ont été classées par durées d'agrégation et représentées en figure 3.3.

Tableau 3.7. Nombre d'averses par durée d'agrégation

Année	Durée d'agrégation $\Delta t$ (minutes)										
	15	30	45	60	90	120	150	180	360	720	1440
1985/86	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
1986/87	1	7	2	1	3	4	3	6	8	0	0
1987/88	1	0	3	2	0	1	2	1	9	0	0
1988/89	1	5	1	1	3	0	0	1	16	1	0
1989/90	0	1	2	2	5	0	4	1	6	0	0
1990/91	0	3	1	1	3	0	2	0	13	0	0
1991/92	0	0	1	1	7	4	2	0	13	0	0
1992/93	0	1	1	2	3	1	1	1	7	0	0
1993/94	0	1	0	1	3	1	0	0	8	0	0
1994/95	1	2	3	0	1	1	0	2	6	0	0
1995/96	1	5	2	0	1	3	1	0	5	0	0
1996/97	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
1999/00	1	0	0	0	1	0	0	3	3	0	0
2000/01	0	0	1	1	3	2	2	1	6	8	1
2001/02	1	1	0	0	1	4	1	2	6	7	0
2002/03	1	0	0	1	1	1	2	3	12	8	2
2003/04	2	1	0	1	0	0	1	3	8	6	2
2004/05	1	0	1	0	2	2	1	5	11	4	1
2005/06	1	0	0	0	0	0	0	3	8	9	3
<b>Total</b>	13	28	19	14	37	25	24	33	145	43	9
<b>Pourcentage (%)</b>	3	7	5	4	10	6	6	9	37	11	2

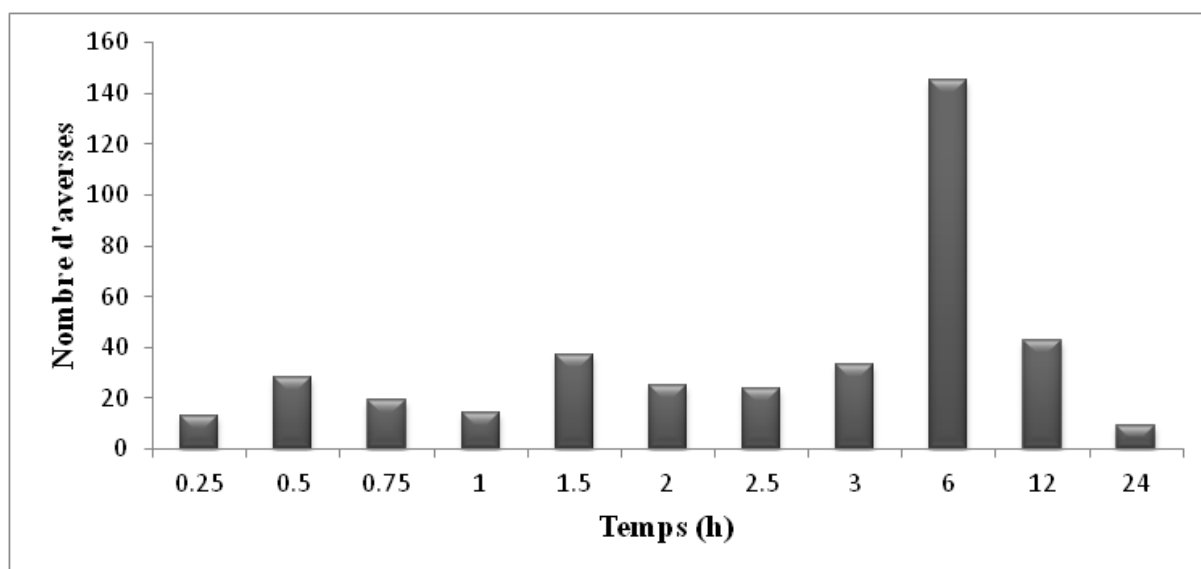


Figure 3.3. Nombre d'averses par durée d'agrégation (1985/86 - 2005/06).

Au vu du tableau 3.7 et la figure 3.3, il en ressort que 37% des averses ont une durée de 6h, 50% des averses ont une durée moins de 6h. Ces averses ont des intensités variables avec une succession de fortes intensités sur de courtes durées puis d'intensités moins importantes sur de longues durées.

**Tableau 3.8.** Nombre d'averses pour toute la série avec seuil

Année	Durée d'agrégation $\Delta t$ (minutes)										
	15	30	45	60	90	120	150	180	360	720	1440
1985/86	3	2	2	2	2	2	2	1	0	0	0
1986/87	35	34	27	25	24	21	17	14	8	0	0
1987/88	19	18	18	15	13	13	12	10	9	0	0
1988/89	29	28	23	22	21	18	18	18	17	1	0
1989/90	21	21	20	18	16	11	11	7	6	0	0
1990/91	23	23	20	19	18	15	15	13	13	0	0
1991/92	28	28	28	27	26	19	15	13	13	0	0
1992/93	17	17	16	15	13	10	9	8	7	0	0
1993/94	14	14	13	13	12	9	8	8	8	0	0
1994/95	16	15	13	10	10	9	8	8	6	0	0
1995/96	18	17	12	10	10	9	6	5	5	0	0
1996/97	4	4	3	2	2	2	1	0	0	0	0
1999/00	8	7	7	7	7	6	6	6	3	0	0
2000/01	25	25	25	24	23	20	18	16	15	9	1
2001/02	23	22	21	21	21	20	16	15	13	7	0
2002/03	31	30	30	30	29	28	27	25	22	10	2
2003/04	24	22	21	21	20	20	20	19	16	8	2
2004/05	28	27	27	26	26	24	22	21	16	5	1
2005/06	24	23	23	23	23	23	23	23	20	12	3
<b>Total</b>	<b>390</b>	<b>377</b>	<b>349</b>	<b>330</b>	<b>316</b>	<b>279</b>	<b>254</b>	<b>230</b>	<b>197</b>	<b>52</b>	<b>9</b>

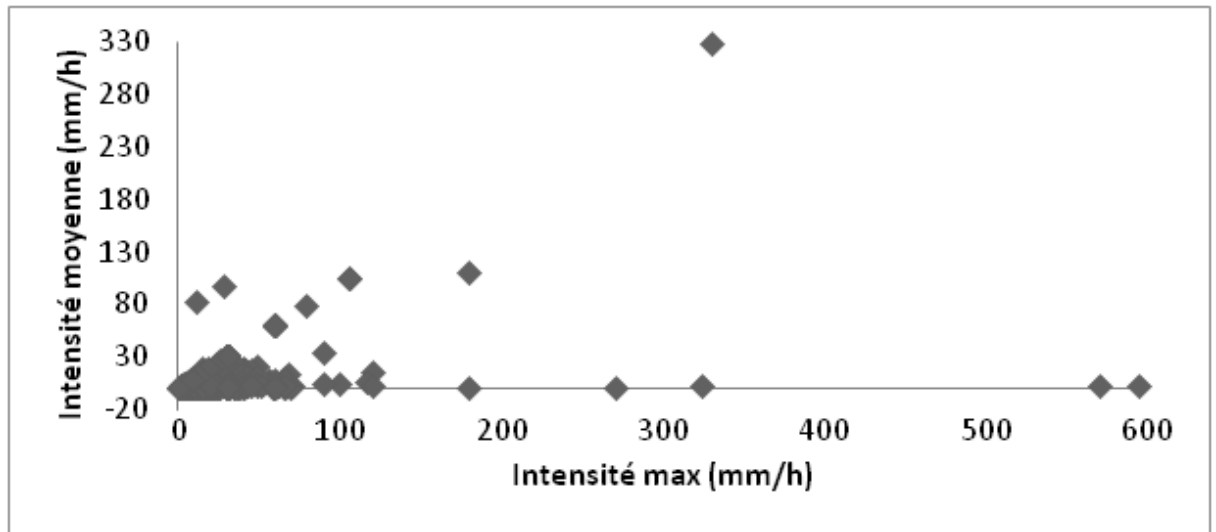
Une autre méthode de choix du seuil est fixée se basant sur l'intensité moyenne  $I_{\text{moy}}$  de la série d'observation des différentes averses quelque soit la durée d'agrégation. Le seuil est fixé à 5 mm/h. Sur 744 averses, seules 189 averses ont une intensité moyenne supérieure à 5mm/h. Dans le tableau 3.9 nous avons représenté les averses enregistrées par classe d'intensité.

**Tableau 3.9** Nombre d'averses par classe d'intensité

$I_{\text{moy}}$ (mm/h)	0÷5	5÷10	10÷15	15÷20	20÷25	25÷30	30÷35	55÷60	75÷80	80÷85	95÷100	100÷105	110÷115	300÷350
<b>Nombre</b>	555	60	28	7	4	76	1	6	1	1	1	2	1	1



Les intensités dépassant le seuil de 24mm/h sont au nombre de 90, seuil estimé très torrentiel et provoquant une forte érosion, (Demmak, 1982). Une recherche d'une relation fonctionnelle pouvant exister entre l'intensité moyenne et l'intensité maximale est entreprise, le diagramme de dispersion est donné en figure 3.4.



**Figure 3.4.** L'intensité moyenne en fonction de l'intensité maximale

Le coefficient de détermination  $R^2$  est calculé pour les différents modèles statistiques comme le montre le tableau 3.10.

**Tableau 3.10.** Coefficient de détermination  $R^2$  pour les différentes lois de régression.

Modèles	Équation	$R^2$
Exponentielle	$I_{moy} = a e^{bI_{max}}$	0.0341
Linéaire	$I_{moy} = a I_{max} + b$	0.117
Logarithmique	$I_{moy} = a \ln I_{max} - b$	0.121
Polynomiale	$I_{moy} = a I_{max}^2 + b I_{max} + c$	0.2251
Puissance	$I_{moy} = a I_{max}^b$	0.1401

Au vu du coefficient de détermination, aucune relation ne se dégage.

### 3. MODÉLISATION DES COURBES INTENSITÉ DURÉE FRÉQUENCE (IDF)

La série des hauteurs maximales pour chaque durée agrégation va permettre d'élaborer les courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence) et de quantifier l'exposant climatique (b) de la station considérée.

### 3.1. Définition de la courbe IDF

Il est bien connu que l'intensité  $I$  de la pluie est très variable. Aux profanes, cette variabilité peut sembler totalement aléatoire. Pour celui qui s'y intéresse d'un peu plus près, même s'il n'est pas météorologue, il apparaît toutefois qu'il y a certaines « règles » observables qui régissent le phénomène (Meylan, 1999).

De l'observation, il est déduit que, « en moyenne », plus la durée analysée (le  $D$  d'IDF) augmente, plus l'intensité diminue : les averses les plus brèves sont souvent les plus violentes. Les pluies de longues durées sont généralement non violentes donc de faibles intensités.

Finalement, pour mieux caractériser le phénomène, il est associé à chaque événement une probabilité d'apparition. Pratiquement les ingénieurs et les hydrologues parlent de période de retour : tel événement se produit, en moyenne sur une longue période, toutes les  $x$  années. Il s'agit de fréquence d'apparition (le  $F$  d'IDF).

Ainsi, par l'observation soignée des précipitations et l'analyse statistique des résultats, il est possible d'établir une « loi » de comportement qui lie l'intensité, la durée et la fréquence : c'est une courbe dite « Intensité-Durée-Fréquence » soit IDF. La méthodologie d'établissement des courbes IDF utilisée, est constituée de trois étapes. Dans la première étape, une distribution de probabilité est ajustée à chaque échantillon de chaque intervalle de référence (15, 30, 45, 60, 90, 120, 150 et 180 min). Dans la seconde étape, les quantiles correspondants aux périodes de retour 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans sont déterminés en utilisant une loi théorique de distribution. Les courbes IDF sont modélisées en ajustant une équation sur les quantiles estimés pour chaque période de retour au moyen des régressions non linéaires.

Deux lois de distribution sont utilisées : Loi de Gumbel et loi Log-Normale. Au vu des différents ajustements, la loi Log-Normale est retenue.

### 3.2.Élaboration des courbes IDF pour la totalité des averses avec seuil

La loi Log-Normale a permis de déterminer les quantiles. Cependant pour la validation de la série, le test de Kolmogorov est appliqué pour décider si les points en dehors du diagramme de dispersion sont à considérer ou pas.

### 3.2.1. Test de Kolmogorov

En pratique, ce test est basé sur le critère de concordance  $K(\lambda)$  de Kolmogorov qui est tabulé en fonction de  $\lambda$ . Ce dernier est donné par la formule 3.13.

$$\lambda = D \sqrt{n} \quad (3.13)$$

Avec :

- n : Taille de la série ;
- D : différence entre la probabilité théorique et la probabilité empirique du point ; considéré et est égale à :

$$D = \text{Max} (\Delta P) \quad (3.14)$$

Tous les points en dehors de la droite sont considérés et le D sera calculé ; on vérifie en prenant le maximum de  $\Delta D$  par rapport à tous les points considérés et on calcule  $\lambda$ .

Sur la table de Kolmogorov (tableau 3.11), on cherche le critère  $K(\lambda)$  en fonction de  $\lambda$ .

**Tableau 3.11.** Critère de concordance de Kolmogorov

$\lambda$	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
<b>K(<math>\lambda</math>)</b>	0.000	0.003	0.036	0.136	0.289	0.456	0.730	0.888	0.960	0.988	0.997

La condition de concordance ou de validité est :

$$1-k(\lambda) \geq 10\% \quad (3.15)$$

Si cette condition est vérifiée, le point est considéré, sinon il faut l'exclure de la série et rechercher la cause.

Un exemple d'application de ce test est présenté pour la durée d'agrégation de 15mn (tableau 3.12).

**Tableau 3.12.** Exemple d'application du test pour une durée d'agrégation 15minutes.

Valeurs	Fréquence empirique	Fréquence théorique	D	$\lambda$	K	1-K	État
18.5	0.999	0.99998	0.0013	0.02	-	-	Refusé
16.5	0.996	0.99993	0.0038	0.07	-	-	Refusé
9.9	0.994	0.99516	0.0016	0.03	-	-	Refusé
9.5	0.991	0.99372	0.0027	0.05	-	-	Refusé
7.1	0.988	0.97034	0.0181	0.36	0.0012	0.1	Acceptée

Le test a permis d'écarter des valeurs de la série pour chaque durée d'agrégation (Tableau 3.13).

**Tableau3.13.** Nombre de valeurs n

Durée d'agrégation (mn)	N	Nombre de n valeurs écartés	Taille (N-n) retenue
15	390	4	386
30	377	1	376
45	349	31	318
60	330	11	319
90	316	10	306
120	279	8	271
150	254	10	244
180	230	15	215

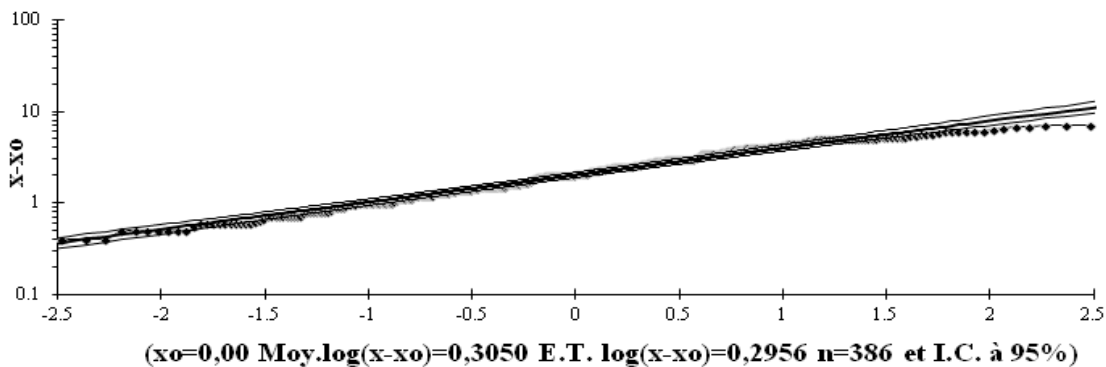
Les valeurs retirées de la série sont des valeurs exceptionnelles dont la fréquence est présentée dans le tableau 3.14 pour la durée de 15 minutes. Puis l'ajustement est réalisé pour une taille de la série de N-n.

**Tableau 3.14.** Période de retour des valeurs extrêmes

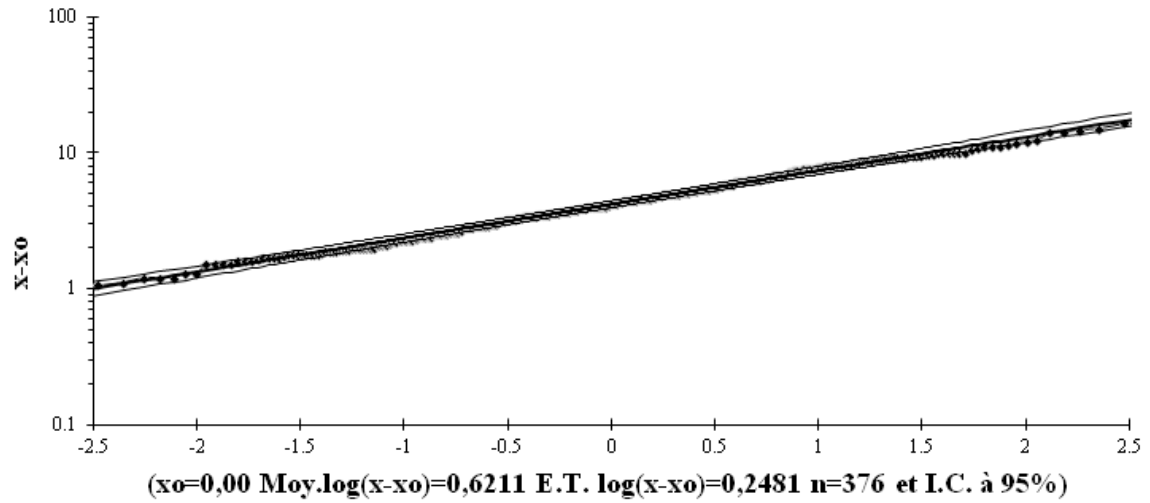
Valeurs externes	P %	Période de retour (ans)
18.5	0.999999	1000000
16.5	0.999996	250000
9.9	0.998720	781
9.5	0.998188	552

### 3.2.2. Pluies probables pour différentes durées

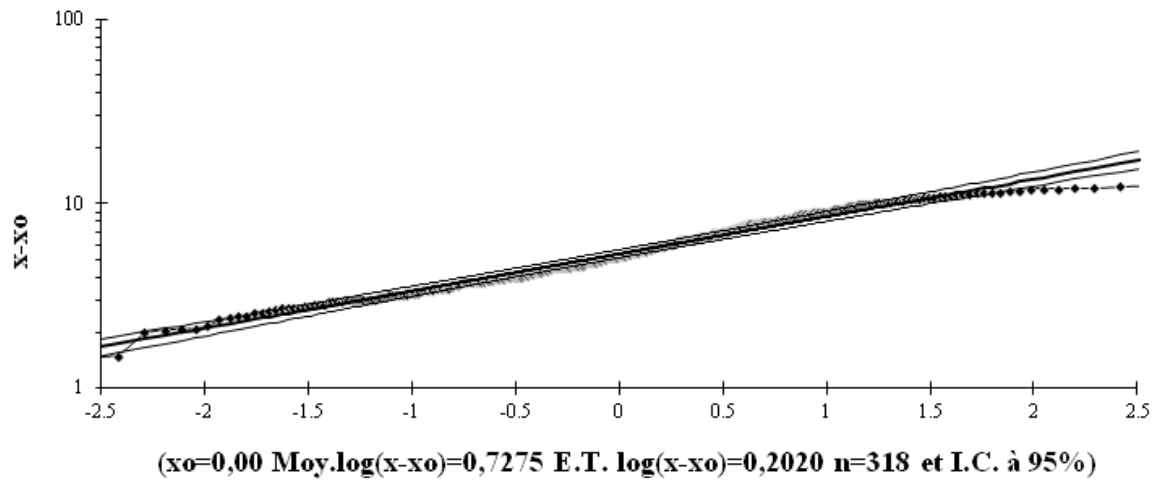
Les valeurs extrêmes ou quantiles pour les périodes de retour 2 ans, 5ans, 10ans, 20ans, 50 et 100 ans sont représentées dans le tableau 3.15, ainsi que les graphes d'ajustement à la loi Log-Normale sont illustrés dans les figures 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 et 3.12 respectivement pour les durées d'agrégation 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150 et 180.



