Sommaire

Remerciement ***I***

Dédicace ***II***

Résumé ***III***

Liste des tableaux ***IV***

Liste des figures ***V***

Introduction générale ***1***

Chapitre I. Généralités sur les crues ***3***

I.1. Introduction ***3***

I.2. Processus de formation d'une crue ***5***

I.2.1. influence des facteurs naturels 5

I.2.1.1. Surface et forme du bassin versant 5

I.2.1.2. Configuration du lit du cours d'eau 5

I.2.1.3. Densité des cours d'eaux et perméabilité du bassin versant 5

I.2.1.4. Couvert végétal 6

I.2.2. Facteurs anthropiques 6

I.3. Type de crue ***6***

I.3.1. Les crues lentes 6

I.3.2. Crue rapide 6

I.4. Différentes méthodes d'évaluation des crues ***7***

I.4.1. Méthodes historiques 8

I.4.2. Méthodes empiriques 8

I.4.2.1. Formule de Mallet – Gauthier 8

I.4.2.2. Formule de POSSENTI 8

I.4.2. 3. Formule de Turraza 9

2.2. Formule de SOKOLOVSKY 9

I.5. Conclusion : *Erreur ! Signet non défini.*

Chapitre II. Erosion et transport solide ***10***

en suspension ***10***

II.3. Transport solide ***29***

II.3.1. Définition ***29***

II.3.3. Nature des apports solides ***31***

II.3.4. Capacité de transport d'un cours d'eau 32
II.3.4 La capacité de transport est variable dans le temps et dans l'espace 32
II.3.5 Mesure de la concentration de la matière en suspension 33
II.3.6 Erosion et transport solide en Algérie 33
II.3.7 Conclusion 36
Chapitre III 35
Bassin versant de l'oued Mouilah 35
III.1.Introduction 36
III.2.Position géographique 36
III.3.Etude morphométrique 37
- La forme du bassin versant 37

III.4. Etude de relief 38
III.4.1. Hypsométrie 38
III.4.2. Les pentes 39
II.4.2.1. La pente moyenne du bassin versant 39
II.4.2.2. Indice de la pente globale Ig 40
III.5.Réseau hydrographie du bassin versant 41
III.5.1. Densité de drainage 42
III.5.2. Rapport de confluence 42
III.5.3. Rapport des longueurs 42
III.6-Sols et végétation 43
III.7-Le climat 44
III.8-Conclusion 45
Chapitre IV 46
Etude hydro-climatique du bassin de l'oued Mouilah 46
IV.1. Introduction 47
IV.2. Etude des pluies 47
IV.2.1 Pluviométrie annuelle 47
IV.2.1.1. Approche graphique 48
IV.2.1.2.Approche par un test d'adéquation 48
a) Loi normale ou Laplace-Gauss 48
b) Application de la loi log normale sur les précipitations annuelles 51
c) Application de la loi de Gumbel sur les précipitations mensuelles maximales annuelles 52
IV.2.2 Variation annuelle des précipitations (1973-2005) 53
IV.2.3 Variation mensuelle des précipitations (1973-2005) 54

VI.3. Etude des débits ____ *56*
IV.3.1 Variation annuelle des débits (1977-1993) ____ 57
IV.3.2. Variation des débits extrêmes saisonniers ____ 59
IV.3.3 Corrélation entre débits solides en suspension et débits liquides ____ *60*
IV.4. Etude des apports ____ *62*
IV.4.1. Apports liquides et solides annuels ____ 64
IV.4 .1 .Apports liquides et solides saisonniers ____ 65
IV.5. Etude des crues : ____ *67*
IV.5.1 Evolution de la concentration des sédiments en suspension et des débits liquides durant les crues (courbes hystérésis) ____ 70
IV.5.2. Application au bassin de l'oued Mouilah : ____ 72
IV.5.3 Analyse des hystérises : ---------- 74
IV.6. Conclusion générale ____ 76

Introduction générale

L'eau constitue l'un des éléments essentiels à la vie. Son intérêt a incité de nombreux scientifiques à faire des recherches approfondies afin de mieux contrôler et modéliser son cycle. Plusieurs sciences ont découlées de ces études effectuées durant des siècles, parmi lesquelles nous trouvons la mécanique des fluides, l'hydraulique, l'hydrologie……, selon le but et l'objet que l'on veut modéliser et estimer, on choisit la discipline adapté au but de l'étude.

Le travail mené dans le cadre de ce mémoire porte sur les crues, c'est-à-dire l'augmentation plus ou moins brutale du débit des cours d'eau, et leur origine par le biais de l'étude des pluies et des débits. Les crues sont décrites par leur débit, leur durée, et leur fréquence. Les crues ont un rôle marquant et leur compréhension présente un intérêt scientifique et pratique de premier ordre, pour s'en protéger efficacement, il importe qu'on connaisse les causes et les caractéristiques des phénomènes naturels que l'on doit prévoir avec d'autant plus de soin qu'ils peuvent être désastreux et meurtriers.

Dans ce travail, on s'est intéressé à l'Oued Mouilah, considéré comme le plus important affluent de la Tafna. Pour ce faire, on étudie les différents épisodes de crue, leur rôle dans l'amplification du transport solide et l'érosion, ainsi que le comportement du bassin lors de ces évènements exceptionnels.

La région d'étude est caractérisée par un climat semi-aride. Les précipitations y sont irrégulières ; la pluie moyenne annuelle est de 302.7mm, dont la période humide s'étale du mois de novembre jusqu'à Mai.

La pluie ne tombe pas d'une façon continue, mais peut même se manifester en périodes sèches.

D'autre part cette région est soumise à des précipitations intenses qui peuvent engendrer des crues et des inondations catastrophiques.

Notre étude s'articulera sur quatre chapitres :

- **Chapitre I : « étude des crues »**

Ce chapitre traite et définie les processus de formation des crues dans les bassins versants et les méthodes d'estimation de crues.

- **Chapitre II : « généralité sur le transport solide et l'érosion »**

Une revue bibliographie, que nous intitulons 'érosion et transport solide', inclus les définitions, les types, les causes et les facteurs de l'érosion et du transport solide dans le bassin versant, ainsi que les méthodes d'évaluation du transport solide en suspension.

- **Chapitre III: « présentation du bassin versant de l'Oued Mouilah »**

Ce chapitre englobe la présentation générale du bassin versant dont : la situation géographique, le sol, la végétation et les principaux paramètres morphométriques.

- **Chapitre IV : « étude hydro-climatique du bassin de l'oued Mouilah »**

Ce chapitre contient quatre parties essentielles

- la première concerne l'étude des pluies, Cette étude est basée sur une analyse statistique par les trois lois d'ajustement loi de Gumbel ; loi normal et log normale.
- la deuxième concerne l'étude des écoulements et traite les relations reliant les différentes données (débits liquide, débit solide, concentration).
- une troisième partie étudie les apports liquides et solides de l'oued Mouilah, dans laquelle nous avons effectué les différents calculs pendant la période d'étude, pour mettre en lumière l'évolution de ces deux grandeurs, et pour connaitre les années et les saisons les plus importantes pour ce bassin.
- une quatrième partie représente une étude globalisée sur tous les évènements qui sont produits le long des 16 années hydrologique (1977-1993).

Chapitre I. Généralités sur les crues

I.1. Introduction

Une crue est un phénomène hydrologique qui s'exprime par une pulsation brutale dans le niveau du cours d'eau. Elle est décrite à partir de trois paramètres : le débit, la hauteur d'eau et la vitesse du courant.

Selon F. Frécaut (1971), il convient de distinguer crues et hautes eaux ; les hautes eaux moyennes représentent une situation saisonnière durable. Les crues au contraire, constituent avec les étiages une situation extrême dans le comportement des cours d'eau. Il s'agit de gonflements fluviaux exceptionnels et irréguliers, tant en saison froide (période de hautes eaux), qu'en saison chaude (période de basses eaux). Pour certains auteurs les crues sont des débits égaux ou supérieurs à un certain multiple du module annuel (03 à 05 fois le module).

On distingue :

- Les crues simples qui sont caractérisées par une seule montée du niveau d'eau, suivit d'une descente de ce niveau. (figure I.1)
- Les crues complexes : Elles sont caractérisées par plusieurs baisses et plusieurs hausses des niveaux d'eau, ce qui témoigne de la pluralité des facteurs responsables de la crue.(figure I.2)

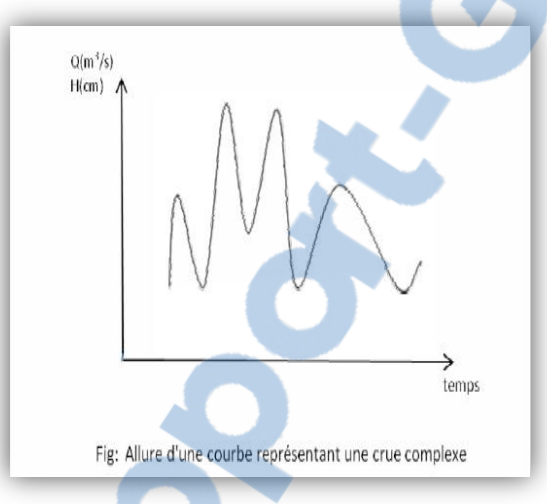


Figure I.1 une crue complexe

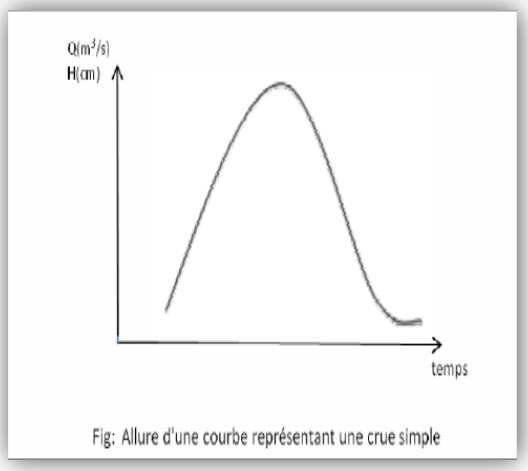


Figure I.2 une crue simple

Une crue est influencée par de nombreuses variables parmi lesquelles : l'intensité, la durée et la distribution de la pluie dans le bassin, la topographie et l'occupation du sol. Les débits de crues ont une influence directe sur le régime hydrologique et en particulier sur les Oueds, à cause de la grande irrégularité, passant de débits nuls à des débits de crues exceptionnels (Asnouni. F, 2014)

Rapport-Gratuit.com

I.2. Processus de formation d'une crue

Comprendre les processus de formation d'une crue revient à analyser les différents facteurs concourant à l'augmentation temporaire des débits d'un cours d'eau. En simplifiant, on distingue:

• **l'eau mobilisable**, constituée de l'eau reçue par le bassin versant.

• **Le ruissellement**, qui correspond à la part de l'eau qui n'a pu s'infiltrer dans le sol. Il dépend de la nature du sol, de son occupation de surface et de l'intensité de l'épisode pluvieux

• **Le temps de concentration**, qui est défini par la durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau partant du point le plus éloigné de l'exutoire du bassin versant parvienne jusqu'à celui-ci.

I.2.1. influence des facteurs naturels

I.2.1.1. Surface et forme du bassin versant

Pour une même surface, l'allure de l'hydrogramme de crue résultant d'une pluie donnée, est très différente suivant la forme du bassin versant ; un bassin très allongé ne réagit pas comme un bassin de forme ramassée ce qui a amené l'utilisation d'un indice « coefficient de compacité de Gravelius » pour caractériser la forme du bassin versant. Plus l'indice est faible, plus la concentration des eaux apportées par les affluents est rapide et plus les crues risquent d'être brutales et bien différenciées (Roche, 1963)**.**

I.2.1.2. Configuration du lit du cours d'eau

La pente exerce une influence directe sur la rapidité de l'écoulement et donc sur la puissance de la crue. Si le profil en long du cours d'eau est assimilable à une suite de segments plus ou moins pentus, il exerce une action visible sur la crue. Le profil en travers est aussi important ; pour un même débit de crue, un cours d'eau encaissé verra sa hauteur d'eau monter beaucoup plus vite qu'un cours d'eau à profil plus évasé. En contrepartie, ce dernier a de plus grands risques de débordements (Cosandy & Robinson 2012)**.**

I.2.1.3. Densité des cours d'eaux et perméabilité du bassin versant

La densité des cours d'eau est fonction de la nature du sol. Le réseau est d'autant plus développé et complexe que le terrain est moins perméable. Plus l'imperméabilité est forte et plus les eaux de pluies sont disponibles pour le ruissellement de surface. Ainsi, les cours d'eau drainant les régions imperméables ont une plus forte probabilité à développer des crues dangereuses (Asnouni, 2014)**.**

I.2.1.4. Couvert végétal

L'on sait depuis longtemps qu'une couverture végétale dense réduit et ralenti considérablement l'écoulement (Cosandy & Robinson 2012), elle agit sur le ruissellement, retient une quantité de pluie, évapore l'eau, donc elle est considérée comme un facteur indispensable dans la protection contre les crues.

I.2.2. Facteurs anthropiques

Les actions de l'homme se résument principalement à :

- l'i**mperméabilisation des sols en** conséquences d'aménagements urbains ou agricoles;
- **Défiance des dispositifs de protection comme les** digues et déversoirs.

I.3. Type de crue

On distingue 2 types de crues, les crues lentes et les crues rapides

I.3.1. Les crues lentes

Les crues lentes sont plutôt des crues d'hiver. La lente montée des eaux permet de prévoir le phénomène quelques heures voir plusieurs jours à l'avance. Crue par remontée de la nappe, elle se produit sur les sols poreux, perméables et sans couverture étanche favorisant les crues de nappes en augmentant la capacité de stockage de l'eau. Suite à plusieurs années humides consécutives, le niveau de la nappe souterraine est élevé. L'arrivée d'un épisode très pluvieux durant la saison humide, fini par saturer la nappe et le niveau de l'eau remonte jusqu'à l'air libre. Certains points hauts du bassin versant peuvent alors être inondés. Ces crues sévères sont fortes et durables dans le temps [1].

I.3.2. Crue rapide

Lorsque des précipitations intenses, telles des averses violentes, intéresse un bassin versant, les eaux de ruissellement se concentrent rapidement dans le cours d'eau engendrant des crues rapides. Généralement le temps de concentration des eaux est minime devant les crues lentes. Les crues rapides ou torrentielles sont caractérisées par une augmentation brutale du débit des cours d'eau et une vitesse élevée des écoulements, en raison d'averses intenses et/ou de la présence de fortes pentes. Ces crues concernent donc le plus souvent les torrents montagnards, mais aussi les cours d'eau méditerranéens et les oueds des zones semi-arides.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Un système torrentiel présente trois parties : une partie amont, le bassin de réception, qui collecte les eaux de ruissellement ; une partie médiane, le chenal d'écoulement, qui les concentre ; à l'aval, le cône de déjection torrentiel sur lequel divaguent parfois eaux et débris torrentiels. La crue torrentielle est consécutive à des précipitations violentes, qui peuvent provoquer en outre de nombreux ravinements dans le bassin de réception en amont. Le ruissellement très rapide s'accompagne de forts transports solides pouvant constituer des laves torrentielles, qui s'écoulent à grande vitesse dans le chenal pour s'accumuler ensuite sur les cônes de déjection. L'histoire des catastrophes laisse apparaitre que le risque de crue torrentielle est privilégié sur les cônes de déjection, où de nombreux villages montagnards se sont souvent impliqués [1].

Il est aussi possible d'observer des crues torrentielles sur des rivières situées hors zone de montagne, à l'aval immédiat de reliefs marqués par exemple, mais dont la pente moyenne est forte, compris entre 1 et 6 %. Leurs débits de crue sont plus importants que pour les torrents et la vitesse des écoulements plus élevées. On parle parfois de crue rapide, de crue subite et même de crue éclair, ou flash-flood des auteurs anglo-saxons. Les crues torrentielles peuvent provoquer des affouillements, des érosions de berges qui sont liées à la vitesse du débit et à la forte proportion de transports solides.

Pour les crues rapides, généralement, les eaux transportent de grandes quantités de sédiments et de flottants (bois morts, débris …) ce qui se traduit par une forte érosion du lit et un dépôt de matières transportées. Ces dernières peuvent former des barrages, appelés embâcles, qui s'ils viennent à céder, libèrent une vague pouvant être très dangereuse voire mortelle [1].

I.4. Différentes méthodes d'évaluation des crues

Les techniques utilisées pour la détermination des crues dépendent pour une grande part des données disponibles. Presque chaque problème qui se produit est uniquement, du aux variations des conditions et des données, qui fait que c'est la disponibilité des données plutôt que la nature des problèmes qui conditionnent la procédure. Il n'existe pas encore une unicité de calcul des crues, les méthodes de calcul diffèrent aussi selon le chargé d'études. (Krim, 2006)
Nous rappelons ci-dessous, les différentes méthodes de calcul des crues citant les avantages et les inconvénients de chacune.

I.4.1. Méthodes historiques

Comprend les études des archives, les enquêtes auprès des populations et les recherches d'anciennes traces des crues (les niveaux atteints par les crues du passé).

I.4.2. Méthodes empiriques

Les méthodes empiriques sont des excellents outils pour la détermination d'un hydrogramme. En effet, elles permettent toute au long du développement du calcul, de rationaliser les résultats et de dégager ainsi les meilleures caractéristiques du projet. (Boudjerda, 2005). Les méthodes consistent à établir les relations entre le débit et la surface du bassin versant, la pluie et la période de retour comme les formules de Greager, Fuller, Snyder, Possenti, etc.…
Voici quelques formules :

I.4.2.1. Formule de Mallet – Gauthier

$$Q_{maxp\%} = 2K \log(1 + A.P_{moy} . \frac{S}{\sqrt{L}} (1 + \sqrt{4\log T - \log S})$$

K : une constante comprise entre 1-3.

P_{moy} : Pluie moyenne annuelle (m)

S : Surface du bassin en Km².

L : Longueur du talweg principal en Km.

T : Période de retour.

I.4.2.2. Formule de POSSENTI

$$Q\max = \frac{\mu.P\max j\%.S}{Lp}$$

Pmax j% : Pluie maximale journalière correspondante à la période de retour donnée (m).

µ : Coefficient compris entre 700 et 800

Lp : Longueur du cours d'eau principal en (Km)

I.4.2. 3. Formule de Turraza

Cette formule utilise l'intensité moyenne maximale de précipitations déterminées sur un intervalle de référence égal au temps de concentration du bassin versant.

$$Q_{max,p\%} = \frac{C.i_{tc}.S}{3.6}$$

Avec :

S : Surface du sous bassin. i_{tc}

$\mathbf{i_{tc}}$: Intensité moyenne maximale des précipitations pendant une durée égale au temps de concentration en mm/h.

C : coefficient de ruissellement de la crue considérée pour une probabilité P%.

Cette formule est bien adaptée aux petits bassins (Taha et Hugo Année et Bobee et Lemonier, 2001).

2.2. Formule de SOKOLOVSKY

$$Q_{max,p\%} = \frac{0.28.(Ptc - Ho).\alpha\%.F.S}{Tm}$$

***S*:** superficie du bassin versant (km^2)

H_0 : pertes initiales en mm. H_0 = 8 mm

αp% : coefficient de ruissellement de la crue probable pour une période donnée ;

F : Coefficient de forme de la crue ;

$t_m = t_c$

Chapitre II. Erosion et transport solide en suspension

II.1. Introduction

L'Algérie, caractérisée par un climat semi-aride, est menacée par l'érosion des terres qui provoque l'augmentation du transport solide et un envasement croissant des barrages. Ce phénomène constitue un problème majeur au niveau des bassins versants. La dégradation des sols a des conséquences très néfastes sur la productivité des terres et sur la qualité des eaux. Malgré les efforts de luttes antiérosives telles que le reboisement et la reforestation (Bouguerra, 2014**)**.

C'est Dans ce contexte que nous allons étudier dans ce chapitre le phénomène de l'érosion et de transport solide en suspension, pour connaitre les processus et les facteurs influençant les deux phénomènes : leurs différents mécanismes, causes, et caractéristiques.

II.2. L'érosion

II.2.1. Définition de l'érosion

L'érosion des sols correspond au détachement et au transport des particules du sol, par différent agents (gravité, eau, vent, glace), de leur emplacement d'origine à un endroit de dépôt à l'aval., EINSTEIN (1950) affirme que chaque particule qui passe dans une section de mesures doit satisfaire deux conditions : (a) elle doit être érodée à un endroit quelconque des versants à l'amont et (b) elle doit être transportée par l'écoulement (ruissellement) de l'endroit d'érosion vers l'exutoire du bassin. Donc, la production de sédiments est limitée par la disponibilité de sédiments sur les versants et par la capacité de transport de l'écoulement. Les sédiments qui arrivent aux cours d'eau sont produits dans le bassin versant par les agents naturels et par les processus chimiques qui dégradent les roches et les transforment en sols. Ce processus est très lent, dont la vitesse d'érosion est de l'ordre de 10 t/ha/an, c'est à dire, 0.4 mm/an (KIRKBY, 1980).

La dynamique des particules érodées est gérée par des processus discontinus à fortes variation spatio-temporelles, difficiles à décrire sous forme d'équation mathématique.La pluie et le vent sont les deux facteurs climatiques qui influencent le plus l'érosion des sols .

Dans cette étude on s'intéresse à l'érosion hydrique, qui est un phénomène largement répandu au Maghreb. En Algérie, elle affecte durement le patrimoine foncier et 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 (Chibbaniet al.,1999).

II.2.2. Formes de l'érosion hydrique

II.2.2.1. L'érosion en nappe ou "sheet érosion"

En fait, ce n'est qu'après formation des flaques et débordement de l'eau non infiltrée d'une flaque à l'autre, que naît le ruissellement en nappe. Celui-ci s'étalant à la surface du sol gardera une faible vitesse même sur des pentes de 5 à 10 % à cause de la rugosité du sol (mottes, herbes, feuilles, racines, cailloux, etc...) qui l'empêchent de dépasser la vitesse limite de 25 cm/seconde.

En illustration de cette forme d'érosion, voici un ensemble de photos qui montrent clairement comment l'érosion en nappe se manifeste en plein paysage [2]

Figure II.1 : Erosion en nappe.

C'est le stade initial de la dégradation des sols. Cette érosion en nappe entraîne la dégradation du sol sur l'ensemble de sa surface. Autrement dit, c'est une forme d'érosion diffuse. De ce fait, elle est peu visible à courte échelle temporelle ou échelle d'une vie humaine.

Le signe le plus connu de l'érosion en nappe est donc la présence de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés. Egalement, il y a un autre symptôme de l'érosion en nappe est la remontée des cailloux en surface par les outils de travail du sol. Les paysans disent que "les

cailloux poussent". Il s'agit en réalité d'une fonte de l'horizon humifère et d'un travail profond du sol qui remonte en surface les cailloux. Après quelques pluies, les terres fines sont entraînées par les pluies tandis que les cailloux, trop lourds pour être emportés, s'accumulent à la surface du sol.

L'importance de l'érosion en nappe dépend à la fois : -
de l'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement, -
de l'énergie des pluies qui détachent les particules susceptibles de migrer,
- de la durée des pluies et/ou de l'humidité avant les pluies.

Lorsqu'il y a l'érosion en nappe, le déplacement des particules se fait d'abord par effet "splash" à courte distance et ensuite par le ruissellement en nappe. La battance des gouttes de pluie envoie des gouttelettes accompagnées de particules fines dans toutes les directions. L'eau de pluie non infiltrée vers le sous-sol, forme des flaquent qui débordent et communiques entre elles pour constituer le ruissellement en nappe. Celui-ci s'étale sur la surface du sol et gardeune faible vitesse sur les pentes modérées de 5 à 10 % à cause de la rugosité du sol (mottes, herbes, feuilles, racines, cailloux, etc...) qui l'empêchent de dépasser la vitesse limite de 25 cm/seconde. (Dufour, J. 1990.)

II.2.2.2. L'érosion linéaire (micro-channel ou Rill érosion)

Lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration de la surface du sol, il se forme d'abord des flaques; ensuite ces flaques communiquent par des filets d'eau et lorsque ces filets d'eau ont atteint une certaine vitesse, 25 cm par seconde d'après Hjulström (1935), ils acquièrent une énergie propre qui va créer une érosion limitée dans l'espace par des lignes d'écoulement. Cette énergie n'est plus dispersée sur l'ensemble de la surface du sol, mais elle se concentre sur des lignes de plus forte pente. L'érosion linéaire est donc un indice que le ruissellement s'est organisé, qu'il a pris de la vitesse et acquis une énergie cinétique capable d'entailler le sol et d'emporter des particules de plus en plus grosses. Contrairement à l'érosion en nappe qui est sélective, L'érosion linéaire peut arracher et transporter des graviers ou des cailloux et même des blocs (Yacouba.1999).
L'érosion linéaire est exprimée par tous les creusements linéaires qui entaillent la surface du sol suivant diverses formes et dimensions (griffes, rigoles, ravines, etc.).
En fait, L'érosion linéaire apparaît lorsque le ruissellement en nappe s'organise et creuse des formes de plus en plus profondes. On parle de :

· **Griffes** lorsque les petits canaux ont quelques centimètres de profondeur

· **Rigoles** lorsque les canaux dépassent 10 cm de profondeur mais sont encore effaçables par les techniques culturales.

En effet, sur un bassin versant ou une parcelle, l'érosion en rigole succède à l'érosion en nappe par concentration du ruissellement dans les creux. A ce stade, les rigoles ne convergent pas mais forment des ruisselets parallèles.

Nappe ravinante lorsque les creux ne dépassent pas 10 à 20 cm mais que leur largeur atteint plusieurs mètres.

· **Ravines** lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de cm (plus de 30 cm) et en particulier, lorsqu'ils ne sont plus effaçables par les techniques culturales.

A l'intérieur des ravines on peut encore distinguer des petites ravines dont le lit est encore encombré de végétation herbacée et surtout arbustive et qu'on pourra fixer rapidement par des méthodes biologiques. Par contre, dans des grandes ravines qui peuvent s'étaler sur plusieurs kilomètres, le canal central comporte des blocs rocheux, témoins d'un charriage important e d'une certaine torrentialité [3].

Figure II.2 : l'érosion en rigole

Rapport-Gratuit.com

Figure II.3 : L'érosion en ravine

Figure II.4 : approfondissement en ravine

Figure II.5 : L'érosion en griffe

II.2.2.3. L'érosion en masse

Les mouvements de masse concernent un volume du sol à l'intérieur de la couverture pédologique. On attribue à l'érosion en masse tout déplacement de terre selon des formes non définies. Ces phénomènes sont nombreux dont on peut citer :

a- Les glissements

Sont des décollements d'une couche plus ou moins épaisse de sol, glissant sur un horizon plus compact (souvent de la roche altérée), servant de plan de glissement. Ce phénomène est très

courant sur les schistes et sur les marnes en voie d'altération. Les glissements se produisent lorsque la contrainte de cisaillement dépasse la résistance du sol ou lorsque la limite de plasticité ou de liquidité est atteinte [3].

