

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur l'érosion et le transport des sédiments

I.1. L'intérêt de l'étude de la dynamique fluviale des sédiments.....	3
I.2. Problématique de l'érosion et transport solide.....	4
I.3. Quelques travaux effectués sur le transport solide en Algérie.....	6
I.4. Problèmes liés à l'érosion et le Transport solide.....	8
I.5. Processus de l'érosion dans les bassins versants.....	9
I.6. Mécanisme de l'érosion.....	9
I.6.1. Détachement.....	9
I.6.2. Transport.....	9
I.6.3. Dépôt.....	10
I.7. Différentes types d'érosion.....	10
I.7.1. Erosion éolienne.....	11
I.7.2. Erosion hydrique.....	11
a) Erosion en nappe.....	12
b) Erosion en griffe.....	12
c) Erosion en ravines.....	13
d) Erosion des berges.....	13
I.8. Les processus qui influencent l'érosion.....	13
I.8.1. Le climat.....	14
I.8.2. La topographie.....	14
I.8.3. Le couvert végétal.....	14
I.8.4. L'activité humaine.....	14
I.9. Transport solide.....	15
I.9.1. Modes de transport.....	15
I.9.1.1. Le transport solide en suspension.....	16
I.9.1.2. Le transport solide par charriage.....	18
I.9.1.3. La Saltation.....	20

Chapitre II : Caractéristiques de bassin versant de sikkak

II.1. Introduction.....	21
II.2. Caractéristiques physiques.....	21
II.2.1. Situation géographique.....	21

III.2.2. La mesure les vitesses d'eau.....	47
III.2.2.1. Jaugeage au moulinet.....	47
III.2.2.1.1 Adaptation du moulinet.....	47
III.3. Mesure de concentration.....	48
III.4. Calcul du débit solide en suspension.....	48
III.5. Conclusion.....	49

Chapitre IV : Méthodologie

IV.1. Introduction.....	50
IV.2. Mesure hydrométrique de oued Sikkak.....	50
IV.2.1.Outils et protocole de mesures.....	51
a) Les débits liquides.....	51
b) La concentration.....	51
c) Les débits solides.....	51
IV.2.2.Données fournies.....	52
IV.3.Etude des Précipitations.....	53
IV.4.Ajustement aux lois de probabilité.....	53
IV.4.1.La loi normale.....	53
IV.4.1.1.Propriétés de la loi normale.....	54
IV.4.1.2.Moments statistiques.....	54
IV.4.2.La loi Log-normale.....	55
IV.4.2.1.Définition.....	55
IV.4.2.2.Domaine d'utilisation.....	55
IV.4.2.3. Moments statistiques.....	56
IV.4.3. Loi de Gumbul.....	56
IV.4.3.1. Moments statistiques.....	57
IV.5. Adéquation de l'ajustement par le test de Kolmogorv-Smirnov.....	58
IV.6. Calcul des probabilités et périodes de retour.....	58
IV.7.Etude des apports.....	59
IV.7.1.Calcul des apports.....	60
a) Les apports annuels.....	60

IV.8. Conclusion.....	61
Chapitre V :	Résultats et Interprétations
V.1. Introduction.....	62
V.2. Etude pluviométrique.....	62
a) Etude de variabilités mensuelles.....	62
b) La contribution des Pj max par rapport a P mensuelle.....	64
V.3. La susceptibilité à l'érosion.....	65
V.3.1. Analyse du tableau.....	68
V.3.2. Analyse de tableau.....	72
V. 4. Etude des apports.....	73
V.4.1. Apports mensuels.....	73
a) Oued Sikkak.....	73
V.4.2. Apports saisonniers.....	75
V.5. Application des lois de probabilité sur la pluviométrie.....	80
V.6.Conclusion.....	89
Conclusion générale.....	90

Liste des tableaux

Tableau I.1 :Etat des barrages en 2001.....	5
Tableau II.1 : Caractéristiques de forme hydrologiques d'Oued Sikkak.....	23
Tableau II.2 : Paramètres morphométriques des principales unités hydrologiques de Sikkak.....	25
Tableau II.3 : Répartition hypsométrique du bassin versant d'oued Sikkak.....	26
Tableau II.4 : Altitudes caractéristiques du bassin d'Oued Sikkak.....	27
Tableau II.5 : Classification du relief selon Ds.....	28
Tableau II.6 : Indices de pente et Ds.....	28
Tableau II.7 : Classification du relief selon Ig par l'ORSTOM.....	29
Tableau II.8 : Valeurs des coefficients de torrentialité et les temps de concentrations Des eaux des sous – bassins.....	30
Tableau II.9 : Distribution du couvert végétal dans le bassin d'oued Sikkak.....	31
Tableau II.10 : Répartition spatiale des différentes formation lithologiques en % de bassin Versant deSikkak.....	34
Tableau II.11 : Pluviométrie dans le bassin versant de la Tafna et choix des précipitations dans le bassin versant de l'oued Sikkak.....	35
Tableau IV.1 : Coordonnées cartésiennes de la station de Ain Youcef.....	50
Tableau IV.2 :Espérance mathématique, écart type, coefficient d'asymétrie et d'aplatissement d'une loi normale.....	55
Tableau IV.3 : Moments statistiques d'une loi Log-Normale.....	56
Tableau IV.4 :Table de Kolmogorov-Smirnov.....	59
Tableau V.1 : la variabilité du coefficient a mensuelle,saisonnière et annuelle.....	68
Tableau V.2 : la variabilité du coefficient a pour les concentrations mensuelle, saisonnière et annuelle.....	72
Tableau V.3 : Apports liquides et solide moyens mensuelles à oued Sikkak (période 1972/99).....	73
Tableau V.4 : Apports liquides et solide saisonniers avec les précipitations et la dégradation spécifique à oued Sikkak.....	75
Tableau V.5 : Valeurs des apports liquides, solides et des dégradations spécifiques au niveau d'oued Sikkak.....	77
Tableau V.6 : Période de retour pour les précipitations annuelles, les Pj max,le débit annuel, le débit max et la concentration.....	80

Introduction

La mobilisation des eaux superficielles est une des stratégies mise en place par l'Etat Algérien pour accroître les ressources en eau. Pour réussir cette mobilisation il est impératif de procéder à une étude quantitative des apports liquides et solides sur le bassin versant choisi à cet effet car les retenues et les barrages algériens sont soumis aux problèmes d'envasement qui réduit énormément leur capacité de stockage.

La nécessité de la quantification des apports solides sont accentuées par la contrainte liée au manque de données, ce qui a poussé plusieurs chercheurs à proposer des modèles de prévision spécifiques à leurs régions d'études. Suite à l'acuité du phénomène, beaucoup de chercheurs algériens (Terfous et al, 2001; Touaïbia et al, 2011; Megnounif et al, 2003; Ghenim, 2008...etc) ont essayé d'exploiter les données disponibles en vue d'étudier le phénomène du transport solide en suspension dans les bassins versant méditerranéens algériens afin d'obtenir des modèles qui aident à l'estimation de la charge en suspension.

Le bassin versant de l'oued Sikkak est un sous bassin de la Tafna. Il prend naissance sur le plateau de Terny à la source de AÏN Rhanous, c'est un affluent rive gauche de l'oued Isser avec lequel il conflue au nord de AÏN Youcef. Le bassin versant d'Oued Sikkak occupe une surface de 463 km².

Dans ce mémoire on trouve cinq chapitres, le premier chapitre « Généralités sur l'érosion et le transport des sédiments » présente des généralités sur le phénomène d'érosion et le transport solide, leur facteur et leur conséquence dans le bassin versant.

Le deuxième chapitre «Etude de cas du bassin versant de l'oued Sikkak» est consacré au site de l'étude, les caractéristiques physiques, géologiques, climatiques et pluviométriques pour connaître la région d'étude.

Le troisième chapitre «Mesure hydro-pluviométrique» englobe les différentes méthodes de mesure des précipitations ainsi hauteurs d'eau, le débit solide, la concentration, le débit liquide dans les stations de jaugeage.

Introduction Générale

Dans le quatrième chapitre « Méthodologie » cette partie comporte les étapes de calcul et les lois d'ajustement utilisées.

Le cinquième chapitre « Résultats et Interprétations » c'est la partie finale de cette étude, un ensemble des résultats obtenus à partir un bilan des apports solide et liquide ainsi les concentrations et une étude de tendance des précipitations mensuelles.

En fin une conclusion générale.

I.1. L'intérêt de l'étude de la dynamique fluviale des sédiments

L'érosion hydrique entraîne des conséquences tant en amont qu'en aval des bassins versants. Elle peut se traduire, en amont, par des pertes en terre ainsi que des pertes en matière organique et en éléments nutritifs. En terre agricole, l'érosion est aussi accompagnée par la perte des amendements ajoutés au sol comme les fertilisants (azote et phosphate).

A côté des dégâts bien visibles concernant les terres cultivées, il existe des dégâts en aval beaucoup plus insidieux, provoqués par l'augmentation du ruissellement et l'entraînement des particules du sol. Ce sont, entre autres, les coulées de boues, inondations, sapements de chaussées, colmatages des réseaux d'assainissement et des ouvrages de retenue des eaux pluviales et envasements des cours d'eau. Les dégâts se manifestent par des accumulations sédimentaires massives en aval qui peuvent perturber l'écosystème littoral [1].

Les pertes en sols des terres, leur transport et leur atterrissement dans les infrastructures hydrauliques, hydro- agricoles, portuaires, routières...ont laissé les pouvoirs publics très soucieux sur la gravité du phénomène de l'érosion hydrique. Des outils d'investigation ont été mis en œuvre pour tenter de maîtriser le phénomène, malheureusement les sols continuent à se dégrader malgré une lutte anti érosive intensive entreprise à tous les niveaux en commençant par le traitement des bassins versants des barrages en exploitation. La gravité du phénomène a atteint un stade parfois irréversible. Toutes les formes d'érosion y sont associées laissant des paysages désolants [2].

I.2. Problématique de l'érosion et transport solide

L'aspect le plus important de l'érosion est l'érosion pluviale et plus précisément l'érosion par ruissellement. Les terrains étant nus, pour une raison ou pour une autre (déboisement, labour...), le ruissellement dû aux eaux de pluie et surtout à la suite d'averses torrentielles décape progressivement les horizons supérieurs du sol jusqu'à atteindre parfois la roche mère. La lame d'eau en mouvement le long des versants se divise progressivement. Les filets d'eau se regroupent dans les petites dénivellations du sol. Concentrée, cette eau déploie une force lui permettant d'arracher les obstacles. Emportés par l'eau, ces derniers, augmentent la faculté d'érosion, qui se voit amplifier avec l'épaisseur de la lame d'eau ruisselée, la longueur et la pente du versant. Un exemple frappant de ce générique est celui des inondations de Bab El-Oued (Alger) en Novembre 2001 où plus d'un millier de personnes ont péri, enseveli dans la boue. Sur 2,6 Millions de m³ ruisselés, un volume de 800 000 m³ de sédiments arrachés au bassin ont transité [2].

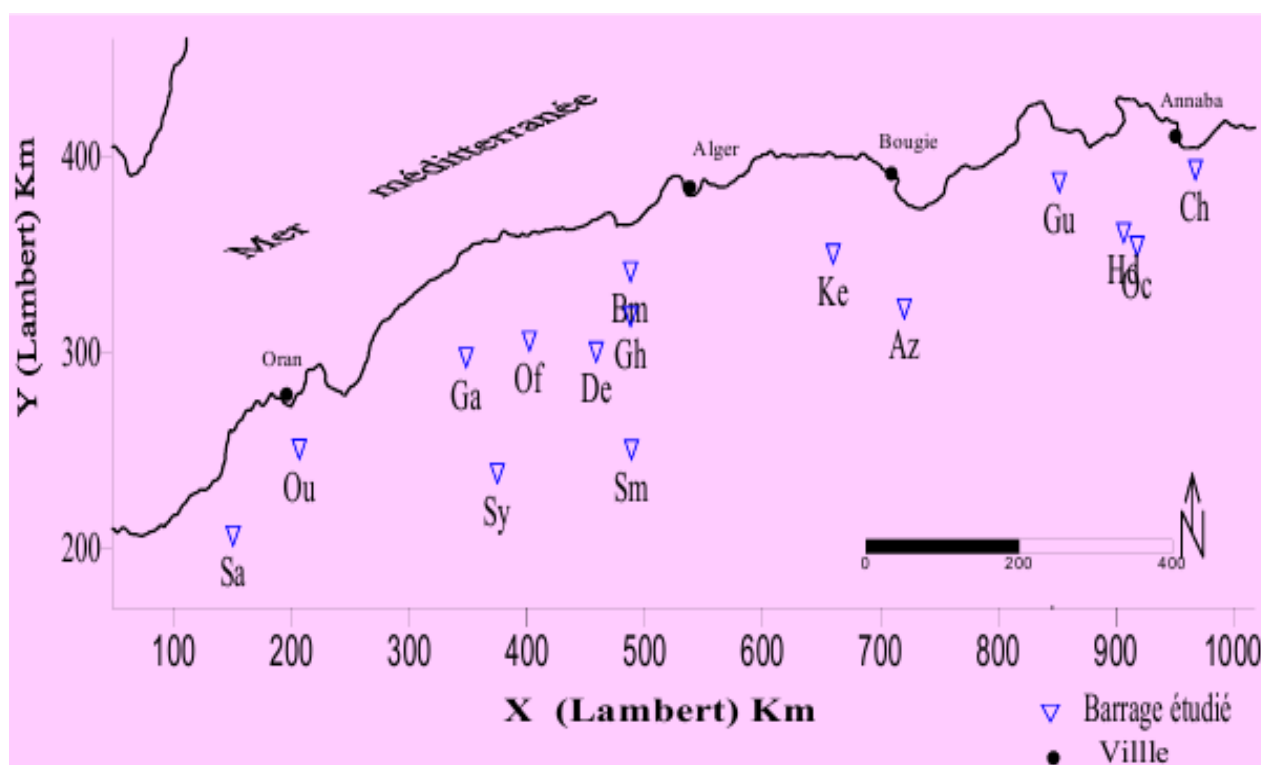


Figure I.1 : situations des barrages au nord algérien [2].

Le tableau suivant représente l'état des barrages du nord Algérien en 2001.

Tableau I.1 :Etat des barrages en 2001 [2].

Nom du barrage	Mise en service	Surfae Km ²	Apport liquide Mm ³	Coefficient Ecoulement Flow coefficient	Erosion spécifique T.ha ⁻¹ Specific Erosion
Oued Fodda*	1932	800	120.0	0.23	24.00
Ghrib*	1939	2800	148.5	0.14	7.50
Cheffia*	1965	575	138.0	0.26	27.13
Sidi M. Bénaouda*	1978	4900	120.0	0.42	3.36
Guenitra	1984	202	55.0	0.32	8.37
Deurdeur	1985	468	45.0	0.10	23.06
Sidi Yacoub	1985	920	98.0	0.17	14.90
Ain Zada	1986	1070	90.0	0.13	4.38
Bouroumi	1986	150	26.0	0.37	69.33
Ouizert	1987	2100	84.0	0.07	2.60
Hammam Debagh*	1987	1070	69.0	0.10	5.05
Keddara	1987	93	27.3	0.03	32.15
Sidi Abdelli	1988	1100	70.0	0.13	2.10
Gargar	1988	2900	185.0	0.16	20.62
Oued Cherf	1995	1735	33.0	0.20	3.00

Il s'agit des barrages **Oued Fedda, Ghrib, Cheffia, Sidi M. Bénaouda, Deurdeur, Sidi Abdelli, Bourouni**. Pour les barrages ayant plus de 50 années d'exploitation (**Oued Fedda et Ghrib**), il est difficile de parler d'envasement, même si leur capacité utile est affectée puisque la période pour laquelle le volume mort a été calculé est atteinte. Cependant, les barrages affectés sont ceux qui ont un période d'exploitation de moins de 25 ans [2].

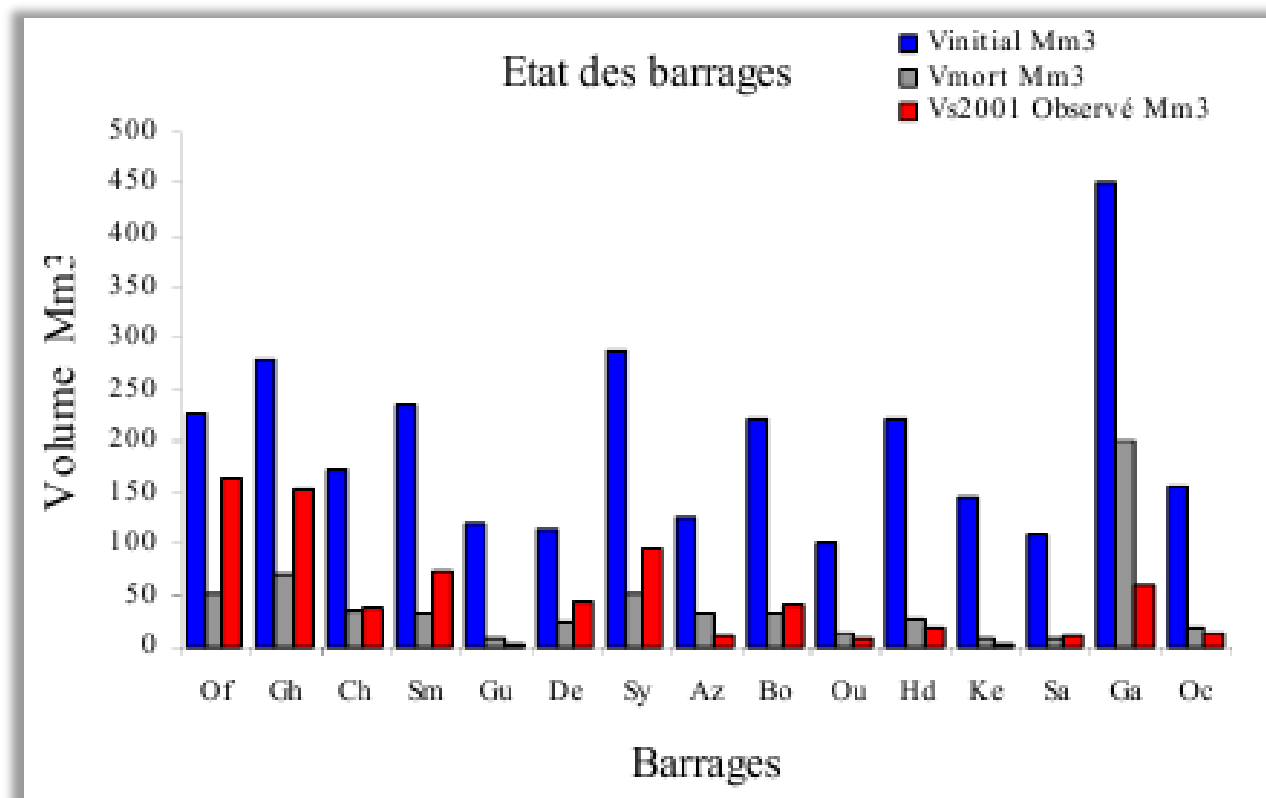


Figure 1.2 :Etat d'envasement des barrages (mars 2001) [2].

La plus grave forme de l'érosion en Algérie, est l'érosion par ravinement du réseau d'écoulement et peut représenter à elle seule plus de 50% de l'apport solide annuel. Des lâchers d'eau peuvent basculer facilement la balance en apport de sédiment [2].

Un cas frappant sur la sédimentation a été étudié. En 2 mois 45 000 m³ de vase consolidée ont été enlevés d'un barrage de prise après avoir mobilisé toutes les infrastructures du périmètre d'irrigation de la Mitidja Ouest [2].

I.3. Travaux effectués sur le transport solide en Algérie

Plusieurs chercheurs ont étudié le phénomène de l'érosion et le transport solide dans nos bassins versants. Nous citons quelques travaux importants :

Megnounif A, Terfous A, et Bouanani A (2003)

Les auteurs se sont intéressés dans leur travail aux sédiments transportés en suspension par oued Tafna à Beni-Bahdel. Pour la période allant septembre 1988 à Aout 1993. L'analyse de variabilité de la charge en suspension montre une production très forte en automne mais d'une faible ampleur au printemps. En automne le flux des matières solides en suspension représente 44% de flux annuel estimé à 28600 tonnes, au printemps malgré l'augmentation des débits (60% de l'apport annuel) la charge en suspension diminue considérablement. La production du ruissellement superficiel en matières solides représente 62% du flux annuel alors que l'érosion du cours d'eau contribue par 38% [3].

Ghenim A, Seddini A et Terfous A (2007)

L'étude est basée sur les mesures instantanées des débits liquides et des concentrations réalisées par les services de l'A.N.R.H. Les auteurs se sont intéressés à l'Oued Mouillah qui constitue le plus important affluent de la Tafna. Pour ce faire, ils ont étudié, pour les différents épisodes de crue, leur rôle dans l'amplification du transport solide ainsi que le comportement du bassin lors de ces événements exceptionnels. Cette étude permet de souligner l'importance des crues dans la genèse et le cheminement des particules solides vers l'exutoire des bassins. Elle met aussi en évidence la complexité de ce phénomène dans les zones semi-arides [4].

Bouchelkia H, Belarbi F et Remini B (2011)

L'étude consiste à évaluer le transport solide en suspension dans le bassin versant de l'oued Mouillah. Le principe adopté est basé sur des données hydrométriques des stations de jaugeage de sidi Belkheir contrôlant le bassin versant de l'oued Mouillah, et des analyses saisonnières et annuelles sur la période 1975-2000, et a permis de définir une méthode appropriée d'estimation des apports solides. Cette approche a permis de quantifier le transport solide en suspension, les résultats obtenus ont montré que les apports solides les plus abondants et réguliers sont en hiver. Ils attestent que le bassin versant de l'oued Mouillah est d'une érodabilité modérée, puisque la valeur maximale annuelle des apports solides trouvée est de $7,53.10^4$ tonnes [5].

Touaibia I et Ghenim A (2011)

L'étude se base sur les données de mesures instantanées de débits liquides et de concentration des sédiments en suspension enregistrées au cours de la période allant de 1973 à 1994 relevées à la station de Medjez. Cette étude examine 9 approches de quantification statistique de l'érosion pour adopter celle qui estime l'apport solide avec un minimum d'erreur relative. Les deux modèles les plus adaptés considèrent un découpage par crue ou un découpage mensuel. La méthode qui tient compte uniquement des crues donne le meilleur résultat avec une erreur relative de 23% [6].

I.4. Problèmes liés à l'érosion et le Transport solide

Les problèmes du transport solide peuvent être cités comme les suivants :

- ✚ Disparition des terres agricoles
- ✚ Envasement des barrages et divers ouvrages hydrauliques etc.
- ✚ Le problème le plus important et inquiétant est l'envasement des cuvettes des barrages.

I.5. Processus de l'érosion dans les bassins versants

D'une manière générale, l'érosion des sols correspond au "détachement" et au "transport" des particules de sol, par différents agents (gravité, eau, vent, glace), de leur emplacement d'origine à un endroit de "dépôt" à l'aval. Dans tous les cas, ces mouvements de sol sont des processus discontinus à fortes variations spatio-temporelles, difficiles à décrire sous forme d'équations mathématiques. Nous, nous intéressons dans cette étude plus particulièrement à l'érosion hydrique, qui est un phénomène largement répandu et dont les conséquences peuvent entraîner des pertes de terre irréversibles et une diminution des capacités de stockage des barrages.

L'érosion hydrique constitue en Algérie un phénomène très grave qui affecte durement le patrimoine foncier. Elle touche 45% des zones telliennes soit 12 millions d'hectares cultivables. Ce phénomène devient encore plus grave si l'on sait que 85% des surfaces cultivables, sont situées dans les zones les plus sensibles à l'érosion [7].

I.6. Mécanisme de l'érosion

L'érosion hydrique résulte de divers processus que sont le détachement, le transport et le dépôt ou la sédimentation.

I.6.1. Détachement

Sur la surface du sol le détachement des particules se produit lorsque, sous l'action des gouttes de pluie, des agrégats s'éclaboussent ou lorsque la force de cisaillement du ruissellement devient supérieure à la résistance au détachement du sol.

I.6.2. Transport

Les particules issues de la dissociation, grossières ou fines, sont ultérieurement déplacées vers l'aval sous l'action de la gravité. Certains, comme les cailloux d'éboulis et les blocs d'éboulement, tombent directement dans les rivières. D'autres, les plus fins, sont véhiculés par un agent de transport, l'eau ou le vent. La force du véhicule règle naturellement la taille des sédiments; le vent ne pouvant déplacer que les poussières et les fins grains de sable, tandis que les torrents charrient du sable, du gravier et des galets.

I.6.3. Dépôt

Le dépôt se fait lorsque l'énergie cinétique qui déplace les matériaux issus du détachement, diminue ou s'annule. Une fraction des particules est piégée entre les mottes de terres, une autre partie dans le lit du cours d'eau et une infime partie arrive à la mer.

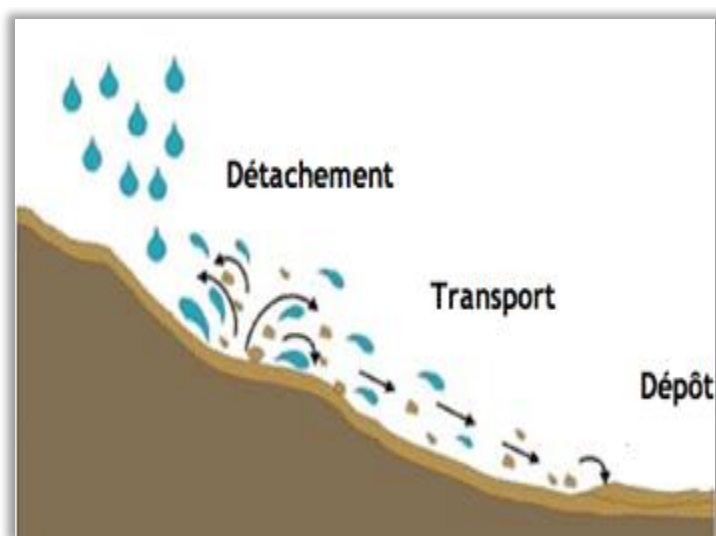


Figure I.3 : mécanisme de l'érosion [8]

I.7. Différentes types d'érosion

L'effet de l'érosion est perceptible sur les fortes pentes de montagne, naturellement dénudées, les matériaux du sol et même de la roche mère y sont visiblement démantelés par les torrents qui se chargent de matériaux qu'ils déplacent rapidement. Il s'y produit alors des effondrements, des décrochements et des glissements en grandes masses, c'est un processus lent qui agit en deux temps:

- Altération en surface
- Transport de matériaux provenant de cette altération.

Il existe quatre types d'érosion des bassins versants à savoir :

I.7.1. Erosion éolienne

Agissant sur un sol meuble desséché, le vent enlève des les éléments fins. sont enlevés par le vent. Grâce à un vent léger en été lève verticalement du sol des spirales de poussière s'élevant verticalement du sol sous ayant l'aspect d'une colonne de fumée [9].



Figure I.4 : Erosion éolienne [10].

I.7.2. Erosion hydrique

L'agent principal de l'érosion hydrique est le ruissellement des eaux météoriques. L'érosion pluviale détermine quatre groupes de forme correspondant à des stades de dégradations.



Figure I.5 : phénomène d'érosion hydrique [11]

a) Erosion en nappe

L'érosion en nappe agit sur la surface du sol. Elle provoque une usure homogène la quelle dans beaucoup de cas n'est pas perceptible. Sinon, elle se manifeste par déchaussement des cailloux, des herbes, des plantes, etc.



Figure I.6 : Erosion en nappe [12].

(1) : Le choc de la goutte sur la terre nue	(2) : Le manque de la solidité du liant argilo-humique des agrégats	(3) : Entraînent le bouchage du pores du sol.
---	---	---

b) Erosion en griffe

Elle se manifeste souvent après un ruissellement. Certains versants présentent des parallèles. Leurs tracés sont fins, leur profondeurs n'excèdent pas 10cm, leurs longueur sont surtout en fonction de la nature du terrain, de la force des eaux à creuser le sol et de l'importance des versant. L'érosion en griffe donne naissance aux rigoles tout en gardant une direction parallèle, le profil formé est en (V) ou en (U) en fonction des terrains en place. Généralement les griffes sont formées au niveau des jachères nues. Parfois, les rigoles se transforment en ravines plus ou moins profondes et les eaux qui y coulent sont boueuses [9].



Figure I.7 : Erosion en griffes [13]

d) Erosion en ravines

Une évolution de l'érosion en rigoles peut conduire à l'érosion en ravine. Les rigoles sont appelés ravins lorsqu'ils s'étendent au point de ne pouvoir être comblés par les opérations normales de travail du sol, ou lorsqu'ils deviennent nuisibles au travail du sol.

e) Erosion des berges

C'est une érosion verticale dont le mécanisme se fait par l'eau qui attaque des berges des cours d'eau, en provoquant leur effondrement, c'est l'ablation des matériaux des berges des cours d'eau par déplacement latéral du lit par suite de l'affouillement des rives [9].

I.8. Les processus qui influencent l'érosion

L'érosion des sols dépend de différents facteurs dont les plus importants sont : le climat, le relief, le sol, la végétation et les activités humaines.

I.8.1. Le climat

Le climat en régions semi aride est très agressif. Les pluies sont dangereuses surtout par leur soudaineté et intensité lorsqu'elles dépassent 30 mm en 24heures ou 20 mm en 2heures ou même 15 mm en moins d'une heure. Dans ces cas, l'eau qui ruisselle accumule une énergie croissante générant une érosion désastreuse, même en faible pente, le sol est exposé aux dégradations accélérées du ruissellement qui se traduit donc par une exportation importante en terre et cailloux vers l'aval des bassins versants.

