

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA



Faculté des Sciences et Sciences Appliquées  
Département de Génie Civil

**Mémoire de Fin d'Etude**

Présenté par :

**ZAKEZ Hadjer**

**SAFIA Rezkia**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Filière : **Hydraulique**

Option : **Ressources Hydrauliques**

**Thème**

**Estimation du Transport Solide dans le Bassin Versant de l'Oued Isser au  
Droit du Barrage de Koudiat Acerdoune (Nord Algérie)**

Devant le jury composé de :

|                  |                  |            |                     |                     |
|------------------|------------------|------------|---------------------|---------------------|
| <b>METAICHE</b>  | <b>Mehdi</b>     | <b>MCA</b> | <b>U. de Bouira</b> | <b>Président</b>    |
| <b>KHALDI</b>    | <b>Ramzi</b>     | <b>MAA</b> | <b>U. de Bouira</b> | <b>Examineur</b>    |
| <b>GHERNAOUT</b> | <b>Redhouane</b> | <b>MCA</b> | <b>U. de Bouira</b> | <b>Encadreur</b>    |
| <b>ZEGGANE</b>   | <b>Houari</b>    | <b>MCB</b> | <b>U. de Msila</b>  | <b>Co-encadreur</b> |

**Année Universitaire 2019/2020**

*Ce travail a été le fruit  
d'un travail collectif  
perturbé (confinement).*

*Il aurait été bien meilleur  
s'il n'y avait pas la crise  
du Covid 19 qui a mis le  
monde entier à l'arrêt et en  
état d'urgence sanitaire, et  
ce pour une durée de huit  
mois.*

## *Remerciements*

*Avant tout, on remercie dieu le tout puissant d'avoir nous donner l'envie, le courage et la force pour mener à terme ce travail.*

*En second lieu, Nous aimerons adresser nos plus sincères remerciements à notre encadreur GHERNAOUT Redhouane, pour l'intérêt qu'il a accordé à notre travail de manière approfondie, ainsi que pour son soutien, ses multiples conseils et à monsieur Zeggane Houari le Co-Encadreur.*

*Nous aimerons remercier très chaleureusement monsieur le président ainsi que l'examineur, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger ce travail.*

*Nous remercions aussi toutes les personnes qui nous ont contribués de près et de loin à la réalisation de ce mémoire.*

*Enfin je tiens à remercier toute la promotion de génie Hydraulique*

# Dédicaces

*Je remercie Dieu tout puissant de m'avoir aidé dans ce travail  
que je dédie :*

*A l'âme de mon père qui est toujours présent dans mon cœur, a  
ma chère mère pour l'éducation qui m'ont prodiguée avec tous  
les moyens et au près de tout les sacrifices qu'ils ont consentis à  
mon égard, pour leur patience, leur amour et leurs  
encouragements.*

*A mes chères tantes Dahbia et Fadma et Khadidja et a mon  
oncle Salah et sa femme Fatima, sans oublier mes chères cousins.*

*A mon amour Rabia.*

*A mes amis pour leur soutien psychologique, et en particulier :*

*Roza, Zouina, Ibtissam, Fadma et Naima*

*Et a mon chère ami Lahlou qui est toujours là pour moi.*

*A ma meilleure amie Yousra qui est loin des yeux mais près de  
cœur.*

*A mon binôme Hadjer.*

*A tous ceux qui me sont chers.*

*SAFIA Rezkia*

# *Dédicaces*

*Je remercie Dieu tout puissant de m'avoir aidé dans ce travail que je dédie :*

*A mes chères parents qui sont toujours présent dans mon cœur, a pour l'éducation qui m'ont prodiguée avec tous les moyens et au près de tout les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard, pour leur patience, leur amour et leurs encouragements.*

*A mon fiancé : Anis*

*A mes chères frères: Walid, Oussama, Wahid et Amine*

*A mes chères sœurs : Marwa et Nour El Houda*

*A mes amis pour leur soutien psychologique, et en particulier : Amira, Yamina et Ferial*

*A mon binôme Rezkia.*

*A tous ceux qui me sont chers.*

*ZAKEZ Hadjer*

# RESUME

En raison de la complexité du phénomène d'érosion - transport solide – envasement, dans le bassin de l'Oued Isser à cause de son importante hétérogénéité des sols, un faible couvert végétal et une grande variabilité spatio-temporelle du régime hydro-pluviométrique ; un modèle de puissance régressive ( $Q_s=a*Q_l^b$ ) expliquant la variation du débit solide en suspension par le débit liquide (période 1971 à 1985) a été employé en subdivisant l'ensemble des données en groupes quotidiens (toutes les données), annuels, mensuels et saisonniers. Les relations en puissance mensuelles obtenues, expliquant la plus grande partie de la variance, ont conduit à interpoler, extrapoler et analyser les charges solides fines et grossières véhiculées par l'Oued Isser au droit du barrage de Koudiat Acerdoune. Les résultats obtenus montrent une variation remarquable de l'apport solide tant sur les valeurs intra-annuelles que celles interannuelles. L'exutoire du bassin versant au niveau du barrage de Koudiat Acerdoune recoit environ 2.969 MT ( $1.855Mm^3$ ) de matériau solide fin et grossier annuellement, soit une dégradation surfacique de  $1065.957 T/Km^2/an$ . Ces résultats alarmants permettent aux gestionnaires de l'eau et des barrages d'adopter des stratégies et des actions urgentes pour protéger les terres et préserver le potentiel du barrage de Koudiat Acerdoune.

**Mots clés:** Bassin versant d'Oued Isser –La Traille – barrage Koudiat Acerdoune – relation puissance, transport solide en suspension, concentration, débit solide, débit liquide.

# ABSTRACT

Due to the complexity of the phenomenon of erosion-sediment transport-siltation in Isser river basin because of its important soil heterogeneity, vegetation deficiency and rainfall-runoff variability in time and space, regressive power model ( $Q_s=a*Q_l^b$ ) explaining the variation of suspended sediment discharge by the flow discharge (period 1971 to 1985) has been employed by subdividing the data sets into daily (all data), annual, monthly and seasonal groups. The obtained monthly power relations, explaining the greatest part of the variance, lead to interpolate, extrapolate and analyse suspended and bed loads conveyed by Wadi Isser upstream of Koudiat Acerdoune dam .The results obtained show a remarkable variation in the solid contribution both on intra-annual and monthly values. The drainage basin outlet at the Koudiat

Acerdoune dam receives approximately 2,969 MT (1,855Mm<sup>3</sup>) of fine and coarse solid material annually, representing a surface degradation of about 1065.957 T / Km<sup>2</sup> / year. These alarming results allow water and dam managers to adopt urgent strategies and actions to protect the land and preserve the potential of the Koudiat Acerdoune dam.

**Keywords:** Isser river basin – La Traille – Koudiat Acerdoune dam - power relation - suspended sediment load concentration, solid flow, liquid flow.

## الملخص

بسبب تعقيد ظاهرة التعرية - نقل الرواسب - الترسيب في حوض وادي يسر، بسبب عدم تجانس التربة ونقص الغطاء النباتي وتغير جريان الأمطار في الزمان والمكان؛ تم استخدام النموذج قوة ( $Q_s = a * Ql^b$ ) الذي يشرح ويفسر على نحو أفضل العلاقة بين بيانات الحمل الرسوبي العالق والتصريف المرصودة بمحطتي القياس الهيدرومترية لاتراي (الفترة 1971 إلى 1985) وذلك بدراسة هذه العلاقة لعدة جداول زمنية: السنوي والموسمي والشهري واليومي سمحت علاقات القوة الشهرية التي تم الحصول عليها، والتي توضح الجزء الأكبر من التباين، من استقرار وتحليل الأحمال الصلبة الناعمة والخشنة التي نقلها وادي يسر عند مخرج الحوض اعلى سد كدية أسردون. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها تبايناً ملحوظاً في الأحمال الصلبة السنوية والشهرية. يستقبل منفذ حوض الصرف على مستوى سد كدية أسردون حوالي 2.969 مليون طن (1.855 مليون متر مكعب) من المواد الصلبة الناعمة والخشنة سنوياً، أي ما يعادل عائدات سطحية مقدارها 1065.957 طن/ كيلومتر مربع/ سنة. هذه النتائج المقلقة تسمح لمسيرى المياه والسدود بتبني استراتيجيات وإجراءات عاجلة لحماية الأرض والحفاظ على إمكانات سد كدية أسردون التخزينية.

**مفتاح الكلمات:** حوض وادي يسر - محطة لاتراي - سد كدية أسردون - العلاقة قوة - الحمل الرسوبي العالق - التركيز - الحمل الرسوبي - التصريف.

**Liste des symboles**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

Introduction générale.....1

***Chapitre I : Généralités et définitions***

I.1 Introduction..... 4

I.2 Le Ruissellement..... 5

    I.2.1 Théories de ruissellement ..... 5

        I.2.1.1 Théorie de Horton (1945) ..... 5

        I.2.1.2 Théorie de la saturation du milieu..... 6

    I.2.2 Phases de ruissellements ..... 7

        I.2.2.1 Phase d'imbibition de  $t_0$  à  $t_i$  ..... 7

        I.2.2.2 Phase transitoire de  $t_i$  à  $t_m$  ..... 8

        I.2.2.3 Phase de régime permanent de  $t_m$  à  $t_u$ ..... 8

        I.2.2.4 Phase de vidange de  $t_u$  à  $t_f$ ..... 8

    I.2.3 Types de ruissellement..... 9

I.3 Erosion ..... 10

    I.3.1 Définition ..... 11

    I.3.2 Types d'érosion..... 11

        I.3.2.1 L'érosion éolienne ..... 11

        I.3.2.2 L'érosion aratoire ou mécanique sèche..... 12

        I.3.2.3 L'érosion hydrique ..... 12

            I.3.2.3.1 Erosion en nappe..... 13

    I.3.3 Causes de l'érosion hydrique ..... 14

        I.3.3.1 Influence du climat ..... 14

## **TABLE DE MATIERES**

|   |    |
|---|----|
| I.3.3.2 Facteurs topographiques .....                   | 14 |
| I.3.3.3 Facteurs géologiques et pédagogiques.....       | 15 |
| I.3.3.4 Couvert végétal .....                           | 15 |
| I.3.4 Conséquences de l'érosion hydrique.....           | 15 |
| I.4 Transport solide .....                              | 16 |
| I.4.1 Origine des matériaux transportés.....            | 18 |
| I.4.2 Mobilisation des matériaux sur les versants ..... | 19 |
| I.4.3 Caractéristiques des matériaux transportés.....   | 19 |
| I.4.3.1 Dimension des particules .....                  | 19 |
| I.4.3.2 Vitesse de sédimentation.....                   | 20 |
| I.4.4 Modalités du transport solide.....                | 22 |
| I.4.4.1 Transport par charriage .....                   | 23 |
| I.4.4.2 Transport en suspension.....                    | 23 |
| I.4.5 Apport solide annuel .....                        | 24 |
| I.5 Envasement des barrages « Sédimentation » : .....   | 25 |
| I.5.1 Mécanisme de la sédimentation .....               | 25 |
| I.5.2 Sédimentation des barrages dans le Maghreb .....  | 26 |
| I.6 Conclusion .....                                    | 26 |

### ***Chapitre II : Méthodes de quantification de l'érosion et le transport solide***

|   |    |
|---|----|
| II.1 Introduction .....                                     | 26 |
| II.2 Quantification de l'érosion .....                      | 26 |
| II.2.1 Formule de Henin (1950) .....                        | 26 |
| II.2.2 Modèle universelle (ELSE) de Wischemeïr (1959) ..... | 27 |
| II.2.3 Formule de Gravilovitch (1960).....                  | 28 |
| II.2.4 Formule de L'A.N.R.H (1982) .....                    | 29 |
| II.2.5 Formule de Tixeront (1960) .....                     | 29 |

## **TABLE DE MATIERES**

|  |    |
|--|----|
| II.2.6 Formule de Fournier (1960) .....  | 30 |
| II.3 Mesure et quantification du transport solide .....                        | 30 |
| II.3.1 Mesure et quantification du transport solide de fond (charriage)        |    |
| II.3.1.2 Quantification (calcul) du transport solide de fond .....             | 31 |
| II.3.1.2.1 Formule de Du Boys (1879) .....                                     | 32 |
| II.3.1.2.1.1 Description du phénomène .....                                    | 32 |
| II.3.1.2.2 Formule de Schoklitch (1934) .....                                  | 33 |
| II.3.1.2.3 Formule de Shields (1936) .....                                     | 34 |
| II.3.1.2.4 Formule de Mayer Peter (1937).....                                  | 34 |
| II.3.1.2.5 Formule de Mayer Peter et Muler (1948).....                         | 35 |
| II.3.1.2.6 Formule d'Einstein-Brown (1950) .....                               | 35 |
| II.3.1.2.7 Formule d'Engelund et de Hasen (1967) .....                         | 35 |
| II.3.1.2.8 Formule de Yalin (1963-1970).....                                   | 36 |
| II.3.2 Mesure et quantification du transport solide en suspension .....        | 36 |
| II.3.2.1 Mesure du transport solide en suspension .....                        | 36 |
| II.3.2.1.1 Méthode rapprochée .....  | 36 |
| II.3.2.1.2 Méthode par exploration de champs de vitesse .....                  | 37 |
| II.3.2.1.3 Appareils de mesure de la concentration .....                       | 39 |
| II.3.2.2 Quantification du transport solide en suspension .....                | 40 |
| II.3.2.2.1 Détermination de la concentration des matériaux en suspension. .... | 40 |
| II.3.2.2.1.1 Formule d'O'Brien (1933).....                                     | 40 |
| II.3.2.2.1.2 Formule d'Abalianz (1958) .....                                   | 41 |
| II.3.2.2.2 Estimation du transport solide en suspension.....                   | 41 |
| II.3.2.2.4 Méthodes d'estimation des charges solides.....                      | 44 |
| II.3.2.2.4.1 Méthode numérique .....   | 45 |
| II.3.2.2.4.2 Méthode de la moyenne.....  | 45 |
| II.3.2.2.4.3 Méthode d'intervalle de débit.....                                | 45 |

## **TABLE DE MATIERES**

|  |    |
|--|----|
| II.3.2.2.4.4 Méthode de régression.....  | 45 |
| II.3.2.2.4.5 Echantillonnage proportionnel au débit.....                         | 45 |
| II.3.2.2.5 Performances des méthodes.....  | 45 |
| II.3.2.2.6 Méthode de régression.....  | 45 |
| II.3.2.2.6.1 Description générale.....   | 45 |
| II.3.2.2.6.2 Hypothèses.....   | 45 |
| II.3.2.2.6.3 Méthodologie d'échantillonnage.....                                 | 45 |
| II.3.2.2.6.4 Méthode d'estimation de la charge.....                              | 45 |
| II.3.2.2.7 Méthode de correction des courbes de transport solide en suspension . | 45 |
| II.3.2.2.7.1 Estimateur du Quasi-Maximum de Vraisemblance (QMV).....             | 45 |
| II.3.2.2.7.2 Estimateur de Duan.....   | 45 |
| II.3.2.2.7.3 Estimateur non biaisé de variance minimum (MVUE).....               | 45 |
| II.4 Conclusion.....   | 45 |

### ***Chapitre III : évaluation de la concentration et des débits liquides durant les crues***

|  |    |
|--|----|
| III.1 Introduction.....                      | 57 |
| III.2 Caractère cyclique de la relation..... | 57 |
| III.3 Boucles d'hystérésis :.....            | 58 |
| A. Modèle Classe I.....                      | 62 |
| B. Modèle classe II.....                     | 62 |
| C. Modèle classe III.....                    | 63 |
| D. Modèle classe V.....                      | 63 |
| III.4 Conclusion.....                        | 64 |

### ***Chapitre IV : Travaux et études précédentes***

|                          |    |
|--------------------------|----|
| IV. 1 Dans le monde..... | 63 |
|--------------------------|----|

## **TABLE DE MATIERES**

|                           |    |
|---------------------------|----|
| IV.2 En Algérie .....     | 68 |
| IV.2.1 Sédimentation..... | 74 |
| IV.3 Conclusion .....     | 76 |

### ***Chapitre V : Cadre général de l'étude***

|   |    |
|---|----|
| V.1 Présentation de la région d'étude .....       | 77 |
| V.2 Situation géographique .....                  | 77 |
| V.3 Caractéristiques du bassin versant .....      | 78 |
| V.3.1 Lithologie et végétation.....               | 78 |
| V.3.2 Topographie.....                            | 80 |
| V.3.3 Climat .....                                | 81 |
| V.3.3.1 Température.....                          | 81 |
| V.3.3.2 Evapotranspiration ETP .....              | 81 |
| V.3.3.3 Gelée.....                                | 82 |
| V.3.3.4 Vent .....                                | 82 |
| V.3.4 Caractéristiques hydromorphométriques ..... | 83 |
| V.4 Conclusion.....                               | 86 |

### ***Chapitre VI : Analyse et quantification du transport solide***

|   |    |
|---|----|
| VI.1 Introduction .....                                     | 87 |
| VI.2 Données utilisées .....                                | 88 |
| VI.3 Etude du transport solide en suspension.....           | 92 |
| VI.3.1 Relation concentration C - débit liquide Ql .....    | 92 |
| VI.3.2 Relations débit solide – débit liquide.....          | 93 |
| VI.3.2.1 Relation interannuelle (Ensemble des données)..... | 93 |
| VI.3.2.2 Relations annuelles.....                           | 94 |

## ***TABLE DE MATIERES***

|   |     |
|---|-----|
| VI.3.2.3 Relations intra annuelles (mensuelles) ..... | 97  |
| VI.3.2.4 Relations saisonnières.....                  | 99  |
| VI.4 Quantification des apports solides.....          | 100 |
| VI.5 Conclusion .....                                 | 106 |
| Conclusion générale .....                             | 109 |

# *Liste des symboles*

## LISTE DES SYMBOLS

| <b>Symbole</b>   | <b>Désignation</b>  |
|--|---|
| A  | Surface du bassin   |
| Ass  | Apport solide en suspension   |
| Ast  | Apport solide total   |
| a, b   | Paramètres des relations $Y = aX^b$ et $Y = aX + b$   |
| C  | Concentration des sédiments en suspension   |
| CV   | Coefficient de variation  |
| C <sub>max</sub> , C <sub>max</sub>                    | Concentration maximale  |
| D  | Dénivelée spécifique  |
| Dd   | Densité de drainage   |
| Ds   | Dénivelée spécifique  |
| D <sub>max</sub>                                       | Ecart maximum entre la fonction de densité cumulée observée et la fonction de répartition théorique |
| D <sub>n,α%</sub>                                      | Ecart critique à un risque d'erreur α%  |
| H <sub>max</sub> , H <sub>min</sub> , H <sub>moy</sub> | Altitudes maximale, minimale et moyenne   |
| H <sub>x%</sub>  | Altitude correspondant à x% de la surface totale du bassin  |
| I <sub>g</sub>   | Indice de pente globale   |
| K <sub>c</sub>   | Indice de compacité   |
| L  | Longueur du rectangle équivalent  |
| l  | Largeur du rectangle équivalent   |
| L <sub>cp</sub>  | Longueur du cours d'eau principal   |
| L <sub>r</sub> , L <sub>m</sub>                        | Lame ruisselée (écoulée)  |
| Max  | Valeur maximale   |
| Méd  | Médiane   |
| Mod  | Mode  |
| n  | Taille de l'échantillon   |
| P  | Périmètre du bassin   |
| P <sub>an</sub>  | Précipitation annuelle  |
| P <sub>m</sub>   | Pluie mensuelle   |
| R1 à R7  | Classement du relief selon O.R.S.T.O.M.   |
| R, r   | Coefficient de corrélation  |
| R <sup>2</sup>   | Coefficient de détermination  |
| SB   | Sous bassin   |
| SC   | Surfaces cumulées   |
| SP   | Surfaces partielles   |
| t  | Temps   |
| T  | Période de retour   |
| T <sub>c</sub>   | Temps de concentration  |
| Q, Q <sub>l</sub>                                      | Débit liquide   |
| Q <sub>min</sub> , Q <sub>max</sub> , Q <sub>moy</sub> | Débits liquides minimum, maximum et moyen   |
| Q <sub>s</sub>   | Débit solide  |
| X, Y, Z  | Coordonnées Lambert   |
| $\bar{x}$ , Moy  | Valeur moyenne  |
| σ, Var   | Ecart type, variance  |
| Q's  | Débit liquide mensuel spécifique  |

*Liste des figures et des  
Tableaux*

## ***LISTE DES FIGURES***

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figure (I.1):</b> Naissance de ruissellement selon Horton.....   | 5   |
| <b>Figure (I.2):</b> Naissance de ruissellement.....  | 6   |
| <b>Figure (I.3):</b> Courbe d'évolution au cours du temps de la charge solide des eaux de ruissellement sous une avance d'intensité donnée (callinet a lafforgue).....                          | 9   |
| <b>Figure (I.4):</b> Diagramme de Hjulstrom (Boil sin 2004).....  | 17  |
| <b>Figure (I.5):</b> Mode de transport solide dans un courant (Boulvain 2004).....  | 22  |
| <b>Figure (II.1):</b> Section de mesure du transport solide.....  | 38  |
| <b>Figure (II.2):</b> Epuré des débits solides élémentaires.....  | 39  |
| <b>Figure (II.3):</b> Graphique hypothétique du flux dans le temps.....   | 45  |
| <b>Figure (III.1):</b> Maractère cyclique de la relation C-Q.....   | 59  |
| <b>Figure (III.2):</b> Modèle des relations concentration-Debit liquide (William GP, 1989).....   | 62  |
| <b>Figure (V.1):</b> Situation géographique du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Isser.....   | 82  |
| <b>Figure (V.2):</b> Carte lithologique du bassin versant de l'oued Isser (Zeggane, 2017).....  | 83  |
| <b>Figure (V.3):</b> Carte d'altimétrie du bassin versant de l'oued Isser.....  | 84  |
| <b>Figure (V.4):</b> Courbes hydrométrique du bassin versant de l'oued Isser.....   | 88  |
| <b>Figure (VI.1) :</b> Chronologie des concentrations C et des débits liquides Ql instantanés observés au niveau de la station de la Traille durant la période d'étude (1971/72 à 1984/85)..... | 94  |
| <b>Figure (VI.2):</b> Concentration C–débit liquide Ql, instantanés interannuelles.....   | 95  |
| <b>Figure (VI.3):</b> Relation interannuelle du débit liquide - débit solide.....   | 96  |
| <b>Figure (VI.4):</b> Relations annuelles du débit liquide - débit solide «71/72 et 77/78 ».....  | 97  |
| <b>Figure (VI.5):</b> Relations annuelles du débit liquide - débit solide «80/81 et 84/85 ».....  | 98  |
| <b>Figures (VI.6):</b> Relations intra annuelles du débit liquide - débit solide «Sep., Nov., Jan. et mars ».....   | 100 |

## ***LISTE DES FIGURES***

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figure (VI.7):</b> Relations saisonnières du débit liquide - débit solide.....                                 | 101 |
| <b>Figure (VI. 8):</b> Résidus de la régression à l'échelle intra-annuelle (mois : Sep., Nov., Jan. et fév.)..... | 102 |
| <b>Figure (VI.9):</b> Bilan annuel des apports solides fin et grossier.....                                       | 107 |
| <b>Figure (VI.10):</b> Bilan intra-annuel des apports solides fin et grossier.....                                | 107 |

## ***LISTE DES TABLEAUX***

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tableau (I.1):</b> forme d'érosion hydriques (roose; 1994).....  | 14  |
| <b>Tableau (I.2):</b> classification des matériaux transportés.....   | 19  |
| <b>Tableau (I.3):</b> nombre capacité de stockage et envasement annuel des bagages en Afrique du nord.....                                | 26  |
| <b>Tableau (III.1):</b> classes des relations C-Q.....  | 60  |
| <b>Tableau (IV.1):</b> taux de sédiments dans les barrages les plus envasés en Algérie (Remini).....                                      | 79  |
| <b>Tableau (V.1):</b> lithologie du bassin versant de l'oued Isser au droit de barrage de Koudiat Acerdoune.....                          | 83  |
| <b>Tableau (V.2):</b> températures maximales moyennes et minimales de la station Beni Slimane.....  | 85  |
| <b>Tableau (V.3):</b> ETP a la station de la traile en mm.....  | 85  |
| <b>Tableau (V.4):</b> nombre de jours de gelée aux stations de Tablate (ANBH; 2001).....  | 86  |
| <b>Tableau (V.5):</b> nombre de jours de Sirocco à la station de Beni Slimane (ANBH; 2001).....   | 86  |
| <b>Tableau (V.6):</b> repartitions altimétriques du bassin versant de l'oued Isser au droit du barrage de Koudiat Acerdoune.....          | 88  |
| <b>Tableau (V.7):</b> caractéristiques hydromorpho métriques du bassin versant de l'oued Isser droit du barrage de Koudiat Acerdoune..... | 89  |
| <b>Tableau (VI.1):</b> Nombre de valeurs observées par station et années.....   | 92  |
| <b>Tableau (VI.2):</b> Nombre de valeurs observées par saison et mois.....  | 93  |
| <b>Tableau (VI.3):</b> Paramètres statistiques de la concentration C, du débit liquide Ql et débit solide Qs .....                        | 94  |
| <b>Tableau (VI.4):</b> Relations obtenues à l'échelle instantanée interannuelle ( $Q_s = aQ_l^b$ ).....                                   | 96  |
| <b>Tableau (VI. 5):</b> Modèles obtenus à l'échelle annuelle ( $Q_s=aQ_l^b$ ).....  | 99  |
| <b>Tableau (VI.6):</b> Modèles obtenus à l'échelle intra annuelle ( $Q_s=aQ_l^b$ ).....   | 100 |
| <b>Tableau (VI.7):</b> Modèles obtenus à l'échelle saisonnière.....   | 101 |
| <b>Tableau (VI.8):</b> Bilan annuel des apports liquides et solides.....  | 105 |

***LISTE DES TABLEAUX***

**Tableau (VI.9):** Bilan intra-annuel des apports liquide et solide.....106

# *Introduction générale*

## INTRODUCTION GENERALE

L'eau est devenue ces dernières années la ressource la plus rare et la plus précieuse de la terre et les réserves en eau continuent de baisser de manière alarmante dans plusieurs régions du monde, notamment dans les pays arides et semi-aride où l'eau potable, industrielle et d'irrigation ne peut être fournie qu'en stockant l'écoulement de surface (Ghernaout, 2014). Les capacités de stockage des barrages, et par conséquent les ressources en eau, ont considérablement diminué ces dernières décennies et sont gravement menacées par la dégradation de la terre (érosion) et l'envasement (dépôt des particules solides) dont les conséquences sont extrêmement gênantes.

Environ 1% de la capacité mondiale de stockage d'eau dans les réservoirs est perdue chaque année par le dépôt de sédiments dans les réservoirs (White, 2001). En Algérie le taux de comblement des barrages, dont le nombre est de 80 aujourd'hui et dans la capacité de stockage globale est de 6,8 milliards de m<sup>3</sup>, est de l'ordre de 20% (Remini, 2017). Ils sont amputés annuellement d'une capacité d'environ 65Mm<sup>3</sup> suite à l'envasement, et les problèmes posés par l'érosion et le transport solide peuvent atteindre une ampleur susceptible de combler les retenues de sédiments et ainsi de stériliser les efforts d'aménagement des eaux et des rivières (Achite & Meddi , 2004).

Selon Heusch (1982), l'érosion spécifique des bassins versants de l'Afrique du Nord avoisine 800T/Km<sup>2</sup>an. Il est de l'ordre de 1250T/Km<sup>2</sup>an selon la SOGREAH (1967). L'Algérie (du Nord) est classée parmi les pays aux sols les plus érodibles du monde où le taux d'érosion spécifique atteint les valeurs les plus importantes, dépassant 2000T/Km<sup>2</sup>an sur la plupart des bassins versants de l'Atlas Tellien (Rhiou, Sly, Fodda, Mazafran, Isser); il atteint 4000T/Km<sup>2</sup>an sur la chaîne côtière de Dahra, 5000T/Km<sup>2</sup>an dans le bassin très dégradé de l'Oued Agrioun qui alimente le barrage d'Ighil Emda (Remini & Remini, 2003) et une valeur très élevée selon (Bourouba (1994) de 7619T/Km<sup>2</sup>an dans le bassin versant de Djendjen dans le Nord Est de l'Algérie. La dégradation spécifique moyenne dans le Nord Ouest de l'Algérie vaut 470T/Km<sup>2</sup>an dans le bassin versant de Harreza (Megueni & Remini, 2008), 100T/Km<sup>2</sup>an dans le bassin versant de l'Oued Mouilah (Tarfous *et al.*, 2001) et 450T/Km<sup>2</sup>an dans le bassin versant de l'Oued Mina (Ghernaout, 2014). Pour la région centre et pour le bassin versant de l'Oued Isser, ces taux varient selon (Demmak, 1982) entre 100 et 2000 T/Km<sup>2</sup> an avec des concentrations de sédiments en suspension allant de 0 à 410g/l.

Le cas du bassin versant de l'Oued Isser est donc à signaler au regard de l'importance et de la complexité du phénomène de transport solide en suspension en raison d'une importante hétérogénéité

## INTRODUCTION GENERALE

des sols, un faible couvert végétal et une hydro-pluviométrie mal répartie aussi bien dans l'espace que dans le temps, et au regard du taux important de comblement de la retenue de barrage de Koudiat Acerdoune, construit en 2013 à l'aval de la station hydrométrique de la Traille de capacité initiale de stockage de 640Mm<sup>3</sup>.

La présente étude a pour principal objectif :

- L'analyse des données de concentrations des sédiments en suspension mesurées au niveau de la station de la Traille, au droit du barrage de Koudiat Asserdoune (N Algérie) ;
- Mettre en évidence des relations régressives en puissance, reliant la concentration (ou le débit solide) des sédiments en suspension au débit liquide ;
- Cerner la variation interannuelle et intra-annuelle des apports solides fins et grossiers, véhiculés par l'Oued Isser au niveau de la station hydrométrique de la traille, et déposés dans la retenue du barrage de Koudiat Asserdoune durant la période de disponibilité débits liquides (de 1970/71 à 1984/85) ;
- Prévoir la variation interannuelle et intra annuelle de l'érosion spécifique et à la variation de la capacité de stockage de la retenue du barrage de Koudiat Asserdoune en se basant sur la dégradation spécifique moyenne du bassin.

Dans le cadre de préparation de ce mémoire de fin d'étude nous avons établis le plan de travail suivant :

Introduction générale ;

Chapitre I : Généralités et définitions sur le ruissellement, l'érosion, le transport solide et l'envasement des barrages ;

Chapitre II : Méthodes de quantification de l'érosion et du transport solide en suspension ;

Chapitre III : Evolution de la concentration et des débits liquides durant les rues ;

Chapitre IV : Travaux et études précédentes (exposition des résultats des différents travaux antérieurs) ;

Chapitre V : Cadre général et présentation de la région d'étude ;

Chapitre VI : Analyse et quantification du transport solide ;

## INTRODUCTION GENERALE

Et enfin, nous avons terminé par une conclusion générale.

*Chapitre I*  
*Généralités et définitions*

### **I.1 Introduction**

Quand le sol ne peut plus absorber l'eau des précipitations, une lame d'eau se forme à la surface du sol correspondant à l'eau en excès. La mise en mouvement de cette eau forme le ruissèlement.

Le ruissellement de l'eau sur le sol constitue la cause fondamentale de l'érosion du sol ou l'érosion hydrique. D'autres facteurs tels que l'action du vent (érosion éolienne), le travail du sol, la pente et le couvert végétal peuvent provoquer l'érosion. Le sol se détache, se déplace puis se dépose. L'érosion du sol abaisse la productivité des terres et contribue à la pollution des cours d'eau, des terres humides et des lacs adjacents.

L'érosion du sol engendre la production et le transport de sédiments. Ces derniers transitent dans le bassin versant, les thalwegs et les cours d'eau qui sont alors sujets au transport solide.

Le transport des matières solides par l'eau est multiforme. Il résulte d'une action mécanique directe des précipitations, aussi bien que d'actions indirectes. La pluie en tombant fait éclater les agrégats du sol et déplace les particules, c'est l'érosion de rejaillissement. Lorsque le ruissellement apparaît, il intervient à la fois par sa force tractrice et par son action sur la cohésion des particules.

Le transport des sédiments par les écoulements est un phénomène physique dépendant de la morphologie des réseaux naturels d'évacuation des eaux. Il en résulte que toute intervention susceptible de modifier le régime hydrologique ou du lit d'un cours d'eau doit être examinée eu égard des processus d'érosion, de transport solide et de déposition. On peut distinguer les processus de transport solide, selon les caractéristiques physiques des matériaux transportés, la composition granulométrique des sédiments et les conditions de l'écoulement (vitesse, profondeur).

### **I.2 Le Ruissellement**

Le ruissellement à l'échelle du versant est divers dans ses origines, ses modalités et les formes d'érosion associées. Selon J. Ticart (1972), le ruissellement se produit dans deux cas : lorsqu'il y a saturation ou lorsque «la battance» occasionne le glaçage.

### **I.2.1 Théories de ruissellement**

La naissance du ruissellement peut être expliquée par 3 théories :

#### **I.2.1.1 Théorie de Horton (1945)**

Le ruissellement naît lorsque l'intensité des pluies est supérieure à la capacité d'infiltration du sol (Figure I.1). Si on compare l'infiltration à l'intensité de la pluie, on constate que l'intensité d'infiltration décroît au cours du temps, d'une part parce que le potentiel capillaire diminue à mesure que le front d'infiltration pénètre à l'intérieur du sol et d'autre part, par dégradation de l'état de la structure à la surface du sol. Par contre, l'intensité de la pluie passe généralement par un (ou plusieurs) maximum et le volume de la pluie situé au-dessus de la courbe d'infiltration peut être considéré comme le ruissellement. On constate dans l'exemple choisi, pour une séquence d'intensité voisine que le volume du ruissellement peut varier considérablement en fonction de la période où apparaît le maximum d'intensité dans l'averse. Plus tôt apparaît ce maximum, plus réduit sera le ruissellement puisque la capacité d'infiltration diminue au cours du temps. Cependant, les hydrologues ont montré qu'il était rare d'obtenir une bonne corrélation entre le volume ruisselé sur un bassin versant et l'intensité des pluies. On a donc cherché une autre explication.

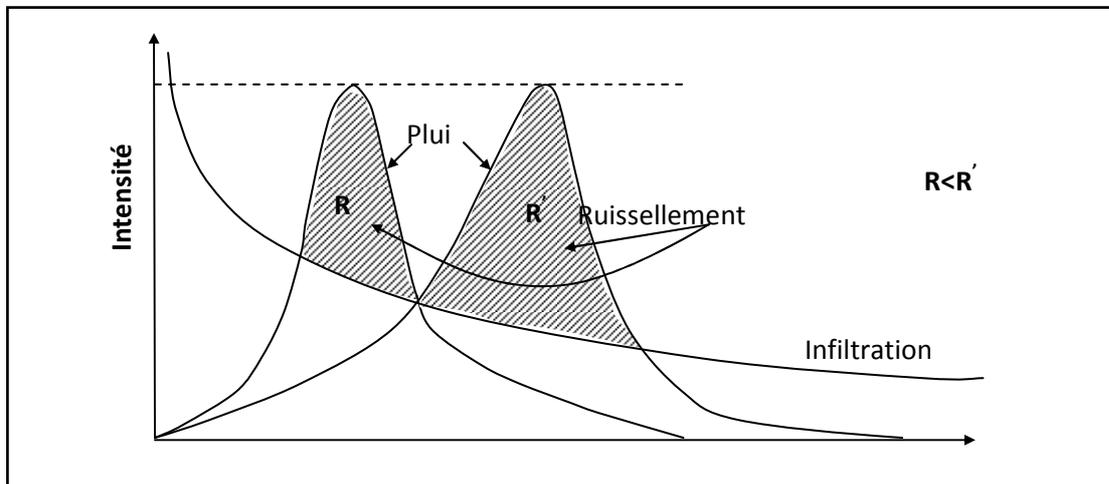


Figure (I.1) : Naissance du ruissellement selon Horton

#### **I.2.1.2 Théorie de la saturation du milieu**

Le ruissellement naît lorsque l'espace poreux du sol est saturé (figure I.2). Si, au cours d'une pluie simulée, on constate d'abord le démarrage du ruissellement après une pluie d'imbibition, le ruissellement va augmenter jusqu'à atteindre un niveau stabilisé correspondant

à la capacité d'infiltration stabilisée du sol. Mais si la pluie persévère (plus de 100mm), il peut arriver que l'on observe une nouvelle croissance du ruissellement et un nouveau plateau d'infiltration stabilisée. Il s'agit simplement de la saturation de l'horizon labouré; elle provoque le débordement de cette capacité de stockage que représente la macroporosité de l'horizon labouré. On peut constater soit que l'intensité de ruissellement correspond exactement à celle de la pluie simulée si l'horizon de profondeur est totalement imperméable ou qu'il reste une certaine capacité d'infiltration résiduelle correspondant à celle du fond de labour. Lorsqu'un milieu est totalement saturé, toute goutte d'eau tombant dans ce milieu ruisselle, quelle que soit l'intensité de la pluie.

