

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf -Mila-
Institut des Sciences et de Technologie
Département des Sciences et Techniques**



N° Ref :.....

Projet de fin de cycle préparé en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Hydraulique urbaine

Spécialité : Hydraulique Urbaine

**Quantification du transport solide dans le
bassin versant de Cheliff Nord-Ouest de
l'Algérie.**

Présenté par : BELATTAR Souhir, CHOUARFA Imane.

Membres de jury :

| | | |
|------------------|--------------|--------------|
| Dr. KABOUR. A | Président | C.U.A.B.MILA |
| Dr. ALLIA. Z | Examinatrice | C.U.A.B.MILA |
| Dr. MOUSSOUNI. A | Encadreur | C.U.A.B.MILA |

Année Universitaire: 2020/2021

Résumé :

La région de Cheliff est périodiquement affectée par des crues. La région de Cheliff est exposée à des crues très importantes et à répétition, ce qui provoque l'augmentation du transport solide avec une quantité importante à partir de l'érosion des terres agricoles. Le transport de sédiment en zone semi aride à climat tempéré pose de sérieux problèmes aux services de mobilisation des ressources hydrauliques, notamment aux chercheurs chargés d'évaluer le transport solide dans les bassins versant. Il en résulte que toute intervention susceptible de modifier le régime hydrologique ou le lit d'un cours d'eau doit d'être examinée en regard des processus d'érosion, de transport solide et de déposition. L'irrégularité saisonnière et interannuelle des pluies liées à des intensités parfois très élevées peuvent engendrer avec des temps de concentration parfois très courts des pertes de terrains considérables.

L'objectif de ce travail est de faire une étude sur le transport solide, elle sera basée sur le transport en suspension, de oued Cheliff et au niveau de deux stations hydrométriques Djidiouia RN4 et Sidi Belatter. Nous traitons et nous analysons les données de ces deux stations afin d'établir des relations existantes entre les débits liquides et solides. Il est intéressant d'effectuer dans le bassin versant une modélisation débit solide-débit liquide en utilisant le réseau de neurones artificiel (RNA) dans un milieu semi aride et d'étudier l'impact de débit solide débit liquide sur la réponse hydrologique du bassin versant. Les séries de données ont été divisée en trois, nous avons utilisées 70% pour l'apprentissage, 15% pour la validation et 15% pour le test avec différentes combinaisons d'entrée en utilisant les critères d'efficacités MSE (erreur carrée moyenne) et R^2 (coefficient de détermination).

Les résultats obtenus, ont permis d'indiquer en premier lieu, la fiabilité du modèle RNA appliqué sur notre bassin versant sur le processus débit liquide-débit solide. Le résultat a montré une meilleure performance utilisant le rejet de sédiment "Qs-Ql" comme entrée "Input" Ql et sortie "Target" Qs. D'autre part l'évaluation du transport solide à l'échelle annuelle et saisonnière est très importante et engendre une dégradation des sols assez considérable.

Il est à signaler que l'utilisation du réseau de neurones artificiel offre une alternative utile et puissante à la prédiction pour modéliser et quantifier la charge sédimentaire qui affecte négativement l'environnement.

Mots clés : Dégradation des sols, transport solide en suspension, débit liquide, débit solide, réseau de neurone artificiel (RNA), Oued chellif

Abstract :

The region of Cheliff is periodically affected by floods. The Cheliff area is exposed to very heavy and repeated flooding, which causes the increase in solid transport with a significant amount from the erosion of agricultural land. The transport of sediment in a semi-arid zone with a temperate climate poses serious problems for water resource mobilization services, in particular for researchers responsible for evaluating solid transport in watersheds. It follows that any intervention likely to modify the hydrological regime or the bed of a watercourse must be examined with regard to the processes of erosion, solid transport and deposition. The seasonal and interannual irregularity of the rains linked to sometimes very high intensities can cause considerable land losses with sometimes very short concentration times.

The objective of this work is to carry out a study on solid transport, it will be based on transport in suspension, of wadi Cheliff and at the level of two hydrometric stations Djidiouia RN4 and Sidi Belatter. We process and analyze data from these two stations in order to establish existing relationships between liquid and solid flows. It is interesting to perform in the watershed a solid flow-liquid flow modeling using the artificial neural network (ARN) in a semi-arid environment and to study the impact of solid flow liquid flow on the hydrological response of the basin. pouring. The data sets were split into three, we used 70% for training, 15% for validation and 15% for testing with different input combinations using MSE efficiency criteria (mean square error) and R2 (coefficient of determination).

The results obtained made it possible to indicate, first of all, the reliability of the RNA model applied to our watershed on the liquid flow-solid flow process. The result showed better performance using the sediment rejection " Q_s-Q_1 " as the "Input" Q_1 and the "Target" output Q_s . On the other hand, the evaluation of solid transport on an annual and seasonal scale is very important and causes quite considerable soil degradation.

It should be noted that the use of the artificial neural network offers a useful and powerful alternative to prediction to model and quantify the sediment load which negatively affects the environment.

Key words: Soil degradation, suspended solid transport, liquid flow, solid flow, artificial neural network (RNA), Oued chellif

الملخص:

تتأثر منطقة Cheliff بشكل دوري بالفيضانات. تتعرض منطقة تشلييف لفيضانات شديدة ومتكررة ، مما يؤدي إلى زيادة النقل الصلب بكمية كبيرة من تآكل الأراضي الزراعية. يطرح نقل الرواسب في منطقة شبه قاحلة ذات مناخ معتدل مشاكل خطيرة لخدمات تعبئة الموارد المائية ، ولا سيما للباحثين المسؤولين عن تقييم النقل الصلب في مستجمعات المياه. ويترتب على ذلك أن أي تدخل من المحتمل أن يعدل النظام الهيدرولوجي أو قاع المجرى المائي يجب فحصه فيما يتعلق بعمليات التعرية والنقل الصلب والترسيب. يمكن أن يتسبب عدم انتظام الأمطار الموسمي والمتوسط الذي يرتبط أحياناً بكثافة عالية جداً في خسائر كبيرة في الأراضي مع فترات تركيز قصيرة جداً في بعض الأحيان.

الهدف من هذا العمل هو إجراء دراسة عن النقل الصلب ، وستقوم على أساس النقل المعلق بوادي شليف وعلى مستوى محطتي القياس الهيدرومتري جيديوية RN4 وسيدي بلاتر. نقوم بمعالجة وتحليل البيانات من هاتين المحطتين من أجل إقامة علاقات قائمة بين التدفقات السائلة والصلبة. من المثير للاهتمام القيام في مستجمعات المياه بنمذجة تدفق سائل صلب باستخدام الشبكة العصبية الاصطناعية (ARN) في بيئة شبه قاحلة ودراسة تأثير تدفق السائل الصلب على الاستجابة الهيدرولوجية للحوض. تم تقسيم مجموعات البيانات إلى ثلاثة ، استخدمنا 70 ٪ للتدريب ، و 15 ٪ للتحقق من الصحة و 15 ٪ للاختبار مع مجموعات إدخال مختلفة باستخدام معايير كفاءة) MSE (متوسط الخطأ التربيعي) و R2 معامل التحديد).

أتاحت النتائج التي تم الحصول عليها الإشارة ، أولاً وقبل كل شيء ، إلى موثوقية نموذج الحمض النووي الريبي المطبق على مستجمعات المياه لدينا في عملية التدفق السائل والصلب. أظهرت النتيجة أداء أفضل باستخدام رفض الرواسب-Qs " Q1 مثل "الإدخال Q1 "والإخراج "الهدف Qs. "من ناحية أخرى ، فإن تقييم النقل الصلب على نطاق سنوي وموسمي مهم للغاية ويسبب تدهوراً كبيراً للتربة.

وتجدر الإشارة إلى أن استخدام الشبكة العصبية الاصطناعية يوفر بديلاً مفيداً وقوياً للتنبؤ بنمذجة وقياس حمل الرواسب الذي يؤثر سلباً على البيئة.

الكلمات المفتاحية: تدهور التربة ، النقل الصلب المعلق ، التدفق السائل ، التدفق الصلب ، الشبكة العصبية الاصطناعية (RNA)، واد التشلييف

Dédicace

**Avant tous, je remercie « ALLAH »
de m'avoir donné le courage et la volonté nécessaires pour atteindre
mon travail.**

**J'ai l'honneur de dédicace ce modeste travail à Ma famille Chouarfa
et aux personnes Les plus chères au monde mes chers parents :**

A mon père :

**Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon
éducation et mon bien être. Ce travail est fruit de tes sacrifices qui
tu as
consentis pour mon éducation et ma formation.**

A ma très chère mère :

**Tu es l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager
et de**

Prier pour moi.

A mes chers soeurs

A mes chers frères

A mes chers amis :

wissem, asma, aicha, imane, falak et hamida

A mon binôme souhir

A tous ceux que j'aime et à tous ceux qui m'aiment.

A tous les étudiants de la promotion Master hydraulique

2020/2021.

Dédicace

A mes chers parents qui n'ont jamais cessé de formuler des prières à mon égard et qui ont toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager.

A mes Sœurs Zahira et Aida pour leurs soutiens moraux et leurs conseils tous le long de mes études.

A ma chère amie Malek qui ma aidée et supportée dans les moments difficiles.

A la personne la plus chère et importante de ma vie, mon fiancé Fayssal.

A toute ma belle famille et tous ceux et celles que j'aime.

A tous mes collègues

Je dédie ce mémoire.

Belattar Souhir.

Remerciements

En préambule a cette mémoire, nous adressons ces quelques mots en guise de remerciement au grand Dieu tout puissant en exprimant nos reconnaissances envers sa grande générosité, et sa miséricorde.

Remercier Dieu qui nous a donné la volonté, la patience, la santé et la confiance durant toutes les années d'études.

Nous tenons à être très reconnaissants en remerciant sincèrement et chaleureusement Monsieur MOUSSOUNI. A, qui en tant que notre encadreur pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter nos réflexion.

Un grand merci pour Dr.KABOUR.A et Dr.ALLIA.Z qui ont acceptés de faire partie du jury.

Merci à la direction de l'ANRH pour nous avoir permis d'accéder aux données hydrométriques dont nous avons besoin pour la réalisation de notre étude.

Merci à nos professeurs et enseignants d'être là pour nous et d'avoir donné le meilleurs d'eux par la qualité d'enseignements qu'ils nous ont prodigués, aussi à notre chef de département de Sciences et Techniques.

Nous remercions nos très chers parents pour leurs générosité et leurs compréhension, ils ont toujours été une source de motivation, d'encouragements et d appuis, et aussi tous nos frères et sœurs.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à toutes nos camarades de master, nos famille, nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenus et encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.

BELATTAR et CHOUARFA

Liste des Tableaux

| N° | Titres | Pages |
|--|---|-----------|
| Chapitre I. Synthèse bibliographique. | | |
| Tableau 01 | Valeur du coefficient α selon le niveau perméabilité. | 16 |
| Tableau 02 | Classification de Ramette. | 25 |
| Chapitre II. Présentation de la zone d'étude. | | |
| Tableau 03 | Caractéristiques des stations hydrométriques du bassin de l'Oued Chélif. | 31 |
| Tableau 04 | Les caractéristiques des bassins versant. | 33 |
| Tableau 05 | Température et précipitation moyenne mensuelles de la région de Bas Chélif (1990 – 2013). | 35 |
| Tableau 06 | La température moyenne Annuelle à l'échelle des 4 stations pour le bassin Cheliff. | 37 |
| Tableau 07 | Humidité relative (%) enregistrée à la station de Tiaret (1980-2008). | 38 |
| Chapitre III. L'étude de transport solide par suspension | | |
| Tableau 08 | Nombre de valeurs observées par station. | 40 |
| Tableau 09 | Fonction de la relation débit solide-débit liquide des deux stations. | 42 |
| Tableau 10 | Fonction de la relation débit solide-débit liquide des deux stations à l'échelle saisonnière. | 46 |
| Tableau 11 | La comparaison des relations débit liquide- débit solide. | 47 |
| Chapitre IV. Modélisation par les réseaux de neurones artificiels | | |
| Tableau 12 | Fonction reliant le débit solide et le débit liquide. | 66 |
| Tableau 13 | Fonction reliant le débit solide et le débit liquide. | 68 |
| Tableau 14 | Erreur moyenne quadratique MSE des deux stations. | 72 |

Liste des Figures

| N° | Titres | Pages |
|---|--|-----------|
| Chapitre I. Synthèse bibliographique | | |
| Figure 01 | Dégradation des sols dans 77 bassins de l'Algérie. | 03 |
| Figure 02 | Schéma descriptif des types de dégradation des sols. | 04 |
| Figure 03 | Processus de l'érosion hydrique. | 05 |
| Figure 04 | Diagramme de Hjulstrom. | 08 |
| Figure 05 | Transport solide en suspension. | 09 |
| Figure 06 | Transport solide par charriage. | 10 |
| Figure 07 | Les modes de transport solide. | 10 |
| Figure 08 | Equilibre d'un grain posé sur le fond d'un canal. | 17 |
| Figure 09 | Intégral de j_1 et de j_2 utilisée dans la méthode d'EINSTEIN. | 23 |
| Figure 10 | Diagramme de Yalin-Sheilds. | 25 |
| Chapitre II. Présentation de la zone d'étude | | |
| Figure 11 | Carte de situation de la région hydrographique Chélif. | 28 |
| Figure 12 | Carte géologie de la zone d'étude. | 29 |
| Figure 13 | Station hydrométrique du bassin versant. | 30 |
| Figure 14 | Bassin versant de Oued Djidiouia. | 32 |
| Figure 15 | Bassin versant de Oued Cheliff. | 33 |
| Figure 16 | Diagramme Ombrothermique de Gaussen e Bagnoles de la station de Relizane . | 34 |
| Figure 17 | Variation de la pluie annuelle dans la région de la station de recherche INRAA. | 36 |
| Figure 18 | Distribution intra annuelle de l'évapotranspiration potentielle. | 37 |
| Chapitre III. L'étude de transport solide par suspension | | |
| Figure 19 | Répartition débit solide – débit liquide de la totalité des données de 1974-2000 de la station de Djidiouia RN4. | 42 |
| Figure 20 | Répartition débit solide – débit liquide de la totalité des données de 1969-2001 de la station de Sidi Belatter. | 42 |
| Figure 21 | Répartition saisonnière des débits solides – débits liquides de la station de Djidiouia RN4. | 44 |
| Figure 22 | Répartition saisonnière des débits solides – débits liquides de la station de Sidi Belatter. | 45 |
| Chapitre IV. Modélisation avec réseaux de neurones artificiels | | |
| Figure 23 | Neurone artificiel. | 51 |
| Figure 24 | Neurone biologique. | 51 |
| Figure 25 | Schéma d'un neurone forme. | 52 |
| Figure 26 | Les différentes formes de la fonction d'activation. | 53 |
| Figure 27 | Réseau De Neurone Artificiel. | 56 |
| Figure 28 | Perceptron à une couche cachée. | 57 |
| Figure 29 | Réseau de neurone bouclé. | 58 |
| Figure 30 | Architecture de modèle choisi dans notre cas. | 62 |

| | | |
|------------------|---|-----------|
| Figure 31 | Variation de débit solide simulé en fonction de débit solide mesuré de la Djidiouia RN4. | 65 |
| Figure 32 | Variation de l'erreur entre le débit solide simulé et le débit solide mesuré de la Djidiouia RN4. | 66 |
| Figure 33 | Performance de validation Q1-Qs du perceptron multicouche de la station Djidiouia RN4. | 66 |
| Figure 34 | Variation de débit solide simulé en fonction de débit solide mesuré de la station Sidi Belatter. | 67 |
| Figure 35 | Variation de l'erreur entre le débit solide simulé et le débit solide mesuré de Sidi Belatter. | 68 |
| Figure 36 | Performance de validation Q1-Qs du perceptron multicouche de la station SidiBelatter . | 68 |
| Figure 37 | Modélisation de débit solide en fonction de temps pour la station de Djidioua RN4. | 69 |
| Figure 38 | Variation de l'erreur en fonction de temps pour la station de Djidioua RN4. | 70 |
| Figure 39 | Performance de validation multicouche de la station Djidiouia RN4. | 70 |
| Figure 40 | Modélisation de débit solide en fonction de temps pour la station de Sidi Belatter | 71 |
| Figure 41 | variation de l'erreur en fonction de temps pour la station de Sidi Belatter. | 71 |
| Figure 42 | Performance de validation multicouche de la station Sidi Belatter. | 72 |

Liste des Abréviations

USLE : Universal Soil Loss Equation.