I.8.2. La topographie

Les facteurs topographiques essentiels sont la pente du bassin versant, le relief, la densité de drainage, l'importance des vallées et des plaines d'inondation, l'orientation et la taille du bassin.

Les fortes pentes génèrent des écoulements rapides, sont généralement à l'origine d'une érosion excessive dont l'importance dépend de la lithologie géologie des sols et de la protection de la couverture végétale [14].

I.8.3. Le couvert végétal

Un bon couvert végétal limite l'érosion en dissipant l'énergie de pluie, favorise l'infiltration et s'oppose à toutes formes d'érosion. Le couvert végétal est classé en trois types généraux : végétation arbustive des zones désertiques, prairies et forêts [14].

I.8.4. L'activité humaine

Le sol constitue la plus importante ressource naturelle pour l'homme. Cependant, pour assurer sa prospérité, l'homme a entamé des aménagements de cette ressource et a commencé, malheureusement, par détruire la forêt pour ses besoins en terres, de culture et de parcours.

En Algérie des cinq millions d'hectare de forêts remontants à la période précoloniale, il n'en reste plus qu'environ 3,5 millions actuellement exposés aux dangers permanents qu'est le feu. Ainsi, les grands massifs sont réduits à des formations forestières discontinues, offrant une faible protection du sol contre les différents mécanismes d'érosion [9].

I.9. Transport solide

Le transport solide c'est la quantité de matériaux granulaires transportée par un cours d'eau, les sédiments ainsi emportés proviennent soit du bassin versant soit des berges ou du fond du lit mineur. Grâce à l'érosion qui se manifeste est dite aréolaire appelée aussi érosion en nappe ou en rigole, les fines particules entraînées en surface sont souvent cohésives. ainsi l'érosion linéaire qui persiste même quand la pluie cesse de tomber, elle mobilise des forces hydrodynamiques importantes qui finissent par transporter des matériaux très grossiers [15].

Le charriage et la suspension qui sont les principaux types de transport solide, (**Figure. I.8**).

La capacité de charriage est liée à la nature granulométrique des matériaux et varie dans le temps et dans l'espace avec le débit liquide.

La répartition entre le charriage et la suspension dépend essentiellement de la dimension des matériaux rapportés à la vitesse de l'eau et la turbulence de l'écoulement.




En tout point d'une rivière d'alimentation, le débit solide est défini par les caractéristiques hydrologiques de son bassin versant [16].

Le transport des sédiments par les cours d'eau est en fait déterminé par les caractéristiques des particules (taille, forme, concentration, vitesse de chutes et densité des particules). Les deux modes de transport connus en hydraulique fluviale sont : le charriage et le transport en suspension [15].

I.9.1. Modes de transport :

Il existe différents modes de transport solide dans les cours d'eau, ces modes dépendent essentiellement de la morphologie du cours d'eau et des terrains traversés.

Il s'agit de trois types de mouvements dans les cours d'eaux :

-  Transport en charriage au fond du lit,
-  Transport par saltation,
-  Transport en suspension.

La figure suivante schématise les types de transport solide, rencontrés dans le bassin versant

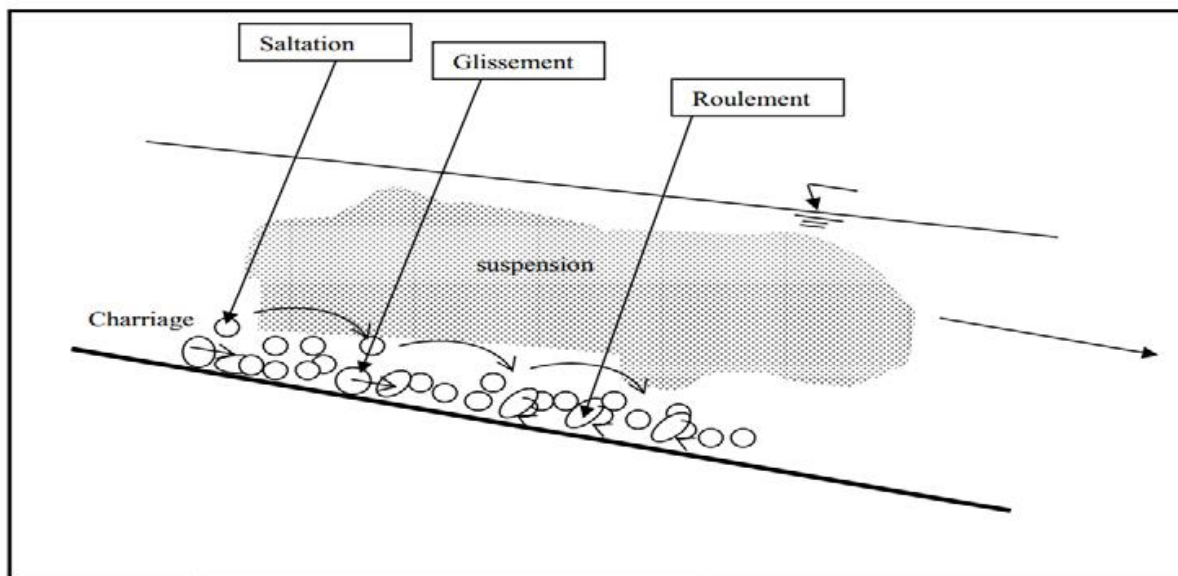


Figure I.8 : Différent types de transport solide en rivière [15].

I.9.1.1. Le transport solide en suspension

Ce type concerne principalement les matériaux produits par l'abrasion des sols. Aussi sa détermination est très utile en agronomie, car ce sont les éléments les plus fertilisants qui sont ainsi transportés : particules fines, éléments chimiques et matières organiques [17].

Le transport solide en suspension est assez continu dans l'espace. Les sédiments sont transportés sur de longues distances, à la vitesse du courant. Mais il est très discontinu dans le temps puisqu'il est conditionné par le phénomène d'abrasion.

Quand la vitesse du courant s'accroît dans le cours d'eau, l'intensité de la turbulence et l'épaisseur de la couche limite turbulente s'accroissent également, on arrive finalement à un stade où les particules en saltation atteignent une hauteur au dessus du fond où les forces ascensionnelles fluctuantes dues à la turbulence dépassent le poids des particules.

Les particules suivent des trajectoires aléatoires dans l'épaisseur de fluide [18].

Le critère d'apparition des phénomènes de suspension qui consiste à définir la vitesse "U" d'écoulement du liquide, par laquelle la poussée de ce dernier sur les grains de diamètre "D" permet la mise en suspension des grains de 0,2 à 0,85 millimètres de diamètre dans des écoulements naturels de rivières est définie par la formule de W.Kresser suivante :

$$U^2 = 360.g.D$$

Avec:

$$U = C \sqrt{h.J}$$

$$\text{et } \tau = \gamma J. h$$

$$\text{D'où } \tau = 360 (\gamma g/C^2)$$

τ : La contrainte tangentielle de l'écoulement

γ : Poids volumique du liquide (N/m³)

C : Coefficient de Chezy.

h : Hauteur du liquide (m).

J : Perte de charge régulière de l'écoulement.

U : Vitesse de l'écoulement (m/s).

D : Diamètre des grains (mm).

g : Accélération de pesanteur (m/s²).

Les sédiments se déplacent sur des grandes distances et le débit solide croît de l'amont vers l'aval. Quelques valeurs indicatives, permettent de délimiter les deux modes de transport.

Ces valeurs utilisent le rapport entre vitesse de l'écoulement V sur le lit du cours d'eau, et la vitesse W de chute des particules,

$V/W > 0,10$ début de transport par charriage.

$V/W > 0,40$ début de transport en suspension.

Les critères de suspension, donnés par Bagnold, Van Rijn, Eugelund et Schields sont représentés dans la **Figure I.9** [19].

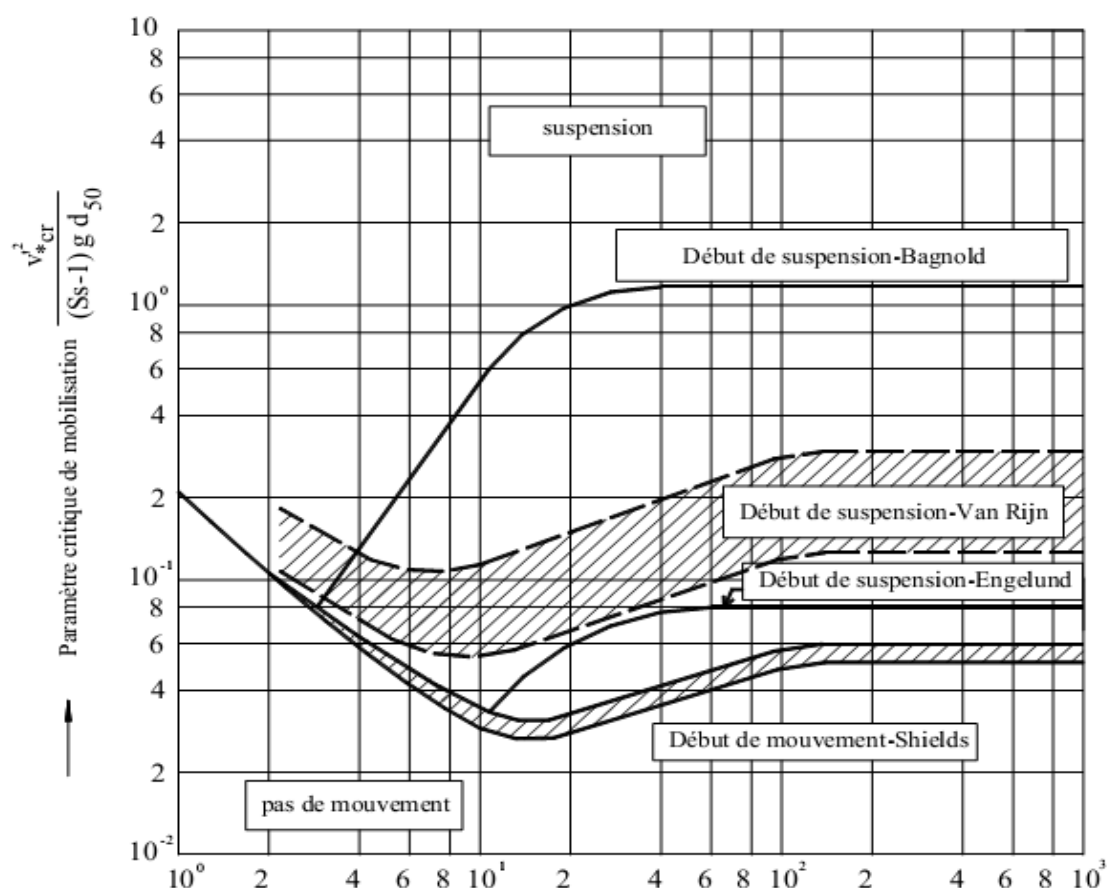


Figure I.9 : Critères de suspension (Van rijn 1984)

I.9.1.2. Le transport solide par charriage

Il s'alimente surtout par érosion du lit et des berges du cours d'eau. Il contribue pour une large part à la formation et à l'équilibre du lit, modelant ainsi le profil en long du cours d'eau. Les grains charriés se déplacent par à coups à une vitesse moyenne très nettement inférieure à celle de l'eau (moins d'un mètre par heure). [19]

Malgré le poids des grains ils sont susceptibles d'être emportés par suspension dans la présence de la turbulence. Pour déplacer sur de longues distances sans rejoindre le fond, avec une vitesse égale à celle de l'eau [20].

C'est un phénomène très localisé puisqu'il est conditionné entre autres, par la pente et la constitution du lit, qui peuvent varier d'un tronçon de cours d'eau à l'autre. Par contre, pour une même

section de cours d'eau, il peut être lié au débit liquide, donc, dans certaines conditions il se prête mieux à l'étude théorique et à l'élaboration de formules [19].

Sur le lit des matériaux sans cohésion, les grains isolés sont soumis aux forces de pesanteur et aux forces hydrauliques.

- ❖ Les forces de pesanteur sont des forces stabilisatrices.
- ❖ Les forces hydrauliques sont des forces déstabilisatrices dues à l'écoulement (traînée et portance)

La grandeur physique explicative de ce mode de transport (charriage) est la contrainte hydrodynamique critique « τ_c »

Donc les grains constituant l'interface solide-liquide, ayant un poids et un coefficient de frottement, ils ne peuvent être mis en mouvement par l'action du fluide que si la contrainte sur le fond " τ " dépasse la valeur de la contrainte critique « τ_c »

Ce mouvement de granulats se traduira par un transport sur le fond dans le sens de l'écoulement.

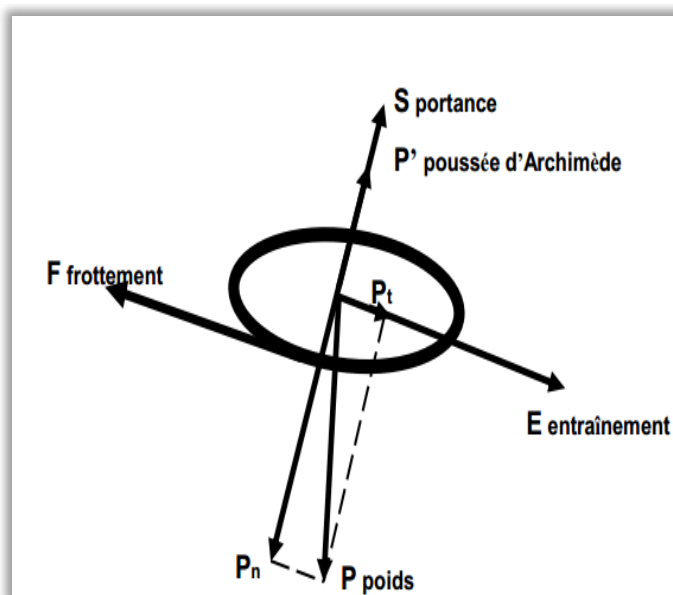


Figure I.10 : Equilibre d'un grain posé sur le fond d'un canal

La contrainte sur le fond de la rivière est exprimée par :

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R_h \cdot J \text{ (N/m}^2\text{)}$$

τ : La contrainte tangentielle de l'écoulement. (N/m²)

τ_{Cr} : contrainte critique du début d'entraînement. (N/m²)

J : Perte de charge régulière de l'écoulement.

ρ : Poids spécifique de l'eau.

R_h : Rayon hydraulique (m)

g : Accélération de la pesanteur (m²/s)

Pour cela, on dit que le charriage est un phénomène à seuil et l'analyse très simplifiée pour le début de mouvement, revient à comparer directement la force de déstabilisation due à l'écoulement à la capacité de résistance au mouvement des matériaux, qui tapissent le fond [16].

I.9.1.3. La Saltation

C'est le mode de transport des éléments plus fins que les galets, c'est-à-dire les graviers et les sables grossiers, Les graviers sautent, progressent par bonds au fond de la rivière et occupent donc, dans la section, une certaine hauteur dépendant de la vitesse et des caractéristiques des grains.

On explique la progression par saltation de la façon suivante: un grain glisse sur le fond du lit, puis rencontre un obstacle, il se bute alors sur cet obstacle. La différence de pression entre l'amont et l'aval du grain augmente, il bascule, puis est arraché, entraîné par le courant et, par gravité, retombe au fond où le processus recommence [21].

II.1. Introduction

Pour l'étude des bassins versants il est nécessaire de connaître les caractéristiques physiques, géologiques, climatiques et pluviométriques afin de quantifier les débits liquides et solides. On a choisi le bassin versant de l'oued sikkak comme cas d'étude.

II.2. Caractéristiques physiques

Ces caractéristiques nous donnent des informations sur la forme du bassin versant et de ses affluents.

II.2.1 Situation géographique

Le bassin versant de l'oued Sikkak est un sous bassin de la Tafna. Il prend naissance sur le plateau de Terny à la source de AÏN Rhanous, c'est un affluent rive gauche de l'oued Isser avec lequel il conflue au nord de AÏN Youcef. Le bassin versant d'Oued Sikkak occupe une surface de 463 km², il est limité :

- Au sud par les Djebels Nador et Bouladour.
- A l'est par les Djebels Er Ramlya, Ouakrif et Tabeldaout.
- A l'ouest, par le Djebel Tiffatisset et le plateau de Zenata.
- Au nord par le Djebel Toutlait.

D'une longueur de 48.49 Km, oued Sikkak présente des variations de pentes assez importantes. D'une pente assez faible sur le plateau de Terny (de l'ordre de 0,57%), elle devient plus forte entre Ain Meharas et Dif El Meffaleg (de l'ordre de 10%). Elle s'adoucit un peu (de l'ordre de 5%) entre Ain Safra et oued Sebaoun pour faiblir (de l'ordre de 0.71%) en rentrant en confluence avec oued Isser [22].

Le bassin versant de l'oued Sikkak, se situe sur les cartes topographiques au 1/50000 de Tlemcen, de Terny et de Bensekrane .

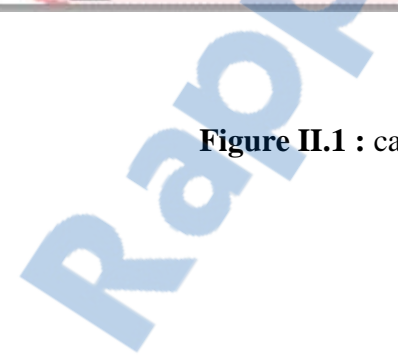


Figure II.1 : ca

II.2.2. Caractéristiques de forme

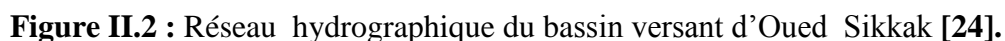
Le bassin d'Oued Sikkak présente une forme assez ramassée et moyennement compact. Ce qui favorise à priori, le temps de concentration des eaux de ruissellement. La valeur de l'indice de compacité de Gravelius est $K_c = 1.5$ (**Tableau II.1**).

Tableau II.1 : Caractéristiques de forme hydrologiques d'Oued Sikkak [19].

Bassins	Superficie (Km ²)	Périmètre (Km)	Kc	Rectangle équivalent	
				Longueur (Km)	Largeur (Km)
Oued Sikkak	463	116	1.50	48.49	9.55

II.2.3 Réseau hydrographique

Les affluents les plus importants d'Oued Sikkak sont les oueds Tasseddarine Bou Rhourara, Sennoun et Chaâbat el Hora, El Ihoudi, Ain beida, tishert, Melah, Houad ben Rahou **Figure II.2**.



II.2.3.1 Densité de drainage :

$$Dd = \sum L / A$$

A : aire du bassin en (Km²).

La valeur de densité de drainage obtenue est de 1.51 (Km/Km²). Ce résultat indique que notre bassin est assez bien drainé. Ainsi que la pente assez forte. Aussi le régime climatique, caractérisé par ses pluies irrégulières et violentes. Auxquelles s'ajoute la faible abondance des précipitations, une évapotranspiration élevée et d'autre part, de la perméabilité non négligeable des formations lithologiques [19].

II.2.3.2 Rapport de confluence

Il est définit par :

$$Rc = Nn / N (n+1)$$

Où :

Rc : Rapport de confluence.

Nn : Nombre de cours d'eau d'ordre n

II.2.3. 3 Rapport de longueur

Le rapport de longueur (RL) est défini par l'équation suivante :

$$RL = L_{(N+1)} / L_N$$

Où :

LN : Longueur de cours d'eau d'ordre N.

Tableau II.2 : Paramètres morphométriques des principales unités hydrologiques de Sikkak [19]

Bassin	Dd	Rc	RI
Oued Sikkak	1.51	3.76	2.63

II.2.4 Etude du relief

Le relief est un facteur essentiel, il détermine en grande partie l'aptitude au ruissellement, l'infiltration et l'évaporation. C'est un élément capital dans le comportement hydrologique d'un bassin. Partant de la répartition par tranches d'altitudes du bassin, on présente la courbe hypsométrique et le diagramme de fréquence altimétrique.

II.2.4.1. Courbe hypsométrique

La forme de la courbe hypsométrique **Figure II.3** présente l'état d'équilibre vieillissant du bassin, offrant un potentiel érosif moyen à faible, **Tableau II.3**.

Tableau II.3 : Répartition hypsométrique du bassin versant d'oued Sikkak [19]

Tranches D'altitude	Ai (Km ²)	Ai cumulées (Km ²)	Ai %	% Ai cumulées	% altitudes Cumulées
1500-1400	7.675	7.675	1.66	1.66	100
1400- 1300	11.750	19.425	2.54	4.2	92.62
1300- 1200	20.95	40.375	4.52	8.72	85.24
1200- 1100	63.25	103.625	7.675	7.675	1.66
1100- 1000	10.75	114.375	2.32	24.7	70.48
1000- 900	12.65	127.025	2.73	27.43	63.10
900- 800	20.975	148	4.53	31.96	55.72
800- 700	28	176	6.15	38.01	48.34
700- 600	45.150	221.15	9.75	47.76	40.96
600- 500	58.975	280.125	12.74	60.5	33.58
500- 400	67.025	347.15	14.48	74.98	26.20
400- 300	72.075	419.225	15.57	90.55	18.82
300- 200	38.075	457.3	8.22	98.77	11.44
200- 145	5.7	463	1.23	100	4.06

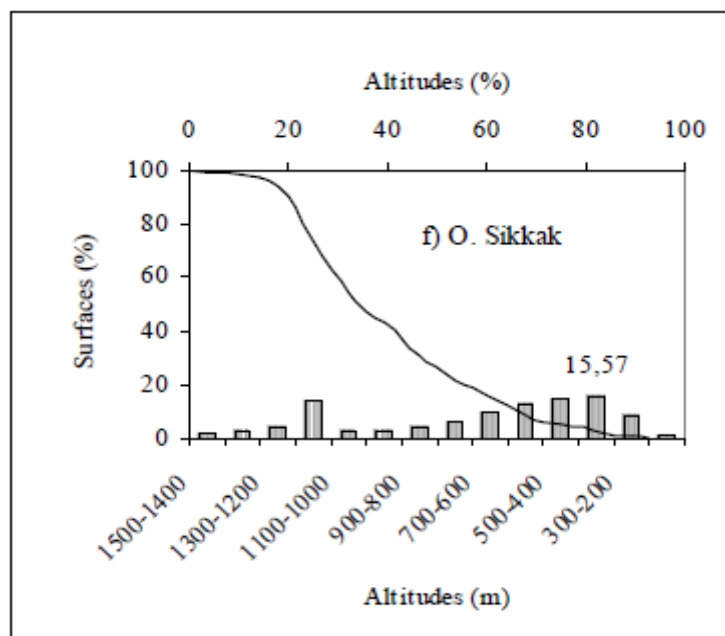


Figure II.3 : Courbe Hypsométrique et histogramme de fréquences altimétriques de sous Bassin de Sikkak [19].

II.2.4.2 Altitudes caractéristiques du bassin d'Oued Sikkak

Tableau II.4: Altitudes caractéristiques du bassin d'Oued Sikkak.

Bassin	Altitude la plus fréquente (m)	Altitude de fréquence $1/2$ (m)
Oued Sikkak	400-300	575

II.2.4.3 Indice de pente et relief

A / Indices de pente

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

$$I_g = D / L$$

Où :

I_g : indice globale de roche.

D : dénivelée (m)

Sur la courbe hypsométrique déjà tracée, on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5% de la surface du bassin. La dénivelée D est donc égale à $H_5 - H_{95}$.

L'indice de pente I_p également défini par Roche à partir du rectangle équivalent est égale à :

$$I_p = 1/L \cdot \sum x_i \cdot \beta_i \cdot [a_i - a_{i-1}]$$

β_i : fraction de la surface totale du bassin comprise entre les côtes a_i et a_{i-1} ; fonction donnée par le tableau hypsométrique.

x_i : Distance séparant deux courbes de niveau sur le rectangle équivalent.

L : Longueur du rectangle équivalent.

B/ La dénivelée spécifique

$$D_s = I_g \cdot A^{1/2}$$

I_g : Indice de pente global (m/Km).

A : aire du bassin (km²).

Elle s'exprime en mètres et est indépendante, en théorie, de l'aire du bassin. On peut distinguer différentes classes de relief en fonction de D_s :

Tableau II.5: Classification du relief selon D_s [19].

$D_s < 10$ m	Relief très faible
$10 \text{ m} < D_s < 25$ m	Relief faible
$25 \text{ m} < D_s < 50$ m	Relief assez faible
$50 \text{ m} < D_s < 100$ m	Relief modéré
$100 \text{ m} < D_s < 250$ m	Relief assez fort
$250 \text{ m} < D_s < 500$ m	Relief fort
$D_s > 500$ m	Relief très fort

Tableau II.6: Indices de pente et Ds

Sous bassin	Ip	Ig	Relief selon « Ig »	Ds	Relief selon « Ds »
Oued Sikkak	1.52	0.021	Assez fort	451.9	Fort

Au regard de la

classification de l'ORSTOM (Tableau II.7), selon l'indice Ig le relief est classé assez fort, alors que selon l'indice Ds le relief est fort [19].

Tableau II.7: Classification du relief selon Ig par l'ORSTOM, [19]

Relief très faible	$Ig < 0.002 \text{ m /km}$
Relief faible	$0.002 < Ig < 0.005$
Relief assez faible	$0.005 < Ig < 0.01$
Relief modéré	$0.01 < Ig < 0.02$
Relief assez fort	$0.02 < Ig < 0.05$
Relief fort	$0.05 < Ig < 0.5$
Relief très fort	$0.5 \text{ m /Km} < Ig$

C / Coefficient de torrentialité

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

$$CT = Dd \cdot Fl$$

Avec :

Dd : densité de drainage.

F1: fréquence des thalwegs élémentaires.

$$Fl = N1 / A$$

Avec :

N1 : nombre de cours d'eau d'ordre 1.

A : aire du bassin (km²).

D/Temps de concentration

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

$$Tc = 4(A + 1.5L)^{0.5} / 0.8 (Hmoy - Hmin)^{0.5}$$

Où :

Tc : temps de concentration (heures).

A : superficie du bassin (Km²).

L : longueur du thalweg principal (Km).

Hmoy : altitude moyenne (m).

Hmin : altitude minimale (m).

Tableau II.8: Valeurs des coefficients de torrentialité et les temps de concentrations

Des eaux des sous – bassins.

Bassin	Coefficient de torrentialité CT	Temps de concentration TC
Oued Sikkak	1.9	09 h30 mn

La faible valeur du coefficient de torrentialité du **tableau II.8** est liée à la forte perméabilité des formations lithologiques.

II.2.5 Sols et végétation

La végétation est un facteur déterminant de la rapidité du ruissellement superficiel, du taux d'évaporation et de la capacité de rétention du bassin. Donc la présence de végétation va jouer le rôle de « Régulateur » dans le régime d'écoulement.

L'occupation végétale a une influence directe sur l'écoulement fluvial aussi bien que facteurs orographiques et climatiques. La résistance à l'écoulement est d'autant plus grande que le couvert végétal est plus dense. Le paysage végétal du bassin de oued Sikkak a été largement dégradé et défriché en montagne par les incendies et par une petite agriculture extensive et un surpâturage endémique. Ce qui a entraîné une perte d'eau par évaporation et une accélération de l'érosion.

Les massifs jurassiques rocheux, calcaires et dolomitiques admettent une maigre couverture forestière. Les broussailles occupent une petite surface dans notre bassin, concentrées dans la région de la commune de AÏN Fezza et au djbel AÏN El Hout.

Une plantation d'oliviers couvre une partie de la plaine qui s'étend de Tlemcen à Hennaya, de Saf Saf à Mensourah. A son abri s'étagent gradins des jardins irrigués qui produisent des légumes et des fruits à côté de l'oued de Sikkak.

La carte d'occupation du sol du bassin versant de l'oued de Sikkak (**figure II.4**) présente les limites des différentes communes avec la diversité de cultures et d'occupation du sol, elle montre que

les cultures extensives occupent plus de la moitié de l'espace de bassin versant, suivie par l'arboriculture qui occupe 12% de la superficie totale, **tableau II.9 [19]**.

Tableau II.9: Distribution du couvert végétal dans le bassin d'oued Sikkak.