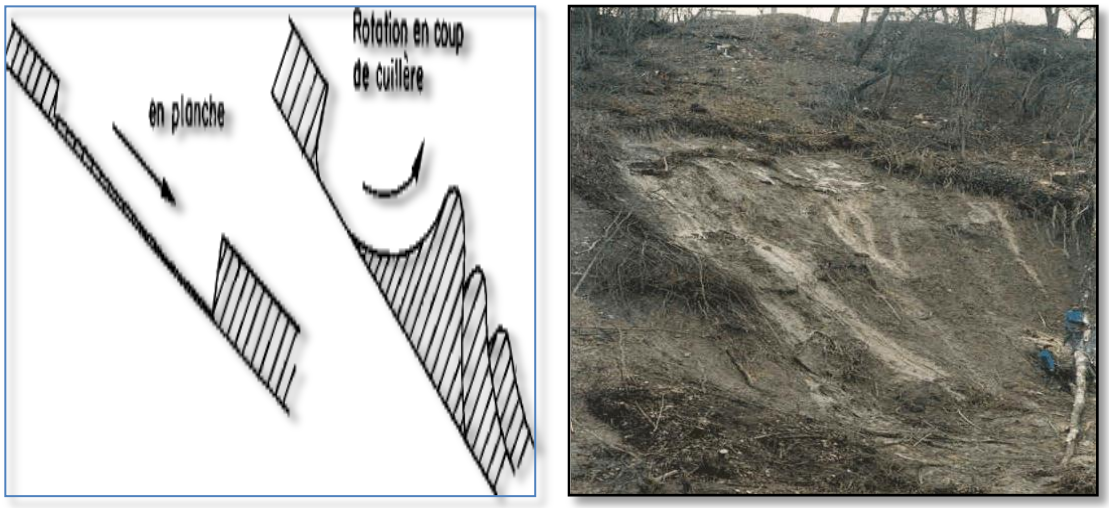


Figure II.6 : glissement du sol

b- Coulées boueuses et laves torrentielles

Ce sont des mélanges d'eau et de terre à haute densité ayant dépassé le point de liquidité et qui emportent à grande vitesse des masses considérables de boue et de blocs de roches de taille imposante. Les matériaux fins sont repris ultérieurement par l'érosion hydrique en nappe ou en rigole, laissant en place une masse de cailloux et de blocs de taille très hétérogène.

Une lave torrentielle est un mélange de matériaux solides (blocs, graviers, etc.) transportés par un fluide visqueux (composé de sédiments fins, d'argiles et d'eau) sous l'action de la gravité et, qui prend naissance dans le réseau de drainage.

Une lave torrentielle ne survient qu'à l'intérieur de chenaux préexistants caractérisés par une inclinaison souvent forte (pente > 5° en général). Par opposition, une coulée boueuse survient suite à une instabilité de terrain en pente, sans qu'il y ait un chenal. Lorsqu'une coulée boueuse rejoint un chenal d'écoulement et se mélange à un fluide clair ou visqueux, on parle alors de lave torrentielle.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Les coulées boueuses consistent en la propagation de matériaux sans cohésion ou ayant perdu leur cohésion dès la mise en mouvement, matériaux mélangés à une quantité d'eau telle que la masse en mouvement a franchi sa limite de liquidité. Les matériaux susceptibles de perdre ainsi leur cohésion sont des argiles, des limons, des sols, des roches décomposées ou des éboulis fins. L'eau peut pénétrer au sein des matériaux par infiltration avant le déclenchement de la coulée ou au moment de la rupture par concentration des eaux de ruissellement.

Les laves torrentielles restent difficiles à prévoir. Il n'existe pas de modèle à base physique utilisés pour la modélisation des avalanches.

Figure II.7 : Lave torrentielle

Figure II.8 : Coulées boueuses

C - Les formes locales

Il s'agit d'éboulements rocheux ou d'effondrements de versants qui entraînent des glissements localisés. Ceux-ci sont très fréquents en tête de ravine: ils entraînent l'éboulement de la partie supérieure d'une ravine et font progresser la ravine vers le sommet de la colline par érosion régressive.

En d'autres termes, les éboulements sont des chutes de masses rocheuses et ont des mouvements rapides, discontinus et brutaux résultant de l'action de la pesanteur et affectant des matériaux rigides et fracturés tels que calcaires, grès, roches cristallines, ... Ces chutes se produisent par basculement, rupture de pied, glissement banc sur banc, à partir de falaises, escarpements rocheux, formations meubles à blocs (moraines par exemple), blocs provisoirement immobilisés dans une pente.

Figure II.9 : L'érosion en masse par éboulement

- Les facteurs qui favorisent les mouvements de masse sont les secousses sismiques, les fissurations suite à l'alternance gel/dégel ou à la dessiccation des argiles gonflantes, l'altération de la roche, l'humectation jusqu'à saturation de la couverture pédologique, l'humectation du plan de glissement qui devient savonneux (présence de limons issus de l'altération des micas), des roches présentant des plans de clivage ou de fracture préférentiels (argiles, marnes, schistes, roches mi-cassées, gneiss).

-Par ailleurs, l'homme peut accélérer la fréquence de ces mouvements de masse en modifiant la géométrie externe du versant (par terrassement, creusement d'un talus pour installer une route ou des habitations, surcharge d'un versant par des remblais, modification des écoulements naturels, érosion au pied d'un versant par une rivière dont le cours est modifié, etc.).

II.2.3. Origine et Mécanisme

L'érosion hydrique se définit comme le détachement et le transport de particules de sol de leur emplacement d'origine par différents agents vers un lieu de dépôt. Les trois étapes par lesquelles passe l'érosion sont le détachement, le transport et la sédimentation. Cependant,la pluie et le ruissellement superficiel sont à l'origine des mécanismes du détachement, du transport et du dépôt des particules du sol arrachées comme schématisé dans la figure suivante :

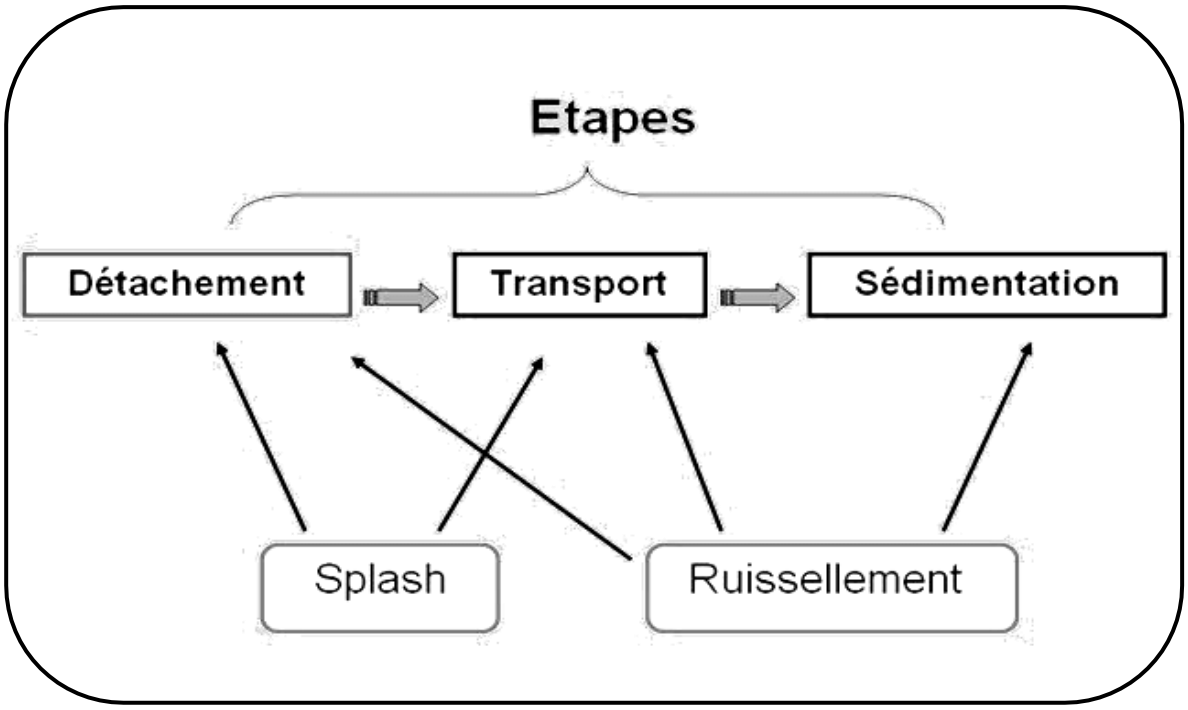


Figure II.10 : Schématisation des étapes liées à l'érosion

II.2.3.1. Le détachement

Les principaux mécanismes conduisant au détachement sont : *

L'éclatement par humectation sous l'effet de l'impact de gouttes de pluies. L'éclatement correspondant à la désagrégation par compression de l'air piégé lors de l'humectation. L'intensité de l'éclatement dépend entre autres, du volume d'air piégé, de la teneur en eau initiale des agrégats et de leur porosité.

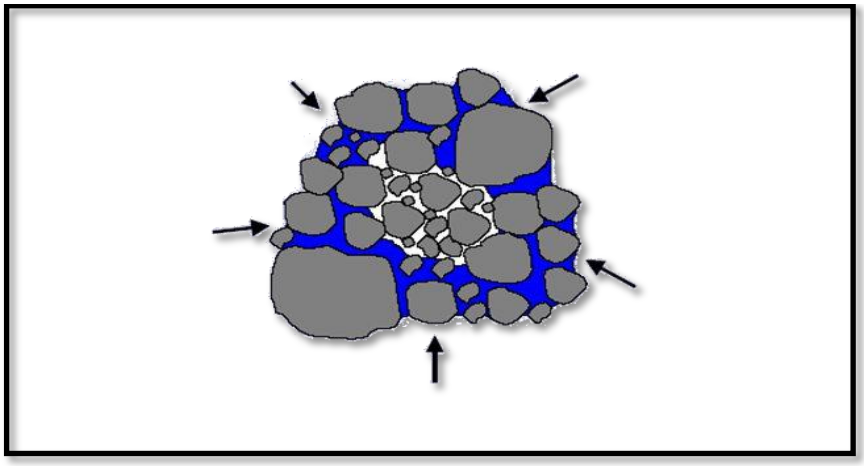


Figure II.11 : L'éclatement par humectation

*** Le gonflement différentiel :** Ce phénomène intervient suite à l'humectation et la dessiccation des argiles, entraînant des fissurations dans les agrégats. L'importance de ce mécanisme dépend en grande partie de la teneur et de la nature de l'argile des sols[4].

***La désagrégation mécanique sous l'impact des gouttes de pluie :** (c'est le détachement par « spalsh »). L'impact des gouttes de pluie peut fragmenter les agrégats et surtout détacher les particules de leur surface. Ce mécanisme intervient en général conjointement aux autres mécanismes cités précédemment et nécessite une pluie d'une certaine énergie qui est variable selon les sols.

L'énergie cinétique des gouttes n'est plus absorbée mais est transformée en force de cisaillement qui provoque détachement et splash.

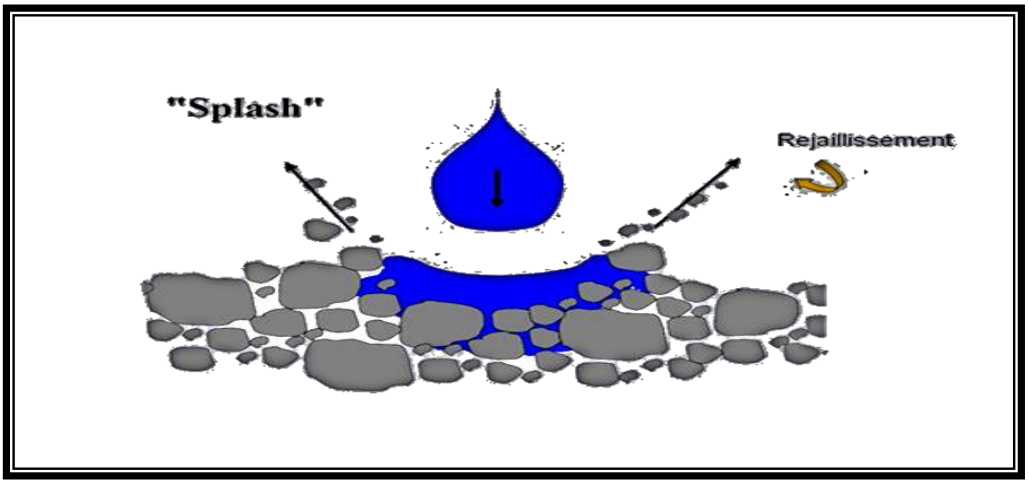


Figure II.12 : Détachement par spalsh

Les particules détachées par les gouttes de pluie sont généralement des micro-agrégats ou des particules élémentaires < 100 mm.

La taille et l'impact des gouttes sont des facteurs importants dans ce processus de destruction et d'arrachement (éclaboussement par effet splash).

L'énergie d'une seule goutte de pluie cause une érosion par éclaboussement ou rejaillissement qui peut déplacer les particules sur quelques dizaines de cm, la distance dépendant de la masse des particules et de l'angle d'incidence des gouttes de pluies par rapport à la surface. La masse de sol détachée peut être de l'ordre de plusieurs dizaines de tonnes par hectare et par an.

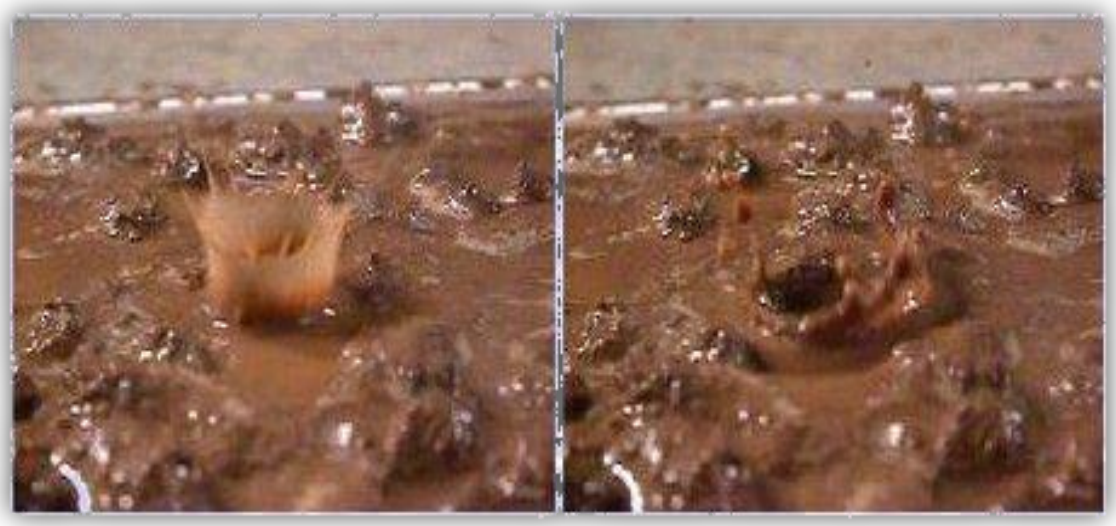


Figure II.13 : Rejaillissement du sol et de l'eau suite à l'impact d'une goutte d'eau ou effet splash.

.L'énergie cinétique des gouttes qui tombent est généralement utilisée comme paramètre pour déterminer le pouvoir érosif des pluies. Cette énergie cinétique peut être très élevée dans les régions humides ou semi-arides. En Afrique, par exemple, elle peut être deux à six fois plus importante que dans les zones tempérées.

Les particules de sol très fines qui sont détachées de la surface par l'impact des gouttes sont piégées entre les éléments plus grossiers et peuvent obstruer les pores de la couche supérieure du sol et réduire considérablement le taux d'infiltration (battance). Cette obstruction augmente les risques d'érosion et de ruissellement en surface. Les sols limoneux sont particulièrement touchés par ce phénomène. La croûte de battance ainsi formée s'épaissit dans les petites dépressions où l'eau stagne, permettant la sédimentation des éléments fins. La perméabilité de la surface peut descendre en dessous de 2 mm/h en période humide. Le micro relief s'estompe et le sol perd toute capacité de rétention d'eau superficielle. Lorsque la croûte de battance est formée, les pluies ultérieures, même si elles sont de faible intensité, engendreront du ruissellement. [4]

- **Le ruissellement**

L'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre. Ce refus du sol d'absorber les

eaux en excédent apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltration au sol (ruissellement "Hortonien"), soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe (ruissellement par saturation).

Ces deux types de ruissellement apparaissent généralement dans des milieux très différents, bien que l'on observe parfois une combinaison des deux. Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace pouvant donner naissance soit une érosion diffuse et /ou soit une érosion concentrée.

Il est donc à noter qu'il y a détachement par ruissellement lorsque la force de friction de l'eau sur les particules du sol est supérieure à la résistance du sol au cisaillement comme schématisé sur le graphique suivant :

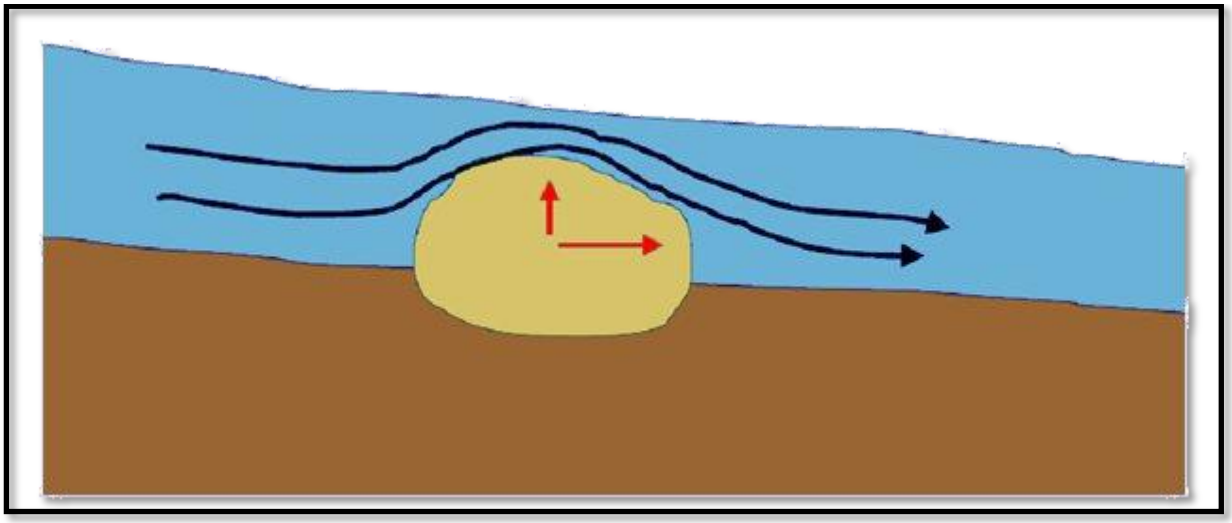


Figure II.14 : détachement par ruissellement

II.2.3.2. Le transport

Il est dû à la fois aux gouttes d'eau de pluie (par rejaillissement= effet splash) et aux eaux de ruissellement. Ainsi, le transport est assuré par ces eaux. Cependant, il est à signaler que le mode de transport par effet splash est généralement négligeable sauf sur pente forte. Alors que les eaux de ruissellement sont les plus responsables du transport des particules du sol détachées. Les modes de transport par ruissellement sont illustrés sur le graphique ci-dessous :

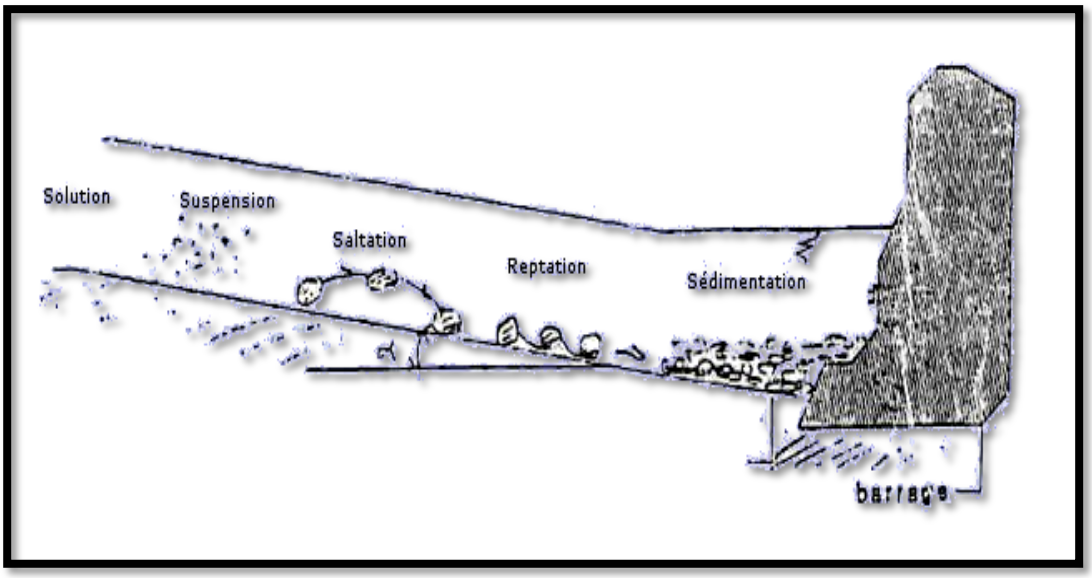


Figure II.15 : Modes de transport par ruissellement

Effet splash

Appelé érosion élémentaire est due au choc de la goutte de l'eau de pluie sur le sol. Celle-ci désagrège les particules du sol qui rejaillissent.

Cette action de rejaillissent est liée à l'énergie cinétique libérée par les gouttes de pluie en arrivant sur le sol.

L'énergie cinétique est égale au demi-produit de sa masse par le carré de sa vitesse.

$$Ec=\frac{1}{2}\, mv2$$

m: la masse de la goutte

v: la vitesse de la goutte

Ec: l'énergie cinétique en joule (si m en Kg et v en m/s).

Le diamètre des gouttes de pluie, leur vitesse de chute et leur masse totale déterminant la capacité de détachement des particules du sol [4].

II.2.3.3. La sédimentation

L'agent responsable de la sédimentation est l'eau de ruissellement. Les particules arrachées du sol se déposent entre le lieu d'origine et l'aval en fonction :

- de leur dimension

- de leur densité
- de la capacité de transport du ruissellement ou du cours d'eau.

Les particules se déposent dans l'ordre suivant :

- sable
- sable fin
- limon.

Les argiles et l'humus colloïdal sont généralement transportés jusqu'à l'embouchure du cours d'eau où il se dépose soit après évaporation de l'eau, soit après floculation [4].

II.2.4. Les facteurs de risque de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique qui s'exerce de manière spectaculaire est due à l'action de plusieurs facteurs dont les plus importants sont :
- le climat.
- La nature du sol.
- La végétation.
- La rugosité.
- Les facteurs anthropiques
- Facteurs lié au l'homme
- Topographie.

a) Le Climat :

Le climat est l'élément moteur de l'érosion. Les changements de température, l'intensité et la hauteur de précipitation ainsi que le vent ont des effets prépondérants sur la désintégration de la roche.

Les principales caractéristiques d'une pluie liée à l'érosion sont:

- la hauteur des précipitations est peu liée à l'importance de l'érosion.
- L'intensité est le facteur principal de l'érosion. Plus l'intensité est grande, plus l'effet de battance est prononcé.
- L'érosivité d'une pluie est donc fonction de ses caractéristiques physiques :

Rapport-Gratuit.com

- Le diamètre et la vitesse d'impact des gouttes de pluie.

b) La Rugosité

La rugosité de surface est une propriété qui influe sur plusieurs processus en relation avec le sol tels que l'infiltration, la capacité de stockage temporaire, le dépôt ou le détachement de particules. Elle évolue rapidement sous l'influence du travail du sol et des précipitations (Zobeck T.M., Onstad C.A., 198**7).**

c) Couvert végétale

C'est le facteur primordial de protection du sol contre érosion. L'interception des gouttes de pluie dissipe l'énergie cinétique des gouttes de pluies et donc diminue l'effet du Splash. De plus, le système radiculaire des plantes maintient le sol et favorise l'infiltration. L'eau qui atteint le sol a moins d'énergie cinétique et peut s'infiltrer le long des racines. De plus, le réseau de racines maintient la structure du sol. Selon Colonbani et Olivery (1984), l'érosion est une fonction décroissante de la couverture végétale.

d) Topographie

Plusieurs chercheurs ont mis en évidence l'effet de la topographie sur l'érosion, dont un grand nombre ont montré que la topographie agit sur le ruissellement et les pertes en sol par deux composantes (Borst et Woodburd, 1940)

 La longueur de la pente car plus la pente est longue, plus les eaux ont tendance à se concentrer dans les fissures ou rainures, ce qui entraîne un apport considérable en eau et en sédiments.

 Le degré de la pente car plus le degré de l'inclinaison des versants est important, plus l'énergie cinétique de l'écoulement et le détachement des particules du sol sont importantes (Wischmeieret Smith,1978).

e) Les facteurs liés à l'homme

Les activités humaines qui ont une grande influence sur l'érosion des sols sont l'agriculture, l'élevage, les exploitations minières, l'abattage du bois, la construction de routes et l'urbanisation. Les actions non contrôlées telle que les incendies, le défrichement, la

déforestation et le surpâturage sont à l'origine de processus aggravant l'intensité de l'érosion des terres. Ces actions sont des agents de la dénudation artificielle du sol **(Dajoz, 1985).**

Les facteurs indirectes comme la croissance démographique a entraîné la dégradation des ressources naturelles par :

- La mise en culture
- La pression pastorale
- Les incendies
- L'urbanisation engendre la suppression de la végétation, des modifications topographiques et de la destruction de l'équilibre du sol.

Le constat est que chaque civilisation a créée des conditions favorables au développement de l'érosion et la dégradation de la fertilité des sols, les villes, les routes, les zones des pâtures sont des milieux peu perméables qui accumulent les volumes ruisselés, et provoquent des inondations et des dépôts de boue (Melalih,2011).

II.2.5. Quantification de l'érosion hydrique

II.2.5.1 Formules empiriques

Plusieurs formules ont été conçues pour la quantification de l'érosion hydrique. Nous ne citons que celles qui impliquent les paramètres physiques représentatifs (morphologie du bassin, pluies, débit liquide, végétation).

a) Formule de Wischmeier et Smith (1978)

Wischmeier et Smith ont mené un grand nombre d'expériences sur des parcelles de terres standardisées en surface, ayant différentes structures du sol, avec différentes inclinaisons et occupation végétales. Ces parcelles sont exposées à des pluies naturelles ou artificielles par simulateur de pluies. L'objectif est d'estimé la moyenne annuelle des pertes de terres Aà partir de six facteurs :

$$A = R.\ K\ .L_S\ .C\ .P$$

A : Perte en sol moyenne annuelle (t/ha.an)R : Indice d'érosivité des précipitations (N/h).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

K: Indice d'érodabilité du sol, fonction de la texture, du taux d'humus, de la structure de la couche superficielle du sol ainsi que de sa perméabilité (t.h / N.ha)

L_S: Indice topographique, fonction de la longueur (L) et de l'intensité (S) de la pente .

C : Indice de couverture végétale et des pratiques culturales.

P : Indice d'aménagement antiérosif.

b) Formule de Fournier (1960)

Fournier présente une formule pour estimer l'apport solide spécifique en fonction de la superficie du bassin versant, de la pluviométrie moyenne mensuelle et la dénivelée moyenne du bassin versant :

$$\mathbf{Ass} = \left(\frac{1}{36}\right)\left(\frac{Pm}{Pam}\right)^2 (2.65)\left(\frac{h}{S}\right)^2 (0.46)$$

Avec :

Ass : apport solide spécifique (t/km2/an)

Pm : précipitations moyennes mensuelles du mois le plus pluvieux (mm)

Pam : précipitations moyennes annuelles (mm)

h : dénivelée moyenne (m)

S : superficie du bassin versant (km2).

c) Formule de Tixeront (1960)

Tixeront présente une formule pour estimer l'apport solide spécifique en fonction de la lame d'eau écoulée et deux constantes empiriques caractérisant la région d'étude, exemples de formules :

$$\mathbf{Ass = 354.\ E^{0.15}}$$ pour les bassins tunisiens

$$\mathbf{Ass = 92.\ E^{0.21}}$$ pour la région est algérien

$$\mathbf{Ass = 200.\ E}$$ pour la région centre algérien

Avec :

Ass : Apport solide spécifique en(t/km2/an)

E : Ecoulement en (mm)

d) Formule de la SOGREAH

La formule de SOGREAH est semblable à celle de Tixeront avec un exposant fixe et un coefficient lié à la perméabilité du sol :

$$\mathbf{Ass = \alpha .E^{0.15}}$$

Avec :

Ass : Apport solide spécifique (t/km2/an)

α : Coefficient dépendant de la perméabilité du sol,

E : Ecoulement annuel (mm).