### I.2.1.3 Théorie de la contribution partielle de la surface du bassin au ruissellement

En la figure (I.3), le ruissellement observé au niveau de la rivière est fonction de la surface du sol saturé au fond de la vallée. Si, au cours de la saison sèche, on mesure le ruissellement sur un bassin versant, on constate que la rivière réagit très rapidement aux orages alors qu'on n'observe pas de ruissellement sur les versants ! Le volume ruisselé est réduit pendant cette période sèche car la surface saturée du fond de vallée est très étroite, souvent réduite au lit mineur. En fin de l'hiver, par contre, lorsque tout le volume de la couverture pédologie a été humecté jusqu'à capacité au champ, la moindre averse réalimente la nappe, laquelle va latéralement saturer une surface plus grande de la vallée.

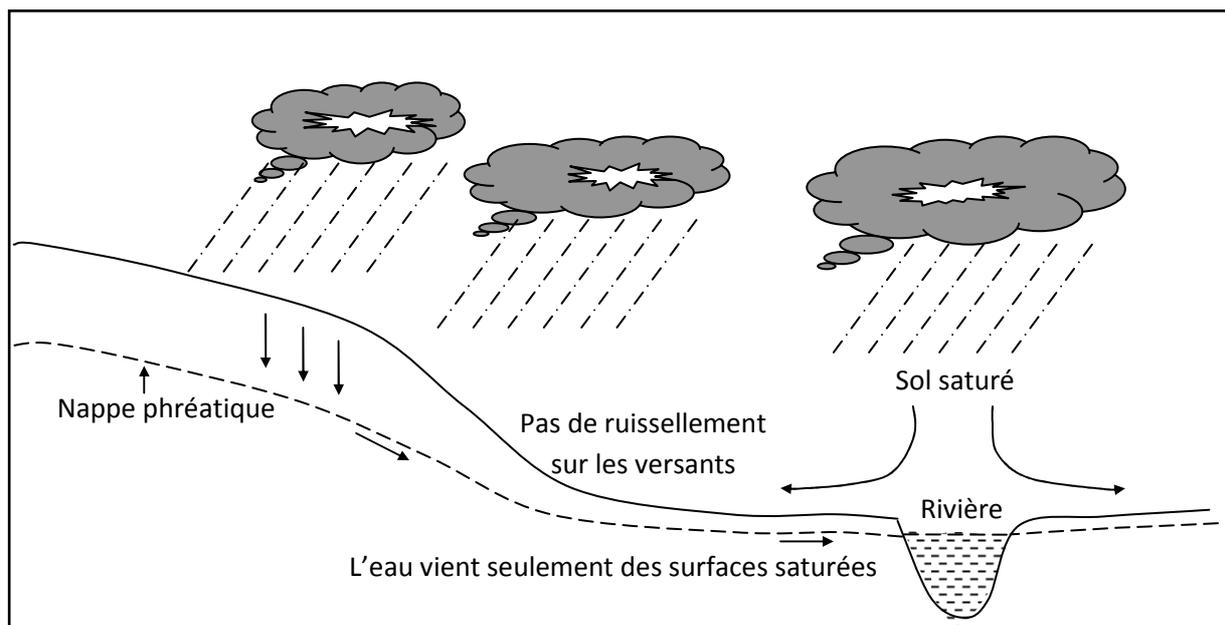


Figure (I.2) : Naissance du ruissellement

Par conséquent, même s'il n'y a pas de ruissellement sur le versant en période humide, l'ensemble du bassin versant va contribuer au volume écoulé par la rivière par extension de la surface saturée, la nappe étant alimentée directement par le drainage de l'ensemble du bassin.

### **I.2.2 Phases de ruissellements**

Les phases du ruissellement ont été décrites (Tricart J., 1972) puis cernées plus précisément, malgré leur complexité, sur parcelles soumises à des pluies simulées à intensité constante (Lafforgue, 1977 ; Collinet, 1979). Le turbidigramme est, par définition, la courbe d'évolution au cours du temps, de la charge solide des eaux de ruissellement sous une averse d'intensité donnée. (Collinet & Lafforgue, 1979).

Définition des différents temps (ce sont les mêmes temps que ceux de l'hydrogramme théorique de ruissellement) :

$t=0$  : début de l'averse;

$t_i$  : début du ruissellement, fin de la phase d'imbibition;

$t_{cs}$  : pic de turbidité;

$t_m$  : fin de la phase de transition de l'hydrogramme de ruissellement, l'infiltration atteint un minimum;

$t_u$  : fin de l'averse;

$t_f$  : fin de la phase de vidange.

Les différentes phases du turbidigramme définies par Collinet et Lafforgue (1979) sont :

#### **I.2.2.1 Phase d'imbibition de $t_0$ à $t_i$**

Deux processus se superposent pendant cette phase :

Une mobilisation des particules meubles disposées à la surface du sol par humectation c'est le stock initial *cst*. Ces particules sont constituées de sédiments délaissés pendant la phase de vidange de l'averse précédente, des matériaux remaniés par la faune du sol ou des poussières apportées par le vent.

Une désagrégation de la surface du sol du fait de l'impact des gouttes de pluie: c'est *csp*. Cette composante de la turbidité est due à l'effet de rejaillissement ou "splash".

### **I.2.2.2 Phase transitoire de $t_i$ à $t_m$**

L'augmentation brutale de la turbidité vers un pic  $cs$  au temps  $tcs$  est due à la décharge des composantes  $cst + csp + cn$ , avec  $cn$  : la composante due à l'abrasion des surfaces planes par la lame d'eau de ruissellement en mouvement. Après le temps  $tcs$ , on observe une diminution rapide de la turbidité jusqu'à une valeur de palier  $cx$ . En effet les composantes de la turbidité  $cst$  et  $csp$  diminuent tandis que l'intensité de ruissellement augmente.

### **I.2.2.3 Phase de régime permanent de $t_m$ à $t_u$**

Pendant cette phase, s'instaure un palier de la turbidité  $cx$ , correspondant à la stabilité de l'effet "splash".

### **I.2.2.4 Phase de vidange de $t_u$ à $t_f$**

La diminution du ruissellement va entraîner une diminution des transports, car l'énergie du ruissellement n'est plus suffisante pour le transport de toutes les particules. C'est à ce moment que va se constituer le stock de sédiments se déposant sur la parcelle sans atteindre l'exutoire.

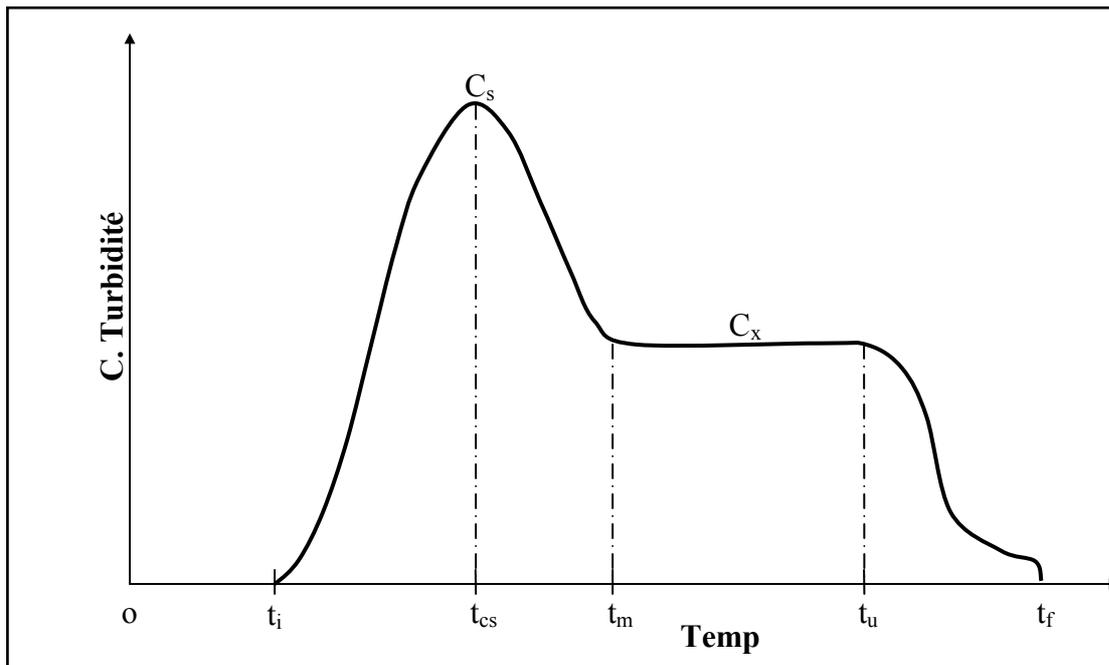


Figure (I.3): Courbe d'évolution au cours du temps de la charge solide des eaux de ruissellement sous une averse d'intensité donnée (Collinet & Lafforgue, 1979)

### I.2.3 Types de ruissellement

Des les années 1930, Davies a proposé un classement des types de ruissellement qui reste valable :

Ruissellement concentré ;

Ruissellement laminaire ou pelliculaire : Sheet Wash ;

Ruissellement diffus ou en filets : rill wash ;

Sheet flood, lorsque les rills débordent.

Une difficulté naît du fait que, dans ce dernier cas où les rills se rejoignent, on a une habitude de parler de ruissellement en nappe parce que l'on a effectivement une lame d'eau généralisée, couvrant apparemment la totalité de la surface. Toutefois, si le sol n'est pas nu, l'action de ruissellement sur ce type de surface n'est égale partout, à cet écoulement correspond d'ailleurs des formes d'érosion spécifiques telles que des micros marches d'escalier, témoins de vitesses d'écoulement élevées et d'un mécanisme de cisaillement. La traduction proche en langue française est « ruissellement diffus généralisé » qui participe à un décapage insidieux, peu perceptible, le ruissellement concentré génère en revanche des

formes de dissection, incision linéaire, bien reconnaissable : rigoles ou ravineaux de dimensions décimétriques, à profil concave ou en u, ravines de dimensions métriques à bords raides. Chaque type de ruissellement provoque une érosion associée.

### **I.3 Erosion**

En zone méditerranéennes et semi-arides caractérisées par un climat plus ou moins sec et des régimes hydrologiques violents, et irréguliers ; l'érosion des bassins versants et la sédimentation des cours d'eau constituent un phénomène complexe très récurrent qui pose de nombreux problèmes aux ingénieurs chargés des projets d'aménagement et de mise en valeur.

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'infiltrabilité de la surface du 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 (Cros-Cayot, 1996). Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace : l'érosion de versant diffuse ou en rigoles parallèles et l'érosion linéaire ou concentrée de talweg.

Comme le suggèrent ces définitions, les processus érosifs dépendent d'une multiplicité de facteurs interagissant entre eux et sont de ce fait, complexes à modéliser. Les facteurs de l'érosion devant être pris en compte pour étudier les phénomènes érosifs font maintenant l'objet d'un consensus et regroupent le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat (Wischmeier et al, 1978).

L'érosion hydrique est la principale forme de dégradation dans les zones semi-arides et les régions subhumides sèches, tandis que l'érosion éolienne domine dans les zones arides.

Les problèmes de dégradation de l'environnement sont intimement liés au développement des populations et des civilisations. Ils concernent autant les agronomes, les forestiers, les géographes, les hydrologues, les sédimentologues que les socio économistes. Mais chacun dans sa discipline a développé un langage propre, si bien que les mêmes mots n'ont pas la même portée selon les professions.

### **I.3.1 Définition**

Erosion vient de "ERODERE", verbe latin qui signifie "ronger". L'érosion ronge la terre comme un chien s'acharne sur un os. D'où l'interprétation pessimiste de certains auteurs qui décrivent l'érosion comme une lèpre qui ronge la terre jusqu'à ne laisser qu'un squelette blanchi: les montagnes calcaires qui entourent la Méditerranée illustrent bien ce processus de décharnement des montagnes dès lors qu'on les défriche et que l'on brûle leur maigre végétation (exp. Grèce). En réalité, c'est un processus naturel qui certes, abaisse toutes les montagnes (d'où le terme de "dénudation rate", vitesse d'abaissement du sol des géographes anglophones) mais en même temps, l'érosion engraisse les vallées, forme les riches plaines qui nourrissent une bonne partie de l'humanité. Il n'est donc pas forcément souhaitable d'arrêter toute érosion, mais de la réduire à un niveau acceptable tolérable.

L'érosion est l'ensemble des actions physico-chimiques et organiques qui aboutissent à la destruction des roches et au nivellement progressif du terrain. Plus simplement, l'érosion est l'usure de la partie superficielle de l'écorce terrestre ; l'eau et le vent sont les principaux agents (Greco, 1966).

L'érosion est un phénomène naturel qui affecte l'ensemble de la couverture terrestre géo pédologique, et c'est l'un des facteurs importants de formation et d'évolution des milieux naturels (Dutil, 1984).

L'érosion hydrique correspond à la séparation entre la particule et son support, sans inclure le transport et la sédimentation, même s'il se produit toujours un micro transport (Rampon, 1990).

### **I.3.2 Types d'érosion**

Il y a trois types d'érosion :

#### **I.3.2.1 L'érosion éolienne**

Le vent exerce sur les particules solides au repos une pression sur la surface exposée au flux d'air, appliquée au-dessus du centre de gravité, auquel s'oppose un frottement centré sur la base des particules. Ces deux forces constituent un couple tendant à faire basculer et rouler les particules lourdes (0,5 à 2 mm), de plus, la différence de vitesse entre la base et le sommet des particules provoque leur aspiration vers le haut. Les particules les plus légères s'élèvent à la verticale jusqu'à ce que le gradient de vitesse ne les porte plus. Elles retombent

alors, poussées par le vent, suivant une trajectoire sub-horizontale. En retombant, ces grains de sable transmettent leur énergie à d'autres grains de sable (comme dans un jeu de boules) ou dégradent les agrégats limono argileux en dégageant de la poussière (Heusch, 1988).

L'érosion éolienne prend de l'importance en Afrique de l'Ouest dans les zones tropicales sèches, là où la pluviosité annuelle est inférieure à 600 mm, où la saison sèche s'étend sur plus de six mois et où la végétation de type steppique laisse de larges plaques de sol dénudé. Ailleurs, elle peut aussi se développer dans des conditions de préparation du sol qui amènent une pulvérisation importante des matériaux superficiels secs.

### **I.3.2.2 L'érosion aratoire ou mécanique sèche**

Ce phénomène d'érosion n'est pas dû à l'intervention de l'eau, c'est le travail du sol qui arrache les particules, les transporte et les dépose soit en bas de parcelle, soit en talus. Les facteurs influençant la quantité de terre déplacée sont :

Le type d'outil ;

La fréquence des passages ;

La pente; plus la pente est forte, plus les mottes de terres détachées roulent bas. C'est ce qui explique que les sommets des collines sont souvent décapés.

Celui ci peut être orienté soit en courbes de niveaux, soit du haut de la parcelle vers le bas (ce qui est le cas pour les tracteurs travaillant sur des pentes supérieures à 15 %), soit du bas de la parcelle vers le haut (pour le travail manuel notamment). Il est très rare que la terre soit remontée par les outils. Par contre, il arrive qu'en montagne et dans les zones où la terre est rare, que l'on récupère mécaniquement ou dans des petits paniers de la terre dans la plaine pour la remonter dans la montagne, c'est le cas sur les vignes. On constate aussi que l'aller et le retour des outils peuvent réduire considérablement la vitesse du décapage par l'érosion mécanique sèche (Revel, 1989).

### **I.3.2.3 L'érosion hydrique**

L'élément déclencheur de ce type d'érosion est la pluie, qui provoque le détachement des particules élémentaires du sol.

### **I.3.2.3.1 Erosion en nappe**

Elle est caractérisée par une eau de ruissellement sans griffes ou rigoles visibles. Sous l'effet de l'impact des gouttes de pluies (effet splash), les particules sont arrachées et transportées. Ce phénomène est observé sur les pentes faibles où l'eau ne peut pas se concentrer.

Dans un premier temps, c'est l'impact des gouttes qui va arracher les particules. La battance des gouttes de pluie va envoyer des gouttelettes dans toutes les directions. Seulement, sous l'effet de la gravité les gouttelettes auront une vitesse plus importante vers l'aval que vers l'amont. Si l'on réalise une moyenne sur l'ensemble des gouttelettes, la vitesse sera dirigée de l'amont vers l'aval. A partir de là, il y aura formation de flaques et débordement de l'eau non infiltrée d'une flaque à l'autre ce qui entraînera un ruissellement en nappe. L'érosion en nappe dépend de:

L'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement ;

L'énergie cinétique des pluies qui détachent les particules ;

La durée des pluies et/ou l'humidité avant les pluies, c'est à dire l'état du sol.

Les signes qui permettent de caractériser l'érosion en nappe sont l'apparition de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés et la remontée de cailloux à la surface du sol, les conséquences de l'érosion en nappe sont:

Le nivellement de la surface du sol ;

La squelettisation des horizons superficiels ;

Le décapage entraînant l'apparition de taches claires ;

### **I.3.2.3.2 Erosion linéaire, en griffes ou en rigoles (rill-interrill)**

Ce type d'érosion intervient à la suite du ruissellement. Dans un premier temps, des flaques se forment. En débordant, les flaques communiquent entre elles et des lignes d'écoulement limitées dans l'espace apparaissent selon la ligne de plus grande pente: selon la profondeur de ces lignes, le vocabulaire employé est différent. Dans le tableau I.1, nous donnons les différentes formes d'érosion hydrique.

Tableau (I.1) : Formes d'érosion hydrique (Roose ,1994)

| Appellation des lignes d'écoulement (d'après Roose, 1994) |                 |
|---|-----------------|
| Profondeur  | Appellation     |
| Quelques centimètres                                      | Griffes         |
| >10 cm  | Rigoles         |
| 10 à 20 cm quelques mètres de large                       | Nappe Ravinante |
| >50 cm  | Ravines         |

Tout comme l'érosion en nappe, il existe une méthode pour mesurer l'érosion linéaire. Cette méthode est basée sur la méthode des volumes (Ludwig, 1992).

### I.3.3 Causes de l'érosion hydrique

La cause principale de l'érosion hydrique est l'eau et plus particulièrement la pluie torrentielle. L'Algérie du nord, de part la nature géologique et lithologique de son sol est caractérisée par un climat agressif à pluie torrentielle ( $I > 24 \text{ mm/h}$ ), irrégulières aussi bien dans l'espace que dans le temps, avec des temps de concentration courts (Achite, 1999). A cela peut s'ajouter l'effet du couvert végétal, la pente du terrain, la lithologie du bassin versant et l'homme qui ont tous leur part dans l'érosion des bassins versants (Linsley, 1975).

#### I.3.3.1 Influence du climat

Le changement de température, la hauteur de précipitation et le vent ont des effets prépondérants sur l'altération mécanique. Leur influence sur l'érosion est difficile à évaluer à cause de leur variation.

#### I.3.3.2 Facteurs topographiques

Les facteurs topographiques essentiels sont la pente du bassin versant, le relief, la densité du drainage, l'importance des collées et des plaines d'inondation, l'orientation et la taille du bassin. Les fortes pentes avec un écoulement rapide sont généralement à l'origine d'une érosion excessive dont l'importance dépend de la géologie des sols et la protection de la couverture végétale.

#### I.3.3.3 Facteurs géologiques et pédagogiques

Ce sont les facteurs géologiques relatifs aux roches de surface, si les roches sont exposées à la pluie, au vent et aux forces de gravité, il peut y avoir désagrégation. La

répartition granulométrique des sols, leur perméabilité, la présence de certains éléments chimiques et matières organiques conditionne l'érodabilité des sols.

### **I.3.3.4 Couvert végétal**

Le couvert végétal, d'une part protège contre la battance des pluies, donc prolonge la perméabilité du sol et réduit le volume ruisselé, sa litière entretient la méso faune (laquelle creuse la macroporosité) et absorbe une grande quantité d'énergie de ruissellement. La rugosité au sol dépend du nombre de tiges par m<sup>2</sup>. C'est ainsi qu'une couverture végétale formée d'herbacées à tiges nombreuses est plus efficace pour protéger le sol contre le ruissellement que des arbres.

### **I.3.4 Conséquences de l'érosion hydrique**

Les conséquences de l'érosion hydrique sont multiples, parmi eux on cite : Sur les versants, ils sont essentiellement supportés par les agriculteurs. Ce sont principalement, de l'amont vers l'aval, les arrachements de plants ou de semis, la création des ravines qui engendrent un gêne pour les interventions culturales, le recouvrement des plants et des semis par des dépôts. A long terme, des tris sur les éléments fins et les matières organiques s'opèrent le long du versant et contribuent à différencier les caractéristiques physiques et chimiques des horizons de la surface du sol selon leur position dans le versant. Le ruissellement tout en distribuant l'eau le long des versants, entraîne des produits de traitements et des fertilisants pour partie liés aux particules de sol transportées ce qui provoque des phénomènes de phytotoxicité en bas de parcelle.

A l'aval, les dégâts incombent essentiellement aux collectivités territoriales. Il peut s'agir de dommages à la fois ponctuels et spectaculaires, tels que des engravements ou des sallissements de chaussées, des colmatages ou de comblements des réseaux de collecte des eaux pluviales, voir des sapements de chaussées. Il peut s'agir des dégâts plus pernicioeux sur la qualité des eaux de surface. L'augmentation de la turbidité des eaux, de la teneur en phosphore migrant fixé aux particules peut ainsi contribuer au colmatage des lits des cours d'eaux, à leur eutrophisation et à la diminution de leur qualité piscicole. Un exemple frappant de ce générique est celui des inondations de Bab El-Oued (Alger) en Novembre 2001 où plus d'un millier de personne ont péri, enseveli dans la boue. Sur 2.6 Millions de m<sup>3</sup> ruisselés, un volume de 800 000 m<sup>3</sup> de sédiments arrachés au bassin a transité (A.N.R.H, 2001).

L'envasement des barrages, l'affouillement et les comblements des lits d'oued sont spectaculaires en Algérie. La vitesse de colmatage des ouvrages d'art est variable d'un barrage à un autre selon la force d'érosion et de la lame ruisselé (Touaibia, 2003).

Une autre conséquence qui mérite d'être soulevé est l'augmentation de la largeur des oueds d'une année à l'autre, en effet ni la quantification ni la mécanisme de ce phénomène n'ont fait l'objet d'une étude sérieuse en Algérie (Remini, 2004).

### **I.4 Transport solide**

Le transport solide dans un cours d'eau constitue la seconde phase de l'érosion, 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. L'eau trouve la puissance nécessaire pour ce transport dans la perte de charge qu'elle subit. Le champ d'exploitation de vitesse varie tout au long du profil de l'oued d'amont en aval.

Le transport solide est par définition la quantité de sédiment transportée par un cours d'eau. Ce phénomène est limité par la quantité de matériaux susceptible d'être transportée. Il est principalement réglé par deux propriétés du cours d'eau :

- 1.** Sa compétence ; elle est mesurée par le diamètre maximum des débris rocheux que peut transporter le cours d'eau. Cette caractéristique est essentiellement fonction de la vitesse de l'eau. Les variations de la compétence en fonction de la vitesse et la granulométrie du substrat ont été étudiées par Hjulstrom (Figure I.5).
- 2.** Sa capacité ; c'est la quantité maximale de matériaux solides que peut transporter en un point et à un instant donné le cours d'eau. La capacité est fonction de la vitesse de l'eau, du débit et des caractéristiques de la section (forme, rugosité,...).

Hjulstrom en 1935 a montré qu'il existait trois zones : la zone supérieure d'érosion passant par un minimum vers 100 microns, la zone inférieure de sédimentation et entre les deux une zone de transport. La granulométrie des particules sédimentaires a donc une influence majeure sur leur transport (et sur la vitesse de sédimentation). Le graphe de la figure (I.5) essentiellement basé sur des expériences en laboratoire montre la vitesse minimale d'un courant nécessaire pour mobiliser, transporter et déposer des grains de quartz de granulométrie variable.

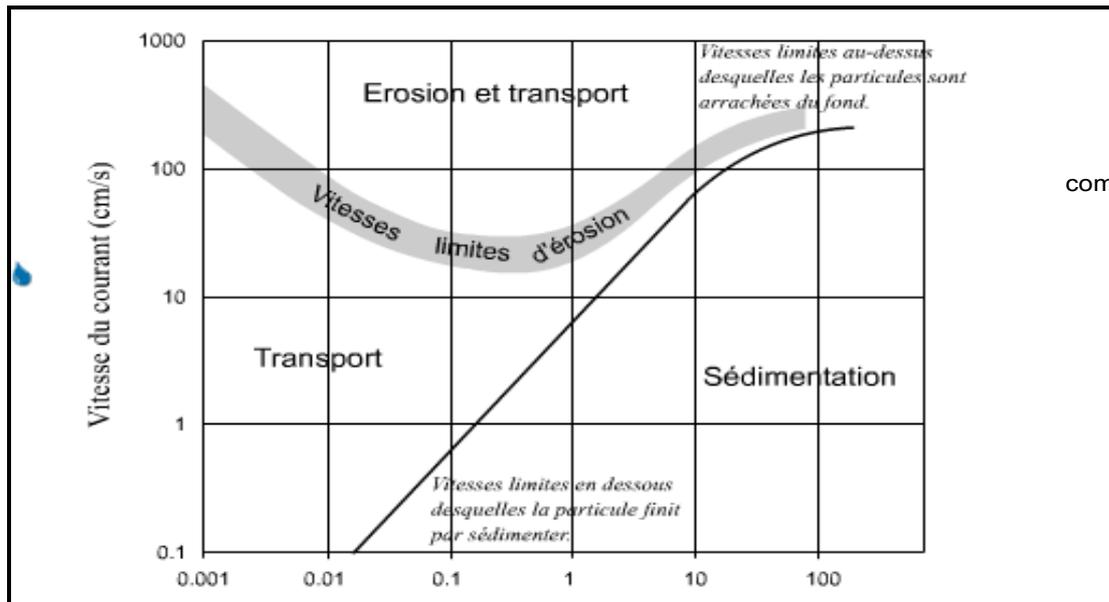


Figure (I.4): Diagramme de Hjulstrom (Boulvain, 2004)

L'analyse d'abord de la partie supérieure de ce graphe (érosion des particules) montre que la portion de la courbe représentant l'érosion des particules moyennes à grossières (sable fin à galets) semble logique: la vitesse du courant nécessaire pour mobiliser des grains augmente avec leur granulométrie. L'érosion démarre pour une vitesse minimum de 25cm par seconde lorsque la texture des matériaux des berges est d'environ 100 microns. Pour les particules fines, par contre, la courbe montre une augmentation de la vitesse du courant avec la diminution de la granulométrie. Ce comportement paradoxal est la conséquence de la cohésion élevée des particules fines, surtout liée à un effet électrostatique. La partie inférieure du graphe montre la relation entre la granulométrie des particules et la vitesse du courant lors de leur dépôt.

Les deux propriétés du cours d'eau (compétence et capacité) ne sont pas directement liées. Ainsi dans un fleuve, la compétence décroît vers l'aval, ce qui n'est pas le cas de la capacité. Le transport des sédiments par le cours d'eau est donc déterminé par les caractéristiques des particules (taille, forme, concentration, vitesse de chute et densité des particules).

L'érosion et le transport solide (en tonnes /Km<sup>2</sup>.an) dépend fortement du climat local (précipitation essentiellement), du sol, de la pente et de l'occupation de sol. Les valeurs peuvent varier de 50 à 500 tonnes /Km<sup>2</sup>.an. Les formules universelles ne sont pas disponibles. Basé sur des données locales, des formules régionales ont été développées.

L'étude du transport solide est devenue essentielle dans de nombreux domaines, de l'étude des processus d'érosion et de sédimentation dans les retenues aux études sur la pollution des cours d'eau.

### **I.4.1 Origine des matériaux transportés**

Les écoulements de surface transportent avec eux les produits de la désagrégation des roches des régions hautes vers les zones basses et en définitif vers la mer. Le transport solide par les cours d'eau est fortement lié à l'érosion de sol due à la pluie. L'eau s'infiltrant dans le sol peut contribuer aux éboulements et glissements qui peuvent devenir des sources principales des sédiments pour les cours d'eau. De manière beaucoup plus détaillée les matériaux solides transportés par le cours d'eau ont diverses origines :

- Ablation des éléments de surface, souvent instable, matériaux meubles produits d'altération du bassin versant. La disparition du couvert végétal accélère le processus d'ablation. L'érosion des berges du cours d'eau se manifeste essentiellement par une ablation directe à la montée des eaux de la base à la crête des berges, suivie d'un décollement des berges par tranches verticales lors de la baisse des eaux, due à la dessiccation interstitielle.

- Reprise des matériaux constitutifs du lit des cours d'eau. Les lits des cours d'eau, par la mobilité ou instabilité des matériaux qui les constituent, donnent lieu, lors des crues à des reprises incessantes, d'autant plus marquées que les débits liquides et la vitesse des eaux sont plus grands. Les éléments grossiers transportés par roulement ou saltation sur le fond proviennent surtout du fond et des berges du lit apparent et du lit majeur, mais aussi directement des versants. Les éléments fins, véhiculés en suspension, peuvent provenir en partie des versants, lors d'un ruissellement superficiel diffus. Ils sont aussi directement entraînés à partir du lit des cours d'eau lors des crues. Les substances dissoutes sont transportées par les eaux d'infiltration et restituées aux cours d'eau par les sources ou eau de suintement à la base des versants.

### **I.4.2 Mobilisation des matériaux sur les versants**

La mobilisation des matériaux solides, grossiers et fins, correspond à des processus mécaniques dont le principal est l'action des eaux. Cette mobilisation dépend de plusieurs facteurs :

- La topographie des versants joue un rôle important en ce qui concerne les processus mécaniques ;
- La lithologie en place est déterminante pour l'érosion ;
- Les conditions climatiques ;
- La présence et la densité du couvert végétal joue un rôle double. D'une part, il représente un obstacle pour les sédiments transportés par le ruissellement et d'autre part, il intervient dans la régulation du ruissellement en diminuant sa capacité de transport.

### I.4.3 Caractéristiques des matériaux transportés

#### I.4.3.1 Dimension des particules

Elle est définie par le diamètre apparent d'une particule mesuré soit au tamis pour les particules ayant un diamètre supérieur à 0.1mm, soit évalué par la formule de stokes ou mesuré au microscope pour les particules plus petites (jusqu'à 4microns). La formule de stokes ou vitesse de sédimentation est en elle même considérée comme un facteur principal dans le phénomène de suspension.

Tableau (I.2) : Classification des matériaux transportés

| D'après l'American Geophysical Union (classification la plus adaptée) |             |          |                 |              |                |
|---|-------------|----------|-----------------|--------------|----------------|
| Nature du matériau  | Galets      | Gravier  | Sable           | Limon        | Argile         |
| Diamètre  | 64 à 4000mm | 2 à 64mm | 62 à 2000 $\mu$ | 4 à 62 $\mu$ | 0.24 à 4 $\mu$ |
| En France (Larras, 1977) la classification suivante est adoptée       |             |          |                 |              |                |
| Nature du matériau  | Gailloux    | Gravier  | Sable           | Limon        | Argile         |
| Diamètre<br>Mm  | 200 à 20    | 20 à 2   | 2 à 0.05        | 0.05 à 0.005 | 0.005 à 0.001  |

### I.4.3.2 Vitesse de sédimentation

La vitesse de chute est considérée comme un paramètre de base dans les problèmes concernant l'action du courant sur le matériau granulaire du lit. Elle permet de caractériser le comportement hydrodynamique d'une particule dans un liquide.

Etudions cette vitesse de chute pour des sédiments non cohésifs en eau calme. En appliquant la loi fondamentale de la dynamique, une particule de grain (de forme sphérique) se déplaçant dans un fluide visqueux est soumise à l'action de trois forces : la pesanteur et la poussée d'Archimède qui constituent ensemble le poids apparent  $P$  de la particule :

$$P = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_s - \rho) g \quad (1.1)$$

Et la traînée hydrodynamique  $F$  (résistance exercée par le fluide), est égale d'après Newton à :

$$F = C_d \gamma \frac{\pi d^2}{4} \frac{w^2}{2g} \quad (1.2)$$

D'où la formule de Newton :

$$w^2 = \frac{4}{3C_d} \frac{(\rho_s - \rho) g}{\rho} d \quad (1.3)$$

Où :  $d$  : Diamètre du grain ;

$\gamma$  : Poids volumique de l'eau ;

$\rho$  et  $\rho_s$  : Masses volumiques de l'eau et du grain ;

$C_d$  : Coefficient de traînée.

Le coefficient  $C_d$  dépend de diamètre des grains  $d$ , des masses volumiques de l'eau et des grains  $\rho$  et  $\rho_s$ , de la viscosité cinématique de l'eau, de l'accélération de la pesanteur  $g$  et de la vitesse de sédimentation  $w$ .

Par des considérations dimensionnelles on constate que le coefficient  $C_d$  est proportionnelle au diamètre sédiment logique  $d^*$  et au nombre de Reynolds  $R_e$  c.à.d :

$$C_d = \text{fct} \left[ d^* = \left[ \frac{(\rho_s - \rho)g}{\rho v^2} \right]^{\frac{1}{3}} d, R_e = \frac{wd}{v} \right] \quad (1.4)$$

**Pour un régime laminaire** «  $R_e < 1$  on a  $C_d = \frac{24}{R_e}$  et  $R_e = \frac{1}{18} d^*$  »

On obtient la solution de Stokes :

$$w = \frac{1}{18} \frac{(\rho_s - \rho)g}{\rho v} d^2 \quad (1.5)$$

**Pour un régime turbulent** «  $R_e > 1000$ ,  $C_d$  est une constante et ne dépend plus de Reynolds

$C_d = 0.5$  et  $R_e = \frac{8}{3} d^*$  » :

$$w = \sqrt{\frac{8}{3} \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} g d} \quad (1.6)$$

**Pour la zone de transition** «  $1 < R_e < 1000$  et  $C_d = \text{fct}(R_e)$  »

Oseen propose la formule suivante pour  $R_e > 2$  :

$$w = \frac{24}{R_e} \left( 1 + \frac{3}{16} R_e \right) \quad (1.7)$$

Dans le domaine de transport solide, on admet les équations suivantes (Larras, 1972 ; Belleudy, 1997) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Formule de Stokes : } w = \frac{1}{18} \frac{(\rho_s - \rho)g}{\rho v} d^2 \quad d < 0.1 \text{ mm} \\ \text{Formule de Brudryk : } w = 10 \frac{v}{d} \left[ \sqrt{1 + \frac{0.01(\rho_s - \rho)}{\rho v^2} g d^3} - 1 \right] \quad 0.1 \text{ mm} < d < 1 \text{ mm} \\ \text{Formule de Van Rijn : } w = 1.1 \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} g d} \quad 1 \text{ mm} < d \end{array} \right. \quad (1.8)$$

Il faut noter que les grains sont considérés comme des sphères parfaites, alors que la forme du grain peut être très différente. De plus, une forte concentration de particule entraîne des interactions entre elles et donc une modification de la chute. Si la concentration

augmente, la vitesse de chute libre devient la vitesse de chute entravée. Notons qu'il peut apparaître des phénomènes de floculations. Les fines particules dont la vitesse de chute est très lente, voient alors leur vitesse de chute augmenter de façon considérable. Et finalement la vitesse de chute peut être influée par la température de l'eau.

### I.4.4 Modalités du transport solide

La connaissance des caractéristiques des matériaux d'une part et des conditions d'écoulements d'autre part permet d'appréhender les modalités de transport solide et par suite d'en faire une classification des modes de transport.

L'eau met en jeu deux types de mécanisme : le charriage « bed load » et la suspension « suspended load » qui sont les principaux types de transport solide (voir Figure I.6).

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.

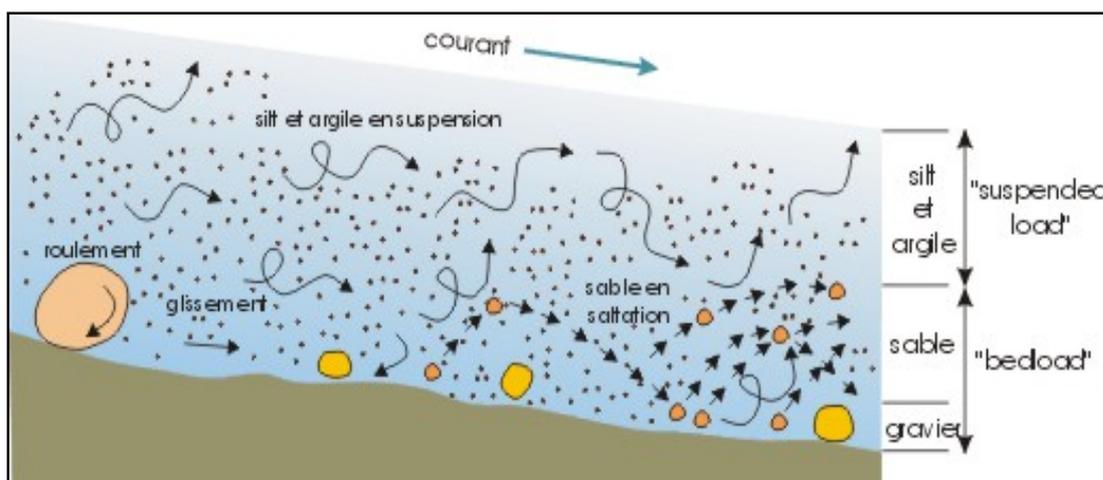


Figure (I.5) : Modes de transport solide dans un courant (Boulvain, 2004)

### I.4.4.1 Transport par charriage

Le transport par charriage est l'un des principaux types de transport solide dans un cours d'eau, il concerne les plus gros matériaux qui contribuent à la formation et l'équilibre du lit, principalement la pente. Ces éléments sont transportés par le fond par roulement, glissement ou saltation. La direction du mouvement est en gros parallèle au fond et les accélérations verticales sont faibles.