Occupation des sols	Superficie en Km ²	% des surfaces
Cultures extensives	149.625	68.63
Couvert forestier dégradé	12	5.5
Couvert forestier normale	9.965	4.57
Arboriculture	26.61	12.74
Prairies et terrains de pacage	19.8	8.56

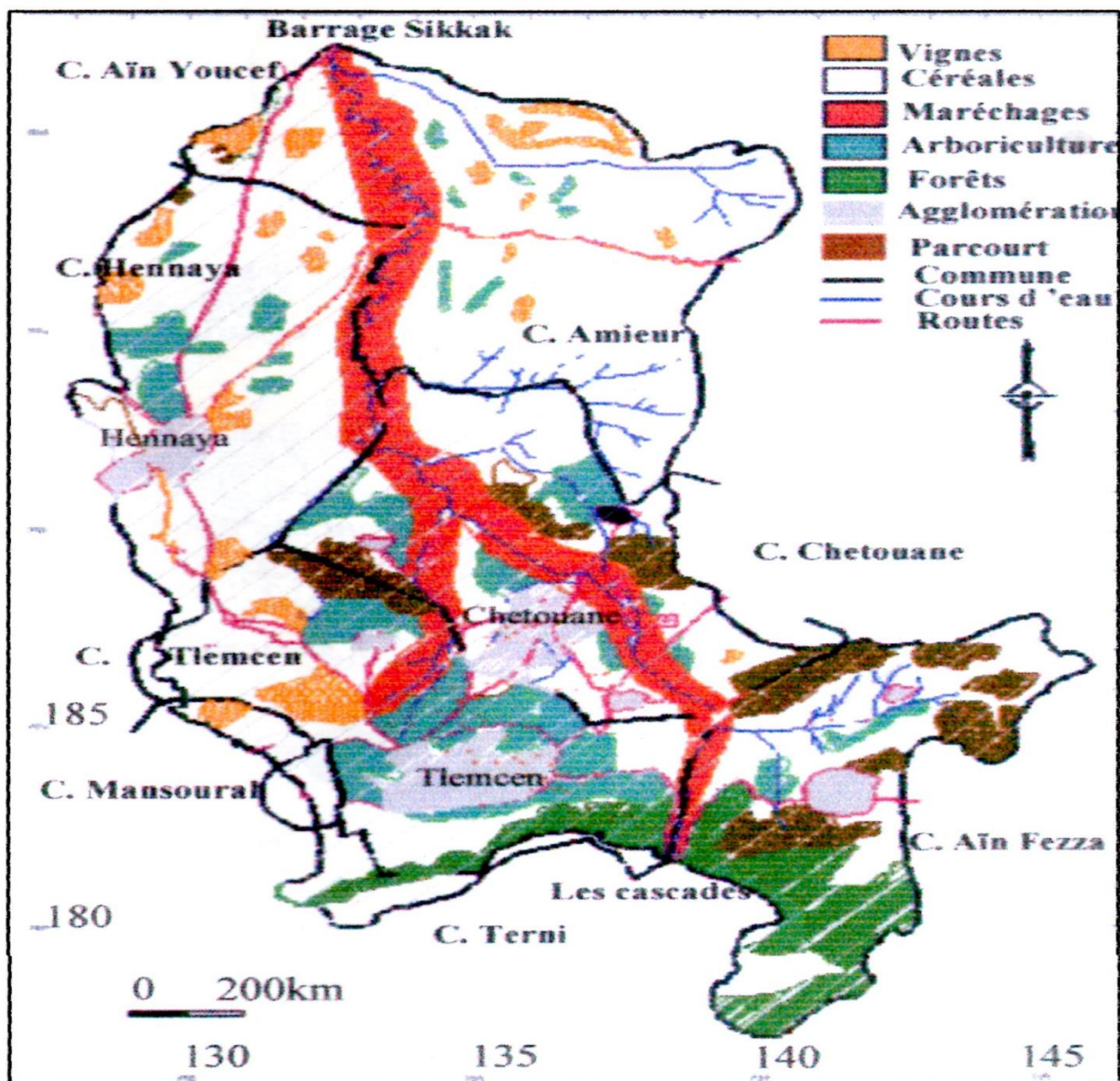


Figure II.4: Occupation du sol de oued de sikkak [19]

II.3. Caractéristiques géologiques

La lithologie joue un rôle important sur le ruissellement, l'infiltration, l'érosion et le transport solide. Les matériaux géologiques se distinguent en formations meubles (sables, argiles, marnes) ou en formations consolidées (grès, calcaires, dolomies,.....).

Dans ce titre, nous allons présenter brièvement les caractères généraux sur la géologie de bassin versant de oued Sikkak.

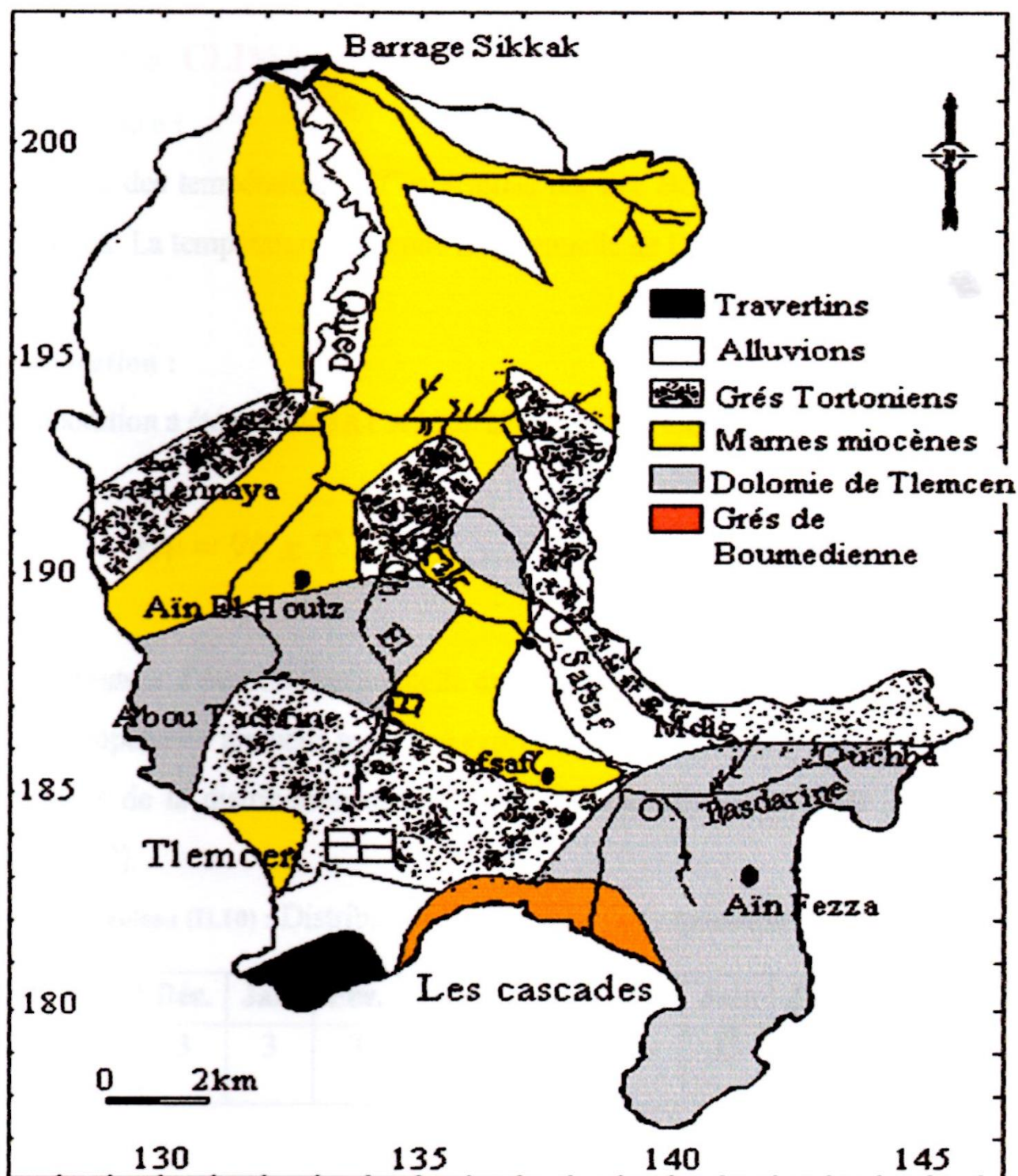


Figure II.5: lithologique du bassin versant de oued Sikkak [19]

La répartition des différentes formations par groupes lithologiques en % des bassins étudiés est donnée dans le **(tableau II.10)** [19].

Tableau II.10: Répartition spatiale des différentes formations lithologiques en % de bassin
Versant de Sikkak [19].

	Schistes et Quartzites	Granites et roches volcaniques	Marnes et argiles	Calcaires et dolomies	Grés	alluvions
Bassin	Terrains imperméables			Terrains perméables		
Sikkak	0%	0%	33%	25%	27%	15%

II.4. Facteurs climatiques

II.4.1. Température

Le régime des températures est caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers relativement doux. La température moyenne interannuelle de l'air varie de 14.7 et 17.9 (°C) dans la période (1970-1990) [23].

II.4.2. Vents

Selon les données de la station de Tlemcen enregistrées entre 1975 et 1980, les vents prédominants dans le bassin versant sont ceux du secteur Nord avec une force faible à modérée de 1 à 10 m/s [23].

II.5. la pluviométrie de la région d'étude

A partir d'une recherche bibliographique, on présente la moyenne annuelle spatiale de la pluviométrie établies par différents auteurs (**Tableau II.11**)

Tableau II.11: Pluviométrie dans le bassin versant de la Tafna et choix des précipitations dans le bassin versant de l'oued Sikkak [25].

Station	Altitude (m)	Body (1995) mm	Carte de Chaumont Mm	Thyssen mm	Romantchouk (1973) mm	Tochnoexportstroy (1979) mm
Hafir	1270	739	739		730	731
Remchi	224	441	441	438	434	452
Meffrouch	1100	846	842		730	709
Bensekrane	247	493	516	476	510	
Lalla Setti	1007	690	688			
Tlemcen	810	688	-	692	636	691
Sidi Abdelli	504	525				
Ain – Youcef	290	445			636	734
Terny	1100				477	
Ouzidane	555				476	

Pierre du Chat	60					
BV Sikkak	740	642	644	645	580	645

La localisation par rapport au bassin versant de l'oued de Sikkak, des stations pluviométriques considérées est montrée à la **figure II.6**. Cette carte montre également la localisation des stations hydrométriques et pluviométriques.

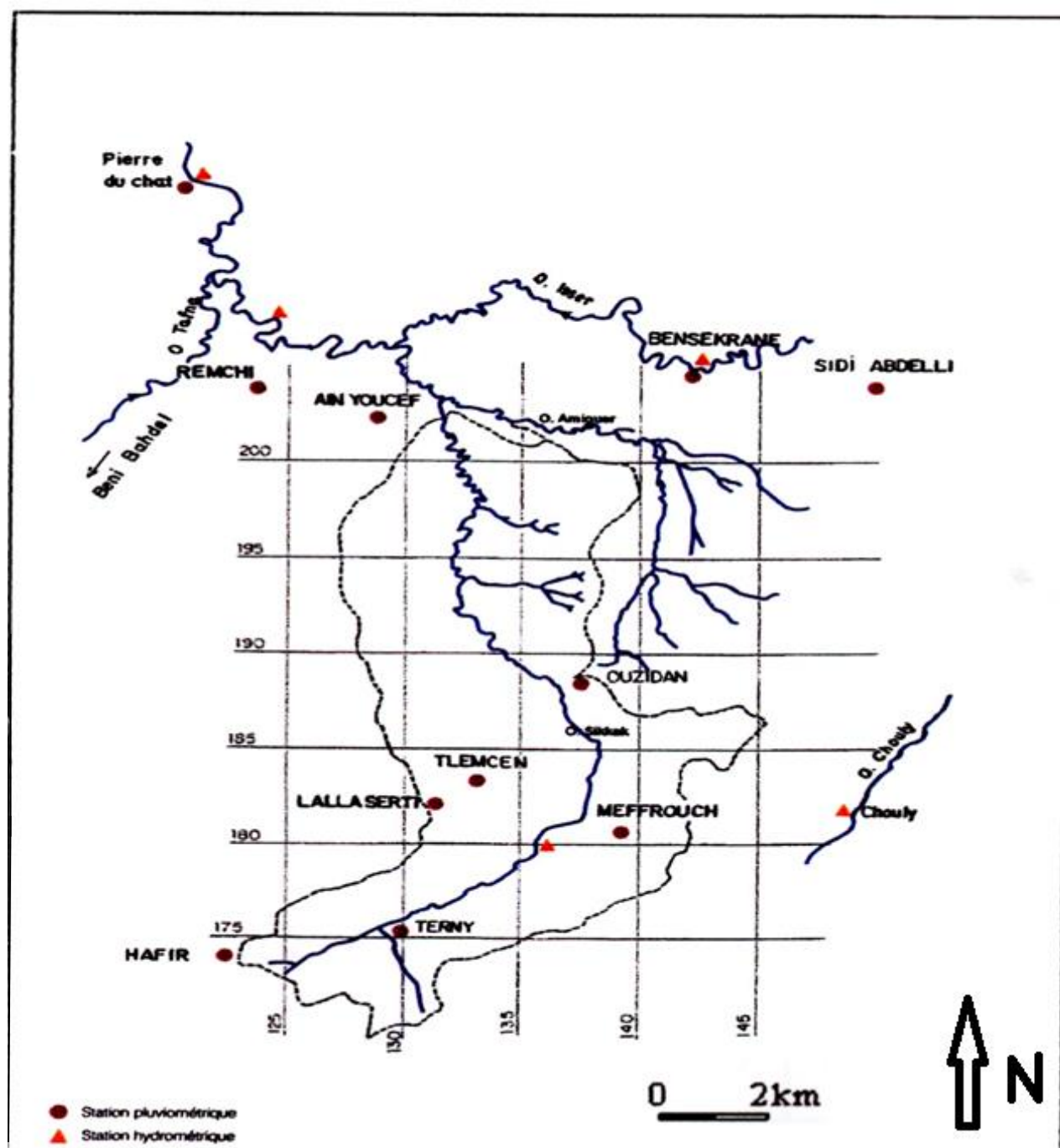


Figure II.6: localisation des stations pluviométriques du bassin versant de l'oued Sikkak [25].

Les indications du tableau (II.11) pour lesquelles il a été donné la priorité aux valeurs de Body, ont permis de tracer des courbes isoyètes montré sur la **Figure II.7**. sur cette même carte sont reportées les isoyètes tirées de la carte Chaumont [25].

Les résultats d'exploitation de ces deux réseaux d'isoyètes pour le bassin versant de l'oued Sikkak a été reportée sur la dernière ligne du **tableau II.11**. Au vu des résultats mentionnés dans le **tableau II.11**, la pluviométrie annuelle représentative du bassin versant de l'oued Sikkak est de l'ordre de 640 mm.

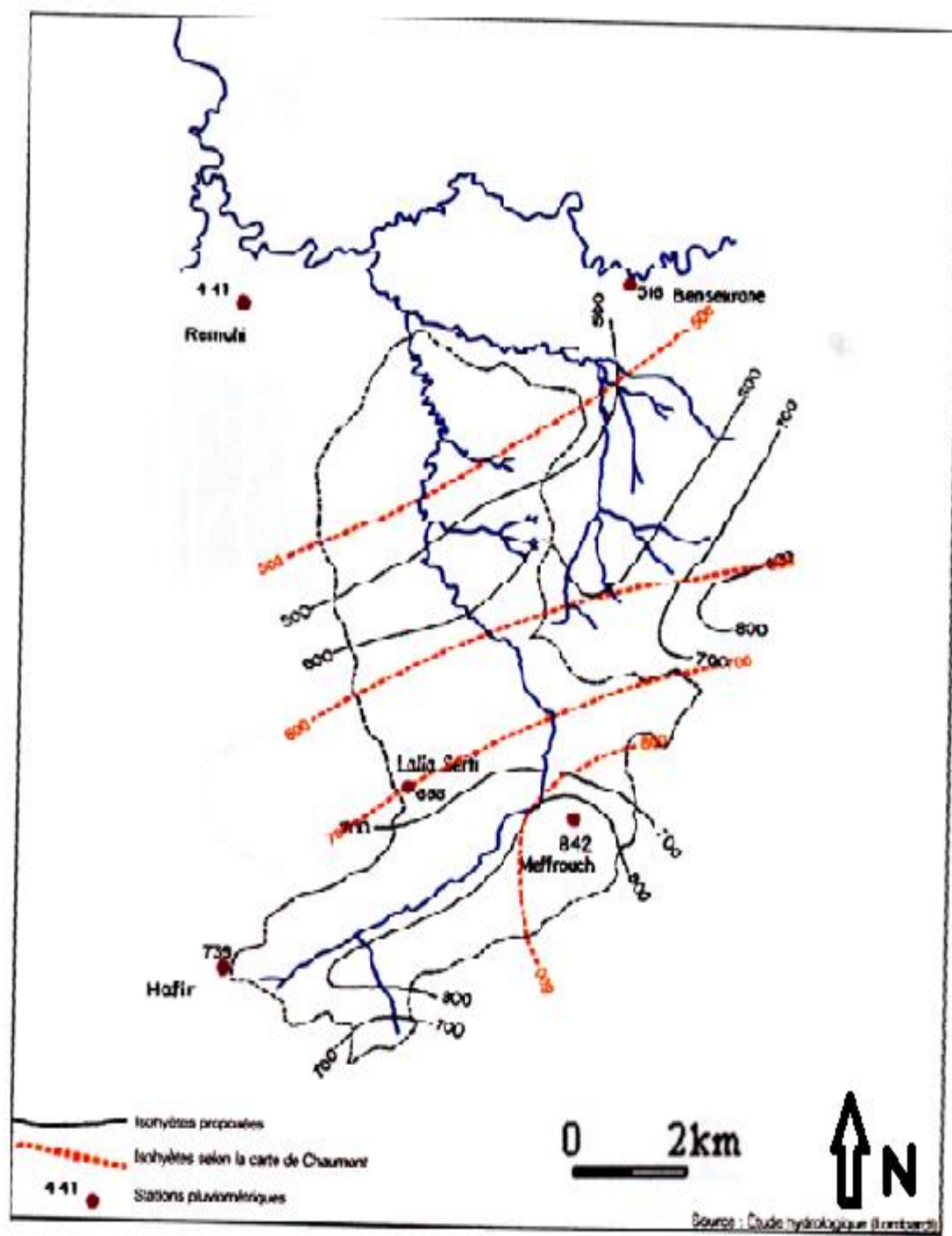


Figure II.7: Tracé du réseau des courbes isoyètes [25].

III.1. Les précipitations

La mesure des précipitations est l'une des plus complexes en météorologie car on observe une forte variation spatiale selon le déplacement de la perturbation, le lieu de l'averse, la topographie et les obstacles géographiques locaux gênant sa captation.

Les précipitations ou lame d'eau précipitée sont exprimées en hauteur (mm ou cm) par unité de surface horizontale. Si on rapporte cette hauteur d'eau à l'unité de temps, il s'agit d'une intensité (mm/h).

L'enregistrement des pluies se fait au moyen de divers appareils de mesure. Les plus classiques sont les pluviomètres et les pluviographes, à enregistrement mécano-graphique ou digital qui donnent une mesure ponctuelle [26].

III.1.1. Les pluviomètres

Le pluviomètre indique la pluie globale précipitée durant l'intervalle de temps séparant deux relevés. Généralement le relevé s'effectue une fois par jour. La hauteur de pluie lue le jour j est attribué au jour $j-1$ et constitue sa "pluie journalière" ou "pluie en 24 heures". Si la station pluviométrique est éloignée ou difficile d'accès, il est recommandé de recourir au pluviomètre totalisateur. Cet appareil reçoit les précipitations sur une longue période et la lecture se fait par mesure de la hauteur d'eau recueillie ou par pesée. En cas de neige ou de grêle on procède à une fusion avant mesure [26].



Figure III.1 : Pluviomètre de Hellmann [26].

Un pluviomètre se compose d'une bague à arête chanfreinée, l'orifice qui surmonte un entonnoir conduisant au récepteur (seau). Pour uniformiser les méthodes et minimiser les erreurs, chaque pays ou office chargé de mesure, fixe les dimensions des appareils et les conditions d'installation.

La quantité d'eau recueillie est mesurée à l'aide d'une éprouvette graduée. Le choix du site où placer le pluviomètre est très important. Les normes standards sont basées sur le principe qu'un site est représentatif et caractérisé par l'absence d'obstacles à proximité.

III.1.2. Les pluviographes

Le pluviographe se distingue par un récipient collecteur, où l'eau recueillie passe d'abord dans un dispositif particulier (réservoir à flotteur, augets, etc) qui permet l'enregistrement automatique de la hauteur instantanée de précipitation. Dans ce cas, l'enregistrement est permanent et continu. Il permet de déterminer non seulement la hauteur des précipitations, mais aussi l'intensité et la leur répartition dans le temps.. Les pluviographes fournissent des diagrammes de hauteurs de précipitations cumulées en fonction du temps. Deux types de pluviographes sont très utilisés de par le monde.

III.1.2.1. Le pluviographe à siphon

L'accumulation de la pluie dans un réservoir cylindrique est enregistrée par l'élévation d'un flotteur. Lorsque le cylindre est plein, un siphon s'amorce et le vide rapidement. Les mouvements du flotteur sont enregistrés par un tambour rotatif à vitesse constante, entouré d'un papier, et déterminent le tracé du pluviogramme.

III.1.2.2. Le pluviographe à augets basculeurs

Cet appareil comporte, en dessous de son entonnoir de collecte de l'eau, se trouve deux compartiments peuvent recevoir l'eau et une pièce pivotant (augets basculeurs). Quand un poids d'eau déterminé (correspondant en général à 0,1 ou 0,2 mm de pluie) s'est accumulé dans un des compartiments, la bascule change de position : le premier auget se vide et le deuxième commence à se remplir (Fig. III.2). Les basculements sont comptés soit mécaniquement avec enregistrement sur papier enroulé autour d'un tambour rotatif, soit électriquement par comptage d'impulsions. Ce qui permet l'acquisition d'événements en temps réel [26].

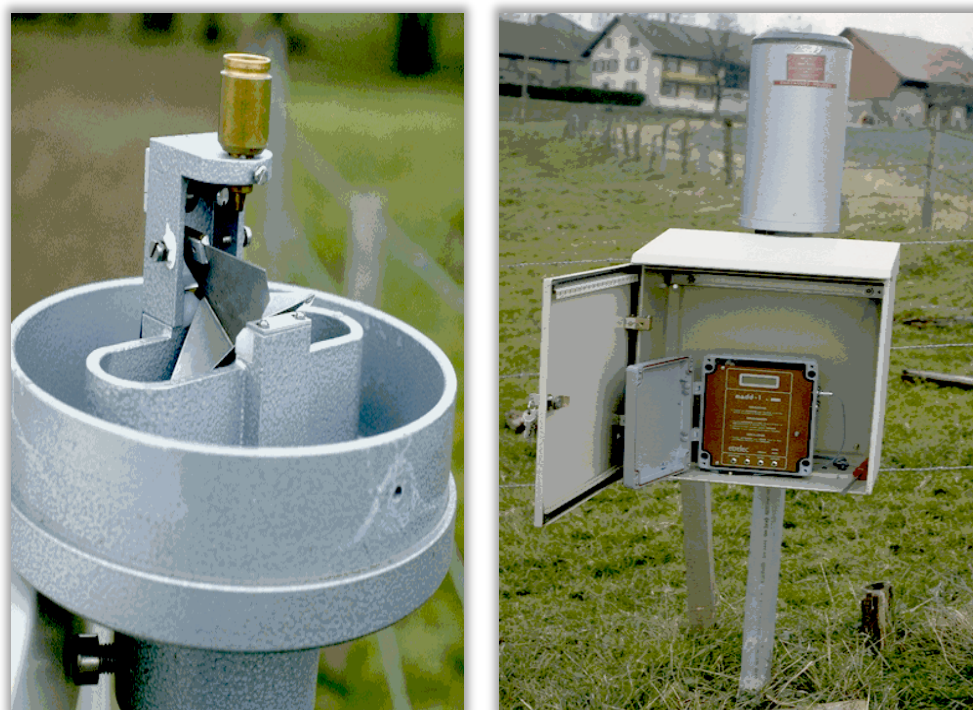


Figure.III.2 : Pluviographe, augets basculeurs et système d'enregistrement MADD [26].

III.2. Les stations de jaugeage

Une station de jaugeage est un site (ou éventuellement plusieurs mais proches) où on réalisera les différentes opérations nécessaires à l'acquisition des débits en fonction du temps. En particulier, ce site doit de préférence être tel que la relation hauteur-débit soit biunivoque et stable dans le temps.

III.2.1. La mesure des hauteurs d'eau ou la limnimétrie

La mesure des hauteurs d'eau (la limnimétrie) ou de la variation d'un plan d'eau s'effectue généralement de manière discontinue par la lecture d'une règle graduée (échelle limnimétrique) fixée sur un support. Pour connaître en continu les variations d'un plan d'eau, on utilise des limnigraphes qui fournissent sur un support un enregistrement continu des variations du niveau d'eau dans la rivière en fonction du temps (enregistrement graphique sur bande papier, enregistrement magnétique sur cassette, etc.).

III.2.1.1. Les échelles

Les échelles sont les repères fixes pour lire le niveau d'eau H . Les échelles sont réalisées le plus souvent en tôle émaillée, et portent des indications métriques décimétriques ou centimétriques.

L'installation des échelles se fait sur des supports fixes dans le lit, culée de point, quais, rives rocheuses, etc.

L'échelle doit être installée de façon à être protégée des corps flottants qui pourraient l'endommager lors des crues.

Il faut que le zéro de l'échelle soit toujours sous l'eau, même lors des étiages les plus sévères et après d'éventuels affouillements [27].

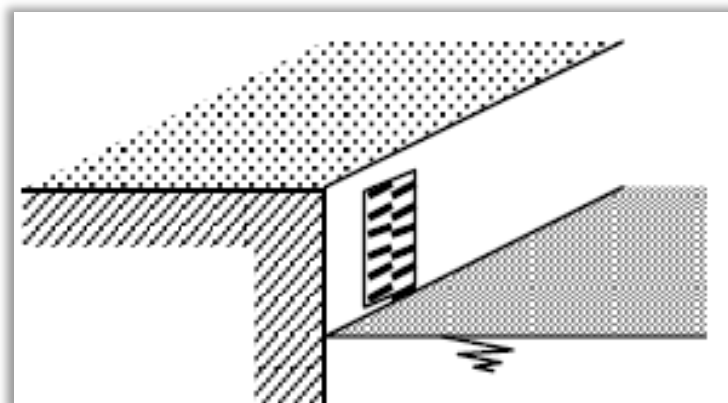


Figure III.3 : échelle verticale scellée contre un quai [27].

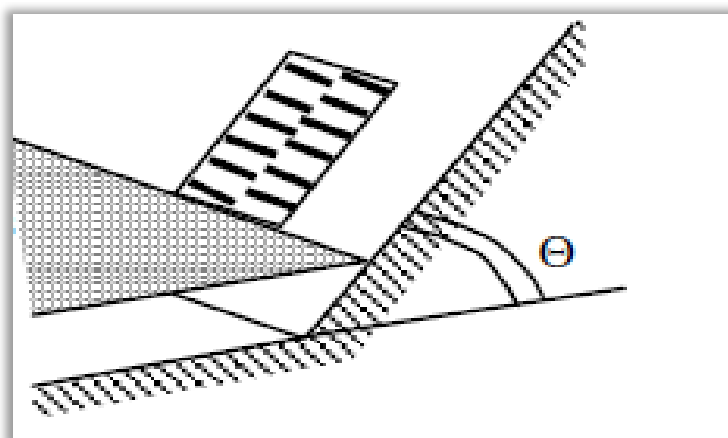


Figure III.4 : Echelle oblique fixée sur la berge
(les graduations sont corrigées de $\cos Q$) [27].

III.2.1.2. Limnigraphe à flotteur

Cet appareil enregistre le niveau d'eau en fonction du temps. Parmi tous les types de limnigraphes, ceux à flotteurs sont les plus utilisés. Leur principe commun est très simple. Le capteur est un flotteur équilibré en partie par un contre-poids dont les déplacements sont liés à ceux du flotteur par un câble et une poulie. Les mouvements verticaux du flotteur sont transformés en mouvements de rotation de l'axe de la poulie. Cet axe entraîne, par un système d'engrenage, le déplacement transversal d'un stylet le long d'une tige filetée.

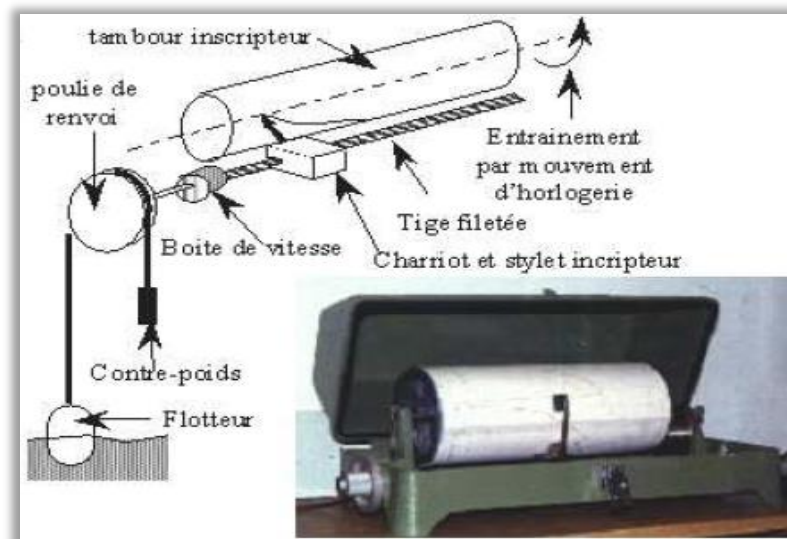


Figure III.5 : Photo d'un limnigraphe à flotteur [27].

Le stylet inscrit sur le papier d'un tambour ou d'une table déroulante dont le déplacement est proportionnel au temps.

Le système des limnigraphes dit "*à retournements*" : la tige filetée possède deux filetages l'un à pas à droite, l'autre à pas à gauche. Le chariot porte-stylet arrivant en bout de course repart en sens inverse ; il n'y a plus de limite à l'amplitude des mouvements du plan d'eau enregistrable. La figure ci-contre illustre un retournement en crue et un retournement en décrue. L'hydrogramme réel s'obtient par symétrie par rapport aux bords du papier [27].