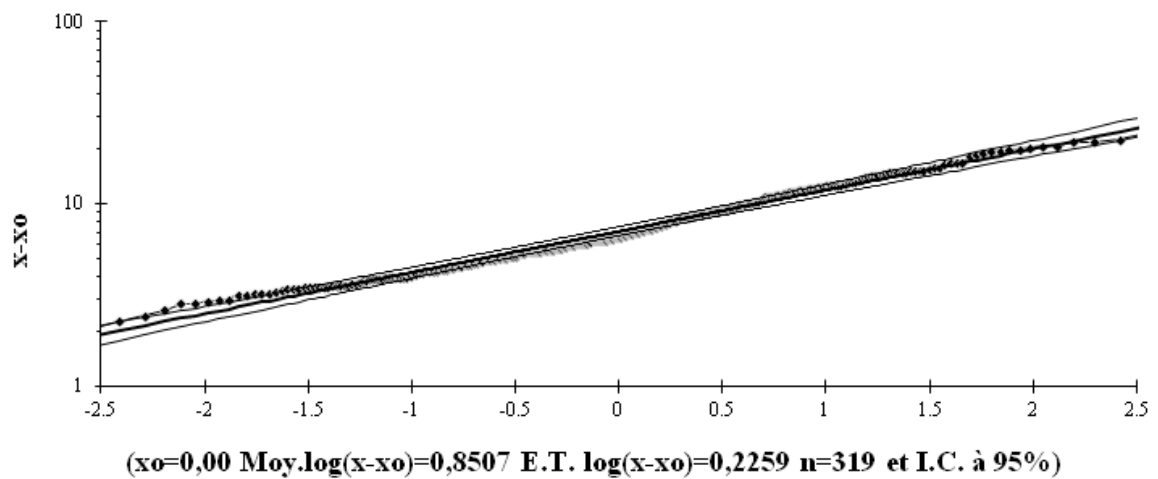
**Figure 3.5.** Ajustement à la loi Log-Normale pour une durée d'agrégation de 15 minutes



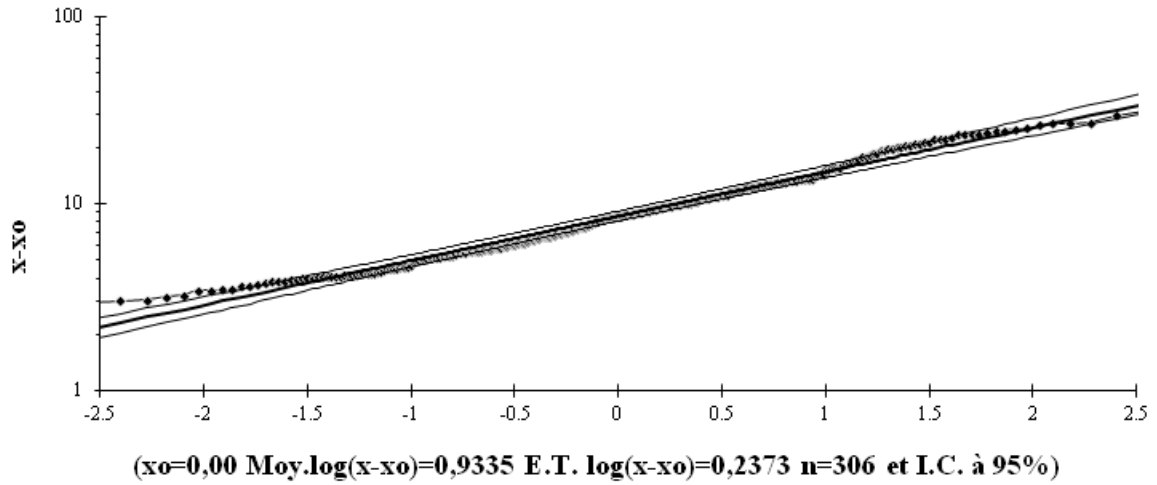
**Figure 3.6.** Ajustement à la loi Log-Normale pour une durée d'agrégation de 30 minutes



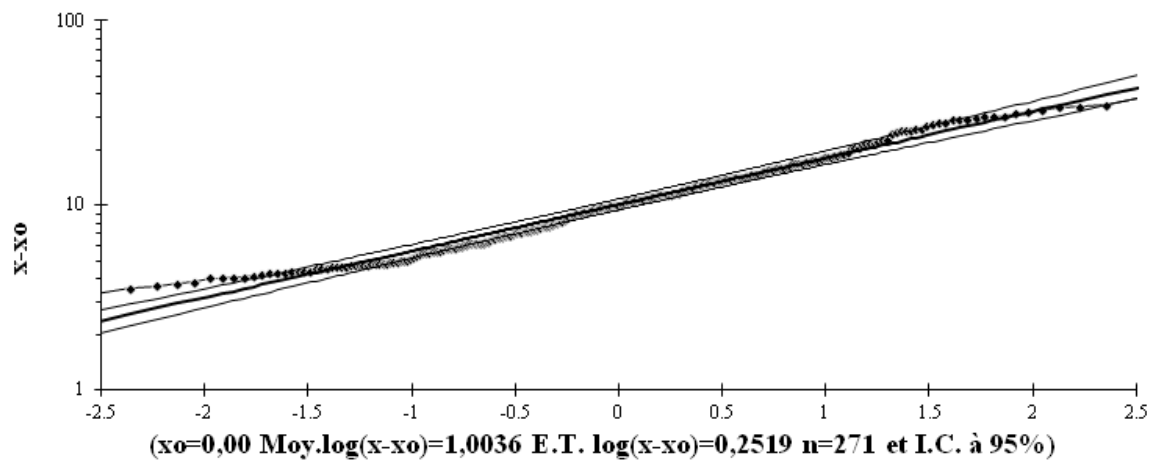
**Figure 3.7.** Ajustement à la loi Log-Normale pour une durée d'agrégation de 45 minutes



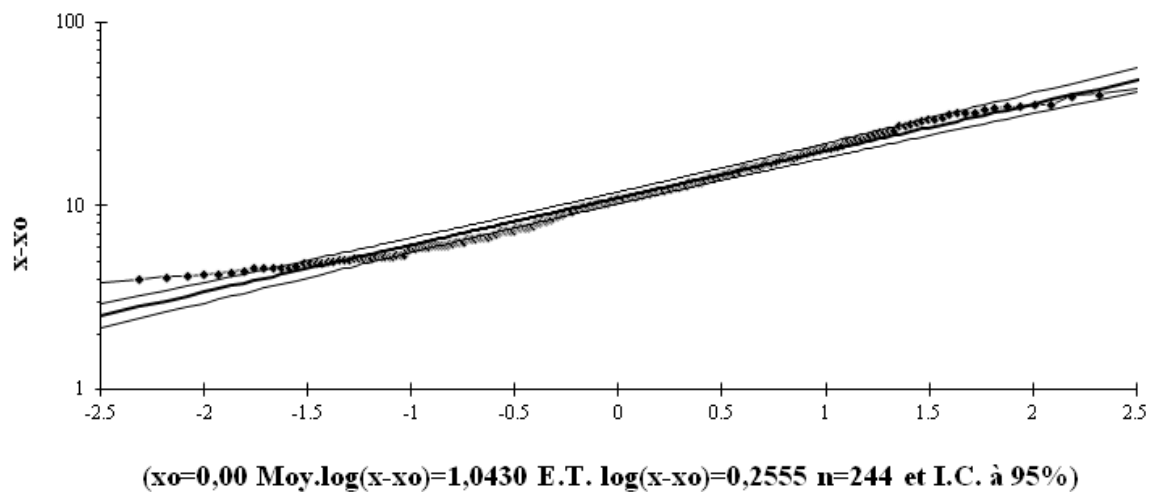
**Figure 3.8.** Ajustement à la loi Log-Normale pour une durée d'agrégation de 60 minutes



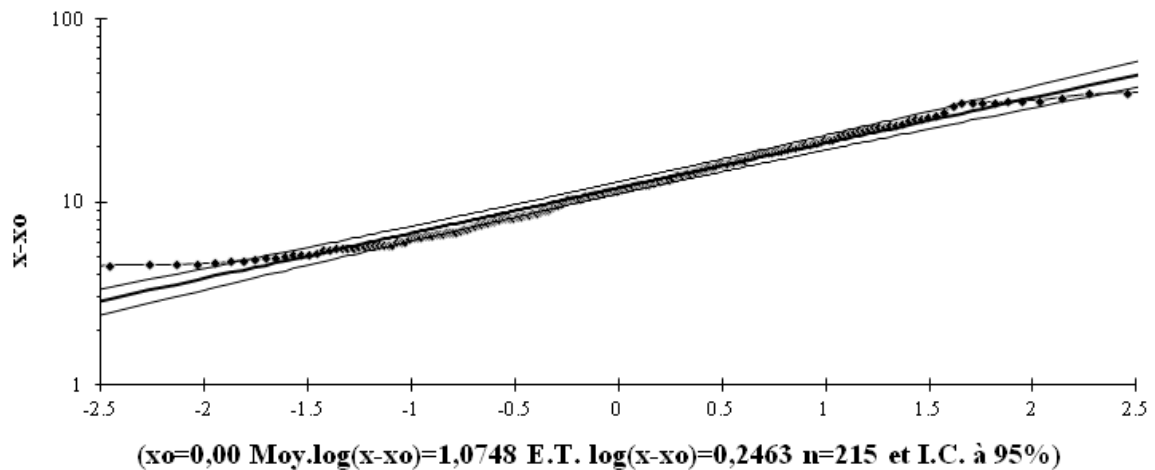
**Figure 3.9.** Ajustement à la loi Log-Normale pour une durée d'agrégation de 90 minutes



**Figure 3.10.** Ajustement à la loi Log-Normale pour une durée d'agrégation de 120 minutes



**Figure 3.11.** Ajustement à la loi Log-Normale pour une durée d'agrégation de 150 minutes



**Figure 3.12.** Ajustement à la loi Log-Normale pour une durée d'agrégation de 180 minutes

**Tableau 3.15.** Pluies probables (mm)

Période de retour T (An)	$\Delta t$ (minutes)							
	15	30	45	60	90	120	150	180
2	6.01	8.74	9.02	9.98	11.25	13.02	14.10	15.87
5	8.12	11.37	12.98	14.61	15.97	17.62	19.83	20.58
10	11.30	13.64	15.97	17.02	18.31	19.61	25.04	30.69
20	16.28	19.97	26.47	28.04	32.67	34.95	36.97	38.62
50	18.98	21.68	28.64	30.97	34.97	39.02	42.97	45.08
100	22.94	25.98	32.61	35.05	38.94	42.85	46.81	60.46

### 3.2.3. Courbes Intensité Durée Fréquence IDF.

Les intensités moyennes maximales représentent les valeurs théoriques pour les périodes de retour, 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans. Les résultats de calcul sont dans le tableau 3.16 et les courbes IDF sont illustrées en figure 13.3.

**Tableau 3.16.** Intensités moyennes maximales  $\bar{i}_T$  (mm/h)

Période de retour T (An)	$\Delta t$ (minutes)							
	15	30	45	60	90	120	150	180
2	24.04	17.48	12.03	9.98	7.50	6.51	5.64	5.29
5	32.48	22.74	17.31	14.61	10.65	8.81	7.93	6.86
10	45.20	27.28	21.29	17.02	12.21	9.81	10.02	10.23
20	65.12	39.94	35.29	28.04	21.78	17.48	14.79	12.87
50	75.92	43.36	38.19	30.97	23.31	19.51	17.19	15.03
100	91.76	51.96	43.48	35.05	25.96	21.43	18.72	20.15

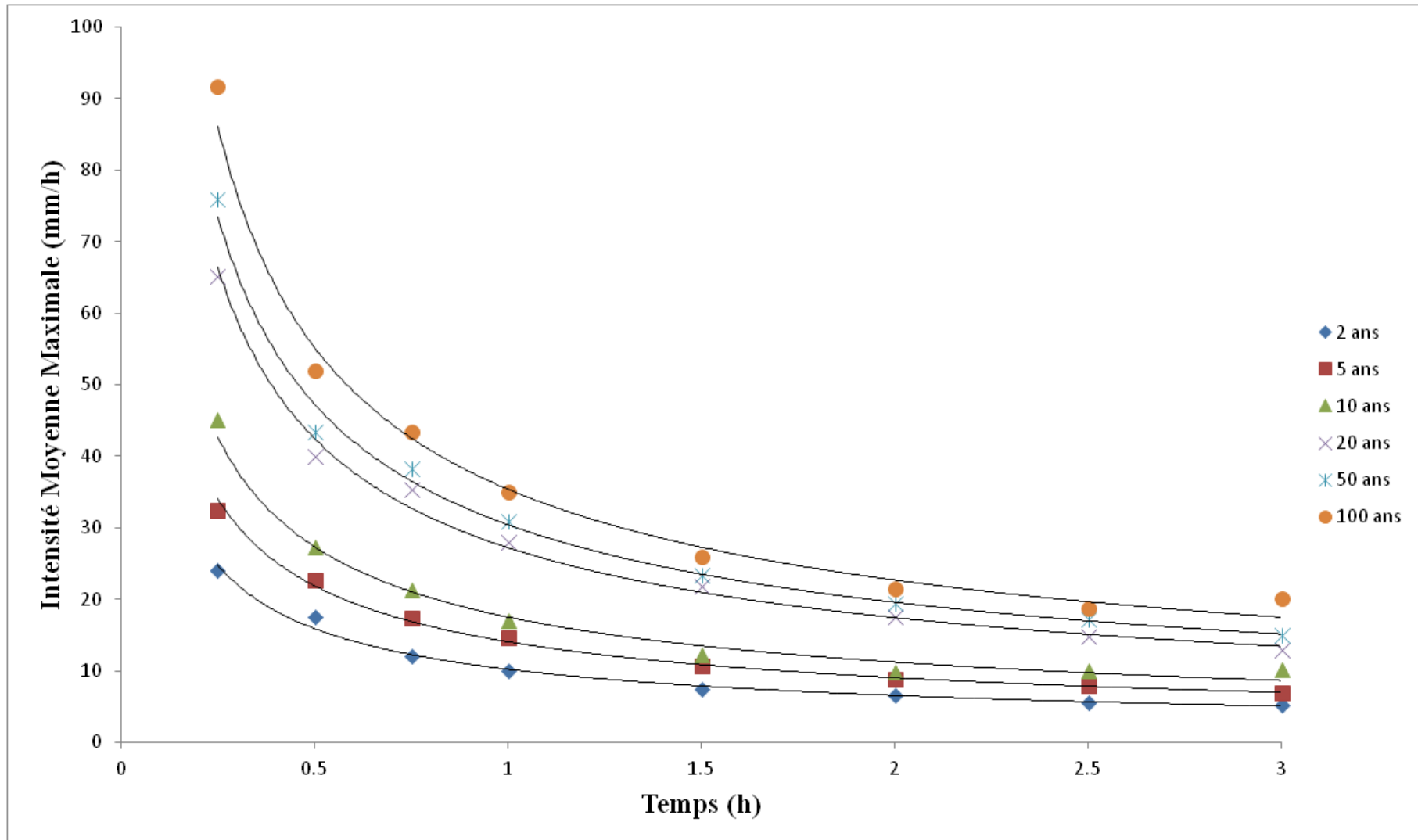


Figure 3.13. Courbes IDF dérivées des averse de toute la série



La figure 3.3 représente un ensemble de courbes (IDF) correspondant chacune à une période de retour pour différents pas de temps. La relation fonctionnelle qui en découle est de type puissance «  $\bar{i}_t = a \cdot t^{-b}$  » et est représentée dans le tableau 3.17, où b représente l'exposant climatique de la zone d'étude, qui est tout simplement la pente de la droite en modèle puissance, converti en linéaire.

**Tableau 3.17.** Modèles des courbes IDF pour chaque période de retour

Période de retour T	Probabilité	Modèles
ans	%	$\bar{i}_t = a \cdot t^{-b}$
2	50	$10,21 t^{-0,64}$
5	20	$14,07 t^{-0,64}$
10	10	$17,51 t^{-0,64}$
20	5	$27,22 t^{-0,64}$
50	2	$30,43 t^{-0,64}$
100	1	$35,39 t^{-0,64}$

Où, a et b sont des coefficients d'ajustement déterminés par la méthode des moindres carrés (Dagnellie, 1992). Dans ce traitement, « b » représente l'exposant climatique de la station pluviographique pour la région d'étude (b=0.64).

A titre comparatif, l'exposant climatique donné par les services de l'ANRH est estimé à 0.46, très inférieur à celui que nous avons calculé. Cette sous estimation de l'exposant climatique induit à un sous dimensionnement du réseau d'assainissement des eaux pluviales dans la mesure, où celui-ci s'implique dans le calcul du débit pluvial.