### I.4.4.2 Transport en suspension

Le transport par suspension est le deuxième type de transport solide dans un cours d'eau. Il concerne les éléments fins qui progressent dans le sens du courant au sein même du liquide. Ces éléments fins sont maintenus en suspension par la turbulence et la quantité de ces matériaux dépend essentiellement des éléments fins, qui proviennent de l'érosion du bassin, suite au ruissellement des eaux de pluie.

Au fur et à mesure que la vitesse du courant s'accroît dans le cours d'eau, l'intensité de la turbulence s'accroît également jusqu'au stade où les particules en saltation atteignent une hauteur au-dessus du fond où les forces extensionnelles fluctuantes dues à la turbulence dépassent le poids des particules. A partir de ce moment, les particules ne suivent plus une trajectoire définie, mais elles suivent des trajectoires aléatoires dans l'épaisseur du fluide.

Le critère d'apparition des phénomènes de suspension qui consiste à définir la vitesse "U" d'écoulement du liquide, par laquelle la poussée de ce dernier sur les grains de diamètre "D" permet la mise en suspension des grains quartzeux de 0,2 à 0,85 millimètres de diamètre dans des écoulements naturels de rivières est définie par la formule (I.11) de W. Kresser :

$$U^2 = 360 \cdot g \cdot D \quad (I.9)$$

$$\text{Avec : } U = C\sqrt{hJ} \text{ et } \tau = \gamma J \cdot h \text{ d'où : } \tau = 360 \left( \frac{\gamma g}{C^2} \right) D$$

T : Tension tangentielle de l'écoulement ;

U: Poids volumique du liquide ;

C : Coefficient de Chezy ;

h : Hauteur du liquide ;

J : Perte de charge régulière.

Selon Roose (1987), la présence d'élément solide en suspension dans un cours d'eau est due à la turbulence de l'écoulement. Les particules solides subissent l'action des composantes transversales des vitesses de turbulence ( $v = \bar{v} + v'$ ) qui s'opposent à la pesanteur pour maintenir les particules en suspension.

### I.4.5 Apport solide annuel

C'est l'un des problèmes de l'envasement des barrages qui présente une variabilité dans l'espace et dans le temps. L'efficacité de piégeage  $\psi$  c'est-à-dire la fraction du transport solide piégé par une retenue (%) dépend de nombreuses variables. Cependant des formules ont été proposées et prenant en considération le volume de la retenue.

Pour les sédiments 'grossiers', Levaindier (1989)

$$\frac{\psi}{1-\psi} = 77 \left[ \frac{V}{Q_a} - 0.001 \right]^{0.83} \quad (\text{I.10})$$

Pour les sédiments 'Fin'

$$\frac{\psi}{1-\psi} = 26 \left[ \frac{V}{Q_a} - 0.004 \right]^{0.84} \quad (\text{I.11})$$

$Q_a$ : Apport annuel en liquides ( $\text{m}^3$ )

$V$ : Volume de la retenue exprimée ( $\text{m}^3$ )

### I.5 Envasement des barrages « Sédimentation » :

Dans de nombreux pays du monde, le transport des sédiments dans le réseau hydrographique des bassins versants et leur dépôt dans les retenues pose aux exploitants des barrages des problèmes dont la résolution ne peut qu'être onéreuse. Non seulement la capacité utile est progressivement réduite au fur et à mesure que les sédiments se déposent dans la retenue mais encore l'enlèvement de la vase est une opération délicate et difficile, qui bien souvent exige que la retenue soit hors service, ce qui est pratiquement impossible dans les pays arides et semi-arides. Dans l'un et l'autre cas, il en résulte des dommages considérables à l'environnement et une mise en péril de l'économie de projet (Remini, 1996).

### **I.5.1 Mécanisme de la sédimentation**

L'arrivée des sédiments dans les retenues de barrages s'effectue selon deux modes (Remini, 2005):

Une fois que les eaux de crues chargées arrivent à l'entrée de la retenue, les matériaux grossiers se déposent en queue sous forme d'un delta et avancent très lentement vers l'aval ;

En revanche les particules fines, qui sont tributaires de leurs poids, se décantent dans l'ensemble de la retenue. Dans le cas où la concentration en particules fines des eaux de crues qui arrivent à la retenue est grande, les eaux chargées plongent et se propagent sous forme d'un courant de densité sans se mélanger à l'eau claire. Dans le cas où la retenue d'un barrage présente une forme de type « canal », le courant de densité arrive facilement au pied du barrage. Si la concentration des sédiments est faible et la retenue présente une forme géométrique de type « lac », le courant de densité peut se former, mais, il n'atteint pas le pied du barrage et il s'évanouit dans la partie centrale de la retenue.

Les courants de densité se forment dans plusieurs barrages algériens ; à savoir par exemple les retenues d'Ighil Emda, K'sob, Oued El Fodda, Fergoug, Erraguene, Foum El Gherza et Zardezas. La concentration en particules fines est très élevée surtout durant les premières crues d'automne. Les retenues présentent une forme géométrique de type « canal ».

### **I.5.2 Sédimentation des barrages dans le Maghreb**

L'Afrique du nord dispose actuellement (2005) de 250 barrages d'une capacité totale de stockage de 22 milliards de mètres cube. Le suivi de l'envasement des retenues a permis d'évaluer à près de 130 millions de m<sup>3</sup> la capacité perdue par envasement en moyenne chaque année. Ces capacités sont répartir comme suit :

Tableau (I.3) : Nombre, capacité de stockage et envasement annuel des barrages en Afrique du Nord (Remini, 2005)

| Pays    | N <sup>re</sup> de barrages | Capacité de stockage<br>Milliards de m <sup>3</sup> | Envasement annuel<br>Millions de m <sup>3</sup> |
|---------|-----------------------------|---|---|
| Algérie | 114                         | 5.2   | 32  |
| Maroc   | 90                          | 14  | 65  |
| Tunisie | 30                          | 3.5   | 30  |

### I.6 Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet de généralités sur le ruissellement, l'érosion, le transport solide et l'envasement des barrages. L'eau ruisselle sur la surface de la terre et engendre l'érosion du sol. Le sol détaché se déplace puis se dépose dans les retenues de barrages.

Il existe deux types de mécanisme de transport solide: le charriage « bed load » et la suspension « suspended load ».

Le transport solide par les cours d'eau dépend fortement du climat local (précipitation essentiellement), du sol, de la pente et de l'occupation de sol. Il est déterminé par les caractéristiques des particules (taille, forme, concentration, vitesse de chute et densité des particules). Ses valeurs peuvent varier considérablement d'une région à une autre et il n'existe pas de formules universelles pour sa bonne estimation.

# *Chapitre II*

*Méthodes de quantification de l'érosion et du  
transport solide*

## **I. Introduction :**

Les problèmes posés par l'érosion et le transport solide peuvent atteindre une ampleur susceptible de complètement les efforts d'aménagement des eaux et des rivières (Achite & Meddi, 2004,2005).

Devant l'importance que revêt ce problème, et fin de permettre une réponse rapide à la demande des ingénieurs pour la quantification du transport solide en suspension à l'exutoire d'un bassin versant, il ya plusieurs méthodes utilisées en va les expliquer dans ce chapitre.

## **II.2 Quantification de l'érosion**

Les nuisances causées par l'érosion ont poussé l'homme pour quantifier les pertes en sol afin de projeter les aménagements antiérosifs par le biais des formules empiriques. Chaque formule à des limites d'application, ce qui oblige l'aménageur à choisir la formule empirique qui été déterminée dans les conditions similaires au bassin versant à aménager. Parmi ces formules (modèles) on peut citer :

### **II.2.1 Formule de Henin (1950)**

Cette formule symbolise la relation existante entre l'érosion pluviotile et les facteurs susceptibles de la favoriser ou de la limiter. La quantification de l'érosion spécifique "Es" est donnée par la formule (II.1) :

$$Es = \frac{I_p IS}{KV_e} \quad (II.1)$$

Avec :

- $I_p$  : Intensité des précipitations ;
- $I$  : Pente du bassin versant ;
- Les facteurs " $I_p$ " et " $I$ " favorisent l'érosion.
- $S$  : Susceptibilité des sols ;
- $K$  : Perméabilité ;
- $V_e$  : Végétation.
- Les facteurs  $S$ ,  $K$  et  $V_e$  limitent l'érosion et en plus, les facteurs  $S$  et  $V_e$  semblent les plus difficiles à quantifier.

### **II.2.2 Modèle universelle (ELSE) de Wischemeir (1959)**

L'équation universelle des pertes en terre USLE prévoit le taux annuel moyen d'érosion à long terme sur la pente d'un champ, en fonction de la configuration des pluies, du type de sol, de la topographie, de l'assolement et des pratiques de gestion des cultures. L'USLE prévoit uniquement l'importance des pertes de terre qui résultent des érosions en nappe ou en rigoles sur une pente simple sans toutefois tenir compte des pertes de terre supplémentaires qui peuvent être attribuables aux autres formes d'érosion associées au ravinement, au vent ou au travail du sol. Ce modèle de prévision de l'érosion a été conçu pour mesurer l'influence de l'assolement et du système de gestion des cultures sur l'érosion, mais il peut aussi servir à prévoir l'érosion dans un cadre qui n'est pas agricole, notamment sur des chantiers. L'USLE peut servir à comparer les pertes de terre provenant d'un champ donné soumis à un assolement et à un système de gestion des cultures particuliers, à des taux de « pertes de terre tolérables » ou à un autre type d'assolement ou système de gestion des cultures, afin de déterminer la pertinence des mesures de conservation du sol dans la planification des activités agricoles. Cinq grands facteurs servent à calculer les pertes de terre en un endroit donné. Chaque facteur est une estimation numérique d'une composante précise qui affecte la gravité de l'érosion du sol à un endroit donné. Les valeurs d'érosion obtenues par l'application de ces facteurs peuvent varier considérablement en raison des différentes conditions météorologiques. Par conséquent, les valeurs obtenues par l'USLE représentent avec plus de précision les moyennes à long terme.

Le modèle s'écrit sous forme:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (II.2)$$

Avec:

- A : perte en sols (T/Ha.an) ;
- R : Facteur de pluie et de ruissellement (T/Ha) ;
- K: Facteur d'érodibilité du sol ;
- LS: Facteur de longueur et d'inclinaison de la pente ;
- C : Facteur de culture ou de végétation et de gestion ;
- P : Facteur de pratique de conservation.

### II.2.3 Formule de Grivilovitch (1960)

Il a défini l'érosion spécifique, comme étant proportionnel à la température, à la pluie et à un coefficient d'érosion, l'équation est donnée par l'expression suivante :

$$E_s = 3.14TP_0\sqrt{Z^3} \quad (\text{II.3})$$

Où :

- $E_s$  : Erosion spécifique dans le bassin versant ( $T/\text{km}^2 \cdot \text{an}$ ) ;
- $T$  : Coefficient de température :

$$T = \sqrt{\frac{t_0}{10}} + 0.1 \quad (\text{II.4})$$

Avec :

- $t_0$  : Température moyenne annuelle en  $^{\circ}\text{C}$ .
- $P_0$ : Pluie annuelle en (mm).
- $Z$  : Coefficient d'érosion.

Où :

$$Z = y[x \times a](\delta + \sqrt{I_{\text{moy}}}) \quad (\text{II.5})$$

Avec :

- $y$  : Valeur du coefficient de la résistance du sol dû à l'érosion. Il dépend de la roche mère, le type du sol et du climat ;
- $[x \times a]$  : Coefficient de régularisation du bassin versant, se rapportant à la protection des sols, des influences des phénomènes atmosphériques des forces érosives liées aux conditions naturelles. Il est aussi tabulé.
- $\delta$  : Equivalant numérique des processus visibles et nettement prononcés dans le bassin versant ;
- $I_{\text{moy}}$  : Indice de pente moyenne du bassin versant.

### II.2.4 Formule de L'A.N.R.H (1982)

$$T_{ss} = 26.62 I_e + 5.071 I_p + 9.77 C_t - 593.56 \quad (\text{II.6})$$

Avec :

- $T_{ss}$  : Transport solide spécifique moyen annuel (T/Km<sup>2</sup>.an)
- $I_e$ : Indice lithologique (%).
- $I_p$ : Indice des précipitations (%).
- $C_t = D_d \cdot F_1$  : Coefficient de torrentialité.

Avec :

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^N L_{i1}}{A} : \text{Densité de drainage}$$

- $L_{i1}$  : Longueur de tous les cours d'eau d'ordre « 1 » (K m).
- $F_1$  = Nombre de talweg/ surface : Fréquence des talwegs élémentaire
- Cette formule est applicable dans les conditions suivantes :  
 $I_e > 10\%$ ,  $I_p > 300\%$

### **II.2.5 Formule de Tixeront (1960)**

Il a procédé à l'homogénéisation des données pour combler les valeurs des débits solides des périodes manquantes et cela à partir de données d'observation de 32 bassins versants algériens et 09 bassins d'autres bassins versants tunisiens. En suite il a évalué les données manquantes à d'autres bassins versants.

Son modèle est basé sur les corrélations entre l'apport moyen annuel liquide et le débit solide moyen  $Q_s$  à partir des données hydrométriques des bassins en questions :

$$Q_s = aL_e^{0.15} \quad (\text{tonnes/Km}^2 \cdot \text{an}) \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$L_e$ : Lamme d'eaux ruisselée en mm

$a$  : Coefficient empirique qui varie en fonction de la Perméabilité du bassin

$a$  : 8.5 ÷ 74 pour une perméabilité élevée ;

$a$  : 75 ÷ 394 pour une perméabilité moyenne ;

$a$  : 350 ÷ 3199 pour une perméabilité moyenne à faible ;

a : 1400 ÷ 3199 pour une perméabilité faible ;

et a>3200 quand c'est imperméable.

### **II.2.6 Formule de Fournier (1960)**

$$Q_s = \frac{1}{36} \left[ \frac{P^2}{P_a} \right]^{2.65} \left[ \frac{H_{\text{moy}}^2}{S} \right]^{0.46} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$Q_s$ : Apport solide moyen inter annuel (T/Km<sup>2</sup>.an) ;

P: Pluviométrie du mois le plus arrosé (mm) ;

$H_{\text{moy}}$ : Altitude moyenne (mm) ;

$P_a$ : Pluviométrie moyenne inter annuelle (mm) ;

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

### **II.3 Mesure et quantification du transport solide**

Le transport solide dans un cours d'eau peut être schématiquement divisé en transport en solution, transport en fluide, transports en suspension et transport de fond. Entre ces composantes, le transport en suspension et celui du fond constitue la source la plus importante de production de sédiments du bassin versant.

La distinction proposée est, sans doute, schématique, étant donné qu'il est difficile en réalité, de définir rigoureusement une ligne de démarcation entre le charriage de fond et le transport en suspension. Ces deux types de transport solide devraient être considérés comme deux aspects limitant d'un même phénomène. Cette distinction, toute fois, est de grande importance dans le domaine de mesures, et devient encore plus nécessaire, du moment que les différents modes de transport impliquent l'emploi d'instrumentation et le choix de techniques de mesure différentes entre elles.

### **II.3.1 Mesure et quantification du transport solide de fond (charriage)**

#### **II.3.1.1 Mesure du transport solide de fond**

Plusieurs méthodes sont utilisées pour mesurer le débit solide par charriage. La plus directe d'entre elles est de disposer d'une trappe sur la largeur du lit de l'oued (transversalement), qui va piéger des sédiments et à l'aide d'un pompage, on connaîtra le volume charrié.

- **Détecteur hydrophoniques** : C'est un dispositif composé d'une boîte, équipée d'une plaque vibrante sur la face amont qui est orientée normalement à la courante grâce un gouvernail. A l'intérieur de cette boîte se trouve un microphone qui transmet les percussions reçues par la plaque vibrante à l'aide d'un câble.
- **traceur radio actif** : En mesurant la vitesse des traceurs radio actifs, on peut estimer la vitesse de déplacement des particules. Cette méthode permette d'obtenir des résultats relativement précis, mais elles nécessitent des prélèvements effectués pendant d'assez longues périodes.
- **Procédés Topographiques** : Par des mesures topographiques, la différence entre deux levés nous donnera la quantité des sédiments déposés au niveau de la retenue. toutefois par le moyen de cette méthode, on mesure aussi le transport en suspension.

#### **II.3.1.2 Quantification (calcul) du transport solide de fond**

Plusieurs théories ont été proposées dans le but de prévoir le comportement des sédiments transportés par un écoulement permanent à surface libre. Certaines sont basées sur le comportement mécanique des particules solides, mais d'autres sont basées sur l'analyse dimensionnelle. Dans le souci de mieux quantifier ce transport, plusieurs formules ont été proposées que certaines sont à utiliser avec précaution vu que les conditions de leur élaboration et conditions d'application sont différentes. Le premier à s'investir dans ce domaine fut Duboys (1879), Schoktlitch (1934), Moyer et Peter (1937) puis Einstein – Brown (1950) ; en 1936, c'est Shields qui établit une formule du débit liquide en fonction de la pente hydraulique, de la relation tangentielle, de la tension tangentielle critique ainsi que du diamètre médian des granulats. A l'instar d'Englund (1967) et Leviandier (1989), plusieurs auteurs

viendront, par la suite, porter un plus. Cependant ces formules n'ont pas été utilisées dans ce travail, puisque nous nous sommes intéressés qu'au traitement des couples débits liquides - débits solides.

Plusieurs recherches ont été entamées et axées sur le transport des sédiments en régime fluvial, aussi bien par voie théorique que par voie expérimentale, mais il n'existe pas encore une théorie générale du mécanisme et il est difficile de donner une définition universelle acceptable de la charge du fond. Plusieurs formules ont donc vu le jour, dont la complexité et l'étendue d'application varient d'une équation à une autre. Le choix de telle ou telle méthode est très difficile. Parmi les formules les plus utilisées on peut citer:

#### **II.3.1.2.1 Formule de Du Boys (1879)**

Du Boys (1879) a été l'un des pionniers de cette recherche sur le charriage. Ce n'est que vers 1930 que cette recherche s'intensifie avec Meyer- Peter, Einstein ... Ils ont basé leurs travaux sur l'équilibre d'une particule ou sein d'un liquide en mouvement en régime fluvial, pour un canal de forme régulière. Mais ces études ne peuvent pas s'appliquer directement à des transports de particules non homogènes pour des formes de lit d'oued non régulières.

Einstein a dressé une liste de caractéristiques qui y sont généralement associées:

1. Il y'a échange de particules, permanent et intense entre la charge du fond en mouvement et le lit.
2. La charge du fond se déplace lentement vers l'aval et le mouvement de chaque particule, individuellement, se fait à coups rapides séparés par des intervalles de repos relativement longs.
3. Le saut moyen d'une particule est à peu près indépendant des conditions d'écoulement, de l'intensité du transport solide et de la composition des sédiments.
4. Les vitesses de déplacement des différentes particules varient selon qu'elles se déplacent plus ou moins souvent.

### **II.3.1.2.1.1 Description du phénomène**

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

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

La grandeur physique explicative de ce mode de transport (charriage) est la contrainte hydrodynamique critique " $\tau_c$ ".

Donc les grains constituant l'interface solide- liquide, ayant un poids et un coefficient de frottement fini, ne peuvent être mis en mouvement par l'action du fluide que si la contrainte sur le fond " $\tau$ " dépasse la valeur de la contrainte critique " $\tau_c$ ".

Ce mouvement de granulats se traduira par un transport de fond dans le sens de l'écoulement. La contrainte sur le fond de la rivière est exprimée par :

$$\tau = \rho g R_h J \quad (II.9)$$

Avec :

- $J$  : Perte de charge régulière de l'écoulement (pente hydraulique);
- $R_h$  : Rayon hydraulique.

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

### **II.3.1.2.2 Formule de Schoktlitch (1934)**

Elle s'écrit sous la forme :

$$g_s = 2500 J^{3/2} (q - q_{cr}) \quad (\text{Kg/m/s}) \quad (II.10)$$

Et

$$q_{cr} = 0.6 \frac{D_s^{3/2}}{J^{7/6}}$$

Où :

- $q_{cr}$  : Débit de début du mouvement pour la fraction de sédiment ( $m^3/s/m$ );
- $q$  : Débit d'écoulement par unité de largeur ( $m^3/s/m$ );
- $D_s$  : Diamètre moyen des sédiments ;
- $g_s$  : débit charrié de fond par unité de largeur

On prend souvent comme moyenne  $D_s$  la moyenne géométrique des dimensions extrêmes de la fraction (obtenus à partir de la courbe granulométrique). Cette formule correspond à des sédiments allant de 0.3 à 5mm (elle est donnée dans le système MKS, et elle est appliquée seulement aux sédiments grossiers et non aux sables.

### II.3.1.2.3 Formule de Shields (1936)

Elle est donnée par l'expression :

$$g_s = \frac{10qJ(\tau - \tau_{cr})}{\left[ \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)^2 D_{50} \right]} \quad (\text{Kg/s/m}) \quad (\text{II.11})$$

Où :

$\tau_0$  : contrainte critique du début d'entraînement et donnée par la courbe de Shields.

-Cette formule a été établie à l'aide d'essais en canal de laboratoire.

-Les densités des sédiments utilisées étaient comprises entre 1.06 et 4.2, et les diamètres moyens allaient de 1.56mm à 2.5mm.

### II.3.1.2.4 Formule de Mayer Peter (1937)

Elle s'écrit :

$$g_s = \left( 2.5q^{2/3} \times J - 42.5D_{50} \right)^{3/2} \quad (\text{Kg/s/m}) \quad (\text{II.12})$$

En posant  $G=0$ , le débit liquide pour lequel on n'a pas de transport de matériaux de dimensions  $D_{50}$  est de la forme :

$$q = \left( \frac{17D}{J} \right)^{3/2} \quad (\text{l/s/m})$$

L'ajustement de cette formule correspond à des sédiments dont  $D_{50}$  varie de 3.1 à 26.6mm. La plupart des essais furent réalisés par Gilbert dans des canaux de laboratoire en l'absence d'ondulation du fond.

### II.2.1.2.5 Formule de Mayer Peter et Muler (1948)

Cette expression peut s'écrire sous la forme :

$$g_s = \frac{8\rho_s}{\left(\rho_s - \rho \sqrt{\frac{(\tau - \tau_c)^{3/2}}{\rho}}\right)} \quad (\text{Kg/s/m}) \quad (\text{II.13})$$

Cette formule a été établie en canal pour des écoulements uniformes et pour des pentes comprises entre 0.04 et 0.02. La profondeur du canal dans les expériences allait de 1 cm à 120 cm. La gamme de  $\rho_s/\rho$  couverte allait de 1.25(Charbon) à 4(Baryte).

Cette formule n'est pas utilisée lorsque la charge en suspension est importante et elle ne concerne que le transport solide par charriage.

### II.3.1.2.6 Formule d'Einstein-Brown (1950)

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$g_s = \phi \times \rho_s g f_1 \sqrt{g \left[ \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) D_s^3 \right]} \quad (\text{Kg/s/m}) \quad (\text{II.14})$$

Avec :  $\phi = \left( \frac{1}{\psi} \right)^3$  pour  $\frac{1}{\psi} \geq 0.09$

Et :  $\frac{1}{\psi} = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gD_s}$ ,  $\tau = \rho g R_h J$ ,  $f_1 = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{gD_s^3 \left[ \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \right]}} - \sqrt{\frac{36v^2}{gD_s^3 \left[ \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \right]}}$

Où :  $D_s$  est pris égal à  $D_{50}$  ou à la moyenne géométrique  $D_g$ , et  $v$  est la vitesse moyenne d'écoulement.

Cette formule dérive des données de Gilbert et Meyer Peter et Muler, avec un diamètre moyen allant de 0.3 à 7mm (Liberton, 1974).

### II.3.1.2.7 Formule d'Engelund et de Hasen (1967)

Cette expression peut s'écrire sous la forme :

$$g_s = \frac{0.05 \rho_s g v^2 D_{50}}{g \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)} \times \frac{\tau_{cr}}{\left[ (\rho_s - \rho) g D_{50} \right]^{3/2}} \quad (\text{Kg/s/m}) \quad (\text{II.15})$$

Cette formule est employée pour :

$$\frac{\tau_{cr}}{\left[ (\rho_s - \rho) g D_{50} \right]} \geq 0.15 \quad \text{et } D_{50} > 2\text{mm en nature.}$$

Elle est obtenue par des expériences en canal (2.4m de largeur et 50m de longueur) sur des sédiments de diamètre variant de 0.19 à 0.93mm.

### II.3.1.2.8 Formule de Yalin (1963-1970)

Elle correspond à un modèle de saltation du grain, elle s'écrit :

$$g_s = u^* D_s \times 0.635 \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \left[ 1 - \frac{\log(1-a)}{a} \right] \quad (\text{Kg/s/m}) \quad (\text{II.16})$$

Où : 
$$a = 2.45 \left( \frac{\rho_s}{\rho} \right)^{0.4} \sqrt{\frac{\tau_c}{g \gamma_s D}}$$

Et : 
$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$$
 : est la vitesse de cisaillement due aux granulats.

Cette formule donne des résultats excellents pour des granulats compris entre 1.72 et 26.6mm.

## II.3.2 Mesure et quantification du transport solide en suspension

### II.3.2.1 Mesure du transport solide en suspension

#### II.3.2.1.1 Méthode rapprochée

Elle consiste à effectuer des prélèvements en bordure d'un cours d'eau. Ainsi, dans un laboratoire, nous mesurerons la concentration «C » de l'échantillon prélevé par filtration, le passage à l'étuve et enfin la pesée. La relation du débit solide ( $Q_s$ ) est exprimée par la formule (II.17) :

$$Q_s = C \cdot Q_l \quad (\text{kg/ s}). \quad (\text{II.17})$$

**Remarque :**

La répartition de la charge en suspension, dans la section transversale d'une rivière dépend de la dimension du matériau. Les particules dont le diamètre est inférieur à 60 microns montrent en général une répartition homogène selon la profondeur et la largeur (suspension uniforme). Il n'est pas de même pour les éléments grossiers qui se présentent selon un gradient de concentration en fonction de la profondeur (suspension graduée).

**II.3.2.1.2 Méthode par exploration de champs de vitesse**

La méthode consiste à explorer à travers une section droite d'un cours d'eau, le champ de concentration de matières en suspension et de déterminer le débit solide par intégration. Nous prélevons des échantillons aux différents points de la section transversale et en différentes profondeurs, par la suite on détermine le champ de concentration et le champ de vitesse (Figure I.1).

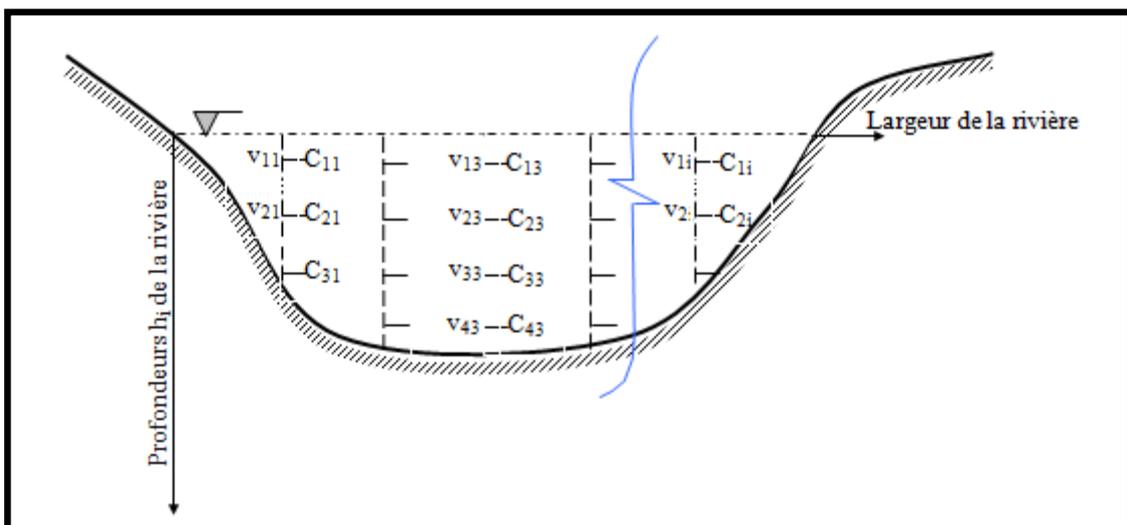


Figure (II.1): Section de mesure du transport solide

Le dépouillement d'un jaugeage de débit solide se fait de la même manière que celui de débit liquide. Un certain nombre de points est réparti sur plusieurs verticales, pour lesquelles on dispose d'une mesure de vitesse (v) et d'une mesure de concentration des matériaux en suspension(C).

Pour une verticale i nous reporterons C.v en fonction de la profondeur  $h_i$ . Nous traçons les épures de vitesse de chaque verticale (Figure II.2).

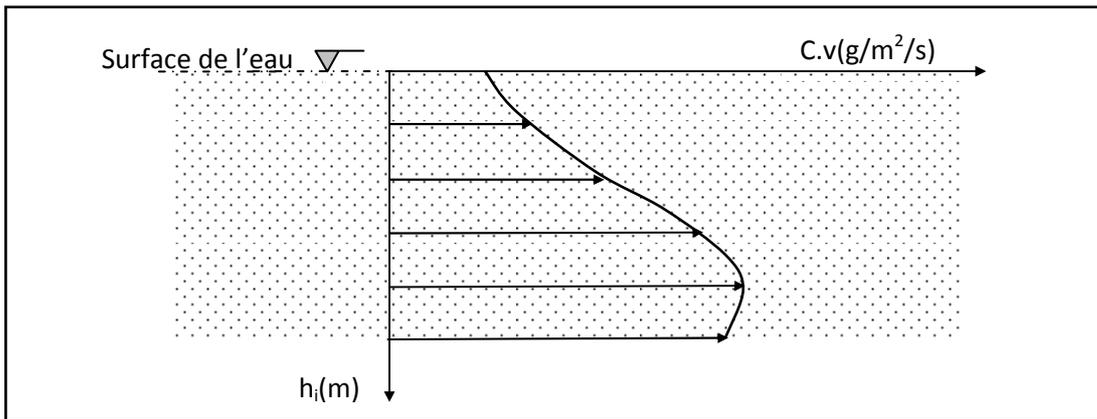


Figure (II.2): Epure des débits solides élémentaires

D'où :

$$q_s = \int_0^{h_i} Cvdh \quad (II.18)$$

Avec :

- C: concentration des matériaux en suspension au niveau d'un point de mesure en (g/l, g/m<sup>3</sup> ou Kg/m<sup>3</sup>) ;
- v : vitesse au niveau d'un point de mesure en (m/s) ;
- h<sub>i</sub> : profondeur de la vertical i en (m).

Pour avoir le débit solide au niveau de la section de l'oued (section de mesure), on intègre le débit solide unitaire sur toute la largeur de l'oued (largeur de la section de mesure), qui sera donnée par la formule (II.19) :

$$Q_s = \int_0^L q_s \cdot dl = \int_0^L \int_0^{h_i} Cvdh \cdot dl \quad (II.19)$$

Avec :

- L<sub>i</sub> : largeur totale de la section de mesure ;
- Q<sub>s</sub> : débit solide à travers toute la section exprimée en Kg/s ou bien en Tonne /an.

Il est à noter l'existence d'autre méthode de mesure de concentration, telle que la mesure directe de la concentration en utilisant l'absorption et la diffusion des rayonnements par les matières en suspension et aussi la méthode de mesure de concentration par prélèvement (Guillot, 1987).

La vitesse du transport des matériaux grossiers est liée au débit, mais elle tend à varier considérablement dans le temps et selon la section du cours d'eau choisie.

Puisque les matériaux sont transportés par des écoulements turbulents et puisque les tailles des sédiments peuvent s'étendre des argiles aux rochers, l'échantillonnage des matériaux et les mesures de débit sont sujettes à l'erreur de la variabilité temporelle. L'erreur est composée par la variabilité spatiale dans la section transversale de l'écoulement. Les fluctuations rapides du débit liquide et de la concentration ont été résolues par la mesure et le prélèvement fréquents en vue d'améliorer la précision des enregistrements des débits solides.

### **II.3.2.1.3 Appareils de mesure de la concentration**

Divers dispositifs de mesure de la concentration des sédiments en suspension ont été élaborés par différents laboratoires hydrauliques. Ces différents appareils sont surtout mis à l'épreuve sur terrain. Les modèles d'échantillonneurs conçus répondent aux recommandations de l'organisation mondiale de la météorologie en 1981.

En réponse à ces exigences nous donnerons à titre indicatif les différentes méthodes et appareils utilisés dans le monde :

- Les échantillonneurs instantanés
- Les échantillonneurs à intégration dans le temps
- Les échantillonneurs à système de pompage
- Turbidimètres optiques
- Jauges nucléaires
- Télédétection

La plupart des appareils fonctionnent manuellement. Le fait que les appareils de prélèvement de matériaux en suspension ne récolent qu'un petit échantillon constitue un inconvénient. La plupart des méthodes traditionnelles de prélèvement et

de calcul de la concentration exigent une grande quantité de matériaux, alors que les appareils électroniques récents n'ont besoin que d'un petit échantillon.

Des appareils d'enregistrement de la concentration des matériaux fins en continu ou à des intervalles de temps très rapprochés ont été développés. D'autres instruments d'enregistrement ont été élaborés, dont les principes sont basés sur l'atténuation ou la diffraction de la lumière, le rayonnement nucléaire, ou le bruit (Guy, 1966). Malheureusement, il s'est avéré qu'aucun de ces appareils n'est adaptable à toutes les situations (Guy, 1978). Cependant certains de ces instruments peuvent être très performants pour des applications spécifiques.

### **II.3.2.2 Quantification du transport solide en suspension**

#### **II.3.2.2.1 Détermination de la concentration des matériaux en suspension par des formules**

##### **II.3.2.2.1.1 Formule d'Obrien (1933)**

Cette formule s'appuie sur le fait que le taux de concentration dépend directement de la côte  $Z$  des points prélèvement

$$\frac{C}{C_0} = \left[ \frac{h-Z}{Z} \times \frac{Z_0}{h-Z_0} \right]^{KU^*} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

- $C$  : Taux de concentration volumique à la côte  $Z$  (g/l) ;
- $C_0$  : Taux de concentration volumique à la côte  $Z_0$  (g/l) ;
- $H$  : Hauteur du liquide (m) ;
- $W$  : Vitesse de décantation des grains (m/s) ;
- $K$  : Constante universelle de Karman ;
- $U^*$  : Vitesse moyenne de l'écoulement (m/s).

$$U^* = (\tau g / \delta)^{1/2}$$

Avec :

- $\tau$  : tension de frottement ( $\text{Kg/m}^2$ ) ;
- $\delta$  : poids spécifique de l'eau ;

Cependant cette formule présente des limites d'application, elle est appliquée pour des écoulements rigoureusement uniformes et ne comptant aucune sorte de fluctuation plus au moins aléatoire de la vitesse.

### **II.3.2.2.1.2 Formule d'Abalianz (1958)**

$$\bar{C} = 26 \cdot \frac{\bar{U}}{h^{3/4} \cdot W} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

- $\bar{C}$  : Valeur moyenne du taux de concentration des matériaux (g/l) ;
- $\bar{U}$  : Vitesse moyenne de l'écoulement (m/s) ;
- $W$  : Vitesse de décantation des grains dans l'eau (m/s) ;
- $h$  : Hauteur du liquide(m).

### **II.3.2.2.2 Estimation du transport solide en suspension**

L'estimation de la charge annuelle de transport solide d'un cours d'eau peut être assez simple, s'il existe des enregistrements continus à la fois du débit liquide et de la concentration des sédiments en suspension. Cependant, dans la plupart des cas, l'enregistrement continu de la concentration n'est pas disponible, et des méthodes indirectes doivent être utilisées pour faire l'estimation. Il y a deux approches d'estimation, l'une est le produit du débit annuel avec la concentration moyenne, l'autre doit employer la méthode de la courbe de transport solide (Ferguson, 1987 ; Gordova et Gonzalez, 1997). La première approche a montré qu'elle conduisait à des erreurs sérieuses lorsque les conditions d'écoulement varient dans une large proportion et l'échantillonnage non intensif. La deuxième approche est par conséquent la plus largement utilisée.

La concentration des sédiments en suspension  $C$  et le débit liquide évoluent en général suivant un modèle de puissance (Wood, 1977 ; Walling et Webb, 1981 ; Etchanchu et Brobst, 1986 ; Benkhaled et Remini, 2003).

$$C = aQ^{b-1} \quad (\text{II.22})$$

lacunes d'observation et par suite, l'évaluation des apports solides à différents pas de

temps. Pour l'amélioration des paramètres statistiques des séries courtes de débits solides par corrélation avec les séries longues de débits et pour l'analyse du phénomène du transport solide.

La relation empirique (II.22), communément appelée courbe du transport solide (Campbell et al. 1940 ; Crawford, 1991) peut s'écrire sous une autre forme en liant le débit solide au débit liquide.

$$Q_s = aQ^b \quad (\text{II.23})$$

Où  $a$  et  $b$  sont des paramètres propres au bassin versant considéré, généralement estimés par régression linéaire.

Bien que l'exactitude de cette approche ait été remise en cause (Walling, 1977), son application semble être appropriée pour plusieurs objectifs (Campbell et Bauder, 1940 ; Miller, 1951 ; Colby, 1956 ; Glysson, 1987 ; Crawford, 1991). Cette relation a une longue histoire du développement et d'utilisation due à sa facilité relative d'application et de flexibilité.