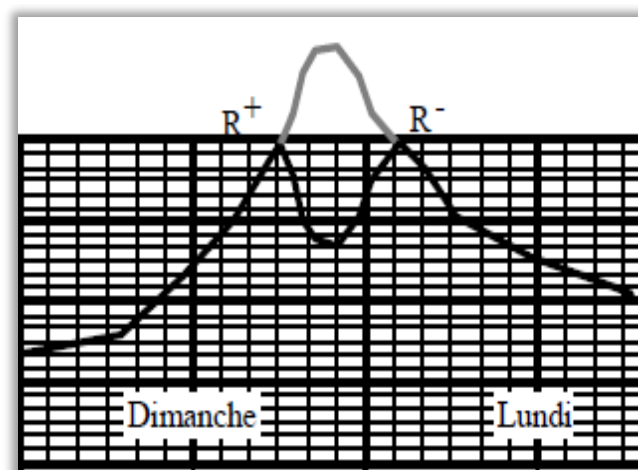


Figure III.6 : Un graphe obtenu à partir d'un limnigraphe à flotteur [27].

Ces appareils sont souvent réglables en vitesse de rotation. les rotations se font en un jour, une semaine, deux semaines ou un mois ; pour les tables déroulantes, l'autonomie peut être de plusieurs mois. Le mécanisme d'horlogerie peut être entraîné soit par un ressort, soit par des piles électriques. Dans le choix de l'échelle de réduction et de l'autonomie, il faut trouver un compromis entre une bonne sensibilité verticale (réduction faible), mais une amplitude suffisante (forte réduction) pour mesurer toutes les hauteurs et entre une bonne lisibilité des temps (rotation rapide) et une autonomie grande (rotation lente). Dans tous les cas, il est conseillé de ne pas laisser plus d'un mois les appareils sans visite car les sources de panne sont nombreuses.

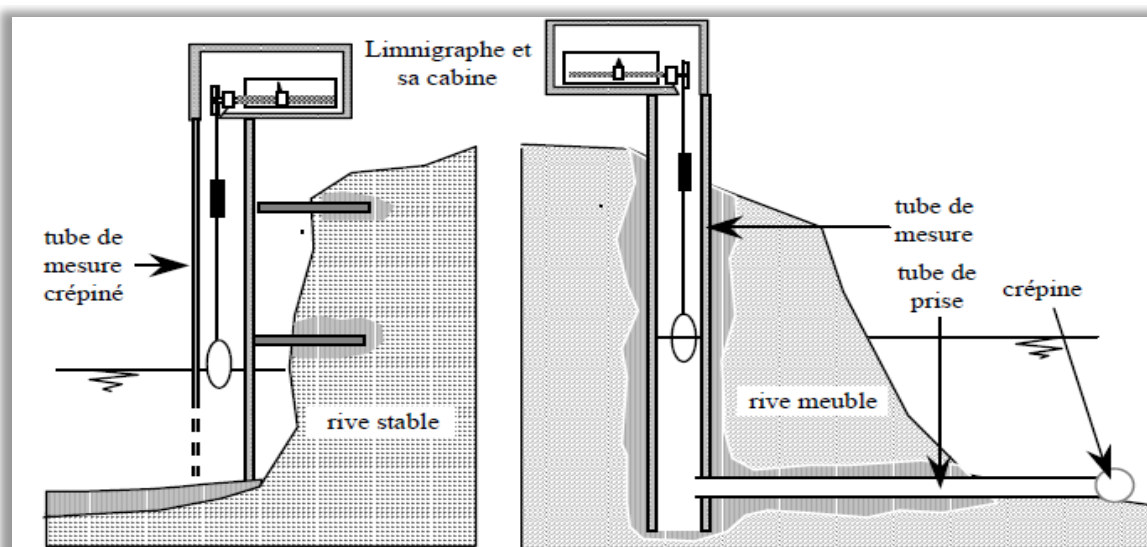


Figure III.7 : Un limnigraphe et sa cabine [27].

L'installation de ces appareils se fait à la verticale d'un puits de mesures dans lequel est situé le flotteur. Il est ainsi protégé du batillage et des corps flottants. Selon les cas et les circonstances, l'installation peut se faire soit en prise directe dans le cours d'eau, soit enterrée dans la rive avec un tube de prise.

III.2.1.3. Les limnigraphes dits à bulles

Le principe de ces appareils est d'une prise de pression au fond de la rivière. Une bouteille de gaz comprimé (azote ou air), munie d'un mano-détendeur qui alimente le circuit gaz à débit constant. Le régulateur de débit est couplé avec un visualisateur ; on peut ainsi régler le débit constant à un écoulement "bulle à bulle".

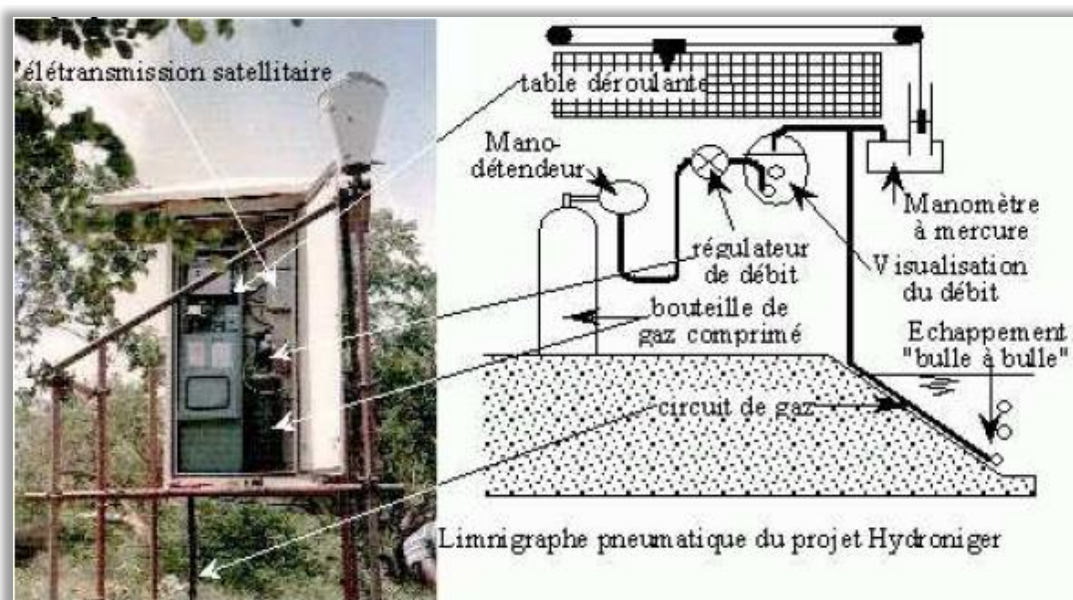


Figure III.8 : un limnigraphe à bulles [27].

Le circuit gaz se poursuit jusqu'au fond de la rivière à partir de laquelle s'échappent les bulles de gaz. Sur ce circuit de gaz est branchée une prise de pression reliée à un manomètre à mercure (ou à une capsule manométrique). Le déplacement d'un stylet inscripteur sur une table déroulante est asservi par différents systèmes à la mesure de pression. Or, cette pression est égale à la pression qui règne au fond de la rivière $H \rho g$ moins le poids de la colonne de gaz plus les pertes de charges dans le circuit gaz.

III.2.1.4. Sondes piézorésistives immergées (S.P.I.)

Depuis la fin des années 1980 sont apparues sur le marché de nouveau type de capteurs piézorésistifs. Les déformations que subit le capteur sont dues à la pression (pression atmosphérique + $\rho g H$) et à la température. Une chaîne de traitement électronique est associée au capteur et délivre sous forme digitale la hauteur d'eau (au cm) et sa température. Le capteur est lui-même dans de l'huile maintenu à la pression de l'eau par une membrane souple.

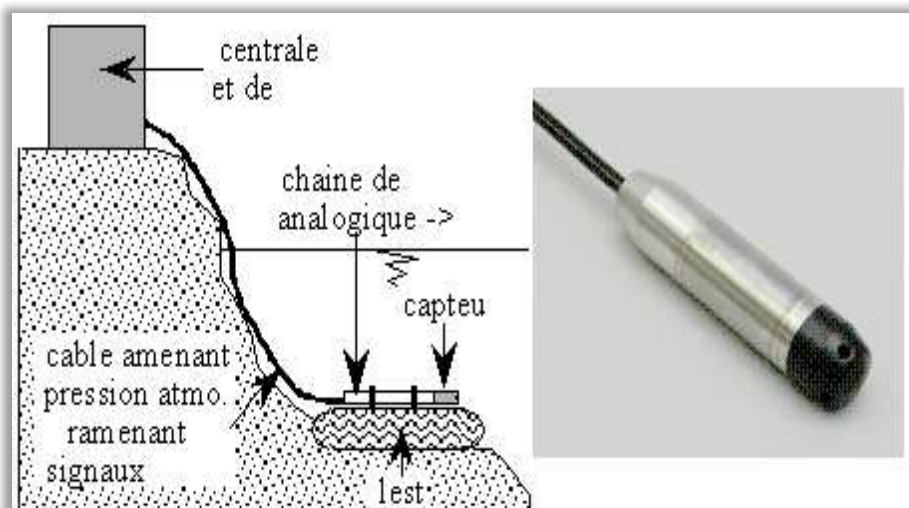


Figure III.9 : Sondes piézorésistives immergées (S.P.I.) [27].

Ce type d'appareil remplace progressivement les anciens limnigraphes à bulle ou à flotteur.

III.2.1.5. Limnigraphes à ultra-sons

Ce type d'appareil est constitué d'un émetteur récepteur d'ultrasons, fixé à la verticale du plan d'eau. Le temps de parcours aller retour entre l'appareil et le plan d'eau permet de déterminer la distance x et par déduction la hauteur d'eau H puisque l'on connaît la position nécessairement fixe de l'appareil [21].

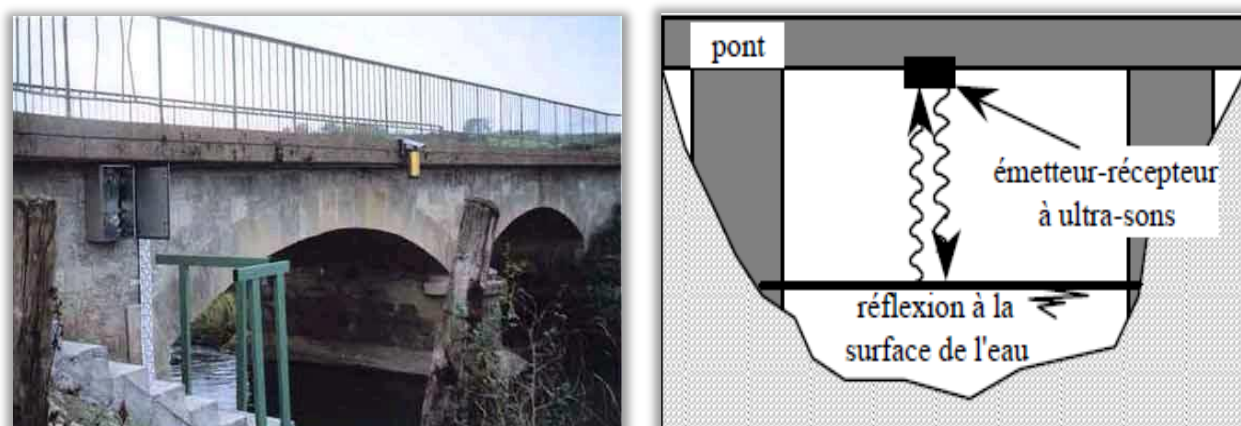


Figure III.10 : Limnigraphe à ultra-sons [27].

Ce type de limnigraphe nécessite la présence d'un pont stable ou la mise en place d'un portique.

III.2.2. La mesure les vitesses d'eau

III.2.2.1. Jaugeage au moulinet

Présente la mesure du débit par la méthode d'exploitation du champ des vitesses. La mesure de La profondeur de l'écoulement dans la section transversale s'effectue à l'aide d'une perche ou d'un câble de sondage. Les vitesses sont mesurées à l'aide d'un moulinet, en même temps que les profondeurs, en un ou plusieurs points sur la verticale. La mesure des largeurs, des profondeurs et des vitesses permet le calcul du débit partiel de chaque secteur de la section transversale. La somme de ces débits partiels fournit le débit total [27].

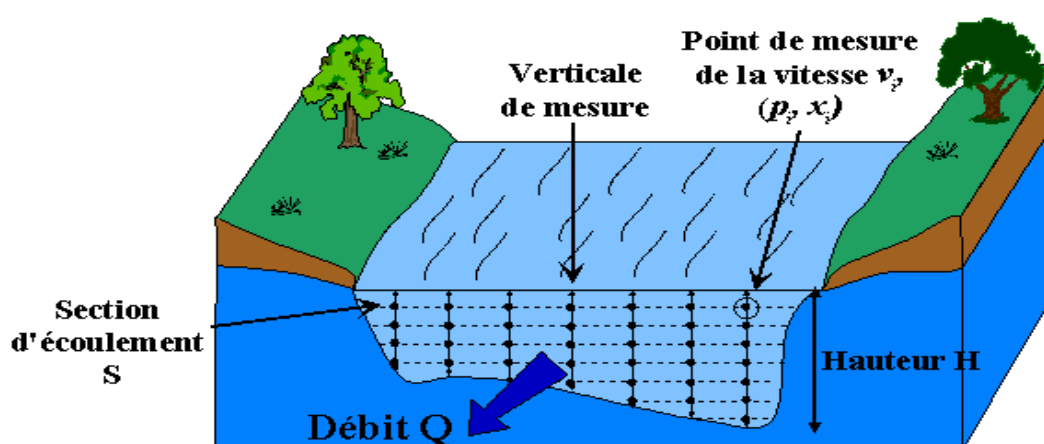


Figure III.11 : Débit et champ des vitesses à travers une section [12].

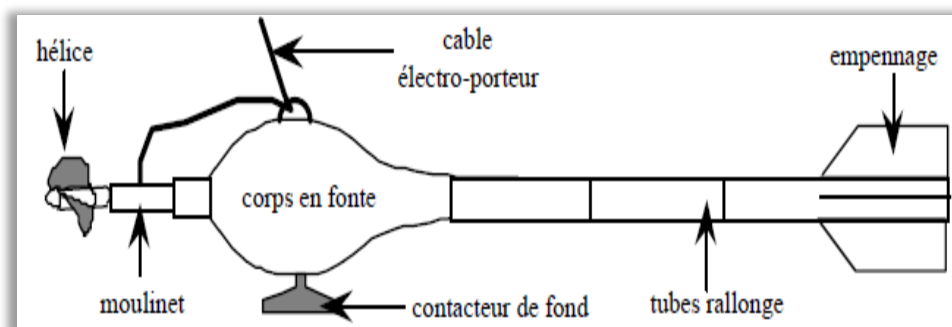


Figure III.12 : Le moulinet hydrométrique [27].

III.2.2.1.1 Adaptation du moulinet

Dans le cas du montage sur perche, le moulinet peut être manœuvré de deux manières :

Directement par l'opérateur placé dans l'écoulement (jaugage à gué), la perche reposant sur le fond du lit du cours d'eau. Cette méthode est utilisable dans des sections de profondeur inférieure à 1 mètre et avec des vitesses d'écoulement inférieures à 1 m/s.

III.3. Mesure de concentration

La mesure de la concentration des sédiments en suspension se fait par prise d'échantillon d'eau à l'aide d'un flacon de 500 ml au niveau d'un point du cours d'eau généralement au milieu et dans une zone de turbulence. L'échantillon prélevé sera analysé au niveau du laboratoire par la technique classique de dessiccation (filtrage, étuvage à 105°C pendant 30 minutes puis pesage), d'où on déduira la masse correspondante au volume prélevé qui sera ramenée à un litre d'eau pour donner la concentration en g/l. Il est à signaler que cette technique de mesure est caractérisée par son aspect approché qui réside dans la variation de la concentration des sédiments en suspension d'un point à un autre de la section de mesure et la difficulté d'obtenir une valeur représentative de la concentration des sédiments en suspension.

III.4. Calcul du débit solide en suspension

En considérant la section S d'un cours d'eau de largeur L , chaque verticale V peut être définie par son abscisse l (distance à l'une des 2 rives), et sa profondeur totale P . Si en un point d'une verticale V , situé à la profondeur p , sont mesurées à la fois la vitesse du courant v et la concentration C de matériaux en suspension, le débit solide sur la surface dS de la section S s'écrit :

$$q_s = c * v * ds$$

Le débit solide total sur l'ensemble de la section S s'obtient par intégration :

$$Q_s = \int \int_S q_s = \int \int_S c \times v \times ds = \int \int_S c \times v \times dl dp$$

Avec : Q_s : débit solide du cours d'eau [kg/s] ;

La concentration moyenne dans la section est définie par le rapport :

$$C_m = Q_s / Q_L$$

étant le débit liquide total sur la section S

$$Q_L = \int \int_S v \times ds$$

Cette méthode pour mesurer la quantité de sédiments transportée par un cours d'eau est évidemment très coûteuse. Les mesures sont donc généralement simplifiées. Elles sont surtout utiles pour valider les protocoles d'échantillonnages des réseaux de surveillance du transport en suspension [26].

III.5. Conclusion

La mesure hydrométrique est très importante en hydrologie, ce qui nécessite des visites de contrôle instantanées aux stations de jaugeage, il est difficile de mesurer les débits et les hauteurs d'eau en continu, tous ça pour contrôler la situation des cours d'eau et les rivières.

IV.1. Introduction

La station hydrométrique de Sikkak nous donne une série d'informations sur la mesure des débits et la concentration. Dans ce chapitre on présente les étapes de calcul des apports liquides et solides ainsi que les précipitations à différentes échelles temporelles.

IV.2. Mesure hydrométrique de oued Sikkak

Les coordonnées cartésiennes de la station de jaugeage et la longueur des séries de mesure sont données dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 : Coordonnées cartésiennes de la station de Ain Youcef

Station	Code	X	Y	Z	Période
Ain Youcef	16-07-04	151.70	201.70	200	1972-1999

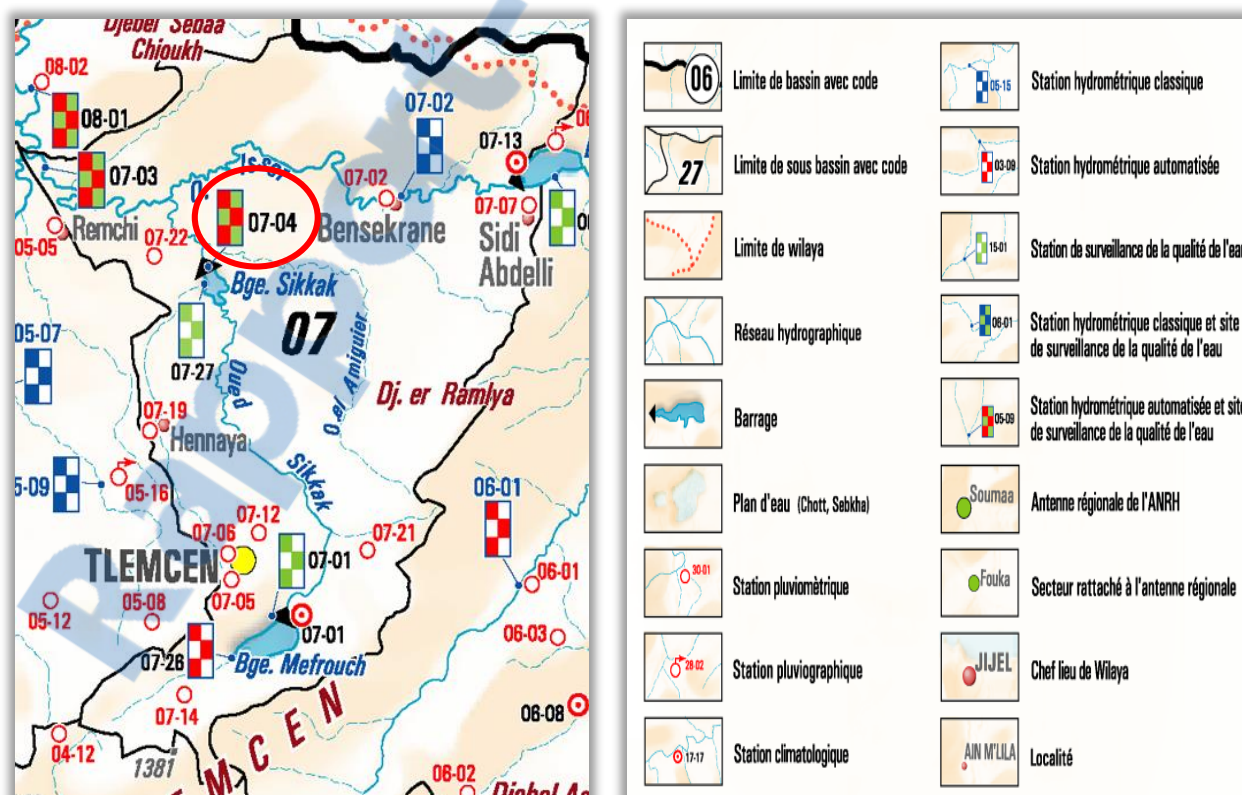


Figure IV.1 : Informations générales sur la région du bassin de l'oued de Sikkak [28].

IV.2.1.Outils et protocole de mesures

Les techniques utilisées par l'ANRH d'Oran, relatives aux jaugeages, au traitement et à l'édition des données de débits liquides et solides au niveau de la station hydrométrique sont :

d) Les débits liquides

Au niveau de la station les jaugeages sont effectués à l'aide d'un moulinet hydrométrique étalonné. Le dépouillement des jaugeages est réalisé au bureau pour l'obtention des débits liquides.

e) La concentration

A chaque mesure effectuée, a été évaluée la charge de la matière en suspension obtenue à partir d'échantillons d'eau prélevés sur les rives de l'oued au moyen d'un conteneur de 50cl. La boue recueillie sur un papier filtre est pesée après séchage à l'étuve à 105°C pendant 24 heures. On détermine ensuite la charge correspondante à un litre d'eau prélevé, ce qui établit la concentration, donnée en g/l.

f) Les débits solides

Les prélèvements se font soit sur le bord, soit au milieu, au moyen de bouteilles d'échantillonnage. Il s'agit généralement de bouteilles en matière plastique d'une contenance de 500cl.

Théoriquement l'échelonnement des prélèvements lors d'une crue se fait selon des intervalles de temps variables en fonction du régime de l'oued étudié. Le traitement initial des échantillons se fait au laboratoire local.

S'agissant de la fréquence des prélèvements, les consignes suivantes sont données :

- ❖ Un prélèvement est effectué durant la montée des eaux. Si cette montée est lente (supérieure à une heure), on prélève un échantillon d'eau toutes les heures.
- ❖ Un prélèvement doit être obligatoirement effectué au maximum de la crue, cette tâche étant la plus difficile à réaliser compte tenu de la grande vitesse des eaux ne permettant pas de maintenir le moulinet dans une position verticale pour la mesure.

Ainsi, on cite le cas de cassure et de perte de moulinets.

- ❖ En décrue, et suivant la vitesse, on prélève un échantillon toutes les heures durant les six premières heures et toutes les deux heures ensuite.
- ❖ L'évaluation des apports solides journaliers, mensuels et annuels est effectuée de la même façon que pour les apports liquides sur le tas d'un dépouillement des enregistrements limnigraphiques suivant un pas de temps de demi – heure, d'une heure ou de deux heures.

IV.2.2.Données fournies

Les données hydrométriques qui concernent le bassin étudié ont été fournies par l'Agence Nationale des Ressources en Hydrauliques (ANRH) d'ORAN.

Les données recueillies au niveau de la station hydrométrique de Ain Youcef contrôlant le sous bassin versant d'oued Sikkak, sont fournies par l'A.N.R.H.

Les données d'observations sont fournies dans un fichier sous format Excel contenant : La date, l'heure, la hauteur d'eau, le débit liquide et la concentration.

- ✚ Le tableau de données comprend 3835 enregistrements instantanés de débits liquides et concentrations des sédiments en suspension. Ces données représentent une période de 28 ans hydrologiques 1972-1999. Ces données ont été fournies grâce à des jaugeages plus ou moins réguliers pendant les crues, à la lecture des échelles et au dépouillement des limnigraphes.

- ✚ Les données des précipitations journalières en mm couvrent la période 1970-2000.

IV.3. Etude des Précipitations

Par une droite de regression simple on étudie la tendance des précipitations mensuelles la pente de la droite de tendance $ax+b$ est analysé, un coefficient $a>0$ indique un excédent en apport pluviométrique, quand $a<0$ il y'a un déficit.

Dans une deuxième étape, On ajuste les séries pluviométriques annuelles, mensuelles et P_{jmax} (précipitation journalière maximale annuelle) aux lois de probabilités : la loi normale, la loi lognormale et la loi de gumbel.

Pour les précipitations annuelles et le débit annuel on applique la loi normale et lognormale, pour les P_j max le débit max annuel même la concentration on utilise la loi lognormale et la loi de gumbel.

La validation des ajustements est faite par le test de **Kolmogorov-Smirnov** aux seuils de confiance de 95%.

IV.4. Ajustement aux lois de probabilité

IV.4.1. La loi normale

La loi normale dite aussi loi de Gauss (ou Laplace-Gauss) est une loi à deux paramètres m et σ ($\sigma > 0$) qu'on note par $N(m, \sigma)$.

La forme analytique de la fonction de densité de probabilité s'écrit :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right).$$

Dans la figure ci-après (fig. xx), on présente l'exemple de fonction de densité de loi de probabilité normale. En trait plein loi normale centrée réduite et en pointillées loi normale de paramètres $m=1$ et $\sigma=3$.

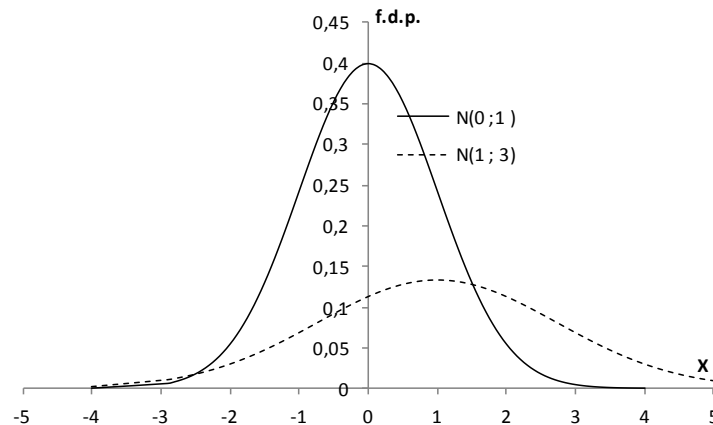


Figure IV.2 : Exemples de fonction de densité de loi de probabilité normale.

IV.4.1.1. Propriétés de la loi normale

- a) La fonction de densité de probabilité est symétrique. Donc la moyenne $m \ll E(X) \gg$ est égal à la médiane. Ainsi, la moyenne correspond à la probabilité de 50% au non dépassement.
- b) La variable aléatoire est uni-modale, c'est-à-dire, la fonction densité a un seul maximum:
Mode = Moyenne = Médiane.
- c) non bornée à droite comme à gauche

Les valeurs de la fonction de répartition (probabilité au non dépassement) sont calculées à partir de l'équation :

$$F(t) = \text{Prob}(X < t) = \int_{-\infty}^t f(x) dx = \frac{1}{\sigma 2\pi} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right) dx.$$

Les valeurs de F sont déduites de table préétablies. Dans cette étude on utilise le calcul sous Microsoft Excel.

IV.4.1.2. Moments statistiques

une variable statistique qui suit une loi normale, l'espérance mathématique, la variance, le coefficient d'asymétrie et le coefficient d'aplatissement sont résumés dans le **Tableau IV.2**

Tableau IV.2: Espérance mathématique, écart type, coefficient d'asymétrie et d'aplatissement d'une loi normale.

	$N(0,1)$	$N(m, \sigma)$
Espérance mathématique : $E(X)$	0	M
Variance	1	σ^2
Ecart type	1	σ
Coefficient d'asymétrie : γ_1	0	0
Coefficient d'aplatissement : γ_2	0	0

IV.4.2. La loi Log-normale (dite également loi de Galton ou Gibrat-Gauss)

IV.4.2.1. Définition Soit X une variable aléatoire à valeurs positives :

si $Y = \ln(X)$ suit une loi normale $N(\mu, \delta)$ alors $X = e^Y$ suit une loi normale.

IV.4.2.2. Domaine d'utilisation

Lorsque un événement hydrologique résulte d'une combinaison de facteurs qui se multiplient, alors la loi log-normale est préconisée (Chow et al., 1992). En effet le produit de variables $\prod_i X_i$ se ramène à la somme des logarithmes de celles-ci $\sum_i \log(X_i)$. Le théorème central-limite permet d'affirmer la log-normalité de la variable aléatoire.

On sait que le logarithme d'un produit est la somme des logarithmes. Du théorème central limite de la loi normale, il en résulte que le produit de variables log-normales indépendantes est aussi distribué suivant une loi log-normale.

On peut citer les exemples suivants :

- Granulométrie des sédiments, qui résultent de chocs indépendants qui enlèvent chacun un pourcentage "multiplicatif" aléatoire du grain,

- Phénomènes de fatigue où l'effet est *proportionnel* à l'état déjà atteint (cf. Benjamin et Cornell 1970)
- Débits mensuels qui sont en première approche le produit de la pluie par des coefficients d'écoulement aléatoires..., etc...
- La loi log-normale est aussi fréquemment utilisée pour représenter les distributions de grand nombre de variables aléatoires positives comme la crue annuelle maximale, précipitation annuelle maximale, magnitude de tremblement de terre, concentration de contaminants....