### 3.3. Élaboration des courbes « HDF »

Après construction des courbes « Intensité-Durée-Fréquence » (IDF), les courbes « Hauteurs-Durée-Fréquence » (HDF), sont construites à partir des courbes IDF par la relation 3.16.

$$H_{t,p\%} = \bar{i}_{t,p\%} \cdot \Delta t \tag{3.16}$$

Avec :

$\bar{i}_{t,p\%}$  (mm/h): Intensité moyenne maximale de la pluie pour un intervalle de référence

$\Delta t$  et une probabilité p% ;

$H_{t,p\%}$  (mm): Hauteur de pluie durant l'intervalle de référence «  $\Delta t$  » et de période p%.

Les hauteurs d'eau utilisées pour l'établissement des courbes HDF sont représentées dans le tableau 3.18.

**Tableau 3.18.** Hauteur de pluie des différentes périodes de retour en mm

Pas de temps (minutes)	Périodes de retour (ans)					
	2	5	10	20	50	100
15	6.2	8.5	10.6	16.5	18.5	21.5
30	8.0	11	13.6	21.2	23.7	27.6
45	9.2	12.7	15.8	24.5	27.4	31.9
60	10.2	14.1	17.5	27.2	30.4	35.4
90	11.8	16.3	20.3	31.5	35.2	40.9
120	13.1	18.1	22.5	34.9	39.0	45.4
150	14.2	19.6	24.4	37.9	42.3	49.2
180	15.2	20.9	26.0	40.4	45.2	52.6

La représentation graphique est donnée en figure 3.14.

## CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre est l'élaboration des courbes IDF et la détermination de l'exposant climatique, afin d'estimer avec précision l'intensité moyenne maximale de la pluie pour une durée et une période de retour donnée.

Pour une période de retour de 10 ans et une intensité de durée 15mn, le débit spécifique pluvial considéré dans le dimensionnement des réseaux d'assainissement est estimé à :

$$q_{15mn,10\%} = 118 \text{ l/s.ha} \quad (3.17)$$

Ce débit considéré très important, nécessite un aménagement conséquent d'évacuation des eaux pluviales.

Au cours de cette étude, on a remarqué dans que l'intensité des averses est très importante lors des 15 premières minutes, et ce sont elles qui causent les dégâts. Parfois une averse de 1 minute donne une intensité de 60mm/h, ce qui est très important.

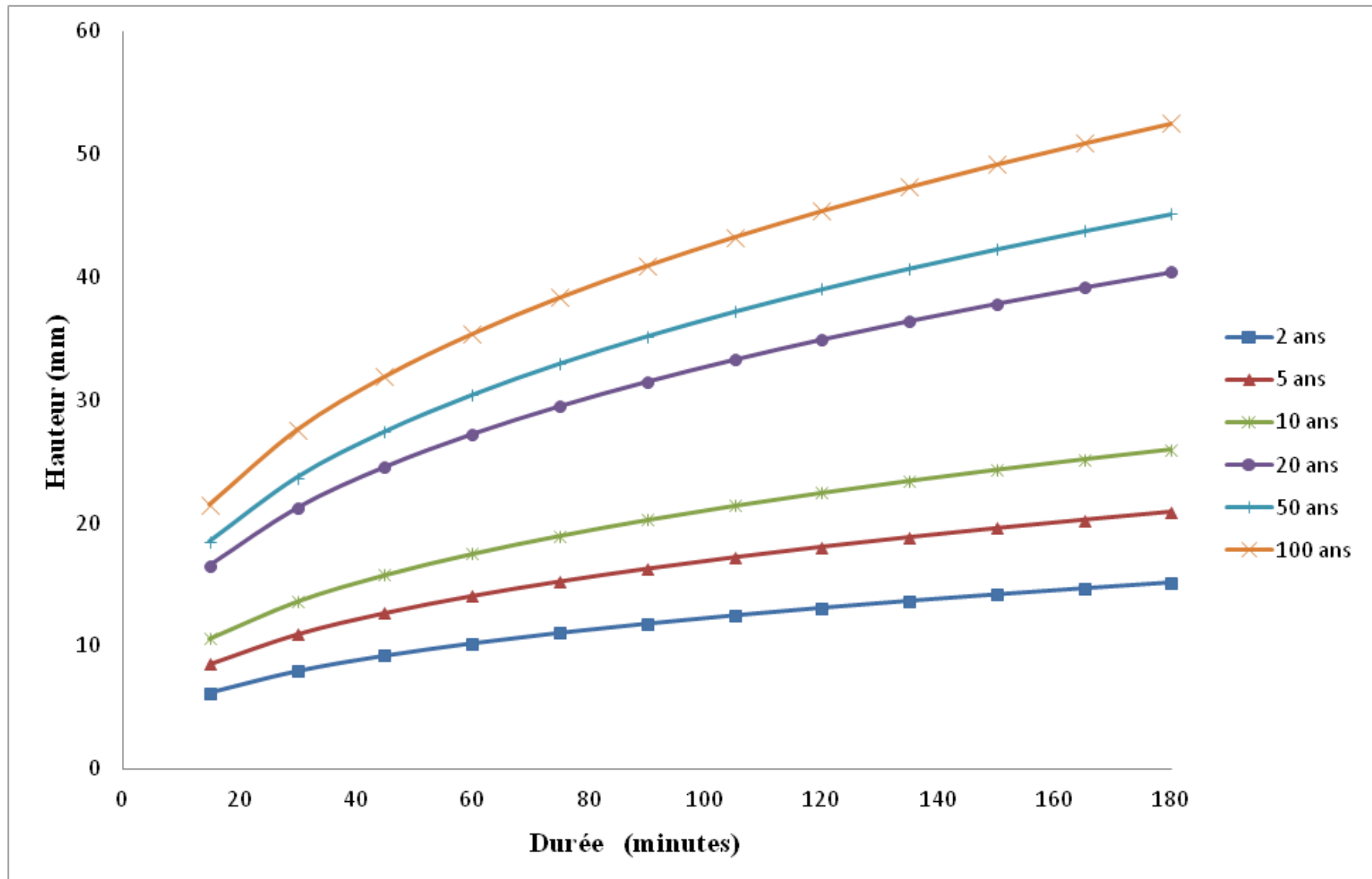


Figure 3.14. Courbes HDF pour les différentes périodes de retour

**CHAPITRE IV**  
**MODELISATION DU DEBIT PLUVIAL**

---

## CHAPITRE IV : MODELISATION DU DEBIT PLUVIAL

### 1. INTRODUCTION

Dans le cas des petits bassins versants non jaugés, l'évaluation des débits de crues repose exclusivement sur l'information pluviométrique.

Ce chapitre se base essentiellement sur la transformation de la lame précipitée en débit à l'exutoire du bassin versant, en utilisant trois modèles, modèle des Curves Number, modèle HEC-HMS et la méthode des Isochrones.

Le débit de crue, ainsi que sa propagation dans le temps est établi pour les périodes de retour de 10, 50 et 100ans.

### 2. PRECIPITATIONS

La pluie est l'élément clef de la plupart des études et analyses hydrologiques. Afin d'appréhender le phénomène de ruissellement, une connaissance approfondie de la pluie est nécessaire. En effet, l'intensité et la durée de cette dernière conditionnent le débit maximum de ruissellement (Ben-Zvi, 2009).

Traditionnellement, la pluie de projet, considérée pour le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques (réseaux d'égouts, bassins de rétention, déversoirs d'orages, etc.) est une averse uniforme (*uniform design storm*). C'est-à-dire ; une pluie ayant une intensité constante durant toute sa durée, qui est souvent prise égale au temps de concentration du bassin sur lequel elle sera appliquée. En effet, il a été cité qu'à égalité d'intensité, les pluies occasionnant le débit maximum en un point du réseau d'écoulement sont celles dont la durée de précipitation est au moins égale au temps de concentration de ce dernier (Reminieras, 1986).

- **Transformation de la précipitation**

La pluie précipitée (pluie brute) est soumise à trois types de pertes : les pertes par interception, celles par emmagasinement ou rétention de surface et celles par infiltration. Laborde (2007) étudie les principales transformations de la pluie en fonction du temps ou de la quantité de pluie déjà tombée, une hauteur de pluie se répartit entre :

- Interception :
  - Une évaporation directe (souvent négligeable) ;
  - Une accumulation dans les dépressions (puis évaporation ou infiltration) ;
  - Une interception par les végétaux (puis évaporation).
- Infiltration :
  - Un écoulement souterrain vers les nappes ;
  - Une humidification du sol (puis évaporation ou égouttage).
- Ruissellement :
  - Un ruissellement retardé ;
  - Un ruissellement pur.

### 3. Modélisation de la transformation pluie-débit

Dans le cadre d'une description selon le principe établi par Horton, la transformation de la pluie en hydrogramme de crue se traduit par l'application successive de deux fonctions, nommées respectivement fonction de production et fonction de transfert.

La fonction de production permet de déterminer le hyétogramme de pluie nette à partir de la pluie brute. La fonction de transfert permet de déterminer l'hydrogramme résultant de la pluie nette (la fraction de pluie brute participant totalement au ruissellement).

Le passage du hyétogramme à l'hydrogramme de crue fait intervenir toutes les caractéristiques météorologiques, physiques et hydrologiques du bassin versant considéré, sachant que la détermination d'une relation analytique rigoureuse entre précipitation et débit est une tâche très difficile. Toutefois, l'analyse de séries de couples pluie-débit permet d'obtenir des informations pertinentes sur la fonction de transfert du bassin versant quand l'information relative au débit est disponible, ce qui n'est pas le cas dans notre zone d'étude. De ce fait, nous disposons uniquement de la variable précipitation, nous avons jugé utile d'utiliser les modèles existants dans la littérature pour aborder la problématique.

Trois modèles ont fait l'objet d'une application dans la zone d'étude, à savoir :

- Modèle HEC-HMS ;
- Modèle SCS Curve Number,
- Méthode de l'hydrogramme synthétique communément la méthode des isochrones.

#### 3.1. Modèle HEC-HMS

Le HEC-HMS est un code de calcul très flexible employé pour modéliser le processus pluie-débit dans un bassin versant ou une région. A l'aide de son interface fonctionnant sous l'environnement Windows le modèle HEC-HMS est d'usage très souple. Il nécessite une

étape de préparation des données, qui consiste en une schématisation du bassin versant appelé modèle du bassin.

### 3.1.1. Préparation des entrées du modèle HEC-HMS

La modélisation de la réponse d'un bassin versant soumis à un phénomène pluvieux sous le logiciel HEC-HMS est découpée en deux parties :

- La modélisation du bassin versant.
- La modélisation des précipitations.

#### 3.1.1.1. Modélisation du bassin versant

La modélisation d'un bassin versant consiste, en premier lieu, en un découpage de celui-ci en sous-bassins versants, ensuite, spécifier les méthodes utilisées pour le calcul des pertes (fonction de production) et de ruissellement (fonction de transfert).

- **Modélisation des pertes par le modèle SCS Curve Number (CN) (fonction de production)**

HEC-HMS calcule les volumes d'écoulements en soustrayant aux précipitations les quantités d'eau qui sont stockées, infiltrées ou évaporées sur le bassin versant. L'interception, l'infiltration, le stockage et l'évaporation sont représentées par le HEC-HMS comme étant des pertes.

Le modèle SCS Curve Number (CN) estime l'excès de précipitation comme une fonction de précipitation cumulée, de la couverture et de l'humidité initiale du sol.

- **Modélisation de ruissellement par le modèle CLARK (fonction de transfert)**

Il s'agit d'un modèle quasi-conceptuel puisqu'il prend en compte les deux processus intervenant dans la transformation d'un excès de précipitation en ruissellement, à savoir le mouvement de l'eau de son origine jusqu'à l'exutoire du bassin versant et l'atténuation de cette quantité d'eau par stockage lors de son parcours.

La simulation avec HEC-HMS par le modèle CLARK nécessite la détermination du temps de concentration (time of Concentration) et du coefficient de stockage (Storage Coefficient) des sous bassins versants.

Le temps de concentration (en heure) est calculé pour les sous bassins à l'aide de la formule Soil Conservation Service (SCS) (Rahai, 2007). Cette formule est recommandée pour une simulation avec HEC-HMS.

$$T_c = \left[ \frac{0.87 L^3}{H_{\max} - H_{\min}} \right]^{0.385} \quad (4.1)$$

Le coefficient de stockage ( $C_s$ ) (en heure) a été approximé par une valeur correspondant à la moitié de celle du temps de concentration (HEC-HMS, 2000), donnée dans la formule 4.2.

$$C_s = 0.5 \times T_c \quad (4.2)$$

### 3.1.1.2. Modélisation des précipitations par la méthode de la pluie hypothétique basée sur la fréquence

L'objectif de cette méthode est de définir un événement pour lequel la hauteur et la durée des précipitations sont déterminées pour une probabilité donnée. Pour définir cet événement avec HEC-HMS, la hauteur de précipitation en chaque pas de temps pour une probabilité choisie est vérifiée. Les hauteurs des précipitations peuvent être déduites à partir des courbes HDF (Hauteur-Durée-Fréquence). La distribution de l'intensité des précipitations est non uniforme sur le bassin versant, la hauteur moyenne sur la surface du bassin est inférieure à la hauteur donnée par la courbe HDF. Pour palier à ce problème, le US. Weather Bureau, a défini des facteurs qui permettent d'ajuster les hauteurs données par les courbes HDF à la hauteur moyenne. Ces facteurs sont fonction de la surface du bassin et de la durée de la pluie, (Henine, 2004).

### 3.1.2. Simulation hydrologique et visualisation des résultats

A présent, toutes les parties indispensables à une simulation hydrologique sous HEC-HMS sont prêtes, il ne nous reste que le lancement de la simulation.

L'outil principal de cette partie est le gestionnaire d'exécution obtenu à partir de l'écran « Basin Model ». L'exécution est lancée après avoir sélectionné un « Run ». Le Run est défini par le modèle de bassin et le modèle de précipitation.

Les résultats peuvent être visualisés en utilisant l'écran du modèle en chaque élément de bassin (les jonctions et les sous-bassins) sous forme :

- De graphe (graph) ;
- De tableau récapitulatif des résultats (Summary table) ;
- De tableau relatif aux résultats calculés à chaque pas de temps (Time Series Table).



### 3.2. Méthode du SCS Curve Number

Proposée en 1954, par Us Soil Censervation Service, cette méthode est empirique, élaborée à partir du suivi du ruissellement de certains bassins expérimentaux. Elle s'appuie sur le concept que la précipitation totale tombant sur un bassin est basée sur le potentiel absorbant du sol d'une certaine quantité d'humidité. Sur la base des observations du terrain, ce potentiel de stockage maximal  $S$  (millimètre ou en pouce) est lié à CN (Courbe Numéroté) qui est une caractéristique du type de sol, de l'utilisation du sol et du degré initial de saturation connu sous le nom de l'état d'humidité initiale ou pertes initiales ( $I_a$ ), en admettant que  $I_a=0.2 S$ . La valeur de  $S$  (mm) est définie par la formule 4.3.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4.3)$$

Le CN est simplement une transformation non-linéaire de  $S$  qui est un paramètre de stockage. Il est déterminé en considérant essentiellement les types de sol formant le bassin et le couvert végétal.

La méthode des Curve Number est moins appropriée pour l'analyse de petites précipitations et il est reconnu qu'elle devient moins précise pour des lames de pluie inférieures à 10mm.

La méthode SCS définit les groupes de sols comme suit :

**Groupe A :** Sols présentant des taux élevés d'infiltration. Il comprend des sols sableux contenant une faible fraction de limon et d'argile.

**Groupe B :** Sols avec des taux d'infiltration moyen. Composés essentiellement de sols sableux-limoneux de texture moyennement grossière à moyennement fine.

**Groupe C :** Sols présentant des taux d'infiltration lents.

**Groupe D :** Sols avec de très faible taux d'infiltration. Constitués principalement d'argile en surface.

Les tableaux 4.1 et 4.2, donnent les valeurs du CN suivant les surfaces drainées, les conditions d'humidité antécédentes et pour les différents types de sol

**Tableau 4.1.** Indice de ruissellement CN pour différentes occupations du sol (conditions antécédentes d'humidité moyennes,  $I_a=0.2S$  (adapté de Chow et al, (1988), Rivard, 2005).

Type d'utilisation du sol	Groupe hydrologique du sol			
	A	B	C	D
Terrain cultivé : Sans traitement de conservation	72	81	88	91
Terrain cultivé : Avec traitement de conservation	62	71	78	81
Pâturage : Mauvaise condition	68	79	86	89
Pâturage : Bonne condition	39	61	74	80
Champs ou prairie : Bonne condition	30	58	71	78
Boisé ou forêt : Mauvais couvert	45	66	77	83
Boisé ou forêt : Bon couvert	25	55	70	77
Espace verts, pelouses, parcs, cimetières, etc.				
Bonne condition : 75% ou plus en gazon	39	61	74	80
Condition moyenne : 50 à 75% en gazon	49	69	79	84
Secteurs commerciaux (85% imperméable)	89	92	94	95
Secteurs industriels (72% imperméable)	81	88	91	93
Résidentiel :				
Dimensions moy. des lots	% imperméable			
0.05 hectare ou moins	65	77	85	90
0.1 hectare	38	61	75	83
0.13 hectare	30	57	72	81
0.2 hectare	25	54	70	80
0.4 hectare	20	51	68	79
Stationnement pavés, toits, entrée d'autos, rue		98	98	98
Pavés avec bordure et égout pluvial		98	98	98
Gravier		76	85	89
Non aménagée		72	82	87

**Tableau 4.2.** Détermination du numéro de la courbe de saturation en fonction des caractéristiques du bassin versant.

Type de couvert	Mode de culture	Condition hydrologique pour l'infiltration	Courbes de saturation			
			Groupe A	Groupe B	Groupe C	Groupe D
Friche	SR		77	86	91	94
Cultures en rangées	SR	Faible	72	81	88	91
	SR	Bonne	67	78	85	89
	C	Faible	70	79	84	88
	C	Bonne	65	75	82	86
	C+T	Faible	66	74	80	82
	C+T	Bonne	62	71	78	81
Céréales	SR	Faible	65	76	84	88
	SR	Bonne	63	75	83	87
	C	Faible	63	74	82	85
	C	Bonne	61	73	81	84
	C+T	Faible	61	72	79	82
	C+T	Bonne	59	70	78	81
Légumineuses à grains serrés ou cultures en rotation	SR	Faible	66	77	85	89
	SR	Bonne	58	72	81	85
	C	Faible	64	75	83	85
	C	Bonne	55	69	78	83
	C+T	Faible	63	73	80	83
	C+T	Bonne	51	67	76	80
Pâturage ou zone de parcours		Faible	68	79	86	89
		Moyenne	49	69	79	84
		Bonne	39	61	74	80
	C	Faible	47	67	81	88
	C	Moyenne	25	59	75	83
	C	Bonne	6	35	70	79
Pré (permanent)		id.	30	58	71	78
Bois		Faible	45	66	77	83
		Moyen	36	60	73	79
		Bon	25	55	70	77
Routes (chemin de terre)			72	82	87	89
			74	84	90	92

SR : Rangés droite

C : Cultures suivant les courbes de niveau

T : Cultures en terrasse

C+T : Cultures en courbe de niveau et en terrasse.