II.2.5.2. Analyse critique

L'équation universelle de Perte en sol est un modèle empirique. Fondamentalement, elle représente les descriptions statistiques des données collectées au niveau de 10000 parcelles/année d'érosion ayant des pentes uniformes et gérées sous des pratiques culturales communes. Bien qu'elle soit largement utilisée à travers le monde, elle possède certaines limitations. Parmi celles-ci, le redéploiement de l'équation à des échelles plus importante aussi, la difficulté de collecte des sédiments déposés..

A la lumière de la compréhension du processus d'érosion des sols, d'autres modèles ont été développés. Parmi les plus importants, l'on peut citer d'après (Renard et al,1991) :

- le Water Erosion Prediction Project **(**WEPP**),**
- le Soi1 and Water Assessment Tool (S WAT**),**
- le Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems (CREAMS).
- L'application de la formule Wischmeier et Smith semble être difficile elle exige la disponibilité d'une grande quantité de données d'entrée qui reste inaccessibles pour le cas des bassins de notre région. Il s'agit en particulier des facteurs inhérents à l'occupation, l'utilisation et les pratiques de conservation des sols.
- La formule de Fournier quant à elle introduit des termes qui sont fonction de la pluviométrie des mois les plus pluvieux. Pour le cas de notre série Or, dans la région d'étude (Nord de l'Algérie), l'Hiver cumule la plus importante lame précipitée de l'année, alors que c'est le printemps qui totalisent le maximum de l'écoulement. Ce ci semble être une des caractéristiques de la réponse hydrologique des cours d'eau de la région du Nord-Ouest Algérien.

-La formule de Tixeront s'applique à des bassins de l'Est et du Centre algérien. Toutefois, la faible pluviométrie dans les bassins de l'Ouest algérien limite son application. En effet la région de l'est algérien reçoit une pluviométrie annuelle plus importante par rapport à l'Ouest Algerien (Seltzer, 1946 ; Meddi et al., 1998) , une variabilité spatio-temporelle de la dégradation des terres en est la conséquence (Terfous et al., 2001 ; Achite et Meddi, 2005).

-La formule de Sogreah fait intervenir deux paramètres essentiels : la perméabilité du sol et l'écoulement annuel du cours d'eau. Néanmoins Walling et al. (1992) rapportent que souvent près de 90% de la charge solide annuelle est transportée en moins de 5% du temps annuel durant les événements de crues. L'influence de l'écoulement annuel dans ce cas se voit donc diminuer.

II.3. Transport solide

II.3.1. Définition

Le transport de particules solides par un cours d'eau est appelé transport solide ou transit sédimentaire, c'est la seconde phase de l'érosion. Il désigne le phénomène de transport d'éléments solides plus ou moins grossiers. Le transport solide est un phénomène complexe, dépendant d'une multitude de facteurs géologiques, géomorphologiques, météorologiques, hydrologiques, mais également humains [5].

La dynamique des matériaux arrachés au sol et transportés par le réseau d'écoulement dépend essentiellement de la vitesse d'écoulement et de la granulométrie.

II.3.2 Les types de transport solide

L'eau met en jeu trois types de mécanisme : le charriage et la suspension qui sont les principaux types de transport solide et le troisième c'est la saltation.

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 à la turbulence de l'écoulement.

En tout point d'une rivière, l'alimentation en débit solide est définie par les caractéristiques hydrologiques de son bassin versant (Mokhtari, 2007).

II.3.2 .1 Le transport solide par charriage

Le transport solide par charriage, représente la progression de sédiments grossiers (sables, graviers, galets et blocs) de diamètre supérieur ou égale à 1 mm, qui se déplacent par roulement ou glissement, au voisinage immédiat du fond du cours d'eau. Les particules en charriage parcourent des distances relativement petites et discontinues dans le temps et dans l'espace. Leur vitesse est inférieure à celle de l'écoulement.

Les mesures sur terrain du transport solide par charriage sont très onéreuses à cause des perturbations de l'écoulement. L'évaluation de ce type de transport est difficile à mener en l'absence de base de données. On se contente généralement d'études sur modèles réduit pour déterminer la proportion du charriage par rapport à la suspension ou au transport total. Pour quelque bassin versant le taux de charriage a été estime 12.5% de la suspension (Bouanani, 2004).

Dans les retenues Algérienne, les apports par charriage représentent entre 10 à15 %de la charge solide en suspension *(*Remini, 2003).

II.3.2 .1 Le transport solide en suspension

Le transport solide en suspension représente le transport de sédiments fins (argiles, limons, sables fins). Les particules sont maintenues en suspension sur toute la hauteur de la masse liquide du cours d'eau, sous l'action des fluctuations turbulentes de l'écoulement. 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 (Graf, 1971).

V/ W > 0.10 : début de transport par charriage.

V/W > 0.40 : début de transport en suspension

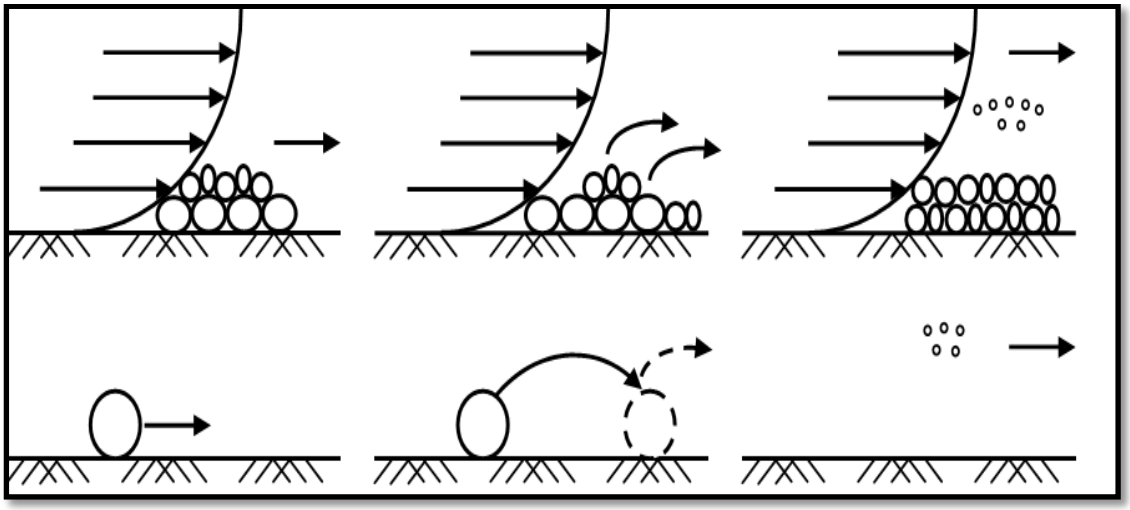
La concentration d'élément en suspension des Oueds Algériens dépasse souvent 100g/l pendant les premières pluies d'automne**.** (Remini, 2003).

II.3.2 .2 Le transport solide par saltation

Correspond à des matériaux assez fins pour que les interactions avec le fond ne soient pas prépondérantes mais trop grossiers pour que les matériaux restent durablement dans l'écoulement.

Dans les rivières, il s'agit essentiellement de sables .Dans le cas d'un bassin versant granitique, ce type de transport qui est prépondérant. Or, sa quantification à partir des conditions d'écoulement n'est pas accessible. Cette lacune n'est généralement pas pénalisante car les interactions avec le lit sont très modérées, les sables se déposant, plutôt à la décrue, seulement dans les zones d'eau morte. Par contre, ces matériaux se déposent massivement lorsque la vitesse - et donc la turbulence - diminue, comme c'est le cas dans les retenues.

Le remplissage des retenues - et donc le bilan d'apport - est alors totalement dépendant de ces apports de sables [6].



Charriage saltation suspension

Figure II 16: différents types de transport solide

II.3.3. Nature des apports solides

Le débit solide est largement déterminé par les conditions climatiques mais les facteurs tels que le relief, la végétation, l'activité agricole et la géologie du site jouent également un rôle important.

Le calcul du débit solide constitue depuis longtemps une difficulté pour les ingénieurs hydraulique, qui ont élaboré une panoplie de méthode et des formules pour faciliter son évaluation (Graf 1971, Ylin 1972, Borgadi1974).Ces formules se rapportent généralement aux paramètres : la pente du lit, la contrainte tangentielle, le débit liquide, la vitesse, le degré de turbulence, la température de l'eau, la taille des particules et les caractéristiques du lit. Il n'existe aucune formule universelle qui prend en compte tous ces paramètres. Néanmoins, toutes les méthodes montrent que lorsque le débit en un point donné diminue, la force tractrice de l'eau diminue, les matériaux solides se déposent et la configuration du lit devient moins favorable à l'écoulement, ce qui tend à réduire encore plus la vitesse et la capacité de transport. [7]

II.3.4. Capacité de transport d'un cours d'eau

Les sédiments qui atteignent le cours d'eau par l'intermédiaire du ruissellement sont transportés par ce dernier s'il en est capable c'est-à-dire, la capacité de les transportés.

On appelle capacité de transport d'un cours d'eau sa possibilité optimum de transport de sédiment ; cette possibilité est liée au débit liquide et à la vitesse du courant.

Si la capacité de transport est suffisante, tous les sédiments fournis par l'abrasion seront transporté ; l'eau conservera un reliquat d'énergie qu'elle pourra employer au creusement du lit et à l'érosion des berges

II.3.4 La capacité de transport est variable dans le temps et dans l'espace

- **Dans le temps** puisqu'elle est liée au débite liquide. Si une crue survient, la capacité de transport du cours d'eau augmente et les alluvions déposées en période d'étiage vont être reprises par la crue.

-**Dans l'espace** puisqu'elle est liée aux vitesses de courant. Le long du parcours d'un cours d'eau, si par exemple, la vitesse est réduite par un changement de pente, la capacité de transport va diminuer et les matériaux vont se déposer [8].

II.3.5 Mesure de la concentration de la matière en suspension

Cette mesure est basée sur les valeurs instantanées des débits liquides (Ql), données en m^3/s, mesurés au droit d'une station hydrométrique.

La charge de la matière en suspension est obtenue à partir d'échantillons d'eau prélevés sur les rives de l'oued au moyen d'une bouteille de 50 cl.

La charge en suspension 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. La fréquence des prélèvements effectués dépend de la variation de la hauteur d'eau. En période de crue, chaque demi-heure, on prélève un échantillon. En période normale on prélève une fois tous les deux jours.

Figure II. : Bouteille de prélèvement

II.3.6 Erosion et transport solide en Algérie

L'érosion hydrique reste un problème majeur en Algérie dont le principal facteur est le ruissellement dont la répartition spatiale est contrôlée par celles des précipitations, des caractéristiques géologiques et bio-physiographiques (topographie, couvert végétal,…). L'érosion se manifeste principalement sur les sols en pente et constitue une des principales causes de dégradation des sols dans les massifs montagneux en zones semi arides.

Elle s'est accélérée suite aux défrichements des forêts et maquis qui protégeaient les sols sensibles.

L'intensité de l'érosion hydrique varie d'une zone à l'autre. La partie Ouest du pays est la plus érodée, où l'érosion touche 47 % de l'ensemble des terres; suivie du Centre (27%) et de l'Est (26%).

L'érosion spécifique varie de 2000 et 4000 t/km2.an et le taux d'envasement est supérieur à 15 %. L'Algérie est, de ce fait l'un des pays les plus menacés dans le monde par l'érosion. (Achite M. et Meddi. M. 2004)

Les bassins versant du tell Algérien dominés par un climat semi-aride sont caractérisés par une pluviométrie saisonnière et interannuelle irrégulière, cette irrégularité a un impact direct sur l'action érosive et notamment sur le transport solide en suspension, Ce dernier dépend de plusieurs facteurs dont l'agressivité des averses, l'état du sol et la turbulence de l'écoulement.

Les crues de l'automne et du printemps sont responsables de l'essentiel du transport solide en effet pendant l'été connu pour ses chaleurs intenses, le sol se dessèche, se fissure, se fragmente et son couvert végétal réduit, ce qui permet aux premières averse de l'automne de laver le sol de ces éléments fins détachés, pendant le printemps qui succède a la saison hivernale froide et pluvieuse , les crues coïncident avec des versants satures et déblayes l'activité érosive dépend alors des mouvements de masse et des sapement de berges qui se produisent dans les zones mal protégées au bas des versants on assiste alors pendant ces crues une croissance rapide du volume ruisselé et de turbidité. Ces périodes de crues de l'automne et de printemps représentent une courte période de forte érosion qui dure entre 2 à 4 mois mais responsable de la majeur partie du transport solide. Le reste de l'année est à érosion faible (Terfous, 1999). Annuellement le comportement morphologique irrégulier des bassins versant Algériens passerait d'une année à l'autre d'un régime méditerranéen à érosion élevée et à écoulement abondant au régime de la zone tempérée caractérisée par un écoulement abondant et une érosion faible ou encore au régime de la frange aride à érosion élevée et à faible écoulement (Bourouba, 1998).

II.3.6 Conclusion

Les deux agents principaux de l'érosion hydrique sont les précipitations et le ruissellement superficiel. Néanmoins d'autres facteurs liés au climat, à la morphologie du site, au couvert végétal et l'état hydrique initial du sol influencent l'érosion du sol.

L'étude de l'érosion et du transport solide est basée sur la précision et la connaissance des facteurs et les cause de ces phénomènes qui constituent une étape indispensable pour une mise au point des techniques d'aménagement anti-érosives.

Rapport-Gratuit.com

Chapitre III

Bassin versant de l'oued Mouilah

III.1.Introduction

Le bassin versant de l'oued Mouilah est situé dans la rive gauche de la haute Tafna. Il est considéré comme l'un des bassins les plus importants dans le territoire algérien et appartient à l'ensemble du bassin hydrographique de l'Oranie Chott Chergui selon la structuration des unités hydrologiques en Algérie.

III.2.Position géographique

Le bassin versant de l'oued Mouilah est situé au Nord-Ouest de l'Algérie, il s'étend sur une superficie de 2650 km^2, pour un périmètre de 230 km. Affluent rive gauche de la Tafna, oued Mouilah, s'écoule sur une longueur de 124 km. Il prend naissance dans la région d'El Abed, en Algérie, à 1250m d'altitude, puis pénètre au Maroc et prend le nom d'oued Isly et suit un cours intermittent. Il redevient permanent en Algérie aux environs de Maghnia sous l'appellation d'oued Mouilah. I1 reçoit sur sa rive droite, Oued Ouardeffou avec ses affluents, Oued EL Abbas, Oued Aouina et Oued Mehaguene et sur sa rive gauche Bouslit, Oued Ben Saria et Oued El Aouedj.

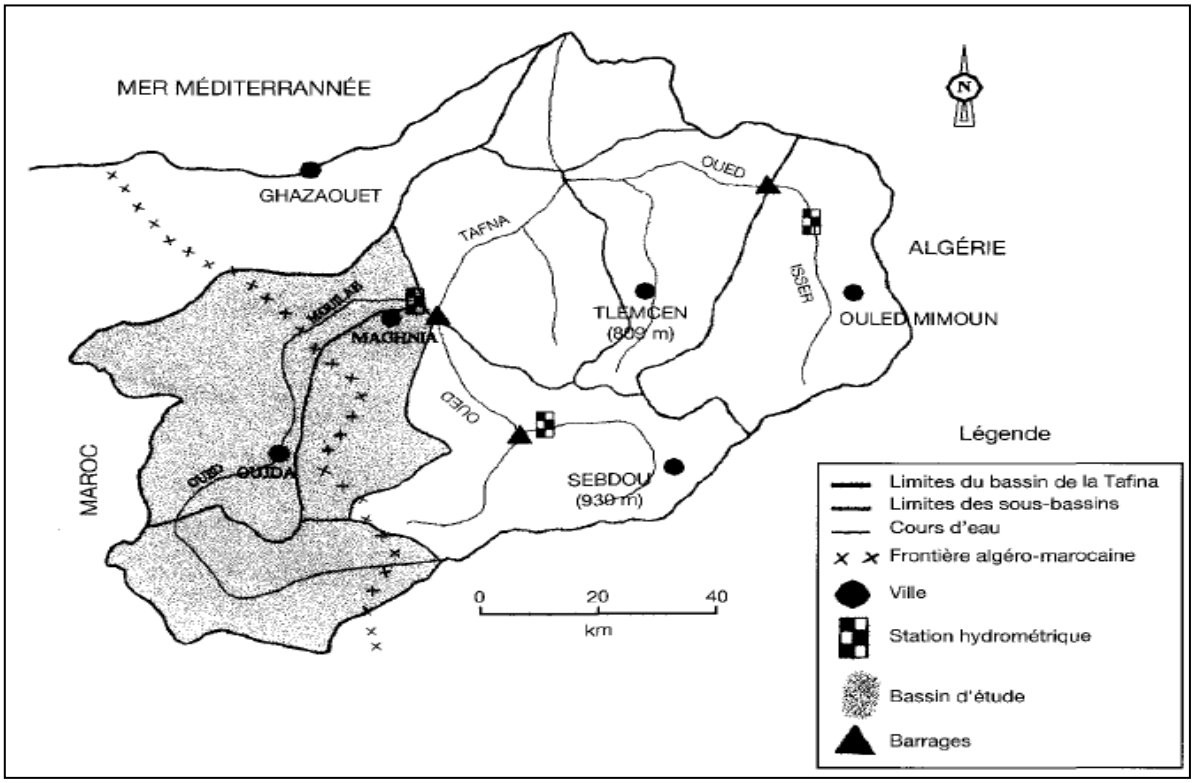


Figure III.1 : Situation géographique de l'oued Mouilah (A. Terfous, A. Megnounif et A. Bouanani,2001)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

III.3.Etude morphométrique

- **La forme du bassin versant**

La forme du bassin-versant peut avoir des conséquences hydrologiques importantes, notamment sur la relation pluie-débit et l'évolution des écoulements et matières solides en suspension en période de crue. Outre la nature de l'averse les caractéristiques morphologiques du bassin conditionnent la forme des hydrogrammes observés à l'exutoire.

Les caractéristiques morphologiques du bassin versant de l'oued Mouilah sont résumées dans le tableau ci-après :

Tableau III.1 : Caractéristiques générales du bassin versant de l'oued Mouilah (Bouanani), 2004)

A (Km^2)	P (Km)	L (Km)	Kc	Rectangle équivalent		Ig (m/Km)	Ip	H_{min} (m)	H_{moy} (m)	H_{max} (m)
				Longueur (Km)	Largeur (Km)					
2650	230	124	1.25	81.63	32.46	0.011	1.16	285	746	1430

Avec :

P : Périmètre du bassin (km)

A : surface (km^2)

L : longueur de Talweg (Km)

H_{min} : altitude minimale (m)

H_{moy} : altitude moyenne (m)

H_{max} : altitude maximale (m)

Kc : coefficient de compacité exprime par :

$$Kc = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}} = 0.28 * \frac{230}{\sqrt{2650}} = 1.25$$

La valeur de l'indice de compacité de Gravelius Kc (Tableau III.1), nous permet de classer ce bassin parmi les bassins à forme **moyennement allongé**.

- **Rectangle équivalent**

C'est une transformation géométrique qui consiste à la détermination de la longueur(L) et la largueur (l) sont données par la relation qui suivent :

$$\mathbf{P = 2\,(L + 1) = \frac{(Kc * A^{1/2})}{0{,}28}}$$

Avec:

A= l .L

Pour notre bassin versant de mouilah, on trouve **: l = 32.46 Km** ; **L= 81.63 Km.**

III.4. Etude de relief

III.4.1. Hypsométrie

Le relief détermine en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains, l'infiltration, l'évaporation et caractérise le comportement hydrologique d'un bassin. Partant de la répartition par tranches d'altitudes (tableau III.2), la courbe hypsométrique est donnée dans (Fig. III.2)

Tableau III.2 : Répartition altimétrique du bassin versant de l'oued Mouilah(Bouanani, 2004)

Tranche d'altitude (m)	Ai (Km^2)	Ai cumulée (Km^2)	Ai (%)	% Ai cumulée	% Altitude cumulée
1430-1400	26.80	26	0.98	0.98	100
1400-1200	306	332	11.55	12.53	97.39
1200-1000	381	713	14.38	26.91	79.92
1000-800	375	1088	14.15	41.06	62.45
800-600	414.5	1502.2	15.64	56.7	44.98
600-400	904	22406.5	34.11	90.81	27.51
400-285	243.5	2650	9.19	100	10.01

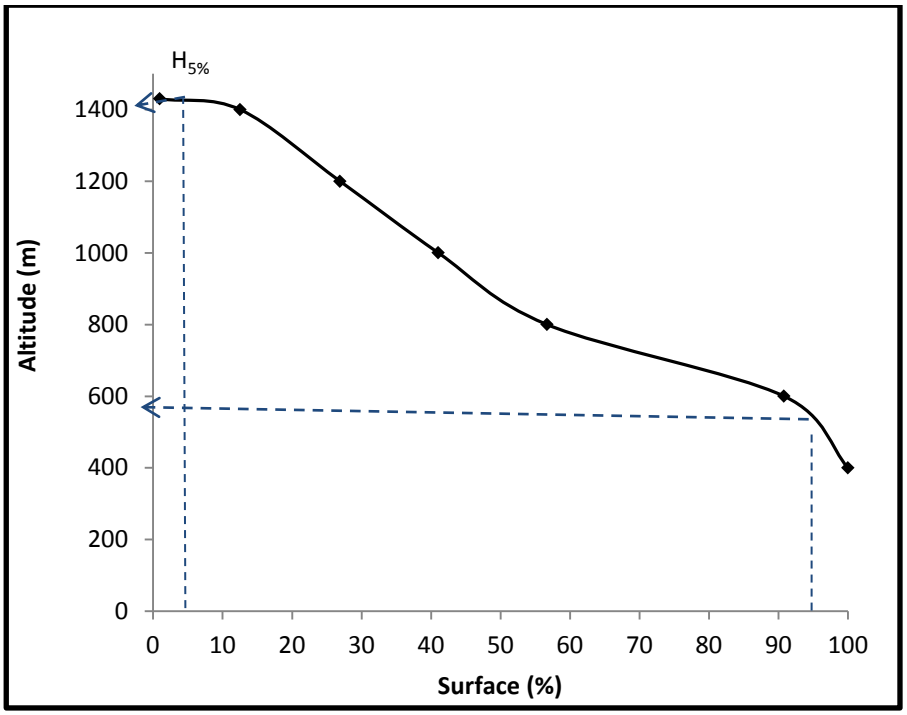


Figure III.2 : Courbe hypsométrique du bassin de Mouilah

La forme de la courbe hypsométrique Figure (III.2), montre un état d'équilibre du bassin et donc un potentiel érosif moyen. L'accentuation de la pente de la courbe vers les basses altitudes indique que la partie aval du bassin est bien occupée par la plaine importante de Maghnia-Angades. Vers les hautes altitudes, le relief accentué à l'amont du bassin est bien mis en évidence par la forme de la courbe hypsométrique.

III.4.2. Les pentes

La pente renseigne sur la topographie du bassin. Elle est considérée comme une variable indépendante. Elle donne une indication sur le temps de parcours du ruissellement direct et influence sur le débit de pointe lors d'une averse. Selon Stewart (1974), la pente des bassins versants est un paramètre clé dans le ruissellement.

II.4.2.1. La pente moyenne du bassin versant

La pente moyenne, Pmoy , s'exprime en fonction de la longueur L du rectangle équivalent et la différence entre les hauteurs extrêmes ΔH.

$$\mathbf{Pmoy} = \frac{\Delta H}{L} = \frac{Hmax - Hmin}{L}$$

$$= \frac{(1430-285)}{81.63} = \mathbf{14.06\ m/km}$$

II.4.2.2. Indice de la pente globale Ig

L'indice de pente global, Ig, permet de déterminer l'importance du relief sur le bassin. Il est définit comme étant le rapport entre la dénivellation (D) et la longueur (L) du rectangle.

$$Ig = \frac{D}{L}(\text{m/Km})$$

Avec :

D : Dénivelée = H5% - H95% (m)

L'altitude **H5%** correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 5% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique

L'altitude **H95%** correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 95% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique

La valeur de la pente globale pour le bassin versant mouilah est 0.011, soit 0.01<Ig<0.02 selon la classification du relief par L'ORTOM (Tableau III.3), la valeur de l'indice du pente globale du bassin versant de l'oued de Mouilah montre que le relief est modéré

Tableau III.3 : Classification du relief selon Ig par l'ORSTOM

Relief très faible	Ig < 0.002m/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	0.5m/km <Ig

Les pentes sont en général très accentuées .Elles dépassent les 20%au niveau des zones montagneuses des monts de Traras au nord-ouest et les monts de Tlemcen au sud. Entre ces

zones à relief fort, le relief localisée de part et d'autre de l'oued Mouilah est plus au moins aplatie avec des pentes plus douces entre 0 et 10%.Cette zone constitue la plaine de Maghnia qui ne favorisant pas ou peu le transport de sédiment. En plus, la partie médiane du bassin soit 25 % de la surface totale du bassin à une pente inférieur à 5% pouvant constituer une zone de dépôt des particules solides transportée par l'oued Mouilah (Hamlat.2007).

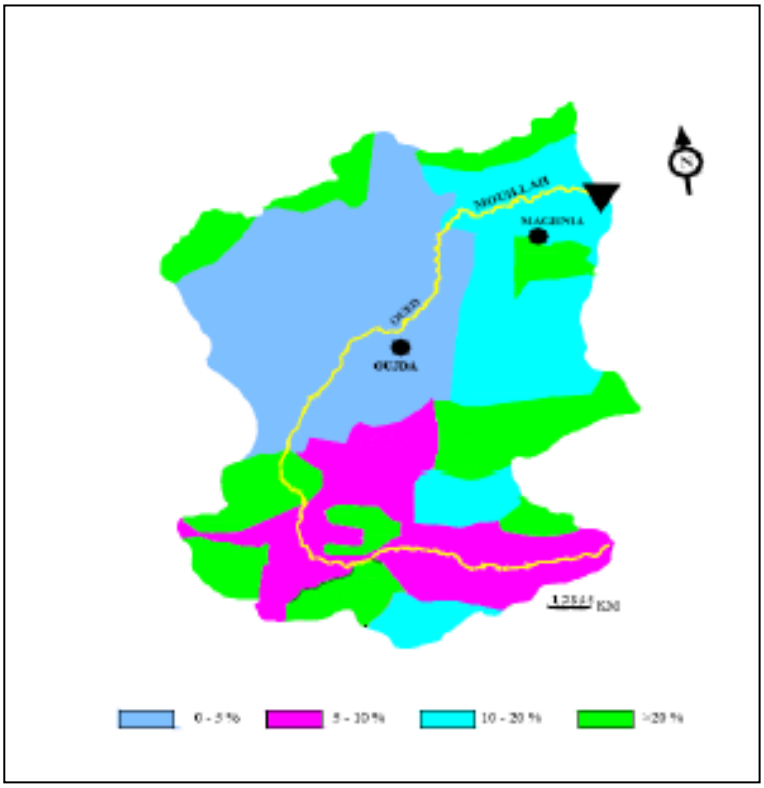


Figure III.3 : Carte de pente du bassin versant de l'oued Mouilah (ANRH)

III.5.Réseau hydrographie du bassin versant

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement, Le réseau hydrographique influence .le régime hydrologique à travers la densité de drainage (Dd), le rapport de confluence (Rc) et le rapport des longueurs (Rl).

III.5.1. Densité de drainage

La densité de drainage est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant. Elle dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques topographiques du bassin, mais aussi parfois par les conditions climatiques et anthropiques.

La relation de la densité de drainage est donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{Dd}=\sum\frac{Li}{A}$$

Avec :

Li : Longueur cumulée de tous les thalwegs du bassin (km),

A : Aire du bassin (km²)

La morphologie du système de drainage est conditionnée principalement par la nature des formations qui constituent la lithologie du bassin du relief ainsi qu'au régime climatique

III.5.2. Rapport de confluence

$$\mathbf{Rc}=\frac{Nn}{N(n+1)}$$

Avec :

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

Si 1'on admet que pour un bassin parfaitement organisé Rc=2, notre bassin est malhiérarchisé avec une Valeur Rc=3.88 supérieure à 2.