IV.4.2.3. Moments statistiques

La moyenne et l'écart type (m, σ) de la variable X sont reliés à la moyenne et écart type (μ, δ) de la variable Y par les équations suivantes (tableau xx) :

Tableau IV.3: Moments statistiques d'une loi Log-Normale

	$X = e^Y$	$Y = \ln(X)$
Espérance	$m = e^{(\mu + \sigma^2/2)}$	$\mu = \ln(m) - \frac{\delta^2}{2}$
Ecart type	$\sigma = \mu \sqrt{e^{\delta^2} - 1}$	$\delta = \sqrt{\ln\left(\frac{\sigma^2}{m^2} + 1\right)}$

IV.4.3. Loi de Gumbul

La loi de Gumbel a été introduite pour l'étude de la distribution des fréquences de valeurs extrêmes (ex. : maximums ou minimums annuels). Elle est parfois appelée loi du double exponentielle. C'est une loi à deux paramètres. Elle a pour fonction de densité de probabilité.

$$f(x, a, b) = ae^{-(ax+b)}e^{-e^{-(ax+b)}} \quad a > 0$$

La fonction de répartition est donnée par :

$$F(t) = \text{Prob}(X < t) = \int_{-\infty}^t ae^{-(ax+b)}e^{-e^{-(ax+b)}} dx = \int_{-\infty}^{u(t)} du = e^{-e^{-(ax+b)}}$$

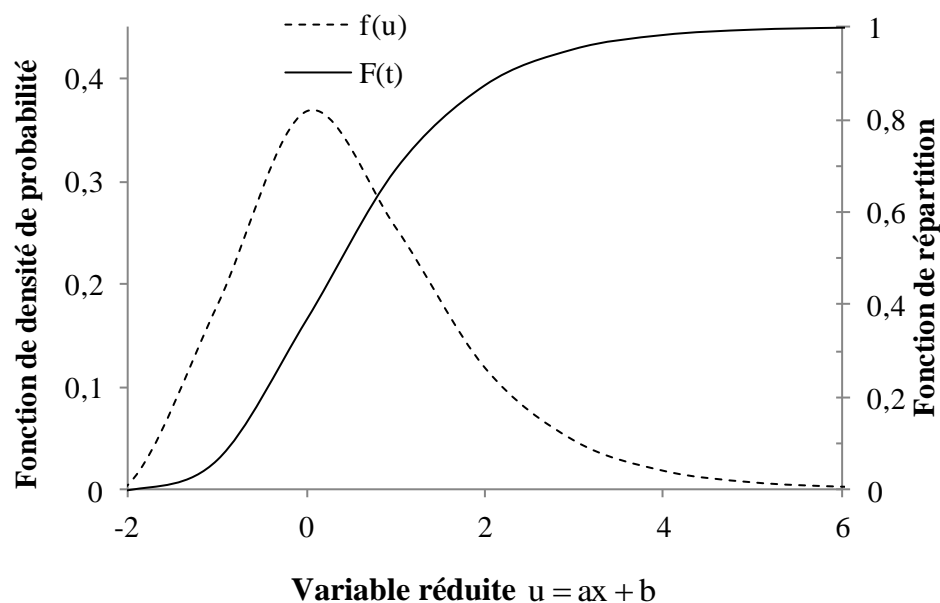


Figure IV.3 : Fonctions de densité de probabilité et de répartition de la loi de Gumbel

Le mode est atteint pour la valeur " $x_0 = -\frac{b}{a}$ "

IV.4.3.1. Moments statistiques

Espérance mathématique est : $E(X) = \frac{1}{a}\gamma - \frac{b}{a}$

Avec γ c'est la constante d'Euler-Mascheroni, elle vaut $\gamma \approx 0,577215$.

La variance est donnée par : $V(X) = \frac{\pi^2}{a^2 6}$

Du système d'équations

$$\begin{cases} E(X) = \frac{1}{a} \gamma - \frac{b}{a} \\ V(X) = \frac{\pi^2}{a^2 6} \end{cases}$$

On déduit que :

$$a = \frac{\pi}{\sigma\sqrt{6}} \approx \frac{1,28}{\sigma} \quad \text{et} \quad b = \gamma - a.m$$

IV.5. Adéquation de l'ajustement par le test de Kolmogorov-Smirnov

Test de Kolmogorov-Smirnov est un test non paramétré, sa réalisation « sous Excel Microsoft Office » passe par les étapes suivantes :

1^{ère} étape : Ordonner la série (du plus petit au plus grand ou l'inverse)

2^{ème} étape : A chaque valeur associer la probabilité fréquentielle $F_i = \frac{i-0,5}{N}$, i est le rang de la valeur et N est l'effectif total de la série. Pour cette application $N = 38$.

3^{ème} étape : On calcul les probabilités théoriques (probabilités au nom dépassement). Dans l'icône fonction, on choisit la fonction de répartition de la loi de probabilité utilisée.

4^{ème} On calcul l'erreur correspondante à chaque valeur de la variable étudiée.

5^{ème} étape, On choisit un seuil de confiance (ou le risque d'erreur toléré). Exemple on choisit le seuil de confiance de 95%, c'est-à-dire il y-a un risque d'erreur de 5% de rejeter à tort la loi de probabilité ajustée à la série.

6^{ème} étape : On compare l'erreur maximale à la valeur critique tabulée et établie par Kolmogorov-Smirnov.

7^{ème} étape : On conclut qu'au seuil de confiance 95% l'ajustement à la loi de probabilité est satisfaisant.

IV.6.Calcul des probabilités et périodes de retour:

Le temps de retour T d'un événement est défini comme étant l'inverse de la fréquence d'apparition de l'événement. Soit :

$$T = \frac{1}{1 - \text{Prob}(X < x_T)}$$

Tableau IV.4:Table de Kolmogorov-Smirnov

n	P = .80	P = .90	P = .95	P = .98	P = .99
1	.90000	.95000	.97500	.99000	.99500
2	.68377	.77639	.84189	.90000	.92929
3	.56481	.63604	.70760	.78456	.82900
4	.49265	.56522	.62394	.68887	.73424
5	.44698	.50945	.56328	.62718	.66853
6	.41037	.46799	.51926	.57741	.61661
7	.38148	.43607	.48342	.53844	.57581
8	.35831	.40962	.45427	.50654	.54179
9	.33910	.38746	.43001	.47960	.51332
10	.32260	.36866	.40925	.45662	.48893
11	.30829	.35242	.39122	.43670	.46770
12	.29577	.33815	.37543	.41918	.44905
13	.28470	.32549	.36143	.40362	.43247
14	.27481	.31417	.34890	.38970	.41762
15	.26588	.30397	.33760	.37713	.40420
16	.25778	.29472	.32733	.36571	.39201
17	.25039	.28627	.31796	.35528	.38086
18	.24360	.27851	.30936	.34569	.37062
19	.23735	.27136	.30143	.33685	.36117
20	.23156	.26473	.29408	.32866	.35241
21	.22617	.25858	.28724	.32104	.34427
22	.22115	.25283	.28087	.31394	.33666
23	.21645	.24746	.27490	.30728	.32954
24	.21205	.24242	.26931	.30104	.32286
25	.20790	.23768	.26404	.29516	.31657
26	.20399	.23320	.25907	.28962	.31064
27	.20030	.22898	.25438	.28438	.30502
28	.19680	.22497	.24993	.27942	.29971
29	.19348	.22117	.24571	.27471	.29466
30	.19032	.21756	.24170	.27023	.28987
31	.18732	.21412	.23788	.26596	.28530
32	.18445	.21085	.23424	.26189	.28094
33	.18171	.20771	.23076	.25801	.27677
34	.17909	.20472	.22743	.25429	.27279
35	.17659	.20185	.22425	.25073	.26897
36	.17418	.19910	.22119	.24732	.26532
37	.17188	.19646	.21826	.24404	.26180
38	.16966	.19392	.21544	.24089	.25843
39	.16753	.19148	.21273	.23786	.25518
40	.16547	.18913	.21012	.23494	.25205
41	.16349	.18687	.20760	.23213	.24904
42	.16158	.18468	.20517	.22941	.24613
43	.15974	.18257	.20283	.22679	.24332
44	.15796	.18053	.20056	.22426	.24060
45	.15623	.17856	.19837	.22181	.23798
46	.15457	.17665	.19625	.21944	.23544
47	.15295	.17481	.19420	.21715	.23298
48	.15139	.17302	.19221	.21493	.23059
49	.14987	.17128	.19028	.21277	.22828
50	.14840	.16959	.18841	.21068	.22604

IV.7. Etude des apports

Dans cette partie nous allons faire une étude statistique pour les apports mensuelles, annuelles et saisonnières.

IV.7.1. Calcul des apports

Les apports solides en millions tonnes, A_s (10^6 t ou MT) et les apports spécifiques en tonnes par kilomètre carré par an, A_{ss} (t/km²/an) sont données par :

$$A_s = Q_s \cdot N \cdot 10^9$$

$$A_{ss} = (A_s \cdot 10^6) / S$$

Avec :

A_s : apport solide annuel, mensuel ou saisonnier (MT)

Q_s : débit solide annuel, mensuel ou saisonnier (Kg/s)

N : temps en secondes. (s)

A_{ss} : apport solide spécifique (t/km²/an)

S : superficie du bassin versant (km²)

b) Les apports annuels

Le flux annuel des matières solides en suspension exporté par les différents oueds étudiés est calculé par la formule :

$$A_s = \sum_{j=1}^N (t_{j+1} - t_j) Q_j C_j$$

Avec

C_j : est la concentration mesurée à l'instant t_j

Q_j : correspondant au débit liquide à l'instant t_j ,

N : est le nombre de prélèvement effectués sur l'année considérée,

$t_{j+1} - t_j$: est le pas de temps séparant deux prélèvements consécutifs.

De même, Al, l'apport liquide annuel engendrant le flux des apports solides As, est calculé par la formule suivante :

$$Al = \sum_1^N (t_{j+1} - t_j) Q_j$$

V.1. Introduction

Dans ce chapitre, on examine le bilan des des apports liquides et matières solides en suspension au niveau de la station hydrométrique « Ain Youcef » qui contrôle le sous bassin. L'étude est basée sur l'exploitation des données de mesures instantanées du débit liquide (Ql) et de la concentration (C) des sédiments transportés en suspension par l'Oued Sikkak.

V.2. Etude pluviométrique

L'étude de la pluviométrie de la région d'étude est basée sur les données de la station Ain Youcef concerne la période 1970-2000.

c) Etude de variabilités mensuelles

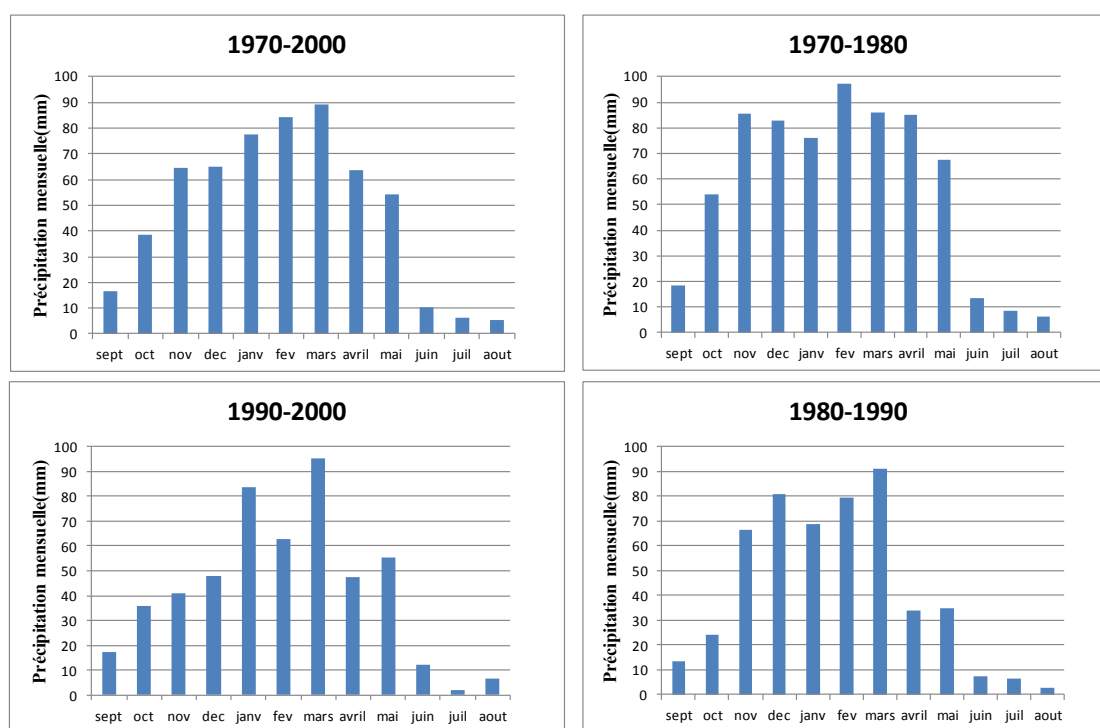


Figure V.1 : Evolution temporelle par tranche de décennie de la répartition des précipitations moyennes mensuelles à Ain Youcef (1970-2000)

De la **figure V.I** on remarque que les pluies sont plus concentrées dans la saison d'hiver qui commencent avec 64 mm au mois de Nov jusqu'à un max de (110 mm) au mois de mars, après on a enregistré une chute dans la saison de printemps arrive à (54,12 mm) au mois de mai, en général le

minimum des précipitations s'observe au mois de juin, juillet et Aout sont estimées à respectivement (10,39),(6,08) et (5,18mm).

Dans les histogrammes de (1970-1980) (1980-1990) et (1990-2000) on remarque au mois d'avril de (1970-1980) a enregistré 105,1 mm qui est le max par rapport le mois avril de (1980-1990) et (1990-2000), aux mois de Novembre (66,16mm) et Décembre (80,78mm) on a des fortes précipitations pour la période (1980-1990) , avec le minimum des précipitations bien marquées aux mois Novembre (41,04mm) et Décembre (47,75mm).

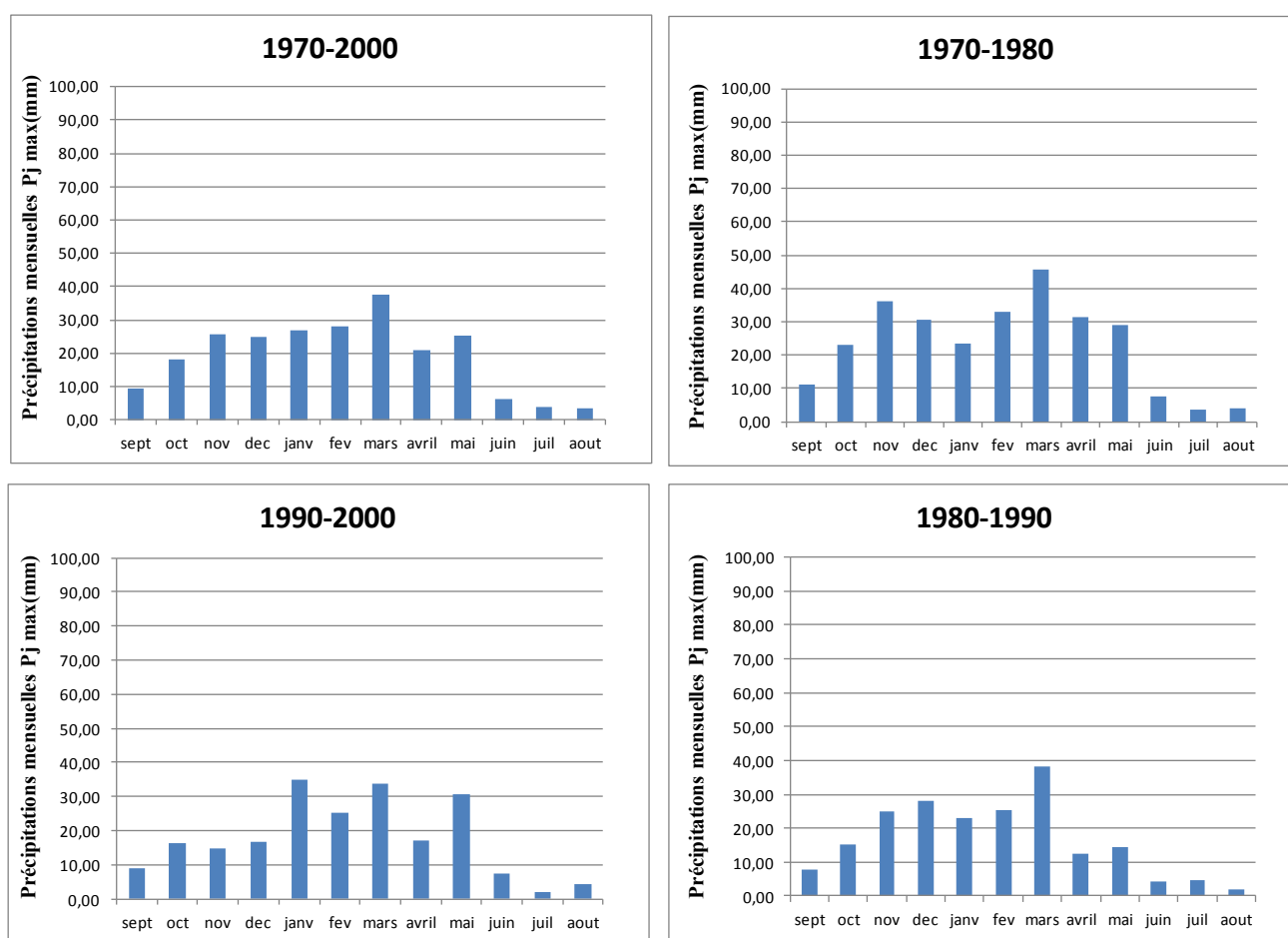


Figure V.2: Evolution temporelle par tranche de décennie de la répartition des précipitations journalières maximales par année à Ain Youcef (1970-2000).

D'après les histogrammes des pluies mensuelles des Pj max, on a enregistré une irrégularité des précipitations au niveau de ces périodes, les pluies varient en Novembre (14,65 mm) et Décembre (28,23 mm) dans la période (1990-2000), qui sont les mois les plus basses par rapport aux même mois

pour les autres périodes, le mois de Mars n'a pas marqué un vrai changement en précipitations juste pour la période (1970-1980) qui a touché le niveau de (45 mm), au mois de Janvier de la période (1980-1990) a atteint (35 mm).

d) La contribution des Pj max par rapport a P mensuelle

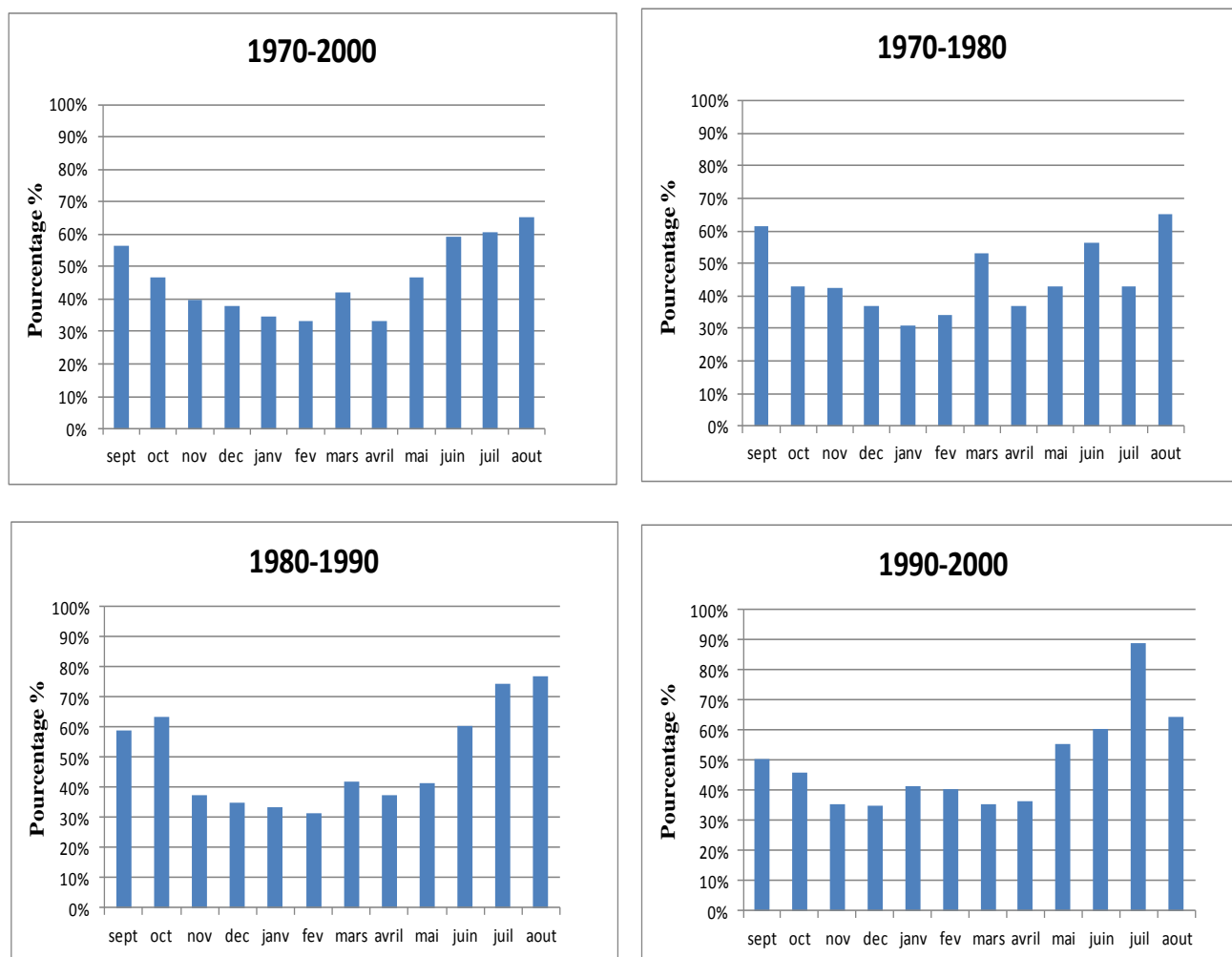


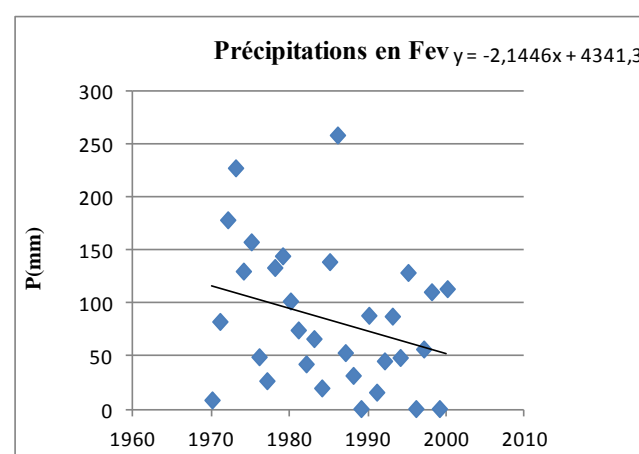
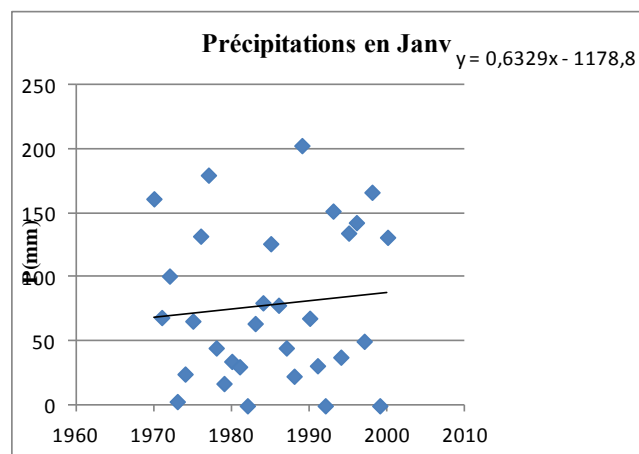
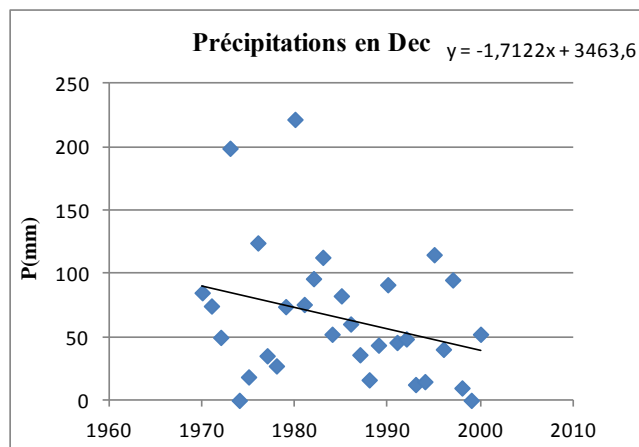
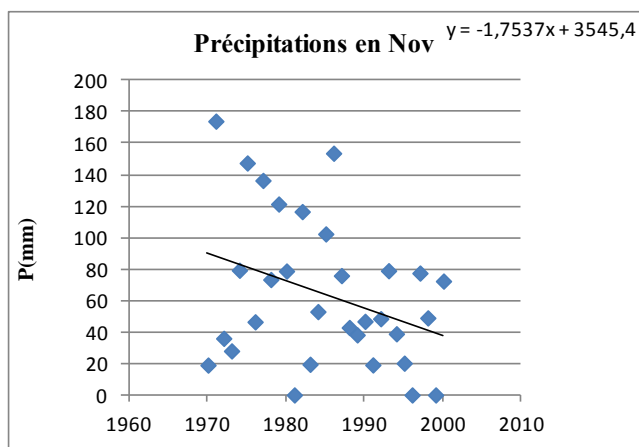
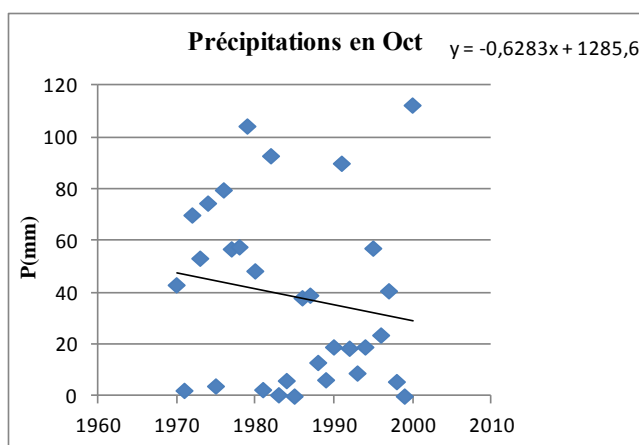
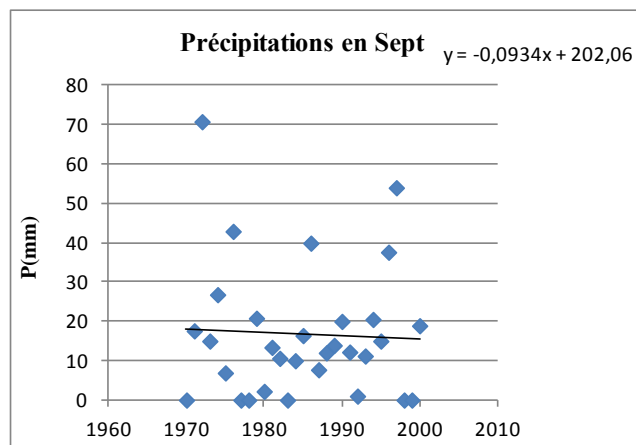
Figure V.3 : les histogrammes des pourcentages mensuelles 1970-2000.

Les histogrammes de dessus durant la période (1970-2000) montrent une irrégularité de pourcentage, des valeurs changent dans chaque mois, dans la période (1990-2000) on trouve en juillet qu'il touche 89% au contraire en juillet de (1970-1980) a enregistré une valeur de 77%, donc on remarque qu'il y'a au début (la saison d'automne) et à la fin (la saison d'été) des fortes valeurs, à

partir la saison d'automne les pourcentages commencent à chuter pour atteindre leurs niveau minimum de 30% par exemple en (1980-1990).