#### • Méthode de calcul

Les calculs se font à partir des courbes HDF (Hauteur-Durée-Fréquence) (figure 3.4), qui découle de l'étude des pluies de courtes durées.

Le choix du numéro de la courbe CN est fonction de la nature du sol. Selon la géologie de la zone d'étude, les sols sont argileux et gonflants où l'infiltration est quasiment nulle. Ce type de sol est classé dans le type D.

Pour un bassin versant composé de différents types de sols, le CN moyen est calculé par la relation (4.4).

$$N = \frac{\sum_i^n a_{ij} CN}{\sum_i^n A_i} \quad (4.4)$$

Le pas de temps pris est de 15mn. Chaque sous bassin est calculé indépendamment pour les différentes périodes de retour 10,50 et 100ans, les résultats sont résumés dans le tableau 4.7.

### 3.3. Méthode des isochrones ou de l'Hydrogramme synthétique

La naissance de cette méthode date de 1960 en Angleterre dans BRRL (British Road Research Laboratory). Son principe est d'établir une relation entre la surface du bassin et le temps de concentration, permettant de définir des courbes isochrones. Ces dernières sont des courbes d'égal temps de ruissellement dictées par la géométrie des bassins.

Pour la méthode des isochrones, la détermination du débit maximal des sous bassins doit passer par le grand bassin versant dans lequel ils sont inclus (figure 2.4), dont les caractéristiques morphologiques sont présentées dans le tableau 2.1.

#### 3.3.1. Construction des courbes isochrones

L'isochrone la plus éloignée représente le temps de concentration du bassin versant, c'est-à-dire le temps mis pour que toute la surface du bassin versant contribue à l'écoulement vers l'exutoire après une averse supposée homogène. Le tracé du réseau d'isochrones consiste à déterminer le temps à partir de la vitesse de transfert des eaux d'une surface à l'autre jusqu'à l'exutoire (formule 4.5).

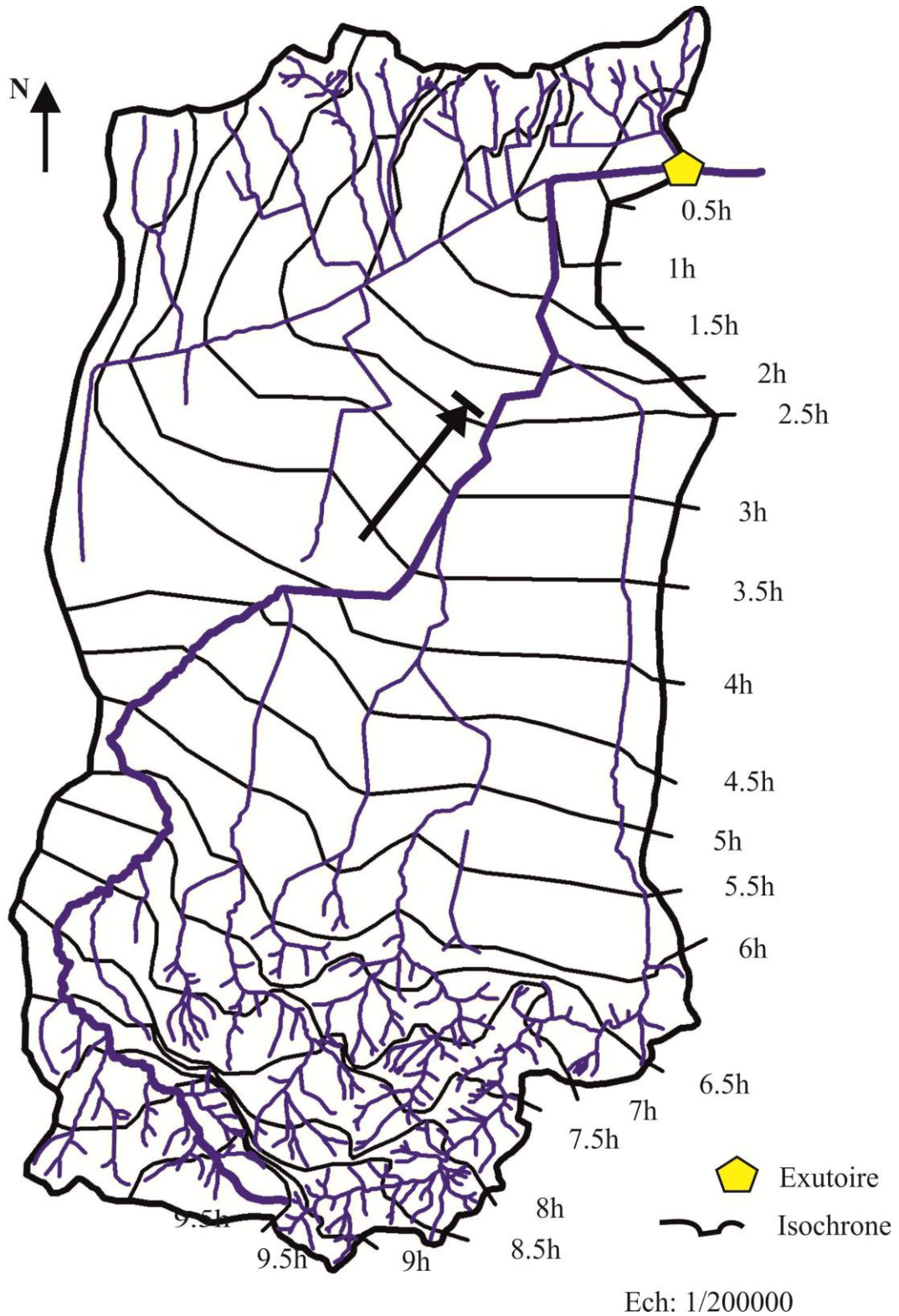
$$t_i = \frac{d_i}{V_m} \quad (4.5)$$

Avec :

$d_i$  : Distance mesurée suivant le trajet de l'eau ;

$V_m$  : Vitesse moyenne d'écoulement.

Le réseau isochrone est donné en figure 4.1. Les surfaces débitantes “Si” sont déterminées par planimétrie, (tableau 4.3). Ces surfaces sont déterminées pour chaque pas de temps :



**Figure 4.1.** Bassin Versant en isochrones de Oued Djer

**Tableau 4.3.** Surfaces débitantes Km<sup>2</sup>

<b>s1</b>	<b>s2</b>	<b>s3</b>	<b>s4</b>	<b>s5</b>	<b>s6</b>	<b>s7</b>	<b>s8</b>	<b>s9</b>	<b>s10</b>	<b>s11</b>	<b>s12</b>	<b>s13</b>	<b>s14</b>	<b>s15</b>	<b>s16</b>	<b>s17</b>	<b>s18</b>	<b>s19</b>	<b>s20</b>	<b>S max</b>
1.02	2.86	2.64	5.64	5.28	9.16	11.10	9.52	10.71	7.28	7.02	7.79	5.21	6.23	5.35	4.29	3.18	2.45	2.74	1.43	1.016
	3.87	5.49	8.28	10.92	14.45	20.26	20.62	20.23	17.99	14.30	14.81	13.00	11.44	11.58	9.64	7.47	5.63	5.19	4.17	3.872
		6.51	11.13	13.56	20.08	25.55	29.78	31.33	27.51	25.01	22.09	20.02	19.23	16.79	15.87	12.82	9.92	8.37	6.62	6.51
			12.15	16.42	22.72	31.18	35.07	40.49	38.61	34.53	32.80	27.30	26.25	24.58	21.08	19.05	15.27	12.66	9.80	12.148
				17.43	25.58	33.82	40.70	45.78	47.77	45.63	42.32	38.01	33.53	31.60	28.87	24.26	21.50	18.01	14.09	17.43
					26.59	36.68	43.34	51.41	53.06	54.79	53.42	47.53	44.24	38.88	35.89	32.05	26.71	24.24	19.44	26.59
						37.69	46.20	54.05	58.69	60.08	62.58	58.63	53.76	49.59	43.17	39.07	34.50	29.45	25.67	37.69
							47.21	56.91	61.33	65.72	67.87	67.79	64.86	59.11	53.88	46.35	41.52	37.24	30.88	47.21
								57.92	64.19	68.35	73.51	73.07	74.02	70.21	63.40	57.06	48.80	44.26	38.67	57.92
									65.20	71.21	76.14	78.71	79.30	79.37	74.50	66.58	59.51	51.54	45.69	65.20
										72.23	79.00	81.35	84.94	84.66	83.66	77.68	69.03	62.25	52.97	72.23
											80.02	84.21	87.58	90.30	88.95	86.84	80.13	71.77	63.68	80.02
												85.22	90.44	92.93	94.59	92.13	89.29	82.87	73.20	85.22
													91.45	95.79	97.22	97.77	94.58	92.03	84.30	91.45
														96.81	100.08	100.40	100.22	97.32	93.46	96.81
															101.10	103.26	102.85	102.96	98.75	101.10
																104.28	105.71	105.59	104.39	104.28
																	106.73	108.45	107.02	106.73
																		109.47	109.88	109.47
																			110.90	110.90

### 3.3.2. Calcul du débit maximum décennal

Le débit est donné par la formule 4.6.

$$Q_{\max} = \frac{S_{\max} \cdot I_{\text{eff}}}{3.6} \quad (4.6)$$

Avec :

$S_{\max}$  : Surface maximale débitante ( $\text{Km}^2$ ) ;

$I_{\text{eff}}$  : Intensité efficace (mm/h) ;

$$I_{\text{eff}} = \frac{P_{\text{eff}}}{t_{\text{eff}}} \quad (4.7)$$

Où :

$P_{\text{eff}}$  : Pluie efficace en mm ;

$t_{\text{eff}}$  : Temps en heure.

La pluie efficace nécessite la détermination de pluie nette ( $p_{\text{nette}}$ ) et du déficit d'écoulement (D). La pluie nette représente la pluie maximale de durée (t) et de probabilité p% qui est donnée par la formule 4.8. Le déficit d'écoulement représente les pertes :

$$P_{\max,t,p\%} = P_{\max,j,p\%} \left( \frac{t}{24} \right)^b \quad (4.8)$$

La pluie maximale journalière probable  $P_{\max,j,p\%}$  découle de l'ajustement des pluies maximales journalières à la loi de Gumbel.

Trois périodes de retour sont prises en considération (10, 50 et 100 ans). Seule la période décennale est prise comme exemple de calcul (tableau 4.4).

Avec :

D : Déficit d'écoulement, il est calculé par la relation 4.9.

$$D = E - P \quad (4.9)$$

E : Écoulement (mm) tiré de la carte des écoulements, élaborée par l'ANRH ;

P : Précipitation (mm) tirée de la carte pluviométrique, élaborée par l'ANRH.

**Tableau 4.4.** Détermination du débit maximum décennal (Bassin Versant de Oued Djer)

S max débitant (Km <sup>2</sup> )	t (h)	p <sub>nette</sub> (mm)	D (mm)	P <sub>effi</sub> (mm)	I <sub>efficace</sub> (mm/h)	Q <sub>max</sub> (m3/s)
1.0	0.5	6.2	0.03	6.2	12.4	3.5
3.9	1	9.7	0.07	9.6	9.6	10.4
6.5	1.5	12.6	0.10	12.5	8.3	15.0
12.1	2	15.1	0.14	15.0	7.5	25.3
17.4	2.5	17.4	0.17	17.3	6.9	33.5
26.6	3	19.6	0.20	19.4	6.5	47.8
37.7	3.5	21.6	0.24	21.4	6.1	64.0
47.2	4	23.6	0.27	23.3	5.8	76.4
57.9	4.5	25.4	0.31	25.1	5.6	89.8
65.2	5	27.2	0.34	26.8	5.4	97.2
72.2	5.5	28.9	0.37	28.5	5.2	104.0
80.0	6	30.5	0.41	30.1	5.0	111.7
85.2	6.5	32.2	0.44	31.7	4.9	115.5
91.4	7	33.7	0.48	33.2	4.7	120.6
96.8	7.5	35.2	0.51	34.7	4.6	124.5
101.1	8	36.7	0.54	36.2	4.5	127.0
104.3	8.5	38.2	0.58	37.6	4.4	128.1
106.7	9	39.6	0.61	39.0	4.3	128.4
109.5	9.5	41.0	0.65	40.3	4.2	129.1
110.9	10	42.4	0.68	41.7	4.2	128.4

Au vu du tableau 4.4, le débit max de fréquence 10% du bassin est de 129.15 m<sup>3</sup>/s, pour une surface maximale débitante de 109.47 Km<sup>2</sup> et un temps de montée de 9h30mn.

Les débits maxima pour les différentes périodes de retour (10, 50 et 100 ans) sont résumés dans le tableau 4.5

**Tableau 4.5.** Débit maxima obtenus par la méthode des isochrones pour le Bassin Versant de Oued Djer.

	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)		
	10 ans	50 ans	100 ans
<b>BV Oued Djer</b>	129.1	175.8	195.5

### 3.3.3. Calcul du temps de base

Le tracé de l'hydrogramme nécessite la détermination du temps de décrue  $t_d$ , soit ses différentes ordonnées. Le temps de base ( $t_B$ ), qui est tout simplement la durée de la crue, est défini par son temps de montée ( $t_m$ ) et son temps de décrue ( $t_d$ ), soit :  $t_B = t_m + t_d$ .



Les ordonnées de l'hydrogramme de crue probable sont calculées par la formule 4.10 et données dans le tableau 4.6.

$$Q_{\max,p\%} = \frac{I_{\text{eff,max}} \sum_{i=1}^n S_i}{3,6} = a \sum_{i=1}^n S_i \quad (4.10)$$

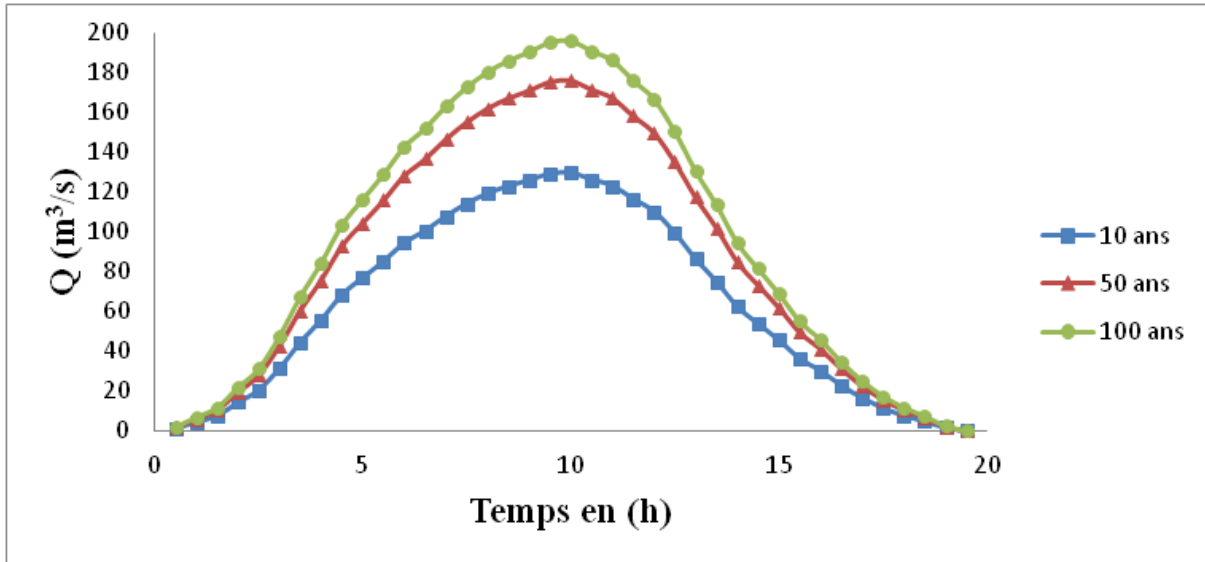
$I_{\text{eff,max}}$  : constante, elle correspond au débit de pointe donc au  $t_{\max}$  ou  $t_m$  (temps de montée).

La somme des  $S_i$  reste à définir, pour la détermination du temps de base de la crue.

**Tableau 4.6** Ordonnées de l'hydrogramme de crue décennal.

	<b>Durée de la crue (h)</b>	<b><math>\Sigma S_i</math> Km<sup>2</sup></b>	<b><math>Q_{\max,i}</math> m<sup>3</sup>/s</b>		<b>Durée de la crue (h)</b>	<b><math>\Sigma S_i</math> Km<sup>2</sup></b>	<b><math>Q_{\max,i}</math> m<sup>3</sup>/s</b>
<b>t montée (t<sub>m</sub>)</b>	0.5	1.0	1.2	<b>t décroue (t<sub>d</sub>)</b>	10	109.9	129.6
	1	3.9	4.6		10.5	107.0	126.3
	1.5	6.5	7.7		11	104.4	123.2
	2	12.1	14.3		11.5	98.8	116.5
	2.5	17.4	20.6		12	93.5	110.3
	3	26.6	31.4		12.5	84.3	99.5
	3.5	37.7	44.5		13	73.2	86.4
	4	47.2	55.7		13.5	63.7	75.1
	4.5	57.9	68.3		14	53.0	62.5
	5	65.2	76.9		14.5	45.7	53.9
	5.5	72.2	85.2		15	38.7	45.6
	6	80.0	94.4		15.5	30.9	36.4
	6.5	85.2	100.5		16	25.7	30.3
	7	91.5	107.9		16.5	19.4	22.9
	7.5	96.8	114.2		17	14.1	16.6
	8	101.1	119.3		17.5	9.8	11.6
	8.5	104.3	123.0		18	6.6	7.8
	9	106.7	125.9		18.5	4.2	4.9
	9.5	109.47	129.1		19	1.4	1.7
			19.5	0	0.0		

Les hydrogrammes de crues du Bassin Versant de Oued Djer sont illustrés dans la figure 4.2.



**Figure 4.2.** Hydrogramme de crue obtenu par la méthode des isochrones pour le Bassin Versant de Oued Djer pour les différentes périodes de retour (10, 50 et 100 ans).