ANRH : Nationale des Ressources Hydrauliques

INRAA : National Institute of Agronomic Research of Algeria.

ETP : évapotranspiration potentielle.

MES : Matière En Suspension

ANN: Artificiel Neural Network.

FAO :Food and agriculture organization.

XOR : exclusive OR

Tables des Matières

| | |
|---|-----------|
| Résumé | i |
| Dédicace..... | iv |
| Remerciements | vi |
| Liste des Tableaux..... | vii |
| Liste des Figures..... | viii |
| Liste des Abréviations..... | x |
| Tables des Matières..... | xi |
| Introduction générale | 01 |
| Chapitre I: Synthèse bibliographique | 03 |
| Introduction | 03 |
| I.1.Dégradation des sols | 03 |
| I.2.Les types de degradation des sols | 04 |
| I.2.1.Généralité..... | 04 |
| I.2.2.Splash..... | 04 |
| I.2.3.Ruissellement | 05 |
| I.2.4.Dépot..... | 05 |
| I.3. Transport solide en Algérie..... | 05 |
| I.4. Les causes de l'érosion | 07 |
| I.5. Le transport solide | 08 |
| 1.5.1. Compétence | 08 |
| 1.5.2. Capacité | 09 |
| I.6. Les modes de transport solides | 09 |
| I.6.1. Le transport solide en suspension..... | 09 |
| I.6.2. Le transport solide par charriage..... | 09 |
| I.6.3. Le transport solide par saltation | 10 |
| I.7. Etude réalisées sur le transport solide et l'érosion en Algerié | 11 |
| I.7.1. Medinger (Mars 1960)..... | 11 |
| I.7.2. Tixeront (Aout 1960) | 11 |
| I.7.3. Capolini (1965-1969) | 11 |
| I.7.4. Sogreah (1969)..... | 12 |
| I.7.5. Demmak (1982) | 12 |
| I.7.6. Etude PNUD/OPE (1987)..... | 12 |
| I.8. Approche et méthode de quantification de transport solide | 13 |
| I.8.1. Méthodes de quantification directe | 13 |
| I.8.2. Méthode d'application des équations du transport solide (empirique) | 13 |

| | |
|---|-----------|
| I.8.2.1 L'équation universelle de perte en terre | 14 |
| I.8.2.2.Transport par charriage | 17 |
| I.8.2.3.Transport par suspension | 20 |
| I.8.2.4. Début d'entraînement des sédiments | 23 |
| I.8.2.5. Méthode par modélisation | 25 |
| I.9. Mesure des transports solide | 26 |
| Conclusion..... | 27 |
| | |
| Chapitre II: Présentation de la zone d'étude..... | 28 |
| Introduction | 28 |
| II.1 Apreçu géographique..... | 28 |
| II.2.Aspect géologique..... | 28 |
| II.3.Végétation et Occupation du sol | 29 |
| II.4. Contexte pédologique | 29 |
| II.5.Stations hydrométriques | 30 |
| II.5.1. Apreçu historique | 30 |
| II.6.Géomorphologique..... | 31 |
| II.6.1.Relief | 31 |
| II.7.Climatologique... .. | 35 |
| II.7.1.Climat | 35 |
| II.7.1.1. Précipitation et Température | 35 |
| II.7.1.2. Evapotranspiration | 37 |
| II.7.1.3. Humidité relative | 38 |
| Conclusion..... | 38 |
| | |
| Chapitre III: L'étude de transport solide par suspension..... | 39 |
| Introduction | 39 |
| III.1.Collect et mise en forme des données..... | 39 |
| III.2.Dépouillement des données | 39 |
| III.3.Classification et mise en forme des données | 39 |
| III.4.Répartition de la totalité des données..... | 40 |
| III.5.Répartition saisonnière des debits liquides-débits solides | 43 |
| III.5.1.Répartition saisonnière des debits liquides-débits solides de station Djidiouia RN4..... | 43 |
| III.5.2.Répartition saisonnière des debits liquides-débits solides de station Sidi Belatter | 45 |
| III.6.La comparaison avec les autres stations | 47 |
| Conclusion..... | 48 |

| | |
|---|-----------|
| Chapitre IV: Modélisation avec réseaux de neurones artificiels | 49 |
| Introduction | 49 |
| IV.1. Historique de Réseau De Neurone Artificiel | 49 |
| IV.2. Réseaux des neurones artificiels (ANN)..... | 50 |
| IV.2.1.Définition..... | 50 |
| IV.2.2.Domains d'applications | 50 |
| IV.2.3.Principe du neurone artificiel | 50 |
| IV.3.Neurone biologique..... | 51 |
| IV.3.1. Corps cellulaire | 52 |
| IV.3.2. Les dendrites | 52 |
| IV.3.3. L'axone..... | 52 |
| IV.4.Neurone formel..... | 52 |
| IV.4.1. Définition..... | 52 |
| IV.4.2. Fonction d'activation | 53 |
| IV.5. Propriétés des réseaux de neurones | 54 |
| IV.5.1.Parallélisme | 54 |
| IV.5.2.Capacité d'adaptation..... | 54 |
| IV.5.3.Mémoire distribuée | 54 |
| IV.5.4.Capacité de généralisation | 54 |
| IV.6. Structure générale des réseaux de neurones | 54 |
| IV.6.1.Réseaux de neurones monocouche..... | 54 |
| IV.6.2.Réseaux de neurones multicouches..... | 54 |
| IV.7.Présentation du modèle | 55 |
| IV.7.1.Couche d'entrée | 56 |
| IV.7.2.Couches cachées | 56 |
| IV.7.3.Couche de sortie | 56 |
| IV.8.Architecture des réseaux de neurones | 56 |
| IV.8.1.Réseaux de neurones non bouclés | 57 |
| IV.8.2.Réseaux de neurones bouclés | 57 |
| IV.9.Apprentissage de réseau de neurones | 58 |
| IV.9.1.Définition..... | 58 |
| IV.10. Algorithme d'apprentissage | 58 |
| IV.11.Résultats de modélisation débit avec le réseau de neurones artificiels | 62 |
| IV.11.1. Collecte des données..... | 62 |
| IV.11.2. Modélisation de la relation débit solide - débit liquide et leur variation de l'erreur | 64 |
| IV.11.3. Modélisation de débit solide en fonction de temps et leur variation de l'erreur | 69 |

| | |
|---|-----------|
| Conclusion..... | 73 |
| Conclusion générale..... | 74 |
| Références bibliographiques..... | 76 |



INTRODUCTION
GÉNÉRALE

Introduction général

L'eau est un élément indispensable pour l'être humain. Depuis son existence, il a su l'utiliser dans ses diverses activités ; elle influe sur tout les cotés de la vie humaine ainsi que sur le sol sur lequel nous vivons. L'influence d'eau sur la terre ou le sol est bénéfique d'un coté, comme peut être fatale d'un autre ; l'une de ses fatalités ; c'est la perte des sols ou le transport solide.

L'érosion hydrique est un phénomène complexe très répandu à l'échelle mondiale, elle menace les potentialités en eau et en sol [1].

Une partie de ces sédiments de perte des sols se déverse dans la mer et d'autres se déposent au fond des barrages et diminuent, ainsi progressivement, leurs capacités annuelles de stockage en eau, d'environ de 2 à 5% [2].

La compréhension des facteurs qui influencent la variabilité spatio-temporelle des flux hydro-sédimentaires et la bonne estimation de la dégradation spécifique, en amont des cours d'eau, sont une démarche indispensable pour lutter contre la perte des terres arables et l'envasement des barrages. Cette démarche doit permettre d'évaluer l'impact de l'activité humaine et du changement climatique sur le processus de détachement, du transfert et du dépôt de la matière solide, donc, de déterminer les méthodes de lutte les plus adaptées [3].

L'évaluation de transport solide dans les bassins Algériens reste jusqu' à nos jours difficile ; à cause de l'insuffisance et parfois à l'absence des mesures de concentration de matières en suspension [4].

Le transport solide constitue par son importance, un problème majeur en Algérie, c'est l'un des pays les plus touché par les conséquences de ce phénomène. Selon [5], l'érosion spécifique moyenne annuelle en Algérie varie entre 2000 à 4000 t/km². [6] citent que l'Algérie dispose de 120 petits et grands barrages en exploitation, d'une capacité de 7 milliards de m³ d'eau, avec un volume régularisé de 3 milliards de m³ par année. Un cumul de vase d'environ un milliard de m³ s'est déposé au fond de ces barrages. Ces valeurs élevées ne sont que la conséquence de la dégradation de l'ensemble des bassins versant de l'Algérie du nord. [6] signale que le transport solide en Algérie enregistre les valeurs les plus élevées de la planète.

L'analyse de ces valeurs et les déclarations faites par les différents chercheurs sur le transport solide en Algérie, nous amène à réagir et à intervenir rapidement et efficacement, et ce par une bonne quantification du transport solide en utilisant, d'une part, des formules mathématiques fiables et d'autre part une modélisation par le réseau de neurone artificiel.

De nombreuses recherches ont été effectuées pour déterminer des méthodes d'estimation et de quantification du transport sédimentaire ou de trouver une théorie de la mécanique capable d'expliquer ce phénomène. Mais à cause de la complexité de ce phénomène et des différentes variables entrant en jeu, il est toujours resté l'un des problèmes hydrauliques qui demandent plus de développement.

Pour l'estimation des apports solides d'un cours d'eau, les ingénieurs ont toujours utilisé des formules empiriques dont la validité d'application est douteuse.

L'objectif de ce travail est de faire une étude de transport solide, l'étude sera accentuée sur le transport en suspension, de oued Cheliff et au niveau de deux stations hydrométriques

Introduction général

DJIDIOUIA RN4 et SIDI BELATTER. Nous traitons et nous analysons les données de ces deux stations afin d'établir des relations existantes entre les débits liquides et solides à différentes échelles du temps.

Pour se faire, notre étude s'articulera sur quatre chapitres :

Un aperçu bibliographique où nous avons parlé sur l'érosion hydrique du sol, les causes de l'érosion et du transport solide dans les bassins versants, méthodes d'évaluation du transport solide, les principaux travaux effectués en Algérie pour atténuer ce phénomène. Le chapitre II sera consacré à la présentation de la zone d'étude ; aux différentes stations hydrométrique implantées dans la région. Le chapitre III sera porté sur l'étude de transport solide par suspension. Nous déterminerons la relation débit liquide-débit solide mensuelle, saisonnière, annuelle et intégrale ainsi que le modèle mathématique représentant les couples (débit solide – débit liquide). Le dernier chapitre présente une modélisation par les réseaux de neurones artificiels. Une modélisation statistique des flux-sédimentaires avec une définition détaillée de la méthodologie suivie. La variabilité des flux hydro-sédimentaires ont été discutées parallèlement le long de la période d'observation pour interpréter les résultats finaux. Et enfin nous terminons par une conclusion générale qui présente l'essentiel des résultats des chapitres précédents.



CHAPITRE I

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

Plusieurs études anciennes et récentes ont été menées par des hydrologues et experts de l'environnement au sujet du phénomène des pertes des sols et de l'érosion hydrique [7].

L'Algérie est un pays montagneux l'histoire géologique de l'Algérie a montré que ces montagnes sont jeunes et à fortes pentes, la lithologie constituée en majorité des roches tendres est sensible à un phénomène naturel appelée l'érosion. L'érosion est composée d'un ensemble de processus complexes et interdépendants qui provoquent le détachement des particules du sol, c'est la perte du sol due à l'eau qui arrache et transporte la terre vers un lieu de dépôt [8].

Ce phénomène qui produit le détachement des matières du sol est nommé le transport solide.

Dans cette synthèse bibliographique nous allons parler le transport solide et la méthode de leur quantification dans notre zone d'études Oued Chélif.

I.1.Dégradation des sols

La dégradation des sols est due à des nombreux facteurs, dont les phénomènes climatiques extrêmes comme: les fortes crues, inondations, sécheresse...etc. ; et aux activités humaines qui polluent les sols ou nuisent à leur qualité ou leur utilité, ce qui a une incidence négative sur la production agroalimentaire, les moyens de subsistance et la production et la fourniture d'autres biens et services éco-systémiques. [9]

D'autre part [10] estiment que 45% du paysage des régions centrales du Nord de l'Afrique sont dégradés, par l'action de l'érosion hydrique. En Algérie, le transfert de sédiments dans les bassins fluviaux s'avère, par certaines études, relativement important [11]. L'inventaire, réalisé récemment par [12], sur un ensemble de 77 bassins-versants algériens, a montré que la fourchette de la perte des sols se situe entre 93 et 44 000 $Tkm^{-2} an^{-1}$ (**Figure 01**).