III.5.3. Rapport des longueurs

$$\mathbf{RL}=\frac{L(n+1)}{Ln}$$

Avec :

Ln : longueur de cours d'eau d'ordre n

La valeur est de l'ordre 2.36 (bouanani 2004)

Tableau III.4: Paramètres morphométriques de l'oued mouilah (bouanani 2004)

Dd (km/km²)	Rc	RL
0.16	**3 .88**	**2.34**

III.6-Sols et végétation

D'une manière générale, les sols dans ce bassin sont constitués par :

- les sols calcaires qui longent l'oued Mouilah et se prolongent au Nord-est des monts des Traras et aux piémonts de Tlemcen. On y trouve généralement une végétation herbacée.
- Les sols calciques : caillouteux et peu profonds, ils se développent surtout le long de la vallée d'oued Mouilah.
- Les sols alluviaux constitués principalement de sols calcaires lourds recouvrant les basses terrasses et les lits des oueds. Ils sont localisés au Nord de la plaine de Maghnia.
- Les sols rouges à encroûtement : ces sols formés de marnes du Miocène, couvrent une grande partie de la plaine de Maghnia où l'on rencontre une culture extensive irriguée.

La distribution du couvert végétal (Tableau II.10), montre que la moitié de la superficie du bassin de l'oued Mouilah est constitué de terrains nus, localisés dans la partie ouest du bassin.

Ces terrains susceptibles d'être transpercés par l'effet de pluies violentes, correspondent à une zone plate à pente inférieure à 5%. L'autre partie du bassin se trouve suffisamment couverte pour résister aux menaces érosives.

Tableau III.5 : Distribution du couvert végétal dans le bassin d'oued Mouilah (Bendimerad 2012)

Occupation des sols	Surface (ha)	% des surfaces
Cultures extensives	57 200	21,58
Couvert forestier dégradé	9 500	3,58
Couvert forestier normal	39 000	14,72
Arboriculture	1 200	0,45
Couvert mort (terres nus)	131 000	49,43
Prairies et terrains de pacage	27 100	10,23

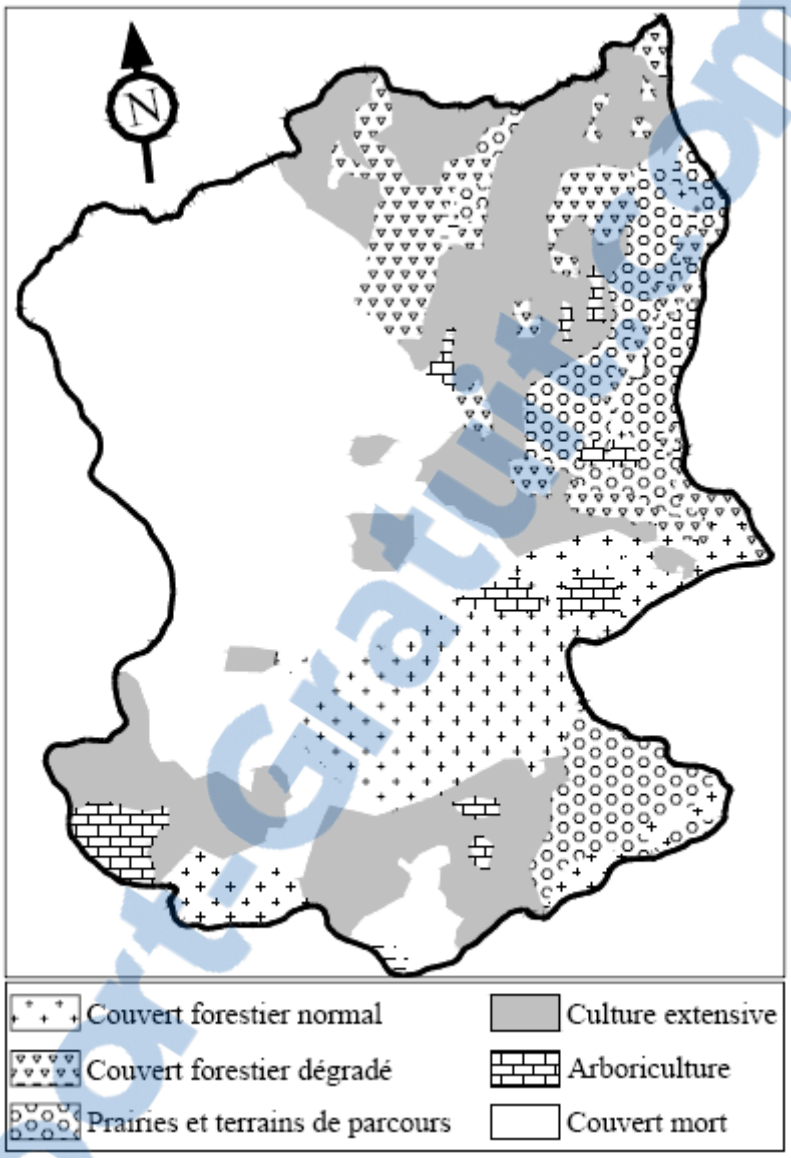


Figure. III.4 : Couvert végétal du bassin versant de l'Oued Mouilah (Ghenim et al ,2008)

III.7-Le climat

En Plus des facteurs morphologiques, géologiques et géographiques, les conditions climatiques d'un bassin versant jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eau. Ce sont les précipitations, surtout liquides, qui constituent le facteur essentiel intervenant par :

- leur hauteur totale annuelle qui détermine l'abondance fluviale,
-leur répartition mensuelle et saisonnière qui influence directement les régimes hydrologiques,
- leurs totaux journaliers et surtout les averses génératrices de crues.

Ces différents aspects sont plus ou moins modifiés selon l'effet combiné d'autres paramètres physiques et climatiques (températures et évapotranspiration).
Le bassin versant de l'Oued Mouilah se caractérise par un climat semi-aride. Les températures annuelles varient entre 15,7 et 18,4°C (période 1977–1995). (Direction des ressources en eau).

Les précipitations sont relativement faibles et inégalement réparties au cours de l'année. La moyenne interannuelle est de 297 mm (période 1977–1993).

III.8-Conclusion

Les paramètres morphométriques montrent que les sous bassins versants de l'oued Mouilah présentent une forme assez allongée (kc=1.25). Le bassin est moyennement drainée Dd=0.16. L'indice de pente moyenne est très fort, donc on assistera à un écoulement rapide.

Chapitre IV

Etude hydro-climatique du bassin de l'oued Mouilah

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, on examine le bilan des apports liquides et matières solides en suspension au niveau de la station hydrométrique de Maghnia qui contrôle le bassin de l'oued Mouilah. 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 Mouilah.

IV.2. Etude des pluies

Les données de mesure utilisées dans ce travail sont enregistrées au niveau de la station de Maghnia (X=88,10 Y=176,75 Z=426,0 m). Suivant la nomenclature de l'ANRH, le code de la station climatique de Maghnia est 160302. L'étude porte sur la série des pluies moyennes mensuelles pour la station pluviométrique de Maghnia pour contrôler le bassin de l'oued Mouilah. La série de mesure s'étale sur la période allant de septembre 1973 à août 2005.

IV.2.1 Pluviométrie annuelle

Les principales statistiques : moyenne, écart type et coefficient de la série des pluies annuelles sont résumées dans le tableau (IV.1).

Tableau IV.1 Paramètres de position des précipitations à la station de Maghnia

Paramètre	Formule	Valeur
$\bar{P}$ **: Moyenne**	$\bar{P} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n} Pi$	**303 mm**
s^2**:Variance**	$s^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{i}^{N}(P_i - \bar{P})$:	**7858.38**
s:Ecart type	$s = \sqrt{s^2}$	**90 mm**
Coefficient de variation	$Cv = \frac{s}{\bar{P}}$	**0.3**

Le coefficient de variation Cv < 0,5, laisse fortement penser que l'ajustement suit une loi normale ou une loi log normale. Le test du $\chi 2$ permettra de vérifier cette adéquation.

Pour l'ajustement à une loi de probabilité, il existe deux approches :

IV.2.1.1. Approche graphique

L'ajustement graphique, montrent que la série pluviométrique de la station de l'oued Mouilah s'ajuste bien à la loi normale ou log normale. La procédure d'ajustement à une loi de probabilité consiste à :

- Classer la série des précipitations par ordre croissant.
- Calculer les fréquences empiriques F= (i-0.5)/N (i étant le rang et N la taille de l'échantillon).
- Estimer les paramètres d'ajustement
- Calcul des probabilités théoriques, probabilité au non dépassement pour la loi considérée
- Représentation graphique pour une comparaison entre les probabilités empiriques et théoriques.

IV.2.1.2.Approche par un test d'adéquation

Parmi les tests utilisés nous avons le test du Khi², le test de Kolmogorov. Nous pouvons aussi utiliser des indicateurs comme les coefficients de variation, d'asymétrie ou d'aplatissement. Le test de Khi² mesure l'écart qu'il y a entre les fréquences observées et les fréquences théoriques. Il est donné par la statistique du χ2. Il est utilisé pour déterminer si une distribution théorique comme la distribution normale, peut être ajustera une distribution empirique, c'est-à-dire une distribution calculée à partir des données observées. Dans cette étude, nous appliquons les tests graphiques, le test du χ2 et le teste de kolmogorov pour illustrer l'ajustement des données de notre bassin versant à une loi de probabilité.

a) Loi normale ou Laplace-Gauss

La loi normale est définie par deux paramètres : la moyenne $\bar{P}$ et l'écart type, s.

L'expression de la fonction de densité de probabilité de la loi normale est :

$$\boldsymbol{f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{P-\bar{P}}{\sigma}\right)^2}}$$

La probabilité au non dépassement est donnée par :

$$\boldsymbol{Prob(P < t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{t} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{P-\bar{P}}{\sigma}\right)^2} dt}$$

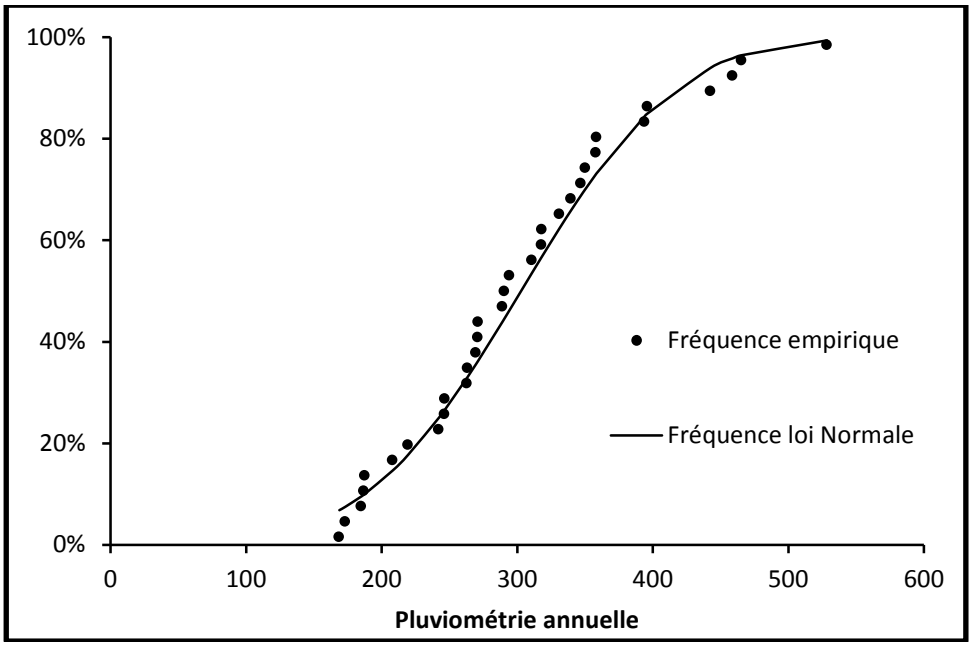


Figure IV.1 : Ajustement graphique des précipitations annuelles à la loi de distribution normale

D'après la figure ci-dessus on remarque que la normalité est plus ou moins adéquate.

- **Application du test khi^2**

La qualité de l'ajustement est appréciée par le test du χ^2 avec un risque d'erreur α=5%.

Pour la loi normale, le nombre de paramètres estimés est 2, la moyenne et l'écart type. Donc le degré de liberté est ν=ddl = k-r-1=k-3, k est le nombre de classes (à choisir).

Pour éviter des classes à effectif moins de 5, on choisit le nombre de classes k parmi les entiers : $r + 1 \leq k \leq \frac{n}{5}$, r étant le nombre de paramètres estimés pour établir le degré de liberté. Dans notre exemple, les possibilités de k sont {4, 5 ou 6}. Nous avons effectué le test pour k=6. Ce qui donne des probabilités théoriques par classe de 1/6 et un effectif théorique np_i= 5,5.

Les bornes des classes sont déduites en utilisant la loi normale inverse donnée par Microsoft Excel de paramètres m= 303 et s=90. Exemple, pour la première classe, la borne a_1 est solution de l'équation Prob($X<a_1$)=1/6 donnée par Microsoft Excel. Les autres bornes sont déduites de la même manière et sont solutions des équations Prob($X<a_i$)=i/6, i=1,6.

Une fois les classes identifiée, on trouve le nombre d'observation, n_i, correspondant à chaque classe.

Dans ce qui suit, nous avons appliqué ce test pour vérifier l'adéquation des lois statistiques utilisées.

Tableau IV.2 : Calcul de χ2 pour la loi normal.

Classe	Ni	npi	$D^2 = \frac{(ni - npi)^2}{npi}$
< 228,65	7	5,5	0,41
[228,65 ; 288,6[	8	5,5	1,14
[288,6 ; 348,55[	9	5,5	2,23
[348,55 ; 408,5[	5	5,5	0,05
[408,5 ; 468,45[	3	5,5	1,14
>468,45	1	5,5	3,68

$$\sum \mathbf{D^2} = \mathbf{8.64}$$

Avec :

ni : effectifs observés

n * pi : effectifs calculés

k : nombre de classes

r : nombre de paramètres estimé

L'écart entre l'observé et le théorique par classe est donné par $\frac{(ni-npi)^2}{npi}$.

La somme des écarts par classe est : $\sum \frac{(ni-npi)^2}{npi} = \mathbf{8.64}$

Pour un seuil d'erreur α de 5% et un ddl=3, la statistique (ou écart toléré par le test du χ2) est donné par la table de Pearson, $\chi^2_{\nu 5\%} = 7.81$.

Le χ2 calculé étant supérieur au χ2 Tabulé, le test du Khi deux ne permet pas un ajustement de la série de précipitations à la loi normale, au risque d'erreur de 5%.

❖ Application du Test de Kolmogorov-Smirnov

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

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

2ème étape : A chaque valeur associer la probabilité fréquentielle Fi=(i-0.5)/N

i est le rang de la valeur

N est l'effectif total de la série. Pour cette application N =38.

3ème 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.

4ème étape : On calcul l'erreur correspondante à chaque valeur de la variable étudiée.

5ème 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 tore la loi de probabilité ajustée à la série.

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

7ème étape : On conclut au seuil de confiance 95% choisi au préalable.

Après avoir appliqué ces étapes, nous avons obtenu le résultat suivant :

L'écart maximale entre la fréquence observée et théorique est de 0.0768. Pour un risque d'erreur α=5%, la valeur maximale tolérée par la statistique de Kolmogorov donnée par la table est de 0,2242.

b) Application de la loi log normale sur les précipitations annuelles

La loi Log-normale est définie par deux paramètres µ (l'espérance) et δ (la variance) , données par les équations suivantes:

$$\mu = \frac{1}{N}\sum_{i}^{N} \mathrm{Log}(P_i) \quad \text{et} \quad \delta^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{i}^{N}(\mathrm{Log}(P_i) - \mu)^2$$

Le calcul des probabilités théoriques est effectué par Microsoft Excel par la fonction : « LOI LOG NORMALE » de paramètre µ et δ.

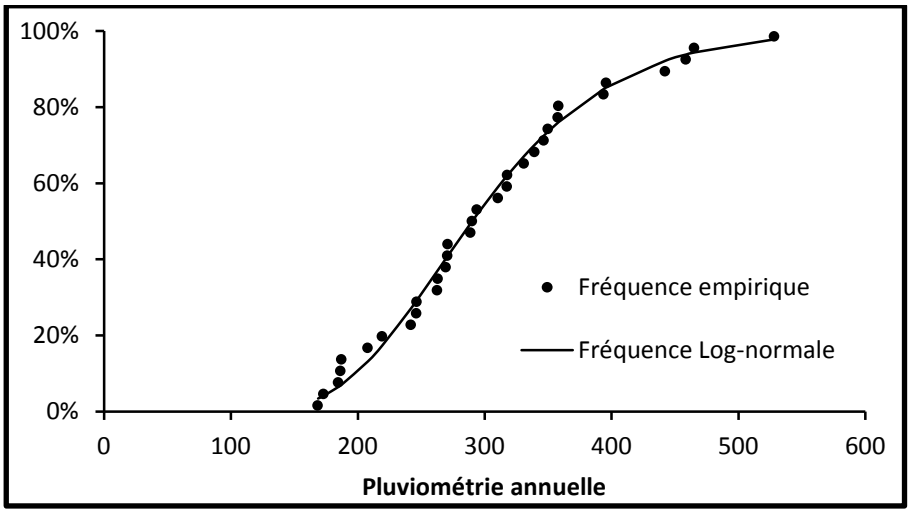


Figure IV.2 Ajustement des pluies annuelles par la loi log normale

❖ Application du Test du χ^2

Tableau IV. 3 : Test du χ^2, comparaison entre les effectifs observés et effectifs théoriques issus de la loi Log-normale.

Classe	ni	Npi	$\frac{(ni-npi)^2}{npi}$
<5,32	5	5,50	0,05
[5,32 ; 5,51[	5	5,50	0,05
[5,51 ;570[	8	5,50	1,14
[5,70 ;5,89[	9	5,50	2,23
[5,89 ;6,08[	2	5,50	2,23
>6,08	4	5,50	0,41

$\sum \chi 2 = 6.09$

L'écart entre l'observé et le théorique est donné par $\frac{(ni-npi)^2}{npi}$.

La somme des écarts est : $\chi^2_{calculée} = \sum \frac{(ni-npi)^2}{npi} = 6.09$

- Pour la loi log-normale avec un seuil de d'erreur α de 5% (0,05) et un ddl=3(ddl = 6 - 2 – 1), la table du χ2 de Pearson nous donne un χ2 Tabulé = 7.81 >6.09 donc l'ajustement des précipitations par la loi log-normale est satisfaisant

❖ Test de Kolmogorov-Smirnov

L'écart maximale entre la fréquence observée et théorique est de 0,0652. Pour un risque d'erreur α=5%, la valeur maximale tolérée par la statistique de Kolmogorov donnée par la table est de 0,2242.

c) Application de la loi de Gumbel sur les précipitations mensuelles maximales annuelles

La loi de Gumbel est définit par deux paramètres **a** et **b**, Les paramètres a et b peuvent être déterminés par la méthode graphique ou bien par la méthode des moments.

- **représentation graphique :**

❖ Classer la série des précipitations par ordre croissant.

❖ Calculer fréquence expérimentale, F= (i-0.5)/N.

Avec :

I: rang

N: taille de l'échantillon.

- On calcule la variable réduite « ou droite » de Gumbel

  $Ui = ax_i + b = -\ln(-\ln(f(xi)))$

- Représentation graphique des fréquences empiriques par rapport à la droite théorique.
- Estimation des paramètres a et b par une corrélation simple en utilisant Microsoft Excel.
- Appréciation de la qualité d'ajustement par le graphe.

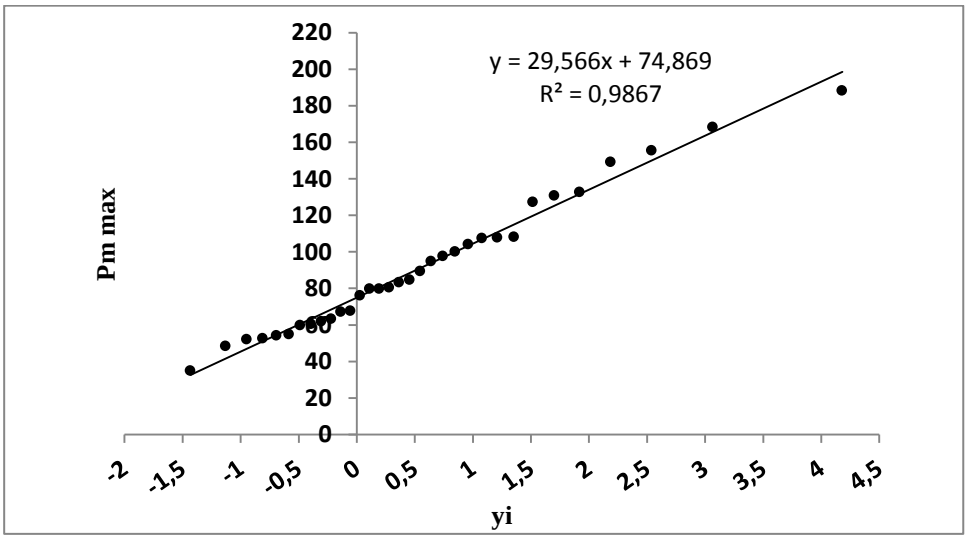


Figure IV.3 Ajustement des pluies mensuelles maximales par la loi Gumbel

L'ajustement graphique à la loi Gumbel est acceptable d'après (Fig. IV.3)

IV.2.2 Variation annuelle des précipitations (1973-2005)

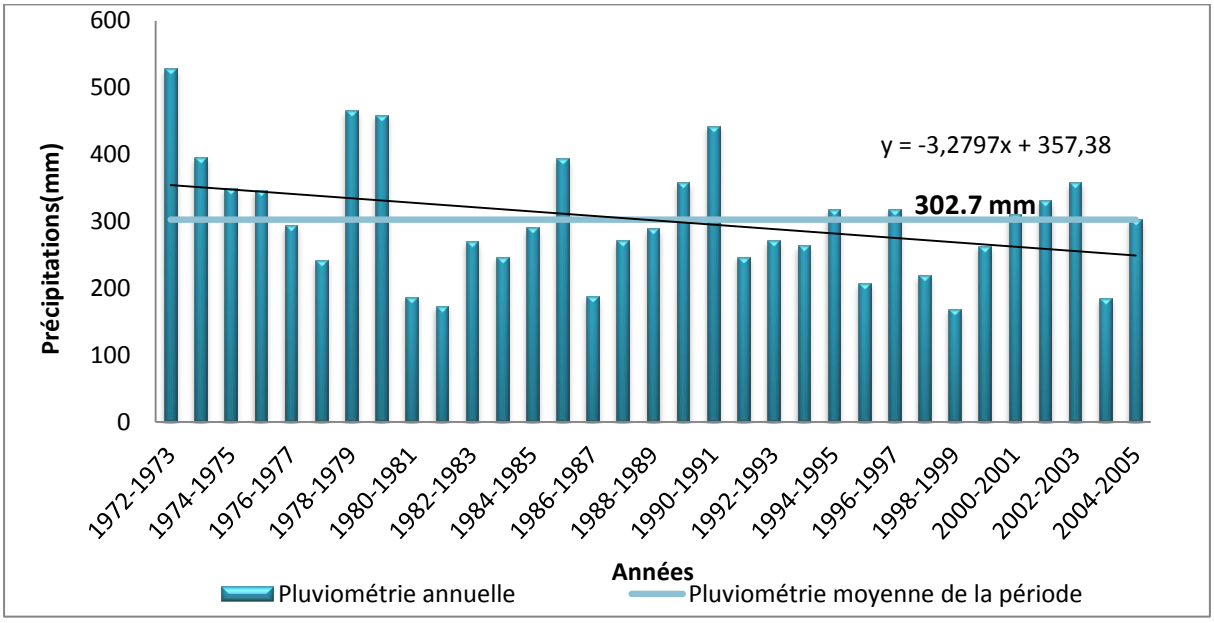


Figure VI.4 : Variations interannuelles des précipitations à la station de Maghnia (1973-2005)

Les variations interannuelles de précipitations (Fig. VI.4) mettent en évidence une période plus ou moins sèche avec quelques années humides. La hauteur annuelle maximale est 528.4 mm, observé en 1973/1974. La plus faible valeur, 168.7 mm, a été enregistrée en 1999/2000. La moyenne interannuelle des précipitations est m=303 mm. De plus, on remarque une tendance à la baisse de la pluviométrie avec une diminution annuelle moyenne de 3.3 mm/an, soit une baisse relative d'une année à une autre de l'ordre de 1%.

IV.2.3 Variation mensuelle des précipitations (1973-2005)

Les précipitations moyennes mensuelles sont présentées dans le tableau VI.4

Tableau IV.4 : variation des moyennes mensuelles

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
P(mm)	13	23	38	34	32	43	44	38	26	6	2	4	303
P (%)	4.3	7.6	12.5	11.2	10.6	14.2	14.5	12.5	8.6	2.0	0.7	1.3	100

On constate que l'année hydrologique dans notre bassin se divise en trois saisons pluviométriques:

- Une période sèche qui correspond au mois (juin, juillet et août), cette saison représente 3.96% par rapport à l'apport annuel moyen en pluviométrie.
- La période relativement sèche, correspond au mois de septembre et octobre qui contribuent à hauteur de 11.88% ;
- Une période humide qui s'étale du mois de novembre jusqu'à Mai, et qui en moyenne cumule 84.15% de la pluviométrie annuelle.

Rapport-Gratuit.com

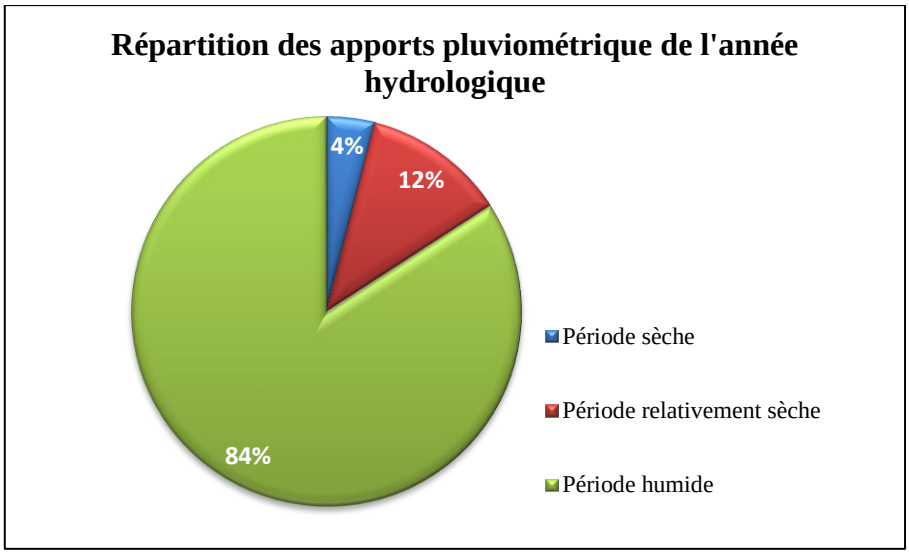


Figure IV.5: Différentes périodes de l'année hydrologique

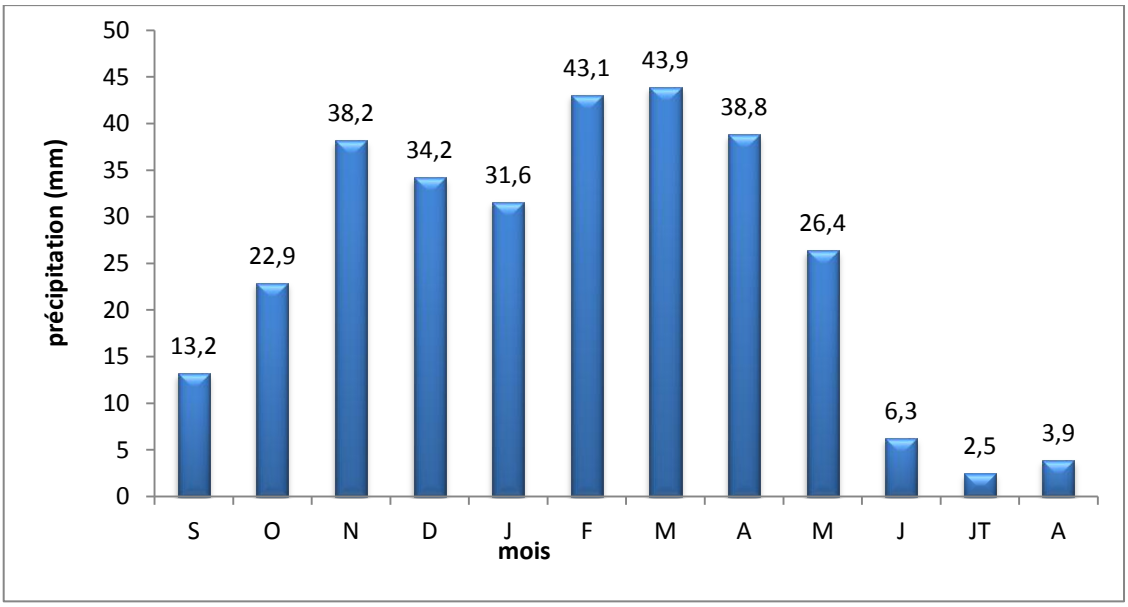


Figure IV.6 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles à la station de Maghnia (1973-2005)

Les mois les plus pluvieux sont par ordre d'abondance pluviométrique mars, février, avril et décembre avec des contributions respectives de 14.5, 14.2, 12.5 et 12.5 %. Les mois secs sont juillet et août (0.66, 1.32%).