V.3. La susceptibilité à l'érosion

Dans cette partie on fait une étude sur les précipitations en tenant compte la variabilité du coefficient **a** à partir de la droite de tendance **ax+b** suivant les mois, les saisons et les années



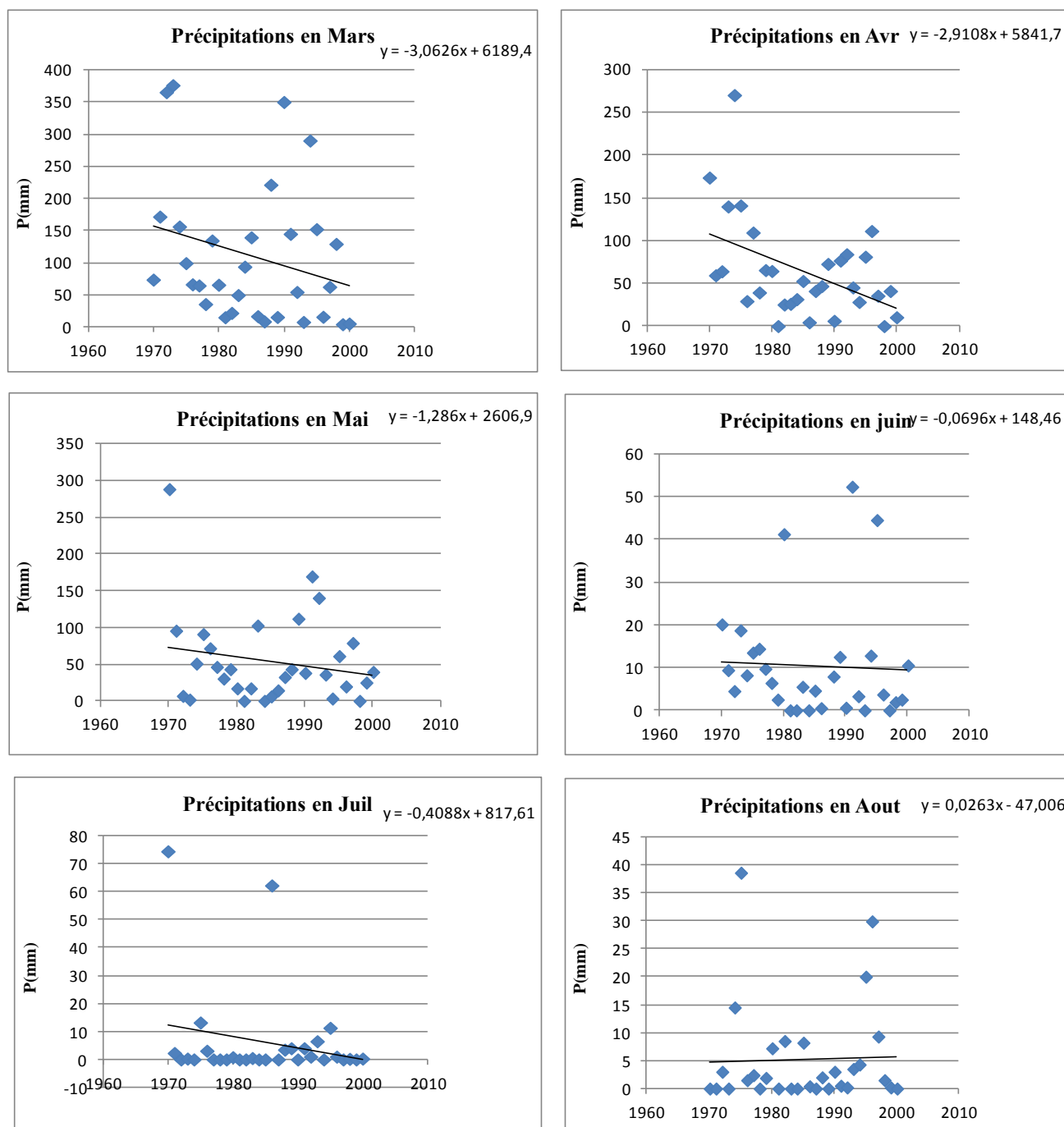


Figure V.4 : les précipitations mensuelles de la série des données (1970-2000).

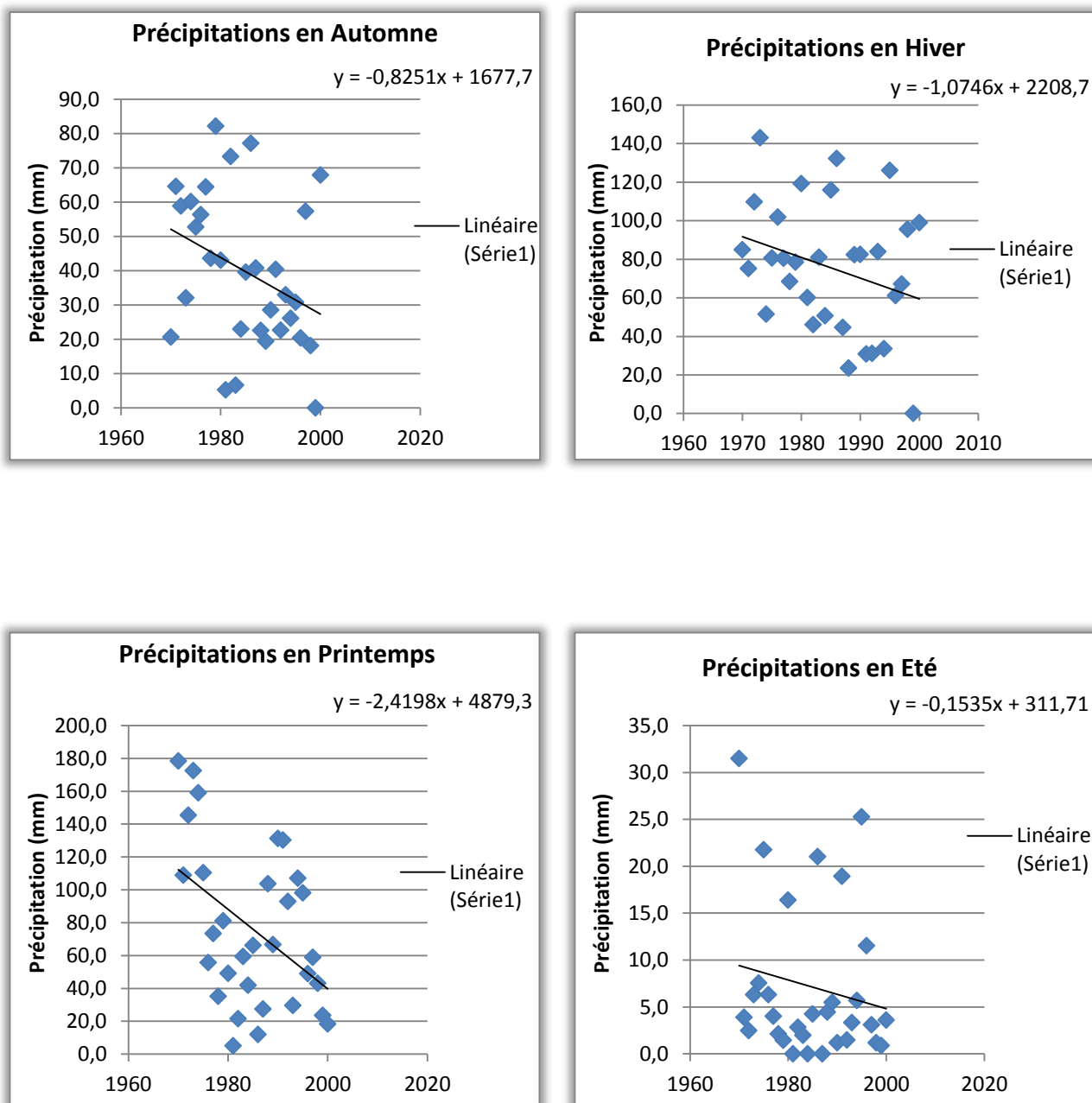


Figure V.5 : les précipitations saisonnière de la série des données (1970-2000)

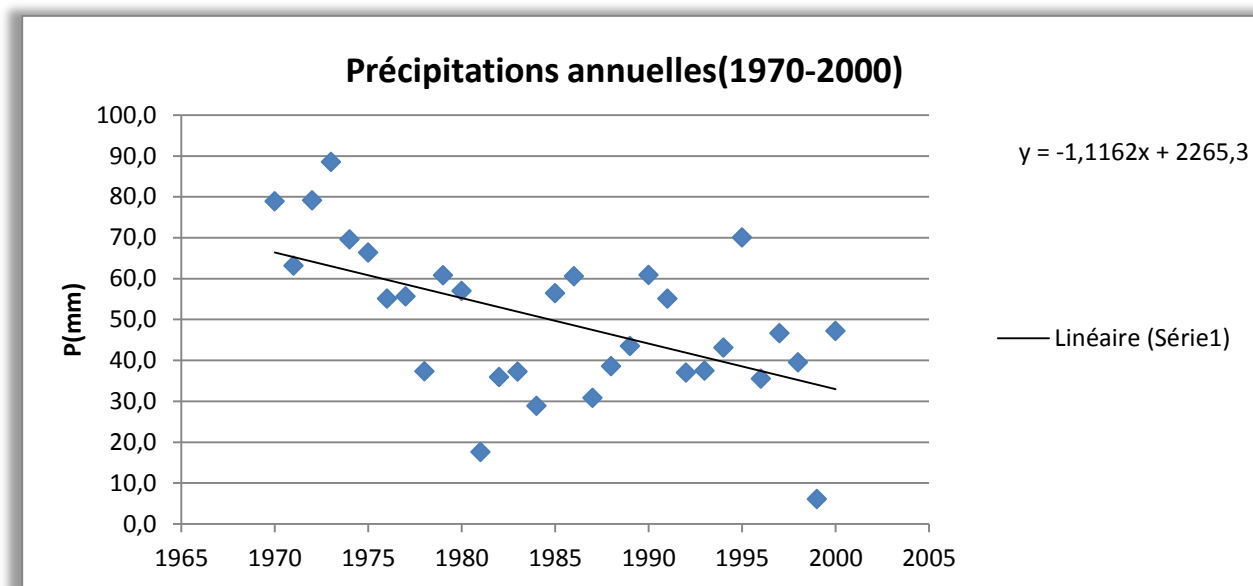


Figure V.6 : les précipitations annuelles de la série des données (1970-2000).

Le tableau ci-dessous nous donne une informations sur les variabilités des droites de regression suivant les graphes des précipitations obtenus :

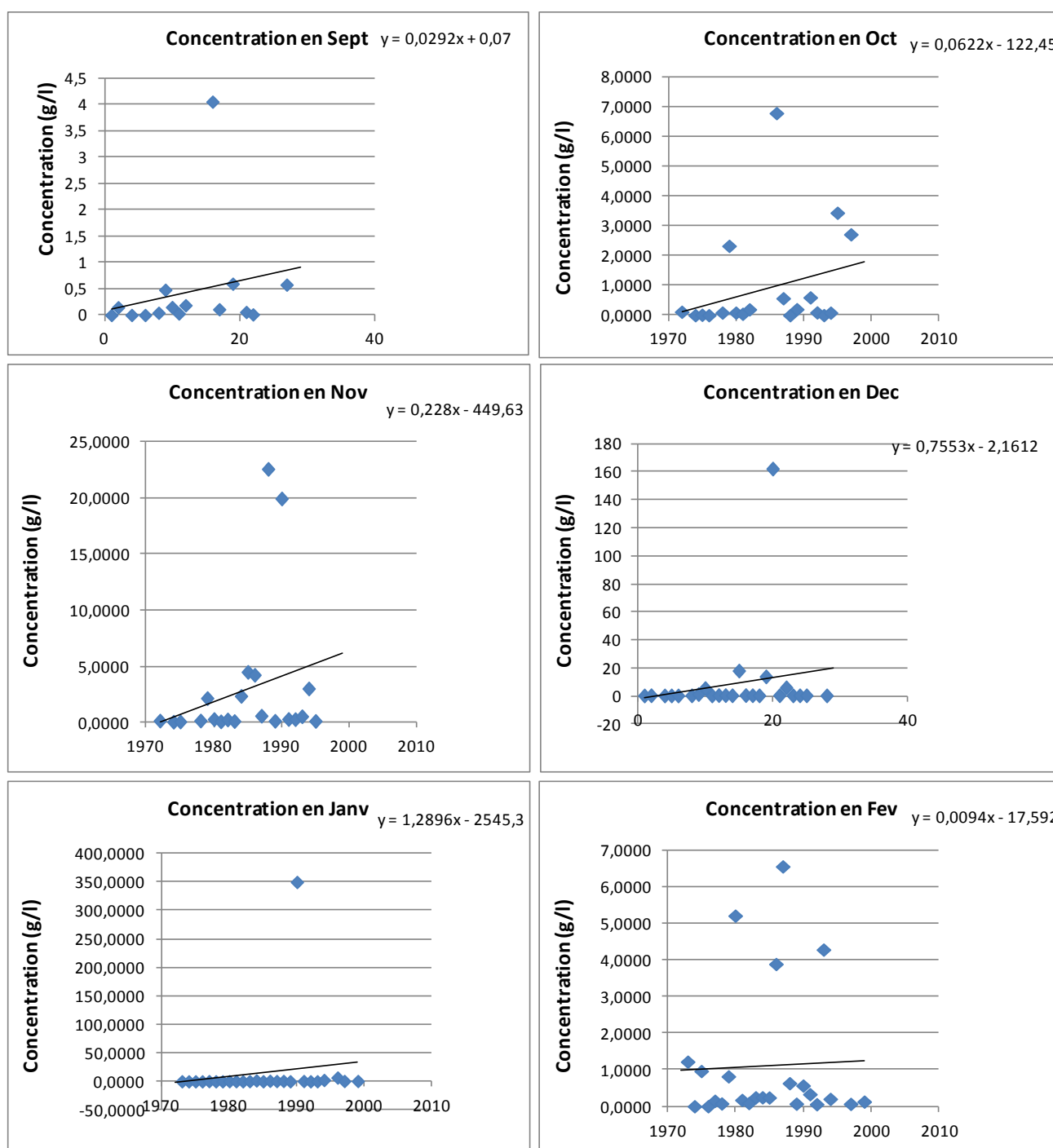
Tableau V.1: la variabilité du coefficient a mensuelle,saisonnaire et annuelle.

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
a	-0,09	-0,62	-1,75	-1,71	0,63	-2,14	-3,06	-2,91	-1,28	-0,06	-0,41	0,02
Saisonnaire	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
a	-0,82			-1,07			-2,41			-0,15		
Annuelle	1970-2000											
a	-1,11											

V.3.1. Analyse du tableau

A partir les valeurs du **Tableau V.1** on trouve qu'il y'a 2 modèles de graphes ou le coefficient **a** d'équation $ax+b$, les mois (Sep,Oct,Nov,Déc,Janv,Fev,Mars,Avr,Mai,Juin,Juil) qui ont les valeurs de $a < 0$ sont des modèles décroissants avec susceptibilité à l'agradation, et pour le mois d'Aout

a une valeur de $a > 0$ c'est un modèle croissant avec susceptibilité à l'érosion. Les deux mois Janv et Aout sont stables sauf pour les mois (Fev,Mars,Avr) il y'a une forte diminution cela veut dire qu'il y'avait une séchresse pendant cette période.



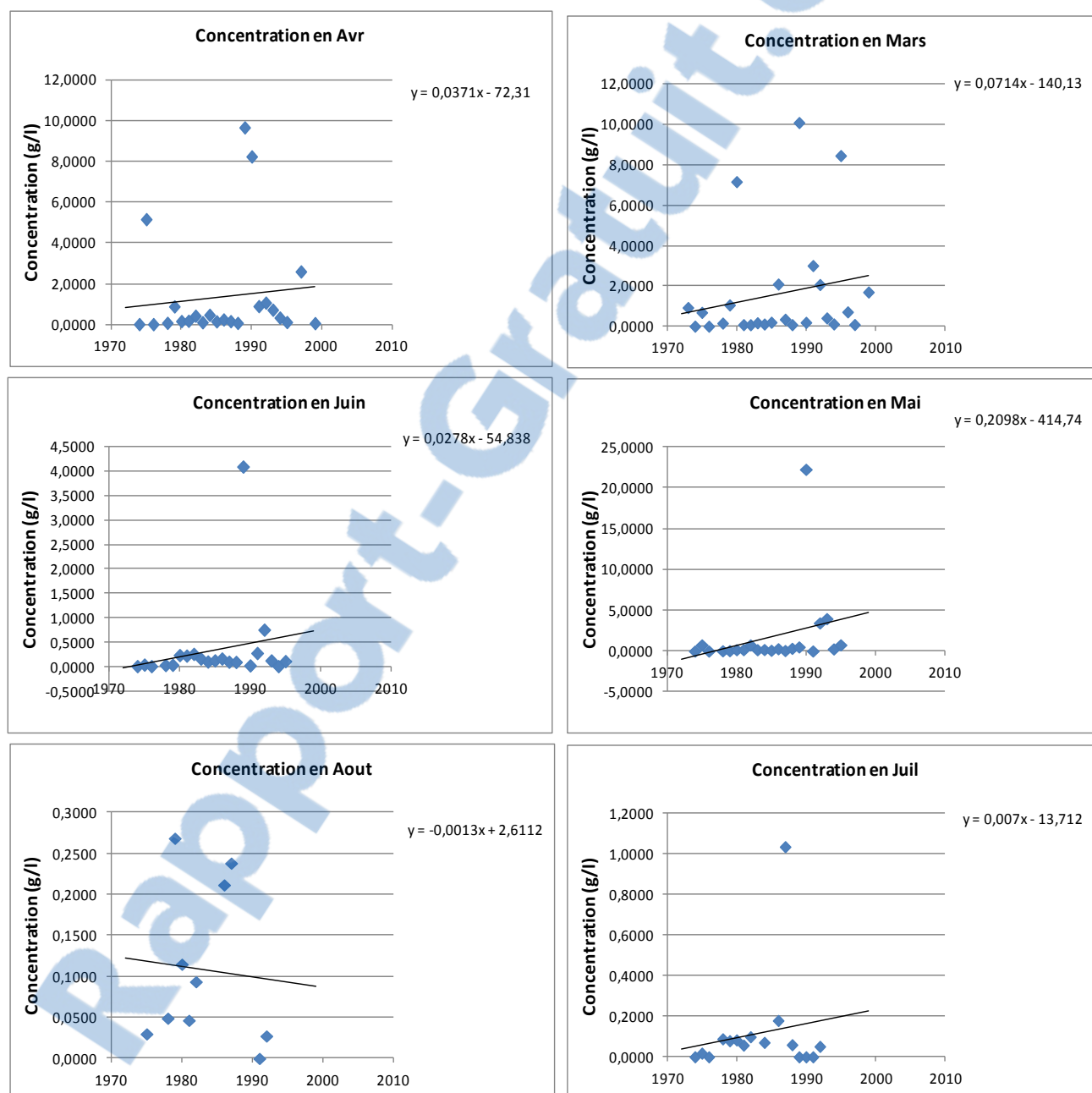


Figure V.7 : les concentrations mensuelles pendant la période (1972-2000).

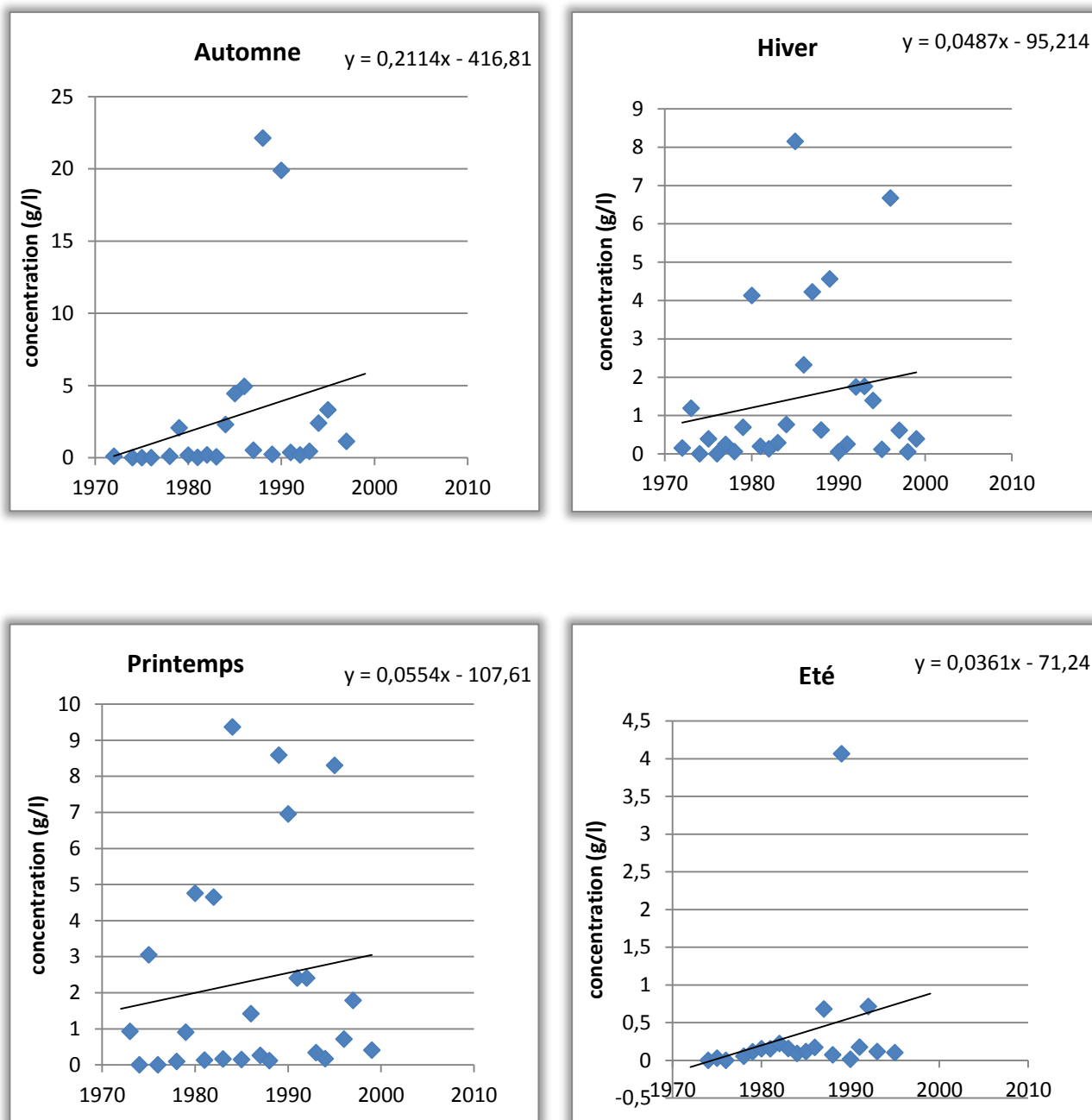


Figure V.8: les concentrations saisonnières pendant la période (1972-2000)

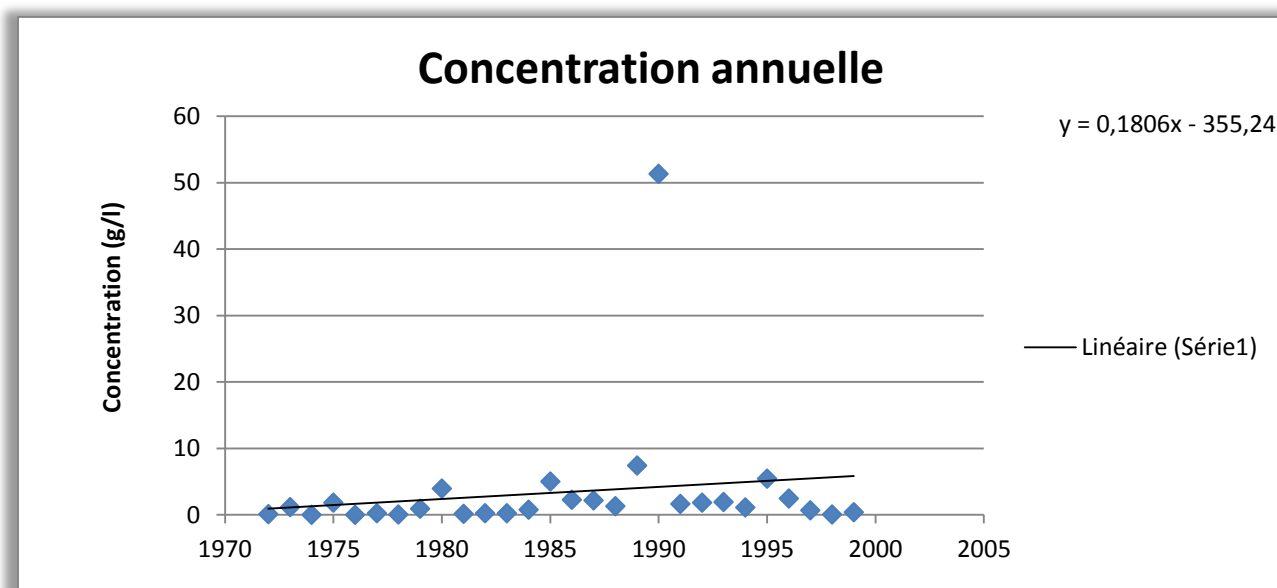


Figure V.9 : les concentrations annuelles pendant la période (1972-2000)

Les pentes qui décrivent la susceptibilité du bassin versant à l'érosion aux échelles mensuelle, saisonnière et annuelle sont résumées dans le tableau suivant à partir des graphes des concentrations annuelles :

Tableau V.2: la variabilité du coefficient a pour les concentrations mensuelle, saisonnière et annuelle.

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
a	0,02	0,06	0,22	0,77	1,28	0,009	0,07	0,03	0,2	0,027	0,007	-0,0013
Saisonnière	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
a	0,21			0,048			0,05			0,036		
Annuelle	1972-1999											
a	0,18											

V.3.2. Analyse de tableau

A partir des valeurs du tableau on trouve qu'il y'a 3 modèles de graphes où le coefficient a d'équation $ax+b$ les mois (Nov, Déc, Janv, Mai) qui ont les valeurs de $a > 0$ sont des modèles croissantes avec susceptibilité à l'érosion, les mois (Sep, Oct, Fev, Mars, Avr, Juin, Juil) ont des valeurs de a sont

Rapport-gratuit.com

des modèles stationnaires et pour le mois d'Aout a une valeur de $a < 0$ c'est un modèle décroissant avec susceptibilité à l'agradation.

V. 4. Etude des apports

V.4.1. Apports mensuels

Le flux mensuel des matières solides en suspension exporté par les différents oueds est Calculé de la même manière que le flux annuel, pour chaque mois considéré de l'année.

a) Oued Sikkak

C'est au mois de mars (**Figure V.6**) que les apports aussi bien liquides que solides sont les plus importants (**Tableau V.3**).

Tableau V.3 : Apports liquides et solide moyens mensuelles à oued Sikkak (période 1972/99)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Al(Mm ³)	0,675	0,897	0,543	3,06	5,914	1,132	2,865	1,334	1,024	0,354	0,047	0,03
P(mm)	17,2 3	39,38	62,10	63,81	75,01	86,92	109,33	60,1	44,64	10,08	3,86	5,54
As (Tonnes)	0,27 7	2,377	1,021	1,452	7,622	0,774	12,027	1,331	3,193	0,285	0,00 1	0,0004
Ass	2,93	3,42	2,69	6,96	7,90	29,87	24,36	10,06	4,27	0,35	0,25	0,02

Al : apport liquide ;

As : apport solide ;

Ass : dégradation spécifique ;

P : précipitations

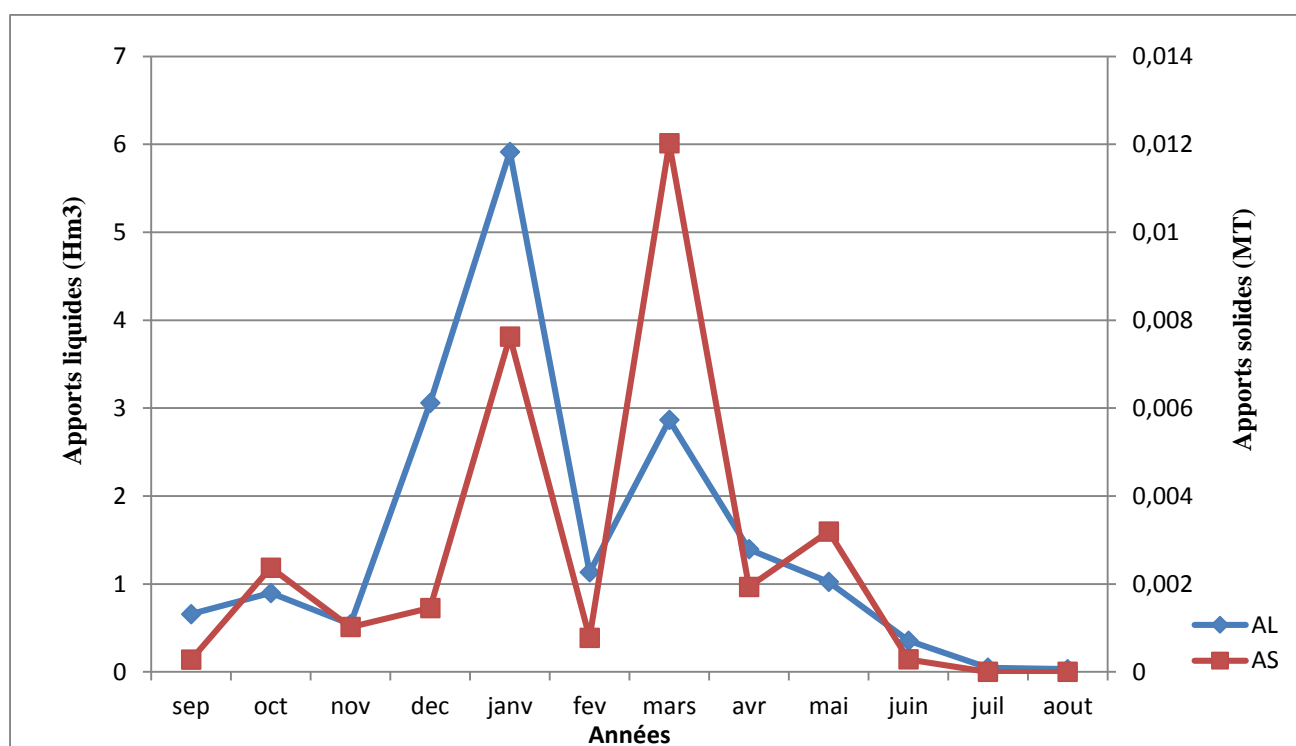


Figure V.10 : Apports liquides et solides moyens mensuels de l'oued Sikkak à Aïn youcef (1972-1999)

Le mois de février assure près 30% des apports liquides annuels et 32% des apports solides, malgré la pluviométrie et l'écoulement mensuel qui sont relativement plus importantes, l'apport solide de l'oued Sikkak est plus faible, d'où une plus faible action érosive. Sur la période de 1972/99, On peut dire que les crues violentes sont responsables de la plus grande partie des transports solides et des dégradations des bassins versants. La plus importante crue enregistrée sur les 28 ans de mesures sur oued Sikkak est celle du 26 mars au 3 avril 1973. Avec un débit de pointe de 176 m³/s et une concentration de pointe de 10 g/l, elle a généré un apport solide de 156847 tonnes (soit 91%) de l'apport annuel.