La relation (II.23) a été formulée de différentes manières. Bien que simple en théorie, elle pose en réalité de nombreux problèmes au niveau de l'évaluation critique des données d'entrée et l'appréciation de ses limites d'application. Par exemple et concernant les débits liquides, il peut s'agir soit des données instantanées, soit des débits moyens journaliers, mais beaucoup de chercheurs ont utilisé des débits moyens mensuels ou annuels aussi bien pour le débit liquide que pour la charge solide (White, 1986). Une courbe de transport solide élaborée à partir de données instantanées est théoriquement inapplicable au calcul direct des débits solides à partir de débits journaliers sauf pour les journées où les débits sont restés constants.

Fergusson (1986) a montré que cette équation sous estimait le débit solide jusqu'à 50% et a proposé un facteur correctif ( $e^{-2.65s^2}$ ) basé sur des considérations statistiques, où  $s^2$  représente l'erreur quadratique moyenne de la régression.

Plusieurs auteurs (Walling et Webb, 1988 ; Asselman, 2000) en comparant les données observées et prévues de concentration dans le nuage de points autour de la droite de régression aussi bien sur l'échelle arithmétique que sur l'échelle logarithmique ont trouvé que les courbes de transport solide peuvent sous estimer

substantiellement les concentrations réelles. Plusieurs méthodes ont été appliquées pour compenser cette estimation arbitraire (Cohn, 1995). Ces méthodes incluent la séparation du nuage de points en groupes de données saisonniers par exemple sur le tracé Log-Log, le développement de divers facteurs de correction, ou l'emploi d'équations de régression non linéaire (Duan, 1983 ; Ferguson, 1986 ; Walling et Webb, 1988 ; De Vries et Klavers, 1994 ; Phillips et al, 1999 ; Asselman, 2000).

Dans le cas de la division du nuage de points en plusieurs groupes de points, chaque groupe peut être alors représenté par une relation séparée qui a généralement un coefficient de corrélation plus élevée que la courbe de transport solide initiale calculée sur l'ensemble des points. La courbe d'estimation est simple, et en incluant des variables additionnelles de régression (Cohn et al, 1992), peut être facilement modifiée pour expliquer la variabilité associée à la dépendance non linéaire de l'écoulement.

### **II.3.2.2.3 Concept de charge**

Le concept de base de la charge solide d'un cours d'eau est trompeusement simple. La charge solide est la masse ou le poids de sédiments qui passe une section transversale du cours d'eau durant une période de temps donnée. Les charges sont exprimées en unités de masse, mais l'intervalle de temps durant lequel la charge se produit est toujours implicite et devrait être claire dans le contexte. La charge pour la période considérée dans le graphique de l'exemple hypothétique montré sur la figure (II.3) est égale à la surface du secteur sous la courbe.

Les flux pendant les événements d'averses et de fusion nivale sont souvent de plusieurs ordres de grandeur plus grands que ceux pendant les périodes de basses eaux. Il n'est pas rare de trouver que 80 à 90% ou plus de la charge solide annuelle est atteinte durant les 10% du temps, avec des flux les plus élevés (Richard, 2001).

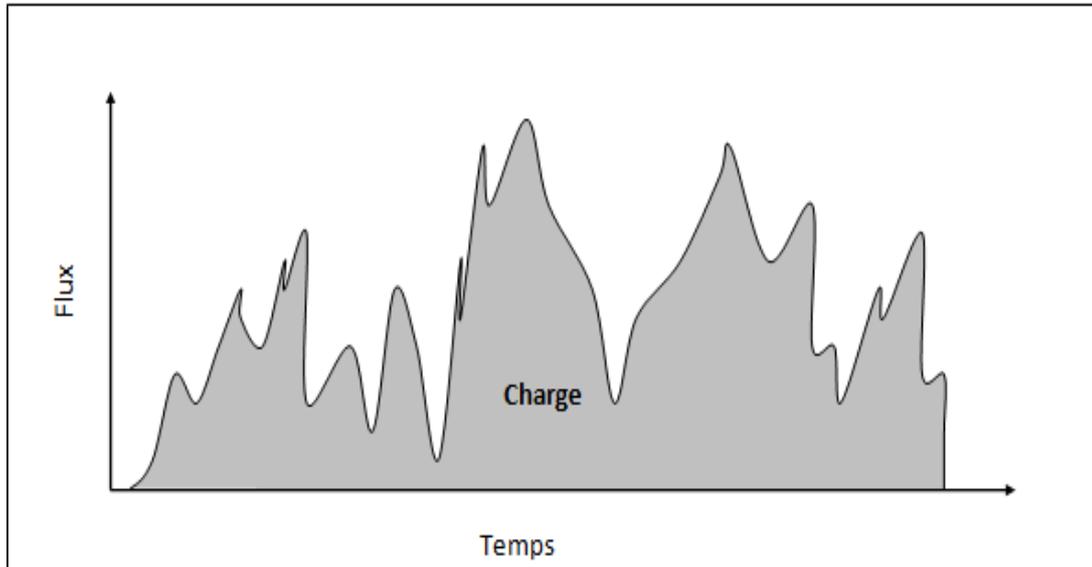


Figure (II.3) : Graphique hypothétique du flux dans le temps

Plusieurs aspects du problème de l'estimation de la charge solide en suspension sont liés au type de résolution temporelle des données. De ce fait, la qualité de l'estimation de la charge diminue à mesure que la résolution du temps des données devient plus faible. La variabilité des données est généralement beaucoup plus grande pour des résolutions fortes (journalières ou instantanées). Les échelles faibles (mensuelles et saisonnières) peuvent constituer des contributions à l'erreur de l'estimation de la charge de sédiments. Les séries mensuelles sous-estimeraient les charges de sédiments dans le cas où elles n'incluent aucune observation sur les averses et précisément les pics.

Beaucoup d'échantillons seront nécessaires pour obtenir de manière précise et fiable la charge solide réelle. La fréquence des prélèvements a donc créé le problème de base de l'estimation de la charge solide en suspension.

#### **II.3.2.2.4 Méthodes d'estimation des charges solides**

Plusieurs approches ont été utilisées pour calculer des charges solides à partir des données observées de concentration et de débit. Certaines sont plus précises que d'autres ; certaines sont seulement appropriées sous des conditions spéciales.

#### **II.2.2.4.1 Méthode numérique**

L'approche la plus simple est l'intégration directe. La charge totale est donnée

par :

$$\text{Charge} = \sum_{i=1}^n C_i Q_i t_i \quad (\text{II.24})$$

Où :

- $C_i$  : Concentration du n<sup>ième</sup> échantillon ;
- $Q_i$  : Débit correspondant ;
- $t_i$  : Intervalle de temps représenté par le n<sup>ième</sup> échantillon.

L'intégration numérique est seulement satisfaisante si la fréquence de prélèvement est élevée, souvent de l'ordre de 100 échantillons par an ou plus, telle que la majorité des événements d'écoulements sont bel et bien prélevés. Roman-mas et al. (1994) ont suggéré qu'une fréquence suffisante de prélèvement pour obtenir 20 échantillons pour un hydrogramme typique de ruissellement ait été nécessaire afin d'obtenir des estimations de charge avec une erreur inférieure à 5%. Yaksich et Verhoff (1983) suggèrent 12 échantillons sur l'hydrogramme.

#### **II.3.2.4.2 Méthode de la moyenne**

Elle consiste à multiplier la concentration moyenne pour une certaine période par le débit moyen journalier pour chaque jour dans la période de temps afin d'obtenir une succession de charges journalières estimées. Une autre approche consiste à multiplier la concentration observée moyenne par le débit moyen basé sur tous les jours de l'année pour obtenir une charge moyenne journalière, qui est alors convertie en charge totale. D'autres variantes sont la concentration moyenne mensuelle multipliée par le débit moyen pour le mois considéré, la concentration moyenne saisonnière multiplié par le débit moyen saisonnier....etc. plusieurs de ces approches sont décrites et évaluées par Dolan et al. (1981) et Walling et Webb (1981). D'une façon générale, cette approche tend à être biaisée si la concentration est corrélée avec le débit : la charge calculée est trop petite si la concentration est positive et trop élevée si la corrélation est négative. Cependant, quelques techniques de cette approche ont montré la précision relativement élevée dans quelques études, et pourraient être utiles dans les situations spéciales, par exemple si le but est de savoir la variation de la charge qui est parfois plus important que la connaissance de la grandeur réelle de la charge.

#### **II.3.2.2.4.3 Méthode d'intervalle de débit**

Cette technique (Yaksich et Verhoff, 1983) est semi graphique. Elle commence par le report sur un graphique des flux instantanés observés dans l'année en fonction des débits instantanés. Le graphique est divisé en plusieurs intervalles de taille uniforme couvrant la gamme des débits moyens journaliers pour tous les jours de l'année. Pour chaque intervalle, le flux moyen est calculé et le nombre de jours avec des débits moyens journaliers dans l'intervalle est déterminé. La charge d'intervalle est calculée comme produit du flux, du nombre de jours dans l'intervalle, et du facteur approprié de conversion d'unités. La charge annuelle est calculée en additionnant les charges d'intervalle.

#### **II.3.2.2.4.4 Méthode de régression**

Elle développe une relation entre la concentration et le débit basé sur les échantillons prélevés, puis emploie la relation pour estimer une concentration représentative durant les jours où il n'y a pas eu de prélèvements. L'estimation s'effectue en utilisant le débit moyen journalier comme entrée dans l'équation de régression. Des relations multivariées de régression ont été développées dans certaines études. La relation est parfois développée en utilisant le flux et le débit plutôt que la concentration et le débit, mais les résultats sont identiques (White, 1986).

La plupart des estimateurs de régression sont basés sur un modèle de régression linéaire, bien que ceci soit souvent appliqué après transformation. La transformation logarithmique est fréquemment employée, parce que beaucoup de paramètres environnementaux ont approximativement une distribution Log Normal. Les relations de régression entre la concentration ou le flux et le débit après transformation log s'appellent souvent les courbes d'étalonnage ou courbes de transport solide dans la littérature spécifique.

Un problème généralement rencontré avec les estimateurs de régression est ce qui est communément appelé la re-transformation de la déviation systématique ou biais, qui peut mener à de grandes erreurs dans les charges estimées. Fergusson (1986, 1987) et Koch et Smile (1986) ont discuté de ce problème et ont développé des solutions à ce sujet. Des chercheurs de l'U.S Geological Survey ont développé les techniques de re-transformation qui sont en grande partie indépendantes du biais.

#### **II.3.2.2.4.5 Echantillonnage proportionnel au débit**

C'est une approche totalement différente, mécanique plutôt que mathématique, qui suppose essentiellement qu'on peut obtenir un ou plusieurs échantillons couvrant la période entière considérée. Chaque échantillon représentant un débit connu avec une concentration proportionnelle à la charge qui a transité par le point de prélèvement pendant le remplissage de l'échantillon. Si cette hypothèse est rencontrée, la charge pour chaque échantillon est facilement calculée comme étant le débit fois la concentration, et la charge totale pendant l'année est obtenue par addition. En principe, c'est une méthode très efficace et rentable pour obtenir une charge totale.

#### **II.3.2.2.5 Performances des méthodes**

Certaines méthodes d'estimation des charges solides en suspension fournissent une mesure de l'incertitude de l'estimation de charge. En outre, les évaluations d'incertitude de différentes méthodes de calcul de charge ne peuvent pas être directement comparées, parce qu'elles reflètent différents genres d'erreurs. Si on s'intéresse à la charge annuelle pendant cette année, on ne considérera pas ceci comme étant une source d'erreur, mais plutôt une partie de la variation normale du système que nous étudions. Il est préférable de confiner la notion d'erreur à la différence entre les charges moyennes journalières estimées et les charges réelles moyennes journalières (inconnues), une différence qui est due seulement au prélèvement et à l'erreur analytique.

Pour ces raisons, les mesures d'incertitude ne fournissent pas le moyen fiable de choisir entre les méthodes. En conséquence, l'évaluation des méthodes d'estimation de charge doit se fonder sur des études comparatives dans lesquelles plusieurs méthodes sont employées pour calculer les charges à partir des mêmes données, et les résultats sont comparés à la charge vraie qui est indépendamment connue.

Il y a des avantages et des inconvénients à chaque méthode, et plusieurs études des approches d'estimation des charges ont été publiées (Dickenson, 1981 ; Dolan et al. 1981 ; Richards et Holloway, 1987 ; Walling, 1978 ; Walling et Webb, 1988 ; Young et al. 1988 ; Preston et al. 1989, 1992 ; Burn, 1990 ; Kao, 2001 ; Horowitz, 2002).

Plusieurs points de consensus émergent de ces études :

- La précision et l'exactitude augmentent avec l'augmentation de la fréquence d'échantillonnage.
- Les méthodes de moyenne sont généralement décentrées, et le biais augmente à mesure que la taille de la moyenne augmente. Par exemple, une charge mensuelle peut être calculée en multipliant la concentration moyenne pour le mois par le débit du mois, et une charge saisonnière peut être pareillement dérivée en utilisant le débit saisonnier et la concentration moyenne. En général, la charge annuelle qui est la somme des quatre charges saisonnières sera plus décentrée que la charge annuelle qui est la somme des 12 charges mensuelles.
- Dans la plupart des études, l'approche de régression est plus performante que l'approche par moyenne.
- Les approches de régression sont performantes si la relation entre le débit et la concentration est suffisamment bien définie, linéaire dans toute la gamme des débits, et constante tout au long de l'année. Cependant, l'approche de régression peut mener à de grandes erreurs dans les charges estimées si les données disponibles contiennent les observations peu communes qui tombent loin de la tendance du reste de données, particulièrement si ceux-ci sont associés aux débits élevés.

Nous présentons ci-après les détails de la méthode de régression qui est la plus utilisée et qui est aussi recommandées à l'usage des hydrologues et statisticiens.

### **II.3.2.2.6 Méthode de régression**

#### **II.3.2.2.6.1 Description générale**

La relation de régression est développée entre la concentration et le débit, basée sur les jours où des échantillons sont obtenus. Cette relation peut impliquer la régression simple ou multiple, et la concentration ou le flux peuvent être employés comme variable dépendante. Dans la plupart des applications, la concentration (ou le flux) et le débit sont transformés en Log pour créer un ensemble de données mieux approprié à l'analyse de régression. La relation de régression peut être basée entièrement sur les échantillons de l'année en cours ou sur des échantillons recueillis

durant les années précédentes ou les deux à la fois. Le temps peut être employé comme variable pour expliquer des tendances linéaires possibles.

Une fois que le rapport de régression est établi, il est employé pour estimer des concentrations pour chaque jour où un échantillon n'a pas été pris. La charge totale est calculée par addition des charges journalières, obtenue en multipliant la concentration mesurée ou estimée par le débit.

#### **II.3.2.2.6.2 Hypothèses**

Les approches de régression supposent seulement qu'il y a une relation linéaire entre une variable dépendante, concentration ou flux, et une ou plusieurs variables indépendantes, typiquement le débit. La concentration, le flux, et le débit sont souvent transformés en log, en utilisant les logarithmes népérien ou décimal, pour créer une relation plus linéaire et/ou pour réduire l'influence des concentrations les plus élevées.

Quand les transformations Log sont appliquées, la transformation inverse (élévation à une puissance) est exigée pour obtenir des concentrations estimées, puisque le modèle de régression rapporte des estimations de concentration logarithmique, et non la concentration elle-même. Cette transformation crée une déviation systématique (biais) dans les charges, et d'autres suppositions doivent être faites (et validées) au sujet de la distribution des résidus des concentrations estimées afin de corriger la déviation.

#### **II.3.2.2.6.3 Méthodologie d'échantillonnage**

Le but de l'échantillonnage est de caractériser minutieusement la relation entre le débit et la concentration (ou le flux). Cependant, il est difficile de traduire ceci en rapport statistique qui peut être employé pour calculer le nombre d'échantillons exigés. Cohn et al. (1992) ont utilisé 75 échantillons pour établir leurs modèles de régression. Ils recommandent que les échantillons soient prélevés sur une période de deux ans, environ la moitié de ces échantillons rassemblés pendant les périodes des hautes eaux, et l'autre moitié sélectionnée au hasard ou en utilisant un intervalle fixe entre les échantillons.

Puisque le but de l'échantillonnage est de caractériser de manière approfondie la relation entre le débit et la concentration ou le flux, le programme devrait être conçu pour obtenir des échantillons sur la gamme entière des débits prévus. Si les différences saisonnières dans le rapport de débit / concentration sont possibles, la gamme entière des débits devrait être échantillonnée dans chaque saison.

La relation concentration - débit dans un événement averse - crue est d'habitude beaucoup plus homogène que celle dans différents événements averses – crues. Pour cette raison il est important d'éviter d'échantillonner une ou deux averses dans le détail, plutôt que de prélever beaucoup d'averses avec peu d'échantillons par averse.

L'estimation de la charge solide en suspension par la méthode de régression a été toujours faite sans calculs stratifiés. Cependant, Walling et Webb (1981) ont démontré qu'on pouvait réduire le biais et augmenter la précision, en augmentant le nombre d'échantillons en période de hautes eaux et en calculant les relations de régression séparément pour l'hiver et l'été, les hautes eaux et les basses eaux.

#### **II.3.2.2.6.4 Méthode d'estimation de la charge**

Le nombre désiré d'observations de concentration instantanée et de débit est en fait réparti sur le régime d'écoulement. Ces données sont employées pour établir une relation de régression de la forme :

$$C = aQ + b \quad (\text{II.25})$$

Où :

C : est la concentration,

Q : est le débit, a est la pente de la droite, et b est une constante. Les paramètres a et b sont déterminé par la méthode des moindres carrés. Une fois que la relation de régression est calculée, elle est employée pour estimer des concentrations pour chaque jour de l'année, en substituant le débit moyen journalier dans l'équation :

En résolvant la concentration estimée on a :

$$\hat{C} = a\bar{Q} + b \quad (\text{II.26})$$

Ici le  $\hat{C}$  est employé au lieu de C pour rappeler que la concentration est une estimation, et  $\bar{Q}$  est utilisé au lieu de Q pour désigner le débit moyen journalier et non le débit instantané.

En conclusion, la charge annuelle est calculée par addition des flux journaliers basés sur les charges solides journalières estimées et les débits moyens journaliers, appliquant un facteur de conversion (k) pour le changement des unités :

$$Charge = k \sum_{i=1}^{365} \hat{C}_i \bar{Q}_i \quad (II.27)$$

### **II.3.2.2.7 Méthode de correction des courbes de transport solide en suspension**

Les hydrologues et les géomorphologues ne semblent actuellement plus ignorer le biais, et les moyens de le corriger, quoiqu'il soit bien connu aux statisticiens depuis long temps. L'existence de biais signifie que beaucoup de résultats édités pour des charges de cours d'eau sont sous-estimés et nécessitent la correction. Le degré de la sous-estimation varie d'un cours d'eau à un autre et pour différents types de charge dans le même cours d'eau.

Le biais statistique intervient lors de la retransformation de l'équation (II.23) transformée en Log en équation (II.23), même si une loi de puissance telle que (II.23) est la forme fonctionnelle correcte pour la relation entre  $Q_s$  et Q. La régression Log-Log assure que la moyenne résiduelle de l'échantillon est zéro. Si la relation de  $\text{Log}Q_s$ - $\text{Log}Q$  est réellement linéaire avec une dispersion aléatoire, la valeur prévue de  $\text{Log}Q_s$  est la moyenne arithmétique de la distribution conditionnelle de  $\text{Log}Q_s$  à  $Q=Q_i$ . Cependant, la valeur prévue de  $Q_s$  donnée par la relation (II.23), est la moyenne géométrique, non arithmétique, de la distribution conditionnelle de  $Q_s$  à  $Q=Q_i$ . La moyenne géométrique est nécessairement plus petite que la moyenne arithmétique.

Les estimations de débits solides en suspension sont souvent dérivées des données périodiques en utilisant des modèles de régression. Plusieurs des modèles de régression utilisés impliquent la transformation dans l'espace logarithmique mais les résultats finaux sont souvent exigés d'être dans les unités originales. Donc, la re-transformation des données de débit solide est nécessaire. Cette re-transformation implique un problème de correction biaisé qui a suscité beaucoup d'attention.

La comparaison des estimations des courbes de transport solide et des mesures directes de charge solide en suspension montre que les méthodes des courbes de transport solide peuvent être décentrées et fortement variables (Golby, 1956 ; Walling, 1977). Dans les études avec données de terrain, ces biais ont parfois excédé 50% (Walling et al. 1981 ; Fenn et al. 1985). En outre, les estimations de courbes de transport solide dépendent du protocole de prélèvement (Bennett et Sabol, 1973 ; Beschta, 1978 ; Thomas, 1988). Des méthodes pour corriger la déviation systématique ou biais dans les données logarithmiquement transformées ont été suggérées comme solution (Ferguson, 1986,1987). Cependant, bien que la correction biaisée soit avantageuse, elle ne rectifie pas les problèmes dans les estimations obtenues à partir des modèles mal ajustés (Thomas, 1985,1988 ; Koch et Smillie, 1986 ; Walling et Webb, 1988). Cohn et al. (1992) précisent que certaines estimations corrigées semblent ne pas être sérieusement affectées par le manque d'ajustement, mais ceci a été démontré pour un échantillon de données de courbe de transport solide plutôt qu'un hydrogramme complet. La concentration des sédiments en suspension dépend en réalité de facteurs autres que le débit mesuré simultanément (Rieger et Olive, 1984), et les courbes de transport solide reflètent rarement la dynamique du bassin versant à donner des estimations fiables d'apports solides.

Trois modèles pour compenser ce biais sont en général utilisés. L'estimateur de Quasi-Maximum de vraisemblance (QMV), l'estimateur non biaisé de variance minimum (MVUE), et l'estimateur de Duan. Deux de ces méthodes sont recommandés par Cohn et Gilroy (1991). Ces deux méthodes sont l'estimateur non biaisé de variance minimum (MVUE) quand la distribution des erreurs est supposée normale et l'estimateur de Duan pour les situations dans lesquelles la distribution non normale des erreurs est identifiée.

#### **II.3.2.2.7.1 Estimateur du Quasi-Maximum de Vraisemblance (QMV)**

C'est une méthode paramétrique qui fournit une évaluation biaisée. Il est à noter que le calcul pour la correction biaisée est effectué sur chaque valeur journalière. Par conséquent, cette méthode est particulièrement utile s'il y a une grande variance dans les débits journaliers, si l'intervalle de prévision change

considérablement sur la gamme des données ou si plusieurs des prévisions sont faites vers les extrémités de la relation.

Identifiant le biais de la méthode de courbe de transport solide, Ferguson (1986) recommande :

$$\hat{Q}_{SMV} = \hat{Q}_S \exp\left(\frac{s^2}{2}\right) \quad (\text{II.28})$$

Où :

- $\hat{Q}_{SMV}$  : est le débit solide estimé à l'aide de l'estimateur Quasi-Maximum de Vraisemblance (QMV) ;
- $\hat{Q}_S$  : est le débit solide estimé à partir de la courbe d'estimation ;
- $s^2$  : est l'erreur quadratique moyenne de la régression.

Bien qu'utilisée intensivement, cette méthode n'est pas généralement recommandée parce que les résultats ne sont pas des évaluations biaisées et la méthode sur évalue souvent les corrections pour le biais de haut en bas de la courbe d'estimation (Cohn et Gilroy, 1991). Cette méthode de QMV peut convenir si les débits prévus sont dans l'intervalle d'une série de données assez calibrage et l'erreur quadratique moyenne de l'échantillon ( $s^2$ ) est un estimateur satisfaisant pour l'erreur quadratique moyenne de la population.

### **II.3.2.2.7.2 Estimateur de Duan**

Thomas (1985), Koch et Smille (1986) recommandent l'estimation de Duan (1983), une fonction non paramétrique de re-transformation appropriée pour des distributions non normales des erreurs. L'estimateur de Duan est une méthode non paramétrique qui est basée sur l'équation :

$$\hat{Q}_{S_{Duan}} = \hat{Q}_S \frac{\sum_{i=1}^N \exp(\varepsilon_i)}{N} \quad (\text{II.29})$$

Où :

$\hat{Q}_{S_{Duan}}$  : Débit (charge) solide estimé en utilisant l'estimateur de Duan ;

$\varepsilon_i$  : Résidus de la régression aux moindres carrés. Ce sont les différences dans les logarithmes normaux du débit solide mesuré et calculé.

L'estimateur de Duan est exprimé par :

$$C'est\ l'équ\ \beta = \frac{\sum_{i=1}^N \exp(\varepsilon_i)}{N} \quad (II.30)$$

C'est une méthode qui exige seulement l'hypothèse que les résidus sont indépendants et identiquement distribués mais ils peuvent suivre n'importe quelle distribution. Quand les résidus sont normalement distribués, elle est aussi performante que MVUE (Cohn et de Gilroy, 1991). En outre, cet estimateur peut être généralisé aux transformations autres que le logarithme. Par exemple, si la fonction de transformation est la racine carrée ou l'inverse, alors, la fonction utilisée est l'inverse de la transformation choisie.

### **II.3.2.2.7.3 Estimateur non biaisé de variance minimum (MVUE) appelé aussi estimateur Bradu-mundlak**

Dans cette méthode, la correction biaisée est appliquée à chaque débit journalier pour la période considérée dans les calculs utilisant l'expression suivante :

$$E \hat{Q}_{S_{MVUE}} = \hat{Q}_{S(t)} g_m \quad (II.31)$$

$$g_m = \left\{ \frac{m+1}{2m} [(1-V)s^2] \right\} \quad (II.32)$$

Où :

1.  $\hat{Q}_{S_{MVUE}}$  : Débit solide estimé pour le jour à l'aide de l'estimateur non biaisé de variance minimum ;
2.  $Q_{S(t)}$  : Charge solide estimé à partir de la courbe de transport pour chaque jour (t) ;
3.  $g_m$  : Une fonction introduite par Finney (1951) et utilisée par Bradu et Mundlak (1970). Cette fonction peut être évaluée par un programme machine (Cohn et al. 1989) ;
4.  $m$  : Degré de liberté de l'équation de régression ;
5.  $V$  : Estimation de la variabilité à une valeur donnée de débit liquide et calculée par l'équation suivante :

$$V = \frac{1}{N} \left[ \frac{\{\text{Ln}(Q^*) - \bar{Q}\}^2}{Q_{\text{var}}} \right] \quad (\text{II.33})$$

Où :

- $Q^*$  : Débit moyen journalier pour le jour où la charge est prévue ;
- $Q_{\text{var}}$  : Variance des débits instantanés utilisés dans la régression ;
- $N$  : Nombre de points de données utilisés dans la régression.

L'estimateur non biaisé de variance minimum (MVUE) peut être évalué en utilisant un programme machine.

Les trois méthodes de correction biaisée donnent des résultats presque identiques dans les conditions suivantes :

- Le modèle assumé linéaire est approximativement correct ;
- Il y a un échantillon raisonnablement grand pour calibrer le modèle de régression (c.à.d 30 observations ou plus) ;
- Le modèle n'est pas employé pour extrapoler au-delà de la gamme des données utilisées pour le calibrage du modèle. Par exemple, si seulement des données de débit faible sont employées pour calibrer le modèle de régression, alors les méthodes produiront différents bilans estimatifs de charge pour des périodes d'écoulement élevés.

Si la première condition est satisfaite, l'estimateur MVUE est le meilleur. Là où les deux autres conditions sont également satisfaites, l'estimateur QMV peut être un bon choix parce qu'il est relativement facile de calculer et se rapproche étroitement de MVUE. Là où des résidus de régression ne sont pas normalement distribués, l'estimateur non paramétrique de Duan peut être le meilleur. Cependant, dans de telles circonstances on doit vérifier que l'utilisation d'un modèle de régression est appropriée.

## **II.4 Conclusion**

En conclusion, on peut dire que ce chapitre a traité les différentes méthodes relatives à la mesure et l'estimation du transport solide en suspension. Il apparaît que le transport solide dans les cours d'eau ne correspond pas à une propriété facilement mesurable ou estimable. Il est maintenant considéré comme une combinaison de réponses complexes influencées par les caractéristiques des sols et les variables environnementales (pluviométrie, couvert végétal, pente, relief, lithologie,...ect).

# *Chapitre III*

*Evolution de la concentration et  
des débits liquides durant les crues*

### **III.1 Introduction**

Les problèmes posés par la mesure du transport en suspensions de part leur nature, incitent les hydrologues à s'intéresser à l'étude des variations de  $C$  et  $Q_1$  au cours d'une crue. En effet, la nature complexe du phénomène de crue, la conception de nouveaux échantillonneurs et de nouvelles techniques de mesure, ainsi que les difficultés rencontrées lors des mesures par les observateurs, sont les éléments clé de cet intérêt.

### **III.2 Caractère cyclique de la relation**

Dans les petits cours d'eau, les concentrations des sédiments en suspension sont directement liées au débit. Les concentrations des sédiments en suspension augmentent généralement très rapidement pendant les montées des crues, produisent une pointe avant le débit maximale puis diminuent plus lentement pendant la décrue. Autrement, le débit liquide et la concentration instantanée des sédiments en suspension peuvent ne pas avoir une relation stationnaire pendant un écoulement simple dû à une averse. La tendance pour que la concentration en sédiment ait différentes valeurs à des débits identiques est l'effet d'hystérésis. La figure (III.1) montre le caractère cyclique de la relation  $C-Q_1$ . Trois périodes peuvent être distinguées dans cette boucle :

1. La première période est caractérisée par une forte augmentation de la concentration des sédiments en suspension et du débit. Cette phase est définie par l'arrivée successive des premières quantités de matériaux en suspension produites essentiellement par l'effet « splash » des pluies érosives dans les zones de ruissellement proches de l'exutoire du bassin. Cette période peut aussi correspondre à la re-mobilisation des matériaux déposés sur le fond lors des basses eaux (Kattan et al, 1987).
2. La seconde période est caractérisée par une diminution de la concentration des sédiments en suspension et une forte augmentation du débit. Cette phase de transport correspond à la dilution de la concentration des sédiments et peut également être attribuée à l'érosion des berges du cours d'eau (Kattan et al., 1987 ; Dinehart, 1992).
3. La troisième période est caractérisée par une diminution de la concentration des sédiments en suspension et du débit. Cette phase correspond au dépôt des matériaux sur le lit des cours d'eau et dans les zones alluviales du bassin.

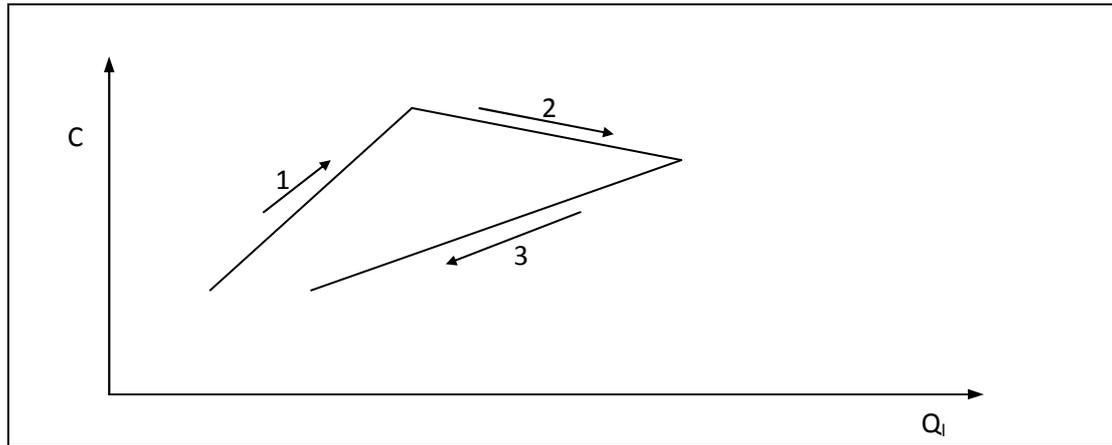


Figure (III.1) : Caractère cyclique de la relation  $C-Q_1$

### **III.3 Boucles d'hystérésis :**

Les boucles d'hystérésis de la relation  $C-Q_1$  sont représentées dans le tableau (III.1). Ce tableau représente probablement la majorité des boucles d'hystérésis relevées à travers les différentes recherches effectuées dans plusieurs bassins du monde.

Les effets de la combinaison des différents paramètres statistiques (mode, aplatissement et asymétrie) peuvent constituer une approche adimensionnelle et qualitative beaucoup plus importante que les méthodes avec calculs détaillés.

Selon G.P. Williams, 1989, les relations entre concentration des sédiments en suspension  $C$  et les débits liquides  $Q_1$  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.

Plusieurs facteurs, affectent les relations  $C-Q_1$ . L'intensité des précipitations et leurs distribution spatiale, volume et vitesse d'écoulement, les distances parcourues des eaux des crues dans le cours d'eau principal.

La concentration des sédiments à travers une section affecte la mobilisation continue, le stockage et la diminution spatio-temporelle des sédiments disponibles. Les sédiments transportés proviennent du lit et des berges par érosion ou glissement et des affluents tributaires. Le matériel du lit transporté en suspension à la station de mesure peut être influencé par les volumes, la hauteur, la puissance des crues précédentes, le pouvoir du courant à passer tout obstacle et par le couvert végétal qui peut retenir ou relâcher les

sédiments. Les sédiments provenant des versants peuvent venir des terres par ruissellement. Dans certains endroits l'homme joue un rôle important dans la production des sédiments par les pratiques culturales.

La forme des courbes de concentration et celle de la relation  $C-Q_1$  dépendent en partie de :

- le temps et le volume des sédiments provenant de différentes sources jusqu'à la station de mesure.
- la proximité de la source des sédiments par rapport à la station.

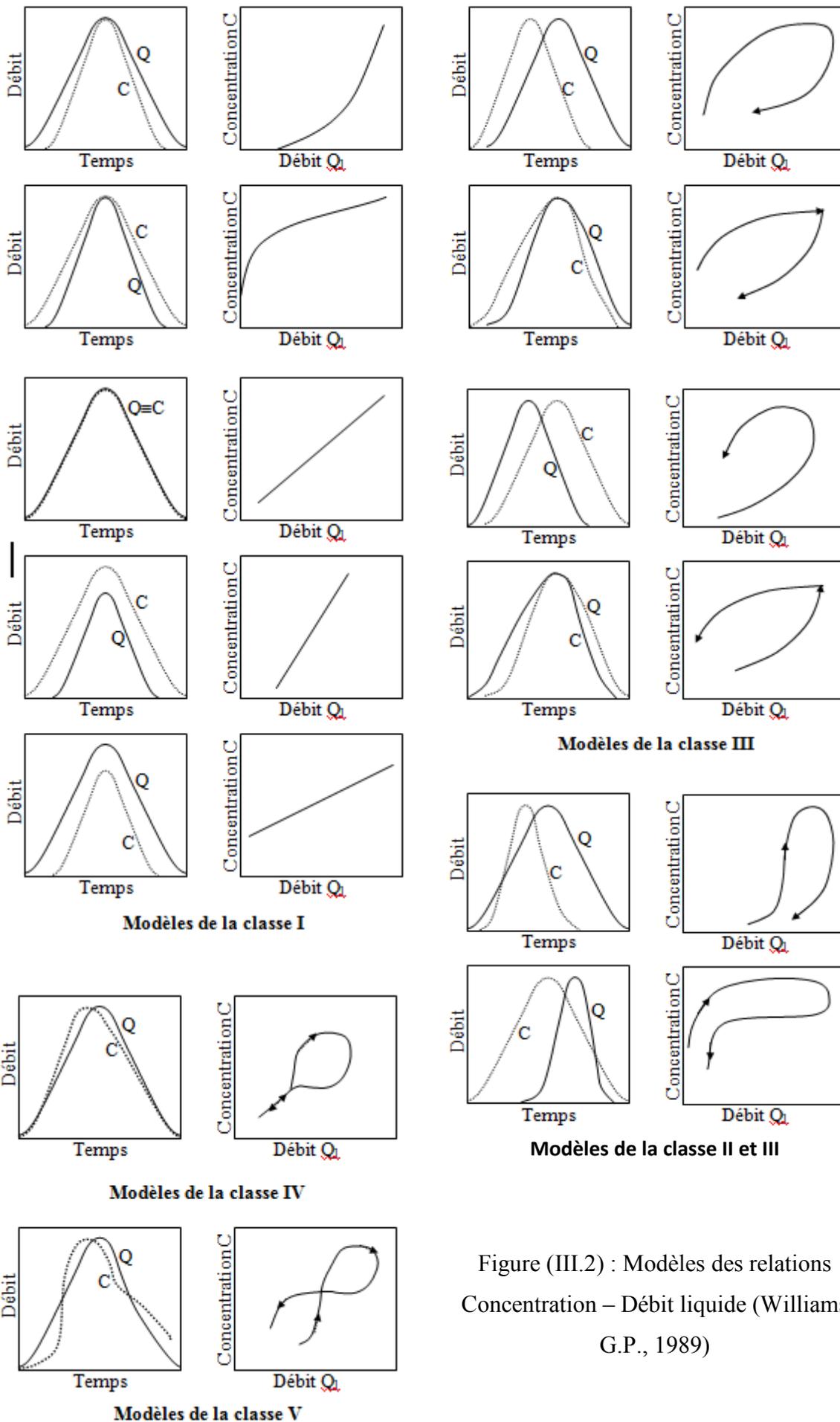
Parmi d'autres considérations sont impliqués, le temps et la vitesse d'entraînement des sédiments relative par rapport à la vitesse du mouvement de l'eau.

Dans cette caractérisation, les parties montée et décrue représentent les deux zones de base pour l'analyse des classes d'hystérésis. Le critère rapport  $C/Q_1$  est un critère simple, objectif mais fiable. Il est considéré comme étant le premier critère de base.