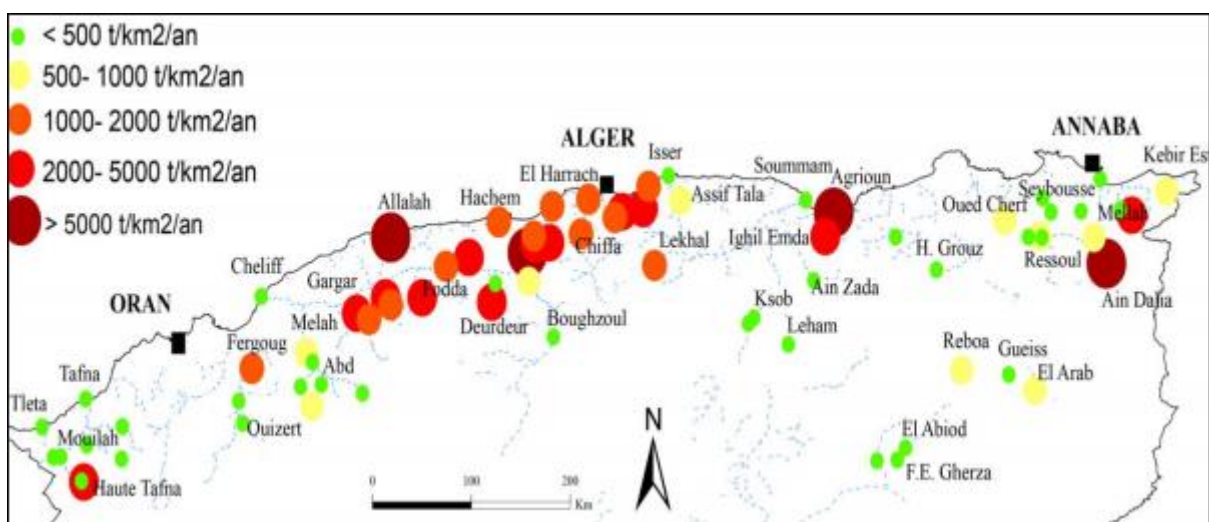


Figure 01 : Dégradation des sols dans 77 bassins de l'Algérie.

I.1.1 Les types de dégradation des sols

La dégradation des sols est définie comme étant la réduction de la productivité biologique et économique d'un écosystème terrestre principalement sol et végétation, et des processus écologiques, biogéochimiques et hydrologiques qui s'y produisent [13]. C'est donc le résultat d'actions anthropiques et de processus naturels qui causent la détérioration de la ressource naturelle ou de la capacité de régénération de l'écosystème. Cette action est souvent amplifiée par les événements climatiques : fortes crues, inondations, sécheresse, etc., notamment dans les pays situés dans les zones semi-arides du globe et où les écosystèmes sont fragiles, les ressources sont rares et la biodiversité est menacée [14].

On distingue quatre principaux types de dégradation des sols: érosion hydrique, érosion éolienne, dégradation chimique et dégradation physique (**Figure 02**).

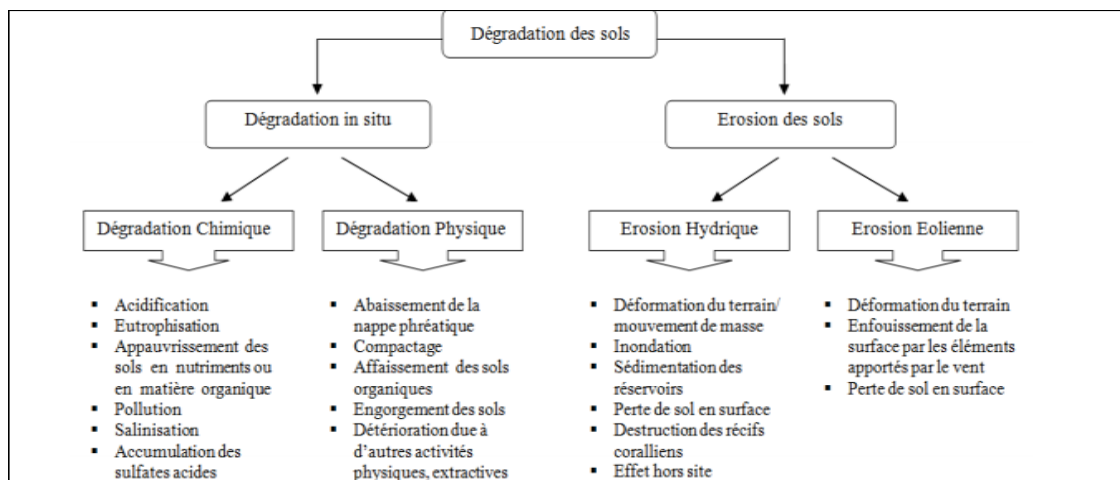


Figure 02 : Schéma descriptif des types de dégradation des sols.

Selon [15], 33 pour cent des ressources en sols du monde sont modérément ou fortement dégradés par l'érosion, la salinisation, l'épuisement des substances nutritives, le compactage, l'acidification et la pollution chimique du sol.

I.2 Phénomène de l'érosion hydrique du sol

I.2.1 Généralité

L'érosion hydrique du sol est un phénomène complexe, résultant du détachement de sol par l'impact des gouttes de pluie et du transport des particules détachées par l'écoulement de surface [16]. [17] Einestien affirme que chaque particule qui passe dans une section de mesure doit satisfaire deux conditions : elle doit être érodée à un endroit quelconque des versants à l'amont et elle doit être transportée par l'écoulement (ruissellement) de l'endroit d'érosion vers l'exutoire du bassin.

Ce phénomène est composé d'un ensemble de processus complexes. Le détachement et le transport des particules du sol font intervenir de nombreux paramètres, dont les plus importants concernent les deux agents principaux que sont la pluie et le ruissellement superficiel.

I.2.2 Splash

Le splash est le premier stade de l'érosion hydrique. Ce phénomène compacte, arrache et éjecte les particules du sol. Le choc des gouttes sur le sol provoque le détachement et la projection des particules dans toutes les directions à des distances comprises entre quelques millimètres et plusieurs dizaines de centimètres. Le taux de détachement par le splash est lié à l'énergie cinétique de la pluie, le type de sol et la tailles des gouttes [18].

La force exercée par l'impact d'une goutte d'eau sur la surface du sol possède des composantes normale et tangentielle à cette surface. La composante normale contribue à compacter le sol. La composante tangentielle est plus faible et elle est entièrement transmise au sol (phénomène de cisaillement) [19].

I.2.3 Ruissellement

Le ruissellement de surface, qui apparaît dès que la pluie dépasse la limite d'absorption du sol, exerce sur ce dernier des actions de détachement et de transport. La quantité de sol érodé est ainsi limitée soit par la capacité de détachement de la pluie et du ruissellement, soit par la capacité de transport du ruissellement [20], [21].

I.1.4 Dépôt

Il s'effectue lorsque l'énergie cinétique qui déplace les matériaux issus du détachement diminue ou s'annule.[22]

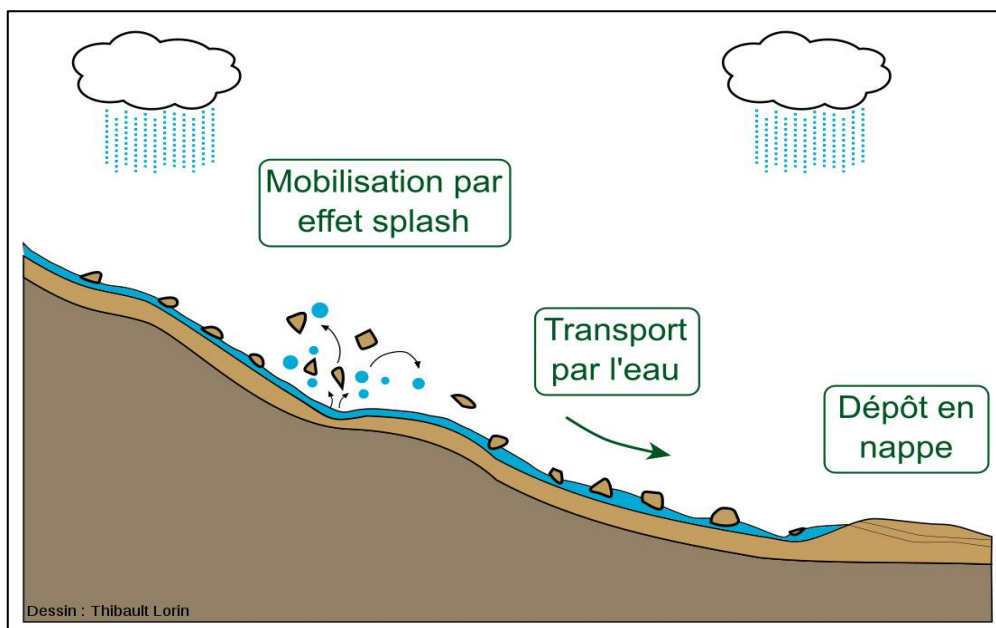


Figure 03 : Processus de l'érosion hydrique. [23]

I.3 Transport solide en Algérie

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.

Le caractère irrégulier, aléatoire de l'érosion hydrique et sa discontinuité spatio-temporelle la rendent complexe.[24]

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.[24]

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.

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 [25], donnent des chiffres allant de 20 à 500 tonnes/km²/an, avec une turbidité comprise entre 16 et 28 g/l. Le taux d'érosion spécifique atteint les 5.000 tonnes/km²/an dans le bassin de l'Agrioun qui alimente le barrage d'IghilEmda (Bejaia). 120 millions de tonnes de sédiments sont rejetées chaque année dans la mer. L'irrégularité du climat influence directement les flux, qui sont caractérisés par :

- L'irrégularité saisonnière et interannuelle des flux d'eau
- La violence et la soudaineté des inondations : le débit du Cheliff peut dépasser les 4200 m³/s
- La sévérité et la durée des périodes basses eaux. [24]

En Algérie, un effort louable a été entrepris depuis les années 1945 pour reforester les vallées w(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 Nationale des 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 concernent aujourd'hui l'amélioration foncière (c'est-à-dire, sous-solage des sols à croûte calcaire, qui augmente la productivité des céréales) et la création de petites retenues collinaires, fournissant 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.

Montrent que la majorité des sédiments piégés dans les réservoirs proviennent du ravinement, des glissements de terrain, des éboulements des berges et de la divagation des oueds. En fonction 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 cherchera 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.). Des méthodes de calcul économique existent, qui permettent de choisir les interventions de lutte antiérosive les plus efficaces, en se basant sur les coûts des traitements antiérosifs, des nuisances auxquelles on peut s'attendre en l'absence d'intervention.[25] [26]

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 affleurant indique qu'une grande quantité de sédiment d'eau ruisselée par conséquent une grande quantité de terre peut être emportée.[25]

Les sols marneux lorsqu'ils sont secs restent non érodables, mais dès qu'ils atteignent une certaine humidité leur sensibilité à la détectabilité et au ruissellement augmente. [27]

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..). [28]

Ses travaux sont basés sur les données de 32 bassins d'Algérie et 6 bassins de Tunisie, dont la superficie varie de 90 à 22300 km². L'auteur a procédé à la correction et l'homogénéisation des séries qui figurent dans les annuaires hydrologiques de l'Algérie. Après avoir regroupé les bassins en trois classes, suivant un critère régional, il a essayé de mettre en évidence le rôle des facteurs suivants : précipitations, écoulement annuel, répartition saisonnière des pluies, le couvert végétal et les facteurs géomorphologiques dans la dégradation du sol

Il a trouvé que :

-Les teneurs en suspension des trois groupes de bassins augmentent d'une façon générale lorsque le débit liquide diminue,

-Le substratum joue un rôle considérable,

-Le crétacé inférieur, Jurassique, les terrains primaires, cristallins et cristallophylliens manifestent un taux d'abrasion négligeable,

-Les bassins à plus forte abrasion se situent dans les régions sismiquement actives,

-La répartition régulière des pluies avec un maximum en saison végétative est favorable aux faibles teneurs.

-Une zone de 300 à 700 mm où l'érosion est très active.[29]

L'auteur a entrepris une étude géomorphologique régionale sur le bassin de Cheliff, afin de mettre en clair le processus d'érosion qui conditionne les transports solides des principaux affluents de l'Oued Cheliff.

Il a basé son étude sur l'analyse morphométrique des réseaux (densité de drainage, coefficient de torrentialité) mise au point par les géographes Américains Schumm et Horton. L'application a permis de trouver des résultats encourageants sur les bassins du Rhiou et du Fodda. A partir de ces résultats, l'auteur a généralisé la méthode à l'ensemble du bassin de l'Oued Cheliff.[24]

I.4 Causes de l'érosion

Les causes sont multiples. L'agent principal est l'eau et plus particulièrement la pluie torrentielle.

Le climat de l'Algérie du Nord est caractérisé par une irrégularité saisonnière et interannuelle des pluies liées à des intensités parfois très élevées. Ces intensités peuvent

engendrer avec des temps de concentration parfois très courts des pertes de terrains considérables.

A cela, doit s'ajouter le couvert végétal, la pente du terrain, la lithologie du bassin versant, l'homme, qui ont leur part dans l'érosion des bassins versants.

I.5 Le transport solide

On appelle transport solide d'un cours d'eau tous les matériaux, des boues les plus fines aux rochers les plus grossiers, que le courant peut entraîner [30]. Il constitue la seconde phase de l'érosion, et aussi la conséquence partielle de la perte en terre des sols au niveau du bassin versant. [31]

Il est régi par deux propriétés du cours d'eau :

1.5.1 Compétence

Elle est mesurée par le diamètre maximal des particules que peut transporter le cours d'eau [32]. Cette caractéristique est fonction de la vitesse d'eau comme le montre le diagramme de Hjulstrom qui divise le transport solide en trois phases : la sédimentation, le transport avec une fonction croissante qui est toujours au dessous de celle d'arrachement des particules (l'érosion). (Figure 04).

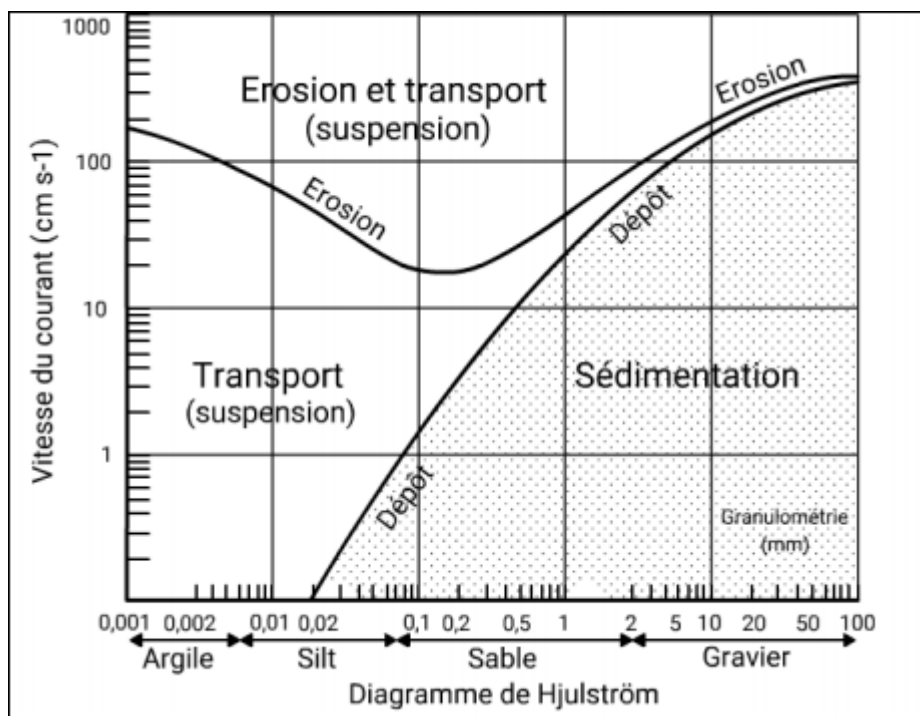


Figure 04 : Diagramme de Hjulstrom. [33]

I.5.2 Capacité :

C'est la quantité maximale de matériaux solides que peut transporter en un point et à un instant donné le cours d'eau. Elle est fonction de la vitesse de l'eau, du débit et des caractéristiques de la section (forme, rugosité, etc ..) [34]

1.6. Les modes de transport solide

Il existe différents modes de transport solide dans les cours d'eau, ils dépendent essentiellement de la morphologie du cours d'eau et des terrains traversés. Il s'agit de trois types de mouvements dans les cours d'eaux (**Figure 05**).