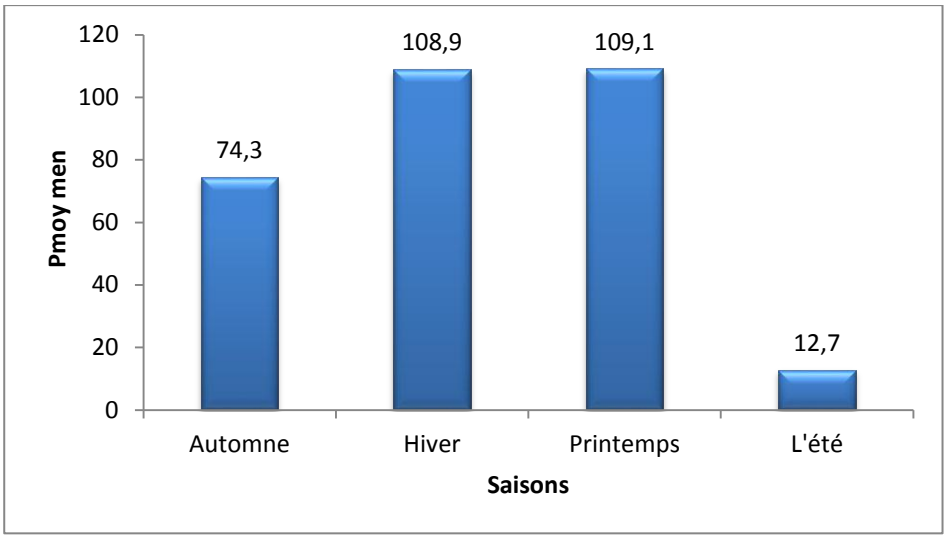


Figure IV.7 : Répartition saisonnière des précipitations à la station de Maghnia (1973-2005)

Les précipitations saisonnières ont été calculées à partir des données mensuelles. Les précipitations d'automne sont la somme des moyennes mensuelles des mois de septembre, octobre et novembre. Les précipitations en hiver la somme des moyennes mensuelles des précipitations des mois de décembre, janvier et février. Les précipitations du printemps la somme des moyennes mensuelles des précipitations des mois de mars, avril et mai. Les précipitations d'été la somme des moyennes mensuelles des précipitations des mois de juin, juillet et août dont on trouve que les saisons les plus pluvieuses sont l'hiver et le printemps avec une valeur maximale de 109.1 mm.(Figure VI.7).

VI.3. Etude des débits

Pour contrôler les flux d'eau et sédiments associés, l'étude est basée sur les données hydrométriques fournies par l'Agence Nationale des Ressources en Hydrauliques (ANRH) (www.anrh.com). Les données fournies dans un fichier sous format Excel, contient les informations suivantes : la date (année, mois, jour heure et minute), le débit liquide (en m^3s^{-1}), et la concentration (en gL^{-1}).

La série des données hydrométriques représentant Oued Mouilah couvrent la période de 16 ans hydrologiques (septembre1977- août 1993) et représentent 3468 enregistrements instantanés.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

IV.3.1 Variation annuelle des débits (1977-1993)

La variation des débits moyens annuels (ou module annuel) est rapporté sur l'histogramme (fig. VI.8). Le graphe montre que l'année hydrologique 1986 a reçu le plus grand débit, 54,4 m^3/s. Le débit le plus faible, 1.35m^3/s, est observé durant l'année 1982.

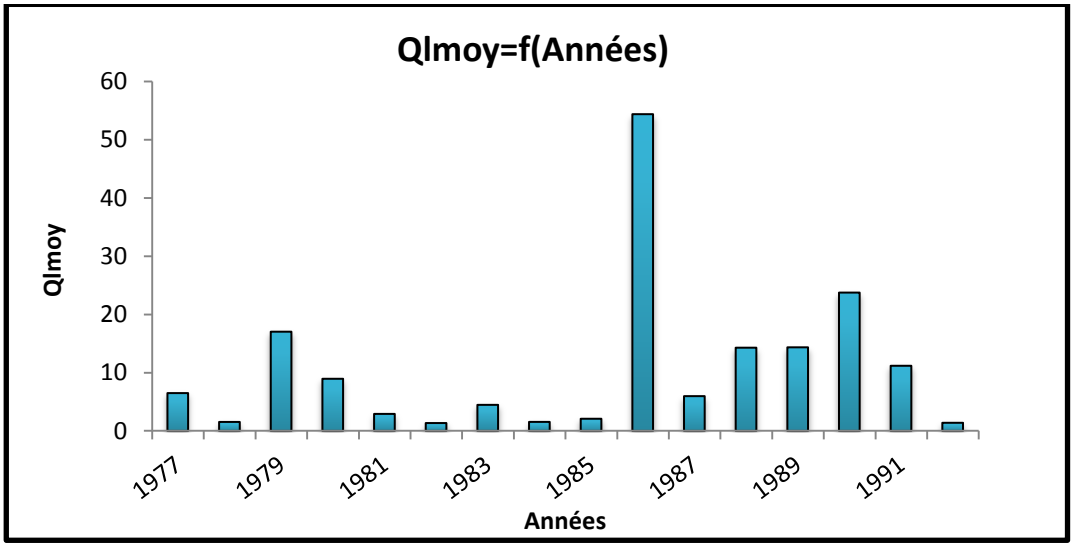
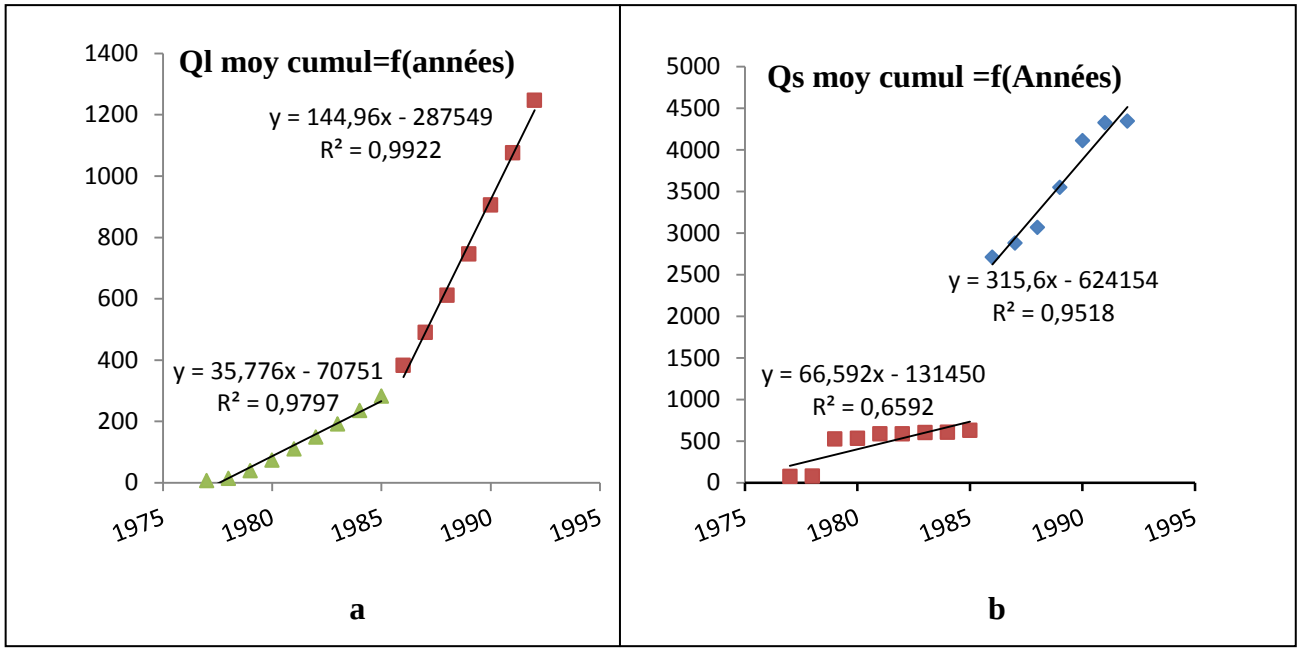


Figure IV.8 : Débits moyens annuels de l'oued Mouilah

Pour une analyse globale de la tendance des débits annuels et pour repérer s'il y a un changement dans le comportement d'un paramètre sous l'influence d'un autre paramètre, nous avons choisi d'utiliser la méthode des doubles cumuls.

La méthode des doubles cumuls a été initiée par MERRIAM (1937). Elle est souvent utilisée pour vérifier l'homogénéité des données chronologiques et déceler les changements dans le comportement de phénomènes hydro-climatiques. Cette méthode consiste à tracer la courbe de valeurs cumulées en fonction des années, ou bien pour une même période le cumul de valeurs d'une variable en fonction du cumul de l'autre variable (SEARCY et HARDISON, 1960). Dans les deux cas, la courbe obtenue est une ligne droite dont la pente représente la constante de proportionnalité. Une rupture de pente indique un changement de cette proportionnalité (KALRA et KUMAR, 1989; WIGBOUT, 1973; ZAHO et al.,2004). La cassure de pente ainsi que l'angle formé par les deux droites indiquent la date et le degré du changement dans le comportement du phénomène. Dans le cas de deux variables, la relation montre le degré d'influence du changement de comportement d'un phénomène sur l'autre.



FigureVI.9 :Simple cumul des débits liquides et débits solides en fonction des années (1977-1993)

D'après la figure (VI.9), on remarque une cassure apparante dans la figure(a) pendant l'année hydrologique (1985-1986), et par conséquent on observe un saut très important de débit solide moyen pendant la même année avec un taut de changement de 374%, se qui signifie une production sédimentaire très importante figure (b).

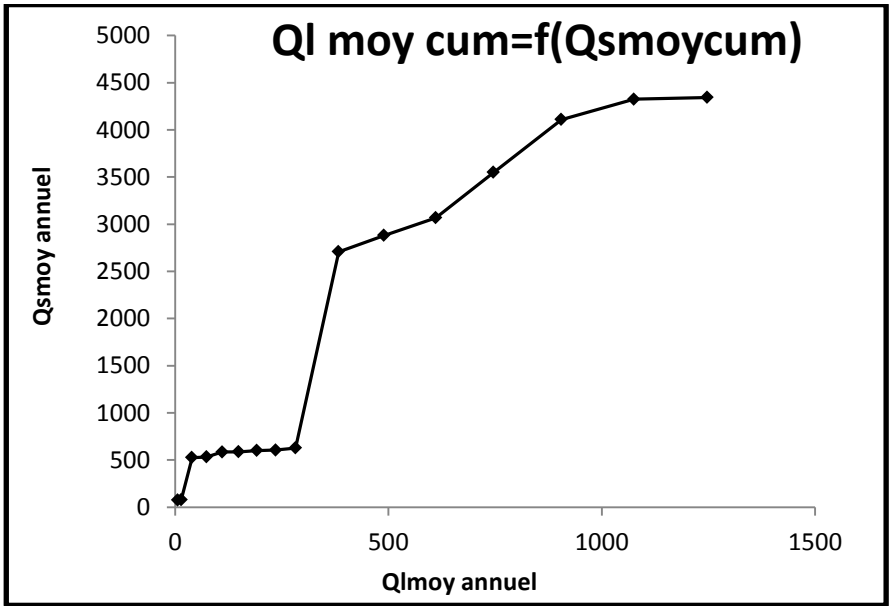


Figure IV.10 Evolution du cumul des débits liquides moyens en fonction du cumul des débits solides moyens

IV.3.2. Variation des débits extrêmes saisonniers

Dans ce paragraphe, on s'intéresse à la répartition interannuelle du débit maximal saisonnier durant la période d'étude

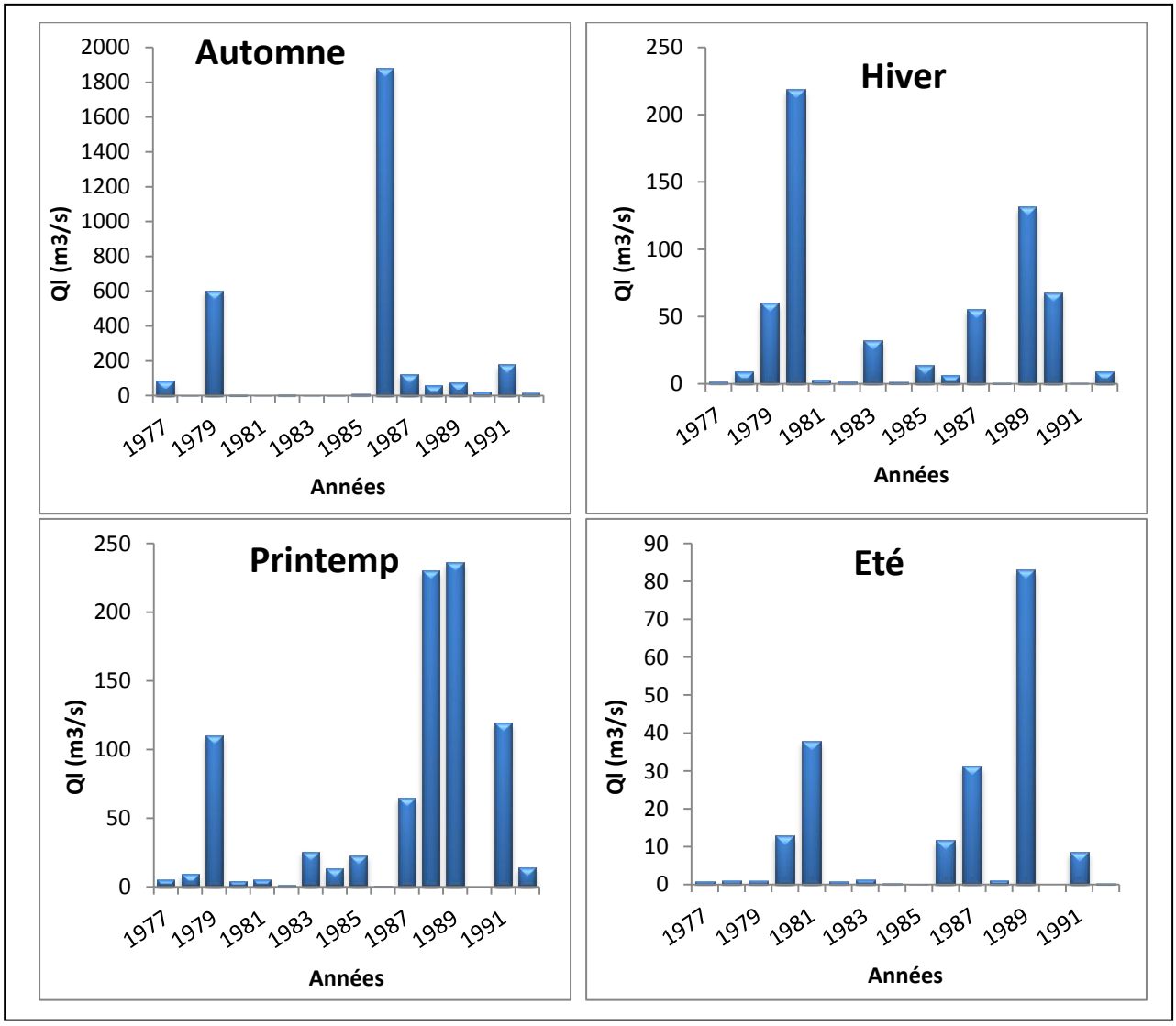


Figure VI.11 : Répartition interannuelle du débit maximal saisonnier

Nous constatons que les plus forts débits se manifestent à tout moment de l'année. Durant l'automne le débit maximal peut être très important jusqu'à 1800 m^3/s. Durant l'hiver et le printemps le débit maximal est faible à modéré pour avoisiner les 200 m^3/s. Durant l'été le débit maximal ne dépasse pas les 90 m^3/s.

IV.3.3 Corrélation entre débits solides en suspension et débits liquides

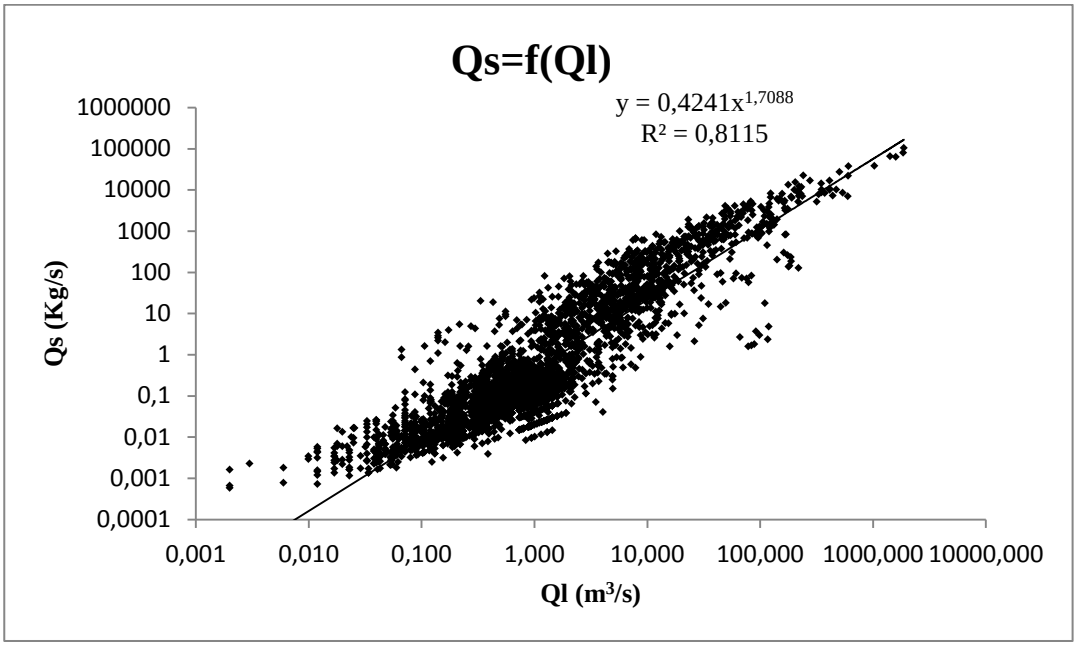


Figure VI.12 : Evolution des débits solides en fonction des débits liquide instantanés

Le graphe présenté dans la figure (IV.12) indique qu'il existe une corrélation acceptable entre ces deux grandeurs, cette corrélation signifie la dynamique sédimentaire de l'oued Mouilah .ceci peut s'expliquer par l'effectivité de la relation puissance.

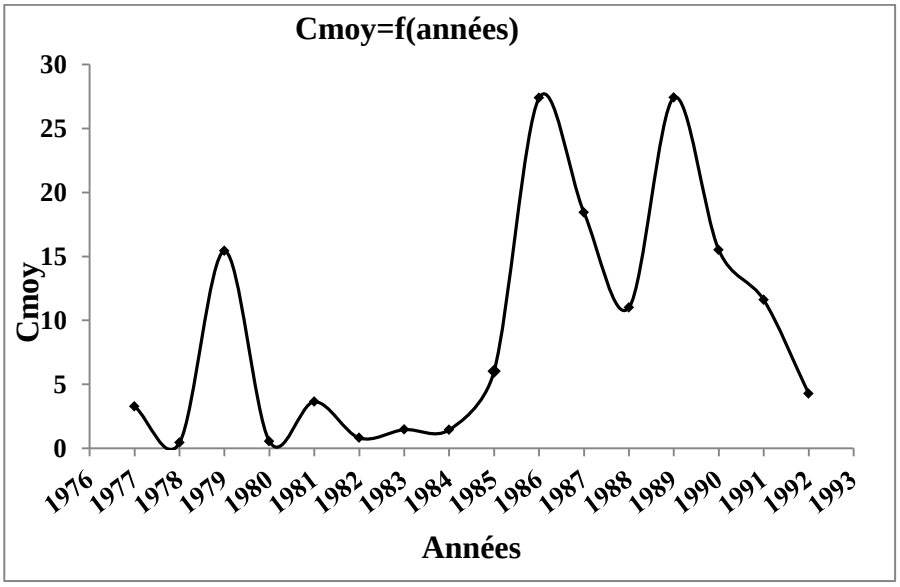


Figure IV.13 : .Evolution de la concentration moyenne

D'après la (figure IV.13) on peut distinguer deux périodes consécutives

- La première entre 1977 et 1984 dont on remarque une production de sédiment plus ou moins faible avec une moyenne de 3.4g/l et dont la valeur maximale est de 15.4g/l enregistré en 1979.
- La deuxième entre 1985 et 1990 dont on remarque une production active avec une moyenne de 15.2mg/l et deux sommets remarquables de valeur ≈ 27.4 g/l enregistrés en 1986 et 1989.

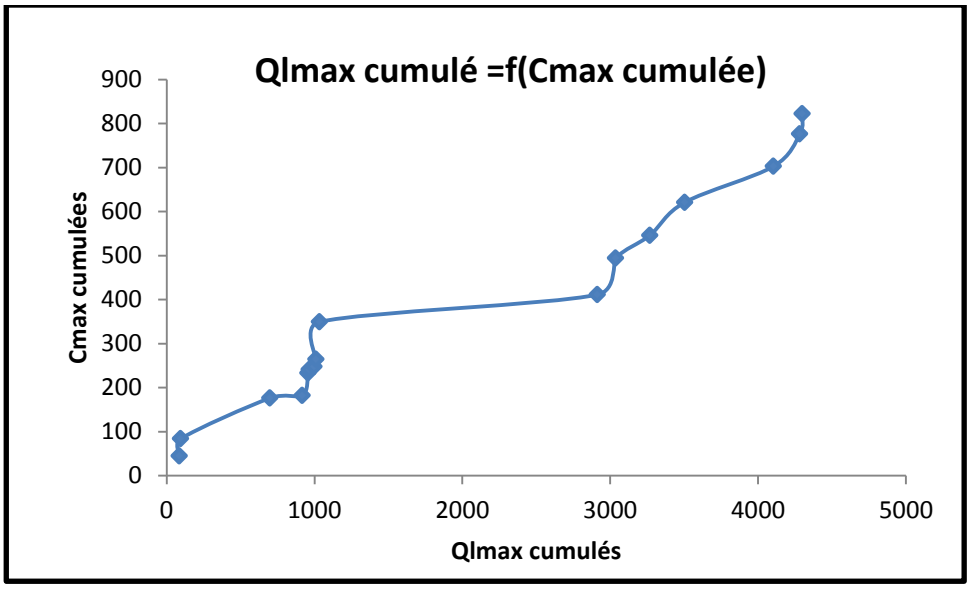


Figure IV.14 : Evolution de la concentration maximale en fonction du débit maximal

Dans cette figure, nous avons utilisé la méthode des doubles cumules pour mieux cerner l'évolution de la concentration maximale annuelles en fonction du débit de pointe enregistré durant l'année hydrologique.

Nous observons une relation de corrélation directe entre les deux variables avec une augmentation remarquable du débit entre 1985 et 1986.

IV.4. Etude des apports

Pour mieux comprendre l'importance et l'état du transport solide en suspension dans la région d'étude, on opte pour l'estimation des apports liquides et solides et étudier leur évolution temporelle et surtout pendant les événements de crue.

Entre deux mesures consécutives (Q_i ; C_i) et (Q_{i+1} ; C_{i+1}), l'apport liquide est évalué suivant les formules :

$Al_{i,i+1}$: Apports liquides (Hm^3) est donné par : $A_{li,i+1}= 0.5\times(Q_{Li}+Q_{Li+1})\times(t_{i+1}- t_i)\times86400$

$As_{i,i+1}$: Apport solide (MT) est donné par : $A_{si,i+1}= 0.5\times(Q_{si+1}+Q_{si})\times(t_{i+1}- t_i)\times86400$

Avec t: Temps (s) et $Q_{Si} = Q_i C_i$ en kg/s.

L'apport relatif à une période T est la somme des apports A_{lii+1} (respectivement A_{Sii+1}), correspondant à la période considérée.

La dégradation spécifique A_{SS} relative à une période est l'apport solide de la période considérée divisée par la superficie du bassin versant : $A_{SS}= A_S/A$

Le calcul des débits liquide ou solide se rapportant à une période annuelle, saisonnière ou mensuelle passe d'abord par le calcul des apports en eau ou en sédiments de la période considérée. Le débit liquide (respectivement solide) est l'apport en eau en m^3 (respectivement l'apport solide en kg) divisé par le temps en seconde de la période considérée.

Tableau IV.5 Calcul annuel des des apports liquides (Al), solides (As) et les dégradations spécifiques (Ass) au niveau du bassin de Mouilah

Année	Al (Hm^3)	As (10^3T)	Ass ($10^3T/km^2/an$)	Qmoy (m^3/s)	Q_S (kg/s)	C_{moy} (g/l)	Q_{lmax} (m^3/s)	Q_{smax} (Kg/s)
1977/78	51,2	167,9	0,063	1,625	5,3	3,28	86,1	2897,9
1978/79	33,5	14,6	0,006	1,062	0,46	0,44	9,2	108,4
1979/80	112,7	1737,7	0,656	3,574	55,1	15,4	604,4	22393,8
1980/81	78,6	42,6	0,016	2,492	1,35	0,54	219	184,8
1981/82	51,7	188	0,071	1,639	5,96	3,64	37,76	1622,17
1982/83	36	29,1	0,011	1,141	0,9	0,808	9,16	38,6763
1983/84	31,2	45,4	0,017	0,989	1,44	1,46	32	164,48
1984/85	18,6	26,9	0,010	0,589	0,852	1,446	13,26	129,88
1985/86	15,7	94,6	0,036	0,497	3,001	6,032	22,8	671,17
1986/87	92,8	2541,4	0,959	2,943	80,6	27,4	1880	104434
1987/88	22,2	409,5	0,155	0,705	12,9	18,43	124	6586,88
1988/89	49,7	546,2	0,206	1,575	17,319	10,9	230	8100,6
1989/90	72,6	1991,1	0,751	2,303	63,137	27,4	236,5	15354,5
1990/91	55,9	867,2	0,327	1,774	27,5	15,500	600	10019,85
1991/92	117,3	1360,5	0,513	3,719	43,14	11,6	178,3	13197,7
1992/93	14,5	61,9	0,023	0,460	1,96	4,27	16,8	634,7

Le tableau (IV.5) Représente le calcul annuel des apports liquides (Al), solides (As) et les dégradations spécifiques (Ass) au niveau du bassin de Mouilah relatives à la période de mesure. L'analyse de ces données permet de déduire que pour le bassin Mouilah les dégradations spécifiques annuelles varient de 6 t et 960 tonnes/km^2/an.