Tableau (III.1): Classes des relations  $C -Q_1$

| Classe    | Modèle  | Critère $C/Q_1$   | Référence                  |
|-----------|---|---|----------------------------|
| <b>I</b>  | Courbe simple (single line)                                     | $(C/Q_1)_m \approx (C/Q_1)_d$                               | Wood (1977)                |
|           | Ligne droite  | Les pentes des deux sections montée et décrue sont égales   |                            |
|           | Courbe, la pente croit quand $Q_1$ augmente                     | Les pentes des deux sections montée et décrue sont inégales |                            |
|           | Courbe, la pente décroît quand $Q_1$ augmente                   | Les pentes des deux sections montée et décrue sont inégales |                            |
| <b>II</b> | Boucle dans le sens des aiguilles d'une montre (Clockwise loop) | $(C/Q_1)_m > (C/Q_1)_d$ pour toutes les valeurs de $Q_1$    | Paustian et beschta (1979) |

|                   |  |   |                             |
|-------------------|--|---|-----------------------------|
| <p><b>III</b></p> | <p>Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre<br/><br/>(Counterclockwise loop)</p> | <p><math>C/Q_1)_m &lt; (C/Q_1)_d</math> pour toutes les valeurs de <math>Q_1</math></p>   | <p>Axelson<br/>(1967)</p>   |
| <p><b>IV</b></p>  | <p>Linéaire simple plus une boucle (single line plus a loop)</p>                                 | <p><math>(C/Q_1)_m \approx (C/Q_1)_d</math> pour une partie des valeurs de <math>Q_1</math><br/><br/><math>C/Q_1)_m &gt; (C/Q_1)_d</math> pour une autre partie des valeurs de <math>Q_1</math></p> | <p>-</p>                    |
| <p><b>V</b></p>   | <p>Forme en huit (figure eight)</p>  | <p><math>(C/Q_1)_m &gt; (C/Q_1)_d</math> pour une partie des valeurs de <math>Q_1</math><br/><br/><math>C/Q_1)_m &lt; (C/Q_1)_d</math> pour l'autre partie des valeurs de <math>Q_1</math></p>      | <p>Amborg et al. (1967)</p> |



### **A. Modèle Classe I**

De la courbe simple (single line) : la relation  $C-Q_1$  la plus simple est du type linéaire (ligne simple ou courbe simple). Son seul caractère est que les rapports  $C/Q_1$  sont égaux pour les valeurs de  $Q$ , que ce soit en montée de crue ou en décrue. Trois sous groupes découlent dans ce type de modèle : la ligne droite, la ligne à concavité vers le haut et la ligne à concavité vers le bas. Dans le premier cas, pourrait être associé un apport continu de sédiments pendant toute la crue (Wood, 1977). Ce modèle indique aussi que les concentrations des sédiments en suspension doivent augmenter ou diminuer en parfaite synchronisation avec le débit liquide. C'est que les courbes doivent avoir des pics simultanément avec des largeurs et des pentes semblables. L'apport continu des sédiments pourrait s'étendre même au delà de la courbe des débits ou descendre sous celle-ci.

On peut concevoir que la même chose peut résulter de facteurs qui influencent l'entraînement des sédiments (taille des particules).

### **B. Modèle classe II**

De la boucle dans le sens des aiguilles d'une montre ou «clockwise loop», peut être due à deux causes principales.

- A un épuisement du stock de sédiment disponible avant le maximum du débit (Arnborg et al. 1967 ; Walling, 1974 ; Wood, 1977 ; Wansickel et Beschta, 1983). L'épuisement ou la diminution des sédiments peut s'expliquer soit, par un petit apport disponible, soit par à un débit continu et/ou intense.
- Le deuxième postulat consiste à la formation d'obstacles au passage de la crue maximale (Arnborg et al. 1967).

Le « clockwise loop » a tendance à se produire plus au début de la saison des pluies qu'après (Sidle et Campbell, 1985). Ceci est lié à la disponibilité des sédiments produits par les crues précédentes, comparés à un manque ou une diminution des réserves en sédiments à la fin de la saison sèche. Selon, Heidel (1956), dans les petits cours d'eau, la concentration maximum des sédiments se produit habituellement avant le débit maximum.

### **C. Modèle classe III**

En boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre où «counterclockwise loop». Le maximum de concentration est postérieur au maximum des débits. Les valeurs des concentrations  $C$  pendant la montée de crue sont inférieures à celle de la décrue pour des valeurs de  $Q$  données alors  $(C/Q)_m < (C/Q)_d$ . La disposition chronologique des données se présente comme une boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. Les boucles dans le sens contraire des aiguilles d'une montre sont apparemment bien connues, à partir de la publication de Heidel (1956), cependant, peu exemples semble avoir été édités pour des événements simples.

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 (Milliams G.P., 1989). Puisque les sédiments en suspension tendent à être transportés avec une vitesse proche de celle de l'écoulement moyen, le flux de sédiments tend à traîner derrière l'onde de crue. Aussi le temps de retard (latence) augmente avec la distance en aval. Le retard du pic des sédiments à une station en aval se manifeste au niveau des écoulements dans un cours d'eau caractérisé par des irrégularités qui empêchent le mouvement des sédiments par rapport à celui de l'eau.

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.

### **D. Modèle classe V**

En forme de huit (8) ou «figure eight». La diffusion jugée approximativement constante, la distribution des variables indique, qu'avec d'abord un maximum des concentrations en premier, on a souvent la formation d'une boucle dans le sens des aiguilles d'une montre. Toutefois, dans certaines conditions, se développe une boucle en forme de huit

indépendamment des pics des variables. Les deux parties du huit sont dirigées séquentiellement dans des directions opposées. Le rapport  $C/Q_l$  pour différentes valeurs de  $Q_l$  explique l'orientation des courbes en fonction du temps sous une forme en huit pour les relations C- $Q_l$ .

Pour les événements hydrologiques simples, les relations en forme de huit, n'ont pas reçu beaucoup d'explication.

La forme en huit de la classe V, combine des parties de la classe II (Clockwise loop) et III (counterclockwise loop). En effet, bien que les maximums des concentrations et des débits arrivent au même moment, l'augmentation de C est plus rapide que celle de  $Q_l$  et le pic de la concentration vient avant celui du débit. Ceci donnera une boucle dans le même sens des aiguilles d'une montre, pendant la montée de la crue. Après, le pic la concentration diminue doucement en fonction du temps, relativement aux débits liquides, pendant la décrue et on obtient une boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre.

### **III.4 Conclusion**

En conclusion, on peut dire que ce chapitre a traité l'évolution de la concentration et des débits liquides durant les crues et présenté probablement la majorité des boucles d'hystérésis relevées à travers les différentes recherches effectuées dans plusieurs bassins du monde.

L'analyse de l'effet d'hystérésis sur la relation concentration C – débit liquide  $Q_l$  permet à travers une série d'événements chronologiques (crues) de caractériser cette relation C- $Q_l$ , d'élaborer une classification de cette dernière et d'en ressortir les modèles de boucle d'hystérésis dominants.

# *Chapitre IV*

*Travaux et études précédentes*

### **IV. 1 Dans le monde**

L'érosion des sols par la pluie et le ruissellement est un phénomène largement répandu dans les différents pays de la méditerranée. Il continue à prendre des proportions considérables en particulier sur les pentes à cause de la torrencialité des pluies, de la forte vulnérabilité des terrains (roches tendre ; sols fragiles ; pentes raides et couvert végétal souvent dégradé) et de l'impact défavorable des activités agricoles, selon la FAO (1990), la situation continue à se dégrader ; En Tunisie 45% de la superficie totale est menacée par l'érosion hydrique (Chevalier, 1995 ; Boussama, 1996), au Maroc 40% (Celik, 1996).

L'érosion est un problème dont la gravité varie beaucoup d'un site à un autre. Aux Etats-Unis, vers 1930, 20 % des terres cultivables ont été gravement endommagées par l'érosion suite à la mise en culture inconsidérée des prairies de la Grande Plaine par les colons européens, peu habitués à ces conditions semi-arides. C'est l'époque sombre des "dust bowl", nuages de poussières qui obscurcissaient complètement l'air dans la Grande Plaine. Ces phénomènes, impressionnant l'opinion publique, ont poussé le Gouvernement américain à former un grand service de conservation de l'eau et des sols mettant à la disposition des agriculteurs volontaires un appui technique et financier dans chaque canton. Parallèlement, un réseau de stations de recherche a été mis en place, qui, trente ans plus tard, aboutit à la formulation de l'équation universelle de perte en terre, connue sous le nom de USLE (Wischmeier, 1978). En 1986, Lovejoy et al remarquent qu'après cinquante ans d'investissement massif en hommes et en moyens, encore 25 % des terres cultivées perdent plus de 12 t/ha/an, limite reconnue tolérable. Le problème reste donc à l'ordre du jour, même si aujourd'hui on s'intéresse plus à la pollution et à la qualité des eaux qu'à la conservation des sols.

En France, Gobillot et Hénin (1956) lancèrent une enquête qui permit d'estimer que 4 millions d'hectares de terres cultivées étaient dégradées par l'érosion hydrique ou éolienne. Le danger étant considéré comme limité, les crédits de recherche dans ce domaine furent peu importants. Aussi, la France ne dispose toujours pas de référentiel de lutte antiérosive, ce qui pose bien des problèmes dans le cas des études d'impact.

Kanwar (1982) a montré au congrès de l'Association Internationale des Sciences du Sol à New Delhi que sur 13.500 millions d'hectares de surfaces exondées dans le monde, 22 % sont cultivables et seulement 10 % sont actuellement cultivés (soit 1.500 millions d'ha).

Ces dix dernières années, les pertes en terres cultivables ont augmenté jusqu'à atteindre 7 à 10 millions d'ha/an, suite à l'érosion, à la salinisation ou à l'urbanisation. A ce rythme, il faudrait trois siècles pour détruire toutes les terres cultivables. L'érosion est donc un problème sérieux à l'échelle mondiale mais il est bien plus préoccupant dans certaines régions du monde, comme c'est le cas au Magreb et plus particulièrement en Algérie.

Pour l'ensemble de la Communauté Economique Européenne (CEE), De Ploey (1990) estime que 25 millions d'hectares ont été gravement affectés par l'érosion. La France totaliserait 5 millions d'hectares et le coût des nuisances occasionnées par l'érosion s'élèverait à 10 milliards de FF., sans compter la valeur intrinsèque des sols perdus, difficilement chiffrables.

Des chiffres bien plus dramatiques donnent l'alarme dans les pays tropicaux. Combeau, en 1977, rapporte que 4/5 des terres de Madagascar sont soumises à l'érosion accélérée; 45 % de la surface de l'Algérie est affectée par l'érosion, soit 100 ha de terre arable perdus par jour de pluie !

En Afrique, on estime que 500 millions d'hectares ont subi une dégradation depuis les années 1950 environ, portant sur 65% des terres agricoles de la région. La dégradation des terres concerne quelque 300 millions d'hectares en Amérique latine. En Europe, 157 millions d'hectares souffrent de l'érosion hydrique et éolienne. En Amérique du Nord, environ 95 millions d'hectares sont touchés. (FEM et FIDA, 2002).

En Tunisie, Hamza (1992) a évalué les transports solides moyens évacués chaque année par les différents bassins versants. En tenant compte d'une profondeur moyenne des sols de 50 centimètres, ce serait 15000 ha de terres qui se perdent en mer par érosion hydrique chaque année.

Au Maroc, le taux d'érosion spécifique dépasse la valeur de 2000 t/km<sup>2</sup>.an dans les bassins versants de Martil de l'Ouergha (Badraoui, 2001). Le taux d'envasement des 25 barrages marocains est d'ordre de 32 millions m<sup>3</sup>/an (Remini, 2005).

Delhoume (1981), dans les régions méditerranéennes semi-arides, les sols sous forêts bien entretenus sont considérés comme non sensible à l'érosion.

Roose (1994), La litière et les végétations basses favorisent l'infiltration.

D'après Razafiniaina (2002), la couverture végétale agit de façon positive sur la réduction de la formation des croûtes donc sur l'amélioration de la rugosité, la limitation de la compacité et par conséquent une amélioration de l'infiltration. Les travaux de labour favorisent également l'infiltration par amélioration de la rugosité mais l'effet n'est pas durable car il suffit de deux pluies successives pour la réduire.

La Chine a perdu au cours de la période 1957-1990 des terres arables d'une superficie égale à celle de toutes les terres de culture d'Allemagne, du Danemark, de France et des Pays-Bas réunis, principalement suite à la dégradation des terres. (FEM et FIDA, 2002).

Les études récentes sur la vulnérabilité au changement climatique dans la région méditerranéenne indiquent une tendance à un accroissement à l'aridité qui accélère l'érosion hydrique (Shabban et al, 1998).

Plus sérieux que ces affirmations dramatiques, sont les résultats des mesures de pertes en terre sur parcelle (100 m<sup>2</sup>) mises en place sous l'impulsion du Professeur Frédéric Fournier depuis les années 1950, par l'ORSTOM et les Instituts du CIRAD (Roose 1967, 1973 et 1980). Ces pertes en terre varient de 1 à 200 t/ha/an (jusqu'à 700 tonnes en montagne, sur des pentes de 30 à 60 %) sous des cultures propres aux régions forestières à pentes moyennes (4 à 25 %), des pertes en terre de 0,5 à 40 t/ha sous mil, sorgho, arachide, coton sur les longs glacis ferrugineux tropicaux des régions soudano sahéliennes (Roose et Piot, 1984 ; Boli, Bep et Roose, 1993).

Si on accepte une densité apparente des horizons de surface variant de 1,2 à 1,5, les ablations correspondantes par érosion varient de 0,1 à 7 (et même 15 mm en montagne), en fonction de la topographie, du climat et des cultures. Ceci correspond à 1 à 70 cm (150) cm/siècle ou 0,2 à 14 mètres depuis le début de l'ère chrétienne.

Bien évidemment, les mêmes sols ne sont pas restés sous cultures depuis 2.000 ans ! Epuisés après 2 à 15 ans de culture plus ou moins intensives et déséquilibrées (les exportations et les pertes ne sont pas compensées par les restitutions et les apports), les terres ont été abandonnées à la jachère dont le premier effet est de réduire l'érosion (Roose, 1992).

La durée de vie des sols peut aussi être estimée à partir des pertes en terre annuelles moyennes, de l'épaisseur du sol explorable par les racines, de la vitesse de la régénération de la fertilité du sol et de la courbe de rendement du sol en fonction de l'épaisseur de la couche

arable (Elwell et Stocking, 1984). En milieu forestier, où les pluies sont agressives et les pentes fortes, les pertes en terre peuvent être importantes et la dégradation des terres est très rapide (quelques années). Cependant, la régénération des sols y est également rapide, car un sol dégradé est rapidement envahi par la végétation.

En milieu semi-aride, la durée de vie peut atteindre quelques dizaines d'années, malgré la modestie des pentes et de l'agressivité des pluies, mais la restauration de la fertilité des sols est d'autant plus lente que la production de biomasse est faible en zone aride et que les sols sont profondément épuisés.

L'analyse des transports solides de centaines de rivières américaines et européennes, montre qu'il existe une zone climatique semi-aride (pluies annuelles moyennes variant de 350 à 700 mm, en fonction de la continentalité des bassins) où la dégradation spécifique des bassins est maximale. En zone plus aride, le transport solide spécifique diminue avec l'énergie des pluies (Fournier, 1955). En zone plus humide, le couvert végétal intercepte une part importante de l'énergie des pluies et du ruissellement (Fournier, 1955 et 1960). Ce qui est vrai statistiquement sur un grand échantillon de bassins versants, ne l'est plus à l'échelle du terroir et encore moins à l'échelle de la parcelle. Le mode de gestion particulier de chaque parcelle, entraîne des différences locales très importantes et c'est ce qui justifie la mise au point de techniques culturales de lutte antiérosive.

Les méthodes de recherche basées sur l'analyse de la régression multiple peuvent fournir une contribution significative pour l'évaluation de la production en sédiment des bassins versants. Ces méthodes font recours à des équations de régression pour exprimer les valeurs de la production en sédiment ou de quelques autres grandeurs représentatives de l'importance des processus érosifs en fonction des caractéristiques hydrologiques, morphologiques et d'utilisation des sols des bassins versants. Dans plusieurs études menées dans ce sens, à travers le monde, la grandeur qui fait l'objet de recherche est la quantité de matériaux solides déposée dans les lacs et les retenues de barrages. Ce choix présente l'avantage de considérer la totalité du matériau provenant à l'exutoire du bassin versant, comprenant d'une part celle charriée par transport de fond et d'autre part celle transportée en suspension.

Parmi les premières applications des méthodes de régression multiples ayant pour objet d'obtenir une quantification de la production en sédiment d'un bassin versant son

mentionnés les travaux conduits par Anderson (1949) dans les bassins versants de la Californie Méridionale.

Dans une des plus importantes expressions élaborées par Anderson, la valeur de la production moyenne annuelle en sédiment d'un bassin versant est liée au débit maximum annuel, à la superficie occupée par le collecteur principal et à la couverture végétale existante. La combinaison de la dite expression avec une autre, développée par le même auteur (1954), en mesure de quantifier les écoulements de crue en fonction des caractéristiques du bassin versant et des précipitations tombées à l'occasion de la crue, a consenti d'obtenir une troisième, grâce à laquelle, il est possible de déterminer la production en sédiment d'un bassin versant à partir de quelques variables faciles à déterminer :

$$\text{LogS} = 2.257 + 0.071\text{LogA} + 1.619\text{Loghd} + 0.41\text{Logha} + 0.37\text{LogAc} - 1.974\text{LogC} \quad (\text{IV.1})$$

Ou :

S : Sédimentation spécifique annuelle ( $\text{m}^3/\text{km}^2$ ) ;

A : Superficie du bassin versant ( $\text{km}^2$ ) ;

hd : Précipitations maximales de 24 heures parvenues au bassin versant à l'occasion de la crue maximale annuelle (mm) ;

ha : Précipitations tombées dans les 21 jours précédents la crue (mm) ;

Ac : Aire occupée par le collecteur principal rapportée à la superficie du bassin versant ( $\text{ha}/\text{km}^2$ ) ;

C : Pourcentage de la superficie du bassin versant couvert de végétation forestière.

En utilisant des données relatives à quelques 250 bassins versants distribués sur toute la superficie du globe terrestre et représentant, pour cela, des cas complètement différents entre eux du point de vue hydrologique, Fleming (1969) a proposé une relation de caractère générale dans laquelle l'écoulement en suspension moyen annuel  $Q_s$  est exprimé en fonction du débit moyen  $Q$  sous la forme :

$$Q_s = aQ^n \quad (\text{IV.2})$$

Les valeurs des coefficients  $a$  et  $n$  dépendent des caractéristiques de la couverture végétale dans le bassin versant.

Une autre étude digne de citation, celle de Flaxman (1974), la méthode développée par cet auteur consiste en une équation de régression dans laquelle la production moyenne annuelle en sédiment est exprimée en fonction des caractéristiques hydrologiques, morphologiques, pédologiques et du degré de développement de la couverture végétale. Ce dernier facteur n'étant pas exprimé par une évaluation directe de la végétation présente, mais à travers un indice climatique constitué par le rapport entre la précipitation moyenne annuelle et la température moyenne annuelle du bassin versant. L'expression de Flaxman a été développée en utilisant les données relatives à 27 bassins versants des U.S.A occidentaux ; cette vaste région géographique a été utilisée pour résoudre de nombreux problèmes techniques avec un regard particulier à ceux relatifs à la planification et à la gestion des barrages.

### **IV.2 En Algérie**

En Algérie, le nord du pays est caractérisé par un climat agressif avec alternance d'années sèches et humide avec la présence des averses orageuses de fortes intensités ( $>100\text{mm/h}$ ), particulièrement fréquentes en automne lorsque le couvert végétale est absent (Arabi, 1986).

En effet, les régions de montagnes s'étendent sur une superficie de 7565000 hectares dont 63% sont situés à plus de 800 mètres, le 1/4 des terres ont des pentes supérieures à 25% (Gréco, 1966, MARA, 1985)

La lithologie constituée en majorité de roches tendre (schiste et argile) est sensible à l'érosion

En Algérie 45% des zones telliennes sont menacées par l'érosion, soit 12 millions d'hectares (Chebbani, 1999).

Face à ce milieu fragile, les facteurs anthropiques ont largement contribué à l'accélération des processus érosifs. Ainsi suite aux colonisations successives les paysans, repoussés dans les montagnes, ont été amenés pour survivre, à exploiter les zones à risque érosif en détriment des surfaces boisées, sont en croissance continue.

Le faible taux du couvert végétal et la dégradation annuelle de ce dernier surtout par incendie à augmenter le taux d'érosion, en sachant que le taux de boisement actuel est de 16% pour seulement le Nord de l'Algérie, C'est-à-dire sans tenir compte du Sahara qui couvre 80% du territoire national, alors que la norme généralement admise se situe entre 20 et 25% (DDF,2001).

Plusieurs recherches ont été entamées en Algérie dont celle de t'ixeront qui à travers une étude basée sur les données de 32 bassins versants algériens et 9 tunisiens dont la superficie varie de 90 à 22300  $km^2$  a essayé, après avoir regroupé les bassins en trois classes suivantes un critère régionale, de mettre en évidence le rôle des facteurs suivantes : précipitations, écoulement annuel, répartition saisonnière des pluies, le couvert végétal et les facteurs géomorphologiques dans le dégradation du sol, il a conclu que la concentration en éléments fins l'érosion, que les terrains jeunes fournissent des taux d'abrasion importants, et que la répartition saisonnière des précipitations a son importance.

Capolini (1965-1969) à travers une étude géomorphologique régionale sur le bassin versant de l'oued Chélif et ses principaux affluents a trouvé une bonne corrélation entre la torrentialité et la géomorphologie, il a pu quantifier des débits solides à partir de la lithologie, il a conclu l'existence d'une relation statistique entre l'érosion spécifique et la torrentialité du bassin versant, et il a proposé une méthode de cartographie du coefficient de torrentialité.

En Algérie, le taux d'érosion spécifique atteint les valeurs les plus élevées d'Afrique du Nord.

Les éléments de quantification concernant les taux et les concentrations d'érosion spécifique, issus des travaux de Demmak (1982), donnent des chiffres allant de 20 à 500 tonnes  $km^2/an$ , avec une turbidité comprise entre 16 et 28 g/l. Le taux d'érosion spécifique atteint les 5000 tonnes/ $km^2/an$  dans le bassin de l'Algrioun qui alimente le barrage d'Ighil Emda (Bejaia) 120 millions de tonnes de sédiments sont rejetées chaque année dans la mer. L'irrégularité du climat influence directement des flux, qui sont caractérisés par ; La violence et la soudaineté des inondations : le débit du Chellif peut dépasser les 4200  $m^3/s$  ; La sévérité et la durée des périodes basses eaux.

Demmak (1982) en se basant sur les données observées durant la période 1972/1979, sur trente bassins versants de l'Algérie du Nord, particulièrement touchée par l'érosion a constaté que l'agressivité des averses est relativement faible en Afrique du Nord, et que son

influence sur l'érosion est négligeable. L'érosion en nappes n'apporte qu'une faible part (0.2 à 1 tonnes/ha.an) au transport solide des oueds. Pour lui l'essentiel se passe autour des oueds. Le sapement des berges et une source majeure des sédiments directement mobilisés par les oueds lors des fortes crues. Il a confirmé l'inaptitude en Algérie des techniques de lutte antiérosives. Il a démontré que le pourcentage de marnes d'argiles affluentes, le pourcentage de torrentialité, sont déterminants pour le transport solide. Il synthétisa ses travaux par une relation empirique valable pour les bassins de l'Atlas Tellien liant les apports solides spécifiques moyens annuels à des indices lithologiques, pluviométriques et géomorphologiques.

En Algérie un effort louable a été entrepris depuis les années 1945 pour re-forestier les vallées (50.000 ha), les "bad-lands" ; fixer les ravines et corriger les oueds ; aménager 300.000 ha de terres cultivées en banquettes d'absorption ou de diversion (construites par les services de DRS) puis par la Direction National ces Forêts. Depuis 1978, la construction de banquettes a été suspendue, suite aux critiques des chercheurs, au rejet des paysans, et surtout, aux difficultés économiques. La lutte antiérosive a été restreinte à la protection des ouvrages d'art, à la reforestation, à la végétalisation des ravines et à la construction des grands barrages.

Pour les paysans, les seules actions de l'Etat concernant aujourd'hui l'amélioration foncière (c'est-à-dire, sous-solage des sols à croute calcaire, qui augmente la productivité des céréales) et la création de petites retenues collinaires, fournissent de l'eau en tête de vallée pour le bétail, l'habitat et quelques hectares d'irrigation. Même cette politique est remise en cause par des hydrologues qui font remarquer que l'envasement des barrages n'a pas diminué depuis l'effort consenti par l'aménagement des hautes vallées. Les travaux de Heushe (1970) et Demamak (1982) montrent que la majorité des sédiments piégés dans les réservoirs proviennent, des glissements de terrain, des éboulements des berges et de la divagation des oueds. En fonction de la part des objectifs des projets de lutte antiérosive en vue de réduire les nuisances à l'aval ou de préserver le capital foncier des versants, on recherchera un compromis permettant d'intervenir dans les vallées pour piéger les sédiments et stabiliser les berges tout en aménageant les versants pour réduire et retarder le ruissellement (améliorations foncières, talus enherbés, techniques culturales pour couvrir le sol en hiver et re-végétaliser les zones sur pâturées). Des méthodes de calcul économique existent, qui permettent de choisir les interventions de lutte antiérosive les plus efficaces, en se basant sur les couts des

traitements antiérosifs, des nuisances aux quelles on peut s'attendre en l'absence d'intervention.

D'après F.A.O (1980) ; Demmak (1982), les divers types de roches et leurs structures donnent une indication précieuse sur la capacité d'infiltration des zones occupées par des roches et par les sols en conséquence sur la quantité du sol susceptible d'être érodée. Une faible infiltration des roches affleurent indique qu'une grande quantité de sédiment d'eau ruisselée par conséquent une grande quantité des terres de terre peut être emportée.

Arabi (1991) a confirmé la faiblesse de l'érosion pluviale et par conséquent le fait que le ruissellement constitue un facteur essentiel pour la détermination du transport solide dans les bassins versants. Il a proposé des mesures de protection à savoir : stocker les eaux d'écoulement, favoriser l'infiltration au maximum, limiter la concentration des eaux de ruissellement, travailler le sol chaque fois que possible, améliorer la structure du sol et corriger les ravins.

Meddi (1992) en se basant sur les données pluviométriques et des transports solide a entrepris une étude hydrologique de grande envergure sur le bassin versant de l'oued Mina et a choisi pour ses analyses quatre sous bassins : l'Oued el Abd, l'Oued Haddad, l'Oued Taht et Oued el Abtal. L'auteur a constaté que le bassin versant d'Oued Haddad a une dégradation spécifique très élevée par rapport aux autres bassins. Le contexte topographie –couverts végétal ainsi que la puissance des crues de ce bassin sont favorables à un fort transport solide. En ce qui concerne l'explication des variations de la concentration des sédiments en suspension, Meddi tenta d'établir, pour chaque bassin, des relations entre le transport solide, la pluie et le débit liquide. Il conclue que dans l'ensemble ce sont l'humidité du sol et le débit de pointe qui expliquent les variations de la turbidité maximale de la crue. Il signala en particulier que la température de l'eau, à défaut de données concernant la température de l'air, joue un rôle non négligeable dans l'explication des variations de la turbidité en saison chaude. En effet, les hautes températures accroissent l'aptitude de l'eau à détruire les agrégats du sol.

Dans leur étude sur le bassin versant de l'Oued Mina, Gomer et Voght (1994) élaborent un modèle pour décrire l'écoulement et l'érosion des sols des petits bassins marneux en climat semi aride méditerranéen. Plusieurs grandeurs initiales ont été analysées et paramétrées pour la description des processus en l'occurrence :

- Les conditions climatiques, en particulier la distribution spatiale des pluies extrêmes ;

- La dérivation d'une carte hydrologique des sols à partir de documents de télédétection ;
- Une analyse numérique du relief ;
- L'infiltration et la formation de l'écoulement compte tenu de l'imperméabilisation par battante des sols marneux ;
- L'érosion des sols sous l'effet de l'impulsion cinétique en fonction des conditions hydrauliques ;
- Le transport solide en fonction du type de transport ;

Le modèle a été validé par la comparaison des résultats des simulations et des mesures in situ. Ils concluent que le transport des sédiments à l'exutoire des micros bassins est déterminé presque exclusivement par l'impulsion cinétique : le rôle direct de l'érosion pluviale est négligeable. L'écoulement, par conséquent l'ablation, se concentrent dans les entailles. Les surfaces agricoles ne contribuent que très peu à l'écoulement, même pour les précipitations d'intensité extrême et peuvent donc être considérées comme stable vis-à-vis de l'érosion. Les sols salins généralement exposés au sud et sensible à la météorisation favorisent beaucoup plus la formation d'écoulement et d'érosion que les sols agricoles, exposés en général au nord. Les surfaces agricoles abandonnées ne peuvent être occupées par une végétation naturelle et sont donc rapidement imperméabilisées par battance. Il en résulte une augmentation de l'écoulement et de l'érosion qui en peu d'années aboutit à la dégradation irréversible des sols. Ils trouvent aussi que le boisement par des pins et des eucalyptus en monoculture sur marnes ne protège pas de l'érosion. Ils préconisent pour cela, comme protection plus efficace, une combinaison de procédés techniques de correction torrentielle et de procédés biologiques dans les principaux ravins. Le modèle ainsi établi combiné avec un système d'information géographique offre aux décideurs un outil de planification permettant de quantifier les mesures anti-érosives dans les bassins versants marneux de l'Algérie septentrionale.

Les rivières drainent souvent des collines et des montagnes marno argileuses. Le courant provoque une érosion multiforme, avec la formation de ravins profonds et hiérarchiques, caractéristiques de mauvaises terres.

D'après Roose (1994), les argiles, les marnes, les schistes, les basaltes, les gneiss sont très vulnérables au ravinement, les transports solides dans un bassin versant dépendent de la surface en roche de différents types (argileuses, marneuses, schisteuses..).

D'après Chebbani (1999), les sols marneux lorsqu'ils sont secs restent et non érodable, mais dès qu'ils atteignent une certaine humidité leur sensibilité à la détectabilité et au ruissellement augmente.

Larfi (2000) a montré que la quantification du transport solide dans le bassin versant de l'oued Isser dont les résultats semblent très cohérent avec les mesures directes de l'envasement dans la retenue de Beni Amrane nous incite à laisser les portes de la recherche et de l'expérimentation grande ouvertes sur la définition des diverses formes d'érosion et une stratégie de lutte anti-érosive en vue de l'accroissement de la durée de vie des aménagements hydrauliques.

D'après Touaïbia (2000), le caractère irrégulier, aléatoire de l'érosion hydrique et sa discontinuité spatio-temporelle la rendent complexe.

D'après Touaïbia (2001), dans ces études sur le bassin Oued Mina, les zones marneuses sont sensibles à l'érosion hydrique et ont dépassé le seuil tolérable de 10 t/Ha.an.

D'après Touaïbia (2003), la couverture végétale, le coefficient d'écoulement, la surface et la densité de drainage sont autant d'éléments qui influent directement sur l'érosion hydrique sur les bassins versants, un modèle a été établi dans ce sens dans le cas de bassin versant de l'oued Mina dont la formulation est donnée par la formule I.19

$$E_s = 34,12 * S^{0,164} * Dd^{-0,284} * Ce^{0,573} * Cv^{-0,329} \quad (IV.3)$$

Avec un coefficient de corrélation multiple de 0,95

Benkhaled (2006), dans son étude ayant pour objectif principal la compréhension du phénomène et l'estimation du transport solide en suspension, basée sur les données observées durant la période 1974/1990 sur le bassin versant de oued Ouahrane, a constaté que le bassin versant de l'oued Ouahrane a une dégradation spécifique de l'ordre de 169Tonnes/km<sup>2</sup>.an. Cette dégradation des sols est très visible sur le terrain. Elle est due aux caractères favorables à l'érosion des sols et au sapement des berges. L'analyse de l'effet d'hystérésis montre relativement l'effet saisonnier sur la forme de boucle obtenue. Le modèle sen des aiguilles

d'une montre est très dominant sur le bassin considéré. L'arrivée du pic de la concentration avant celui du débit liquide, comme ceux se produisant simultanément, est une caractéristique de ce bassin de zone semi-aride. L'étude à différentes échelles temporelles, de la relation de puissance a permis d'appréhender la complexité d'approche du transport solide et d'analyser le comportement des paramètres a et b de l'équation de régression. L'analyse à l'échelle saisonnière de la relation puissance débit solide - débit liquide est très représentative du contexte semi-aride du bassin étudié.

L'érosion spécifique des bassins versants de l'Afrique du nord avoisine  $800 \text{ t/km}^2.\text{an}$  selon Heusch B (1977). Il est de  $1250 \text{ t/km}^2.\text{an}$  selon la SOGREAH (1967). En Algérie du nord, le taux d'érosion spécifique atteint les valeurs les plus importantes, dépassant  $2000 \text{ t/km}^2.\text{an}$  sur la plupart des bassins versants de l'Atlas Tellien (Rhiou, Sly, Fodda, Mazafaran, Isser) , il atteint  $4000 \text{ t/km}^2.\text{an}$  sur la chaîne côtière de Dahra et  $5000 \text{ t/km}^2.\text{an}$  dans le bassin très dégradé de l'oued Agrioun qui alimente le barrage d'Ighil Edma selon (Demmak, 1982) et atteint une valeur très élevée de  $7619 \text{ t/km}^2.\text{an}$  dans le bassin versant de DjenDjen selon (Bourouba, 1994). Comme conséquence du taux d'érosion spécifique élevée, l'envasement des barrages qui reste une ampleur à remédier par des mesures à apprendre.

Le phénomène d'érosion et l'envasement sont une véritable calamité en Algérie. La nature et la morphologie des terrains en pente, la fragilité du couvert végétal, le manque de boisement et l'urbanisation en amont des barrages engendrent une forte érosion qui réduit la capacité de stockage des barrages de 2 à 3% chaque année, suite à l'envasement dû au transport et au dépôt de sédiments par les eaux de ruissellement.

### **IV.2.1 Sédimentation**

L'Algérie dispose de 55 grands barrages d'une capacité totale de 6.4 milliards de  $\text{m}^3$  (Remini et Hallouche, 2002). Seulement 52 grands barrages sont en exploitation « 5.2 milliards de  $\text{m}^3$  de capacité en 2002. Ces barrages reçoivent annuellement une quantité de vase estimée à  $32 \text{ Mm}^3$  (Remini, 2004).

D'après Mahieddine (1997) une quantité de 120 millions de tonnes de sédiments rejetés en mer chaque année par les bassins de la Méditerranée.

D'après Remini (2004) le lac de Beni Amrane dans le bassin d'Isser est envasé à 80 % et la retenue collinaire BS21 est presque comblée en sédiment, ce qui confirme la gravité du seuil d'érosion dans le bassin d'Isser.

La mise en eau des barrages de Beni Haroun, EL Agrem et Taksebt entraînera une augmentation de l'envasement annuel de 32 millions de m<sup>3</sup>/an à 46 millions de m<sup>3</sup>/an. Le barrage de Beni Haroun seul recevra annuellement un volume de vase estimé à 10 millions de m<sup>3</sup>/an. En 2002, le volume de vase déposé dans les 52 grands barrages est estimé à 0.9 milliards de m<sup>3</sup>, soit un taux de comblement de 17% de la capacité totale. Cette quantité sera de 1.1 milliards de m<sup>3</sup> en 2010 et 1.35 milliards de m<sup>3</sup> en 2020 pour le même nombre de barrages. Le taux d'envasement annuel dépassera largement 60 millions de m<sup>3</sup> à partir de l'an 2010 pour les 100 grands barrages prévus. La répartition des barrages sur les cinq bassins hydrographiques indiquent clairement que les barrages de la région de Chéllif-Zahrez sont les barrages les plus menacé par le phénomène de l'envasement, puisque le taux de sédimentation annuel est de 0.75%. Ceci est dû à la forte érosion des bassins versants de la région, favorisé par la nature des sols et l'absence de boisement. Même pour les petit barrages, le taux de comblement évalué en 2002 dans le bassin hydrographique Chellif-Zahrez est de 16% de la capacité totale, il est beaucoup plus grand par rapport à celui des autres régions (Remini, 2005).

Il existe 16 grands barrages qui sont les plus envasés des 52 grands barrages répartis à travers le territoire national. Le taux de sédimentation annuel est évalué à 12 millions de m<sup>3</sup> pour les 16 barrages, ce qui représente 38% de l'envasement annuel de l'ensemble des barrages. Cependant, il reste que le barrage Ghrib est le deuxième barrage algérien, il reçoit une quantité de vase annuel égal à 3.2 millions de m<sup>3</sup> après celui de Gargar avec 4.5 millions de m<sup>3</sup>. Les barrages Ghrib et Oued El Fodda sont comblés à plus de 70% de leur capacité totale. Suite au fort taux d'envasement et malgré l'enlèvement de la vase en 1961, les services hydrauliques ont été contraints d'abandonner le barrage de Cheurfas en 1966 (Remini, 2005).

Des chiffres alarmants de l'état d'envasement des barrages les plus envasés en Algérie sont présentés dans le tableau (V.1).