Pour passer de l'échelle du grand Bassin Versant de Oued Djer à l'échelle des sous bassins de notre zone d'étude, nous nous sommes inspirés des courbes isochrones linéarisant les sous bassins, pour déterminer le débit pluvial correspondant, résumé dans le tableau 4.4

### 3.4. Synthèse des résultats

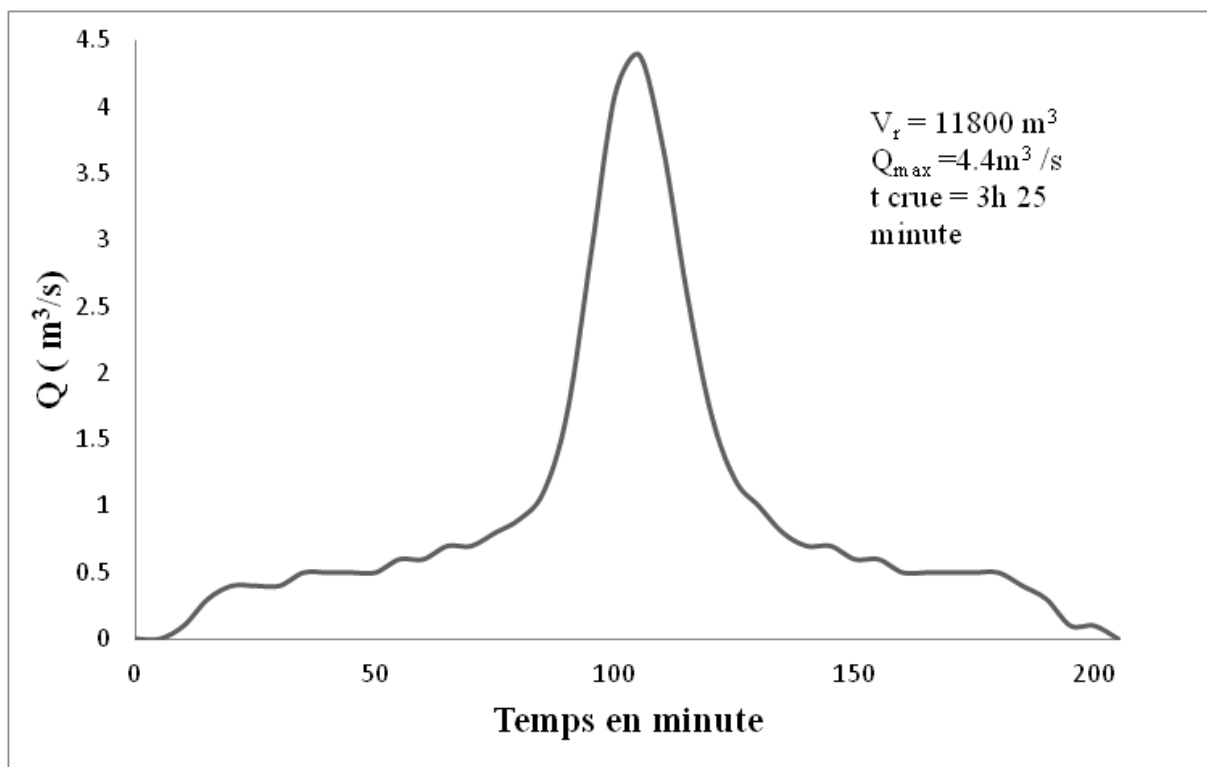
L'application des modèles HEC-HMS et SCS Curve Number et des isochrones des différents sous bassins a généré des hydrogrammes de crues en réponse à des événements pluvieux synthétiques ayant des périodes de retour de 10, 50 et 100 ans. Les résultats de calculs sont résumés dans le tableau 4.7.

**Tableau 4.7.** Débits maxima obtenus par HEC-HMS, SCS et isochrones

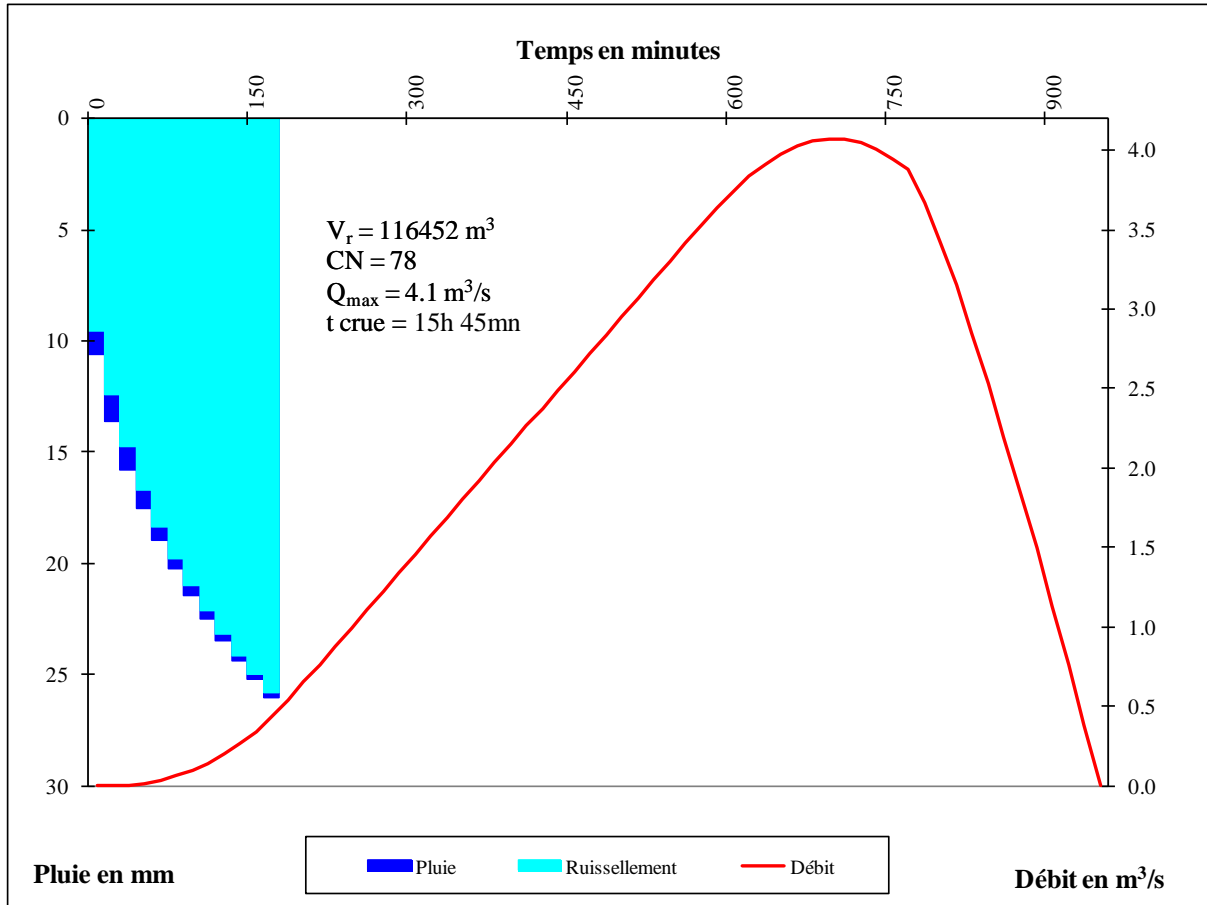
SBV	$Q_{max} (m^3/s)$								
	HEC-HMS			SCS Curve Number			Isochrones		
	10 ans	50 ans	100 ans	10 ans	50 ans	100 ans	10 ans	50 ans	100 ans
<b>01</b>	4.4	7.9	9.2	4.1	7.2	8.3	33.5	45.5	50.5
<b>02</b>	6.9	12.3	14.4	6.5	11.4	13.3	33.5	45.5	50.5
<b>03</b>	9.7	17.2	20.1	8.6	15.3	17.9	15.0	20.4	22.7
<b>04</b>	5.4	9.6	11.2	4.7	8.4	9.8	15.0	20.4	22.7
<b>05</b>	2.9	5.1	6	2.4	4.2	4.9	15.0	20.4	22.7
<b>06</b>	2.8	5	5.8	2.4	4.2	4.9	15.0	20.4	22.7
<b>07</b>	1.7	3.1	3.6	1.6	2.8	3.3	10.4	14.1	15.6
<b>08</b>	0.9	1.6	1.8	0.8	1.4	1.6	10.4	14.1	15.6
<b>09</b>	7.4	13.2	15.6	7.1	12.6	14.7	3.5	4.7	5.3
<b>10</b>	1.7	3.1	3.7	1.6	2.8	3.3	3.5	4.7	5.3

Les valeurs des débits de pointe des crues estimés par les méthodes utilisées diffèrent entre les modèles SCS et HEC-HMS et la méthode des isochrones. Ceci est tout à fait prévisible vu qu'elles ne sont pas basées sur les mêmes hypothèses ni qu'elles utilisent les mêmes paramètres. La méthode « SCS » et le modèle « HEC-HMS », ont pratiquement les mêmes principes. Ils tiennent compte du type de sol, de l'imperméabilité, par contre la méthode des isochrones prend en considération la réaction des sous bassins par rapport au comportement du bassin versant. Les autres modèles considèrent que les sous bassins réagissent indépendamment alors que ce n'est pas le cas.

Les figures 4.3 et 4.4 illustrent les hydrogrammes de crues du sous bassin 01 pour une période de retour de 10ans obtenus respectivement avec les méthodes HEC-HMS et SCS



**Figure 4.3.** Hydrogramme de crue obtenu par le modèle HEC-HMS pour une période de retour de 10 ans pour le sous bassin 01.



**Figure 4.4.** Hydrogramme de crue obtenu par la méthode SCS pour une période de retour de 10 ans pour le sous bassin 01.

Les figures (4.5, 4.6, 4.7) et (4.8, 4.9, 4.10), représentent respectivement les hydrogrammes de crues des modèles « HEC-HMS » et « SCS » pour les 10 sous bassins pour les différentes périodes de retour (10, 50 et 100 ans).

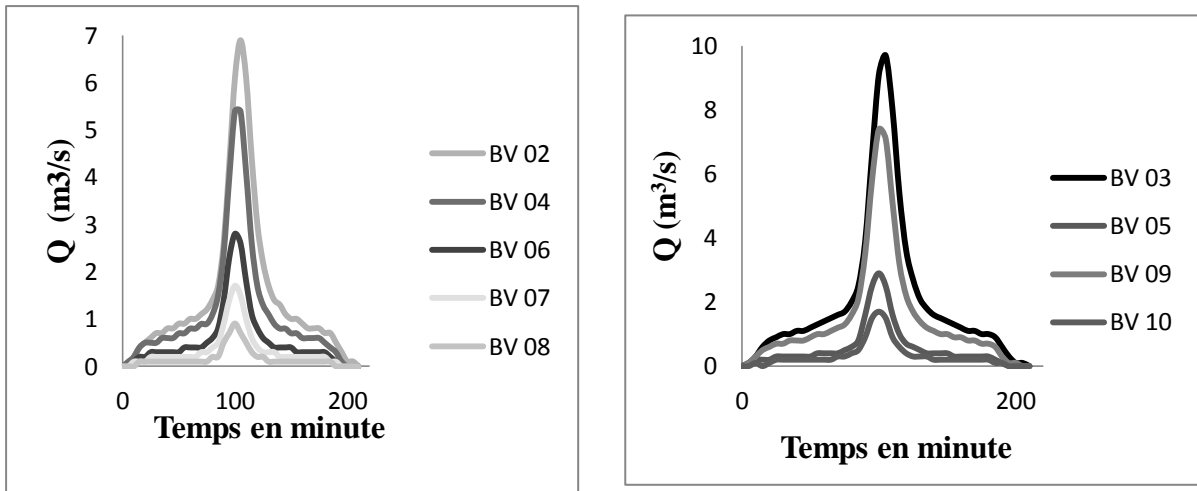


Figure 4.5. Hydrogrammes des crues obtenus par la méthode du modèle HEC-HMS pour une période de retour de 10 ans.

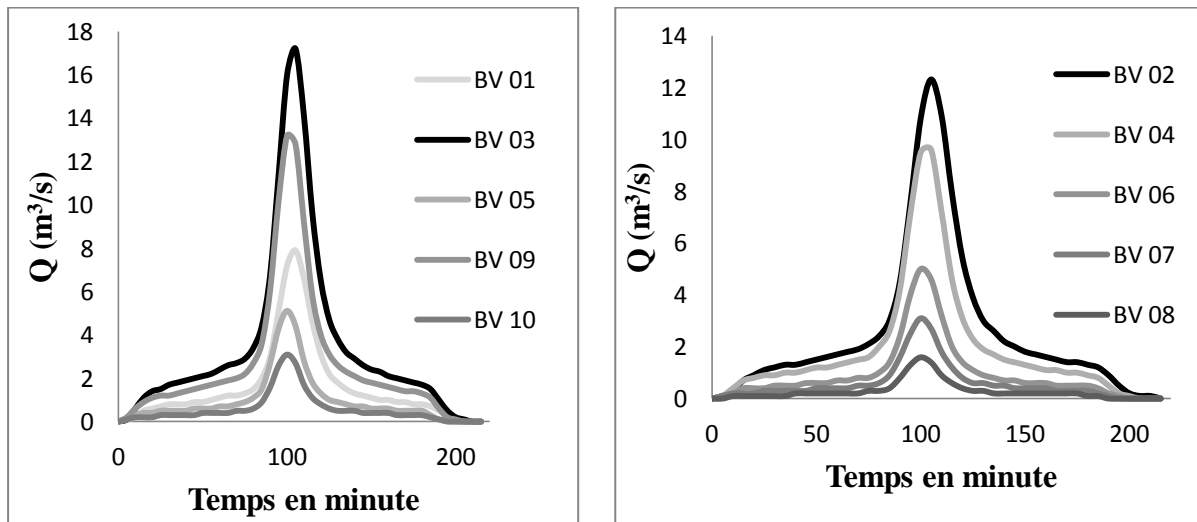


Figure 4.6. Hydrogrammes des crues obtenus par la méthode du modèle HEC-HMS pour une période de retour de 50 ans.

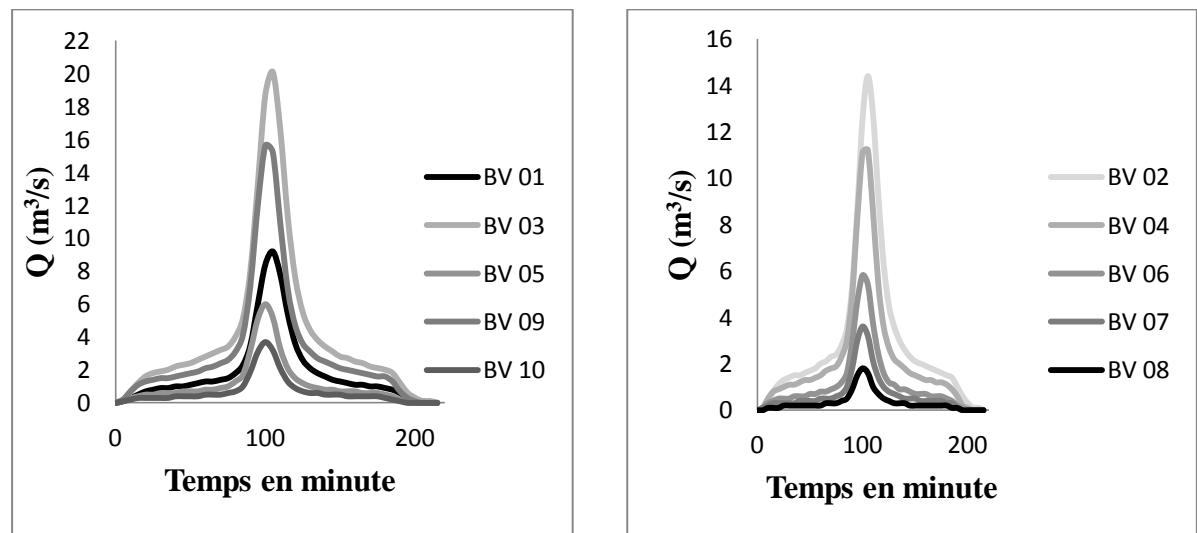
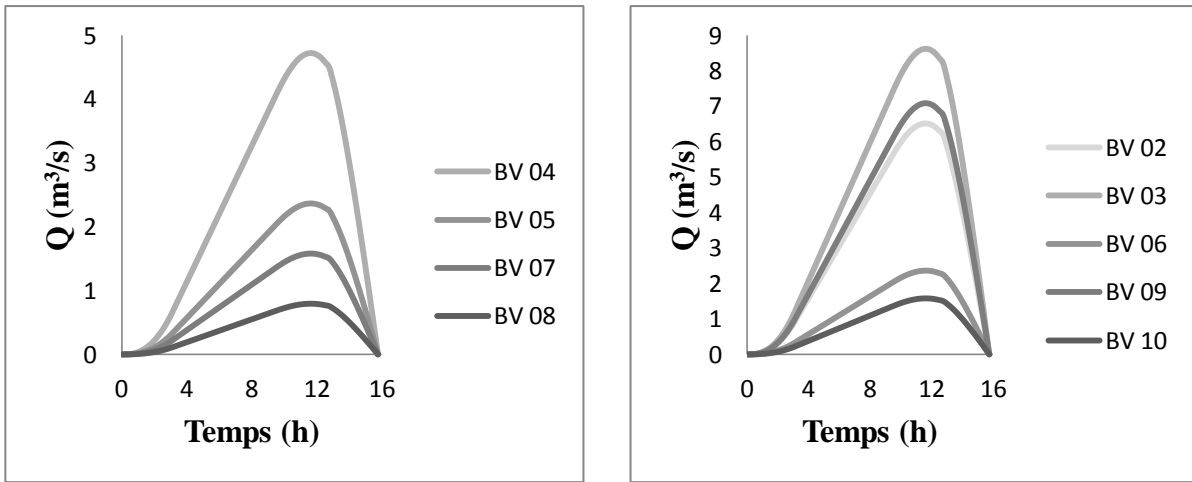
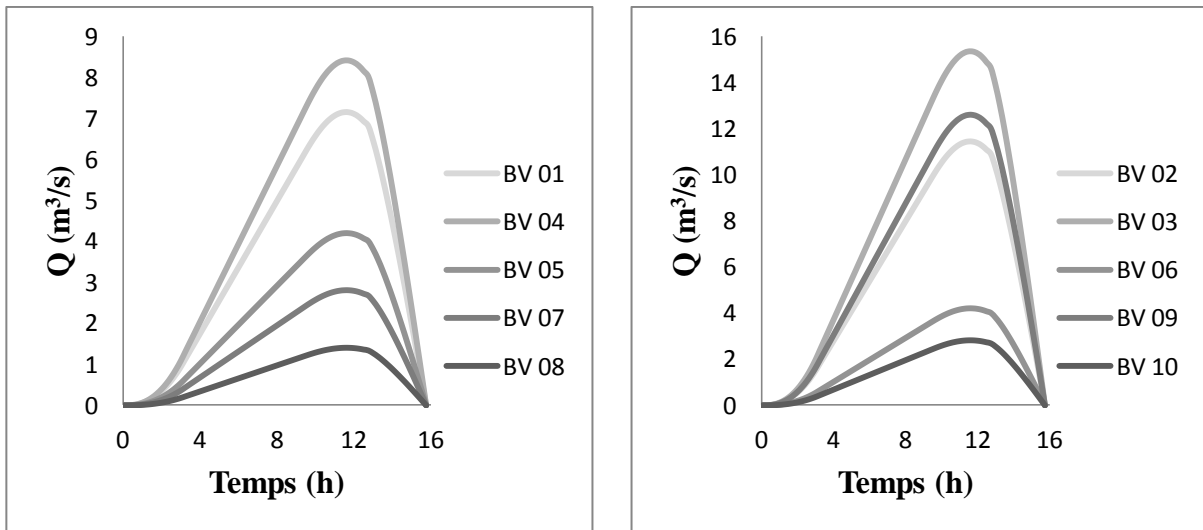