I.6.1. Le transport solide en suspension

Le transport par suspension est le deuxième type de transport solide dans un cours d'eau. Le transport en suspension concerne principalement les matériaux produits par l'abrasion des sols. Aussi sa détermination est très utile en agronomie, car ce sont les éléments les plus fertilisants qui sont ainsi transportés : particules fines, éléments chimiques et matières organiques (Gestion intégrée des crues).

Le transport solide en suspension est un phénomène assez continu dans l'espace. Les sédiments sont transportés sur de longues distances, à la vitesse du courant. Mais il est très discontinu dans le temps puisqu'il est conditionné par le phénomène d'abrasion. [35]

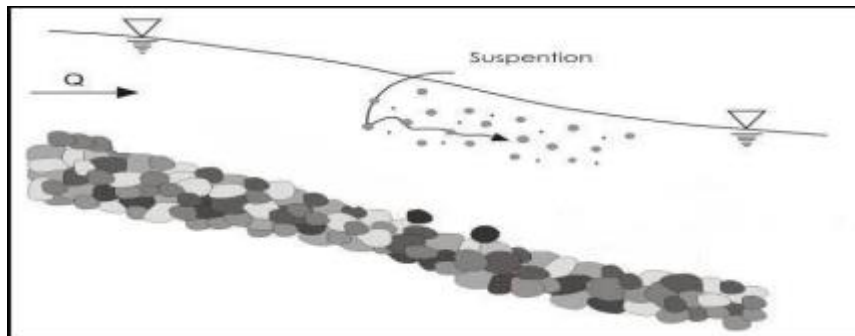


Figure 05 : Transport solide en suspension. [36]

I.6.2 Le transport solide par charriage

Le transport par charriage est l'un des principaux types de transport solide dans un cours d'eau, il s'alimente surtout par érosion du lit et des berges du cours d'eau. Il contribue pour une large part à la formation et à l'équilibre du lit, modelant ainsi le profil en long du cours d'eau. Les grains charriés se déplacent par à-coups à une vitesse moyenne très nettement inférieure à celle de l'eau (moins d'un mètre par heure) [37]. Lorsque la turbulence de l'écoulement est importante, les grains sont susceptibles d'être emportés par suspension malgré leur poids. Ils peuvent alors se déplacer sur de longues distances sans rejoindre le fond, avec une vitesse égale à celle de l'eau [38].

Le transport par charriage est très discontinu à la fois dans le temps et dans l'espace. C'est un phénomène très localisé puisqu'il est conditionné entre autres, par la pente et la constitution du lit, qui peuvent varier d'un tronçon de cours d'eau à l'autre. Par contre, pour une même section de cours d'eau, il peut être lié au débit liquide, donc, dans certaines conditions il se prête mieux à l'étude théorique et à l'élaboration de formules. [37]

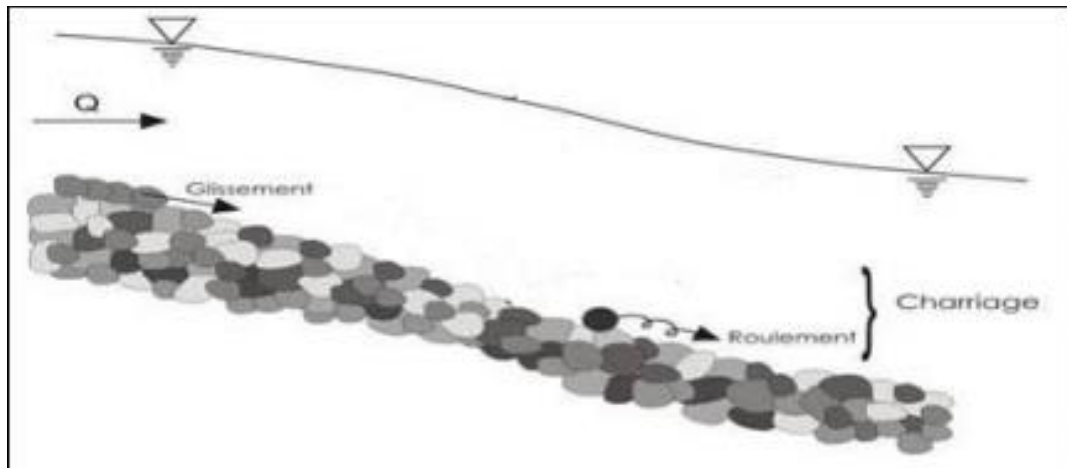


Figure 06 : Transport solide par charriage. [39]

I.6.3 Le transport solide par saltation

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

On explique la progression par saltation de la façon suivante: un grain glisse sur le fond du lit, puis rencontre un obstacle, il se bute alors sur cet obstacle. La différence de pression entre l'amont et l'aval du grain augmente, il bascule, puis est arraché, entraîné par le courant et, par gravité, retombe au fond où le processus recommence. Il est évident que les composantes multiples de la vitesse, qui caractérisent la turbulence, jouent un rôle important dans la saltation. [40]

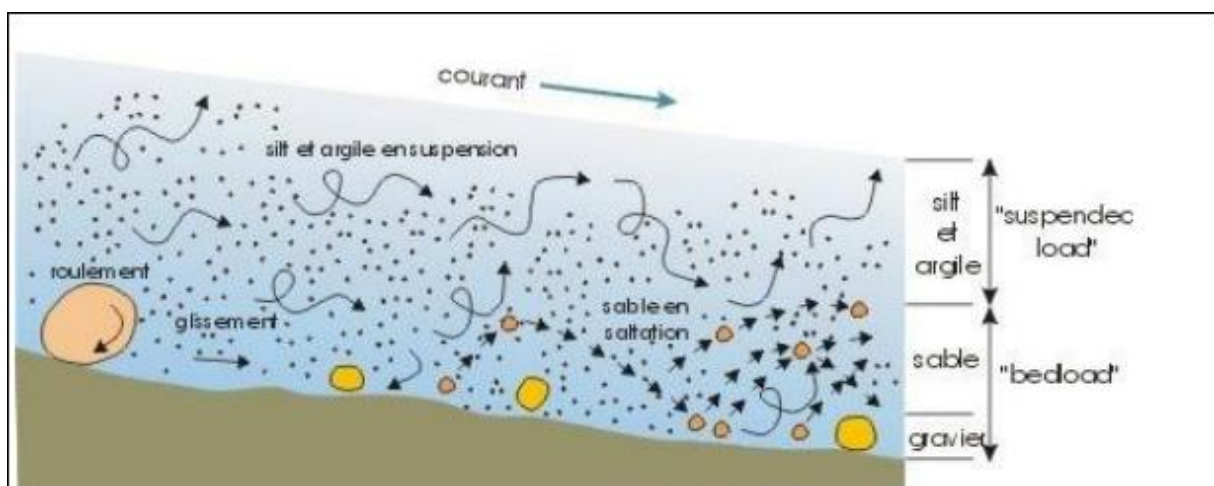


Figure 07 : Les modes de transport solide.[41]

On distingue deux catégories de transports solides : les matières en suspension et le charriage de fond. Ce dernier comprend les particules qui glissent, roulent ou sautent sur le fond ou près du fond.

I.7 Etudes réalisées sur le transport solide et l'érosion en Algérie [17]

De nombreuses études expérimentales avaient été consacrées au problème de l'érosion. Les principaux résultats ont permis d'appréhender, sur une base scientifique, le mécanisme de l'érosion.

I.7.1 Medinger (Mars 1960)

Medinger effectue une étude sur les méthodes de mesure et présente les données de mesure recueillies sur une trentaine de bassins versants durant la période 1946-1957.

Ses essais ont porté sur l'élaboration d'une relation entre débits et concentrations instantanées. Les résultats obtenus n'étaient pas satisfaisants.

I.7.2 Tixeront (Août 1960)

Les travaux de Tixeront sont basés de 32 bassins d'Algérie et 9 bassins de Tunisie. Les superficies varient de 90 à 22300 km² et les observations portent sur une durée de 2 à 22 ans.

L'auteur a procédé à la correction et l'homogénéisation des séries qui figurent dans les annuaires hydrologiques de l'Algérie.

Puis a regroupé les bassins en 3 classes suivant un critère régional, et pour chacune d'elles une relation débit solide et ruissellement.

Les principales conclusions des travaux de Tixeront sont résumées comme suit:

- Les teneurs en suspension des 3 groupes de bassins augmentent d'une façon générale, quand le ruissellement diminue.
- Les terrains des régions fortement plissées, fournissent des taux d'abrasion et des teneurs en suspension particulièrement élevés.
- La distribution régulière des précipitations avec un maximum en pleine saison végétative est favorable aux faibles teneurs. La distribution la plus favorable est celle qui emporte au maximum en automne.
- La répartition pluviométrique permet la différenciation de 3 zones :
 - Une zone où la pluviométrie inférieure à 300 mm est insuffisante pour causer une érosion appréciable.
 - Une zone de 300 à 700 mm où l'érosion est très active 1200t/km²/an.
 - Une zone de pluviométrie supérieure à 700 mm, mais qui bénéficie d'un couvert végétal protecteur où l'érosion est de l'ordre de 350 t/km²/an

I.7.3 Capolini (1965-1969)

L'auteur a effectué une étude géomorphologique régionale sur le bassin du Cheliff (pente, formation lithologique, superficielle, couvert végétal).

L'étude a permis à Capolini de :

- De quantifier les débits solides en associant à chaque formation lithologique un débit solide spécifique.
- D'établir une relation statistique entre l'érosion spécifique des bassins versants et les coefficients de torrentialité.
- De suggérer une méthode de cartographie de la susceptibilité à l'érosion à partir de la

cartographie du coefficient de torrencialité, en partant de l'hypothèse, vérifiée sur les bassins du Fodda et de Rhiou, que les zones fortement érodées coïncident avec les zones à coefficient de torrencialité élevé.

I.7.4 Sogreah (1969)

L'étude est basée sur les données recueillies dans 27 bassins, Les durées d'observation sont très variables.

Cette étude a montré que le transport solide des oueds est fonction du ruissellement annuel des crues et de la perméabilité des bassins versants, en admettant que le degré de perméabilité est un facteur qui intègre en 1^{ère} approximation les paramètres géomorphologiques.

Sur un bassin de nature géomorphologique donnée, le transport solide apporté par les crues croît avec le volume ruisselé.

I.7.5 Demmak (1982) :

Demmak a mis en relief l'importance de cette érosion et ses conséquences, et a proposé une méthodologie d'étude et de lutte.

A cet effet, il a procédé à la sélection de 30 bassins versants représentatifs de l'Algérie du nord de différentes conditions physiques, géomorphologiques, climatiques et hydrologiques. Il a défini une corrélation multiple très significative incluant plusieurs paramètres physiques pour un bassin versant côtier à très forte érosion, qui n'est valable que pour les bassins versants Téliens ayant un pourcentage marneux érodable supérieur à 10% et une pluviométrie supérieur à 300 mm.

Les travaux de Demmak ont montré que l'érosion spécifique dépasse 2000t/km²/an sur la plupart des bassins versants de l'Atlas Télien. Il atteint 4000t/km²/an sur la chaîne des côtiers de Dahra.

I.7.6 Etude PNUD/OPE (1987)

L'étude avait pour objectifs :

- D'améliorer la connaissance des causes de l'érosion hydrique en zone semi-aride.
- De quantifier les principales formes d'érosion susceptibles de se développer et préciser les relations érosion-transport solide.
- De tester une méthode d'évaluation des transports solides à l'exutoire d'un grand bassin.
- De contribuer à la définition d'une stratégie de lutte contre l'érosion et les transports solides.

L'étude a montré que l'érosion en Afrique du nord est essentiellement liée à l'énergie du ruissellement. Ce sont les épisodes pluvieux importants entraînant un ruissellement généralisé qui provoque les pertes en terre les plus notables et contribuent à l'essentiel des transports solides à l'exutoire des bassins.

L'analyse globale des données a permis de mettre au point des relations entre :

- le ruissellement, la précipitation génératrice, durée de l'averse et la température.
- le débit maximal, le volume ruisselé et le temps de base de la crue
- la concentration du débit solide en suspension et le débit maximal

Cependant, ce modèle reste un outil provisoire, il devra être complété et affiné sur la base de données cartographique et hydrologique exhaustives. En effet, les trois années d'observation constituent une période trop courte pour obtenir des résultats significatifs et appréciables.

I.8 Approche et méthode de quantification de transport solide

Les méthodes employées sont très différentes et s'avèrent riches d'enseignements lorsqu'elles sont croisées : Ces méthodes sont classées en trois types :

I.8.1 Méthodes de quantification directe

Cette méthode basée sur la concentration de la matière en suspension débute par le prélèvement en un point unique soit sur le bord, soit au milieu de l'Oued au moyen d'un flacon de 1 litre [42]. L'échantillonnage s'effectue lors d'une crue suivant des intervalles de temps variables en fonction du régime de l'Oued. Ainsi, en étiage ou lorsque le débit est constant au cours de la journée, il est possible d'effectuer un à deux prélèvements au cours de la journée [43].

En période de crue, le nombre des prélèvements dépend des deux phases de l'événement:
-Un prélèvement est effectué durant la montée des eaux lorsque la montée est lente et toutes les quarts d'heures et demis heures lorsque la montée est rapide.
- En période de décrue, on prélève un échantillon toutes les heures durant les six premières heures et toutes les deux heures ensuite. L'espacement dans le temps des prélèvements des concentrations accroît au fur et à mesure qu'on s'éloigne du pic de la crue. Le traitement des matières en suspension prélevées, se fait au laboratoire par décantation, filtrage avec un filtre de type Laurent ($\varnothing = 32$ cm) et séchage à l'étuve à 110°C durant 30 minutes et enfin la pesée. Les débits solides (Q_s) en Kg s⁻¹ sont déduits du produit des deux paramètres : débit et concentration.