Tableau(IV.1): Taux de sédiments dans les barrages les plus envasés en Algérie (Remini, 2005)

| Barrage       | Année de la mise en eau | Superficie du bassin versant (Km <sup>2</sup> ) | Capacité initiale (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | Annuelle (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an) | Taux de comblement en 2001(%) |
|---------------|-------------------------|---|---|-----------------------------------|---|-------------------------------|
| Beni Amrane   | 1988                    | 370   | 15.6  | 414                               | 1.2   | 80                            |
| Foum ElGherza | 1950                    | 1300  | 47  |                                   | 0.6   | 65                            |
| Zerdezias     | 1977                    |   | 27  |                                   | 0.45  | 40                            |
| Oued ElFodda  | 1932                    | 800   | 228   | 83                                | 2.31  | 70                            |
| Ghrib         | 1939                    | 23800   | 280   | 148                               | 3.2   | 71                            |
| Hamiz         | 1935                    | 139   | 21  | 52                                | 0.35  | 66                            |
| Fergoug       | 1970                    | 566   | 18  |                                   | 0.72  | 80                            |
| Bouhnifia     | 1940                    | 7000  | 73  |                                   | 0.38  | 32                            |
| Boughezoul    | 1934                    |   | 55  |                                   | 0.66  | 80                            |
| Ighil Emda    | 1953                    | 652   | 155   |                                   | 1.33  | 41                            |
| K'Sob         | 1977                    | 1495  | 29.5  | 50                                | 0.3   | 24                            |
| Cheurfas      | 1885                    | 4150  | 14.6  |                                   | 0.3   | 100                           |

| I**            |      |      |      |      |       |    |
|----------------|------|------|------|------|-------|----|
| Meurad         | 1860 | 18   | 0.9  | 1.5  | 0.005 | 72 |
| M.S.Abed       | 1984 | 11   | 54.9 | 40   | 0.03  | 14 |
| Beni Bahdel    | 1952 | 1016 | 63   | 73.8 | 0.2   | 12 |
| Foum El Gueiss | 1939 | 156  | 3    | 12   | 0.03  | 84 |

\*\* : barrage déclassé en 1966

### **\*IV.3 Conclusion**

En conclusion, on peut dire que l'exposé des résultats des différents travaux antérieurs a permis de montrer que l'érosion et le transport solide sont des problèmes sérieux à l'échelle mondiale mais ils sont bien plus préoccupants dans certaines régions du monde, comme c'est le cas au Maghreb et plus particulièrement en Algérie. Il a permis aussi, d'adopter dans le reste du travail une approche par régression plus ou moins performante, selon le type d'échantillonnage adopté sur le réseau hydrométrique Algérien.

# *Chapitre V*

*Cadre générale de l'étude*

### **V.1 Présentation de la région d'étude**

Situé en zone semi aride, le bassin versant de l'Oued Isser répond à notre objectif en raison de sa forte érodabilité et de la disponibilité des données hydrométriques (1970/71 à 1984/1985). Il a été choisi aussi afin mettre en exergue la situation de transport solide en suspension vu l'importance que requiert cette région semi-aride de l'Algérie vis à vis des ouvrages hydrauliques qui alimentent les habitants de plusieurs localités des wilayas de Bouira, Tizi-Ouzou, M'sila et Médéa, la capitale Alger, le secteur industriel et le secteur agricole (pour l'irrigation) en eau.

Le bassin versant de l'Oued Isser est assez représentatif de beaucoup de bassins de la frange semi-aride du Nord de l'Algérie en ce qui concerne les paramètres physico-climatiques et leurs influences sur les phénomènes d'érosion en général et le transport solide en particulier.

### **V.2 Situation géographique**

Situé à environ 70 kilomètres d'Alger, entre 2° 80' et 3° 80' E et entre 35° 90' and 36° 60' N (figure V.1), le bassin versant de l'Oued Isser draine, au niveau du barrage de Koudiat Acerdoune une superficie de 2785 km<sup>2</sup> (2570 km<sup>2</sup> au niveau de la station hydrométrique de la Traille), il chevauche sur deux wilaya : Médéa et Bouira. L'Oued Isser parcourt une distance de 141 km environ entre la ligne de partage des eaux et le barrage de Koudiat Acerdoune avec une orientation SO-NE. L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) exploite plusieurs stations pluviométriques à relevé journalier dans le bassin versant de l'Oued Isser, dont beaucoup n'ont été en fonction que quelques années. Le réseau hydrométrique actuel, au droit du barrage de Koudiat Acerdoune, comporte 4 stations hydrométriques : La Traille (90408), Mezahim (90101), Beni Slimane (90305) et Dechemia (90101). Seule la station de La Traille est retenue dans cette étude pour la détermination des apports liquides et solides au droit du barrage de Koudiat Acerdoune du fait de son emplacement au sein du bassin versant.

Le barrage-poids de Koudiat Acerdoune (X=580150, Y=354700, Z=217) est situé à environ 45Km vers l'Ouest de la ville de Bouira. Il est édifié sur le principal affluent de l'Oued Isser en 2013 et est destiné à l'alimentation en eau potable de 14 centres urbains et 34 localités à travers le territoire des wilayas : Bouira, Tizi Ouzou, Médéa et M'sila et à l'irrigation de plus de 20000 ha du périmètre du moyen Isser ainsi qu'au renforcement de la mise en valeur hydro-agricole du périmètre de la Mitidja Centre et Est.

D'une capacité totale de stockage de  $640\text{Mm}^3$ , le barrage est caractérisé par une digue homogène en BCR d'une longueur en crête de 425m et d'une hauteur de 121m au dessus sa plus basse fondation. L'épaisseur en crête et à sa base sont 8m et 102m respectivement.

### V.3 Caractéristiques du bassin versant

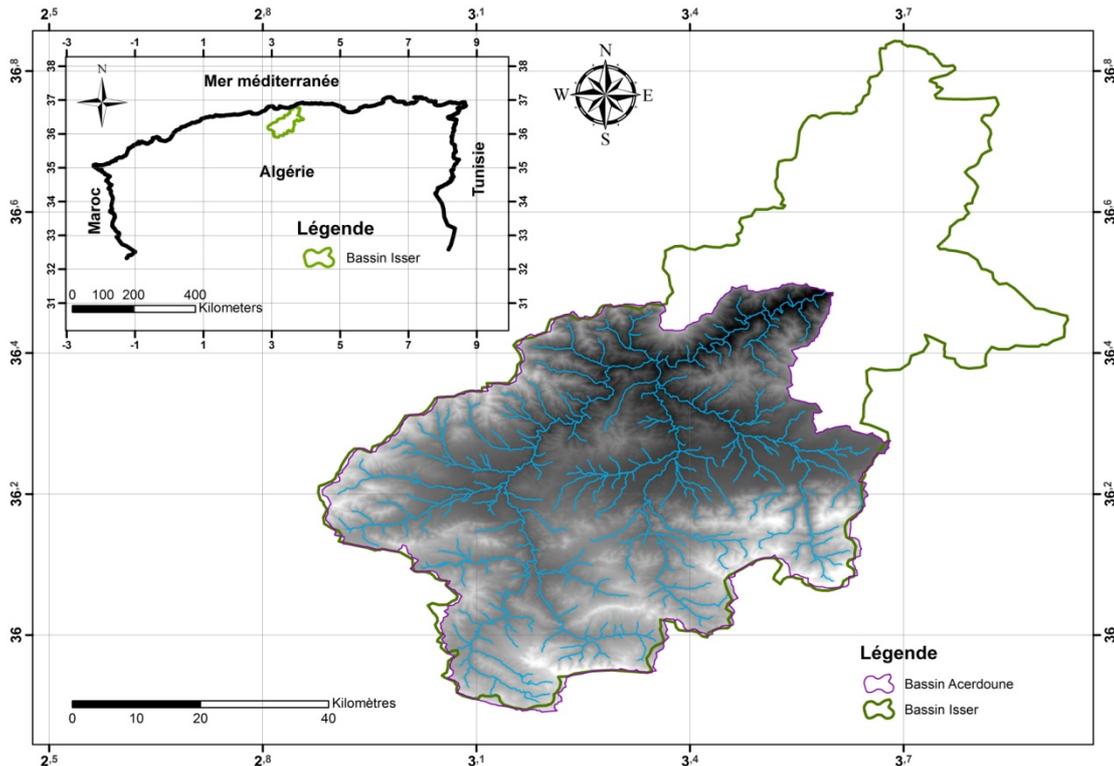


Figure (V.1) : Situation géographique et Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Isser

#### V.3.1 Lithologie et végétation

L'analyse de la répartition géographique ( tableau V.1 et figure V.2) montre que le bassin est constitué à 45% de formation marneuse et marno-calcaire facilement érodables appartenent au crétacé inférieur, moyen et supérieur (au nord et au sud du bassin), à 23% d'argile rouge pur, ou chargée de sable et de grès de l'Aquitaniens Continental (au centre du bassin), à 21% de schiste avec grès (au centre et au nord du bassin), à 6% de formations superficielles (au centre et suivant les cours d'eau principaux) et à 5% d'argilites et argiles (aux extrémités sud et sud-ouest du bassin)

Tableau (V.1): Lithologie du bassin versant de l'Oued Isser au droit de barrage de Koudiet Acerdoune

| Type de sols   | Poucentage (%) |
|--|----------------|
| Sols superficiel   | 6.27           |
| Argilites et argiles   | 5.42           |
| Argile rouge pur ou chargée de sable et grès (Bad land) de l'aquitainien continental | 23.07          |
| Marne et grès de l'oligocène (bad land)  | 8.30           |
| Marnes schisteuses et bancs calcaires du crétacé supérieur                           | 34.53          |
| Schiste avec grès  | 20.66          |
| Calcaires  | 1.76           |
| Surface totale   | 100.00         |

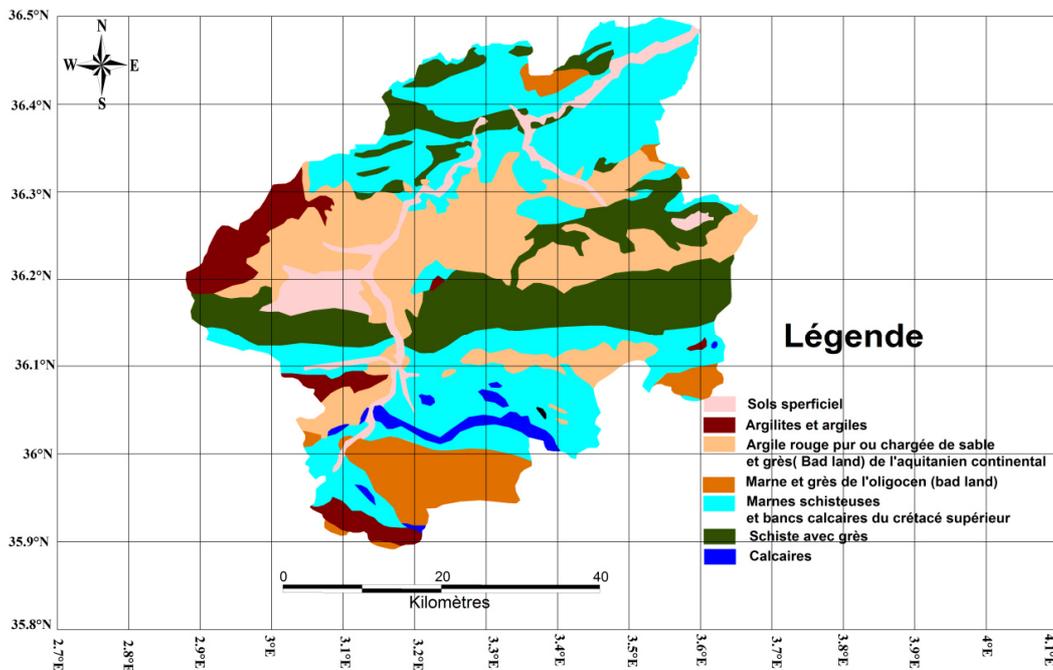


Figure (V.2) : Carte lithologique du bassin versant de l'Oued Isser (Zeggane, 2017) [modifiée]

Du point de vue végétation, le bassin est caractérisé par l'absence d'une couverture végétale arbustive dense, ce qui favorise le phénomène de l'érosion et provoque des dégâts tels que les pertes des terres cultivables et l'envasement du barrage de Koudiat Acerdoune.

### V.3.2 Topographie

Du point de vue altimétrie, le bassin est caractérisé par des altitudes allant de 217 à 1791m avec un dénivelé spécifique (produit de l'indice de pente globale et la racine carré de

la surface) de 279 m, soulignant un relief accidenté et peut être qualifié de fort (figure V.3). Les pentes inférieures à 6 % représentent 22% de la surface totale du bassin dont une grande partie se trouve dans la zone centrale. Les pentes allant de 6 à 12 % et de 12 à 18 % représentent 23 % et 20 % de la surface totale du bassin, respectivement. Les pentes raides supérieures à 18 % représentent 35 % de l'ensemble du bassin et occupent principalement la partie marneuse et marno-calcaire située au nord du bassin. Pour le bassin versant de l'Oued Isser, la pente moyenne est de l'ordre de 5 %, Ce qui implique une pente assez forte et par conséquent une prédominance de l'écoulement de surface et par conséquent l'érosion et le transport solide.

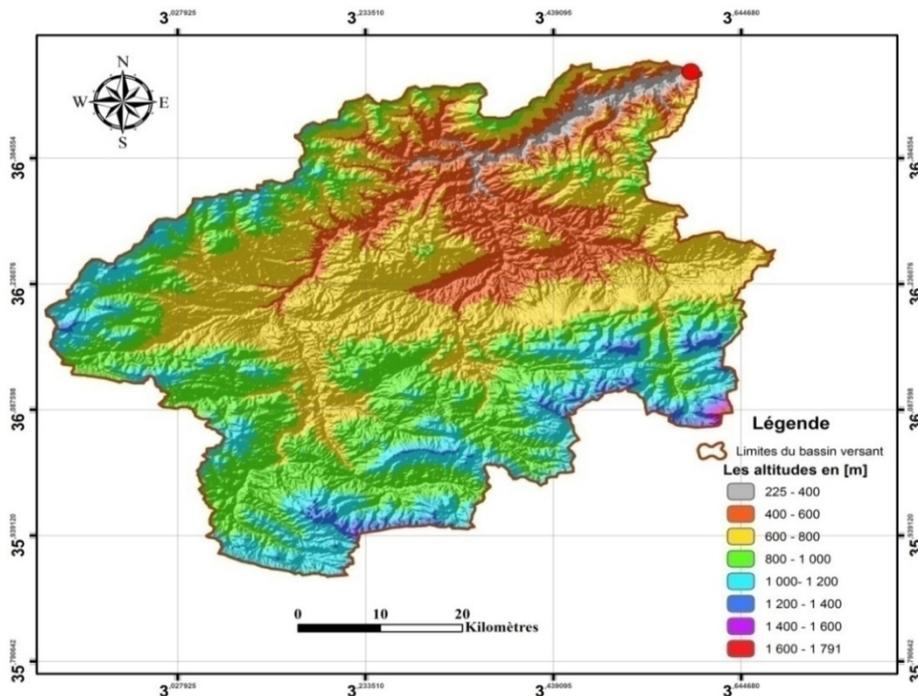


Figure (V.3) : Carte d'altimétrie du bassin versant de l'Oued Isser

### V.3.3 Climat

La région de l'oued Isser est soumise au climat de l'atlas tellien, présentant une continentalité qui croit très rapidement en s'éloignant de la mer. Le climat se caractérise par des étés secs et chauds et des hivers froids et humides, et une précipitation moyenne annuelle de 490mm marquée par une irrégularité aussi bien saisonnière qu'interannuelle.

### V.3.3.1 Température

Le bassin est soumis à un climat méditerranéen intermédiaire. Entre le climat Tellien de montagne pluvieux et à l'amplitude thermique faible, avec des chutes de neige et le climat Tellien de plaine plus sec relativement chaud et présentant de forts écarts de température. Le bassin versant de l'oued Isser est caractérisé par une température relativement humide d'octobre au mois d'Avril et sèche de Mai à Septembre. La température moyenne annuelle à Beni Slimane (altitude 600m) est de l'ordre de 14°C. Le tableau (V.2) résume les températures maximales, moyennes et minimales enregistrées à la station de Beni Slimane.

La variation de la température moyenne mensuelle montre que les valeurs les plus élevées sont observées pendant l'été (Juillet- Août) avec des températures allant de 23.6°C et 27.6°C. Les valeurs les plus basses, sont de 3.4 à 4.3°C, observées durant la période hivernale (Décembre – Janvier – Février). La valeur de la température moyenne annuelle est de 16.8°C.

Tableau (V.2) : Températures maximales, moyennes et minimales enregistrées à la station Beni Slimane

| Mois   | S    | O    | N    | D    | J    | F    | M    | A    | M    | J    | J    | A    |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Tmin°C | 15.3 | 11.4 | 7.0  | 4.3  | 3.4  | 3.4  | 5.1  | 7.0  | 10.8 | 15.4 | 17.9 | 18.8 |
| Tmax°C | 30.0 | 24.8 | 18.8 | 14.1 | 13.2 | 14.6 | 18.0 | 20.2 | 25.9 | 32.0 | 36.1 | 36.4 |
| Tmoy°C | 22.6 | 18.0 | 13.0 | 9.2  | 8.3  | 9.0  | 11.4 | 13.5 | 18.3 | 23.6 | 27.0 | 27.6 |

### V.3.3.2 Evapotranspiration ETP

Une forte évapotranspiration potentielle est enregistrée sur les mois d'été et le début du printemps qu'est supérieur à 150 mm, quant aux mois de l'hiver, elle inférieure à 100mm avec valeur minimale observée au mois de janvier. La valeur moyenne annuelle est de l'ordre de 1405mm. Le tableau (V.3) résume les valeurs de l'ETP enregistrées à la station de La Traille 90408.

Tableau (V.3) : ETP à la station de la Traille en mm

| Mois      | Station La Traille 90408 |
|-----------|--------------------------|
| Septembre | 144.81                   |
| Octobre   | 95.64                    |
| Novembre  | 53.30                    |
| Décembre  | 37.83                    |
| Janvier   | 40.41                    |
| Février   | 39.11                    |
| Mars      | 89.45                    |

|         |         |
|---------|---------|
| Avril   | 122.81  |
| Mai     | 162.95  |
| Juin    | 198.41  |
| Juillet | 221.53  |
| Aout    | 199.08  |
| Total   | 1405.33 |

L'évapotranspiration passe de 37.83mm au mois de Décembre à 221.53mm au mois de Juillet. L'ETP annuelle représente environ trois fois le total pluviométrique du bassin versant de l'Oued Mina. Le bilan hydrique est généralement négatif, ce qui limite les possibilités de boisement ainsi que les rendements céréaliers hors irrigation

### V.3.3.3 Gelée

La gelée est enregistrée du mois de novembre au mois de mai, le nombre moyen de jour par mois enregistré aux stations de Tablat est donné dans le tableau (V.4). Les valeurs maximales sont enregistrées du mois décembre au mois de mars. Pour les autres mois la gelé est nulle.

Tableau (V.4) : Nombre de jours de Gelée aux stations de Tablat (ANRH, 2001)

|                   | Code | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | Tot |
|-------------------|------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|
| Station de Tablat | 450  | 0 | 0 | 1 | 5 | 6 | 3 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19  |

### V.3.3.4 Vent

Les vents chargés d'humidité sont de direction Nord-Sud à Nord-Ouest, Sud- Est alors que les vents desséchant sont de direction Sud-Nord. En Eté, les vents du Sud, secs et froids en Hiver, deviennent très chauds, très poussiéreux et très desséchants et exposant le sol à une grande érosion éolienne par l'apparition de crevasses dans la région la plus sensible qui est la zone des marnes. Le sirocco souffle sur tout le bassin, le nombre moyen de jour de sirocco par an enregistré au niveau la station de Beni Slimane est donnée par le tableau (V.5).

Tableau (V.5) : Nombre de jours de sirocco à la station de Beni Slimane (ANRH, 2001)

|                      | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | Tot |
|----------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|
| Station Beni Slimane | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 5 | 6 | 7 | 8 | 32  |

### V.3.4 Caractéristiques hydromorphométriques

Plusieurs caractéristiques hydromorphométriques du bassin et sous bassins versant de l'Oued Isser ont été déterminées (Réménieras G., 1986 ; Achite M., 1997 ; Ghernaout, 2014) à savoir :

- La surface  $A$  ( $\text{Km}^2$ ) et le périmètre  $P$  ( $\text{Km}$ );
- La longueur du cours d'eau principal  $L_{cp}$  ( $\text{Km}$ );
- La densité de drainage  $Dd$  ( $\text{Km}/\text{Km}^2$ ) qui est définie comme étant le rapport entre la longueur totale de tous les talwegs du bassin et la surface totale.
- Le temps de concentration  $T_c$  (h) qui est définit comme étant le temps que met la particule d'eau la plus éloignée pour arriver à l'exutoire. Il peut être calculé par l'ancienne formule de Guiandotti (1937).
- L'indice de compacité  $K_c$  qui est définit comme étant le rapport entre le périmètre du bassin et la circonférence du cercle ayant la même superficie que la bassin. Ce dernier traduit la forme du bassin versant; Il se rapproche de 1 pour un bassin ramassé et croit d'autant plus que la compacité diminue. Cet indice a également une certaine influence sur l'écoulement, il détermine dans une certaine mesure l'allure de l'hydrogramme de crue.
- Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius qui est une transformation purement géométrique du bassin en un rectangle de longueur  $L$  et de largeur  $l$  ayant le même périmètre et la même superficie. Les courbes de niveaux deviennent des droites parallèles aux petits cotés du rectangle, et l'exutoire est l'un de ces petits cotés. Ce dernier permet de montrer la répartition des pentes et leur impact sur le ruissellement des eaux et de situer les zones d'accélération et de ralentissement. Il permet également de comparer les bassins versant entre eux de point de vue de l'écoulement.
- La courbe hypsométrique qui donne le portrait le plus précis de l'élévation d'un bassin. Cette dernière n'est qu'une représentation de la distribution statistique des altitudes (tableau V.6) sur l'ensemble du bassin versant (ou sous bassin) portant en abscisse les surfaces partielles et en ordonnée les altitudes correspondantes. A partir de cette courbe (figure V.9), on peut tirer les différentes caractéristiques du relief tel que Les altitudes maximale  $H_{\max}$ , minimale  $H_{\min}$ , moyenne  $H_{\text{moy}}$  et celles correspondant à 5%, 50% et 95% de la surface totale ainsi que la dénivelée ( $D=H_{5\%}-H_{95\%}$ ).

L'indice de pente globale  $I_g$  qui est définit comme étant le rapport entre la dénivelée et la longueur du rectangle équivalent et qui sert à classer le relief d'un bassin.

Tableau (V.6) : Répartitions altimétriques du bassin versant de l'Oued Isser au droit du barrage de Koudiet Acerdoune

| Bassin   | Altitudes (m) | SP (Km <sup>2</sup> ) | SP (%) | SC (%) |
|--|---------------|-----------------------|--------|--------|
| SB contrôlé par le barrage de Koudiet Asserdoune | 225-400       | 59.325                | 2.13   | 2.13   |
|  | 400-600       | 416.481               | 14.96  | 17.09  |
|  | 600-800       | 952.249               | 34.19  | 51.28  |
|  | 800-1000      | 826.112               | 29.66  | 80.94  |
|  | 1000-1200     | 447.669               | 16.08  | 97.02  |
|  | 1200-1400     | 76.365                | 2.74   | 99.76  |
|  | 1400-1600     | 5.564                 | 0.20   | 99.96  |
|  | 1600-1791     | 1.236                 | 0.04   | 100.00 |
| Somme  | /             | 2785                  | 100.00 |        |

SP : Surfaces partielles, SC : Surfaces cumulées, SB : Sous bassin

Les résultats de calculs des différents paramètres cités plus haut sont illustrés dans les tableaux (V.7). On remarque que plus de 48% de la surface totale est située au-dessus de l'altitude 800m. Ceci montre que notre bassin est situé dans une région montagneuse. Pour un périmètre 307.3km et une superficie de 2785km<sup>2</sup>, le coefficient de compacité est égale à 1.63, valeur qui dénote une forme plus ou moins allongée. Elle implique par conséquent un temps de concentration lent. Le bassin de l'Isser montre des caractères morphométriques assez particuliers favorisant à priori le ruissellement.

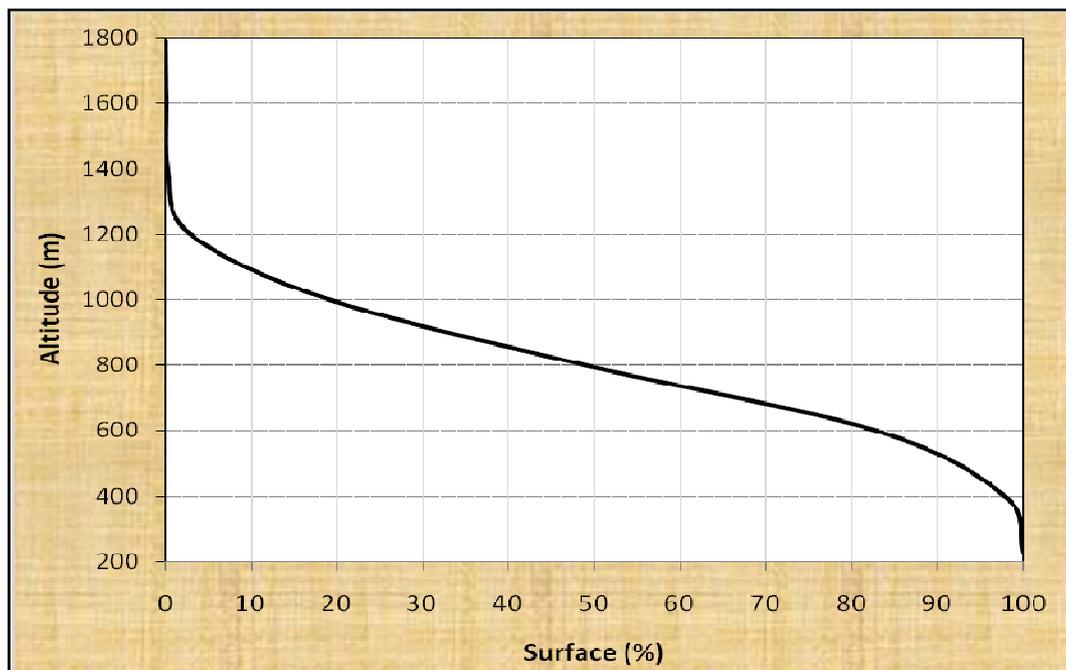


Figure (V.4): Courbes hypsométriques du bassin versant de l'Oued Isser

Tableau (V.7) : Caractéristiques hydromorphométriques du bassin versant de l'Oued Isser au droit du barrage de Koudiat Acerdoune

| Caractéristiques       | Paramètres                        | Unité              | Symbole          | Barrage<br>Koudiat Acerdoune |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|------------------|------------------------------|
| Coordonnées Lambert    | Abscisse                          | m                  | X                | 580.150                      |
|                        | Ordonnée                          | km                 | Y                | 354.700                      |
|                        | Altitude                          | m                  | Z                | 217.00                       |
| Morphologie du bassin  | Surface du bassin versant         | km <sup>2</sup>    | A                | 2785                         |
|                        | Perimètre du bassin versant       | km                 | P <sub>r</sub>   | 307.3                        |
|                        | Indice de compacité               | -                  | Kc               | 1.63                         |
|                        | Longueur du rectangle équivalent  | km                 | L <sub>re</sub>  | 132.61                       |
|                        | Largeur du rectangle équivalent   | km                 | l <sub>re</sub>  | 21                           |
| Relief                 | Altitude maximale                 | m                  | H <sub>max</sub> | 1791                         |
|                        | Altitude minimale                 | m                  | H <sub>min</sub> | 217                          |
|                        | Altitude moyenne                  | m                  | H <sub>moy</sub> | 787                          |
|                        | Indice de pente globale           | m/km               | I <sub>g</sub>   | 5.28                         |
|                        | Pente moyenne                     | %                  | I <sub>m</sub>   | 5.0                          |
| Hydrographie du bassin | Longueur du cours d'eau principal | km                 | L <sub>p</sub>   | 141                          |
|                        | Densité de drainage               | km/km <sup>2</sup> | D <sub>d</sub>   | 3.25                         |
|                        | Temps de concentration            | h                  | T <sub>c</sub>   | 32                           |

### **V.4 Conclusion :**

En conclusion de ce chapitre, on peut dire que le comportement hydrologique du bassin versant de l'Oued Isser est lié à plusieurs facteurs physique, lithologique, géomorphologique et hydraulique. Les principaux paramètres du milieu physique analysés dans ce chapitre font du bassin une géostructure plus ou moins complexe le rendant très sensible au processus d'érosion et du transport solide. Cette complexité s'explique en grande partie par la grande variété des faciès géologiques, des formes topographiques, des systèmes de pentes, du faible couvert végétal, et des nuances climatiques. Les formations de sol imperméable (marneux), les terrains accidentés (supérieures à 6%) et la végétation qui couvrent 45%, 78% et environ 90% (sols nus dépourvus de végétation) de la surface totale du bassin versant respectivement, favorisent l'écoulement de surface et par conséquent l'érosion et le transport solide.

# *Chapitre VI*

*Analyse et quantification du  
transport solide*

### VI.1 Introduction

La mobilisation des matériaux solides sur les versants et leur transport éventuel par les cours d'eau, représentent deux phénomènes distincts, mais liés entre eux. Le débit solide des sédiments en suspension  $Q_s$  qui transitent une section d'écoulement est calculée par le produit de la concentration des sédiments en suspension  $C$  et du débit liquide  $Q$  durant une période de temps donné :

$$Q_s = Q_l \times C \quad (\text{VI.1})$$

La concentration des sédiments en suspension  $C_s$  et le débit liquide évoluent en général suivant un modèle de puissance  $Y = aX^b$  (Etchanchu et al. 1986 Walling et al. 1981 ; Wood, 1977).

$$C_s = aQ_l^{b-1} \quad (\text{VI.2})$$

Une relation empirique, communément appelée courbe du transport solide (Campbell et al. 1940 ; Crawford, 1991) lie le débit solide au débit liquide :

$$Q_s = aQ^b \quad (\text{VI.3})$$

Où  $a$  et  $b$  sont des paramètres du bassin considéré et sont généralement estimés par régression linéaire des variables transformées en log. Le paramètre  $a$  pourrait traduire l'état du sol d'un bassin et son degré de saturation (Benkhaled et Remini, 2003 ; Bouanani, 2004) et l'exposant  $b$  pourrait être lié à la capacité érosive de la rivière ainsi qu'à l'augmentation de la disponibilité en sédiment en fonction du débit (Asselman, 2000).

Une approche consistant à rechercher un modèle puissance régressif pouvant mieux expliquer le débit solide par le débit liquide mesurés au niveau de la station hydrométrique de La Traille, pour différentes échelles temporelles (instantanées interannuelle, annuelle, mensuelle et saisonnière), a été employée dans ce chapitre. L'optimisation des ces courbes de transport solide a été validée par la comparaison des valeurs estimées aux valeurs observées afin de mieux cerner la variation interannuelle et intra-annuelle des apports solides fins et grossiers, véhiculés par l'Oued Isser au niveau de la station hydrométrique de la traille, et déposés dans la retenue du barrage de Koudiat Acerdoune durant (et même en dehors) la période de disponibilité débits liquides (1970/71 à 1984/85) .

### VI.2 Données utilisées

Les données disponibles sont constituées par les débits liquides moyens journalier ( $m^3/s$ ), les débits liquides instantanées ( $m^3/s$ ) et les concentrations des sédiments en suspension instantanées (g/l) prélevés au niveau de la station hydrométrique de la traïlle (090408) par l'Agence Nationale des ressources Hydraulique (ANRH) d'Alger.

Ces données couvrent une période allant de 1971/1972 à 1984/1985, soit 14 années pour les couples (débit liquide – concentration des Sédiments) et de 1970/1971 à 1984/1985, soit 15 années pour les débits liquides moyens journaliers.

L'échantillonnage uni ponctuel est la méthode d'échantillonnage systématique du transport solide sur la plupart des cours d'eau Algériens. L'analyse de laboratoire des échantillons prélevés est effectuée selon les procédés classiques à savoir filtrage, séchage à l'étuve et pesée. Le tableau (VI.1) montre la variation du nombre de mesures du transport solide en suspension.

Tableau (VI.1) : Nombre de valeurs observées par station et années

| Echelle temporelle             | Station             |        |        |
|--------------------------------|---------------------|--------|--------|
| Années                         | La Traïlle (090408) |        |        |
| Coordonnées                    | X (Km)              | Y (Km) | Z (m)  |
|                                |                     | 559.25 | 343.25 |
| 1971/1972                      | 500                 |        |        |
| 1972/1973                      | 321                 |        |        |
| 1973/1974                      | 135                 |        |        |
| 1974/1975                      | 55                  |        |        |
| 1975/1976                      | 95                  |        |        |
| 1976/1977                      | 46                  |        |        |
| 1977/1978                      | 67                  |        |        |
| 1978/1979                      | 20                  |        |        |
| 1979/1980                      | 186                 |        |        |
| 1980/1981                      | 28                  |        |        |
| 1981/1982                      | 135                 |        |        |
| 1982/1983                      | 87                  |        |        |
| 1983/1984                      | 70                  |        |        |
| 1984/1985                      | 74                  |        |        |
| Totalité des valeurs observées | <b>1819</b>         |        |        |
| Moyenne                        |                     |        |        |

Tableau (VI.2) : Nombre de valeurs observées par saison et mois

| Echelle temporelle             |           | Station     |     |
|--------------------------------|-----------|-------------|-----|
| Saison                         | Mois      | La Traille  |     |
| Automne                        | Septembre | 149         | 420 |
|                                | Octobre   | 106         |     |
|                                | Novembre  | 165         |     |
| Hiver                          | Décembre  | 216         | 665 |
|                                | Janvier   | 196         |     |
|                                | Février   | 253         |     |
| Printemps                      | Mars      | 284         | 621 |
|                                | Avril     | 207         |     |
|                                | Mai       | 130         |     |
| Eté                            | Juin      | 62          | 113 |
|                                | Juillet   | 28          |     |
|                                | Août      | 23          |     |
| Totalité des valeurs observées |           | <b>1819</b> |     |

On constate que dans le bassin versant de l'Oued Isser, la concentration des sédiments en suspension se distingue bien au cours des mois pluvieux. Le mois qui engendre le plus grand nombre de valeur de concentration est le mois de Mars. Le plus petit nombre se situe au mois d'Aout. A l'échelle annuelle, ce sont les années hydrologiques 1971/1972 et 1972/1973 qui possèdent le plus grand nombre de valeurs de concentration. La diminution du nombre de mesures pour les autres années et la suspension de mesures à partir 1985 reste mal expliquée.

La figure V.1 est représentative de 1819 valeurs instantanées de concentrations des sédiments et de débits liquides observées sur l'Oued Isser au niveau de la station hydrométrique de La Traille durant la période 1971/72–1984/85. Cette figure anticipe déjà sur la dispersion des points lors de l'analyse de la relation : concentration - débit liquide. Les 1819 seront traités en tant que populations à partir de lesquelles plusieurs types d'échantillons seront pris et analysés.

Les paramètres statistiques de la concentration  $C$  et des débits, liquide  $Ql$  et solide  $Qs$ , instantanés sont montrés dans le tableau (V.3).

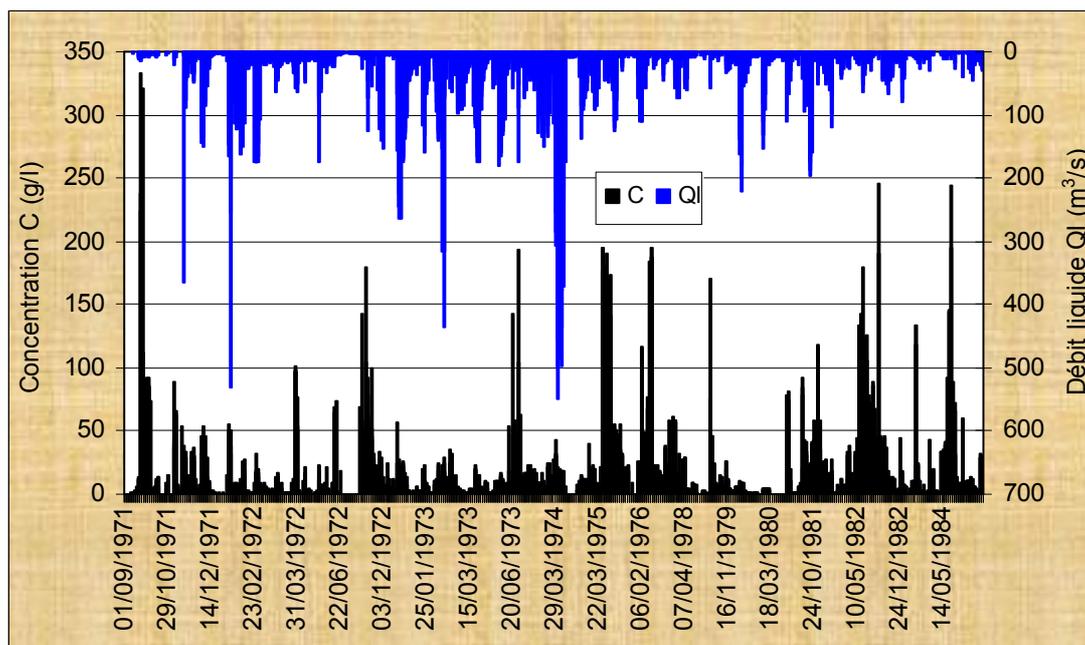


Figure (VI.1) : Chronologie des concentrations C et des débits liquides Ql, instantanés observés au niveau de la station de la Traille durant la période d'étude (1971/72 à 1984/85)

Tableau (VI.3) : Paramètres statistiques de la concentration C, du débit liquide Ql et débit solide Qs

| Paramètres statistiques | Ql (m <sup>3</sup> /s) | Qs (kg/s)  | C (g/L)    |
|-------------------------|------------------------|------------|------------|
| Nombres de valeurs      | 1819                   | 1819       | 1819       |
| Minimum                 | 0.012                  | 0.001      | 0.0001     |
| Maximum                 | 549.00                 | 10069.617  | 332.600    |
| Moyenne x               | 32.628                 | 712.983    | 17.196     |
| Variance                | 3292.90294             | 2647482.16 | 1047.02235 |
| Ecart-type              | 57.3838212             | 1627.10853 | 32.3577247 |
| Coef de variation       | 1.7587084              | 2028211325 | 1.88168767 |
| Coef d'asymétrie        | 3.98605693             | 3.34651422 | 4.00325813 |

### VI.3 Etude du transport solide en suspension

#### VI.3.1 Relation concentration C - débit liquide Ql

La mise en graphe des données, de concentration des sédiments en suspension C et du débit liquide Ql instantanés, enregistrées au niveau de la station de La Traille, durant la période 1971/1972–1984/1985, montre une dispersion considérable en coordonnées linéaires et même logarithmiques. L'essai des points n'est pas linéaire.