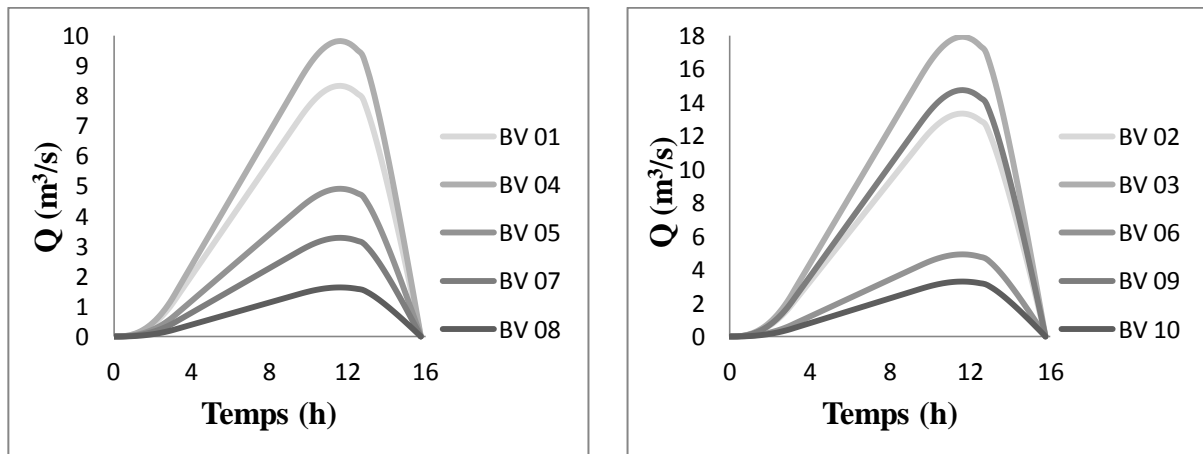
Figure 4.7. Hydrogrammes des crues obtenus par la méthode du modèle HEC-HMS pour une période de retour de 100 ans.



**Figure 4.8.** Hydrogrammes des crues obtenus par la méthode SCS pour une période de retour de 10 ans.



**Figure 4.9.** Hydrogrammes des crues obtenus par la méthode SCS pour une période de retour de 50 ans.



**Figure 4.10.** Hydrogrammes des crues obtenus par la méthode SCS pour une période de retour de 100 ans.

L'allure des hydrogrammes de crues générés est assez étalée dans le temps dans le cas du modèle SCS (16h). Elle est moins étalées dans la méthode des isochrones ou du HEC-HMS.

Pour pouvoir estimer le volume ruisselé de crues ainsi que la lame ruisselée pour chaque méthode et pour les différents sous bassins versants, pour différentes périodes de retour 10, 50 et 100ans, les tableaux 4.8, 4.9 et 4.10 récapitulent respectivement les volumes engendrés par chacun des sous bassins.

**Tableau 4.8.** Volume ruisselé et lame précipitée pour une période de retour de 10 ans

SBV	HEC-HMS		SCS Curve Number		Isochrones	
	$V_r$ ( $m^3$ )	Lame d'eau (mm)	$V_r$ ( $m^3$ )	Lame d'eau (mm)	$V_r$ ( $m^3$ )	Lame d'eau (mm)
<b>01</b>	11800	24	116452	233	301152	602
<b>02</b>	18800	24	186323	233	301152	376
<b>03</b>	25800	24	246010	224	81225	74
<b>04</b>	14100	24	134959	225	81225	135
<b>05</b>	7100	24	67436	225	81225	271
<b>06</b>	7100	24	67524	225	81225	271
<b>07</b>	4200	21	45016	225	37316	187
<b>08</b>	2100	21	22508	225	37316	373
<b>09</b>	18900	21	202308	225	6293	7
<b>10</b>	4200	21	45016	225	6293	31

**Tableau 4.9.** Volume ruisselé et lame précipitée pour une période de retour de 50 ans

SBV	HEC-HMS		SCS Curve Number		Isochrones	
	$V_r$ ( $m^3$ )	Lame d'eau (mm)	$V_r$ ( $m^3$ )	Lame d'eau (mm)	$V_r$ ( $m^3$ )	Lame d'eau (mm)
<b>01</b>	20800	42	204530	409	409288	819
<b>02</b>	33200	42	327237	409	409288	512
<b>03</b>	45400	41	438497	399	110342	100
<b>04</b>	24900	42	240129	400	110342	184
<b>05</b>	12400	41	120011	400	110342	368
<b>06</b>	12400	41	120118	400	110342	368
<b>07</b>	4600	23	80079	400	50678	253
<b>08</b>	3800	38	40039	400	50678	507
<b>09</b>	33900	38	360033	400	8543	9
<b>10</b>	7600	38	80079	400	8543	43

**Tableau 4.10.** Volume ruisselé et lame précipitée pour une période de retour de 100 ans

SBV	HEC-HMS		SCS Curve Number		Isochrones	
	$V_r$ ( $m^3$ )	Lame d'eau (mm)	$V_r$ ( $m^3$ )	Lame d'eau (mm)	$V_r$ ( $m^3$ )	Lame d'eau (mm)
<b>01</b>	24300	49	238412	477	454993	910
<b>02</b>	38900	49	381459	477	454993	569
<b>03</b>	53000	48	512759	466	122649	111
<b>04</b>	29100	49	280675	468	122649	204
<b>05</b>	14500	48	140282	468	122649	409
<b>06</b>	14500	48	140393	468	122649	409
<b>07</b>	8900	45	93596	468	56326	282
<b>08</b>	4400	44	46798	468	56326	563
<b>09</b>	39900	44	420846	468	9494	11
<b>10</b>	8900	45	93596	468	9494	47

D'après les résultats obtenus les volumes des crues sont très différents dans les trois méthodes de calcul, cela peut être expliqué par la sous estimation des volumes de crues par les méthodes « SCS » et « HEC-HMS ». La méthode SCS ne prend pas en considération le temps de concentration des sous bassins versant, par contre la méthode des isochrones prend en compte le comportement de tout le bassin versant, dans lequel sont comprises nos stations.

## CONCLUSION

L'inexistence d'un l'équipement hydrométrique et le manque de données ont été ressentis dans la compréhension de certains phénomènes hydrologiques. L'utilisation des trois modèles a donné trois résultats complètement différents, chacun des modèles à sa propre méthodologie de calcul et ses paramètres. Le modèle HEC-HMS, rassemble tous les critères de calcul, il tient compte du temps de concentration des sous bassins, ainsi que l'état initial de saturation du sol, par contre il considère que les sous bassins sont indépendants.

Le modèle SCS Curve Number dont l'avantage principal est de tenir compte de l'état initial du sol, le ruissellement ne débute qu'après la saturation du sol, par contre son inconvénient, c'est qu'il ne tient pas compte du temps de concentration des sous bassins. D'après son hydrogramme de crue, le temps de crue est très grand, ce qui donne automatiquement un volume plus grand.

La méthode des isochrones, dont l'inconvénient majeur réside dans le coefficient de ruissellement qui est considéré constant sur toute l'averse alors qu'il peut varier en fonction de l'intensité. Par contre elle reflète la réponse du grand bassin versant face aux averses, avec l'ensemble des sous bassins de la zone d'étude. Dans l'ajustement des pluies annuelles, les



valeurs de la précipitation annuelle pour les différentes périodes de retour ne sont pas différentes avec les lames ruisselées calculées par la méthode de l'hydrogramme synthétique. Cette méthode est représentative de la région de Sidi Rached. Le choix est porté sur cette méthode de calcul.

D'après une étude faite pour la protection de Sidi Rached contre les inondations, les débits calculés pour les périodes de retour 10, 50 et 100 ans sont respectivement 3.48, 5.16 et 5.86 m<sup>3</sup>/s, avec un collecteur principal de 1000 mm (DHW Tipaza, 2010). Ces débits sont sous estimés puisque des inondations répétées surviennent dans cette région.

**CHAPITRE V**  
**ESTIMATION DE L'ÉROSION SPÉCIFIQUE**

## CHAPITRE V : ESTIMATION DE L'ÉROSION SPECIFIQUE

### 1. INTRODUCTION

Plusieurs chercheurs ont consacré leurs travaux pour l'estimation de l'érosion spécifique, en tentant de trouver une relation pour la quantification des apports solides pour différentes formes d'érosion, malheureusement, ils se sont heurtés à une problématique complexe quant à la quantification des facteurs déclenchant le processus notamment en absence de mesures. En milieu urbain et périurbain, cette problématique est encore plus délicate, lorsque nous observons des quantités importantes de sédiments déposés sur les routes, les avaloirs, les conduites,..... Dans les zones périurbaines agricoles, où l'érosion en nappe se fait sentir, le processus est accéléré par les façons culturales, il dégrade le sol et diminue sa fertilité (Sadiki, 2009). La ville de Sidi Rached vit cette problématique, et au vu de la nature agricole de la région où elle est implantée. Les sédiments déposés proviennent dans la grande majorité d'une érosion en nappe, visible sur site.

Dans le but de quantifier l'érosion en nappe prédominante dans la zone d'étude, l'équation universelle des pertes en sol « USLE » de Wischmeier est appliquée. En se basant uniquement sur l'aspect hydrologique de cette équation, seule, l'agressivité des pluies est considérée et représentée par le facteur R qui est lié à l'énergie libérée de la pluie en contact du sol et à son intensité (Masson, 1980). L-index R peut être quantifié sur une période donnée grâce aux dépouillements des averses.

Du point de vue « gestion et conservation des eaux et du sol », les autres facteurs de l'équation sont à mesurer obligatoirement, ce qui n'est pas l'objectif de ce travail. Sachant que la zone d'étude est constituée d'un sol argileux, conjugué à l'impact de la pluie, ce dernier gonfle et éclate et le processus d'érosion se déclenche ainsi, notamment sur les parties nues du bassin versant.

Suite aux problèmes que connaissent plusieurs régions Algériennes, quant au manque d'enregistrements pluviographiques des averses, deux approches, sont considérées consistant à rechercher une relation fonctionnelle entre l'index d'érosion R et le cumul interannuel des précipitations  $P_{an}$  et l'index d'érosion R et l'intensité maximale  $I_{max}$ , afin d'évaluer l'apport en sédiments pouvant être engendré.

## 2. PROCEDE DE CALCUL

La relation de base de calcul de l'érosion est la formule de Wischmeier et Smith (1978). Rappelons que cette équation est basée sur 6 facteurs (équation 5.1), influençant directement l'écoulement de surface et le phénomène d'érosion. Seul l'index d'érosion est pris en considération dans ce travail.

$$A = 1,3 R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad \text{en T/ha.an} \quad (5.1)$$

Avec :

A : Perte de terre totale en Tonnes/Ha.an ;

R : Index d'érosion ;

K : L'érodibilité du sol ;

LS : Indice de longueur et raideur de la pente;

C : Indice de culture ;

P : Indice de conservation des eaux de des sols.

L'index d'érosion caractérise l'agressivité des pluies et permet d'estimer à partir d'une averse, la quantité de terre pouvant être arrachée à un sol quand tous les paramètres ne sont pas pris en considération. Ce facteur s'obtient en sommant pour la période considérée, les valeurs  $R_i$  caractérisant un épisode pluvieux. Généralement, un index d'érosion de pluie moyen annuel est utilisé, calculé à partir des pluies de plusieurs années.

R est donné par la formule générale 5.2.

$$R = E_g \cdot I_{30mn} \quad (5.2)$$

Dans le système métrique, où il a été calculé, il est exprimé par la formule (5.3)

$$R = \frac{E_g \cdot I_{\max 30mn}}{100} \quad (5.3)$$

Avec :

- $E_g$  : Energie cinétique globale de la pluie exprimé en m.t/ha ;

- $I_{\max 30mn}$  : Intensité homogène de la pluie maximale en 30 minutes exprimée en cm/h ;

Le procédé de calcul de R est fastidieux. Il consiste en :

- Dépouillement de pluviogrammes : lame d'eau enregistrée (h) en fonction du temps « t »  
 $H=f(t)$ ;
- Détermination de l'intensité homogène  $I_h$ , sur les pluviogrammes ;

$$I_h = h/t \quad (5.4)$$

- Calcul de l'énergie unitaire ( $E_u$ ) par unité d'eau tombée ;

$$E_u = 210 + 89 \log_{10}(I_h) \quad (5.5)$$

Avec :

$$I_h \geq 7.6 \text{ cm/h} \rightarrow E_u = 289 \text{ m.T/ha/cm.}$$

- Calcul de l'énergie de la pluie d'intensité homogène  $E_h$

$$E_h = E_u \cdot h \text{ (m.T/ha)} \quad (5.6)$$

- Calcul de l'énergie globale  $E_g$

$$E_g = \sum_{i=1}^n E_{hi} \quad (5.7)$$

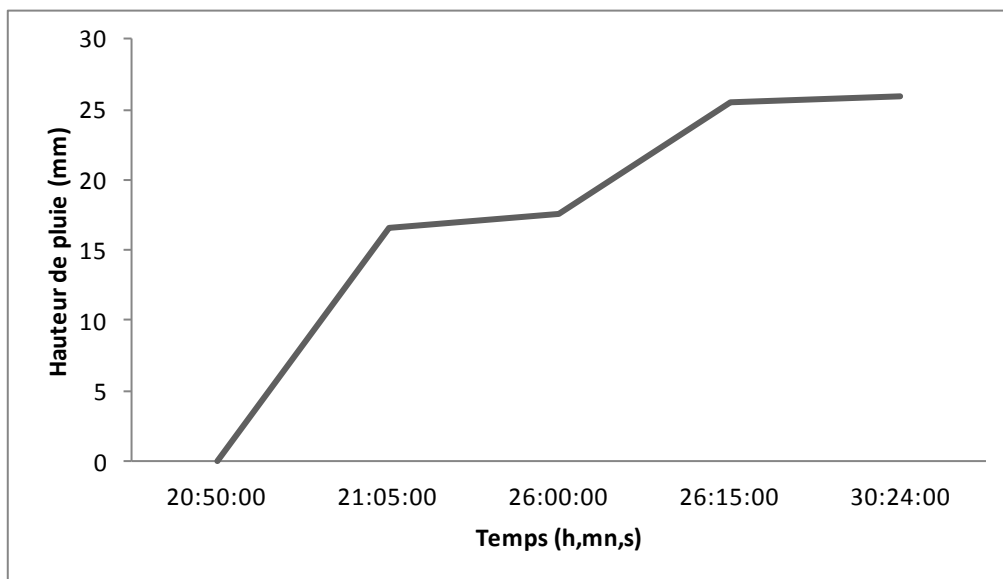
- Détermination de l'intensité maximum 30 minutes  $I_{\max 30mn}$

- Calcul de « R »

### 3. Traitement de données

Ce traitement consiste à dépouiller les pluviogrammes pour la détermination de l'intensité homogène de 30 minutes et de l'intensité maximale observée sur 30 minutes.

Un exemple de dépouillement d'un pluviogramme reconstitué de l'averse du 19/09/2001 est donné en figure 5.1 et le calcul de R dans le tableau 5.1.



**Figure 5.1.** Pluviogramme reconstitué de l'averse du 19/09/2001

**Tableau 5.1.** Exemple de dépouillement d'un pluviogramme

1	2		3		4	5	6	7	8	9	
	h	mn	s	mm	cm	$I_h$ (cm/h)	$E_u$ (m.T/ha/cm)	$E_h$ (m.T/ha)	$E_g$ (m.T/ha)	$I_{\max 30mn}$ (cm/h)	$R$ (m.T.m/ha.h)
	15	0		16.5	1.65	6.60	282.94	466.85			
19/09/2001	4	55	0	1	0.1	0.02	59.44	5.94	678.72	0.02	0.14
		15	0	8	0.8	3.20	254.96	203.97			
	4	9	0	0.5	0.05	0.01	39.20	1.96			

Avec :

- 1- Date de l'averse ;
- 2- Temps exprimé en heure, minute et seconde ;
- 3- Lamme d'eau précipitée en mm et en cm ;
- 4- Intensité homogène en cm/h ;
- 5- Énergie unitaire exprimée en m.T/ha/cm d'eau tombée ;
- 6- Énergie de la pluie d'intensité homogène en m.T/ha ;
- 7- Énergie globale exprimée en m.T/ha ;
- 8- Intensité maximum en 30 minutes exprimée en cm/h ;
- 9- Index R d'érosion exprimé en m.T.m/ha.h.

Cette averse de durée 9h 34mn, a enregistré une lamme d'eau de 26mm, pour une intensité max de 20mm/h engendrant un index d'érosion de 0.14 mTm/ha.h.

Le calcul est réalisé sur l'ensemble des averses enregistrées une à une, sur toute la période d'observations.

Le tableau 5.2 résume les valeurs mensuelles ainsi que les valeurs annuelles de R obtenues à partir d'un dépouillement manuel des 744 averses.