I.8.2. Méthode d'application des équations du transport solide (empirique)

Nombreuses formules de transport solide sont utilisées pour estimer le taux d'apports solides. Dans des conditions d'écoulement bien précises, toutes ces formules donnent une évaluation du débit solide total ou du débit solide de charriage.

Pour la prévision à l'aide de ces formules, il faut disposer des données du terrain sur l'hydraulique du chenal et matériaux du lit, qui sont des facteurs primordiaux.

Le type de données disponibles est très souvent déterminant pour choisir une équation convenable.

Il ya 3 type de transport solide donc il ya différent d'équation pour chaque type

I.8.2.1 L'équation universelle de perte en terre [44]

Le modèle empirique le plus connu pour estimer l'érosion hydrique est l'équation universelle de perte en terre, USLE (Universal Soil Loss Equation). Ce modèle a été développé aux Etats Unis par Wischmeier pour des terrains agricoles. L'USLE permet l'estimation de la perte en terre pour une parcelle donnée dans des conditions bien définies. Le modèle est basé sur l'analyse statistique de 10'000 "parcelles expérimentales années". Ces parcelles expérimentales sont standardisées, elles ont 22.1 m de longueur et de 9 % de pente. L'équation pour la perte en terre s'écrit :

$$A = R.K.L.S.C. P \dots \dots \dots (I.01)$$

avec :

A : perte en terre [t ha⁻¹ an⁻¹]

R : facteur d'agressivité climatique [kJ mm m⁻² h⁻¹]

K : facteur sol [t m² h an⁻¹ ha⁻¹ kJ⁻¹ mm⁻¹]

L : facteur longueur de pente [-]

S : facteur pente [-]

C : facteur agronomique [-]

P : facteur des aménagements anti-érosif [-]. (Exprime le rapport entre la perte en terre d'une parcelle où l'on pratique des mesures de conservation et celles d'un champ cultivé dans le sens de la pente).

A. Formule de Graviovic

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 : [45]

$$E_s = 3,14 \cdot T \cdot P_0 \sqrt{Z^3} \dots \dots \dots (I.02)$$

Où :

E_s : érosion spécifique dans le bassin versant (T/Km² .an).

T : coefficient de température.

$$T = \sqrt{\frac{t_0}{10}} + 0,1 \dots \dots \dots (I.03)$$

Avec :

t₀ : température moyenne annuelle en C°.

p₀ : pluie annuelle en (mm).

Z : coefficient d'érosion.

Avec :

$$Z = y. (x.a).(\delta + \sqrt{I_{moy}}) \dots\dots\dots(I.04)$$

Où :

Y : valeur du coefficient de la résistance du sol du à l'érosion. Il dépend de la roche mère, le type du sol et du climat.

(x.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.

δ : équivalent numérique des processus visibles et nettement prononcés dans le bassin versant.

I_{moy} : indice de pente moyenne du bassin versant.

B. Formule de Tixeront [46]

$$E_s = (S_1.Ta_1 + S_2.Ta_2 + S_3.Ta_3 + \dots\dots\dots S_n.Ta_n) \dots\dots\dots(I.05)$$

Avec :

E_s : érosion spécifique (t/Km².an)

Ta_1, Ta_2, Ta_n : taux d'abrasion en fonction de la perméabilité du sol dans les sous bassins (T/Km²).

S : superficie totale du bassin (Km²).

S_1, S_2, S_n : superficie des sous bassins (Km²).

Maintenant, si on suppose que la totalité du bassin possède une même perméabilité,

On a :

$$E_s = K.L_e \dots\dots\dots(I.06)$$

Avec :

L_e : lame d'eau ruisselé moyenne interannuelle (mm).

K : coefficient qui tiens compte de la perméabilité es terrains (constante).

K=8,5 pour les terrains d'une perméabilité élevée.

K=75 pour les terrains d'une perméabilité moyenne élevée.

K=350 pour terrains d'une perméabilité faible à moyenne.

K=1400 pour les terrains d'une perméabilité faible.

K=3200 pour les terrains perméables.

C. Formule d'ANRH (1970) [47]

Cette formule exprime la dégradation spécifique des bassins Algériens en fonction, des indices de précipitations, la lithologie et la torrentialité des cours d'eaux.

$$T_{ss} = 26,62 I_e + 5,071 IP + 9,77 Ct - 593,59 (T/km^2/an) \dots\dots\dots(I.07)$$

Avec :

T_{ss} : transport solide spécifique moyen annuel (T/Km.an).

I_e : indice lithologique (%).

$C_t = D_d \cdot F_1$: coefficient de torrentialité.

$D_d = \frac{\sum_{l=1}^N L_l}{A}$ densité de drainage.

L_1 : longueur de tous les cours d'eau d'ordre 1 (Km).

F_1 = nombre de talweg/ surface : fréquence des talwegs élémentaire.

Cette formule est applicable dans les conditions suivantes :

$$I_e > 10\%.$$

$$I_p > 300.$$

D. Formule de la SOGREAH (1969) [48]

Cette formule est basée sur des données de 30 bassins algériens, de superficie comprise entre 100 et 300 km², elle est représentée par l'équation ci-dessous :

$$Ass = \alpha \cdot E^{0.15} (A/km^2/an) \dots \dots \dots (I.08)$$

Avec :

E : Ecoulement moyen annuel (mm) ;

α : Coefficient dépendant de la perméabilité du sol.

Tableau 01 : Valeur du coefficient α selon le niveau perméabilité

| Classe de perméabilité | Valeur de α |
|------------------------|--------------------|
| Imperméable | 3200 |
| Perméabilité faible | 1400 |
| Moyenne a faible | 350 |
| Moyenne | 75 |
| Forte | 8.5 |

E. Formule de Fournier (1960)[49]

Fournier (1960) a développé un modèle pour estimer la dégradation spécifique d'un bassin versant en (T/km²/an), quel que soit son emplacement géographique, en utilisant les données de 104 bassins versants, situés dans différentes régions du monde. Le modèle de Fournier (1960) est défini par l'équation suivante :

$$AF = \frac{1}{36} \times \left(\frac{Pm^2}{P_{an}} \right)^{2,65} \times \left(\frac{D^2}{S} \right)^{0,46} (T/km^2/an) \dots \dots \dots (I.09)$$

Avec :

P_m : Précipitation mensuelle du mois le plus arrosé (mm),

P_{an} : Précipitation moyenne annuelle (mm),

D : Dénivelée moyenne (m), S : Surface du bassin versant (km^2).

I.8.2.2 Transport par charriage

Le charriage est un mouvement des grains près du fond par roulement ou glissement des grains les uns sur les autres ou par petits sauts. Le charriage est un déplacement mais bien sur pour qu'il y ait déplacement il faut qu'il y ait d'abord arrachement du grains. ces déplacement sont dus à la traînée et à la portance.

Les particules charriées se déplacent sous l'effet des actions hydrodynamiques exercées par l'écoulement d'eau. Le transport solide par charriage concerne plutôt les particules grossières, typiquement de diamètre supérieur à 0,5mm. [50]

Le charriage dit transport de fond, constitue un sérieux problème en régularisation des débits de cours d'eau, et dans la construction des ouvrages hydrotechniques.

A. Description du phénomène [45]

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 (trainée et portance).

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

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

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

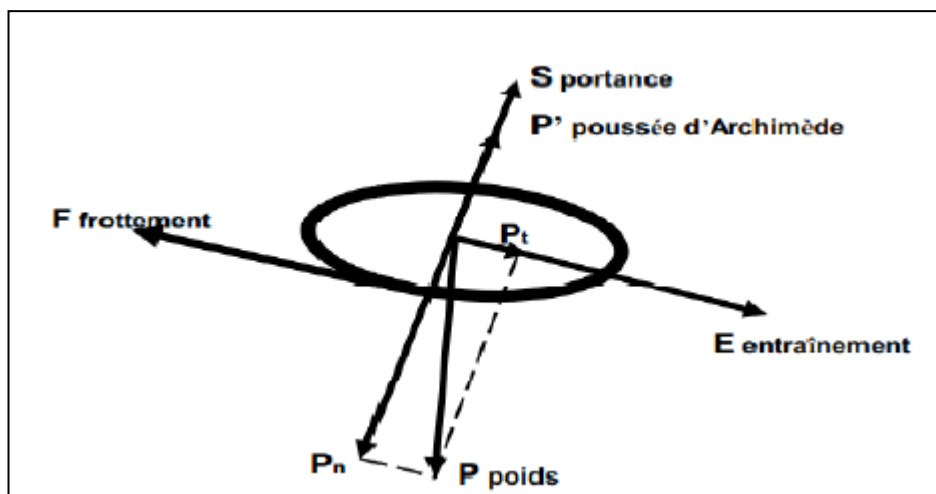


Figure 08 : Equilibre d'un grain posé sur le fond d'un canal.

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

$$\tau = \rho g R_h j \quad (\text{N/m}^2)\dots\dots\dots(\text{I.10})$$

Avec :

- τ : La contrainte sur le fond de la rivière (N/m²).
- J: Perte de charge régulière de l'écoulement (m/m).
- ρ : Masse volumique du liquide(Kg/m³).
- R_h : Rayon hydraulique(m).
- g: Accélération de pesanteur (m²/s).

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

Vu la complexité de mesure, le charriage n'a pas été mesuré, les valeurs utilisées dans la quantification sont inspirées de travaux réalisés par des chercheurs.

Jusqu'à présent, les formules de détermination du débit solide charrié ne donnent de résultats satisfaisants que dans un domaine limité de valeurs des paramètres.

L'application de ces formules doit se faire avec beaucoup de prudence, en général, il faut rester dans le domaine de valeurs des paramètres pour les quels la formule utilisée a été établie.

Il existe un nombre considérable de formules qui permettent de calculer le débit charrié, mais sont rare celles qui donnent plus au moins de bon résultats dans le cas particulier des cours d'eau naturels.

B. Formule de Schoklitsch [51]

Schoklitsch a proposé deux formules empiriques, l'une en 1934 et l'autre en 1950, présentent la plus récente.

$$q_s = \frac{2,5}{s} j_e^{3/2} (q - q_c)\dots\dots\dots(\text{I.11})$$

q_c le débit liquide critique caractérise le début de l'érosion, il est donné par la formule suivante :

$$q_c = 0,26(s_s - 1)^{5/3} \frac{d^{3/2}}{j_e^{7/6}}\dots\dots\dots(\text{I.12})$$

Valable pour $d \geq 6\text{mm}$. Pour un mélange de granulométrie non uniforme on prend $d = d_{40}$ comme diamètre équivalent.

La formule de SCHOKLITSCH s'applique à des diamètres de grains plutôt importants $d \geq 6\text{mm}$, à peu près uniformes et pour des pentes du fond plutôt moyennes à importantes(0.003à0.1).

C. Formule de MEYER-PETER et MÜLLER [51]

En analysant plusieurs formules empiriques obtenues en laboratoire, mais en vérifiant les conditions de Froude, que MEYER-PETER et MÜLLER ont obtenu en 1948 leur dernière formule.

$$0,25\rho^{1/3} g_s'^{2/3} = \gamma R_h \zeta_M j_e - 0.047(\gamma_s - \gamma) \dots \dots \dots (I.13)$$

Cette formule présente l'avantage d'être homogène et de rester valable pour des matériaux de granulométrie largement étendue.

En posant :

$$\tau' = \zeta_M \gamma R_h j_e \quad \text{et} \quad \tau_c = 0.047(\gamma_s - \gamma)$$

Il vient :

$$g_s' = 8 \sqrt{\frac{1}{\rho}} (\tau' - \tau_c)^{3/2} \quad (\text{Kg/s}) \dots \dots \dots (I.13)$$

Où :

$g_s' = g_s (\gamma_s - \gamma) / \gamma_s$ est le débit solide en poids dans l'eau

et $g_s / \gamma_s = q_s$ est le débit solide volumique net (m³/s/m) :

$$q_s = 8 \left(\frac{1}{\gamma_s - \gamma} \right) \sqrt{\frac{1}{\rho}} (\tau' - \tau_c)^{3/2} \quad \text{m}^3/\text{s}$$

Ou sous la forme suivante :

$$q_s = 8 \sqrt{g(s_s - 1) d^3} (\tau^{*'} - \tau_c^*)^{3/2} \dots \dots \dots (I.14)$$

R_h : est le rayon hydraulique du lit.

$\tau^{*'}$: est la force tractrice adimensionnelle corrigée.

τ_c^* : est la tension adimensionnelle critique de frottement.

ζ_M : est un paramètre de rugosité donnée par : $\zeta_M = (K_s / K_s')^{3/2}$

K_s : rugosité totale du lit, évaluée avec la formule de MANING-STRICKLER

$$K_s = \frac{U}{R_h j^{1/2}}$$

K_s' : est la rugosité due aux granulats, évaluée au moyen de la formule de STRICKLER.

$$K_s' = \frac{26}{d_{90}^{1/6}} = \frac{21.1}{d_{50}^{1/6}}$$

Pour une granulométrie non uniforme, on prend le diamètre moyen, $d = d_{50}$, comme diamètre équivalent.

Lorsque le fond est plat (s'il n'y a pas d'ondulation) $\zeta_M=1$, par contre, en présence d'ondulations (dune ou rides) une partie de l'énergie se dissipe en rugosité de forme, on prend $0.35 < \zeta_M < 1$

La formule a été établie en canal pour des écoulements uniformes de 1a 5000l/s sur des granulats de 0.4a 30 mm, de granulométrie tantôt uniforme tantôt étendue, et pour des pentes comprises entre 0,0004et 0,024. La profondeur du canal dans les expériences allait de 1a 120 cm. La gamme de ρ_s/ρ couverte allait de 7,25 à 4,22. [51]

La formule de Meyer-Peteret MÜllera subi des extrapolations sur d'autres conditions pour représenter mieux le phénomène.

Il est donc recommande de n'utiliser cette formule que pour des granulats plutôt grossier, $d > 2$ [mm], a granulométrie uniforme et non uniforme, et pour une gamme de pentes de fond allant de 0.0004 a 0.024. [50]

D. Formule d'Einstein-Brown(1950) [51]

Einstein étudia le problème du charriage par la méthode des paramètres hydrauliques significatifs. Il suppose que le mouvement d'un grain s'effectue par bonds dont la longueur et la fréquence dépendent de ses dimensions, le nombre et le volume des particules en mouvement donnent alors le débit solide de charriage. Il considère ensuite la probabilité pour qu'une particule commence a se déplacer dans un intervalle de temps donné.

La formule est donnée par :

$$\Phi = 40 \left(\frac{1}{\psi}\right)^3 \text{ pour } \frac{1}{\psi} \geq 0.09 \dots \dots \dots (I.15)$$

Avec :

$$\frac{1}{\psi} = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gd}, \quad \tau = \rho g R_h j$$

$$\Phi = \frac{g_s}{\rho_s g F \sqrt{g(s_s - 1)d^3}}$$

$$F = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g(s_s - 1)d^3}} - \sqrt{\frac{36v^2}{g(s_s - 1)d^3}} \dots \dots \dots (I.16)$$

Cette formula est confirmée pour des granulats de diamètre d allant de 0.3mm à 7 mm en laboratoire.