La variation verticale des points semble plus grande à la gauche qu'à la droite, et il est difficile voir impossible de concevoir un modèle linéaire.

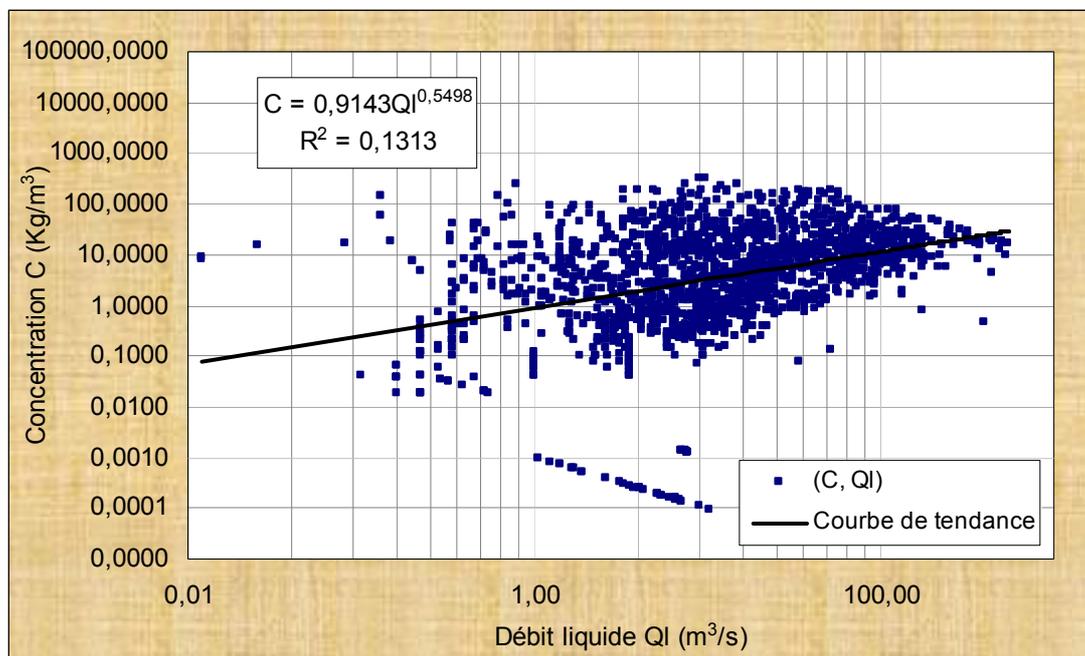


Figure (VI.2) : concentration C–débit liquide Ql, instantanés interannuelles.

Cette figure montre des variations significatives de la concentration pour des débits presque constants d'une part, et d'autre part, elle montre que les plus faibles débits liquides peuvent véhiculer les mêmes concentrations que les grands débits liquides.

### VI.3.2 Relations débit solide – débit liquide

Dans le but de l'homogénéisation des données, nous avons recherché des modèles régressifs entre deux paramètres de mesure le débit liquide et le débit solide. A cet effet, les données sont mises en graphe et leur allure oriente le choix du modèle régressif. L'approche consiste au traitement des valeurs des débits liquides instantanés (Ql inst) et des débits solides instantanés (Qs inst ) pour différentes échelles temporelles.

#### VI.3.2.1 Relation interannuelle (Ensemble des données)

La figure (VI.3) représente la courbe de transports solide en suspension et les données de 14 années d'enregistrements effectués au niveau des stations hydrométriques de la traille. Le tableau (VI.4) résume les valeurs des paramètres a et

b de la relation en puissance  $Q_s = aQ_l^b$ , la valeur de coefficient de détermination  $R^2$  et la taille de l'échantillon n.

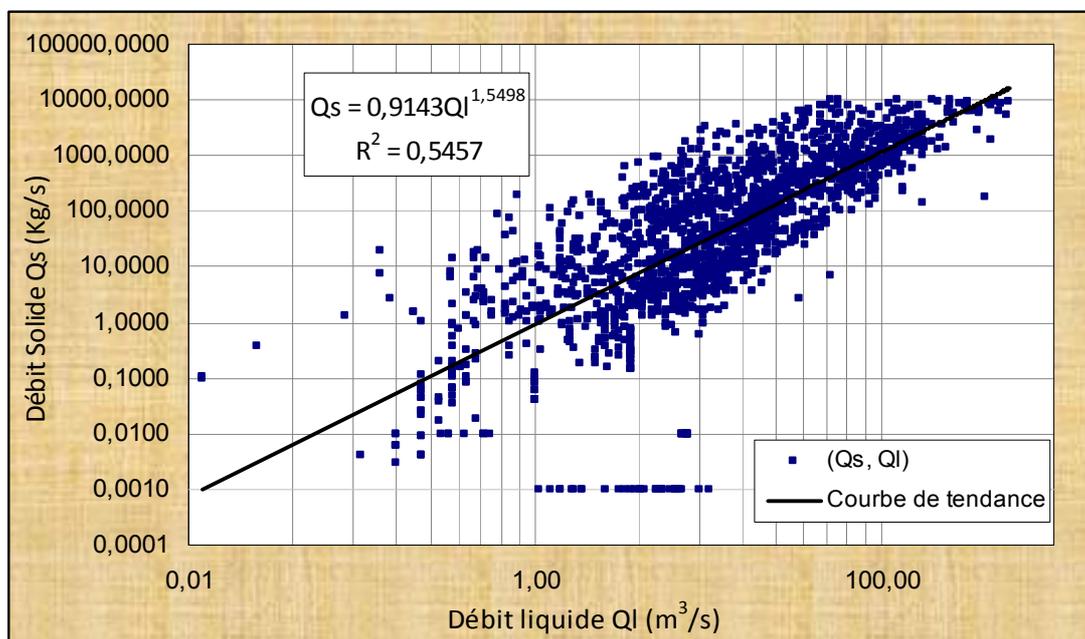


Figure (VI.3) : Relation interannuelle du débit liquide - débit solide

Tableau (VI.4) : Relations obtenues à l'échelle instantanée interannuelle ( $Q_s = aQ_l^b$ )

| Jour           | n    | a      | b      | $R^2$  |
|----------------|------|--------|--------|--------|
| Tous les jours | 1819 | 0.9143 | 1.5498 | 0.5457 |

### VI.3.2.2 Relations annuelles

A l'échelle annuelle, seules les courbes du transport solide des années (1971/1972), (1977/1978), (1980/1981) et (1984/1985) sont données en figures (VI.4) et (VI.5). Les autres courbes annuelles sont illustrées dans le tableau (VI.5).

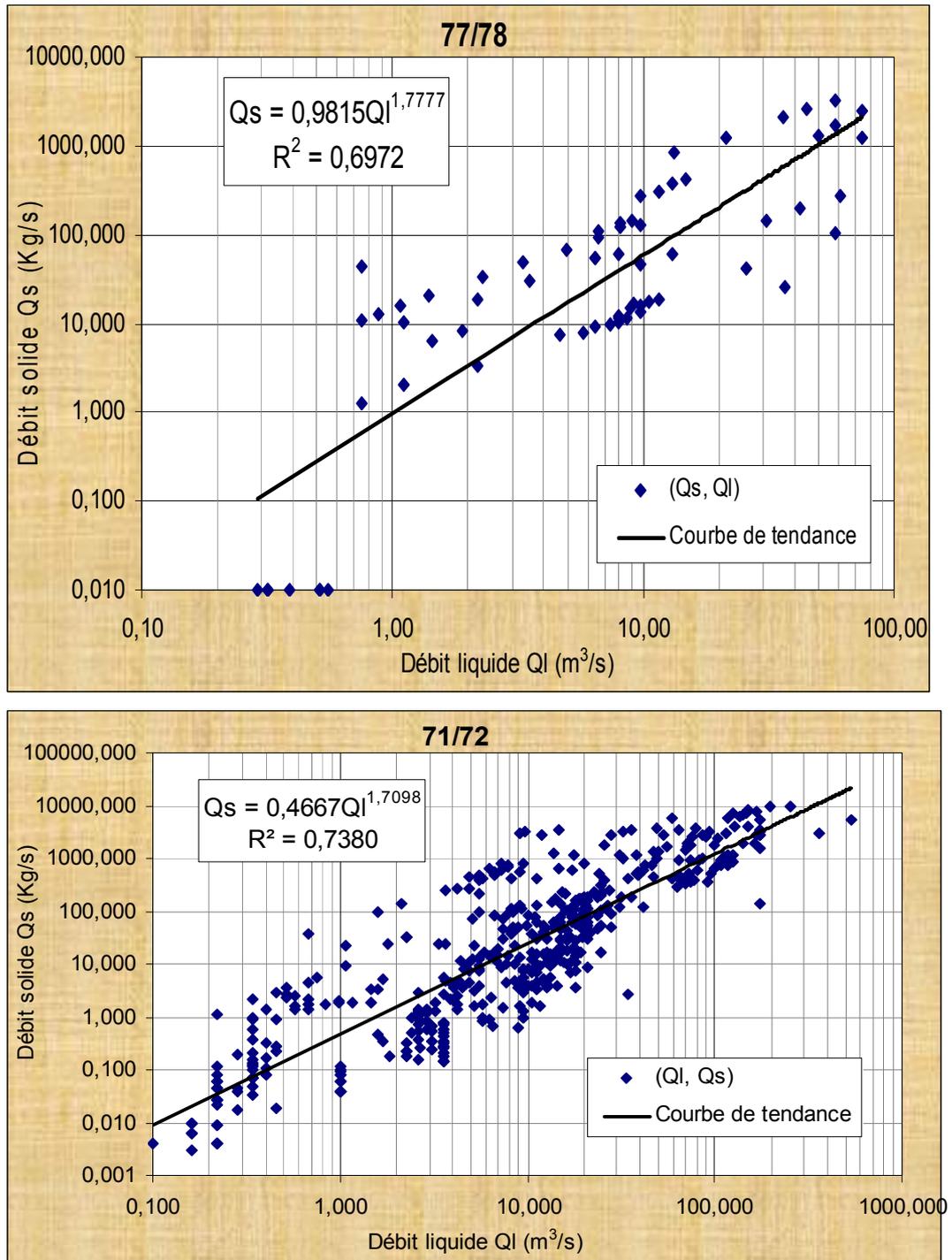


Figure (VI.4) : Relations annuelles du débit liquide - débit solide «71/72 et 77/78 »

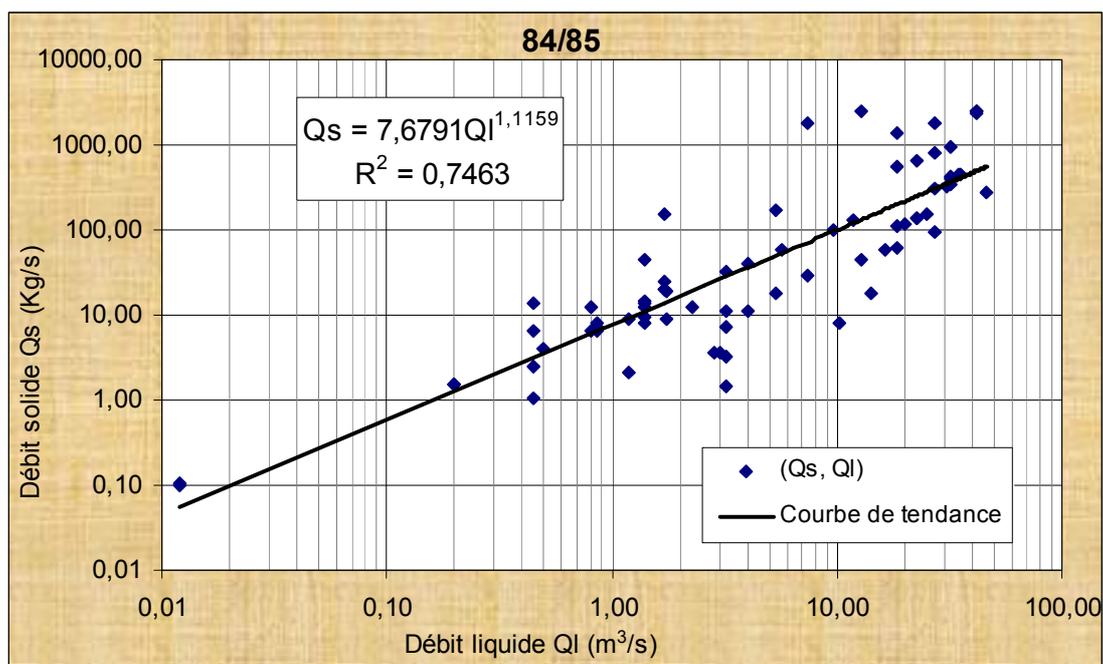
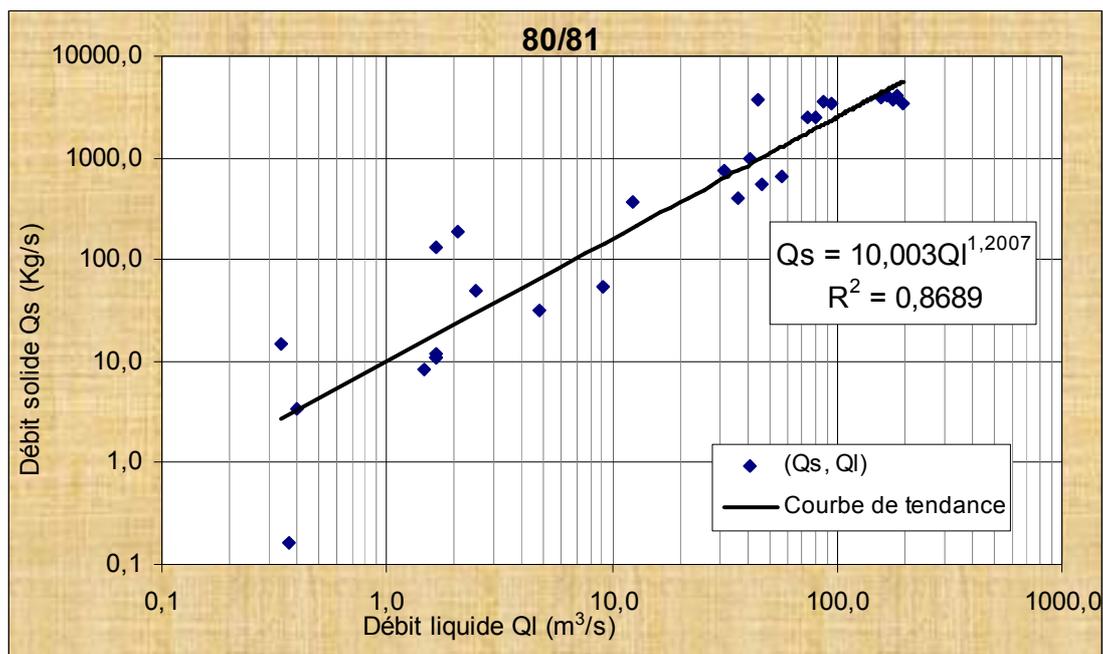


Figure (VI.5) : Relations annuelles du débit liquide - débit solide «80/81 et 84/85 »

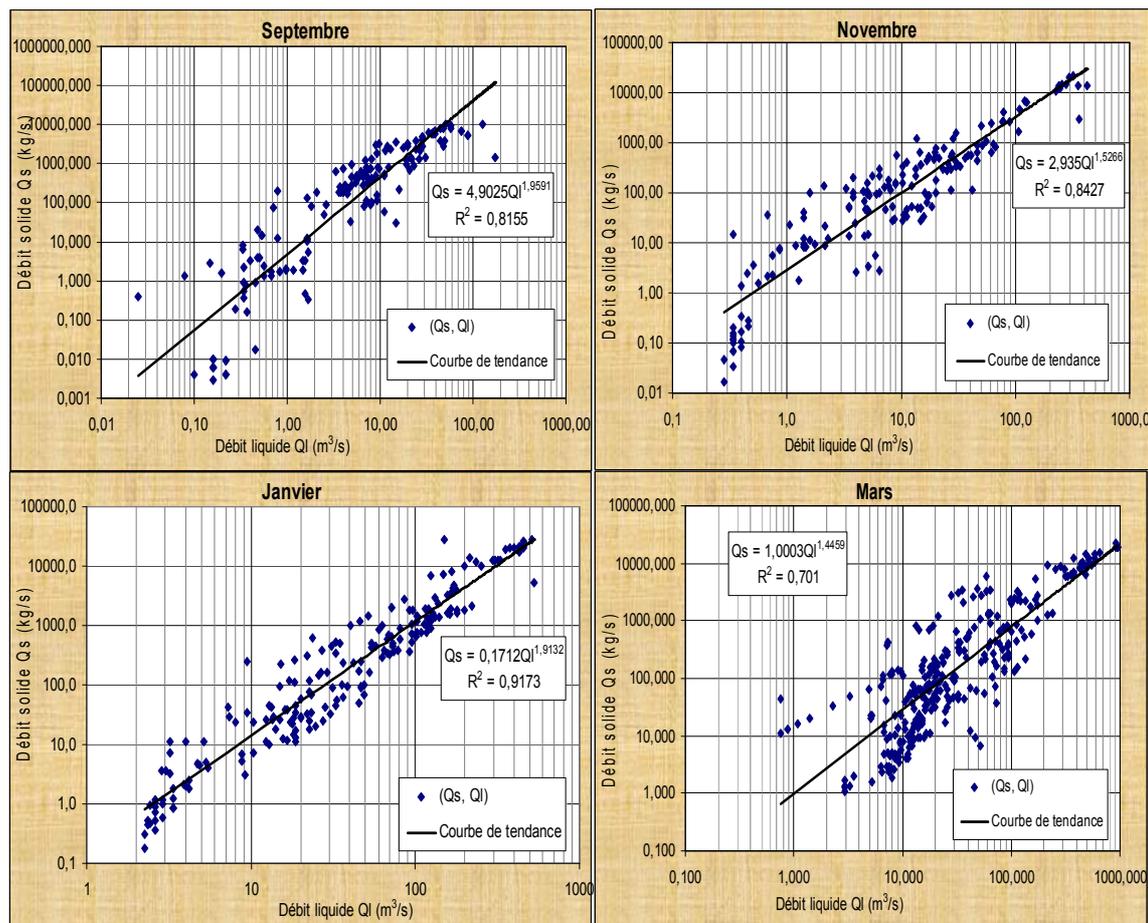
Les valeurs des paramètres a et b de la relation en puissance varient d'une année à une autre dans le bassin versant d'Oued Isser. Le paramètre a varie de 0.467(année 1971/1972) à 10.00 (1980/1981). L'exposant b varie dans une gamme étroite dans le bassin versant d'Oued Isser, et est compris entre 1.116 (année 1984/1985) et 3.129 (année 1975/1976).

Tableau (VI. 5) : Modèles obtenus à l'échelle annuelle ( $Q_s=aQI^b$ )

| Années    | n   | a     | b     | $R^2$ |
|-----------|-----|-------|-------|-------|
| 1971/1972 | 500 | 0.467 | 1.710 | 0.74  |
| 1972/1973 | 321 | 1.806 | 1.309 | 0.68  |
| 1973/1974 | 135 | 0.035 | 2.168 | 0.531 |
| 1974/1975 | 55  | 0.569 | 1.734 | 0.61  |
| 1975/1976 | 95  | 0.014 | 3.129 | 0.50  |
| 1976/1977 | 46  | 8.531 | 1.140 | 0.06  |
| 1977/1978 | 67  | 0.982 | 1.778 | 0.70  |
| 1978/1979 | 20  | 0.367 | 1.483 | 0.75  |
| 1979/1980 | 186 | 0.264 | 1.733 | 0.44  |
| 1980/1981 | 28  | 10.00 | 1.201 | 0.87  |
| 1981/1982 | 135 | 3.092 | 1.506 | 0.53  |
| 1982/1983 | 87  | 4.951 | 1.154 | 0.52  |
| 1983/1984 | 70  | 3.005 | 1.244 | 0.40  |
| 1984/1985 | 74  | 7.679 | 1.116 | 0.75  |

A l'échelle intra-annuelle, seuls les graphiques des mois de septembre, novembre, janvier et mars sont donnés en figures (VI.6). Les autres courbes mensuelles sont illustrées dans le tableau (VI.6).

Les valeurs des paramètres a et b de la relation en puissance varient d'un mois à un autre dans le bassin versant d'Oued Isser. Le facteur a varie de 0.007 (mois de Juillet) à 4.902 (mois de septembre). L'exposant b varie dans une gamme étroite et est compris entre 0.925 (mois d'Aout) et 2.134 (mois de Juin).



Figures (VI.6) : Relations intra annuelles du débit liquide - débit solide «Sep., Nov., Jan. et mars »

Tableau (VI.6) : Modèles obtenus à l'échelle intra annuelle ( $Q_s = a Q_l^b$ ).

| Mois      | n   | a     | b     | $R^2$ |
|-----------|-----|-------|-------|-------|
| Septembre | 149 | 4.903 | 1.959 | 0.82  |
| Octobre   | 106 | 2.517 | 1.816 | 0.73  |
| Novembre  | 165 | 2.935 | 1.527 | 0.84  |
| Décembre  | 216 | 1.588 | 1.539 | 0.82  |
| Janvier   | 196 | 0.171 | 1.913 | 0.92  |
| Février   | 253 | 0.471 | 1.654 | 0.75  |
| Mars      | 284 | 1.00  | 1.446 | 0.70  |
| Avril     | 207 | 0.468 | 1.660 | 0.57  |
| Mai       | 130 | 1.700 | 1.505 | 0.51  |
| Juin      | 62  | 0.573 | 2.413 | 0.54  |
| Juillet   | 28  | 0.070 | 1.238 | 0.86  |
| Aout      | 23  | 0.184 | 0.925 | 0.46  |

### VI.3.2.4 Relations saisonnières

La figure (VI.7) illustre les relations débit liquide - débit solide instantanés. Les résultats sont récapitulés dans le tableau (VI.7).

Les valeurs des paramètres a et b de la relation en puissance varient peu d'une saison à une autre. Le facteur a varie de 0.041 (saison de Printemps) à 3.3668 (saison d'automne). L'exposant b présente des valeurs très rapprochées entre elles et est compris entre 0.1282 (saison d'été) et 0.7998 (saison d'Hivers).

Tableau (VI.7) : Modèles obtenus à l'échelle saisonnière

| Saison    | n   | a      | b      | R <sup>2</sup> |
|-----------|-----|--------|--------|----------------|
| Automne   | 420 | 3.3668 | 1.7068 | 0.7816         |
| Hivers    | 665 | 0.6926 | 1.6152 | 0.7998         |
| Printemps | 621 | 0.041  | 1.4574 | 0.6180         |
| été       | 113 | 0.3179 | 2.1116 | 0.1282         |

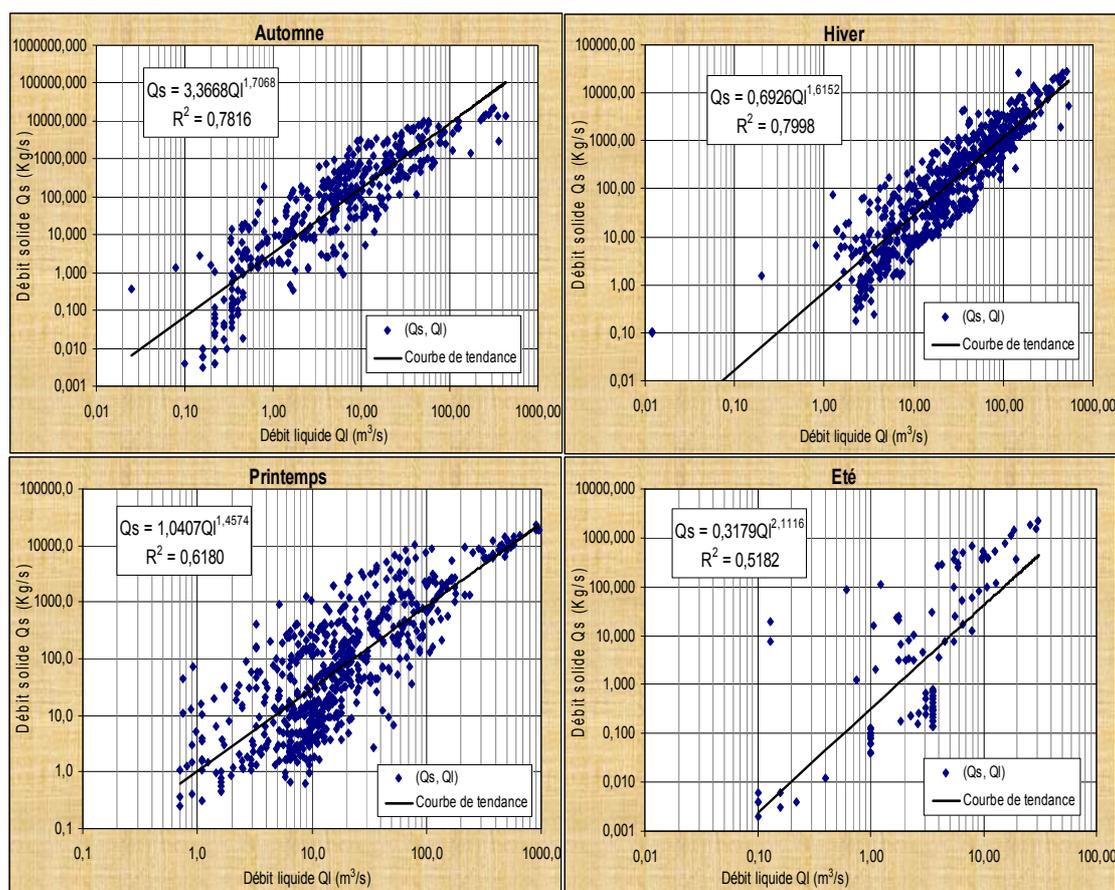


Figure (VI.7) : Relations saisonnières du débit liquide - débit solide

## VI.4 Quantification des apports solides

L'étude de la relation débit liquide - débit solide à différentes échelles temporelles montre que les corrélations sont meilleures à l'échelle intra annuelle (mensuelle), d'autant plus que la variation du transport solide en suspension est beaucoup plus importante aux échelles interannuelle et annuelle qu'à l'échelle intra annuelle.

L'optimisation des courbes de transport solide intra-annuelles a été validée par la comparaison des valeurs estimées aux valeurs observées (Figure 9).

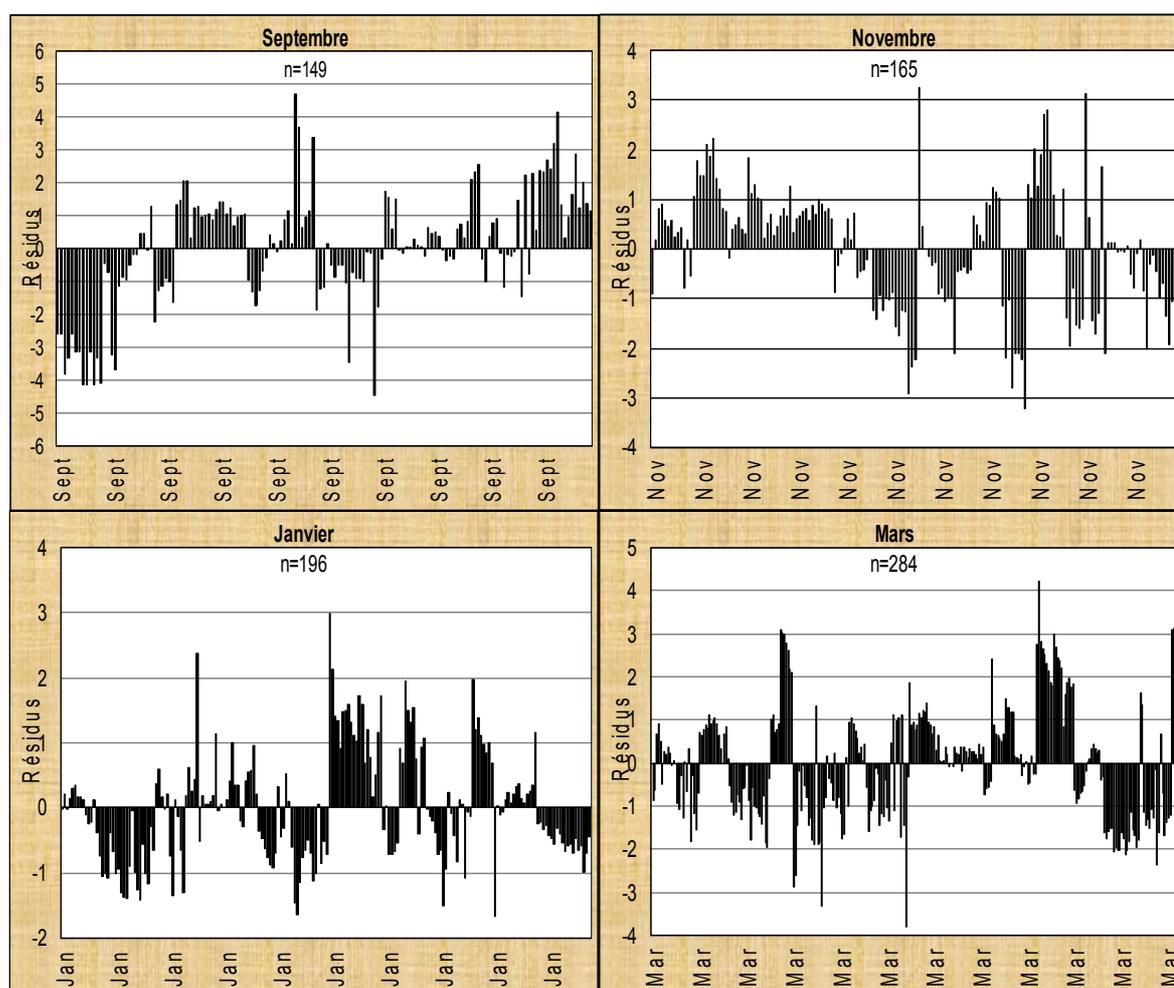


Figure (VI. 8) : Résidus de la régression à l'échelle intra-annuelle (mois : Sep., Nov., Jan. et fév.)

Les écarts entre les séries logarithmiques estimées et celles observées (débits solides observés - débits solides estimés) au niveau des deux stations hydrométriques indiquent que les erreurs associées au prélèvement et à la dispersion de données sont à un niveau plus ou moins acceptable.

Ces relations nous permettent de quantifier les apports solides véhiculés par l'Oued Isser au niveau de la station de la Traille et de prévoir les quantités déposées

dans la retenue du barrage de Koudiat Acerdoune en service depuis 2013, étant donné la disponibilité des débits moyens journaliers de 1970/1971 à 1984/1985. Les bilans annuelle et mensuelle des apports liquides et solides sont donnés dans les tableaux (VI.8) et (VI.9) et bien illustrés dans les figures (VI.10) et (VI.11).

L'Oued Isser véhicule au niveau de la station hydrométrique de la Traille près de 148.468 Mm<sup>3</sup> d'eau en moyenne par an. Ces apports liquides ramènent en moyenne près de 2.107 MT de sédiments en suspension, soit un apport surfacique de 819.967 T/Km<sup>2</sup>/an (tableau VI.8, colonnes 2, 3, 4, 5 et 6).

L'Oued Isser véhicule au niveau de la station hydrométrique de la Traille près de 12.372 Mm<sup>3</sup> d'eau en moyenne par mois. Ces apports liquides ramènent en moyenne près de 0.176 MT de sédiments en suspension par mois soit un apport surfacique de 68.331 T/Km<sup>2</sup>/mois (tableau VI.9, colonnes 2, 3, 4, 5 et 6).

Le cours d'eau supérieur de l'Oued Isser draine au droit de la station de la Traille une superficie de 2570 Km<sup>2</sup>. De la station hydrométrique de la Traille au barrage de Koudiat Acerdoune, les cours d'eau secondaires non jaugés drainent une superficie de 215 Km<sup>2</sup>. Si on considère que ce cours d'eau ramène en moyenne un apport solide surfacique identique à celui de la station de la Traille, on obtient les bilans des apports solides fins au niveau du barrage de Koudiat Acerdoune (tableaux VI.8 et VI.9, colonne 7).

En Algérie, seul le transport solide en suspension est mesuré et le transport solide charrié est pris égal à 30 % du transport solide en suspension (Gomer, 1994). Les tableaux (VI.8. et VI.9, colonnes 8, 9 et 10) montrent le bilan total des apports solides fins et grossiers au niveau du barrage de Koudiat Acerdoune. Le passage du MT en Mm<sup>3</sup> s'effectue en tenant compte de poids volumique des sédiments transportés 1.6 T/m<sup>3</sup>.

Les résultats obtenus sur les 15 années d'exploitation de la station hydrométrique de la Traille montrent qu'il existe une variation remarquable de l'apport solide tant sur les valeurs intra-annuelles (coefficient de variation égal à 1.453) que celles interannuelles (coefficient de variation égal à 1.533). L'apport solide surfacique du bassin versant de au droit du barrage de vaut 1065.957 T/Km<sup>2</sup>/an.

L'analyse des valeurs intra-annuelles montre que l'Automne participe avec 59% du transport solide annuel, alors que l'Hivers, le printemps et l'Eté participent chacune avec (24, 16 et 1%) respectivement. Cette variabilité s'explique par la

variation du couvert végétal durant l'année, par l'étalement de la période sèche et surtout par la nature des pluies d'Automne (pluies importantes agressives et orageuses). Le faible taux de transport solide en suspension d'hiver s'explique par le fait que la plus grande partie des particules solides ont été transportées par les premières crues d'automne, tandis ce que celui de l'Eté est due à l'absence quasi-totale de précipitation.

En admettant que ces résultats sont extrapolables au-delà de la période d'observation, la retenue de barrage de Koudiat Acerdoune d'une capacité initiale de stockage de  $640\text{Mm}^3$  reçoit donc 2.969 MT ( $1.855\text{Mm}^3$ ) de matériau solide annuellement, soit un taux de comblement de 0.30 %/an. Le barrage a accumulé 13MT soit  $8.12\text{Mm}^3$  en 2020, ce qui représente 1.27% de sa capacité. On prévoit l'accumulation de  $161.385\text{Mm}^3$  (25.22%) à l'horizon 2100,  $346.885\text{Mm}^3$  (54.20%) à l'horizon 2200, et un comblement total de la retenue à l'horizon 2358, soit une durée de vie de 345 ans.