**Tableau 5.2.** Répartition mensuelle et annuelle de l'index d'érosion R pour 744 averses enregistrées sur la période de 1985/86 à 2005/06

<b>Année</b>	<b>Sept.</b>	<b>Oct.</b>	<b>Nov.</b>	<b>Déc.</b>	<b>Jan.</b>	<b>Fév.</b>	<b>Mar.</b>	<b>Avr.</b>	<b>Mai.</b>	<b>Juin.</b>	<b>Juil.</b>	<b>Aout.</b>	<b>R total Annuel (m.T.m/ha.an)</b>
<b>1985/86</b>	-	-	-	-	-	-	-	0.63	0.02	0.48	14.76	-	16
<b>1986/87</b>	11.14	39.99	1.64	13.21	6.836	9.80	0.75	-	-	1.18	0.43	-	85
<b>1987/88</b>	3.04	0.08	1.38	3.88	0.47	0.37	0.31	0.45	2.68	1.18	-	-	14
<b>1988/89</b>	3.59	5.64	0.52	4.55	6.73	0.17	14.44	7.52	-	2.29	-	0.08	46
<b>1989/90</b>	0.02	0.14	1.46	1.25	2.39	-	6.82	1.72	3.72	-	0.10	-	18
<b>1990/91</b>	0.04	0.10	4.96	2.56	16.02	2.00	1.29	3.16	0.33	0.07	-	-	31
<b>1991/92</b>	-	82.99	0.05	0.02	21.57	4.88	3.39	5.53	8.27	0.32	0.15	-	127
<b>1992/93</b>	-	6.73	3.19	7.26	0.11	-	0.76	2.17	3.63	-	-	-	24
<b>1993/94</b>	0.22	-	0.50	0.54	12.40	0.82	-	6.18	0.04	-	-	-	21
<b>1994/95</b>	1.36	-	19.98	4.35	1.47	3.04	14.35	-	-	0.02	-	0.21	45
<b>1995/96</b>	41.11	0.75	1.11	0.18	1.30	1.38	0.72	5.01	0.18	4.31	-	-	56
<b>1996/97</b>	-	-	-	-	-	-	-	6.76	-	-	-	-	7
<b>1999/00</b>	-	-	2.46	-	-	63.74	3.41	1.83	3.88	0	0.02	0	75
<b>2000/01</b>	2.27	14.79	6.81	1.15	12.31	1.82	0.07	10.77	2.52	0.38	0	0	53
<b>2001/02</b>	1.53	22.02	12.63	3.73	2.64	4.19	4.32	42.99	0.78	0	2.76	1.96	100
<b>2002/03</b>	12.82	4.60	22.03	16.22	8.10	6.85	1.48	4.77	13.19	0.001	0.38	0	90
<b>2003/04</b>	1.61	15.07	9.19	5.04	3.54	3.15	6.24	10.94	20.26	0.64	0.38	3.82	80
<b>2004/05</b>	24.44	1.40	9.64	10.11	9.04	17.39	-	-	0.44	0.76	0	0.04	73
<b>2005/06</b>	0.01	4.99	1.72	0.01	12.31	4.72	30.77	0.64	31.72	0.56	0	0.03	87
<b>Moyenne interannuelle</b>													55

• **1<sup>ère</sup> Approche**

Une recherche d'une relation fonctionnelle entre l'index d'érosion R et les précipitations annuelle est entreprise  $R = f(P_{an})$ .

Le coefficient de détermination  $R^2$  est calculé pour cinq modèles statistiques comme le montre le tableau 5.3.

Afin de connaître, si le coefficient de détermination  $R^2$  est significatif, celui-ci est comparé à la valeur critique ( $r_{critique}$ ) de la table de Table de Fisher pour une erreur de 0.05 et un nombre de degré de liberté ( $\gamma = N - 1$ ) (Dagnelie 1992).

**Tableau 5.3.** Coefficient de détermination  $R^2$  pour les différents modèles régressifs

Modèles	N	$R^2$	r	$r_{critique}$	État	Modèle : $R = f(P_{an})$
<b>Exponentiel</b>	16	0.34	0.58	0.47	Significatif	$R = a e^{bP_{an}}$
<b>Linéaire</b>		0.24	0.49		Significatif	$R = a P_{an} + b$
<b>Logarithmique</b>		0.27	0.52		Significatif	$R = a \ln P_{an} - b$
<b>Polynomiale</b>		0.30	0.55		Significatif	$R = a P_{an}^2 + b P_{an} + c$
<b>Puissance</b>		0.37	0.61		Significatif	$R = a P_{an}^b$

Avec :

N : Taille de la série ;

$R^2$  : Coefficient de détermination ;

r : Coefficient de corrélation,  $r = \sqrt{R^2}$ ;

$r_{critique}$  : Coefficient de corrélation critique (lu sur la table de Fisher).

Au vu du tableau 5.4, et de la valeur critique du coefficient de corrélation, les cinq modèles régressifs s'ajustent et donnent des résultats significatifs. Le modèle puissance (figure 5.2) entre l'Index d'érosion et la pluie annuelle  $R = f(P_{an})$  est retenu. Son expression est donnée par la formule 5.8.

$$R = 0.001 P_{an}^{1.72} \tag{5.8}$$



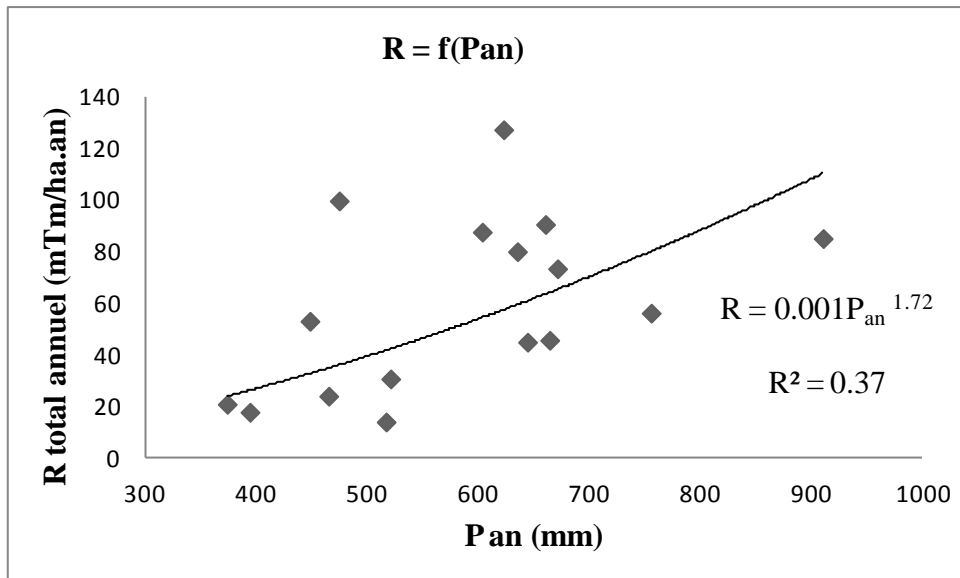


Figure 5.2. Modèle Puissance pour la relation  $R = f(P_{an})$

### • 2<sup>ème</sup> Approche

Elle consiste à rechercher une relation fonctionnelle entre l'index d'érosion  $R$  et l'intensité maximale, pour les 744 épisodes pluvieux (figure 5.3).

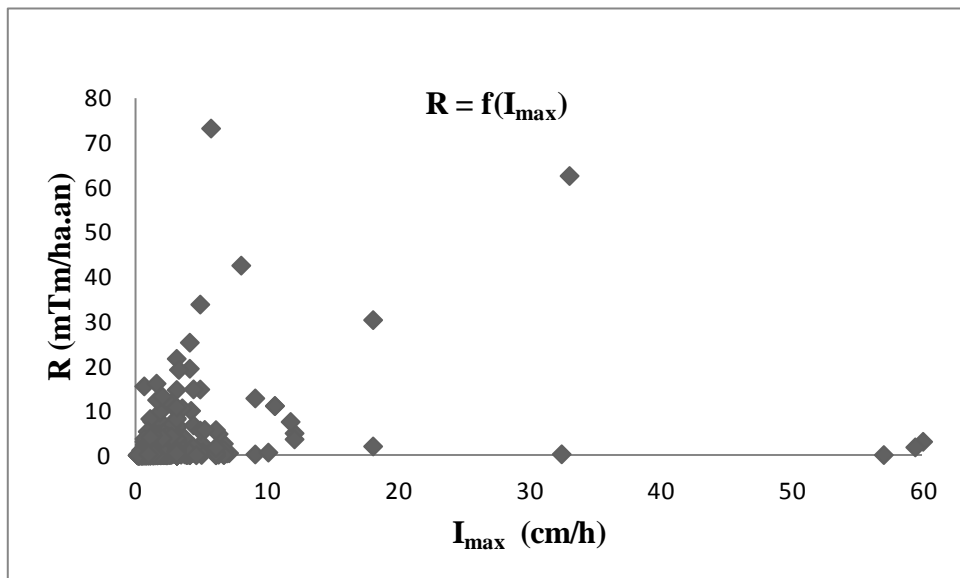


Figure 5.3. Relation  $R=f(I_{max})$  des 744 averses

De même, le coefficient de détermination  $R^2$  est calculé pour les cinq modèles statistiques comme le montre le tableau 5.4.

**Tableau 5.4.** Coefficient de détermination  $R^2$  pour les différents modèles régressifs

Modèles	N	$R^2$	r	$r_{critique}$	État	Modèle : $R=f(I_{max})$
Exponentiel	744	0.036	0.20	0.19	Significatif	$R = a e^{bI_{max}}$
Linéaire		0.060	0.24		Significatif	$R = a I_{max} + b$
Logarithmique		0.061	0.25		Significatif	$R = a \ln I_{max} - b$
Polynomiale		0.148	0.38		Significatif	$R = a I_{max}^2 + b I_{max} + c$
Puissance		0.119	0.34		Significatif	$R = a I_{max}^b$

Au vu, du coefficient de corrélation critique, bien qu'il semble avoir une signification, la corrélation reste cependant faible. La première approche semble mieux adaptée.

#### 4. Interprétation des résultats

En considérant que tous les autres paramètres de l'USLE sont égaux à 1, l'index d'érosivité R représenterait la perte en sol.

L'index moyen interannuel est estimé à 55 m.T.m/ha.an (tableau 5.2). Du point de vue hydrologique, nous considérons les pertes en sols annuelles seraient égales au moins 55 T/ha, il dépasse largement le seuil tolérable annuel de 10 T/ha (Touaibia, 2000), confirmant l'existence d'une importante érosion en nappe, favorisé par une pente importante, un travail de sol inapproprié concluent que le bassin versant est très érodé, (Tixeront, 1960).

La surface totale du bassin versant étant de 500 ha, ce qui donne une quantité annuelle de sédiments arrachés au sol de 27541 T.

Le calcul de  $R_{estimé}$  à partir du modèle puissance est de 57 T/ha. L'évaluation de la représentativité du modèle puissance de la relation  $R=f(P_{an})$ , est faite en considérant l'erreur commise dans l'estimation de l'index d'érosion R. Cette erreur est donnée par l'équation (5.9).

$$\text{Erreur (\%)} = \left( \frac{R_{USLE} - R_{estimé}}{R_{USLE}} \right) \cdot 100 \quad (5.9)$$

L'erreur calculée est de 3%, faible et acceptable. Dans l'étude de la contribution du transport solide en Algérie du Nord des travaux de Meddi et al (1998), pour différentes stations hydrométriques, les erreurs trouvées pour différents modèles sont inférieures à 20%. Ils ont jugé que le modèle a donné des résultats satisfaisants. En résumé, le modèle puissance de la

relation index d'érosivité des pluies R et le cumul précipitations annuelles peut être pris en considération dans l'estimation des pertes en sols à partir des pluies annuelles en milieu urbain et périurbain.

## CONCLUSION

Le calcul de R est basé sur le dépouillement de 19 ans d'observations d'averses. Les pertes en sols annuelles sont très importantes de l'ordre de 27541T. Si nous considérons, le tronçon de la RN 67, sur une longueur 14Kms et une largeur de 8m (accôtément compris), la hauteur annuelle de sédiments déposés serait de 16cm, en considérant que le poids volumique des argiles est de 1.5T/m<sup>3</sup>. Cette valeur ne nous étonne point, car elle a été pratiquement observée lors de notre passage après une seule averse torrentielle, coupant ce tronçon à la circulation.

## **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de ce travail est de proposer une approche méthodologique en milieu urbain et périurbain, pour la détermination du débit pluvial et la quantification de l'érosion spécifique en absence de jaugeages. Les modèles hydrologiques classiques trouvent difficilement leur place, il ne s'agit pas d'exposer ce qu'il aurait été possible de faire avec suffisamment d'observations, mais de développer une méthodologie de modélisation à partir de l'information disponible notamment les précipitations.

La commune de Sidi Rached, se trouvant à l'Ouest de la Capitale « Alger », fait l'objet de notre étude. Le choix de cette zone est basé sur sa position géographique, limitrophe d'une route nationale, qui connaît à chaque épisode pluvieux, des inondations auxquelles se greffe un apport important de sédiments.

De ce fait, la problématique posée est : comment estimer le débit de ruissellement en milieu urbain et périurbain en absence de jaugeages, suite à une averse torrentielle et comment peut-on quantifier l'érosion spécifique suite à ces mêmes averses ? Pour estimer le débit pluvial probable dans des bassins versants non jaugés, seul le recours à la recherche d'un modèle intégrant les averses est possible. La revue bibliographique a permis de connaître les différents modèles pluie-débit existant dans la littérature. Trois modèles sont retenus, considérés comme les plus aptes à apporter des réponses à une grande partie des questions d'hydrologie opérationnelle dans les domaines de la gestion de la ressource en eau, de la prévision des risques et de l'ingénierie hydrologique qui sont : HEC-HMS, SCS Curve Number et la méthode classique des isochrones. Aussi, pour la quantification de l'érosion spécifique, l'équation Universelle des Pertes en Sol de Wischmeier est utilisée où seul l'index d'érosivité des pluies est pris en considération permettant d'estimer l'érosion en nappe.

Par ailleurs, une analyse minutieuse du bassin versant de Oued Djer où s'implante la zone d'étude a été faite. Cette analyse consiste à des études géologique, topographique, climatique et hydrographique et morphologique à l'aide des cartes topographiques et d'image satellitaire. Le bassin versant est traité à l'aide des outils informatiques et des logiciels de cartographie (SIG) élaborant ainsi un Modèle Numérique de Terrain. Cette étape ayant pour but d'aboutir au découpage de 10 sous bassins, a permis aussi de déduire que le bassin versant est de type argileux où l'infiltration est quasiment nulle, un couvert végétal moyen et un réseau hydrographique lâche et une agriculture intensive florissante.

L'estimation du débit pluvial nécessite la construction des courbes IDF, qui ne peuvent être élaborées que si l'on dispose d'une station pluviographique enregistrant les averses. De ce fait, la station pluviographique du Barrage de Meured, située dans les mêmes conditions climatiques est prise en considération. Le dépouillement des averses à travers les séries pluviographiques a permis d'identifier 744 averses, seules 390 sont retenues, basées sur un seuil de 5mm. L'échantillonnage des pluies de courtes durées pour différentes durées d'agrégation a permis de construire les courbes IDF à différentes périodes de retour, desquelles, l'exposant climatique « b » de la station est déterminé, valant 0.64. Le modèle retenu pour l'intensité moyenne maximale pour une durée de 15 minutes et une période de retour 10 ans est de la forme puissance  $\bar{I}_{15mn,10\%} = 17,51t^{-0.64}$ .

Ce modèle a permis de déterminer le débit spécifique pluvial q (l/s.ha) pour la même durée à la période de retour à 118 l/s.ha. Des courbes IDF sont déduites les courbes HDF, entrant dans les modèles HEC-HMS et SCS Curve Number.

Trois modèles sont retenus HEC-HMS, SCS Curve Number et la méthode des isochrones. Les trois modèles ont donné des résultats très différents pour les 10 sous bassins versants considérés pour une période de retour de 10 ans, le modèle HEC-HMS et SCS Curve Number ont donné des débits faibles variant de 0.8 à 9.7 m<sup>3</sup>/s, par contre la méthode des isochrones a donné un débit beaucoup plus important variant de 3.5 à 33.5 m<sup>3</sup>/s, cela s'explique que chaque méthode a ses propres spécificités de calculs. Le modèle retenu est la méthode des isochrones, elle nécessite la connaissance du comportement des sous bassins de la zone d'étude par rapport au bassin versant, elle tient compte du déficit d'écoulement.

Le deuxième volet de cette étude est la quantification de l'érosion en nappe de la région de Sidi Rached en appliquant la formule de Wischmeier, qui nécessite la connaissance de 6 paramètres. Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés uniquement à l'index d'érosivité des pluies R, calculé pour les 744 averses. Les résultats ont montré une érosion en nappe annuelle assez importante de l'ordre de 55 T/ha. Selon la classification de Tixeront (1960) et Touaibia (2000), la zone d'étude est classée comme zone à érosion en nappe excessive. Une relation fonctionnelle type puissance entre l'index d'érosion R et les pluies annuelles P<sub>an</sub>, a donné des résultats satisfaisants justifiés par un calcul d'erreur estimée à 3%. Ce modèle puissance peut être pris en considération dans l'estimation des pertes en sols à partir des pluies annuelles en milieu urbain et périurbain dans la zone d'étude.