D'ou la formule :

$$q_s = 40F \sqrt{g(s_s - 1)d^3} \tau^{*3} \dots \dots \dots (I.17)$$

I.8.2.3 Transport par 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 même du liquide.

Ces éléments fins sont maintenus en suspension par la turbulence. La quantité de ces matériaux dépend essentiellement des éléments fins, provenant de l'érosion du bassin, suite au ruissellement des eaux de pluie.

Le concept le plus utilisé pour expliquer théoriquement le transport en suspension est le concept de diffusion-convection, qui donnera la distribution verticale de la concentration locale $C(z)$ de particules en suspension.

La concentration n'est jamais parfaitement uniforme. Mais l'équilibre entre le flux ascendant et le flux descendant des granulats brassés dans l'agitation turbulente du liquide lui donne une valeur moyenne constante, qui dépend de la cote Z à laquelle on la mesure au dessus du fond.

La fonction $C(z)$ a été déterminée par M.P. O'BRIEN en 1933. l'échange verticale des particules solides du à la diffusion turbulente et le mouvement gravitationnel exprimé pour la vitesse de chute W à la cote Z est donnée par l'expression suivante : [1500].

$$CW + \epsilon_s \frac{dC}{dz} = 0 \dots\dots\dots(I.18)$$

Cette égalité est l'équation de base de la suspension des sédiments dans la théorie de la turbulence. Elle exprime que, a tout niveau, $z_s < z < h$, il y a équilibre (verticale) entre le mouvement dans le sens de gravite et le mouvement du au gradient de concentration dans le sens contraire.

Où ϵ_s est le coefficient d'échange turbulent qui caractérise l'aptitude des granulats a passé de part et d'autre d'un plan horizontal fictif. ϵ_s est analogue (mais pas forcément égal) au coefficient d'échange turbulent ϵ des molécules liquides.

Pour des faibles concentrations, il est admet en général que : $\epsilon_s = \epsilon$

Il résulte des théories modernes de l'écoulement turbulent de Prandtl et de Von Karman, que la loi de répartition des vitesses dans la hauteur du liquide est une loi logarithmique :

$$\frac{du}{u^*} = \frac{dz}{kz} \dots\dots\dots(I.19)$$

K : paramètre de VON KARMAN.

Et que le coefficient d'échange turbulent des molécules liquides ϵ à pour valeur :

$$\epsilon = u^{*2} / \left(\frac{du}{dz} \right)$$

On obtient donc l'expression suivante :

$$\frac{dC}{C} + \frac{w}{ku^*} \left(\frac{h}{h-z} \right) \frac{dz}{z} = 0 \dots\dots\dots(I.20)$$

En admettant qu'il y a peu de granulats en suspension pour qu'on puisse considérer que w est indépendante de la concentration, l'intégration de cette équation différentielle donne :

$$\frac{C}{C_0} = \left(\frac{h-z}{z} - \frac{z_0}{h-z_0} \right) w / ku^* \dots\dots\dots(1.21)$$

En désignant par h la hauteur du liquide qui s'écoule, et par C_0 la concentration à un niveau de référence z_0 au-dessus du fond.

Cette équation donne donc la distribution de la concentration relative, C/C_0 , pour une seule taille de particule, w .

▪ **Description du phénomène [51]**

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.

La formule de W.Kresser définit 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.

$$U^2 = 360 \cdot g \cdot D$$

Avec :

$$U = C \sqrt{hj} \quad \text{et} \quad \tau = \gamma j h \quad \text{d'où} \quad \tau = 360 \left(\frac{\gamma g}{C^2} \right) D$$

- τ : Tension tangentielle de l'écoulement (N/m²).
- γ : Poids volumique du liquide (N/m³).
- C : Coefficient de Chezy.
- h : Hauteur du liquide (m)
- J : Perte de charge régulière (m/m).
- U : Vitesse de l'écoulement (m/s).
- D : Diamètre des grains (mm).
- g : Accélération de pesanteur (m²/s).

A. Formule d'Einstein [51]

Il existe plusieurs méthodes pour calculer le transport en suspension, présentons celle qui est la plus utilisée : la formule d'Einstein (1950).

Einstein développé une formule qui permet de calculer le débit solide volumique en suspension en exprimant la distribution de la vitesse avec la formule logarithmique, et après plusieurs manipulations mathématiques il a pu obtenir la forme finale suivante :

$$q_{ss} = 11,6 C_{0u}^* z_s [2,303 \log(30,2 \frac{h}{\Delta}) j_1 + j_2] \dots \dots \dots (I.22)$$

Ou j_1 et J_2 sont des intégrales évaluées numériquement (abaques) pour différents valeurs de A_E , ζ , tel que :

$$\zeta = w/k u^{*'}$$

$$A_E = z_s/h$$

ζ : l'exposant de ROUSE

Δ : un terme correcteur

Z_s : la cote du niveau au dessous duquel se trouve le charriage.

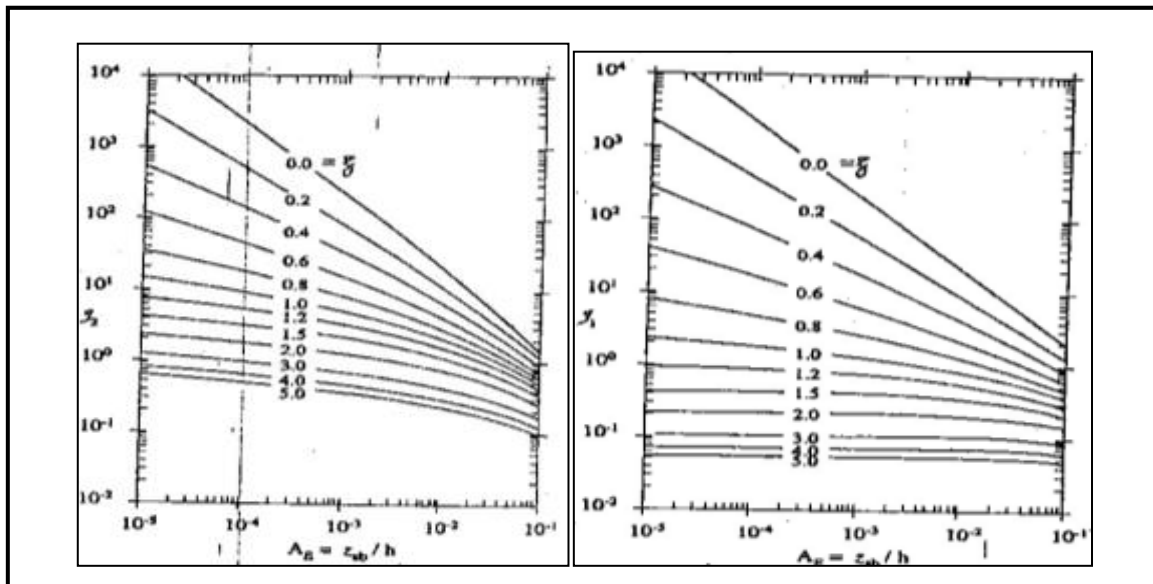


Figure 09 : Intégral de j_1 et de j_2 utilisée dans la méthode d'EINSTEIN

I.8.2.4 Début d'entraînement des sédiments

A. Début d'entraînement des sédiments en suspension

Le début de transport des particules en suspension est un problème plus complexe. Rappelons que ce mode de transport se base sur la théorie de la turbulence, et l'analyse de cette théorie montre le caractère aléatoire du mouvement des grains.

La plus part des critères se base sur la comparaison de la vitesse de frottement u^* à la vitesse de chute des particules solides w .

En se basant sur des résultats expérimentaux et sur des considérations théoriques, Bagnold (1954) et Engelund (1965) indiquent que les particules solides ne peuvent être suspendues que si : u^* dépasse la vitesse de chute soit : [51]

$$u_*/w \geq 1$$

Graf(1971) suggère que le transport en suspension commence si

$$u_*/w \geq 0.4$$

Rijin (1984) propose ce qui suit :

$$\frac{u_*}{w} > \frac{4}{d^*} \quad \text{Pour } 1 < d^* \leq 10$$

$$\frac{u_*}{w} > 0.4 \quad \text{Pour } d^* > 10$$

B. Début d'entraînement des sédiments sur le fond

Pour les différents modes de transport, il est utile, bien que compliqué, de faire la délimitation entre ces modes.

Ces types de transport ne concernent pas les mêmes particules. En fonction de l'écoulement, et plus particulièrement di: la contrainte exercée sur le fond, il y aura soit du charriage soit de la suspension soit les deux modes.

Sheilds a montré expérimentalement en 1936 que pour une granulométrie uniforme, la loi de mise en mouvement des grains pouvait s'exprimer par une relation entre τ^* et le nombre de Reynolds. [45]

$$\tau^* = \frac{\gamma_w R i}{(\gamma_s - \gamma_w) d} \dots\dots\dots (I.23)$$

Avec :

R : rayon hydraulique.

i : pente de l'écoulement.

γ_s : poids volumique spécifique des grains solides est de 26 à 27KN/m³.

γ_w : poids volumique de l'eau 10KN/m³.

d : diamètre du grain.

Aussi, proposons-nous la présentation de Yalin 1972 qui a transformé la relation de Sheilds en une relation entre τ^* et $d^* = d \left[\frac{(\gamma_s - \gamma_w) g}{\gamma_w v^2} \right]$. Cette relation apparait dans la (Figure 10)

La figure 10 Montre donc qu'à 20 C°, le matériau correspondant au faible paramètre de Sheilds a pour diamètre environ 0,8 mm.

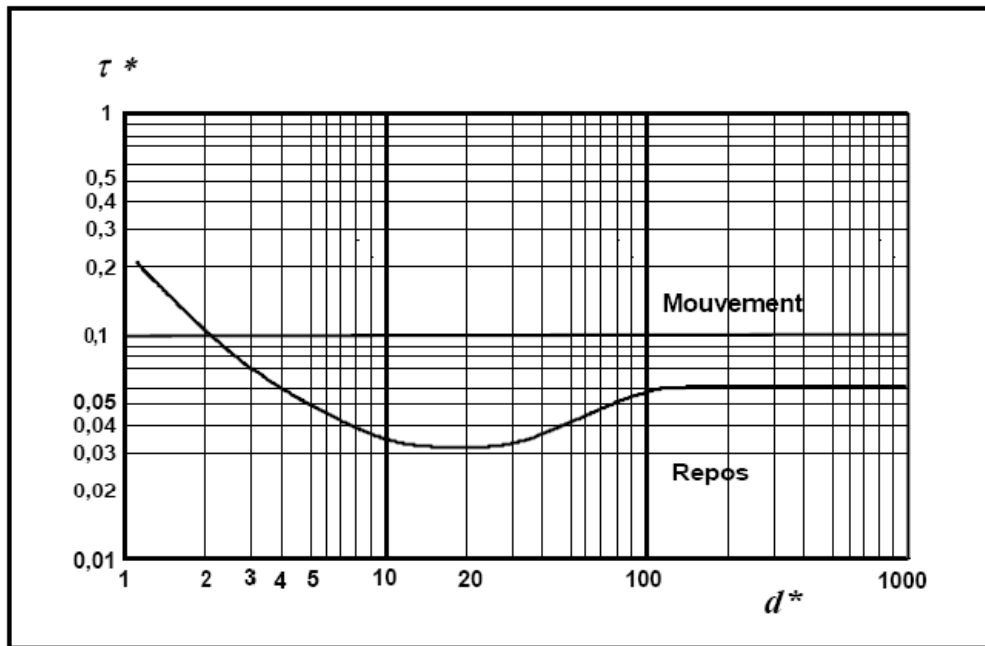


Figure 10: Diagramme de Yalin-Sheilds (d^* en m)

Au départ, seuls les matériaux fins se mettent en mouvement et forment des rides qui progressent dans le sens de l'écoulement. Si la vitesse augmente, il y a formation de dunes qui progressent dans le sens de l'écoulement. Puis le lit s'égalise, il y a mise en suspension des particules après saltation. Enfin, on peut observer des antidunes qui remontent le courant.

Ainsi, selon le régime, le charriage au fond peut s'effectuer sur le lit plat, sur des rides ou au-dessus de dunes.

Finalement, grâce à une classification plus simple on peut déterminer le mode de transport solide selon les valeurs de τ^* :

Tableau 02: Classification de Ramette

| τ^* | 0.01 à 0.05 | 0.05 à 0.25 | 0.25 à 2.50 | 2.50 à 10 |
|-------------------|---------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Mode de transport | Transport nul | Charriage prépondérant | Charriage et suspension | Suspension prépondérante |

I.8.2.5 Méthode par modélisation

Depuis les années quarante, les chercheurs ont eu recours à développer des modèles statistiques reliant les débits solides (Q_s) ou bien les concentrations (C) aux débits liquides (Q). Les travaux de Campbell and Bauder (1940) ainsi que ceux de Miller (1951) constituent

les premiers exemples d'utilisation des courbes de transport solide sur les rivières des Etats Unis d'Amérique.

Ces études ont élaboré au début des relations Q-C pour estimer les débits solides sur une longue période d'écoulement. D'après la littérature, la relation entre les concentrations des MES (C) et des débits liquides (Q) est souvent exprimée selon un modèle d'évolution en puissance et avec une transformation logarithmique. [26]

Ce modèle est de la forme :

$$C = a Q^b$$

Où : a et b sont les paramètres d'ajustement.

Par ailleurs, les modèles utilisant la relation débit solide (QS) – débit liquide (Q), sont apparus pour l'estimation des apports solides. Ces derniers sont sous la même forme mathématique ($Q_s = aQ^b$)

soit une relation de puissance [27].

I.9 Mesure des transports solide [52]

La technique utilisée par ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) pour mesurer la matière en suspension débute par le prélèvement en un point unique soit sur le bord, soit au milieu au moyen d'un flacon de 1 litre en matière plastique.

L'échantillonnage s'effectue lors d'une crue suivant des intervalles de temps variables en fonction du régime de l'oued. Ainsi, en étiage ou lorsque le débit est constant au cours de la journée, il est possible d'effectuer un à deux prélèvements au cours de la journée. En période de crue, le nombre des prélèvements sera augmenté de deux façons:

- Un prélèvement est effectué durant la montée des eaux lorsque la montée est lente et tous les quarts d'heures et demies heures lorsque la montée est rapide,
- En décrue, on prélève un échantillon toutes les heures durant les six premières heures et toutes les deux heures ensuite. L'espacement dans le temps des prélèvements des concentrations accroît au fur et à mesure qu'on s'éloigne du pic de la crue.

Le traitement des matières en suspension prélevées se fait au laboratoire par décantation, filtrage avec un filtre de type Laurent ($\varnothing = 32$ cm), séchage à l'étuve à 110°C durant 30 minutes et pesée.