V.4.2. Apports saisonniers

Pour mieux appréhender le phénomène de l'érosion et du transport des sédiments, nous avons vu qu'il serait judicieux d'analyser la répartition saisonnière des flux et des apports solides en suspension dans notre bassin.

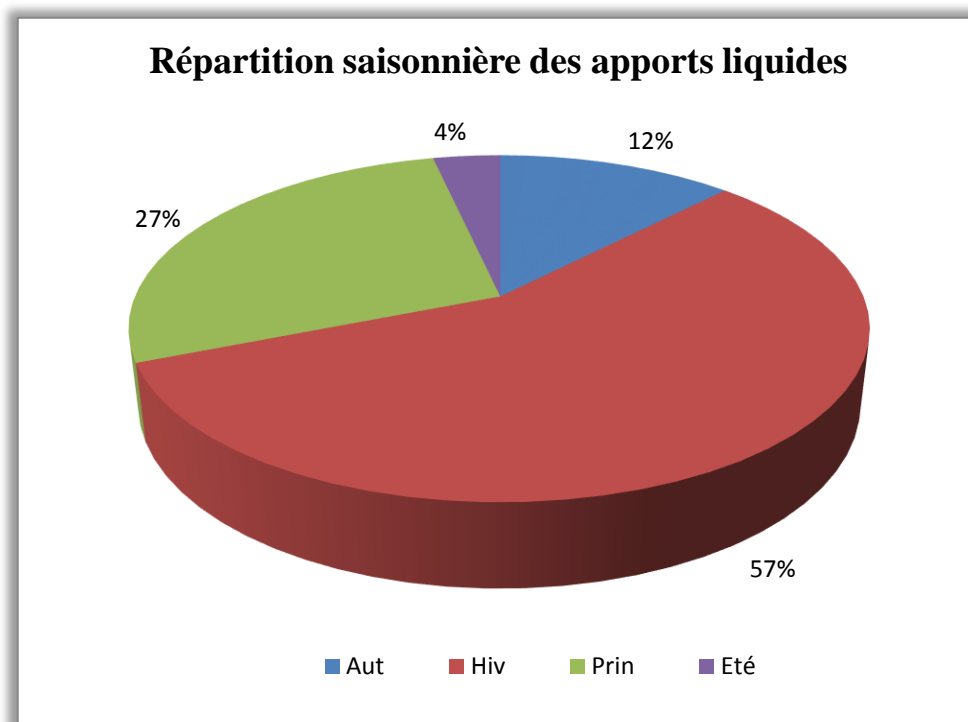


Figure V.11: Répartition Saisonnière des apports liquides de l'oued Sikkak à Ain Youcef (1972/99)

Tableau V.4 : Apports liquides et solide saisonniers avec les précipitations et la dégradation spécifique à oued Sikkak (période 1972/99)

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté
AL (Hm3)	1,403	6,474	3,148	0,403
AS (MT)	0,001	0,007	0,005	0,0001
P(mm)	397,8	455,7	389,2	322,6
ASS (T/Km2)	3,013	14,91	12,89	0,21

Al : apport liquide ;

As : apport solide ;

Ass : dégradation spécifique ;

P : précipitations ;

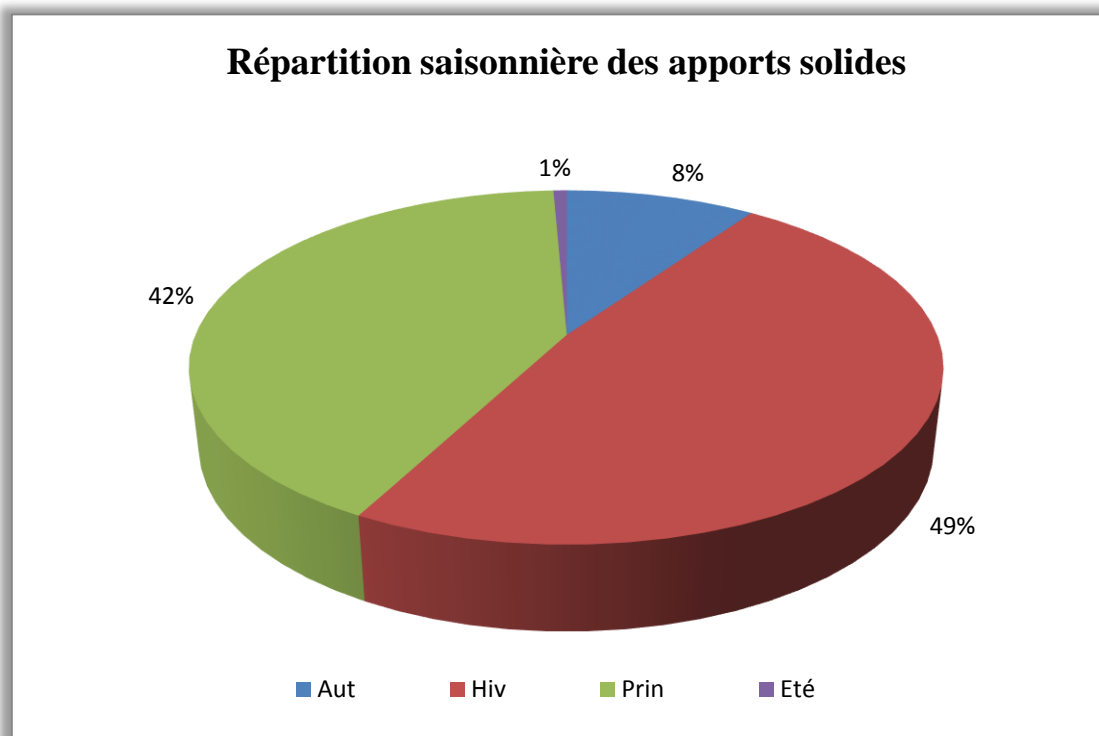


Figure V.12: Répartition Saisonnière des apports solides de l’oued Sikkak à Ain Youcef (1972/99).

La répartition saisonnière des transports solides confirme la variabilité mensuelle. 91% de la charge en suspension est transportée en automne (42%) et en été (49%),

Le tableau d’après montre les valeurs des apports liquides et les apports solides même leurs dégradations spécifiques.

Tableau V.5: Valeurs des apports liquides, solides et des dégradations spécifiques au niveau d'oued Sikkak.

Années	Al(Hm3)	As(MT)	Ass(T/km2)	C(kg/m3)
1972/1973	5,3387	0,0006	1,29	0,112
1973/1974	217,6465	0,2538	548,06	1,166
1974/1975	147,0845	0,1426	307,96	0,970
1975/1976	33,8252	0,0636	28,69	1,880
1976/1977	45,0830	0,0133	4,64	0,295
1977/1978	8,9092	0,0022	5,80	0,247
1978/1979	41,7540	0,0027	39,31	0,065
1979/1980	16,7804	0,0182	180,53	1,085
1980/1981	20,9468	0,0836	6,88	3,991
1981/1982	20,1369	0,0032	6,94	0,159
1982/1983	11,6490	0,0032	2,6	0,275
1983/1984	4,8736	0,0012	9,32	0,246
1984/1985	5,4482	0,0043	64,68	0,789
1985/1986	5,9436	0,0299	80,29	5,031
1986/1987	16,3485	0,0372	96,51	2,275
1987/1988	20,3012	0,0447	54,21	2,202
1988/1989	15,1300	0,0251	61,12	1,659
1989/1990	15,1900	0,0283	38,44	1,863
1990/1991	9,1300	0,0178	19,44	1,950
1991/1992	8,2700	0,0090	222,46	1,088
1992/1993	18,9400	0,1030	34,56	5,438
1993/1994	6,6600	0,0160	95,03	2,402
1994/1995	55,3400	0,0440	2,16	0,795
1995/1996	22,3800	0,0010	6,48	0,045
1996/1997	9,1300	0,0030	2,37	0,329

1997/1998	52,2140	0,0361	78,04	0,691
1998/1999	22,3844	0,0011	2,37	0,049
1999/2000	9,1306	0,0036	7,85	0,394

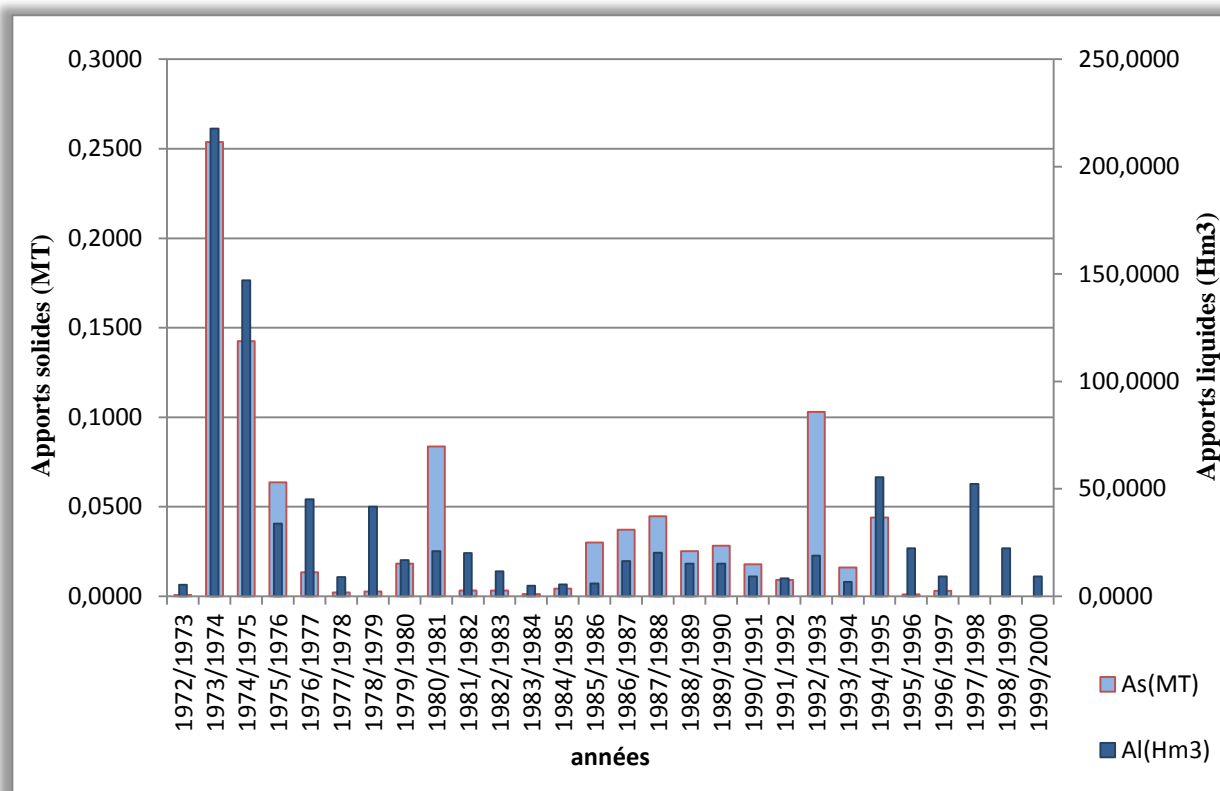


Figure V.13: Apport liquides et solides annuels de l'oued Sikkak à Aïn youcef.

Sur une longue période de mesures, à oued Sikkak l'année 1973/74 a été exceptionnelle avec un apport solide de 0,253 millions de tonnes. En effet, on peut voir (**Figure V.13**), que de 1973/74 à 1974/75, les apports aussi bien liquides que solides sont plus importants par rapport au reste de la période puisque cette région a connue une sécheresse depuis 1975. Toutefois, l'année 1973/74 est assez remarquable par son apport liquide et sa dégradation spécifique de 548,06 t/km²/an, sept fois plus grande que la moyenne annuelle. La crue de mars 1973 avec un débit de 176 m³/s a drainé 70% de l'apport liquide total annuel. Pendant la période de sécheresse, l'année 1979/80 a enregistré quelques crues qui ont permis un apport solide appréciable et une dégradation de 180,53 t/km²/an, trois fois supérieure à la moyenne interannuelle.

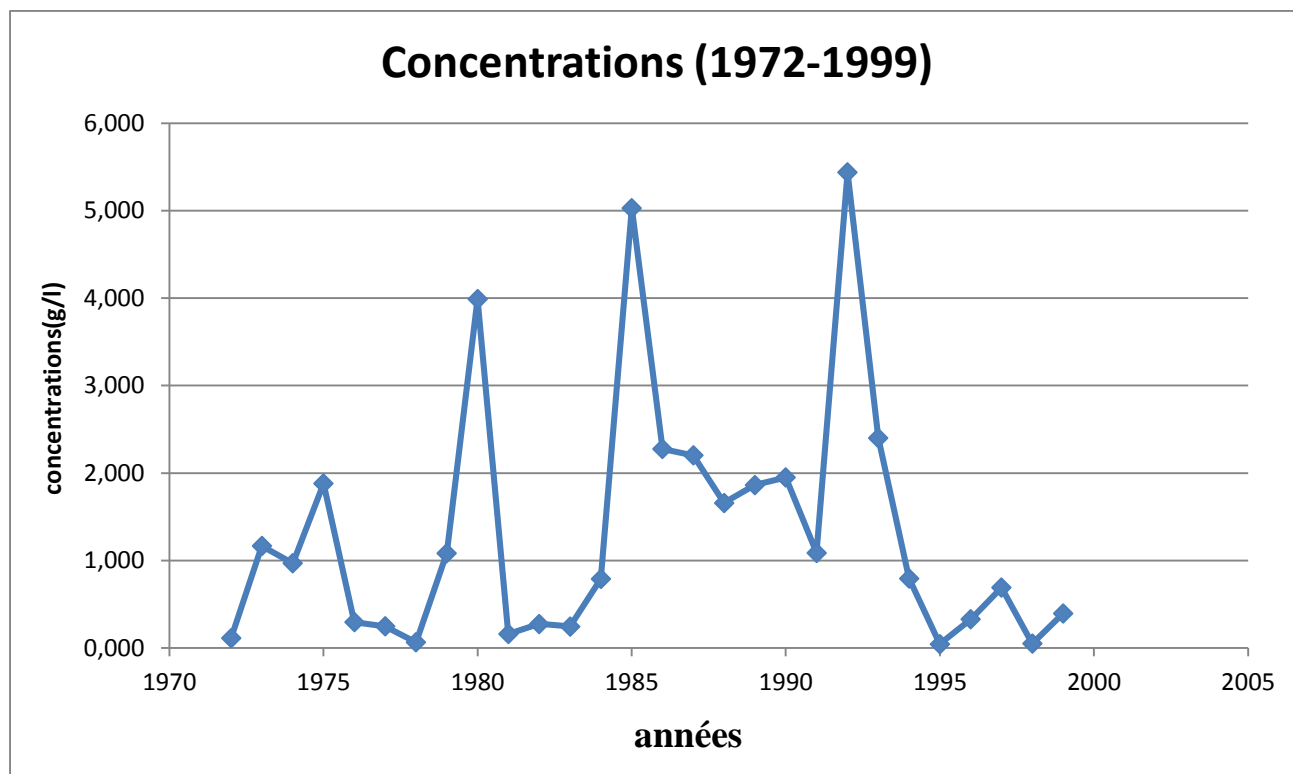


Figure V.14: les variations des concentrations annuelles.

La **Figure V.14** montre des variations des concentrations pour la station Ain Youcef, dans l'année 1992 on a enregistré un pique de 5,438 g/l ce qui est important par rapport aux autres concentrations on a aussi deux concentrations qui sont remarquables, en 1980 on a une concentration de 3,99 g/l avec une augmentation qui arrive en 5,03 g/l en 1985, à partir de l'année 1992 une chute est bien illustrée qui peut atteindre une concentration proche de zéro en 1995, les pics enregistrés de concentrations sont dues aux fortes crues qui sont instantanées elles peuvent durer plusieurs heures et des fois plusieurs jours.

V.5. Application des lois de probabilité sur la pluviométrie

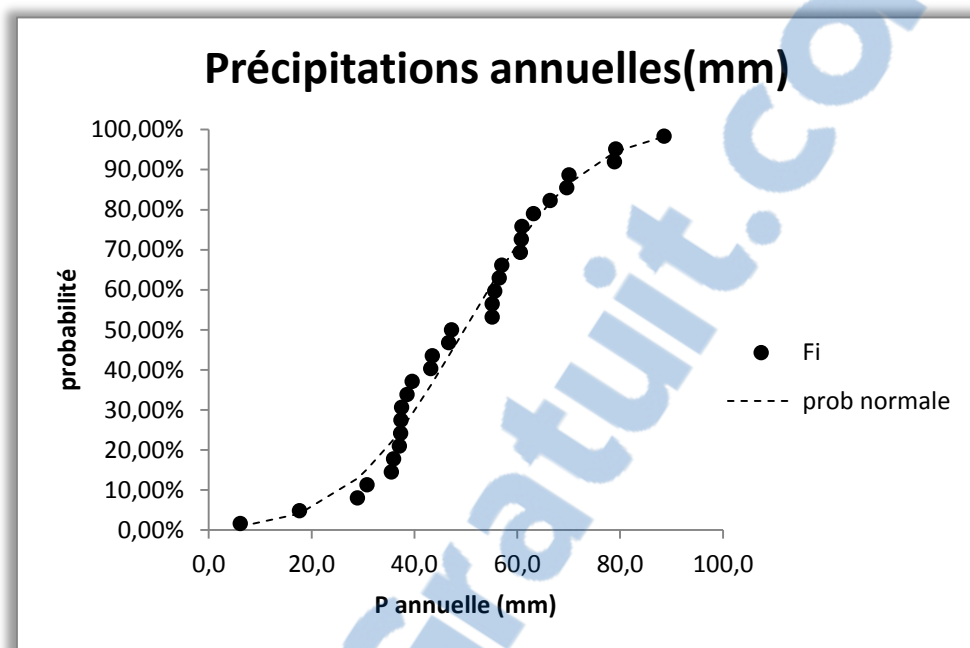


Figure V.15 : ajustement des P annuelles à loi normale

L'erreur maximale est de 8,3% avec un risque d'erreur de 2% l'écart entre loi fréquentielle et Probabilité toléré par le test de Kolmogorov Smirnov est de 26,5% donc l'ajustement à la loi normale est satisfaisant.

Pour le choix de quantile on prend la valeur de l'erreur max qui est minimale.

Tableau V.6: variation des précipitations annuelles, les Pj max, le débit annuel, le débit max et la concentration en fonction de période de retour.

Période de retour	2	5	10	100	1000
P annuelle (mm)	49,69	73,21	87,39	92,39	106,41
Pj max (mm)	17,98	26,84	34,62	37,91	48,76
Qannuel (m3/s)	1,03	3,15	6,15	7,78	15,08
Qmax (m3/s)	8,91	22,68	34,75	39,86	56,72
Concentration (g/l)	1,10	3,23	5,10	5,89	8,50

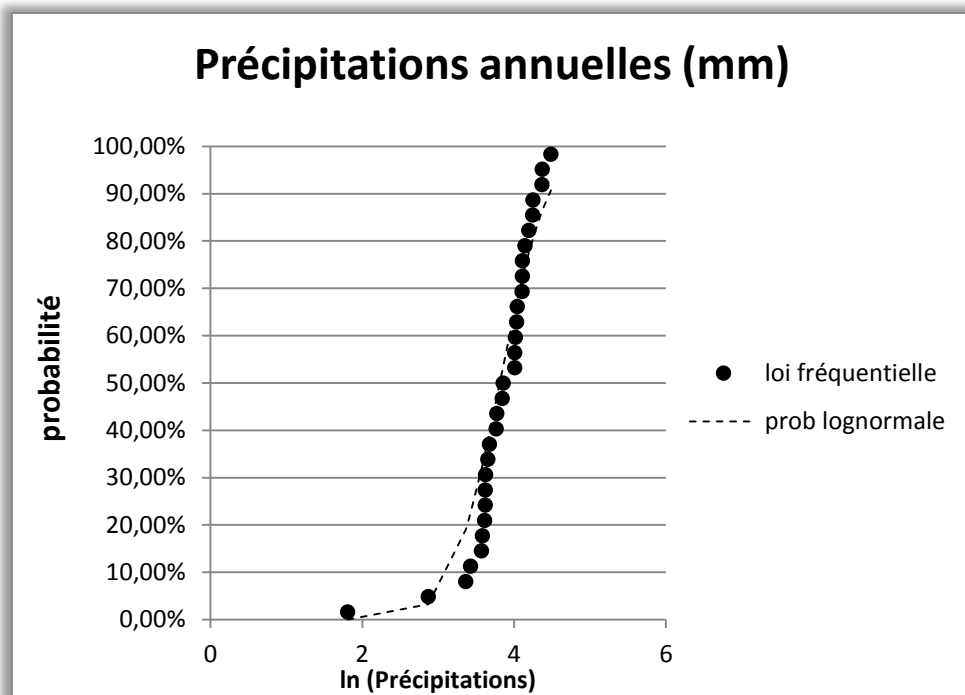


Figure V.16: ajustement des P annuelles à loi lognormale.

L'erreur maximale est de 17,3% avec un risque d'erreur de 10% l'écart entre loi fréquentielle et Prob toléré par le test de Kolmogorov Smirnov est de 21,4% donc l'ajustement à la loi lognormale est satisfaisant.

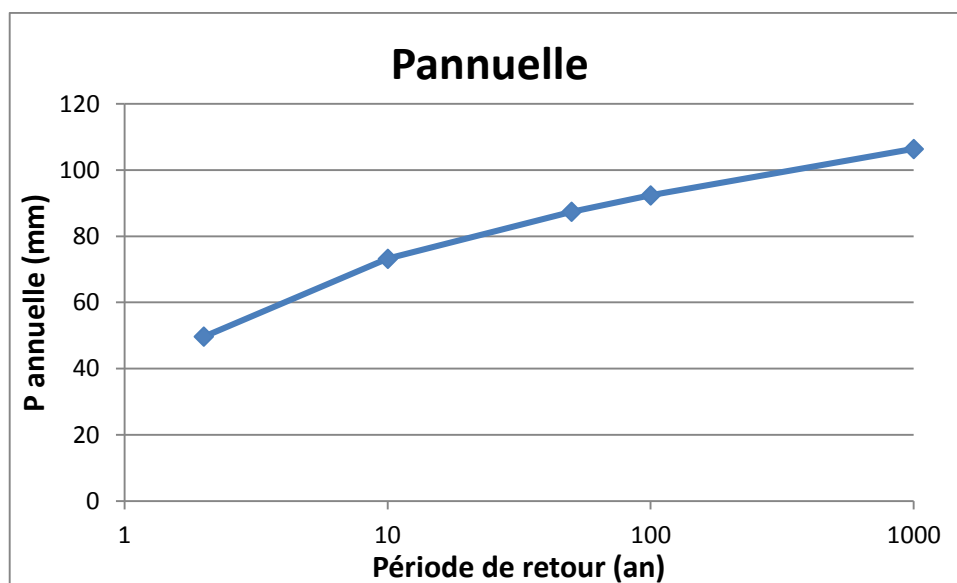


Figure V.17: variation des précipitations annuelles en fonction de la Période de retour.

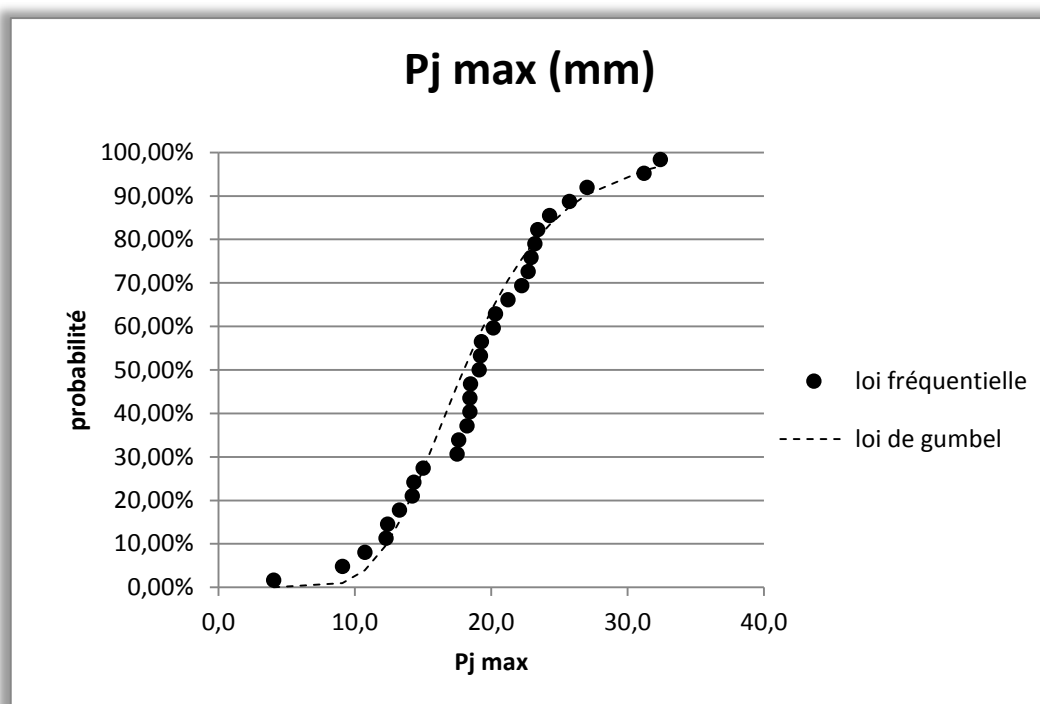


Figure V.18: ajustement des Pj maximales à loi de gumbel

L'erreur maximale est de 15,7% avec un risque d'erreur de 5% l'écart entre F_i et Prob toléré par le test de Kolmogorov Smirnov est de 23,7% donc l'ajustement à la loi de gumbel est satisfaisant.

L'ajustement des Pj maximales à loi de gumbel est le meilleur ajustement

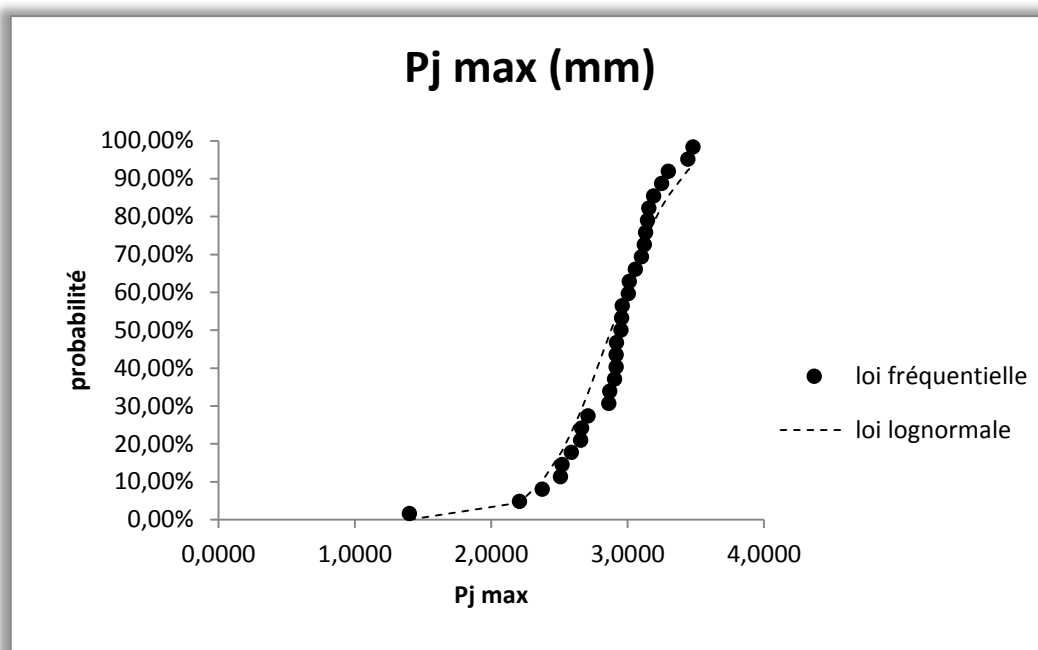


Figure V.19: ajustement des Pj maximales à loi lognormale

L'erreur maximale est de 17,7% avec un risque d'erreur de 5% l'écart entre F_i et Prob toléré par le test de Kolmogorov Smirnov est de 23,7% donc l'ajustement à la loi lognormale est satisfaisant.