## Chapitre VI : Analyse et quantification du transport solide

Tableau (VI.8) : Bilan annuel des apports liquides et solides

| ANNEE          | Apport Liqu     | Apport liqu    | TSS-station   | TSS-station    | Dégradation-TSS  | TSS-barrage   | TST-barrage   | TST-barrage   | Dégradation totale |
|----------------|-----------------|----------------|---------------|----------------|------------------|---------------|---------------|---------------|--------------------|
| an             | Mm3             | %              | MT            | %              | T/Km2/an         | MT            | MT            | Mm3           | T/Km2/an           |
| 1              | 2               | 3              | 4             | 5              | 6                | 7             | 8             | 9             | 10                 |
| 70/71          | 56,54           | 2,54           | 0,146         | 0,46           | 56,670           | 0,158         | 0,205         | 0,128         | 73,671             |
| 71/72          | 403,56          | 18,12          | 6,351         | 20,09          | 2471,255         | 6,882         | 8,947         | 5,592         | 3212,632           |
| 72/73          | 371,11          | 16,66          | 4,147         | 13,12          | 1613,801         | 4,494         | 5,843         | 3,652         | 2097,941           |
| 73/74          | 293,12          | 13,16          | 4,256         | 13,46          | 1656,041         | 4,612         | 5,996         | 3,747         | 2152,853           |
| 74/75          | 104,31          | 4,68           | 0,513         | 1,62           | 199,448          | 0,555         | 0,722         | 0,451         | 259,283            |
| 75/76          | 136,18          | 6,11           | 0,954         | 3,02           | 371,300          | 1,034         | 1,344         | 0,840         | 482,690            |
| 76/77          | 57,75           | 2,59           | 0,265         | 0,84           | 103,245          | 0,288         | 0,374         | 0,234         | 134,219            |
| 77/78          | 39,74           | 1,78           | 0,101         | 0,32           | 39,136           | 0,109         | 0,142         | 0,089         | 50,877             |
| 78/79          | 115,71          | 5,20           | 0,533         | 1,69           | 207,339          | 0,577         | 0,751         | 0,469         | 269,541            |
| 79/80          | 204,96          | 9,20           | 11,556        | 36,56          | 4496,562         | 12,523        | 16,280        | 10,175        | 5845,531           |
| 80/81          | 91,32           | 4,10           | 0,501         | 1,58           | 194,788          | 0,542         | 0,705         | 0,441         | 253,225            |
| 81/82          | 109,28          | 4,91           | 0,408         | 1,29           | 158,599          | 0,442         | 0,574         | 0,359         | 206,179            |
| 82/83          | 92,60           | 4,16           | 0,695         | 2,20           | 270,241          | 0,753         | 0,978         | 0,612         | 351,314            |
| 83/84          | 62,52           | 2,81           | 0,141         | 0,45           | 54,776           | 0,153         | 0,198         | 0,124         | 71,208             |
| 84/85          | 88,30           | 3,96           | 1,044         | 3,30           | 406,304          | 1,132         | 1,471         | 0,919         | 528,195            |
| <b>Moyenne</b> | <b>148,468</b>  | <b>6,667</b>   | <b>2,107</b>  | <b>6,667</b>   | <b>819,967</b>   | <b>2,284</b>  | <b>2,969</b>  | <b>1,855</b>  | <b>1065,957</b>    |
| <b>ET</b>      | <b>116,302</b>  | <b>5,222</b>   | <b>3,231</b>  | <b>10,222</b>  | <b>1257,209</b>  | <b>3,501</b>  | <b>4,552</b>  | <b>2,845</b>  | <b>1634,372</b>    |
| <b>CV</b>      | <b>0,783</b>    | <b>0,783</b>   | <b>1,533</b>  | <b>1,533</b>   | <b>1,533</b>     | <b>1,533</b>  | <b>1,533</b>  | <b>1,533</b>  | <b>1,533</b>       |
| <b>Somme</b>   | <b>2227,014</b> | <b>100,000</b> | <b>31,610</b> | <b>100,000</b> | <b>12299,507</b> | <b>34,254</b> | <b>44,530</b> | <b>27,831</b> | <b>15989,359</b>   |

**Apport liquide** : Apport liquide (station de la Traille)

**TSS-Station** : Apport solide en suspension (station de la Traille) ;

**Dégradation-TSS** : Dégradation surfacique due au transport solide en suspension ;

**TSS-barrage** : Apport solide fin au niveau du barrage de Koudiat Acerdoune ;

**TST-barrage** : Apport solide totale (fin et grossier) au niveau du barrage ;

**Dégradation totale** : dégradation surfacique due au transport solide fin et grossier.

## Chapitre VI : Analyse et quantification du transport solide

Tableau (VI.9) : Bilan intra-annuel des apports liquide et solide

| Mois           | Apport Liqu    | Apport liqu    | TSS-station  | TSS-station    | Dégradation-TSS | TSS-barrage  | TST-barrage  | TST-barrage  | Dégradation totale |
|----------------|----------------|----------------|--------------|----------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------------|
|                | Mm3            | %              | MT           | %              | T/Km2/an        | MT           | MT           | Mm3          | T/Km2/an           |
| 1              | 2              | 3              | 4            | 5              | 6               | 7            | 8            | 9            | 10                 |
| Sept           | 4,112          | 2,77           | 0,944        | 44,78          | 367,150         | 1,023        | 1,329        | 0,831        | 477,295            |
| Oct            | 3,891          | 2,62           | 0,085        | 4,03           | 33,063          | 0,092        | 0,120        | 0,075        | 42,982             |
| Nov            | 8,034          | 5,41           | 0,212        | 10,05          | 82,419          | 0,230        | 0,298        | 0,186        | 107,145            |
| Déc            | 13,347         | 8,99           | 0,126        | 5,96           | 48,904          | 0,136        | 0,177        | 0,111        | 63,576             |
| Jan            | 24,033         | 16,19          | 0,221        | 10,50          | 86,104          | 0,240        | 0,312        | 0,195        | 111,935            |
| Fév            | 29,352         | 19,77          | 0,160        | 7,57           | 62,068          | 0,173        | 0,225        | 0,140        | 80,688             |
| Mar            | 32,366         | 21,80          | 0,213        | 10,12          | 83,016          | 0,231        | 0,301        | 0,188        | 107,920            |
| Avr            | 17,985         | 12,11          | 0,061        | 2,90           | 23,789          | 0,066        | 0,086        | 0,054        | 30,925             |
| Mai            | 9,423          | 6,35           | 0,061        | 2,87           | 23,553          | 0,066        | 0,085        | 0,053        | 30,619             |
| Juin           | 3,397          | 2,29           | 0,025        | 1,19           | 9,783           | 0,027        | 0,035        | 0,022        | 12,718             |
| Juil           | 1,548          | 1,04           | 0,000        | 0,01           | 0,046           | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,060              |
| Août           | 0,980          | 0,66           | 0,000        | 0,01           | 0,072           | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,094              |
| <b>Moyenne</b> | <b>12,372</b>  | <b>8,333</b>   | <b>0,176</b> | <b>8,333</b>   | <b>68,331</b>   | <b>0,190</b> | <b>0,247</b> | <b>0,155</b> | <b>88,830</b>      |
| <b>ET</b>      | <b>11,085</b>  | <b>7,466</b>   | <b>0,255</b> | <b>12,108</b>  | <b>99,280</b>   | <b>0,276</b> | <b>0,359</b> | <b>0,225</b> | <b>129,064</b>     |
| <b>CV</b>      | <b>0,896</b>   | <b>0,896</b>   | <b>1,453</b> | <b>1,453</b>   | <b>1,453</b>    | <b>1,453</b> | <b>1,453</b> | <b>1,453</b> | <b>1,453</b>       |
| <b>Somme</b>   | <b>148,468</b> | <b>100,000</b> | <b>2,107</b> | <b>100,000</b> | <b>819,967</b>  | <b>2,284</b> | <b>2,969</b> | <b>1,855</b> | <b>1065,957</b>    |

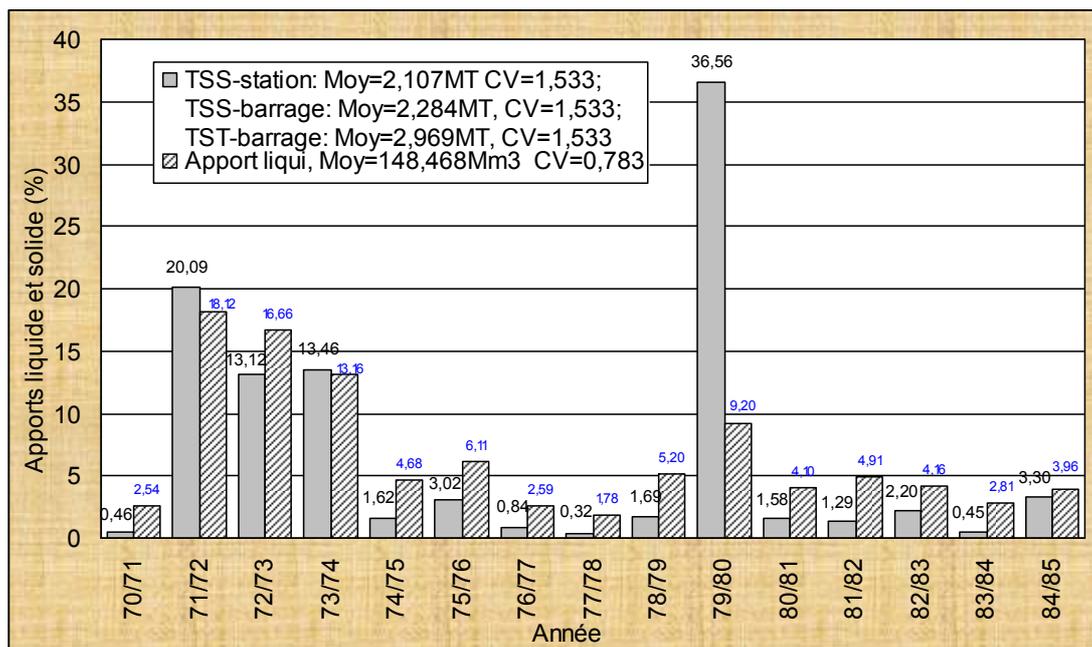


Figure (VI.9) : Bilan annuel des apports solides fin et grossier

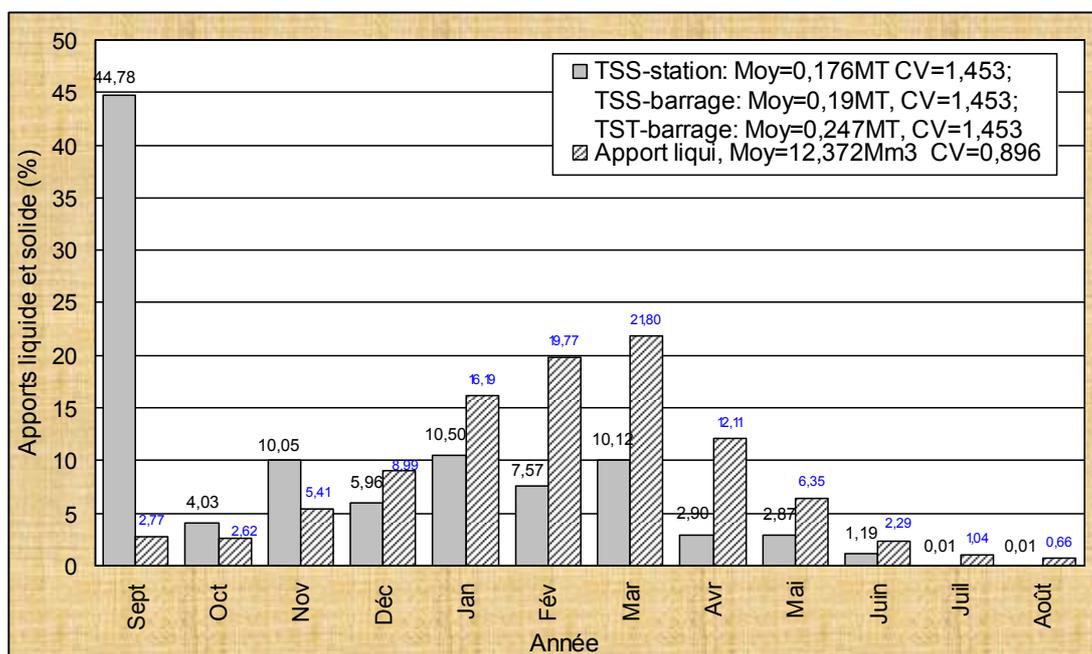


Figure (VI.10) : Bilan intra-annuel des apports solides fin et grossier

### **VI.5 Conclusion**

En conclusion de ce chapitre, on peut dire que la fonction puissance de la courbe du transport solide est une méthode appropriée pour l'estimation et l'analyse du transport solide dans le bassin versant de l'Oued Isser au droit du barrage de Koudiat Acerdoune.

L'analyse de la régression sous différentes formes a montré que le modèle puissance retenu pour le calcul du transport solide est le plus ajusté expliquant dans la plupart des cas plus de 60% de la variance.

Les résultats obtenus montrent une variation remarquable de l'apport solide tant sur les valeurs intra-annuelles que celles interannuelles.

L'exutoire du bassin versant au niveau du barrage de Koudiat Acerdoune a reçu environ 2.284 MT ( $1.428\text{Mm}^3$ ) de sédiments fins par année représentant une dégradation surfacique de l'ordre de  $819.967\text{ T/Km}^2/\text{an}$ . Il a reçu 2.969 MT ( $1.855\text{Mm}^3$ ) de matériau solide fin et grossier annuellement, soit un apport surfacique de  $1065.957\text{ T/Km}^2/\text{an}$ .

En admettant que ces résultats sont extrapolables au-delà de la période d'observation, la retenue de barrage de Koudiat Acerdoune d'une capacité initiale de stockage de  $640\text{Mm}^3$  accumulera 13MT soit  $8.12\text{Mm}^3$  en 2020, ce qui représente 1.27% de sa capacité,  $161.385\text{Mm}^3$  (25.22%) à l'horizon 2100,  $346.885\text{Mm}^3$  (54.20%) à l'horizon 2200, et un comblement total de la retenue à l'horizon 2358, soit une durée de vie de 345 ans.

# *Conclusion générale*

## *Conclusion générale*

Arrivé au terme de ce travail, nous pensons avoir contribué à la compréhension, l'estimation et l'analyse du transport solide en suspension dans le bassin versant de l'Oued Isser au droit du barrage de Koudiat Acerdoune. Nous pensons également avoir atteint les objectifs fixés au départ à savoir:

- ✓ Analyser les données de concentrations des sédiments en suspension mesurées au niveau de la station de la Traille ;
- ✓ Mettre en évidence des relations régressives pouvant mieux expliquer le débit solide par le débit liquide mesurés durant la période 1971/72 à 1984/85 ;
- ✓ Cerner la variation interannuelle et intra-annuelle des apports solides fins et grossiers, véhiculés par l'Oued Isser au niveau de la station hydrométrique de la traille, et déposés dans la retenue du barrage de Koudiat Acerdoune durant la période de disponibilité débits liquides (de 1970/71 à 1984/85) ;
- ✓ Prévoir la variation de la capacité de stockage de la retenue du barrage de Koudiat Acerdoune.

Après avoir :

- ✓ définit le ruissellement, l'érosion, le transport solide, l'envasement des barrages et les différents types de mécanisme du transport solide dans le chapitre 5 ;
- ✓ traité les différentes méthodes relatives à la mesure et l'estimation du transport solide en suspension dans le chapitre II ;
- ✓ traité l'évolution de la concentration et des débits liquides durant les crues dans le chapitre III;
- ✓ exposé des résultats des différents travaux antérieurs dans le chapitre IV qui a permis de montrer que l'érosion et le transport solide sont des problèmes sérieux à l'échelle mondiale mais surtout au Maghreb et plus particulièrement en Algérie.

La présentation de la région d'étude dans la chapitre V nous a permis de conclure que le comportement hydrologique du bassin versant de l'Oued Isser est lié à plusieurs facteurs physique, lithologique, géomorphologique et hydraulique. Les principaux paramètres du milieu physique analysés dans ce chapitre fond du bassin une géostructure plus ou moins complexe le rendant très sensible au processus d'érosion et du transport solide. Cette complexité s'explique en grande partie par la grande variété des faciès géologiques, des formes topographiques, des systèmes de

pentés, du faible couvert végétal, et des nuances climatiques. Les formations de sol imperméable (marneux), les terrains accidentés (pente > 6%) et la végétation qui couvrent 45%, 78% et environ 90% de la surface totale du bassin versant respectivement, favorisent l'écoulement de surface et par conséquent l'érosion et le transport solide.

L'analyse et la quantification du transport solide dans le chapitre VI a montré que la fonction puissance de la courbe du transport solide est une méthode appropriée pour l'estimation et l'analyse du transport solide dans le bassin versant de l'Oued Isser au droit du barrage de Koudiat Acerdoune. L'analyse de la régression sous différentes formes a montré que le modèle puissance retenu pour le calcul du transport solide est le plus ajusté expliquant dans la plupart des cas plus de 60% de la variance. Les résultats obtenus montrent une variation remarquable de l'apport solide tant sur les valeurs intra-annuelles que celles interannuelles.

L'exutoire du bassin versant au niveau du barrage de Koudiat Acerdoune a reçu environ 2.284 MT ( $1.428\text{Mm}^3$ ) de sédiments fins par année représentant une dégradation surfacique de l'ordre de  $819.967\text{ T/Km}^2/\text{an}$ . Il a reçu 2.969 MT ( $1.855\text{Mm}^3$ ) de matériau solide fin et grossier annuellement, soit un apport surfacique de  $1065.957\text{ T/Km}^2/\text{an}$ .

En admettant que ces résultats sont extrapolables au-delà de la période d'observation, la retenue de barrage de Koudiat Acerdoune d'une capacité initiale de stockage de  $640\text{Mm}^3$  accumulera 13MT soit  $8.12\text{Mm}^3$  en 2020, ce qui représente 1.27% de sa capacité,  $161.385\text{Mm}^3$  (25.22%) à l'horizon 2100,  $346.885\text{Mm}^3$  (54.20%) à l'horizon 2200, et un comblement total de la retenue à l'horizon 2358, soit une durée de vie de 345 ans.

Bien qu'ils sont alarmants, les résultats découlant de cette étude peuvent être plus inquiétants (voir même doublés) si on introduit une correction non paramétrique aux courbes de transport solide, étant donné que la régression logarithmique sous-estime les débits solides, notamment autour de la partie supérieure des débits élevés qui contribuent fortement à la charge solide annuelle.

## *Conclusion générale*

Enfin, nous pensons que les résultats et conclusions alarmants de cette étude vont permettre aux gestionnaires de l'eau d'adopter des stratégies urgentes pour protéger les terres et les activités humaines, et d'engager des actions prioritaires permettant d'accroître la durée de vie du barrage de Koudiat Acerdoune.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abalianz (1958). Comptes rendus saniri, No.96, Russie.
- Achite M. (2002). Approche statistique d'évaluation du transport solide dans le bassin versant de l'Oued Mina (Nord-Ouest Algérien). In : Colloque International sur l'Eau dans le Bassin Méditerranéen, 10–13 octobre, Monastir (Tunisie), 894-899.
- Achite M. (1999). Contribution a l'analyse multivariée de la variable 'transport solide', cas du bassin versant de Oued Mina. Mémoire de Magistère – Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique, ENSH-Blida, Algérie.
- Achite M., Meddi M. (2004). Estimation du transport solide dans le bassin versant de l'Oued Haddad (Nord-Ouest Algérien). Revue Sécheresse No.4, Vol.15: 367-373.
- AEE 'Agence Européenne pour l'Environnement' (2005). IRENA Indicator Reporting on the integration of environmental concerns into agricultural policy, <http://webpubs.eea.eu.int/content/irena/Latestproducts.htm>.
- Arnborg L., Walker H.J., Pieppo J. (1967). Suspended load in the Colville River, Alaska. Geogr. Ann. 49A. : 131-144.
- Anderson H.W. (1949). Suspended sediment discharge related to streamflow, topography, soil and land use. Trans American Geophysical Union, Vol 35, No.2.
- A.N.R.H. (2002, 2012, 2014). Rapports Internes de l'A.N.R.H. MRE, Alger.
- A.N.R.H. (2010). Annuaire (données pluviométriques et hydrométriques) et cartes hydrologiques du bassin versant de l'Oued Mina. MRE, Alger.
- Arabi M., Roose E., Kouidri F. (1989, 1991). Influence de quatre systèmes de production sur l'érosion en zone méditerranéenne de moyenne montagne Algérienne. Bull. Réseau Erosion, ORSTOM, Montpellier No.9: 39-51.
- Arabi M. (1991). Influence de quatre systèmes de production sur le ruissellement et l'érosion en milieu méditerranéen à Médéa (Algérie), Université de GrenobleIII.
- Asselman N.E.M. (2000). Fitting and interpretation of sediment rating curves. Journal of Hydrology No.234: 228-248.
- Badraoui A., Hajji A. (2001). Envasement des retenues de barrages, Revue la Houille Blanche, No.6/7: 72-75.

- Benkhalel A. (2005). Contribution à l'étude du transport solide en suspension, bassin d'Oued Ouahrane, Cheliff. Thèse de Doctorat Sciences, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf, Oran, 215p.
- Benkhalel A., Remini B. (2003). Analysis of a sediment rating curve in Wahrane river basin (Algeria). *Revue des Sciences de l'eau* No.16/3: 333-356.
- Benkhalel A., Remini B. (2003). Temporal variability of sediment concentration and hysteresis phenomenon in the Wadi Wahrane basin (Algeria). *Hydrological Sciences Journal* No.48 (2): 243-255.
- Boli Z., Bep A., Roose E. (1991). Enquête sur l'érosion en région cotonnière du Nord Cameroun. *Bull. Réseau Erosion* 11: 127- 138.
- Bouanani A. (2004). Hydrologie, transport solide et modélisation, Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie).Thèse de Doctorat d'Etat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 250p.
- Boulvain F. (2004). Une introduction aux processus sédimentaires. Cours on line, Université de Liège, 63p.
- Bourouba M. (1994). Bilan comparative de l'érosion actuel dans deux bassins versants de l'Algérie orientale: le Seybouse et le Djendjen. *Méditerranée* 80, ¾: 31-39.
- Bradu D., Mundlak Y. (1970). Estimation in lognormal linear models. *J. Am. Stat. Assoc.*, Vol.65, No.329: 198-211.
- Burn D.H. (1990). Real time sampling strategies for estimating nutrient loadings. *J. Water Resour.Planning & Management* No.116: 727-741.
- Campbell F.B., Bauder H.A. (1940). A rating curves method for determining silt discharge of streams. *EOS Trans. Am. Geophys.Union* No.21: 603-607.
- Capolini 1965 1969
- Chebbani R.,Djelil K., Roose E. (1999). Etude des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser, Algérie. *Bulletin Réseau Erosion* 19: 85-95.
- Chevalier J.J., Pouliot J., Thomson K., Boussema M.R. (1995). Système d'aide à la planification pour la conservation des eaux et des sols (Tunisie). Système d'information géographique utilisant les données de télédétection. Acte du Colloque Scientifique International, Hammamet, Tunisie, 1-2 Nov.: 4-12.
- Combeau A. (1977). Erosion et conservation des sols. ORSTOM, Paris, 85 p.
- Cohn T.A, Caulder D.L., Gilroy E.J., Zynjuk L.D., Summers R.M. (1992). The validity of a simple statistical model for estimating fluvial constituent loads.

- An empirical study involving nutrient loads entering Chesapeake Bay. *Water Resour. Res.* No.28: 2353-2363.
- Cohn T.A., De long L.L., Gilroy E.G., Hirsh R.M., Well D.K. (1989). Estimating constituent loads. *Water Resour. Res.* No.25: 937-942.
- Cohn T.A., Gilroy E.J. (1991). Estimating loads from periodic records. U.S. Geological Survey Branch of Systems Analysis Rechnical Memo 91.01, 81p.
- Cohn T.A. (1995). Recent advances in statistical methods for the estimation of sediment and nutrient transport in rivers. *Rev. Geophys.* No.33 suppl July: 1117-1130.
- Colby B.R. (1956). The relationship of sediment discharge to streamflow. U.S. Geological Survey Open File Report.
- Collinet J., Lafforgue A. (1979). Mesures de ruissellement et d'érosion sous pluies simulées pour quelques types de sols de Haute-Volta. ORSTOM, Abid-Jan, 129p.
- Crawford C.G. (1991). Estimation of suspended sediment rating curves and mean suspended sediment loads. *J. Hydrology* No.226: 331-348.
- Cros-cayot (1996). Distribution spatiale des transferts de surface à l'échelle du versant. Contexte armoricain. Thèse de Docteur de l'ENSAR, 218 p.
- Delhoume J.P. (1981). Etude en milieu méditerranéen semi-aride: ruissellement et érosion en zone montagneuses de Tunisie (Djebel Semmama), campagne 1975-1979, Tunis. ORSTOM/DRE, 185 p.
- Demmak A. (1982). Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de Docteur Ingénieur, Université Pierre et Marie Currie, Paris, 210p.
- De Vries A., Klavers H.C. (1994). Riverine fluxes of pollutants: monitoring strategy first, calculation methods second. *European Water Pollution Control* No.4: 12-17.
- Dickenson W.T. (1981). Accuracy and precision of suspended sediment loads In: erosion and sediment transport measurement (proceeding of the Florence symposium). IAHS Publication No.133: 195-202.
- Dinehart R.L. (1992). Sediment data for streams near mount St. Helens, water years 1984-1987. U.S. Geol. Survey Open File Report, Vol.3: 91-219.

- Dolan D.M., Yui A.K., Geist R.D. (1981). Evaluation of river load estimation methods for total phosphorus. *J. Great Lakes Res.* No.7: 207-214.
- Duan N. (1983). Smearing estimate: a nonparametric retransformation method. *J. Amer. Statist. Assoc.* No.78(383): 605-610.
- Dutil P. (1984). L'érosion en grande culture. *Revue Technique des Agriculteurs Dynamique*, No.169, France.
- Engelund F., Hasen E. (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streams. Teknisk for lag, Compenhagen, Danemark.
- Etchanchu D., Probst J.L. (1986). Erosion et transport de matière en suspension dans un bassin versant en région agricole. Méthode de mesure du ruissellement superficiel, de sa charge et des deux composantes du transport solide dans un cours d'eau. *Comptes Rendus Académie des Sciences, Paris*, Vol.17: 1063-1068.
- FAO (1990). Conservation des sols et des eaux dans les zones semi-arides *Bulletin*.
- FEM, FIDA (2002). Publication FIDA. Edition GMS GRAFICHE, Rome.
- Fen C.R., Gurnell A.M., Beecroff (1985). An elevation of the use of suspended sediment rating curves for the prediction of sediment concentration in a proglacial stream. *Geografiska Annales*, 67A: 71-82.
- Fleming G. (1969). Design curves for suspended load estimation. *Proc. Inst. Civ. Eng.*, Vol.43: 1-9.
- Frecaut R. (1964). Les transports solides des cours d'eau et leur signification morphologique. *Revue Géogr. Est* No.4: 447-458.
- Ferguson R.I. (1987). Accuracy and precision of methods for estimating river loads. *Earth Surf. Processes and Landforms* No.12: 95-104.
- Ferguson R.I. (1986). River loads underestimated by rating curves. *Water Resour. Res.* No.22: 74-76.
- Ghernaout R. (2002). Rainfall – Runoff – Sediment load relations in Mina river basin situated in the north western region of Algeria. Master Thesis, Mosul University, Iraq, 148p.
- Ghernaout R. (2014). Impact du transport solide en suspension sur l'envasement du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda. Thèse Université Blida 01, Thèse doctorat .
- Glysson G.D. (1987). Sediment transport curves. *U.S. Geol. Surv.*, Open file report 87-218, 47p.

- Gravilovic S. (1960). Ingénierie des cours d'eau torrentiels et de l'érosion Yougoslavie.
- Greco J. (1966). L'érosion, la défense et la restauration des sols, le reboisement en Algérie. Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire, Alger.
- Gomer D. (1994). Ecoulement et érosion dans des petits bassins versants à sols marneux sous climat semi-aride méditerranéen. Thèse Université Karlsruhe, Allemagne, 137p.
- Gordova D., Gonzalez M. (1997). Sediment yield estimation in small watersheds based on streamflow and suspended sediment discharge measurements. Soil Technology No11: 57-65.
- Guillot P. (1987). Mesures en hydrologie de surface. Revue trimestrielle publiée par la société météorologique de France.
- Guy H.P. (1978). National handbook of recommended methods for water data acquisition. U.S. Geological Survey.
- Guy H.P. (1966). System for monitoring fluvial system. U.S. Geological Survey Water Supply, paper 1822: 84-88.
- Gollillot et Hénin 1965
- G.P Williams (1989). Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. Journal of hydrology (Amsterdam), 111(1), 89-106.
- Hamza A. (1992). Quantification des pertes en terre du territoire tunisien. Bull. Réseau Erosion 13: 188-192.
- Heidel S.G. (1956). The progressive lag of sediment concentration with flood waves. Trans. Am. Geophys. Union 37: 56-66.
- Heusch B. (1988). Aménagement de territoire: techniques de lutte contre l'érosion, CNEARC Montpellier, 199p.
- Heusch B. (1971). Estimation et contrôle de l'érosion hydrique. Soc. Sci. Nat. Phys. Maroc, C. R., 37: 41-54.
- Heusch B. (1982). Etude de l'érosion et des transports solides en zone semi-arides. Rech. Biblio sur l'Afrique du Nord. Projet PNUD Rab/80/04 :83 p.
- Heusch B. (1970). L'érosion de préif. Etude quantitative dans les collines marneuses. Annales Recherches Forestières du Maroc No.12: 9-176.

- Horowitz J.A. (2002). The use of rating curves to predict suspended sediment transport concentration: a matter of temporal resolution. Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop, Apr.30 Mai.2, Reno.NV.
- Horton R.E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. Transactions of the American Geological Union No.14: 446-460.
- Kanwar J.S. (1982). Managing soil resources to meet the challenge to mankind. Presidential address of 12<sup>th</sup> Int. Congress of Soil Science, New Delhi, India. 8-16 February. Plenary Session paper: 1-32.
- Kao S.J., Liu K.K. (2001). Estimating the suspended sediment load by using the historical hydrometric record from the Lanyang-Hsi watershed. TAO, Vol.12, No.2: 401-414.
- Kattan Z., Gac G.Y., Probst J.L. (1987). Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senegal basin. J. Hydrology No.92: 59-76.
- Kite G.W. (1975). Confidence limits for design events. Water Resour. Res. Vol.11, No.1: 48-53.
- Koch R.W. Smillie G.M. (1986). Bias in hydrologic prediction using log-transformed models. Water Resour. Bulltin No.22(5): 717-723.
- Kung S.Y., Chiang T.C. (1977). Soil erosion and its control in small gully watersheds in the rolling loess area on the middle reaches of the yellow river. Paris, France meeting of LUGG handout publication of Chinese delegation. A&Peking, People's Republic of China.
- Lafforgue A. (1977). Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Applications à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées. Cahiers ORSTOM Ser. Hydrologie Vol.14, No.4: 299-344.
- Larras J. (1972). Hydraulique et granulats, Editions Eyrolles, Paris, 254p.
- Larras J. (1977). Fleuves et rivières non aménagées. Edition Eyrolles, Paris, 177p.
- Lebreton J.C. (1974). Dynamique fluviale. Editions Eyrolles, Paris, France.
- Levaindier T. (1989). Sensibilité des estimations hydrologiques à la longueur des observations. In Assises de l'Hydrométrie, Ministère de l'Environnement,
- Ludwig B. (1992). L'érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du nord du Bassin Parisien: analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à

- l'échelle du bassin versant élémentaire. Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg I, 201 p.
- Mahieddine M. (1997). Quantification et variabilité parcellaire sans simulation de pluie dans le bassin versant de l'Oued Mina. Thèse de Magister, INA, El-Harrach, Alger.
- Meddi M. (1992). Hydropluviométrie et transport solide dans le bassin versant de l'Oued Mina. Thèse Unique, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 320p.
- Milliman J.D., Qin Y.S., Ren M.E., Saito Y. (1987). Man's influence on the erosion and transport of sediment by Asian rivers: the yellow river (Huanghe) example. *J. Geology* No.95: 751-762.
- O'Brien M.P. (1933). *Transaction of the American Geophysical Union Section of Hydrology.*
- Phillips J.M., Webb B.W., Walling W.D.E., Leeks G.J.L. (1999). Estimating the suspended sediment loads of rivers in the LOIS study area using infrequent samples. *Hydrological Processes* No.13: 1035-1050.
- Probst, J.L., Amiotte Suchet P. (1992). Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). *Hydrol. Sci. J.*, 37: 621-637.
- Rampon A. (1990). Erosion hydrique et sédimentation dans les barrages. *Informations Techniques Cemagref*, Juin, No.78, Note.6: 1-7.
- Remini B., Avenard J.M., Kettab A. (1996). *Envasement des barrages*, Edition CEDOC, Alger, 207p.
- Remini B., Hallouche W. (2003). Les barrages du Maghreb s'ensavent. 5eme symposium inter. de l'eau, Cannes 23 à 27 Juin.
- Remini B., Hallouche W. (2004). La sédimentation dans les barrages Algériens. *Rev. Int. Houille Blanche* No.1, Jan-Fév: 60-64.
- Remini B. (2005). *La problématique de l'eau en Algérie*. Edition Imprimerie Madani, Blida, Algérie, 101p.
- Remini B. (2002). L'ensablement des barrages et la technique de soutirage, quelques exemples Algériens. *Colloque International sur l'Eau, Chlef*, 5-6 fév.
- Remini B. (2004). Sédimentation des barrages en Algérie. *Revue Internationale la Houille Blanche*, N°1, Janvier.

- Réméniéras G. (1986). L'hydrologie de l'ingénieur. Collect. Dir. Etudes. Rech. Electr. France. Ed.Eyrolles, 465 p.
- Revel J. C., Coste N., Cavalié J., Costes J. L. (1989). Premiers résultats expérimentaux sur l'entraînement mécanique des terres par le travail du sol dans le Terrefort Toulousain, France. Cahiers ORSTOM, Ser. Pédologie Vol.25, No.1: 111-118.
- Richards R.P. (2001). Estimation of pollutant loads in rivers and streams. U.S. Environmental Protection Agency, 121p.
- Richards R.P., Holloway J. (1987). Monte carlo studies of sampling strategies for estimating tributary loads. Water Resou. Res. No.23: 1939-1948.
- Roose E. (1967). Dix années de mesures de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. Agronomie Tropicale (France), Vol.22, No.2: 123-152.
- Roose E. (1973). Dix-sept années de mesure expérimentale de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Thèse Doc. Ing. Fac. Sci. Abidjan, No.20, 125p.
- Roose E. (1980). Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. Thèse Doct. ès Sciences, Université d'Orléans, 587 p. In: Travaux et documents de l'ORSTOM, Paris, No.130, 569 p.
- Roose E. (1987). Evolution des stratégies de lutte antiérosive en Algérie; nouvelle démarche: la GCES. Séminaire INRF de Médéa, Algérie, Bull. Réseau Erosion 7: 91-96.
- Roose E. (1987). Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols dans les paysages soudano-sahéliens d'Afrique Occidentale. Stratégies classiques et nouvelles. In: Soil, Crop, Water Management Systems for Rainfed Agriculture in Semi-arid Zone. Proceeding ICRISAT: 55-72.
- Roose E. (1994). Introduction à la GCES. Bulletin Pédologique FAO.76, 420 p
- Roose E., Piot J. (1984): Runoff, erosion and soil fertility restoration on the mossi plateau (central zone of upper-volta). Symp. Intern Challenge in African Hydrology and Water Resources. Harare Symposium, I.A.H.S. Publ, No.144: 485-498.

- Sidle R.C., Campbell A.J. (1985). Patterns of suspended sediment transport in a Coastal Alaska stream. *Water Resour. Res.* Vol.21, No.6: 909-917.
- SOGREAH (1967). Etude générale des aires d'irrigation et d'assainissement agricole en Algérie. Dossier, Ministère de l'agriculture et de la réforme agraire, Algérie.
- Steel R.G.D., Torrie J.H.T. (1980). Principles and procedures of statistics. McGraw-Hill, New York, USA.
- Terfous A., Megnounif A., Bounani A. (2001). Etude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord Ouest Algérien). *Rev.Sci.Eau* No.14 :175-185
- Thomas R.B. (1985). Estimating total suspended sediment yield with probability sampling. *Water Resour. Res.* Vol.21, No.9: 1381-1988.
- Touaibia B., Achite M. (2003). Contribution à la cartographie de l'érosion spécifique du bassin versant de l'Oued Mina en zone semi-aride de l'Algérie septentrionale. *J. Sciences Hydrologiques* No.2, Vol.48: 235-242.
- Touabia B., Benlaoukli B., Bouheniche S. (2003). Approche quantitative de l'envasement au droit de 15 barrages en exploitation dans l'Algérie du Nord. Conférence Internationale « Hydrologie des régions méditerranéennes et semi-arides », Montpellier, IRD.
- Touaibia B. (2000). Erosion - Transport solide - envasement de barrages, cas du bassin versant MINA. Thèse de Doctorat d'Etat, INA, El-Harrach, Algérie.
- Touabia B., Gomer D., Aidaoui A., Achite M. (2001). Quantification et variabilité temporelles de l'écoulement solide en zone semi aride de l'Algérie du Nord. *J. Science Hydrologique* Vol.46, No.1: 41-53.
- Touabia B. (2010). Problématique de l'érosion et du transport solide en Algérie septentrionale. *Revue Sécheresse* Vol.21, No.1: 1-6.
- Walling D.E. (1977). Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin. *Water Resour. Res.* Vol 13, No.03: 531-538.
- Walling D.E. (1974). Suspended sediment and solute yield from small catchment prior to urbanisation in: Sediment concentration versus water discharge during single Hydrologic events in rivers (ed. by G.P., Willams, 1989). *J. Hydrology* 111: 89-106.
- Walling D.E., Webb B.W. (1988). The reliability of rating curve estimates of suspended sediment yield; some further comments. IAHS Press. Wallingford U.K.: 337-350.

- Walling D.E., Webb B.W. (1981). The reliability of suspended sediment load data, erosion and sediment transport measurement. Proceeding of the Florence Symposium, June, IAHS Pub., No.133.
- White W.E. (1986). Problèmes d'érosion, de transport solide et de sédimentation dans les bassins versants. Rapport Unesco Projet.5, PHI Paris, 161p.
- Willams G.P. (1978). A Sediment graph model based on a instantaneous unit sediment graph. Water Resour. Res. Vol.14, No.4: 659-669.
- Willams G.P. (1989). Sediment concentration versus water discharge during single Hydrologic events in rivers. J. Hydrology 111: 89-106.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. US Departement of Agriculture, Handbook No.537, 58p.
- Wood P.A. (1977). Controls of variation in suspended sediment concentration in river Rother, West Sussex, England Sedimentology 24: 437-445.
- Yaksich S.M., Verhof F.H. (1983). Sampling strategy for river pollutant transport. J. Environ. Eng. No.109: 219-231.
- Zeggane H. (2005). Approche cartographique de l'érosion hydrique à partir des ouvrages hydrauliques existants, cas du bassin versant de l'Oued Isser (W. Boumerdès). Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique, Blida, Algérie, 195p.
- Zeggane H. (2017). Et BOUTOUTAOU, Djamel. Etude de comportement hydrologique des cours d'eau en Algérie, Cas du bassin versant Isser, Algérie. Thèse de doctorat.