Les résultats des analyses des MES ont été traités en vue de comprendre le fonctionnement hydro-sédimentaire de chaque cours d'eau et de quantifier les flux de la matière fine. Pour chaque crue considérée, il faut étudier les relations entre les débits liquides et les débits solides.

Nous avons recherché la meilleure parmi les solutions suivantes:

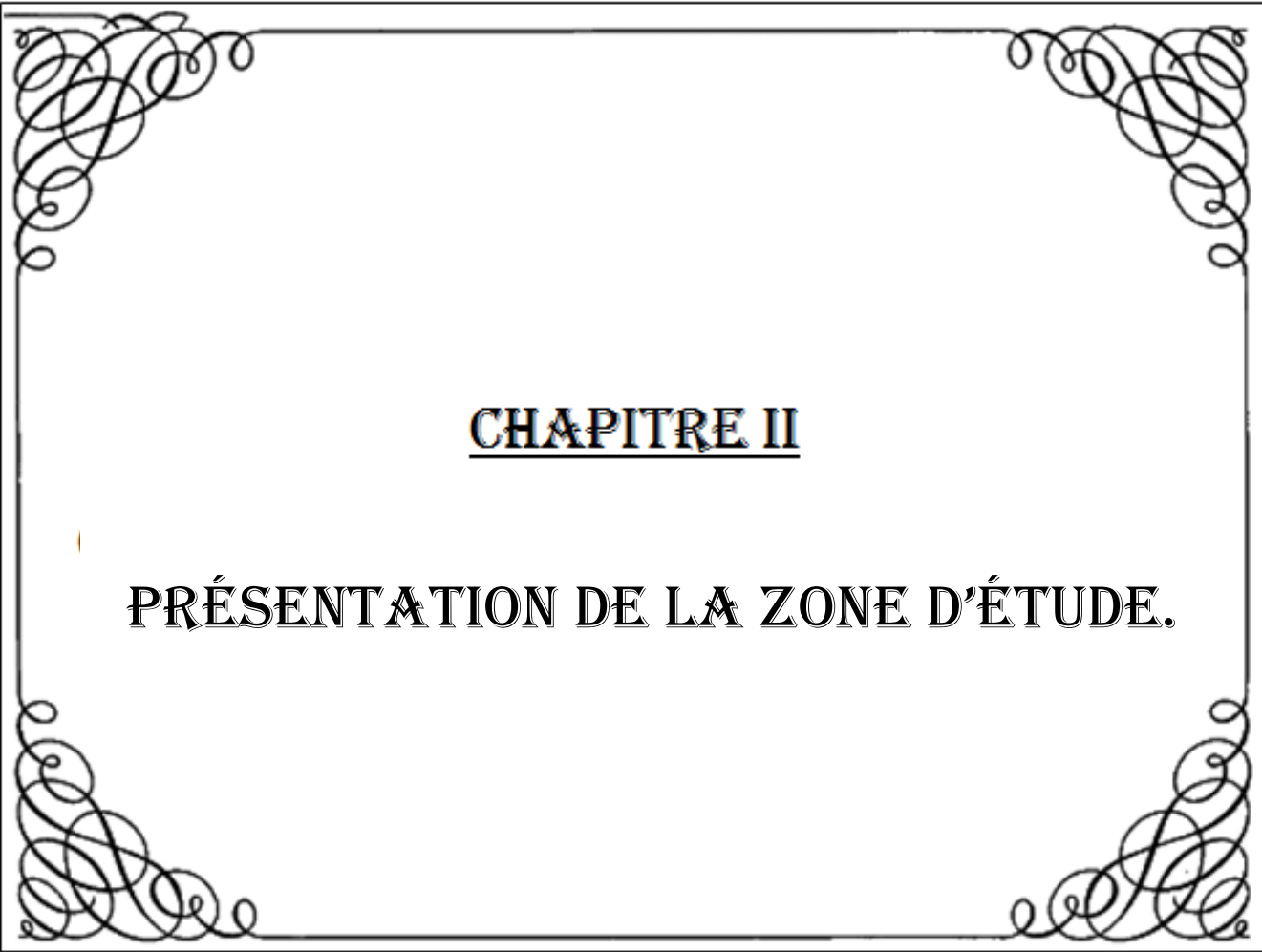
- Linéaire de la forme $y = ax + b$,
- Logarithmique de la forme $\ln(y) = a \cdot \ln(x) + b$,
- Puissance de la forme $y = ax^b$,
- Exponentielle de la forme $y = ae^{bx}$,

- Polynomiale de la forme $y = ax^2 + bx + c$.

Cette méthode de comblement a ainsi permis de reconstituer, quand nécessaire, des valeurs manquantes.

Conclusion

Ce premier chapitre nous a permis de donner un aperçu sur l'état de dégradation des sols et de transport solide en l'Algérie et notre zone d'étude. A travers l'étude bibliographique, ce phénomène est assez répandu et que sa variation spatiale et temporelle est très importante, une grande vallée n'est donc pas à l'abri des dangers de la dégradation des sols. L'étude précédente permet de mettre en lumière les techniques de calcul du transport solide pour une série des données continues et sur une longue période de temps, ce qui est l'une des difficultés que l'on peut rencontrer car les bassins de l'Algérie sont mal mesurés. Une bonne connaissance de la zone d'étude et de son climat est nécessaire pour supporter les formes de transport solide qui y existent car cela dépend principalement des caractéristiques physiques, géographique et climatique de la zone d'étude.



CHAPITRE II

PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE.

Introduction

La présentation de la zone d'étude est primordiale dans ce travail, afin de cerner les caractéristiques de la région et les facteurs qui peuvent bien influencer sur notre étude. En effet, le sous bassin versant bas Cheliff a été choisi comme bassin d'application suite à la disponibilité et à la diversité des données, qui permettent de donner une vision assez complète du bassin versant.

Nous présentons ici les principales caractéristiques du bassin, les données du milieu physique dont nous disposons, et l'interprétation que nous pouvons en faire quant au fonctionnement hydrologique de notre site d'étude.

II.1. Aperçu géographique

Le bassin versant de l'Oued Cheliff fait partie du bassin de l'Oued Cheliff-Zahrez, il représente plus de 77 % de la superficie totale de ce dernier. Il se situe à 100 km au Sud-Ouest d'Alger, entre 0°7' et 3°31' de longitude Est et entre 33°53' et 36°26' de latitude Nord avec une superficie de 43750 km². Ce bassin versant limitée naturellement au Nord par la Mer Méditerranée et cotier, à l'Ouest par la région Oranie, Chott Chergui, à l'Est par la région Algéroise, Zahrez et au Sud par le Sahara. La totalité des flux hydro-sédimentaires de l'Oued Cheliff sont contrôlés par la station Cheliff (013602) et la station Djediouia (012701) exploitée par les services de l'ANRH.

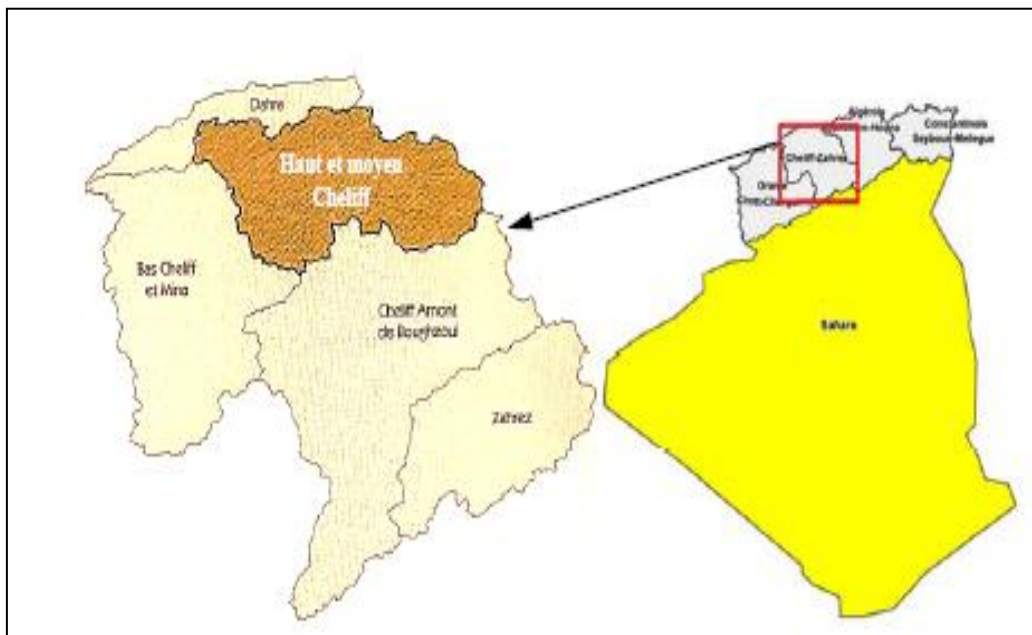


Figure 11 : Carte de situation de la région hydrographique Cheliff [53].

II.2. Aspect géologique

Les formations supérieures et inférieures de la zone d'étude ont un rôle capital dans le processus de l'écoulement. Ils constituent le domaine spatial des échanges entre la surface du sol et le débit à l'exutoire d'un bassin versant.

Le bassin de Cheliff appartient aux bassins sédimentaires sublittoraux allongés Est-Ouest et mis en place après la dernière phase alpine tectonique tangentielle.

Au Nord, cette dépression est séparée de la mer par le tell septentrional représenté par une suite de reliefs parallèles formes essentiellement des terrains jurassico-crétacés que l'on retrouve aussi dans la plaine (Dahra et massif épi-métamorphiques et schistosités de Doui, Rouina et Temoulga) Au sud, le bassin du Cheliff est limité par le tell méridional représenté par un ensemble de massif montagneux ou le substratum y est principalement marno-calcaire et correspond à l'allochtone tellien avec ses différentes nappes [54]. La carte suivante est représentée la nature géologique de notre zone d'étude.

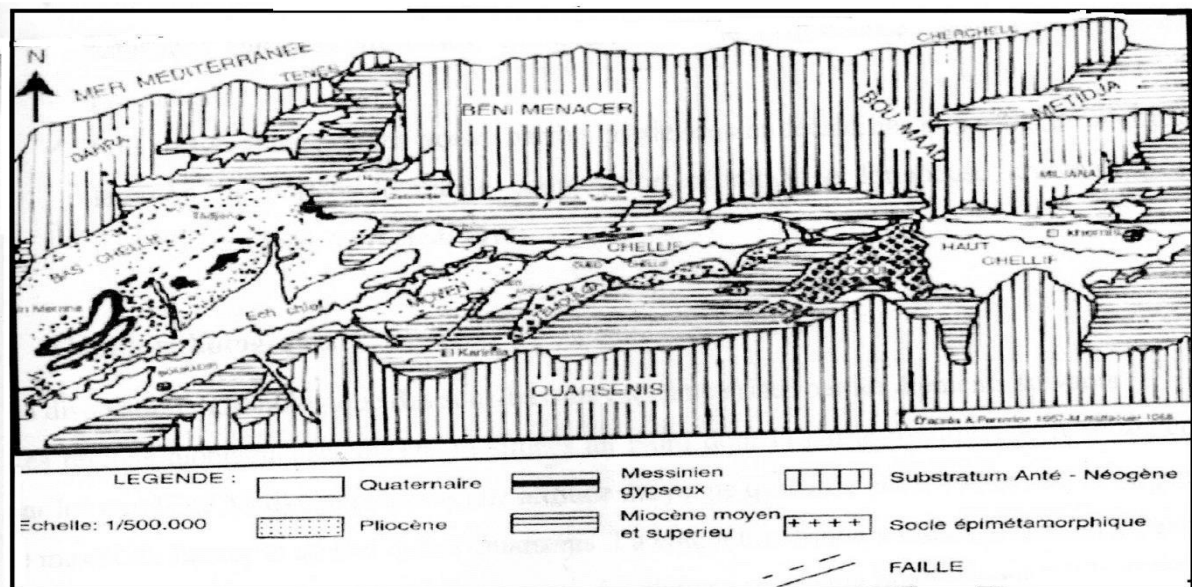


Figure 12: Carte géologique de la zone d'étude [55].

II.3.Végétation et Occupation du sol

Le bassin versant du Cheliff est dans sa majeure partie affecté par un régime climatique semi-aride qui détermine la couverture végétale. En matière d'érosion des sols, c'est le facteur « taux de couverture » qui intervient le plus, ainsi, les forêts (bois et broussailles) occupent plus de 40% de la superficie du Haut et Moyen Cheliff et 15% du bas Cheliff et la Mina, les prairies occupent une partie non négligeable du haut et moyen Cheliff avec un pourcentage de 20% situé à l'Est du bassin, les cultures et les terres arrosées sont concentrées au centre du bassin du Cheliff, le reste se sont des terres au repos et des sols nus tandis que l'Amont de Bougezoul est essentiellement couvert par le sable.

II.4.contexte pédologique

La composition du sol de la plaine est formé par des alluvions, ce sont des sols en majorité peu différents.

D'après la carte pédologique des sols de Carnot, on constate également que l'unité hydrogéologique de la région est caractérisée par une couverture pédologique de dominance alluvionnaire.

Au périmètre de Haut Cheliff, on distingue :

- Les sols alluviaux de la terrasse moderne du Cheliff, qui sont peu évoluées, profonds et perméables.
 - Les sols alluviaux de texture limoneuse de la terrasse récente du Cheliff, qui sont faiblement argileux.
 - Les sols des terrasses anciennes, qui sont rouges sur tuf ou sur croute décalcifiée en surface.
- Alors que des sols du périmètre de Moyen Cheliff sont caractérisés par :
- Les sols d'apport colluvial se trouvant à la lisière de la plaine et sont profond.
 - Les sols hydromorphes se trouvent pour la plupart dans les vallées de la Merdja et de l'Oued Fodda.
- Les sols salés se localisent dans la partie Ouest du périmètre, surtout dans la région de Bled Souala [54].

II.5. Stations hydrométriques

II.5.1. Aperçu historique

Comme pour tous les bassins versants algériens, la mise en place du premier réseau de jaugeage dans le bassin du Cheliff-Zahrez date de 1925. On dispose de données pour la période comprise entre 1969 et 2001. À titre expérimental la station de Djidiouia dispose des données pour la période de 1974 à 2000. Concernant les méthodes de mesures, dans l'ensemble les hauteurs d'eau étaient relevées au moyen d'un limnigraphe, alors que les débits instantanés étaient évalués à l'aide d'un déversoir.

La répartition des stations hydrométriques du bassin versant Cheliff sont représenté sur la figure suivante.