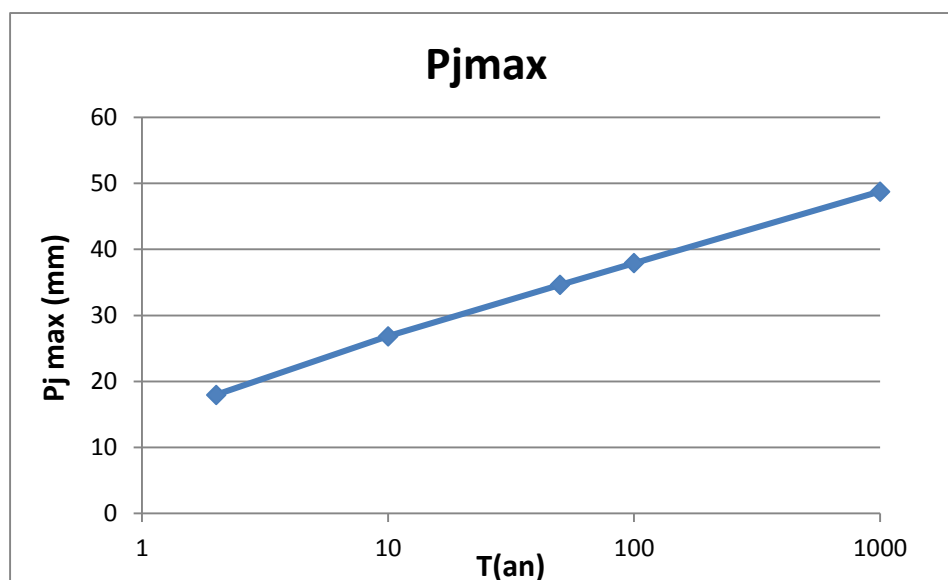


Figure V.20: Période de retour pour les Pj max

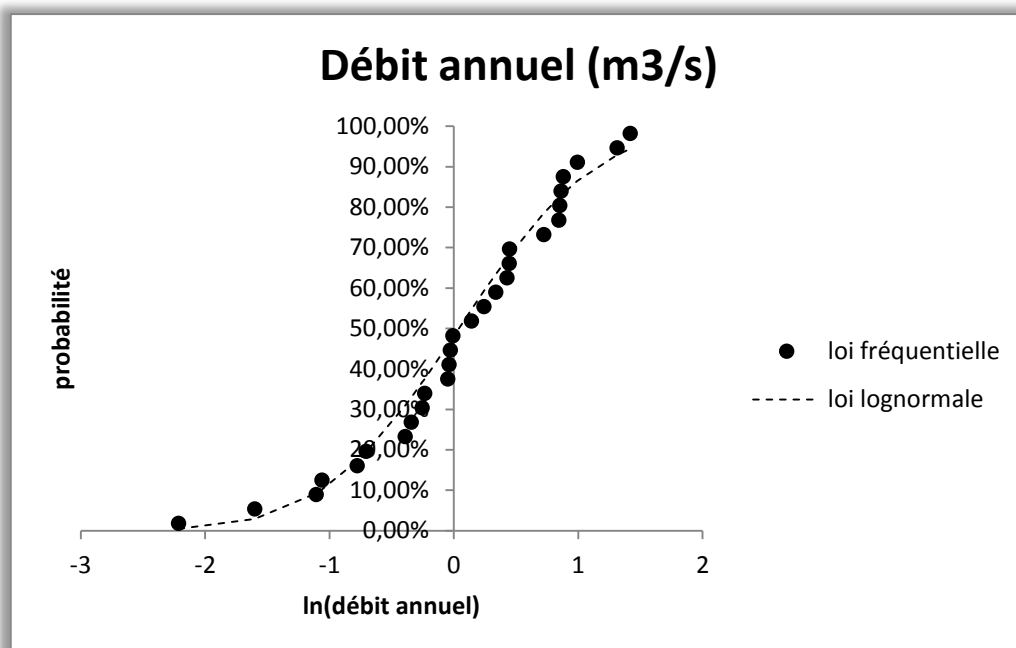


Figure V.21: ajustement de débit annuel à loi lognormale.

L'erreur maximale est de 8,4 % avec un risque d'erreur de 5% l'écart entre loi fréquentielle et Prob toléré par le test de Kolmogorov Smirnov est de 24,9% donc l'ajustement à la loi lognormale est satisfaisant.

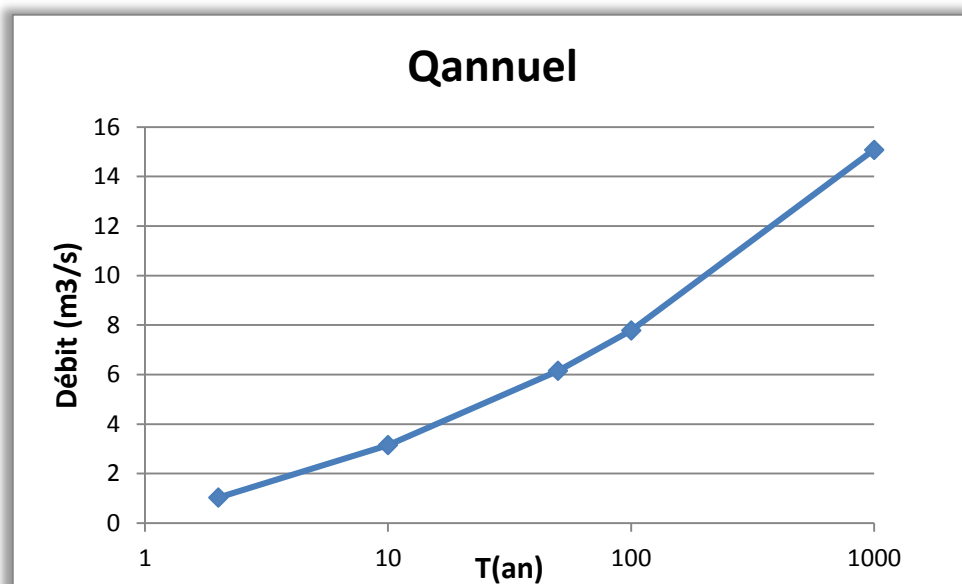


Figure V.22: période de retour pour le débit annuel

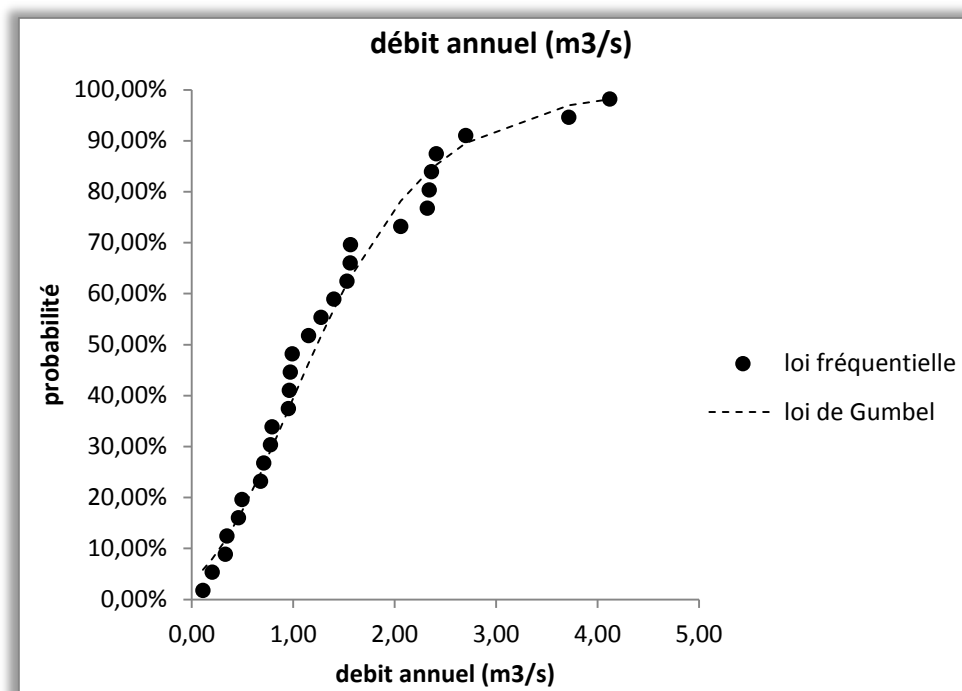


Figure V.23: ajustement de débit annuel à loi de gumbel.

L'erreur maximale est de 9,2% avec un risque d'erreur de 2% l'écart entre F_i et Prob toléré par le test de Kolmogorov Smirnov est de 27,9% donc l'ajustement à la loi de gumbel est satisfaisant.

L'ajustement de débit annuel à loi lognormale est le meilleur ajustement.

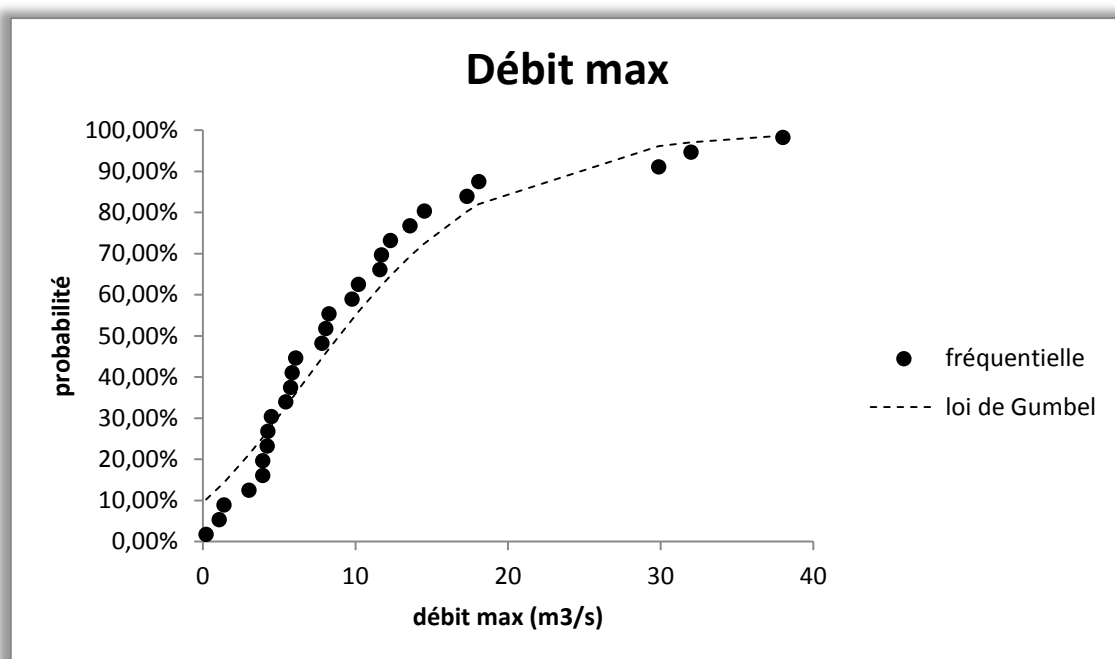


Figure V.24: ajustement de débit maximal annuel à loi de gumbel.

L'erreur maximale est de 9,3% avec un risque d'erreur de 2% l'écart entre F_i et Prob toléré par le test de Kolmogorov Smirnov est de 27,9% donc l'ajustement à la loi de gumbel est satisfaisant.

L'ajustement de débit maximal annuel à loi de gumbel est le meilleur ajustement.

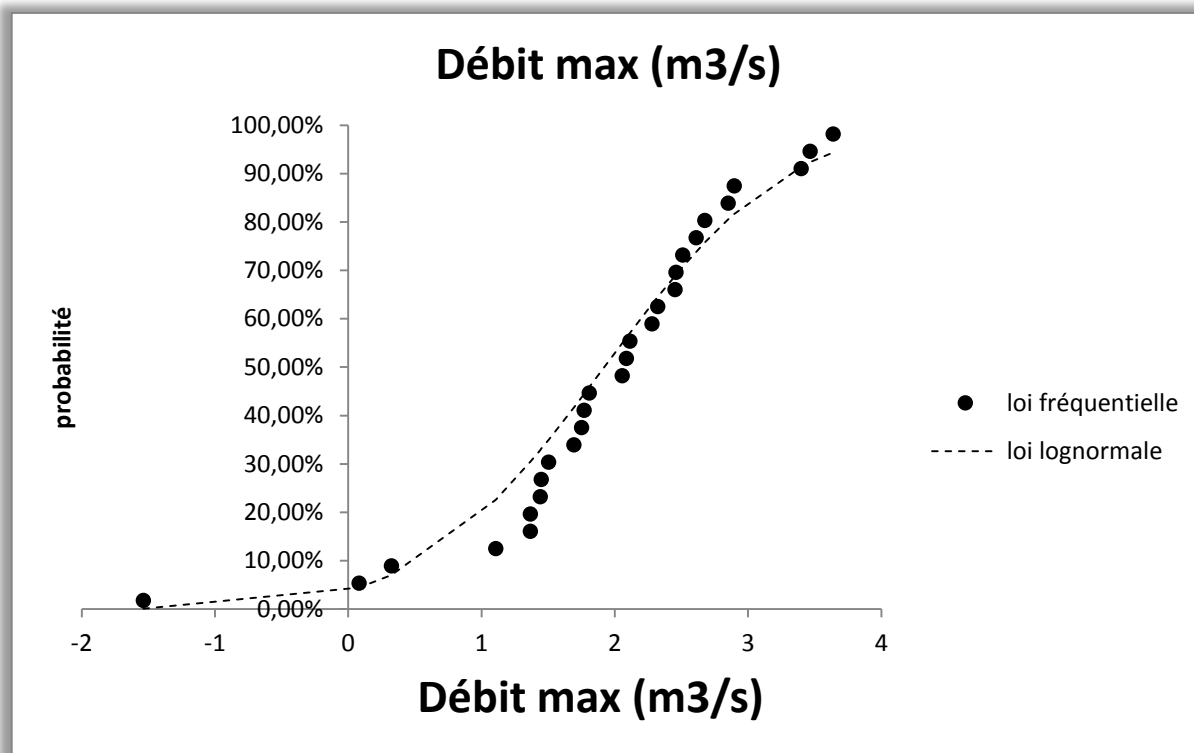


Figure V.25: ajustement de débit maximal annuel à loi lognormale.

L'erreur maximale est de 14,4% avec un risque d'erreur de 5% l'écart entre F_i et Prob toléré par le test de Kolmogorov Smirnov est de 24,9% donc l'ajustement à la loi lognormale est satisfaisant.

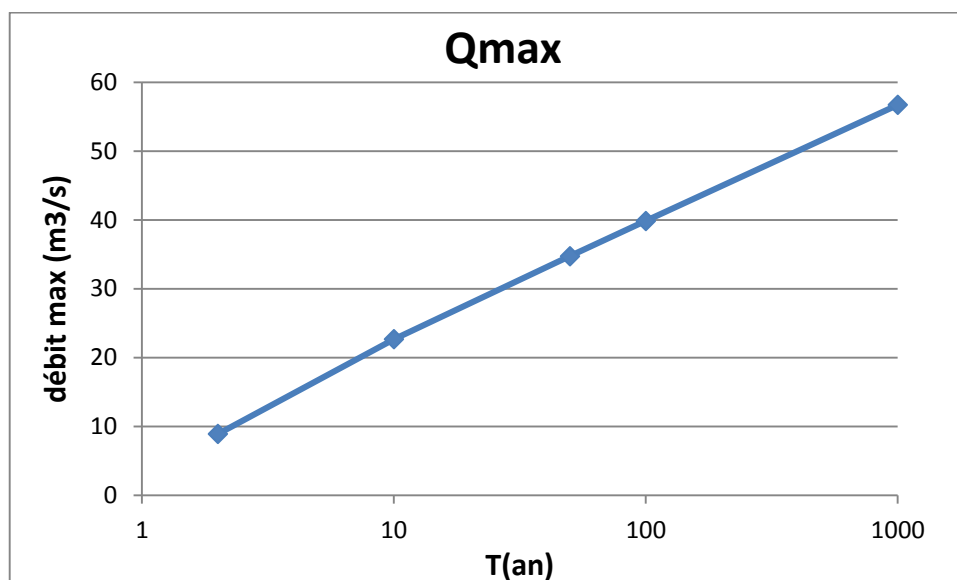


Figure V.26: période de retour pour le débit maximal.

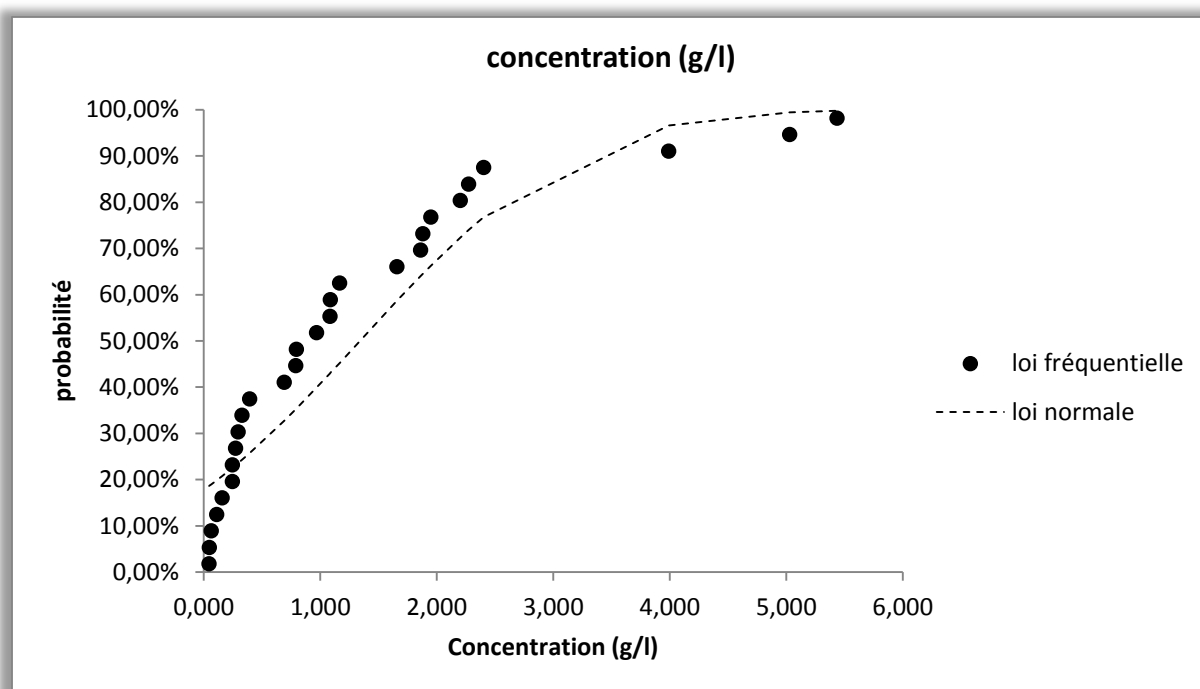


Figure V.27: ajustement de la concentration annuel à loi normale.

L'erreur maximale est de 17,3% avec un risque d'erreur de 5% l'écart entre F_i et Prob toléré par le test de Kolmogorov Smirnov est de 24,9% donc l'ajustement à la loi normale est satisfaisant.

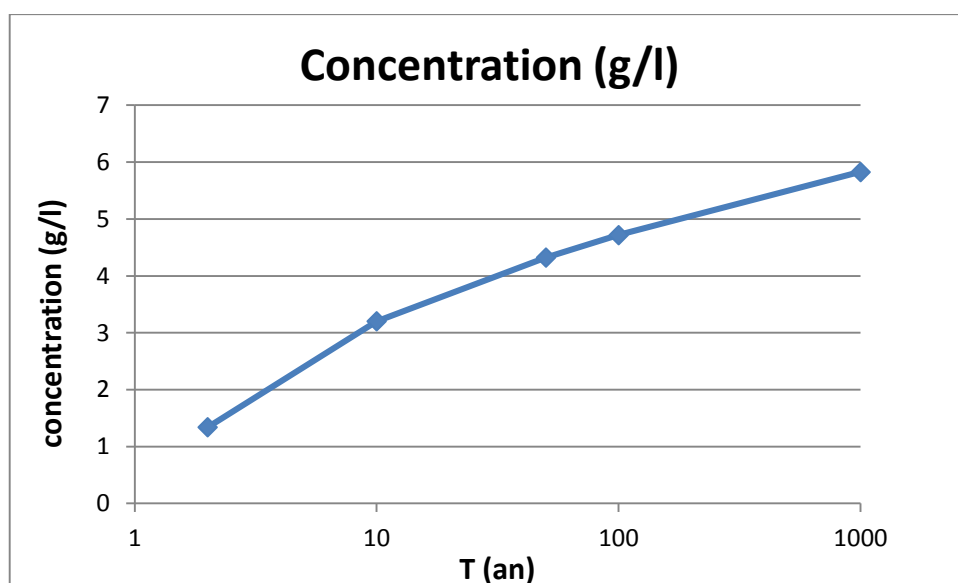


Figure V.28: variation de la concentration en fonction de la période de retour

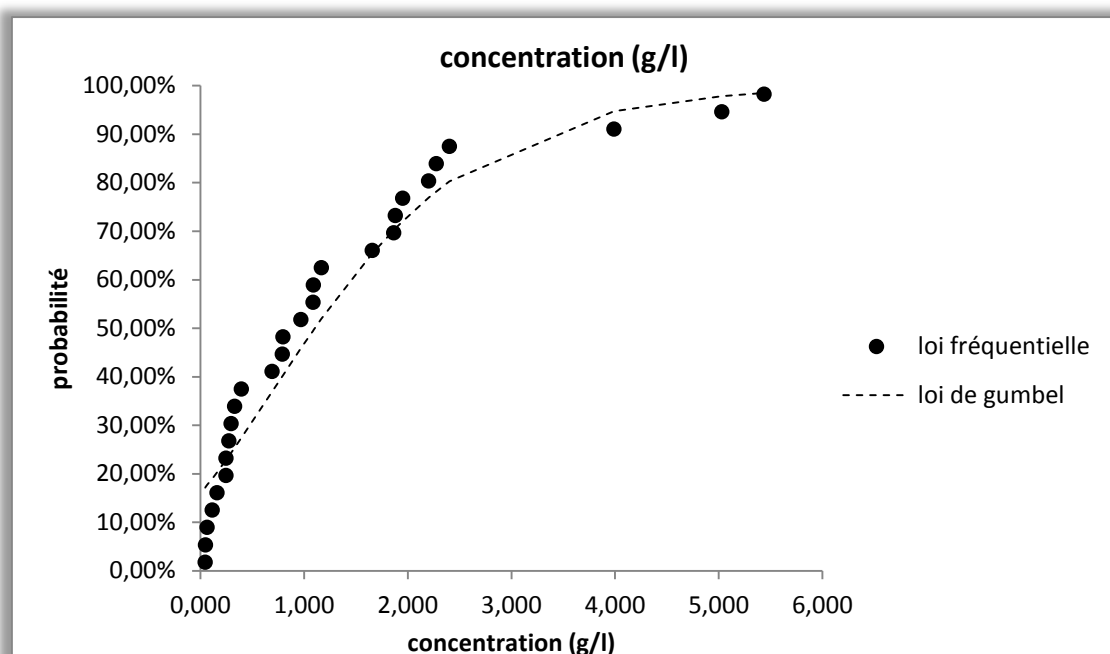


Figure V.29: ajustement de la concentration à loi de gumbel.

L'erreur maximale est de 15,4% avec un risque d'erreur de 2% l'écart entre F_i et Prob toléré par le test de Kolmogorov Smirnov est de 27,9% donc l'ajustement à la loi de gumbel est satisfaisant.

L'ajustement de la concentration à loi de gumbel est le meilleur ajustement.

V.6. Conclusion

En effet, le sous bassin versant de Sikkak a produit pour la période considérée, 30.92 millions de m³ d'eau par an avec 35400 tonnes de matériaux solides en moyenne.

Conclusion

L'eau est une ressource vitale dont les quantités disponibles sont en constante diminution. Cette diminution est due en partie à la réduction de la capacité de stockage des retenues causée par l'envasement engendré par l'érosion des bassins versants. D'où cette urgence de s'interroger sur les voies et moyens pour résoudre ce problème.

Les problèmes de mesure, d'analyse et de prédétermination des différents paramètres du transport solide des oueds des zones semi-arides sont d'actualité et nécessitent des approches de solution adéquates quant à la quantification plus précise des charges solides nécessaires au dimensionnement des ouvrages d'aménagements hydrauliques de mobilisation et de protection contre les inondations.

Les précipitations sont plus concentrées à partir de la saison d'hiver dans la période de (1970-2000), la décennie qui présente des fortes précipitations durant la plupart des mois c'est la décennie de (1970-1980).

A partir de la situation et la présentation de la région d'étude, on note en premier lieu que les Caractéristiques du milieu prévoient l'existence d'une érosion plus ou moins remarquable. A Ain Youcef, les mois d'octobre et novembre sont les mois plus riches en épisodes de crues et ce sont les mois les plus pluvieux.

Le sous bassin versant de Sikkak a produit pour la période considérée, 30.92 millions de m³ d'eau transportant 35400 tonnes de matériaux solides en moyenne par an ou durant les 28 ans d'étude. Les valeurs maximales des transports solides enregistrées à la station Ain Youcef sont observées en hiver.

Suivant les mesures continues de la charge en suspension réalisées dans le sous bassin versant de Sikkak (1972-1999), nous avons calculé la dégradation spécifique moyenne de l'ordre de 72 t/km²/an concernant ce bassin versant.

Conclusion générale

D'après l'analyse des paramètres physiographiques (coefficient de compacité Kc, L'indice de pente globale Ig, densité de drainage Dd), et la dégradation spécifique enregistrée on conclut que le sous bassin versant de Sikkak est susceptible à l'érosion résulte principalement de la différence de la lithologie, du couvert végétal, de la pente et de la taille du bassin versant.

Références bibliographiques

- [1] **Ludwig W, Probst J L. 1998.** River sediment discharge to the oceans: present-day controls and global budgets. American journal of science.
- [2] **Touaibia, B. 2009,** Erosion et transport solide en Algérie Septentrionale, Med Freind Rabbat.
- [3] **Megnounif.A , Terfous. A, et Bouanani A , 2003,** Détermination des dégradations spécifiques dans Trois bassins versants des régions méditerranéennes Algériennes, Hydrology of die Méditerranéen and Semiarid Regions (Proceedings of an international symposion held at Montpellier. Apri1 2003) JAH SPubl.no.278.
- [4] **Ghenim. A, Seddini. A, Terfous. A, 2007,** Production et exportation des sédiments en suspension lors des évènements de crue, cas du bassin versant de l'oued mouilah, Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 06, Décembre 2007.
- [5] **Bouchelkia H, Belarbi F et Remini B Décembre 2011,** Quantification du transport solide en suspension par Analyse statistique : cas du bassin versant de Mouilah, Revue Scientifique et Technique, LJEE N 19.
- [6] **Touaibia. I et Ghenim. A, Décembre 2011,** Estimation du Biais du modèle régressive puissance « Concentration —Débit » : Cas du Bassin versant du K'SOB, Revue Scientifique et Technique, LJEE N 19.
- [7] **Chibbani R., Djilli K., Roose E., 1999.** Étude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser. Bull. ORSTOM, Rés. Eros.,
- [8] http://www.agirpouurladiable.org/html/do_erosion.html.(consulté le 28/03/2015)
- [9] **Megnonif, A. 2007,** Etude du transport des sédiments en suspension dans les écoulements de surface, Thèse de doctorat, Université ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEN-.
- [10] **Bibliothèque virtuelle l'érosion,** www.alloprof.qc.ca (consulté le 25/02/2015)
- [11] **Jim Ritter 2012,** Gestion des sols, www.omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/12-054. (Consulté le 02/03/2015).
- [12] **BENHAFDA Fatima Zohra, 2005,** « étude comparative du transport solide en suspension ; calcul et mesure dans les bassins versants de l'ouest algérien » Mémoire d'ingénieur d'état en hydraulique, Université Aboubakr Belkaid, Tlemcen.
- [13] **Société Suisse de Géomorphologie (SSGm) 2009,** L'érosion fluviale régressive www.unifr.ch/geoscience/geographie/ssgmfiches/torrent/5103.php (consulté le 13/04/2015).

- [15] **BOUGUERRA S**, quantification et modélisation du transport solide dans un cours d'eau de l'Algérie septentrionale cas du bassin versant de l'oued Boumessaoud (Tlemcen), Mémoire de Magister, Université ABOU BEKR BELKAID-TLEMEN-.
- [16] **BENAICHA A.C, 2011**, Etude des processus des transports solide et leur impact sur l'alluvionnement des barrages, Mémoire de Magister, Université El Hadj Lakhdar –Batna-.
- [17] **Asnoui, F, 2014**, Etude du transport solide en suspension dans le bassin versant d'oued AL ABD, Mémoire de Master, Université ABOU BEKR BELKAID-TLEMEN-.
- [18] **OLIVRY J.C, BRICQUET J.P, THIEBAUX J.P, 1989**, bilan annuel et variations saisonnières des flux particulaires du Congo Brazzaville et de l'Obangui à Bangui. La HOUILLE BLANCHE N° 3/4 , PP 311/314.
- [19] **Bouanani .A, 2004**, Hydrologie, transport solide et modélisation étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW— Algérie), thèse de doctorat en géologie appliquée : Option hydrogéologie; Université Aboubakr Belkaid –Tlemcen-.
- [20] **Jean Paul GRANIER**, Juin1993, la mesure in situ du débit solide des cours d'eau, ORSTOM Service hydrologique.
- [21] **M.Henri PELLERAY**, Etude sommaire des transports solides dans un petit bassin du nord-Cameroun, Service Hydrologique de l'ORSTOM au Cameroun.
- [22] **Adjim. H, 2004**, Evaluation et affectation des ressources hydriques superficielles du bassin versant de la Tafna Thèse de magister d'hydraulique, Université Abou bekr Belkaid Tlemcen.
- [23] **Berrezoug T et Kissi S, 2002** : La protection du futur barrage « Sikkak » contre la pollution et l'envasement. PFE d'ingénieur d'Etat d'hydraulique, Université Abou bekr Belkaid Tlemcen.
- [24] **BEMMOUSSAT Abdelkader 2012**, Impact de l'activité agricole sur la qualité des eaux souterraines à travers le bassin versant de la Tafna, Mémoire de magister, Université Abou bekr Belkaid Tlemcen.
- [25] **Bureau D'études Lombardi, 2005**, Monographie du barrage de ain-youcef , Ministère des ressources en eau Agence Nationale des barrages Direction des Etudes Techniques.
- [26] **Cours d'hydrologie**, www.echo2.epfl.ch/e-hydrologie/chapitres/chapitre7/chapitre7.html (consulté le 05/05/2015)
- [27] **LABORDE J.P, 2009**, Eléments d'hydrologie de surface, école polytechnique de l'Université de Nice - Sophia Antipolis -Toulouse-.
- [28] **L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques d'Oran (ANRH)**.