Les variations interannuelles des apports liquides et solides sont présentées dans (Fig. IV.16). On remarque une évolution irrégulière de l'apport liquide entre les années 1977 et 1990 avec

des valeurs plus ou moins faible comprises entre 1.16 et 11.33 Hm^3 suivit d'une augmentation énorme atteint 62.6 Hm^3 enregistrée en 1991.

D'après le graphe des apports solide on constate que l'oued Mouilah apporte les plus grandes quantités des sédiments au cours des années 1989 et 1991 avec les valeurs respectives 539.64 et 993.08 10^3 T.

Cette irrégularité peut être due à la nature des précipitations qui son caractérisées par l'irrégularité et le caractère torrentiel ainsi les autre facteurs qui favorisent les écoulements superficiel (couverture végétal dégradée, perméabilité de sol, l'érosion).

IV.4.1. Apports liquides et solides annuels

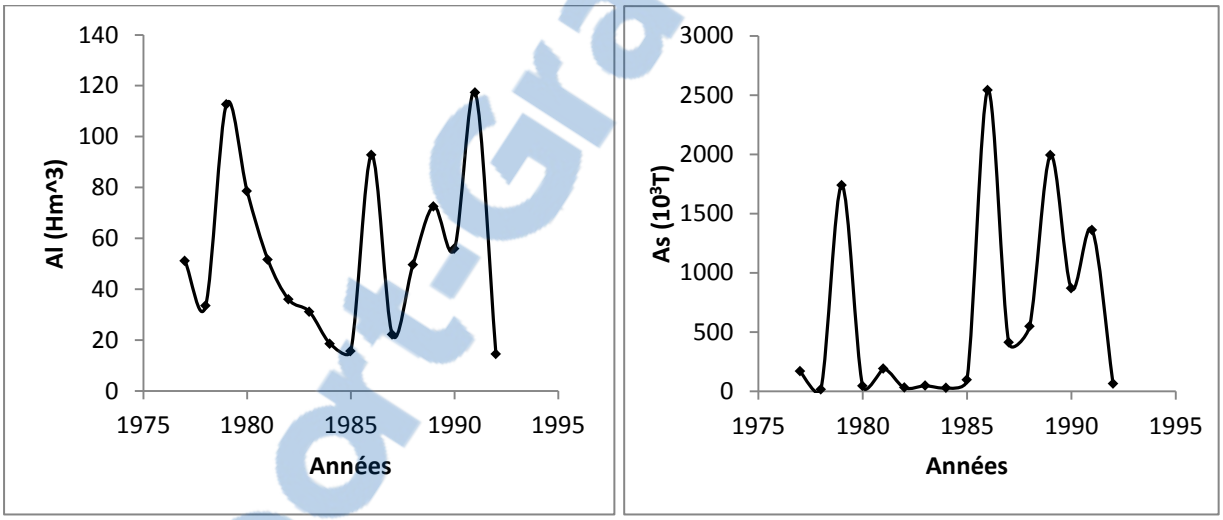


Figure VI.15 : Evolution des apports solides et liquides

Dans (Fig. IV.15) sont superposés les apports annuels liquide et solide. On comparant les deux courbes, on remarque que la production des sédiments à nettement augmentée à partir de l'année 1986. En effet avant 1986, la courbe des apports solide au-dessous de la courbe des apports solides est passée au-dessus après cette date.

Rapport-Gratuit.com

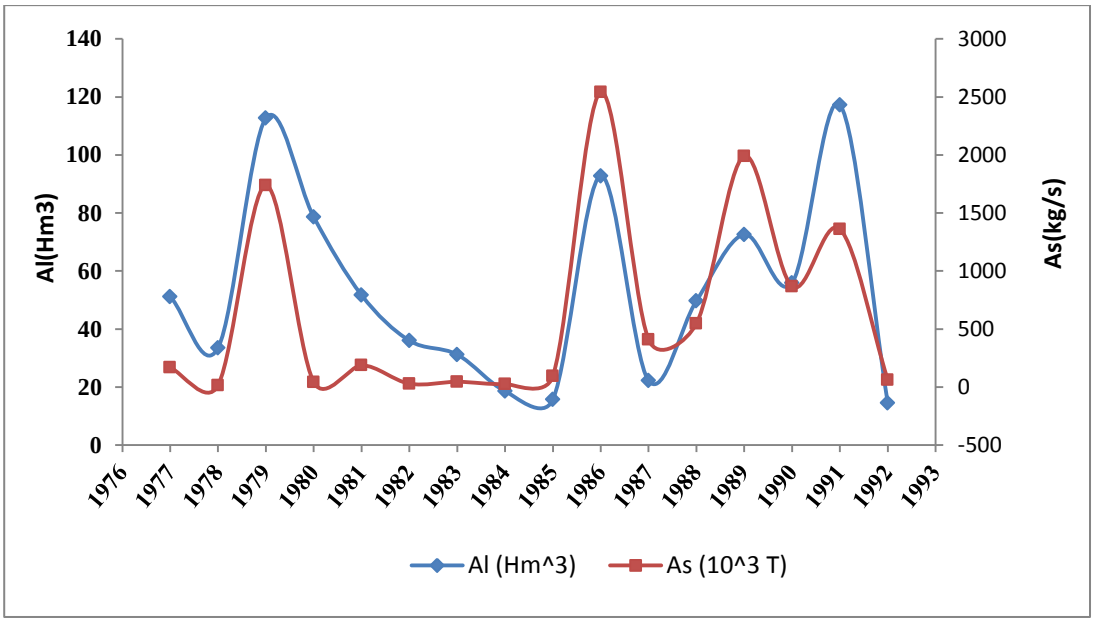


Figure IV.16 : Variation de l'apport annuel liquides et solides à la station de Mouilah

IV.4 .1 .Apports liquides et solides saisonniers

Pendant les 16 années hydrologiques étudiées, les apports liquides de l'automne sont les plus élevés (19.4 Hm3) (Fig. IV.16), suivi par ceux de printemps puis d'hiver avec des moyennes respectives de (15.5 Hm3) et (11.2 Hm3). Les écoulements de la saison d'été sont les moins importants avec une moyenne de (4.7 Hm3).

On observe que la quantité la plus importante des sédiments pendant notre période d'étude est apportée en automne avec une moyenne de (248.6 10^3T), suivi par ceux de printemps puis d'été avec des moyennes respectives de (138.6 10^3T) et (37.4 10^3T). Les apports d'hiver sont les moins importants avec une moyenne de (20.2 10^3T).

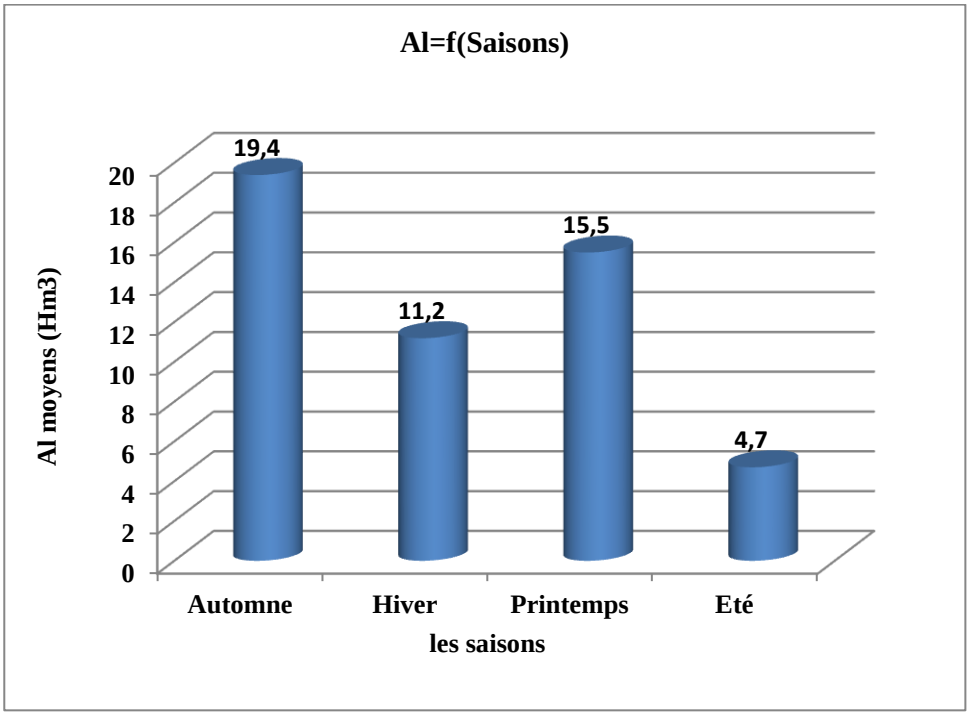


Figure VI.17 : Evolution des apports liquides moyens saisonniers

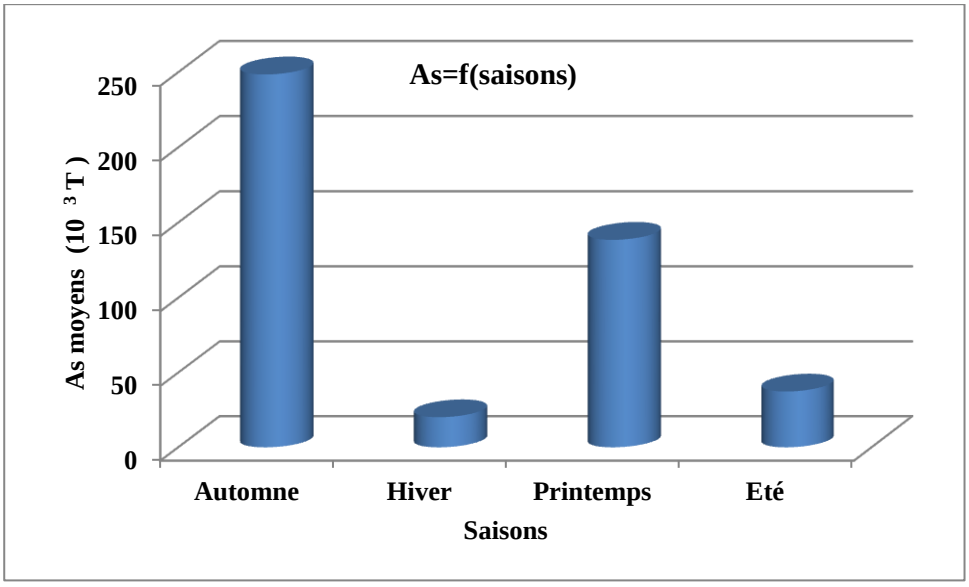


Figure IV.18 : Evolution des apports solides moyens saisonniers

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

IV.5. Etude des crues :

Les crues prises en considération sont celles qui se manifestent par une variation notable du débit liquide (supérieur au module moyen annuel), nous avons détecté 106 crues sur notre période d'étude (16ans) (Annexe I), dont le nombre moyen de crue est de 6 crues/an.

Dans le tableau (IV.6), nous avons effectué les différents calculs par événement dont on observe que le plus grand nombre des crues s'exécutent en 1989-1990 (14 crues).
Les crues enregistrées pendant la période d'étude apportent entre 0.1 et 70.9 Hm^3et un apport solide entre 0.02 et 2359.8 10^3 T dont la plus courte crue a duré 6 h, et la plus longue 3264 heure, soit 132 jours. La crue la plus importante est celle enregistrée au cours de l'année hydrologique (1986-1987) avec un débit de 1880 m^3/s, ce dernier portait 2,69 milles de tonnes de sédiments. La crue a plus faible production est celle enregistrée pendant l'année hydrologique 1992-1993 avec un débit de 0.5 m^3/s portait un apport de 0.1 10^3 T.

La figure ci-après montre la date d'arrivée de la 1ère crue d'automne. En ordonnées sont représentés le nombre de jours à partir du 1erseptembre avant l'arrivée de la 1ère crue.

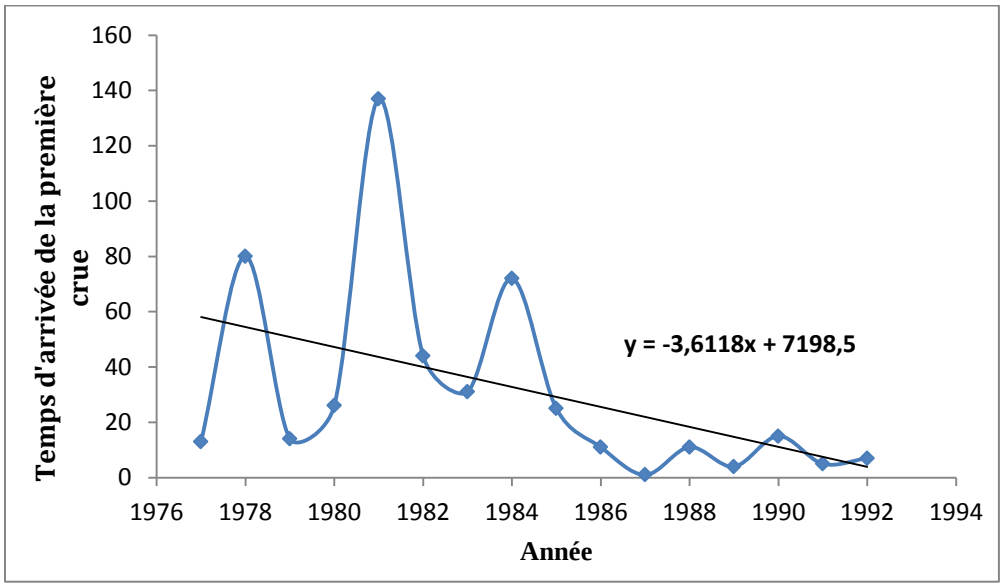


Figure IV.19. Evolution du temps d'arrivée de la première crue

Le graphe représenté dans la figure IV.19 désigne une tendance décroissante, dont on remarque qu'en passant d'une année à l'autre le temps d'arrivée de la première crue diminue de presque 4 jours.

La répartition des crues par saison est représentée dans le tableau suivant :

Tableau IV.6 calculs effectuée par saisons

Année	saison	nombre de crue	Al Hm^3	As 10^3T	Cmoy g/l	Qlmax m^3/s	Qs max Kg/s	C max g/l
1977	Automne	3	22,5	164,7	7,37	86,1	2897,9	40,2
	Hiver	1	12,5	2,5	0,2	1,9	2,46	2,01
	Printemps	1	8,97	0,46	0,05	4,97	0,5222	0,15
	Eté	0	7,3	0,15	0,021	0,9	0,038	0,04
1978	Automne	1	8,7	0,31	0,036	2,2	0,65212	0,3
	Hiver	1	10,4	12,4	1,19	9,2	108,5	35,8
	Printemps	2	9	11,2	1,26	9,2	108,5	35,8
	Eté	0	7,4	0,4	0,056	1,055	0,17	0,15
1979	Automne	6	72,2	1582,3	21,9	604,4	22393,8	72,3
	Hiver	2	15,6	30,4	1,95	60,25	1080,9	22,99
	Printemps	2	18,12	124,08	6,85	110,1	2298,8	17,05
	Eté	0	6,8	0,9	0,136	0,93	0,32	0,3
1980	Automne	1	6,4	3,4	0,523	7,04	38,02	5,69
	Hiver	3	52,8	33,8	0,64	219	184,8	3,2
	Printemps	1	13,3	1,1	0,079	4,21	0,512	0,3
	Eté	1	6,1	4,5	0,737	12,85	28,35	2,69
1981	Automne	0	16,9	3,4	0,20	1,75	6,03	3,2
	Hiver	2	9,4	0,3	0,036	2,86	0,1	0,06
	Printemps	3	8,1	2,4	0,30	4,95	3,84	2,06
	Eté	2	17,3	181,8	10,5	37,76	1622,2	48,18
1982	Automne	2	12,4	24,8	1,99	9,16	38,68	6,8
	Hiver	3	10,9	1,2	0,11	1,75	0,32	0,23
	Printemps	1	7,4	1,8	0,25	1,45	0,7	0,45
	Eté	0	5,3	1,3	0,24	0,88	0,65	0,64
1983	Automne	1	5	1,4	0,29	1	0,64	0,815
	Hiver	4	10,1	19,3	1,91	32	164,48	6,53
	Printemps	3	12,2	23,9	1,96	25,6	119,26	6,755
	Eté	1	3,9	0,8	0,217	1,282	0,37	0,53
1984	Automne	1	4,6	6,8	1,47	3,250	48,69	13,3
	Hiver	1	3,9	1,3	0,3	1,372	1,43	0,99
	Printemps	3	8,9	18,6	2,1	13,260	129,88	16,27
	Eté	0	1,2	0,2	0,14	0,390	0,06	0,35
1985	Automne	3	3,9	49,8	12,9	9,440	671,2	83,87
	Hiver	1	7,7	34,7	4,49	14,1	250,13	17,04
	Printemps	2	3,7	9,9	2,7	22,8	400,05	19,59
	Eté	0	0,4	0,2	0,51	0,104	0,208	1,65
1986	Automne	5	79,1	25,25	31,9	1880	104434	58,15
	Hiver	1	8,3	6,5	0,77	6,750	40,77	5,2
	Printemps	0	3,2	1,1	0,35	0,812	0,715	0,88
	Eté	1	2,2	8,8	4,05	11,64	337,59	42,1

1987	Automne	2	7,9	251,9	31,9	124	6586,88	75,95
	Hiver	2	6,9	42,8	6,23	55,02	975,06	19,17
	Printemps	1	4	53,3	13,46	65,14	1354,9	21,05
	Eté	1	3,5	61,5	17,58	31,3	851,36	28,03
1988	Automne	2	14	39	2,8	61,5	314,13	23,82
	Hiver	0	3,9	0,6	0,153	0,822	0,282	0,44
	Printemps	3	31,3	503,3	16,072	230	8100,6	52,05
	Eté	1	0,5	3,3	6,219	1,116	31,9	28,10
1989	Automne	6	17,5	393,5	22,4	78,05	3545,7	57,6
	Hiver	2	14,3	75,2	5,2	131,5	1643,75	13,9
	Printemps	5	32,4	1251	38,64	236,5	15354,5	74,8
	Eté	1	8,4	271,3	32,42	83,12	5246,5	68,06
1990	Automne	3	5,2	115,3	22,35	23,18	1895,2	80,4
	Hiver	1	6,6	57,2	8,68	68	2181,12	34,78
	Printemps	/	/	/	/	/	/	/
	Eté	/	/	/	/	/	/	/
1991	Automne	2	30,5	1279,8	41,89	178,3	13197,76	71,78
	Hiver	0	1,9	0,1	0,072	0,492	0,089	0,21
	Printemps	4	81	54,8	0,677	119,5	777,2	18,4
	Eté	1	3,9	25,8	6,66	8,45	181,8	38,88
1992	Automne	1	3,4	35,6	0,096	16,8	634,7	38,2
	Hiver	5	3,8	4,5	1,19	9,31	55,8	5,8
	Printemps	2	6,3	21,7	3,46	14,08	211,2	16,02
	Eté	0	1	0,1	0,106	0,362	0,048	0,32

D'après l'analyse du tableau au cours des 16 années étudiées on trouve que :

- l'apport liquide moyen saisonnier le plus élevé se place en automne (19.4 Hm^3) portait un apport solide moyen saisonnier de 248.6.10 ^{3} T par rapport aux autres saisons : Printemps (16.5 Hm^3/ 138 .6 10 ^{3} T), Hiver (11.2 Hm^3/ 20.2 10 ^{3} T), l'été (5 Hm^3/ 37.4 10 ^{3} T).
- La majorité des crues s'accumulent en automne et printemps avec des pourcentages respectifs 36%, 30%, la figure ci-après montre la répartition en pourcentage des crues pendant chaque saison.

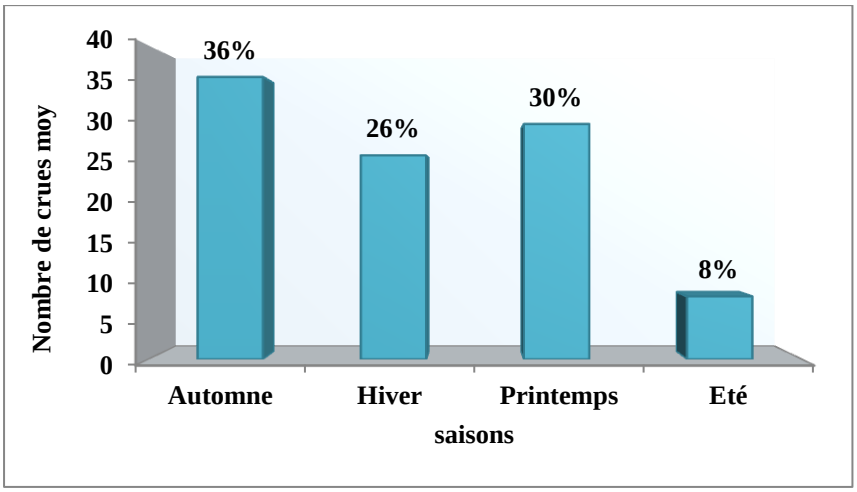


Figure IV.20 : Nombre de crues en fonction des saisons.

IV.5.1 Evolution de la concentration des sédiments en suspension et des débits liquides durant les crues (courbes hystérésis)

Nous présentons, dans cette note, les graphes des relations Concentrations des sédiments en suspension – débits liquides pour les plus importantes crues au niveau d'oued Mouilah relative à la période 1977/93. Nous essayons en même temps de caractériser et de classer ces différentes relations pour une meilleure compréhension du phénomène.

Cette étude est basée sur les travaux de G.P. Williams, 1989. Selon cet auteur, les relations entre concentration des sédiments en suspension C et les débits liquides Ql pour un événement hydrologique tel que les crues, peuvent être étudiées qualitativement par l'analyse des courbes des concentrations et des débits liquides en fonction du temps. A cet effet, l'auteur propose une classification de ces relations basées sur le rapport C/Ql durant les phases de montée de crue et de décrue.

Bien que ce n'est pas toujours évident, vu le manque et l'imprécision des données, nous allons présenter, dans ce qui suit, les graphes des relations C-Ql pour les plus importantes crues au niveau du bassin étudié.

Tableau IV.7 Différents types de classe d'hystérésis G.P. Williams, 1989

Classe	Modèle	Critère C/Ql	Références
I	courbe simple (single line) ligne droite Courbe, la pente croît quand Ql augmente Courbe, pente décroît quand Q augmente	(C/Ql)r≈ (C/Ql)f les pentes des deux sections montée et décrue sont égales les pentes des deux sections montée et décrue sont inégales les pentes des deux sections montée et décrue sont inégales	Wood (1977)
II	Boucle dans le sens des aiguilles d'une montre (Clockwiseloop).	(C/Ql)r> (C/Ql)f pour toutes les valeurs de Ql	Paustian et Beschta (1979)
III	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (Counterclockwiseloop)	(C/Ql)r< (C/Ql)f pour toutes les valeurs de Ql	Axelson (1967)
IV	simple plus une boucle (single line plus a loop)	(C/Ql)r ≈ (C/Ql)f pour une partie des valeurs de Ql (C/Ql)r >< (C/Ql)f pour une autre partie des valeurs de Ql	-
V	Linéaire Forme en huit (figure eight)	. (C/Ql)r> (C/Ql)f pour une partie des valeurs de Ql (C/Ql)r < (C/Ql)f pour l'autre partie des valeurs de Ql (C/Ql)r = (C/Ql) de la courbe de montée de crue pour des débits données ; (C/Ql)f = (C/Ql) de la courbe de décrue .	Arnborg et al. (1967)

(C/Ql)r = (C/Ql) de la courbe de montée de crue pour des débits données ; (C/Ql)f = (C/Ql) de la courbe de décrue .

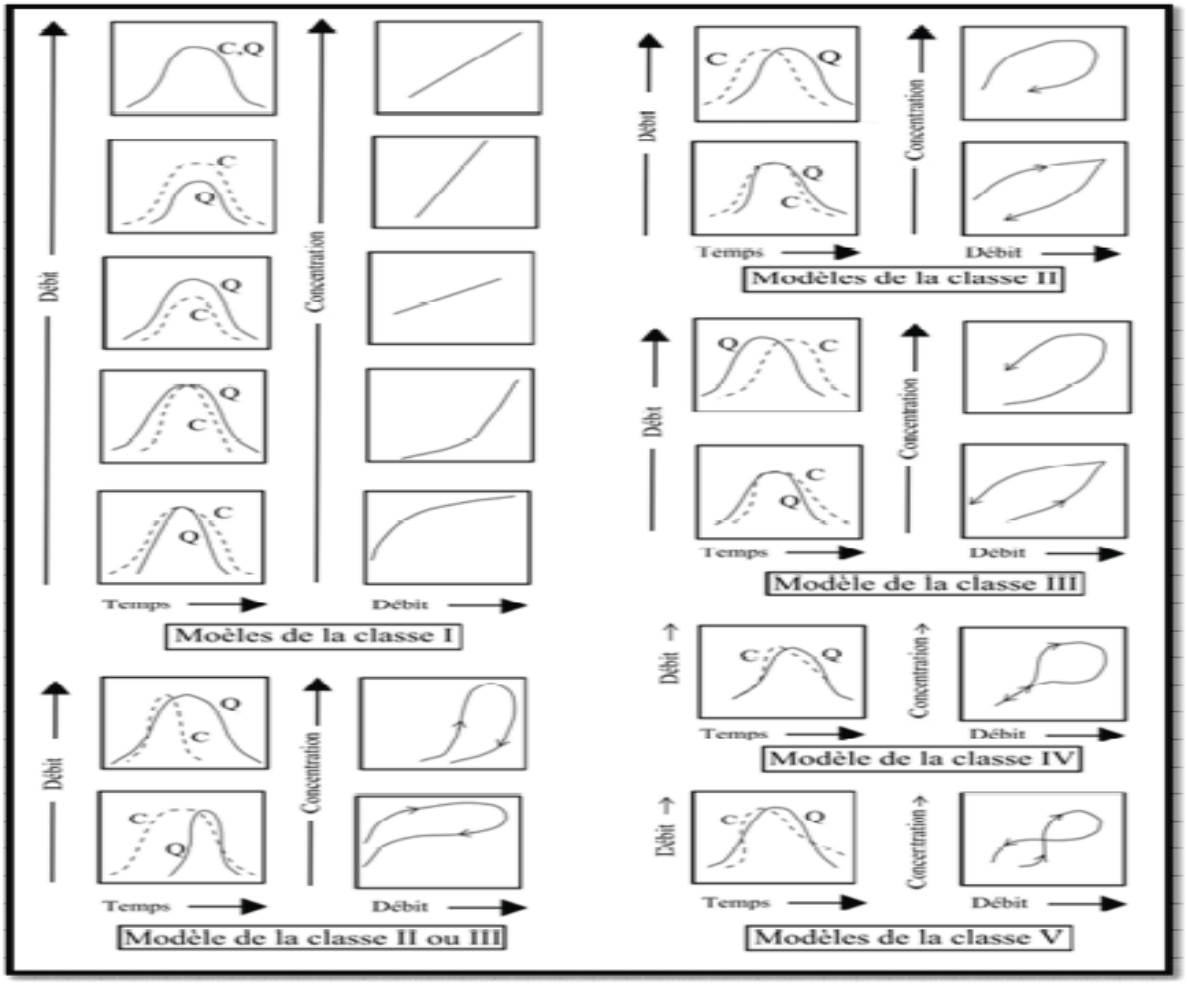


Figure IV.21 : Modèles des relations concentration débit liquide (Williams,G.P., 1989)

IV.5.2. Application au bassin de l'oued Mouilah :

Parmi les 106 crues sélectionnées pendant les 16 années étudiées, nous avons choisi de figurer les plus importants évènements en courbes hystérésis (AnnexeII). On remarque la présence de crues dont la forme est complexe et qui ne sont pas pris en considération par la classification de Williams (1989). Dans cette étude, les formes complexes font parties de la classe numéro VI.