En conclusion, la région de Sidi Rached est vulnérable aux inondations ainsi qu'à une érosion en nappe notable. Certaines perspectives à long terme doivent être mises au point par les collectivités locales pour une prévision de ces deux phénomènes, qui sont :

- Faire une étude détaillée du point de vue géologique, pédologique, et morphologique de toute la wilaya de Tipaza, pour une meilleure maîtrise du réseau d'écoulement et son comportement vis à vis du ruissellement.
- Adapter les pratiques culturales telles que le labour des sols selon les courbes de niveaux, pour ne pas accélérer le phénomène de l'érosion.
- Faire une exploitation rationnelle des terres à l'amont de la zone d'étude.
- Faire un aménagement approprié en amont pour freiner le ruissellement et un bon dimensionnement du réseau d'évacuation des eaux pluviales en se basant sur le traitement des averses.
- Faire une cartographie des zones vulnérables aux inondations pour une aide à la décision.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANRH. (2012).** Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. Rapport interne, Alger. Algérie.
- Ambroise, B. (1999).** La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant : Processus, Facteurs, Modèles. HGA, Bucarest. 200 p.
- Ambroise, B. (2012).** Quelques problèmes et solutions en modélisation hydrologique. Revue LJEE, (20), pp 6-16. ENSH, Algérie.
- Aron, G .M., Miller, A. C., & Lakatos, D. F . (1977).** Infiltration formula based on SCS Curve Number. Journal of Irrigation and Drainage Division. pp 419-427.
- Benaouadj, A. (2011).** Contribution à l'étude des inondations dans la vallée du M'Zab (Wilaya de Ghardaïa). Thèse de Magistère. ENSH, Blida. Algérie, 152p.
- Benkaci, T., Dechemi, N. (2010).** Analyse des risques hydrologiques et impacts sur la qualité de l'eau de la future autoroute Est-Ouest (Algérie). Revue LJEE (17), pp 31-46.
- Ben-Zvi, A. (2009).** Rainfall intensity-duration-frequency relationship derived from large partial duration series. Journal Hydrol. (367), pp104-114.
- Bergaoui, M., Camus, H., & Nouvelot, J.F. (1996).** Quantification du transport solide sur les micro-bassins de Tebata en Tunisie Centrale. Bulletin 16. Réseau érosion. ORSTOM. Montpellier. France.
- Bertrand-Krajewski, J. L. (2006).** Hydrologie urbaine. Support de cours OSHU3. Institut Nationale des Sciences Appliquées (INSA), Lyon, France. 15p.
- Boiffin, J. (1984).** La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse INAPG. Paris. France.320p.
- Bouanani, A., Baba-Hamed, K., & Bouanani, R. (2011).** Utilisation d'un modèle global pour la modélisation pluie-débit : cas du bassin de la haute Tafna (NW Algérien). Revue LJEE (18), pp 46-57.
- Boukhelifa, M. (2011).** Contribution à la modélisation de la relation pluie-débit en absence de données hydrométriques: Cas d'une zone urbaine (ville de Tipasa). Thèse de Magister. ENSH, Blida, Algérie. 147 p.
- Bourrier, R. (1997).** Les réseaux d'assainissement, calculs applications perspectives. Edition Lavoisier, collection Tec & Doc. Paris, France. 108p.
- Boyce, R. C. (1975).** Sediment Routing with sediment delivery rations. In: Present and prospective technology for ARS, USDA, Washington. ARS-S-40, pp 61-65.
- CACG (Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne). (1989).** Barrage de Charlas : Étude de faisabilité.
- Carte des écoulements. (2005).** Carte des écoulements moyens annuels sur Nord de l'Algérie. Échelle 1 :500.000. ANRH, Alger. Algérie

- Carte pluviométrique. (1993).** Carte pluviométrique moyenne annuelle de l'Algérie du Nord ramenée à la période (1922/23 jusqu'à 1960/61 et 1969/70 jusqu'à 1989/90). Échelle 1 :500.000. ANRH. Alger. Algérie.
- CERTU (Centre d'étude sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les Constructions Publiques) (2003).** La ville et son assainissement. Principes et outils pour meilleure intégration dans le cycle de l'eau. CERTU, Lyon, France. 503p.
- Chocat, B. (1997).** Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. Paris : Lavoisier TEC&DOC. Paris. France. 1124 p.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988).** Applied hydrology, McGraw-Hill, Singapore, pp 99–126.
- Christoi, R. (1961).** Résultats obtenus à l'essai « EROSION » de la station de Niangoloko Haute-Volta. IRHO, 51 p.
- Cudennec, C. (2000).** Description mathématique de l'organisation du réseau hydrographique et modélisation hydrologique. Thèse de Doctorat. École Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, France. 261p.
- Dagnelie, P. (1992).** Théories et méthodes statistiques. Tome 2. Presses agronomiques de Gembloux. Belgique. 463p.
- Demmak, A. (1982).** Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie Septentriennale. Thèse de Doctorat Ingénieur. Université Pierre et Marie-Curie. Paris, France.
- DHW Tipaza, (2010).** Etude de la protection de la ville de Sidi Rached contre les inondations, phase I et II. Rapport de diagnostic. 36 p.
- Dogan, O., & Kucukcakar, N. (1997).** Perte en sol et en eau sur les terrasses en gradins et détermination des dimensions des terrasses sous les conditions climatiques de l'Anatolie centrale en Turquie. Réseau érosion. Bulletin 17. ORSTOM. Montpellier. France.
- Dubreuil, P. (1974).** Initiation à l'analyse hydrologique. Ed. Masson et CIE. ORSTOM. Paris. France. 216 p.
- El-Hames, A.S., & Al-Wagdany, A.S. (2012).** Reconstruction of flood characteristics in urbanized arid region: Case study of the flood of 25 November 2009 in Jeddah. Saudi Arabia. Hydrological Sciences Journal , Vol 57 (3), pp 507-516.
- Ellison, W. D. 1944.** Studies of raindrop erosion. Agric. Eng. (25), pp 131-181.
- Fadil, A., Rhinane, H., Kaoukaya, A., & Kharchaf, Y. (2011).** Modélisation hydrologique du bassin versant de Bouregreg à travers des modèles différent: HEC-HMS et SWAT. Proceedings Colloque International sur les Ressources en Eau et le Développement Durable, 22 et 23 Février, 2011. Alger, pp 100-104.
- FAO. (1999).** Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin pédologique de la FAO 70. Réimpression réalisée avec la contribution de l'IRD ex-ORSTOM, Montpellier, France. 420 p.

- Fournier, F., & Henin, S. (1959).** A new climatic formula for evaluating the specific degradation of soil. *C. R. Acad. Sci, Paris* (**248**), pp 1694-1969.
- Fournier, F. (1960).** Climat et érosion. Presses Universitaires de France, Paris, 201p.
- Frenette, M., & Julien, P. Y. (1986).** Un modèle pour prédire l'érosion des bassins et le transfert des sédiments fins dans les cours d'eau nordiques. *Can. J. civ, Engng, CSCE*, 13(2), pp 150-161.
- Gaume, E. (2002).** Éléments d'analyse sur les crues éclair. Thèse de Doctorat. École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, France, et de l'Institut Nationale de la recherche Scientifique du Québec, Canada. 359p.
- Gomer, D. (1996).** Écoulement et Érosion dans des petits bassins versants à sols marneux sous climat Semi-aride Méditerranéen. Coopération Algéro-Allemande. 258p.
- Greco, J. (1966).** L'Érosion, la défense et la restauration des sols : Le reboisement en Algérie. Publication du Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire (Alger). 384p.
- Guide de gestion des eaux pluviales.** Évaluation quantitative du ruissellement-Aspect Hydrologique. Chapitre 6. La participation du ministère du développement, de l'environnement et des parcs et le ministère des affaires municipales, des régions et de l'occupation du territoire. Canada. 38 p.
- HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modelling System). (2000).** Technical Reference Manual.
- Henine, H. (2004).** Interfaçage entre un modèle hydrologique/modèle hydrodynamique au sein d'un système d'information intégré sous web incluent les SIG. Mémoire de Magistère. ENP Alger. Algérie 114 p.
- Heusch, B. (1970).** L'érosion du Pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré-Rif occidental, Maroc. *Annales Rech. Forestières au Maroc* (**12**), pp 9-176.
- Higy, C. (2000).** Modélisation conceptuelle et à base physique des processus hydrologiques : application du bassin versant de la Haute Mentue. Thèse de Doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 300 p.
- Hjelmfelt, Jr. A. T. (1987).** Curve number in urban hydrology: topics in urban hydraulics and hydrology. Proceeding XXII congress, International Association for Hydraulic Research, Lausanne, Switzerland. pp 73-78.
- Horton, R.E. (1933).** The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Géophys. Union*, (**14**), pp 446-460.
- Hubert, P., Bendjoudi, H. (1995).** Indépendance d'échelle de la distribution statistique des précipitations extrêmes. École des Mines de Paris, Fontainebleau, France.
- Hudson, N. W. (1971).** Raindrop Size in Soil conservation Cornell University Press. Ithaca. New York. USA.
- Hudson, N. W. (1992).** Land Husbandry. Batsford, London, 192 p.
- Huft, A. (2001).** Introduction à la climatologie. De Boeck université. Laval. Canada. 542 p.

- Julien, P. Y., & GONZALEZ DEL TANAGO, M. (2009).** Spatially varied soil erosion under different climates. *Journal des sciences hydrologique* 36(6), pp 511-524.
- Khelfi, M.A. (2012).** Étude comparative des différentes méthodes pour la construction des courbes Intensité-Durée-Fréquence, en insuffisance de données et sous différents étages bioclimatiques. Thèse de Magistère, option : Génie de l'eau. ENSH, Algérie. 119 p.
- Koutsoyiannis, D., Kozonis, D & Manetas, A. (1998).** A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationship. *J. Hydrol.* (206), pp 118-135.
- Laasla, S. (2008).** Étude du réseau d'assainissement de la ville de Sidi Rached, Wilaya de Tipaza. Mémoire de fin d'étude. École nationale supérieure d'Hydraulique (ENSH), Blida. Algérie. 104 p.
- Laborde, J. P. (1995).** Éléments d'hydrologie de surface. Tome1, 2 et 3. Université de Nice-Sophia Antipolis. Laboratoire d'Analyse Spatiale. Nice, France.
- Laborde, J. P. (2007).** Élément d'hydrologie de surface. Département Hydro-Informatique et Ingénieries de l'Eau. Université de Nice-Sophia Antipolis, France. 213 p.
- Lal, R. 1975.** Role of mulching techniques in tropical soil and water management. *Techn. Bull. n°1, IITA, Ibadan*, 38 p.
- Lal, R. (1976).** Soil erosion problème in Western Nigeria and their control. I.I.T.A. Ibaden. Nigeria, 208 p.
- Lamboley, A. 2006.** Statistiques (A166), in *Technique de l'ingénieur. Volume A. Éditions Technique de l'ingénieur. Paris. France. A166 1-A166 41p.*
- Llamas, J. 1993.** Hydrologie générale. Principes et applications, 2<sup>ème</sup> édition. Gaëtan Morin Editeur. Québec. Canada. 527 p.
- Linsley, R.K., Kohler, A., & Paulhus, J. (1982).** *Hydrology for Engineers.* Mc Graw Hill, 508 p.
- Lowdermilk, W. C. (1953).** Conquest of the land through 7000 years. *Agriculture information Bull. 99. USDA, SCS*, 54 p.
- Mailhot, A., Duchesnr, S., Caya, D., & Talbot, G. (2007).** Assessment of futur change in intensity-duration-frequency (IDF) curves for Southen Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *J. hydrol.* (347), pp 197-210.
- Makhlouf, Z. (1994).** Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres, Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud, Cemagref, 227 p.
- McCuen, R. H. (2004).** *Hydrologic analysis and design*, 3<sup>rd</sup> edition. Pearson Prentice Hall. New Jersey. USA. 859 p.
- Meddi, M., Khaldi, A.K., & Meddi, H. (1998).** Contribution à l'étude du transport solide en Algérie du Nord. *IAHS* (249), pp 393-397.
- Merabet, A. (2008).** Étude de la protection de la ville de Sidi Bel Abbès contre les inondations. Mémoire de Magister. Université de Sidi Bel Abbès. Algérie.

- Mester (2000).** Méthodes statistiques pour l'homogénéisation de longues séries climatiques. Thèse de Doctorat. Université Paul Sabatier. Toulouse. France. 230 p.
- Meylan, P & Musy, A. (1999).** Hydrologie fréquentielle. Edition HGA, Bucharest Hongrie, 414 p.
- Moles, A.A. (1995).** Les sciences de l'imprécis. Seuil, Points sciences, S105, 360 p.
- Morgan, R.P.C. (1986).** Soil Erosion and conservation. Longman,UK.
- Mouhoub, L. (2011).** Hydrologie des lacs, cas du lac de Fetzara W. Annaba. Mémoire de Magistère. ENSH, Blida. Algérie, 115 p.
- Moussi, B., (1991).** Calcul de l'index d'érosion (R). Mémoire de fin d'étude. Institut Nationale d'Agronomie Chlef. 52 p
- Muller, A. (2006).** Comportement asymptotique de la distribution des pluies extremes e France. Thèse de doctorat. Université de Montpellier II. Montpellier, France. 245 p.
- Musy, A. & Higy, C. (1998).** Hydrologie appliquée. Edition HGA, Bucharest, Hongrie. 367p.
- NRCS. (1986).** Urban Hydrology for Small Watersheds, TR-55. NRCS. Conservation engineering Division. USA. 163 p.
- Ourahou, M. (2009).** Étude hydrologique des bassins versants. Orrice régional de mise en valeur agricole de Tafilalet, service équipement rural, bureau des études. Royaume du Maroc. 49 p.
- Payraudeau, S. (2002).** Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranées. Thèse : ENGREF Montpellier, spécialité Science de l'eau. 225 p.
- 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. 287 p.
- Poesen, J. (1987).** Transport of rock fragments by rill flow. A field study. Catena, suppl. (8), pp 35-54.
- Radojevic, B. (2002).** Méthode d'évaluation de l'influence urbaine sur le régime des crues d'un bassin de 130km<sup>2</sup>. Thèse de Doctotat, Institut Nationale des Sciences Appliquées (INSA), Lyon, France, 261 p.
- Rahai, A. (2007).** Délimitation des zones inondables\_application a l'oued Allalah. Bassin versant de Ténès. Mémoire de Magister. ENR. Alger, Algérie.
- Rampon, A. (1987).** Sedimentation et barrage : Erosion et transport : Les dépôts dans les barrages. CEMAGREF, Groupement d'Antony. Division de mécanique des sols et génie civil. Mémoire N° 18. Paris. France.
- Refsgaard, J.C., & Storm, B. (1996).** Chapitre 3: Construction, Calibration and Validation of hydrological medels. In: Distributed Hydrological Modeling. Kluwer Academic Publishers. Netherlands. pp 41-42.
- Refsgaard, J.C. (1997).** Paramétrisation, calibration and validation of distributed hydrological models. Journal of Hydrology, (198), pp 69-97.

- Reminieras, G. (1986).** Hydrologie de l'ingénieur, 2<sup>ème</sup> édition. Edition Eyrolles. Paris, France. 462 p.
- Renard, K. G., & Simanton, J. R. (1990).** Application of RUSLE to Rangelands. Proc. Symp. on Watershed Planning and Analysis in Action, ASCE, Durango, Colorado, USA, pp 164-173.
- Renfro, W. G. (1975).** Use of erosion equation and sediment delivery ratios for predicting sediment yield. In: Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. US Dept. Agric., publ. ARS-S-40, pp 33-45.
- Rivard, G. (2005).** Gestion des eaux pluviales – Concepts et applications. 2<sup>ème</sup> édition, Alias Communication Design, Laval. Québec. 329 p.
- Roche, P.A. (1988).** Les modèles. In : Gestion des eaux : automatisation, Information et télégestion, Tome3, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. pp 133-166.
- Roose, E. (1973).** Dix sept années de mesure de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat. Ing. Fac. Sci. Abidjane n°20, ORSTOM : 125 p.
- Roose, E. (1976).** Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique Tropical. Études sur petites parcelles expérimentales de sol. Revue de géographie physique et de géologie dynamique, XVIII(4), pp 365-374.
- Roose, E. (1977).** Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. Travaux et documents de l'ORSTOM. N°78. Paris. France. 105 p.
- Roose, E., Arabi, M., Brahamia, K., Chebbani, R., Mazour, M., & Morsli, B. (1997).** Recherches sur la réduction des risques d'érosion par la Gestion Conservatoire de l'Eau et du Sol (GCES) en moyenne montagne méditerranéenne algérienne. Bulletin 17. Réseau érosion. ORSTOM. Montpellier. France. pp 161-167.
- Roose, E. (1999).** Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin pédologique de la FAO. Réimpression réalisée avec la contribution de l'IRD (ex. ORSTOM\_ Montpellier, France). 420 p.
- Roudier, P., & Mahé, G. (2010).** Calcul des pluies et débits classés sur le bassin du Bani (Mali) : une approche de la vulnérabilité des ouvrages et de la population depuis la sécheresse. J. sci. Hydrol.55(3), pp 351-363.
- Sadiki, A., Faleh, A., Zêzere, J.L., & Mastass, H. (2009).** Quantification de l'érosion en nappe dans le bassin versant de l'Oued Sahla, Rif central Maroc. Cahier géographique (6), pp 59-70.
- Sarab, N. (1978).** Contribution à l'application de l'Équation Universelle de l'Érosion dans le Constantinois. Mémoire de DES (diplôme d'Enseignement Supérieur) en Écologie. Université de Constantine, Algérie.
- Singh V.P. (1995).** Computer models of watershed hydrology. 1130 p.
- Sogreah. (1984).** Étude du schéma directeur des ressources en eau du Cheliff et réaménagement du périmètre du Bas-Cheliff. Rapport B2 et B5. SNC. Montréal, Canada.

- Soil Conservation Service (SCS). (1972).** National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology. SCS, US department of Agriculture. Washington, États-Unis.
- Tixeront, J. (1960).** Les débits solides des cours d'eau d'Algérie et de Tunisie. Étude hydrologique. Série II. Secrétariat agricole. Tunis. IAHS, (53), pp 26-41.
- Tlili, A. (2012).** Approche méthodologique de détermination du débit pluvial pour une aide à la décision : Cas de la région de Benchaabane. Wilaya de Blida. Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger. Algérie, 120 p.
- Touaibia, B., Dautrebande, S., Gomer, D., & Aïdaoui, A. (1999).** Approche quantitative de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales : Bassin Versant de l'Oued Mina. Hydrological Sciences Journal des sciences hydrologiques44 (6), pp 973-986.
- Touaibia, B. (2000).** Érosion – Transport Solide – Envasement de barrage : Cas du bassin versant de l'Oued Mina – Wilaya de Relizane. Thèse de Doctorat d'Etat en Science Agronomique. Institut Nationale Agronomique INA, El Harrach, Alger. Algérie 175 p.
- Touaibia, B. (2004).** Manuel pratique d'hydrologie. Edition Madani. Blida. Algérie. 166 p.
- URBAB. (2007).** Révision du PDAU commune de Sidi Rached, Wilaya de Tipaza. Centre d'Etude et de Réalisation en Urbanisme, Blida. Edition 2007. 180 P.
- Valentin, C., & Roose, E. (1982).** Soil and water conservation problems in pineapple plantations of South Ivory Coast. In: Soil Conservation. Problems and Prospects. R. P. C. Morgan (ed). John Wiley. pp 239-246.
- Vogt, H. (1991).** Quelques problèmes concernant les méthodes de recherche en érosion des sols. Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages, ANRH Alger. pp 10-15.
- White, W. R. (1999).** Water in rivers; Flooding, world water vision. Document de réflexion. IARH. 21 p.
- Williams, R. & Berndt, H.D. (1972).** Sediment yield computed with universal equation. Journal. Hydraulique. Engng Div. ASCE 98 (Hy 12), pp 2087-2098.
- Wischmeier, W. H & Smith, D. D. (1960).** A Universal soil loss estimating equation to guide conservation farm planning. 7<sup>ème</sup> Congrès On Soil Science USA (1), pp 418-425.
- Wischmeier, W. H & Smith, D. D. (1978).** Predicting rainfall erosion losses. Guide to conservation planning. USDA-ARS, Agriculture Handbook n°537. Washington. 58 p.
- Wischmeier, W. H & Smith, D. D. (1978).** Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook N° 57. Washington DC. USA. 58 p.
- Yahiaoui, A. (2012).** Inondations torrentielles : cartographie des zones vulnérables en Algérie du Nord (cas de l'Oued Mekerra, Wilaya de Sidi Bel Abbès). Thèse de Doctorat en Hydraulique. École Nationale Supérieure Polytechnique. Alger. Algérie. 190 p.
- Zahar, Y., & Laborde, J.P. (2001).** Génération stochastique d'averses et de leurs index d'érosivité pour la simulation de la dynamique érosive en Tunisie centrale. Hydrological Sciences Journal. 2(46), pp 243-253.