Tableau IV. 8 Classement des hystérésis (1977-1993)

classes	I courbe simple	II clockwise	III Counter-clockwise	IV- Linéaire simple plus une boucle	V figure en huit	VI Forme complexe
Nombre de crues	5	19	26	8	32	25

IV.5.3 Analyse des hystérises :

Les courbes au (Annexe II), montrent que l'évolution des concentrations en fonction des débits liquides dans l'oued Mouilah pendant les crues suit principalement deux modèles :

- La forme en huit se présente aussi bien pour les crues d'automne. Cela peut s'expliquer par la disponibilité des sédiments produits par des crues précédentes.
- Le modèle " counterclockwise loop " : les courbes en boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre se présente pour les crues survenues en automne après une saison généralement sans pluie et où le sol est dénudé et fragilisé. L'érosion est active dès les premières pluies qui, même si elles sont d'un faible apport liquide, peuvent donner des concentrations importantes en sédiments en suspension.

Les « counterclockwise loop» résultent de l'une des trois causes suivantes :

- Une des causes possible, est le temps de parcourt de l'onde de crue et du flux des sédiments, particulièrement en raison de la distance entre la source de la crue et la station de jaugeage (Heidel, 1956). Les variations des débits tendent à suivre les vitesses de l'onde de crue. Cette vitesse est généralement plus rapide que la vitesse moyenne d'écoulement (Williams G.P., 1989).
- La deuxième cause rapportée des boucles dans le sens contraire des aiguilles d'une montre est l'érodabilité importante du sol en même temps que de l'érosion prolongée pendant la crue (Kung et Chiang, 1977).
- La troisième cause est la variabilité de la distribution saisonnière des pluies et de la production des sédiments dans le bassin.

Conclusion Générale

L'objectif de ce travail de recherche est l'étude hydrologique, climatique et la modélisation de transport solide en suspension dans le sous bassin versant de l'oued Mouilah (Nord Ouest Algérien). L'analyse procédée sur certains paramètres est détaillée comme suit:

Les paramètres morphométriques montrent que le bassin versant de l'oued Mouilah présentent une forme assez allongée (Kc= 1.25). Le bassin est moyennement drainé Dd=0.16. L'indice de pente moyenne est très fort, donc on assistera à un écoulement rapide.

La relation liant les débits liquides aux débits solides en suspension pour le bassin du Mouilah est de type puissance de forme générale ($Qs = a.Ql^b$) indique qu'il existe une corrélation acceptable entre ces deux grandeurs, cette corrélation signifie la dynamique sédimentaire de l'oued Mouilah.

Les résultats obtenus montrent que le transport des matières solides en suspension se fait principalement durant les épisodes de crues. En effet, sur un apport liquide annuel de 53.38 Hm^3 déduit d'un apport solide moyen annuel de 632.8 Kg/ s. Avec des dégradations spécifiques annuelles varient entre 6 et 960 milles de tonnes/km^2/an. Soit une moyenne de 240 tonnes/km^2/an.

Les courbes C-Ql obtenues, montrent que l'évolution des concentrations en fonction des débits liquides dans l'oued Mouilah pendant les crues suit principalement deux modèles :

- La forme en huit se présente aussi bien pour les crues d'automne. Cela peut s'expliquer par la disponibilité des sédiments produits par des crues précédentes.
- Le modèle " counterclockwise loop " : les courbes en boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre se présente pour les crues survenues en automne après une saison généralement sans pluie et où le sol est dénudé et fragilisé. L'érosion est active dès les premières pluies qui, même si elles sont d'un faible apport liquide, peuvent donner des concentrations importantes en sédiments en suspension.

Rapport-Gratuit.com

Références bibliographiques :

- **Achite M. et Meddi. M**. **2004.** Estimation du transport solide dans le bassin versant de l'oued Haddad (Nord-Ouest algerien). Secheresse
- **Adjim .M, Bensaoula .F.** application of the drastic groundwatervulnerability mapping to the aquifer of maghnia (north-west ofalgeria)
- **Asnouni. F. 2014**. Etude du transport solide en suspension dans le Bassin Versant d'oued AL ABD, Mémoire de master, Université de Tlemcen.
- **Belarbi. F. 2010**: Etude de la pluviométrie journalière dans le bassin versant de la TAFNA Magister en hydraulique Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen.
- **Bendimerad .S. 2012**. Gastion des apports en nutriment dans le bassin vessant de mouilah et leur impact sur le milieu récepteur.
- **Borst H L. Woodburd R, 1940**: Rain simulator studies of slop on erosion and runoff. USDA, Soil conservation.
- **Bouanani A. 2004**. Hydrologie, Transport solide et modélisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérien). Thèse de Doctorat d'état, Univ. Tlemcen,
- **Boudjerda. M, 2005 .**Protection contre les inondations de la région de fouka (W.Tipaza), Mémoire de magister, Ecole national supérieur d'hydraulique.
- **Bourouaha.**M 1998.phénomène de transport solide dans les hauts plateaux orientaux.cas de l'oued lougmen et oued leham dans le bassin de hodna revue des sciences et technologie.
- **Bourouaha.**M.1997. les variations de la turbidité et leurs relations avec les précipitations et les débits des oueds semi-arides de l'Algérie orientale. bulletin de l'ORSTOM
- **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., 19, 85-95
- **Chrif S. Edderkaoui R ,2014** : La lutte contre l'érosion dans le bassin versant de l'Ourika : Protection mécanique et biologique Faculté des Sciences et Techniques Département des Sciences de la Terre université Marrakech
- **Colonbani J Olivry O, 1984 :** Phénomènes exceptionnels d'érosion et de transport solide en Afrique aride et semi-aride
- **Cosandy C., Robinson M. 2012**. Hydrologie continentale, Éditions Armand colin, collection U, 2ème édition, 448 p.
- **DAJOZ R .1985** : Précis d'écologie Paris. Dunad.5eme édition.
- **Ehamdani M** : Etude Hydrologique du Bassin Versant de L'Oued Mikkès
- **Einstein, H.A. 1950.** The bed load function for sediment transportation in open channels. Washington, U.S. Department of Agriculture. 78 p. (Soil Conservation Service. Technical Bulletin 1026)

- **Elahcen O , 2013 :** Etude du transport solide par charriage et en suspension dans le bassin versant de l'oued bellah (tipaza) doctorat en science agronomique école nationale supérieure agronomique el harrache (alger) . Faculté des Sciences et Techniques – Fès Master Sciences et Techniques
- **Frécaut, F, (1971) .**La Moselle et son bassin. Contribution à l'hydrologie et la dynamique fluviales :en milieu tempéré océanique. Thèse, doctorat, Brest, Reprod. Univ. Lille III.
- **Ghenim A , Seddini A, Terfous A. 2008** :Hydrological Sciences Journal ,Variation temporelle de la dégradation spécifique du bassin versant de l'Oued Mouilah (nordouest Algérien).
- **Hachemi ,S 2014** .Protection des agglomérations contre les Inondations cas du centre d'el gouassir (w. Tlemcen) université abou bekr belkaïd – Tlemcen
- **Hamlat, 2007** : gestion de la ressource en eau dans le bassin de la tafna, mémoire de magister, département d'hydraulique, USTO-MB.
- **Iratni .N, 2014 :** Modélisation hydrologique de quelques sous bassins versant de la ***Tafna*** faculté d'architecture et de génie civil département d'hydraulique université Mohamed Boudiaf
- **Jean C. O et Jean .P 1993** .Transport en solution et en suspension par le fleuve Congo (Zaïre) et ses principaux affluents de la rive droite
- **khennane F .2015** modélisation de la qualité des eaux du cours d'eau de mouilah par weap département d'hydraulique université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed boudiaf mémoire de magister
- **KIRKBY, M.J. 1980.** The problem. In: KIRKBY, M.J. et MORGAN, R.P.C., ed. Soil Erosion. New York, John Wiley. Chap.l, p. 1.6.
- **Meddi , K A et Meddi, H**. **1998**. Etude du transport solide dans le nord de l'Algérie. *IAHS Publication*
- **Melalih , A 2011**.Analyse des techniques de conservation de l'eau et du sol dans la zone aride cas bassin versant d'AIN SEFRA Université Abou-bekr Belkaid de Tlemcen Faculté des Sciences de la Nature et de laVie magister en sciences agronomiques
- **Mokhtari E .2007** .Contribution à l'étude du transport solide en suspension Bassin de l'Oued Cheliff – Ghrib université badji mokhtar – ANNABA mémoire de magister
- **Rabdo, A. Mars 2007** .Inventaire des techniques de lutte anti érosive dans le degré carré de Ouahigouya au Burkina Faso
- par Abdoulaye RABDO
- **Remini B., 2003 .**l'envasement des barrages et la technique de soutirage : quelque exemple algériens. Colloque international sur l'eau « gestion quantitative et qualitative des ressources en eau ».chlef ; Algérie
- **Roche M. 1963**. Hydrologie de surface, Gauthier-Villars paris, 430 p.
- **Seltzer, P**. **1946** : Le climat de l'Algérie. Alger : *Météo et Phys du Globe,*Carbonnel.
- **Sidahmed B, 2014 :** quantification et modélisation du transport solide dans un cours d'eau de l'algerie septentrionale **:** cas du bassin versant de l'oued boumessaoud (Tlemcen).magister en hydraulique université de Tlemcen

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

- **Talah. S, 2014 .**Contribution à l'étude des risques des inondations de l'oued Mellah W. Djelfa par les systèmes d'informations géographiques (ArcGis et HEC-geoRAS) ; en utilisent le logiciel HEC-RAS, Thèse Magister, Université de M'silla.
- **Terfous A., Bouanani A. et Megnounif A 2001**. Evaluation du transport solide dans le bassin de l"Isser (N-O Algérien), *2e séminaire maghrébin sur l'eau*. Tizi Ouzou, 28-29 juin.
- **Walling D.D, Webb D.W & Woodward J.C**., **1992**. Some sampling considerations in the design of transport.
- **Wischmeier WH et Smith D**, 1978. Predicting rainfall erosion losses. A Guide to Conservation Planning, Washington.
- **Zobeck T, Onstad C. 1987:** Tillage and rainfall effects on random roughness: a review. Soil and Tillage Research.

Webographie

- http://www.risques-meteo.ac-versailles.fr/Crues-lentes consulté le 08/03/17 [1]
- http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre1/II.Formes.html consulté le 19/04/17 [2]
- http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre1/II.Formes.html consulté le 08/03/17 [3]
- http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre1/I.Origine.html consulté le 22/3/2017 [4]
- http://lhe.epfl.ch/rapport/DEAJodeau.pdf consulté le 17/05/17 [5]
- http://www.documentation.eaufrance.fr/entrepotsOAI/AERMC/R217/77.pdf consulté le 23 /05/17 [6].

Annexe I : calculs effectuée par événements

Année	Nbr de crues	Date		Al Hm³	As 10³T	module Al	Module As	Cmoy max (g/l)	Ql max m³/s	Qs max Kg/s	Durée jrs
		début	Fin								
1977	Crue 1	13/9	15/9	1,1	23,7	6,04	134,1	40,2	36,38	1440,65	2,04
	Crue 2	15/9	13/10	4,5	6,3	1,86	2,6	9,4	3,7	24,45	28
	Crue 3	15/10	4/12	18,2	135,2	4,25	31,56	35,86	86,1	2897,9	49,6
	Crue 4	12/4	15/4	0,9	0,05	3,3	0,19	0,13	4,97	0,52	3
1978	Crue 1	19/11	29/11	2,9	0,2	3,32	0,2	0,3	2,21	0,65	10
	Crue 2	14/2	25/2	1,9	10,9	1,96	11,5	35,8	5,59	108,45	11
	Crue 3	27/2	9/3	2,2	1,3	2,49	1,4	2,7	9,2	11,45	10
	Crue 4	12/4	16/4	0,6	1,2	1,6	3,3	0,44	1,165	0,44	4
1979	Crue 1	14/9	15/9	2,7	36,2	26,7	352,4	14,8	46,1	633,5	1,2
	Crue 2	18/10	23/10	57,2	1491,1	126,7	3300,3	72,3	604,4	22393,8	5,23
	Crue 3	27/10	28/10	0,7	3	8,3	35,4	6,6	16,4	117,2	1
	Crue 4	28/10	29/10	0,5	1,1	4,3	9,9	3,6	5,3	19,4	1,3
	Crue 5	16/11	17/11	2,6	45	24,2	416,4	20,05	50,8	844,2	1,25
	Crue 6	17/11	20/11	1,5	2,1	7	9,7	2,8	13,4	18,8	2,5
	Crue 7	21/12	21/12	0,1	0,1	6,2	4,4	2	5,4	2,04	0,25
	Crue 8	20/02	01/03	9,1	29,1	10,5	33,7	23	60,25	1080,9	10
	Crue 9	4/3/	07/03	10,6	122,6	40,9	472,9	17,05	110,1	2298,9	3
1980	Crue 1	26/09	27/09	0,5	2	5,1	19,43	5,7	7,04	38,02	1,19
	Crue 2	28/12	11/01	43	29,5	35,8	24,6	1,016	219	184,8	13,9
	Crue 3	13/01	17/01	1,2	0,1	3,5	0,2	0,08	2,86	0,25	4

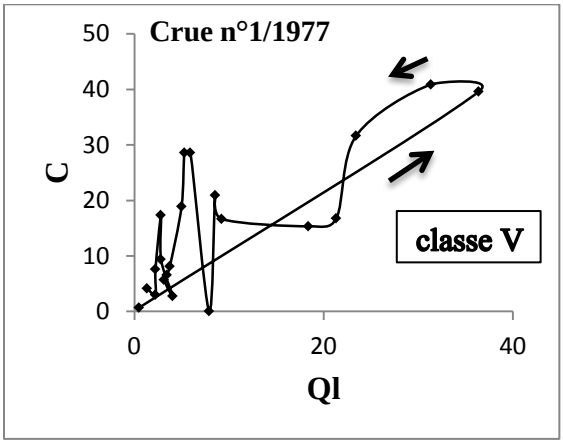
	Crue 4	début 12/02	Fin 25/02	3,4	3,3	3	3	3,2	5,7	16,3	13
	Crue 5	début 20/04	Fin 06/05	4,2	0,2	3	0,13	0,07	4,2	0,34	16
	Crue 6	début 26/06	Fin 30/06	2	3,7	5,8	10,7	2,7	12,85	28,35	4
1981	Crue 1	début 15/01	Fin 21/01	1,3	0,1	2,6	0,11	0,05	2,9	0,1	6
	Crue 2	début 23/02	Fin 26/02	0,5	0,02	1,9	0,08	0,05	1,9	0,08	3
	Crue 3	début 30/03	Fin 02/04	0,5	0,04	1,7	0,15	0,12	2,16	0,26	3,2
	Crue 4	début 24/04	Fin 30/04	2,1	0,5	4,1	1,03	0,78	4,95	3,84	6
	Crue 5	début 06/05	Fin 14/05	1,6	1,1	2,4	1,6	2,06	2,3	0,18	8
	Crue 6	début 02/06	Fin 22/06	12	172,6	7	99,9	48,2	37,8	1622,2	20
	Crue 7	début 30/08	Fin 31/08	1	6,5	11,05	72,9	7,8	17,5	142,7	1,028
1982	Crue 1	début 14/10/	Fin 24/11	6,2	9,6	1,8	2,7	5,706	6,25	37,4	41
	Crue 2	début 26/11	Fin 29/01	8,4	1	1,5	0,18	0,37	1,75	0,4	64
	Crue 3	début 08/02	Fin 12/02	0,6	0,1	1,8	0,15	0,09	1,3	0,14	4
	Crue 4	début 16/02	Fin 20/02	0,6	0,1	1,8	0,28	0,23	1,3	0,3	4
	Crue 5	début 20/03	Fin 26/03	0,8	0,2	1,6	0,45	0,35	1,45	0,7	6
1983	Crue 1	début 01/10	Fin 05/10	0,4	0,1	1,09	0,2	0,21	1	0,18	4
	Crue 2	début 11/12	Fin 18/12	3,6	12,4	6,02	20,5	6,53	32	164,5	7
	Crue 3	début 20/12	Fin 24/12	0,5	1,1	1,5	3,07	2,65	1,6	5,7	4,021
	Crue 4	début 03/01	Fin 05/01	1	4,3	4,9	20,8	6,13	7,8	44,3	2,375
	Crue 5	début 23/02	Fin 26/02	0,6	0,2	2,23	0,64	0,33	2,7	1,035	3
	Crue 6	début 21/3/	Fin 01/04	3,6	13,9	3,8	14,6	6,76	17,45	119,3	11
	Crue 7	début 29/04	Fin 15/05	5,1	8,8	3,66	6,3	3,25	25,6	72,7	16

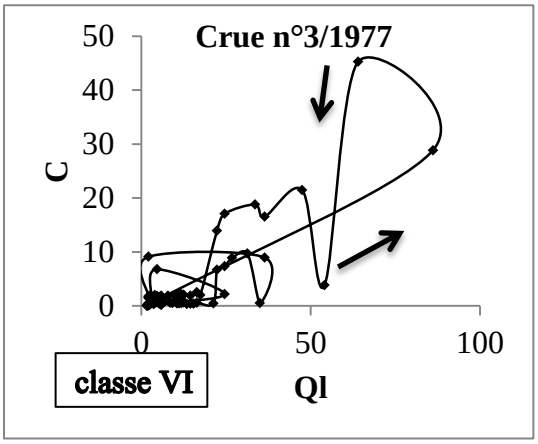
	Crue 8	début 19/05	Fin 22/05	0,4	0,2	1,4	0,6	0,5	1,54	0,8	3
	Crue 9	début 28/05	Fin 09/06	1	0,2	0,98	0,19	0,3	1,3	0,37	12
1984	Crue 1	début 5/11	Fin 15/11	1,5	6,2	1,7	7,16	13,3	3,25	48,7	10
	Crue 2	début 05/01	Fin 01/02	1,7	0,8	0,72	0,34	0,99	1,37	1,43	27
	Crue 3	début 03/04	Fin 09/04	0,5	0,1	0,96	0,25	0,32	1,37	0,26	6
	Crue 4	début 27/04	Fin 19/05	6,1	12,3	3,2	6,5	13,06	13,26	129,88	21,986
	Crue 5	début 23/05	Fin 27/05	0,6	5,6	1,8	16,2	16,28	3,6	59,3	4
1985	Crue 1	début 25/09	Fin 30/09	1	41,6	2,21	96,2	83,9	9,4	671,17	5
	Crue 2	début 19/10	Fin 25/10	0,5	1,3	0,92	2,5	3	1,89	4,55	6
	Crue 3	début 09/11	Fin 25/03	11,9	50,4	1,01	4,3	22,06	22,8	400,05	136
	Crue 4	début 02/04	Fin 05/04	0,2	0,04	0,6	0,16	0,3	0,67	0,20	3
1986	Crue 1	début 11/09	Fin 13/09	0,5	5,3	3,28	33,5	13,76	11,36	148,1	1,817
	Crue 2	début 03/10	Fin 05/10	2,7	90,2	17,6	582,8	39,8	48,88	1950,3	1,792
	Crue 3	début 08/10	Fin 11/10	1,9	29,9	7,7	123,77	41,2	28,9	1301,3	2,792
	Crue 4	début 11/10	Fin 15/10	2,6	38,2	7,5	110,7	21,2	38,1	797,05	3,990
	Crue 5	début 15/11	Fin 21/11	69,6	2359,8	141,05	4784,7	58,15	1880	104434	5,708
	Crue 6	début 18/02	Fin 24/02	2,3	5	4,5	9,6	5,2	6,75	40,8	6
	Crue 7	début 14/07	Fin 15/07	0,3	6,6	6,25	142,7	42,1	11,6	337,6	0,538
1987	Crue 1	début 03/10	Fin 13/10	5,7	243,9	6,6	282,3	75,95	124	6586,9	10
	Crue 2	début 23/11	Fin 30/11	0,6	1,7	0,915	2,85	6,5	1,69	12,3	7,021
	Crue 3	début 31/12	Fin 06/01	3,6	41,9	6,9	80,9	19,2	55,02	975,06	6
	Crue 4	début 07/02	Fin 10/02	0,3	0,1	1,12	0,3	0,44	1,9	0,98	3,007

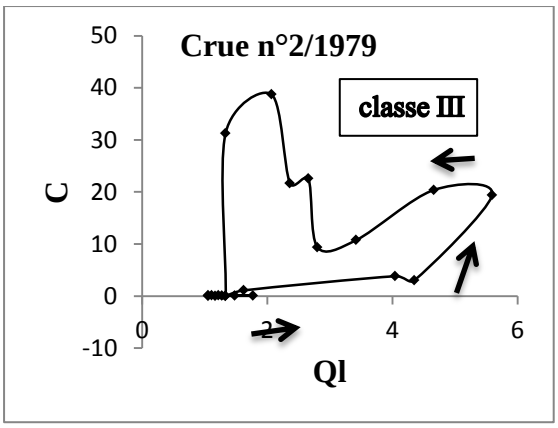
	Crue 5	début 05/05	Fin 09/05	3,3	53,2	9,95	162,3	21,05	65,1	1354,9	3,792
	Crue 6	début 07/06	Fin 10/06	2,5	61,4	8,97	219,2	28,03	31,3	851,36	3,240
1988	Crue 1	début 11/11	Fin 14/11	2,1	23,4	8,03	91,6	19,17	23,2	314,13	2,958
	Crue 2	début 23/11	Fin 30/11	11,2	12,2	18,5	20,2	6,76	61,5	95,4	7
	Crue 3	début 18/03	Fin 25/03	17,6	133,7	29,16	221,4	32,75	230	8100,6	6,993
	Crue 4	début 02/04	Fin 09/04	11,8	364,2	19,46	602,3	52,05	86,35	4499,7	7
	Crue 5	début 25/04	Fin 30/04	1,3	5,2	3,1	11,9	16,05	13,1	23,6	5
	Crue 6	début 23/07	Fin 24/07	0,1	1,8	1,02	19,5	28,1	1,12	31,92	1,069
1989	Crue 1	début 04/09	Fin 07/09	4,2	101,5	16,4	394,2	53,1	78,05	2672,4	2,979
	Crue 2	début 17/09	Fin 22/09	2,2	33,4	5,14	77,3	36,7	12,85	481,4	5
	Crue 3	début 25/09	Fin 27/09	1,1	31	5,9	162,2	57,6	9	600,5	2,208
	Crue 4	début 18/10	Fin 22/10	4,8	187,2	14,03	544,4	51,5	73,9	3545,7	3,979
	Crue 5	début 17/11	Fin 19/11	1,1	18,9	6,2	106,9	17,6	11,9	209,6	2,042
	Crue 6	début 23/11/	Fin 27/11	2,5	19,3	7,3	55,9	8,3	14,56	104,5	4
	Crue 7	début 31/12	Fin 06/01	9,2	63,1	17,8	121,8	12,8	131,5	1643,75	6
	Crue 8	début 10/01	Fin 18/01	2,6	11,3	3,8	16,3	13,9	8,3	68,3	8,007
	Crue 9	début 03/03	Fin 06/03	1	18,8	3,96	72,5	29,4	23,04	447,9	3
	Crue 10	début 31/03	Fin 03/04	0,7	1,1	2,6	4,05	1,8	4,4	8,04	3
	Crue 11	début 10/04	Fin 13/04	2,8	6,9	10,07	24,8	4,16	41,9	133,7	3,226
	Crue 12	début 30/04	Fin 04/05	3,4	83,8	9,5	232,6	38,2	60,2	2276,6	4,167
	Crue 13	début 10/05	Fin 16/05	21,4	1137,4	41,1	2181,45	74,9	236,5	15354,5	6,035
	Crue	début	Fin	5,7	270,2	16,5	781,9	68,06	83,1	5246,5	4

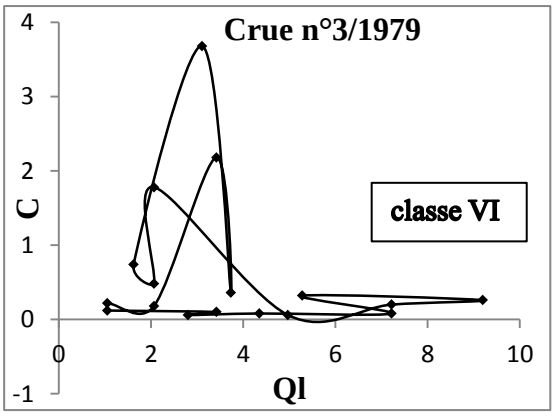
	14	04/06	08/06								
1990	Crue 1	début 15/09	Fin 16/09	1,3	91,3	12,06	818	80,4	23,2	1895,2	1,292
	Crue 2	début 18/09	Fin 19/09	0,5	12,1	5,35	134,3	38,7	6,4	249,7	1,042
	Crue 3	début 08/11	Fin 09/11	0,2	6,6	3,09	83,6	45,5	8,96	364,7	0,917
	Crue 4	début 19/02	Fin 21/02	2,4	52,7	13,28	292,5	34,8	68	2181,1	2,083
	Crue 5	début 01/03	Fin 03/03	1,1	6,5	6,5	38,6	19,8	11,9	300,6	1,958
	Crue 6	début 13/03	Fin 17/03	33,3	686,2	101,8	2094,6	50,56	600	10019,85	3,792
	Crue 7	début 24/03	Fin 29/03	1,4	0,5	3,3	1,2	1,3	4,05	0,064	5
1991	Crue 1	début 5/009	Fin 13/09	10,3	128	14,9	184,7	20,9	60,04	1203,02	8,021
	Crue 2	début 16/10	Fin 21/10	18,8	1145,3	43,5	2651,3	71,8	178,3	13197,8	5
	Crue 3	début 04/03	Fin 07/03	1,7	0,4	6,5	1,6	0,27	11,6	3,1	3
	Crue 4	début 27/03	Fin 01/04	2,7	2,3	6,3	5,4	1,17	10,14	9,5	5
	Crue 5	début 05/04	Fin 01/05	70,9	7,2	31,5	3,2	17,7	119,5	25,7	26
	Crue 6	début 03/05	Fin 11/05	5	43	7,3	62,3	14,7	52,8	777,2	8
	Crue 7	début 03/08	Fin 05/08	0,7	15,3	4,3	92,4	24,4	8,45	181,8	1,917
1992	Crue 1	début 07/11	Fin 14/11	1,7	35,4	2,78	58,6	38,25	16,8	634,7	7
	Crue 2	début 16/12	Fin 20/12	0,2	0,2	0,65	0,6	1,4	0,5	0,9	4
	Crue 3	début 27/12	Fin 19/01	1,1	0,7	0,6	0,37	1,3	0,6	0,77	23
	Crue 4	début 28/01	Fin 31/01	0,2	0,3	0,9	0,97	1,18	0,6	0,5	3
	Crue 5	début 04/02	Fin 11/02	0,4	0,1	0,62	0,2	0,47	0,5	0,3	7
	Crue 6	début 27/02	Fin 30/03	2,3	4,6	0,87	1,7	5,9	9,3	55,9	31
	Crue 7	début 24/04	Fin 17/05	3,4	19,1	1,7	9,6	16,02	14,08	211,2	22,993

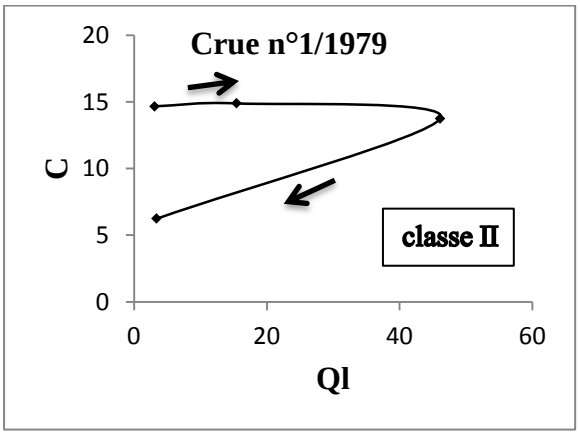
Annexe II : Courbes des hystérises

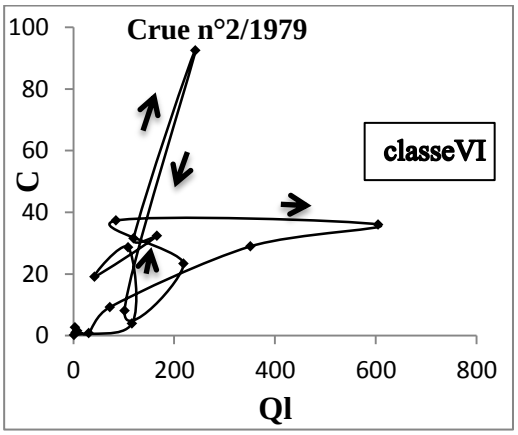


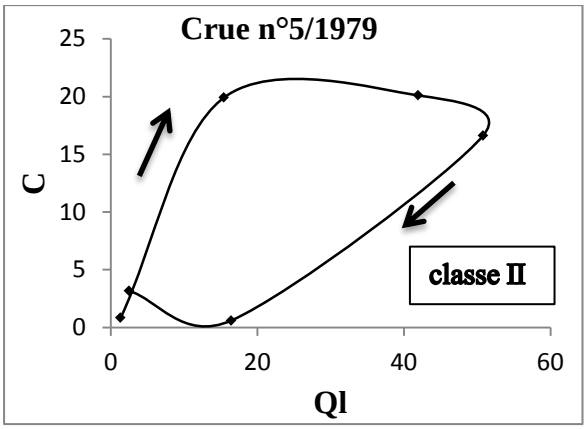


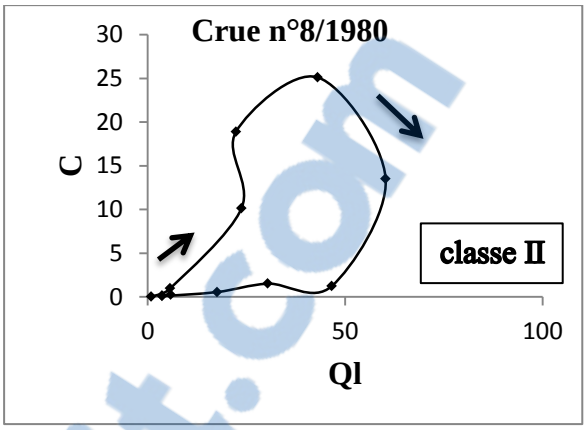


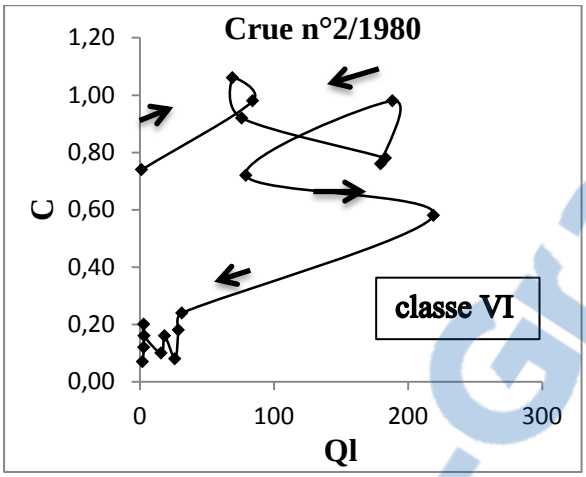


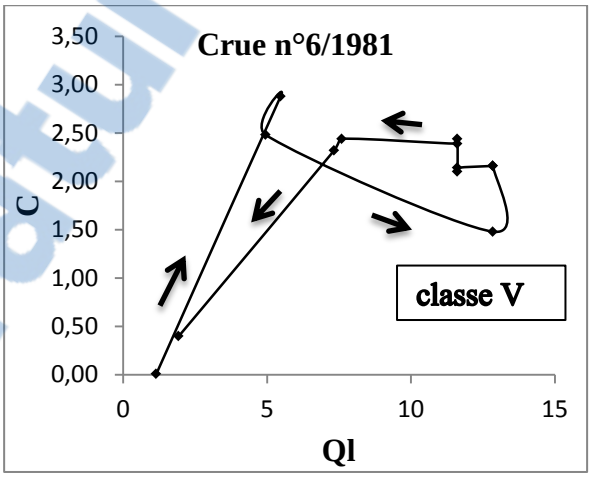


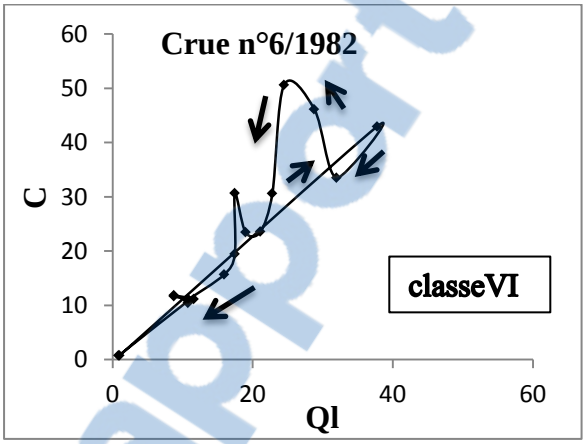


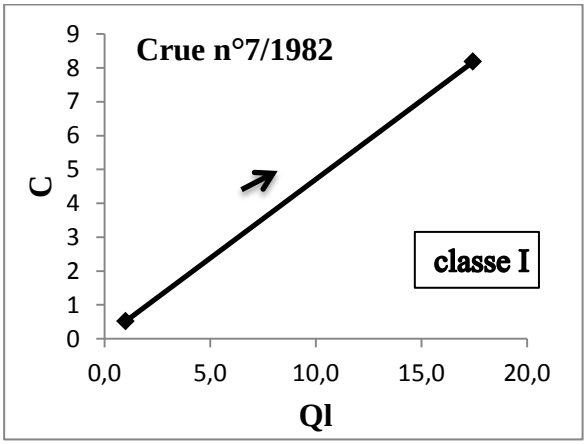




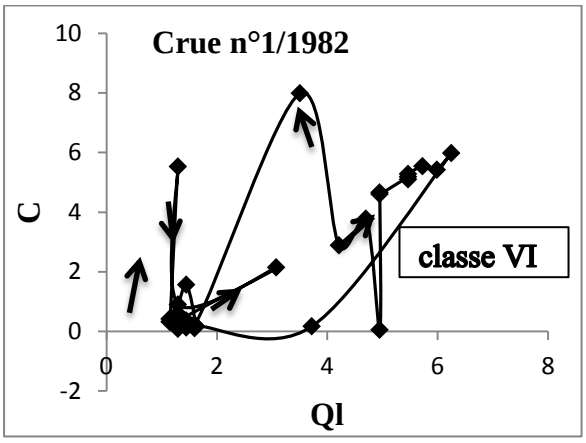


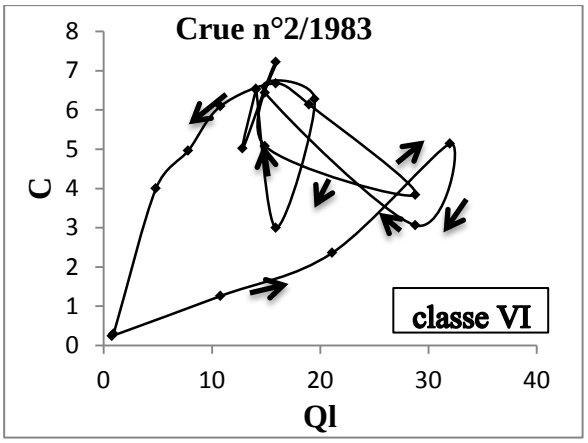


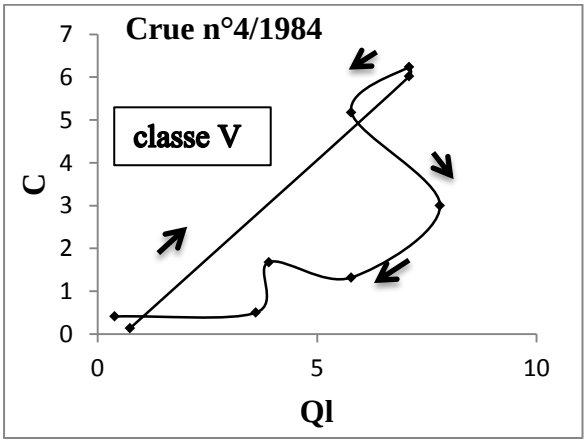


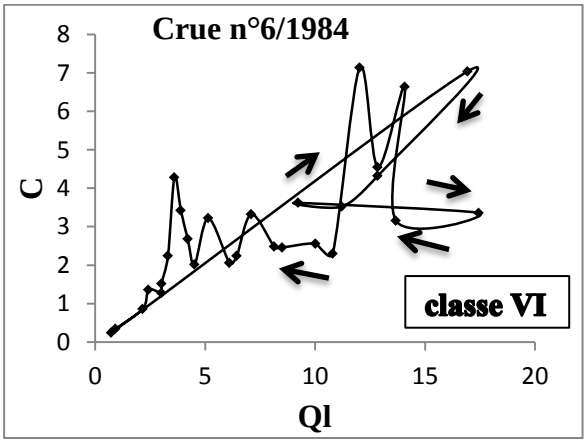


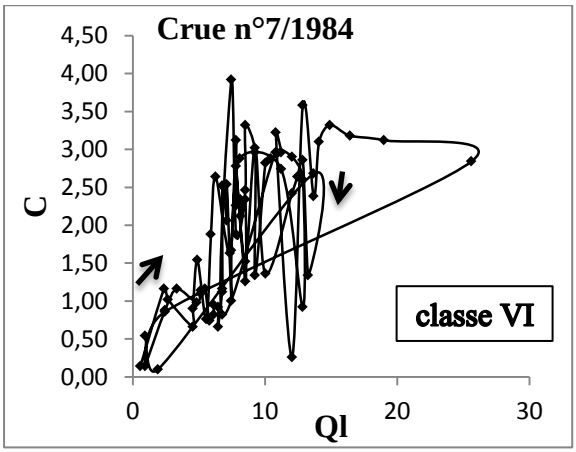
Rapport-Gratuit.com

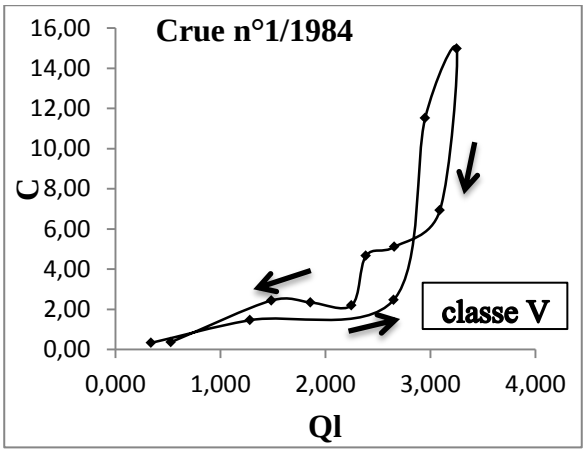

Crue n°1/1982
C
Ql
classe VI

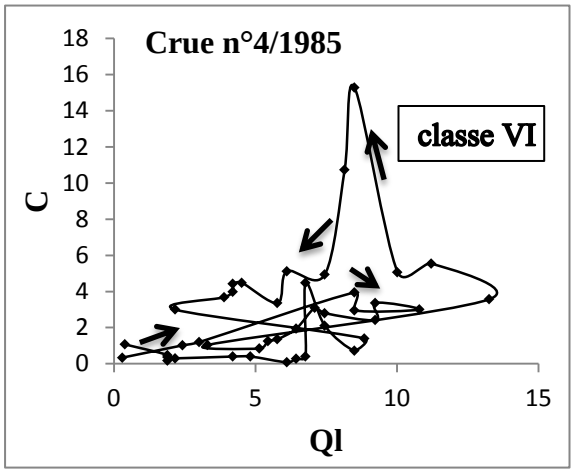

Crue n°2/1983
C
Ql
classe VI

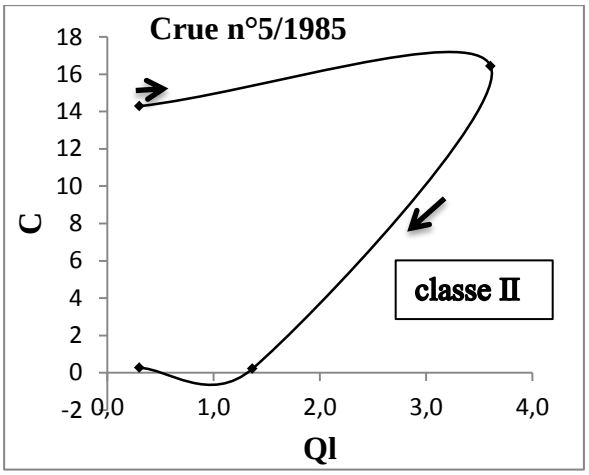

Crue n°4/1984
C
Ql
classe V

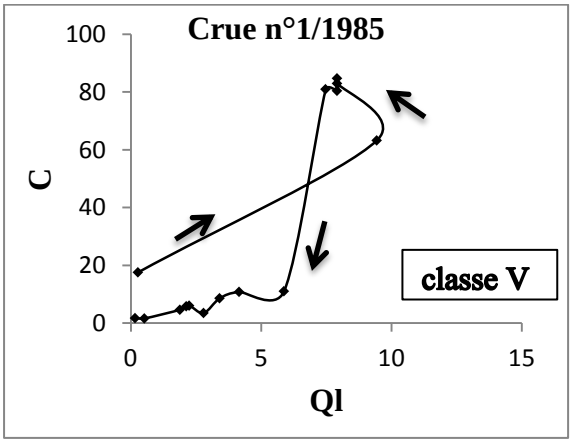

Crue n°6/1984
C
Ql
classe VI

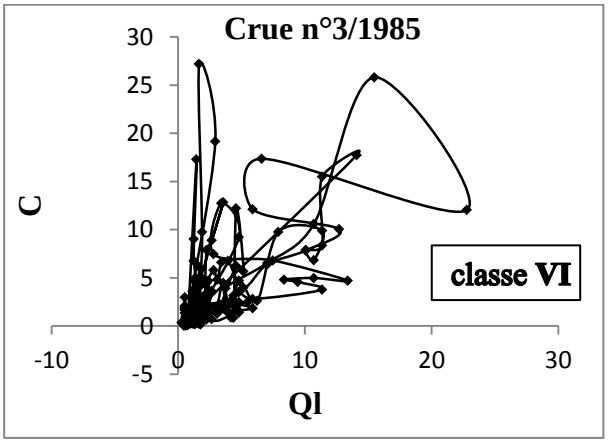

Crue n°7/1984
C
Ql
classe VI

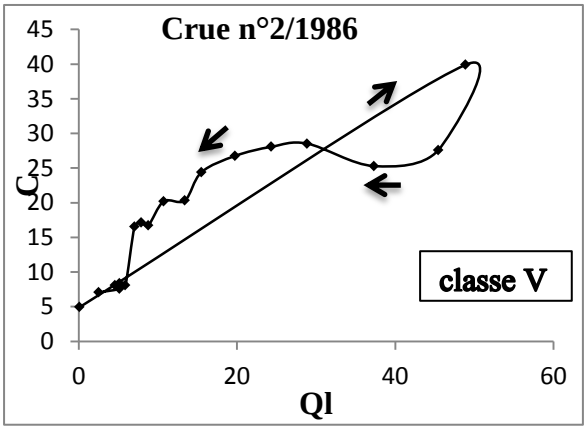

Crue n°1/1984
C
Ql
classe V

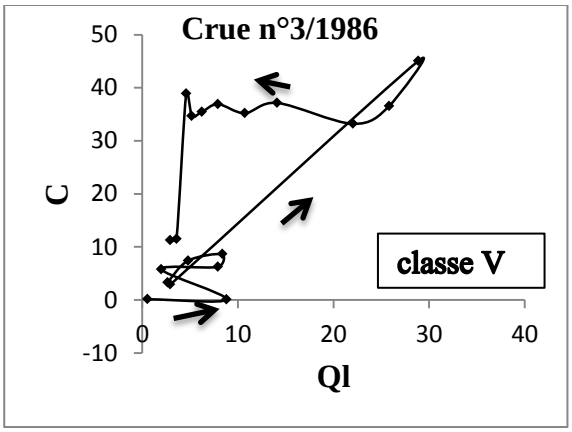




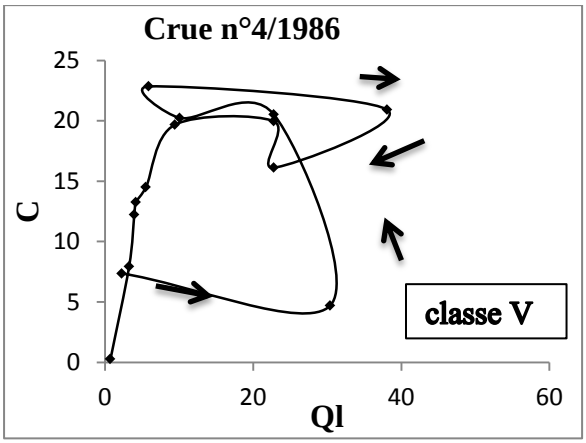


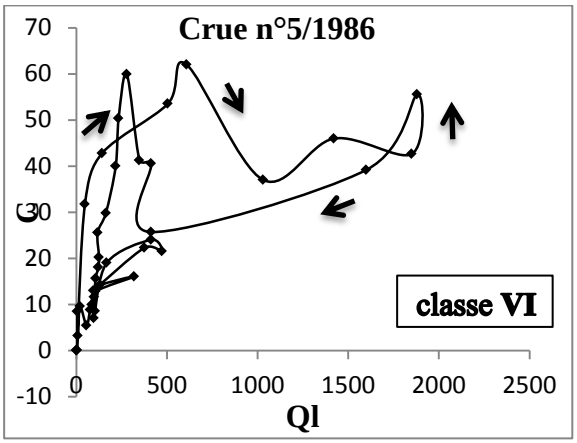


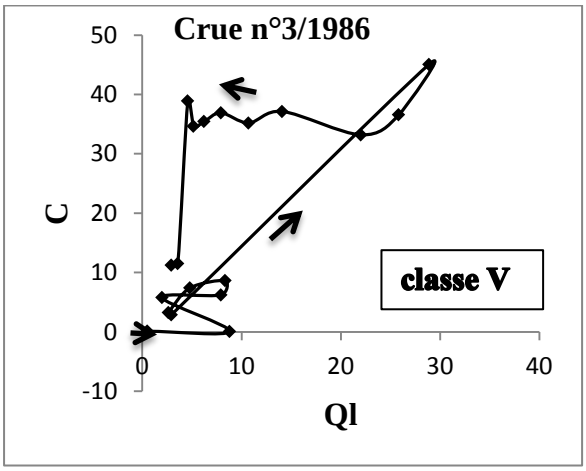


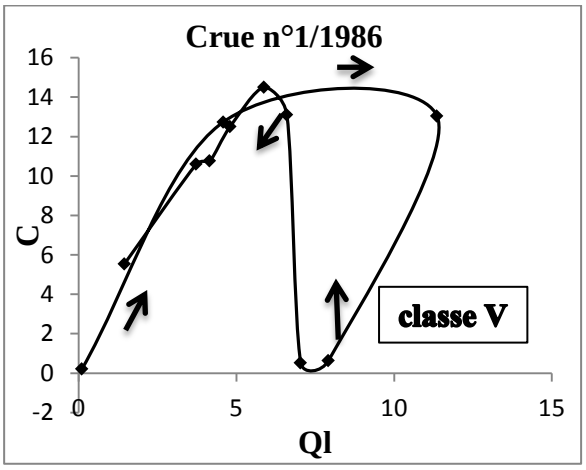


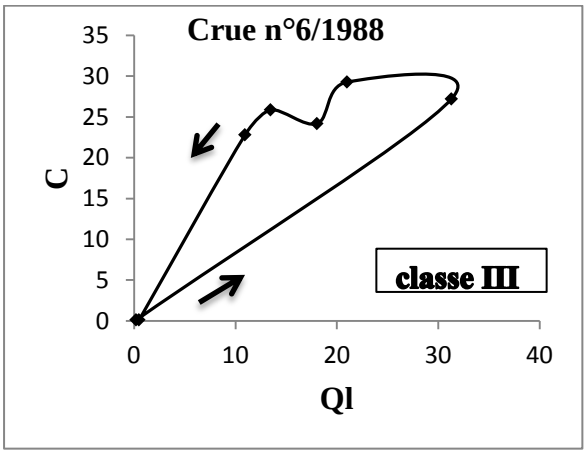
Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

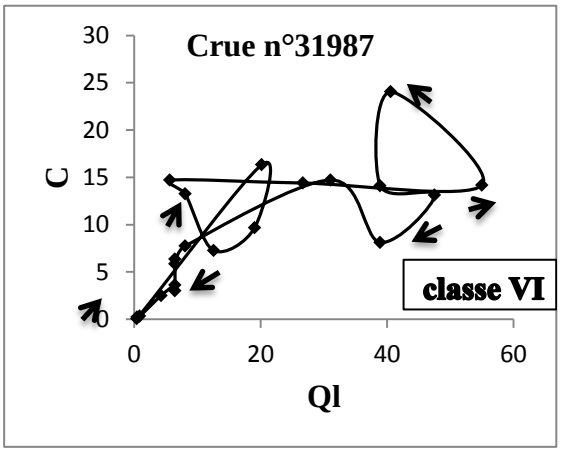

Crue n°4/1986
C
Ql
classe V

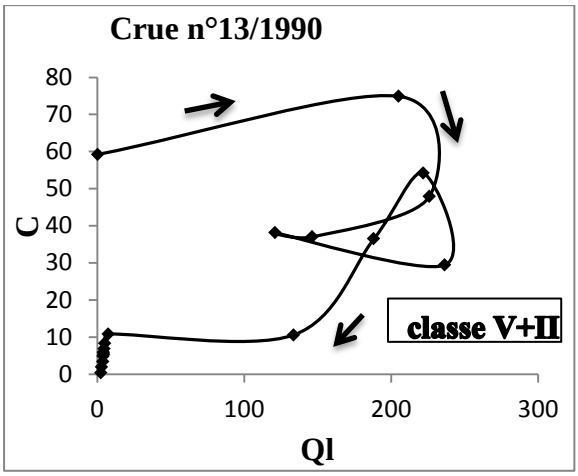

Crue n°5/1986
C
Ql
classe VI

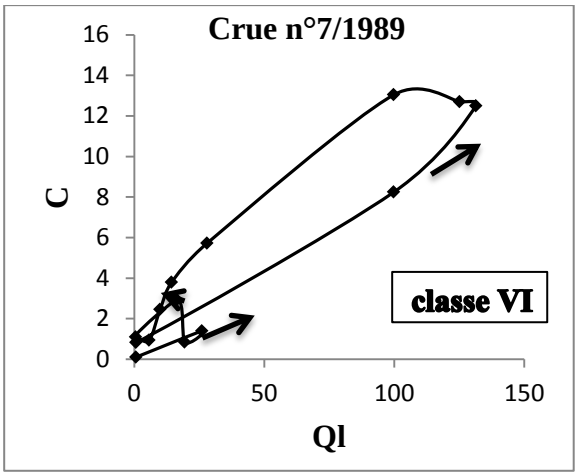

Crue n°3/1986
C
Ql
classe V

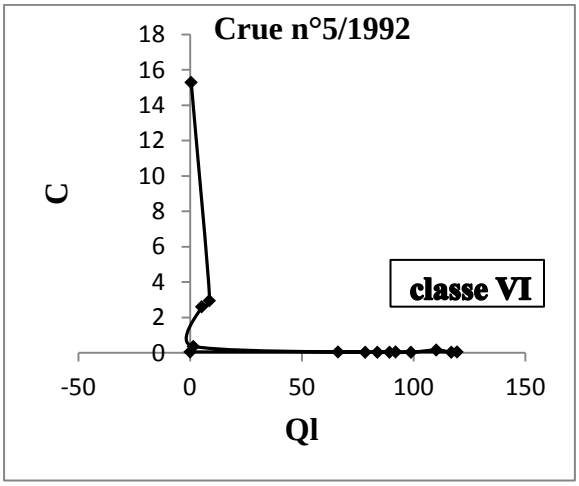

Crue n°1/1986
C
Ql
classe V

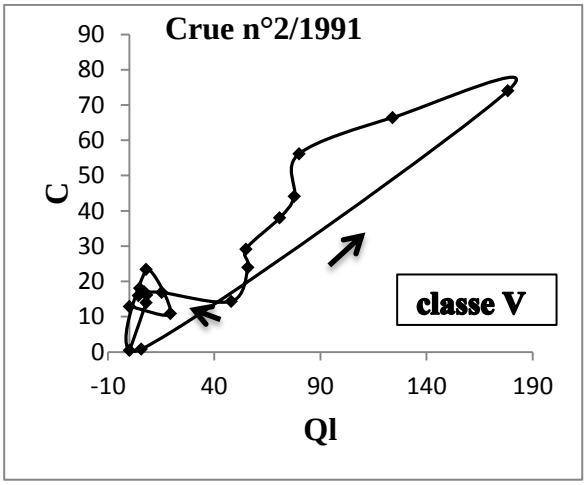

Crue n°6/1988
C
Ql
classe III

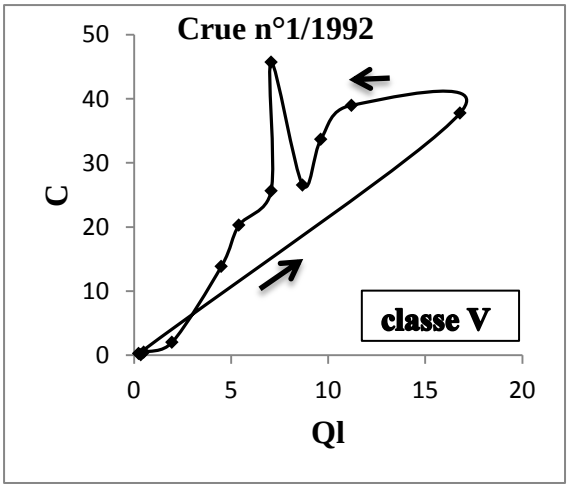

Crue n°31987
C
Ql
classe VI

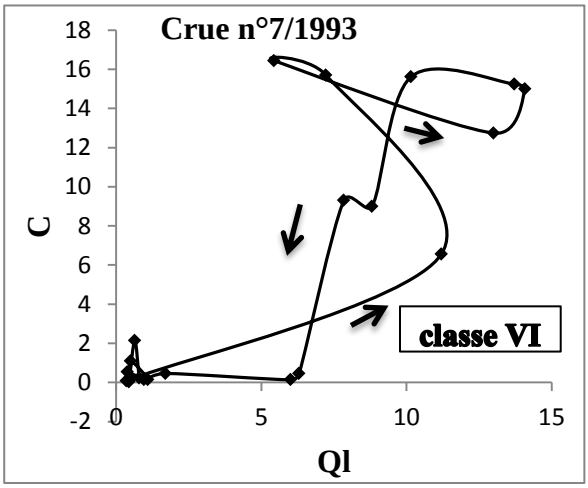

Crue n°13/1990
C
Ql
classe V+II


Crue n°7/1989
C
Ql
classe VI


Crue n°5/1992
C
Ql
classe VI


Crue n°2/1991
C
Ql
classe V


Crue n°1/1992
C
Ql
classe V


Crue n°7/1993
C
Ql
classe VI