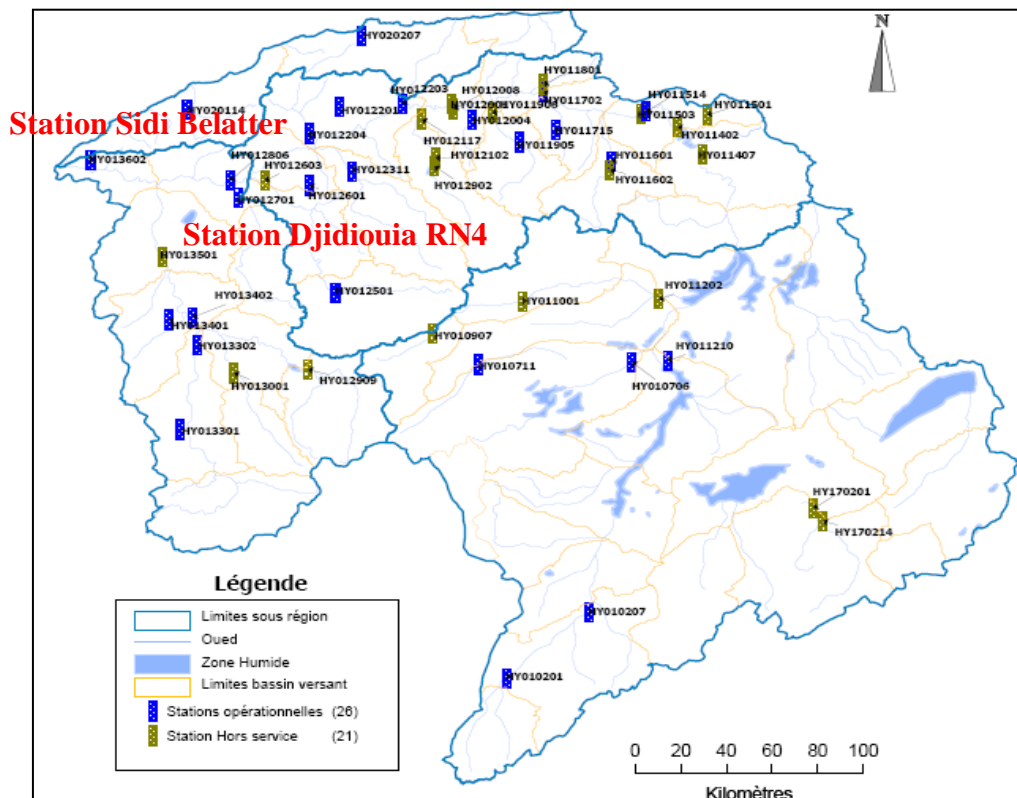


Figure 13: Station hydrométrique du bassin versant.

Le choix des stations hydrométriques est imposé par rapport à la disponibilité de données de mesure, en l'occurrence les débits liquides et les débits solides. Ces données nous ont été fournies par les services hydrologiques de l'ANRH d'Alger, dont ils sont illustrés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 03: *Caractéristiques des stations hydrométriques du bassin de l'Oued Chélif.*

| Bassin | Oued | Station | Code | Période | Nombre des données |
|--------|-----------|---------------|----------|-----------|--------------------|
| Chélif | Djidiouia | Djidiouia RN4 | 01-27-01 | 1974-2000 | 7670 |
| | Cheliff | Sidi Belatter | 01-36-02 | 1969-2001 | 5814 |

II.6.Géomorphologique

La disposition morphologique des sous-bassins est caractérisée par les éléments suivants : Les régions montagneuses du Dahra situés au Nord dont la partie méridionale représentée par les monts de Medjadja présente une altitude moyenne qui varie entre 400 et 500m et par le massif de Zaccar et au sud djebel Ouarsenis. La cote altimétrique varie de 200m au niveau de la plaine à 1000 m au niveau des sommets. La plaine a une pente relativement faible (15%). Elle est bordée au nord par des cônes de déjection qui constituent la zone de transition entre la vallée et la montagne. Au centre, les plaines de l'oued Cheliff qui forme une étroite bande d'une dizaine de kilomètre de largeur. Au sud, les collines qui constituent les piémonts de l'imposant massif de l'Ouarsenis se dressent en range dispersés ne sont pas très étendues (5 à 10 kilomètre de large. [56]

II.6.1. Relief

Les reliefs jouent un rôle très important dans les calculs de l'infiltration et le ruissellement ; pour des reliefs de forte pente le ruissellement sera très rapide (torrentiel) et l'infiltration sera faible (le temps de concentration est très court) Plusieurs études ont montré l'existence d'une relation directe entre la quantité de pluie tombée dans un endroit et l'altitude de ce point. L'augmentation des pluies avec l'altitude dépend également de l'orientation du relief par rapport aux flux pluvieux.

A. Surface

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont donc être en partie reliés à sa surface. Celle-ci correspond à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux. La surface (A) du bassin versant, exprimée en km², peut être déterminée à l'aide d'un planimètre ou mieux par les techniques de la digitalisation. Bien que la grande superficie, en interceptant plus de précipitation, favorise bien l'écoulement. Elle favorise au contraire l'évaporation qui réduit la ressource en eau en période sèche. Le plus petit bassin versant dans notre région d'étude, de point de vue superficie, est le bassin de Djidiouia « 835 Km² », alors que la plus grande superficie correspond au bassin de Cheliff « 43700 Km² » et d'Ain Amara « 2526 Km² » (Tableau 03).

B. Périmètre

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant, il est exprimé en km. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés.

C. La forme

La forme d'un bassin versant influence l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant. Par exemple, une forme allongée favorise, pour une même pluie, les faibles débits de pointe de crue, ceci en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus importants. Ce phénomène est lié à la notion de temps de concentration. En revanche, les bassins en forme d'éventail (bassin de Djediouia ; $K_G=2.04$), présentant un temps de concentration plus court, auront les plus forts débits de pointe, comme le montre la figure.

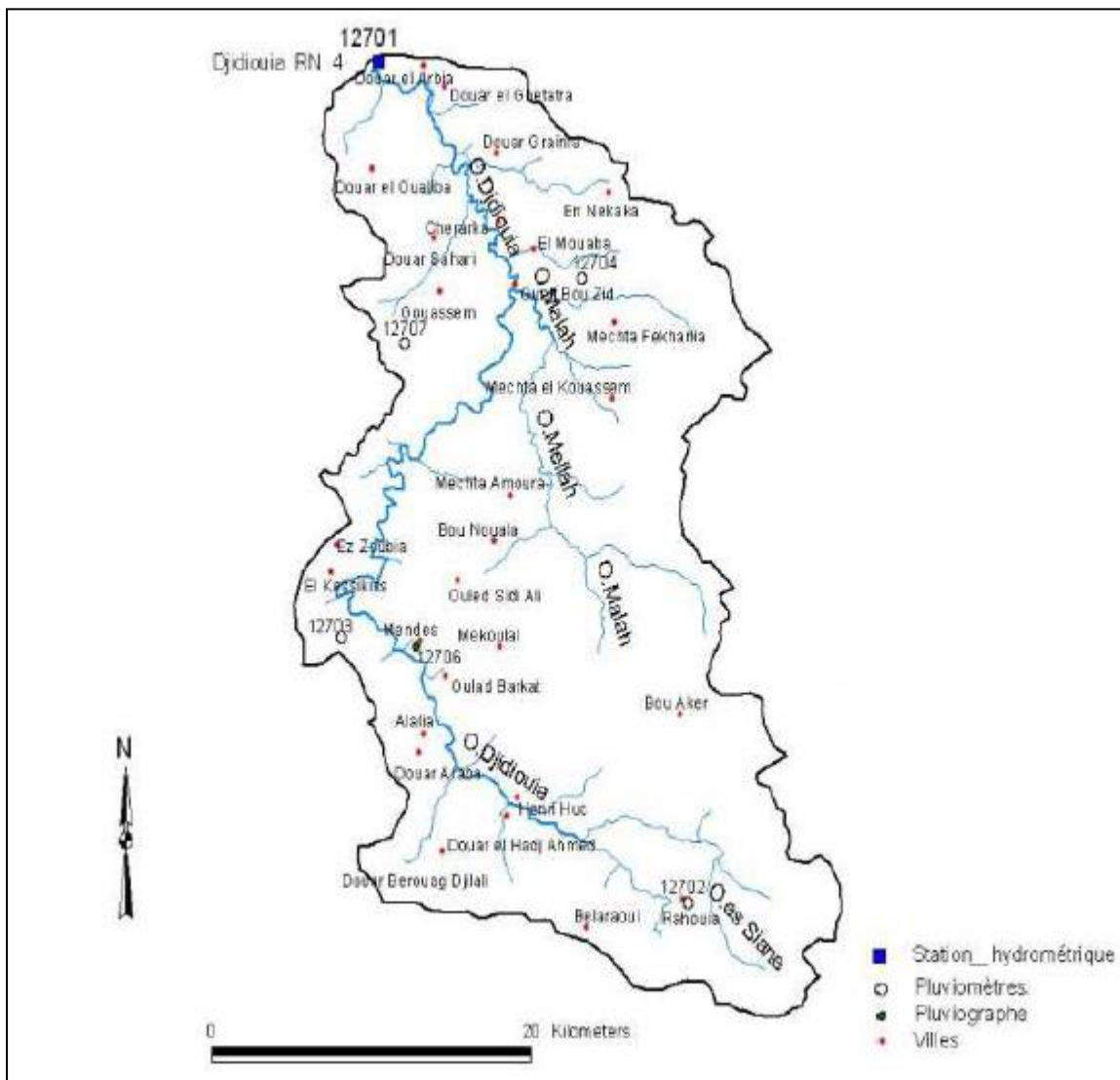


Figure 14: Bassin versant de Oued Djidiouia (ANRH,2016)

L'Oued Djidiouia est un cours d'eau situé sur l'Est de la wilaya de Relizane dans le Nord-Ouest de l'Algérie, il prend sa source dans les monts de Rahouia sur le sud est de Relizane et se jette dans oued Cheliff.

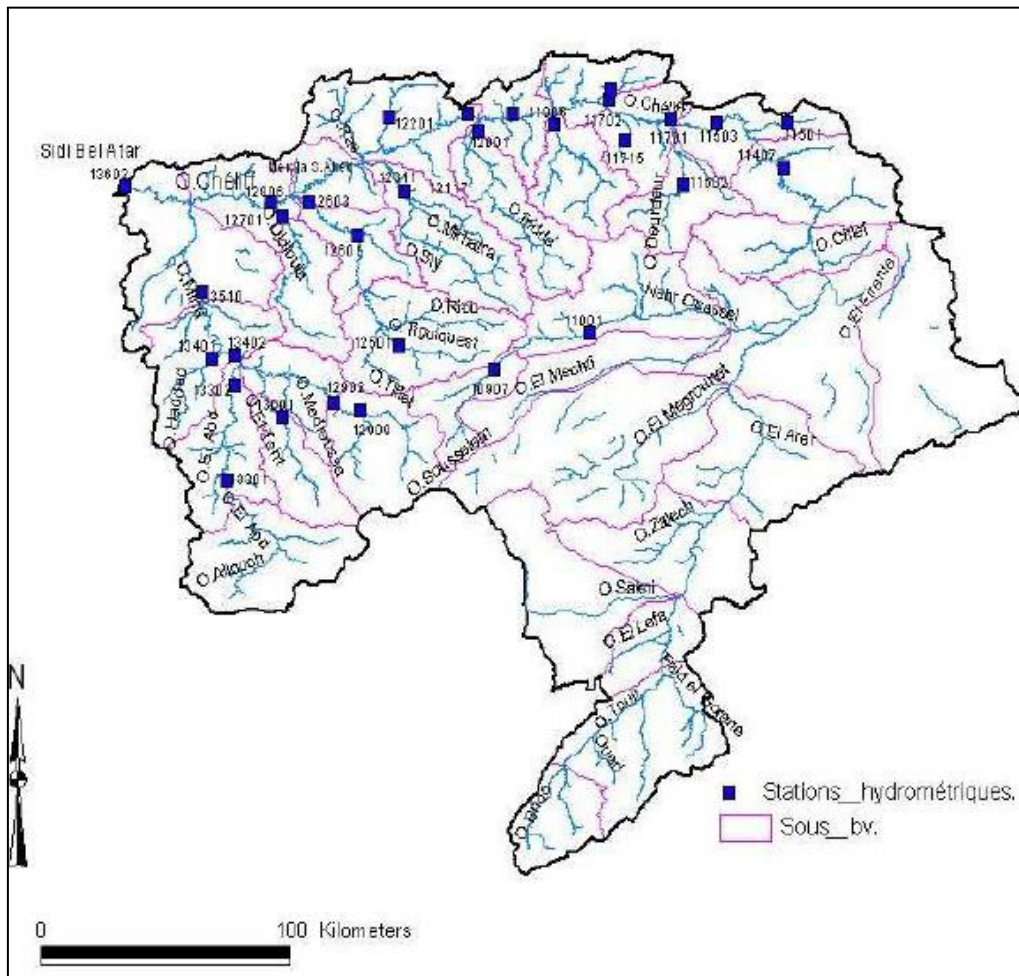


Figure 15 : Bassin versant de Oued Cheliff (ANRH,2016).

Oued Cheliff est un cours d'eau situé dans le nord ouest de l'Algérie, il prend sa source dans l'Atlas tellien plus précisément dans le Djebel Amour et se jette dans la Méditerranée. Le Cheliff est caractérisé par une vallée très fertile. Il est le plus important fleuve d'Algérie.

Tableau 04 : Les caractéristiques des bassins versant sont représentées dans le tableau ci-dessous.

| Bassin | Oued | Superficie (km ²) | Périmètre (km) | K _c | Long équivalente (km) | long talweg (km) | Hmin (m) | H max (m) |
|---------|-----------|-------------------------------|----------------|----------------|-----------------------|------------------|----------|-----------|
| Cheliff | Djidiouia | 835 | 135 | 1.31 | 51.2 | 51 | 70 | 925 |
| | Cheliff | 43700 | 1383 | 1.85 | 619 | 759 | 20 | 1983 |

Cette forme qui peut être traduite par l'indice de compacité de « Graveluis » K_c. Cet indice s'établit en comparant le périmètre stylisé du bassin (P) à celui d'un cercle qui aurait la même surface (A).

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

L'indice de compacité K_G est de l'ordre de 1.31 pour le bassin oued Djidiouia et 1.85 pour le bassin oued Cheliff. Ces bassins ont une forme plus au moins allongée ce qui favorise bien l'écoulement de surface qui échappe plus facilement aux pertes par infiltration et évaporation.

- **Altitudes maximales et minimales**

L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire. Ces deux données deviennent surtout importantes lors du développement de certaines relations faisant intervenir des variables climatologiques telles que la température, la précipitation et le couvert neigeux. Elles déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de la pente. Les valeurs sont représentées dans le tableau ci-dessus.

- **Analyse Climatique des dernières décennies**

D. Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen

L'indice Ombrothermique, développé par Bagnoule et Gaussen, est un indice climatique permet d'estimer les éléments de climat d'une région de points de vue précipitation et température pendant une période donnée et permet également de préciser les périodes sèches et humides. Il est égal au rapporte (P / T) de la pluviométrie et de la température moyenne que représenter sur le même graphique ou:

P : pluviométrie ou précipitation en (mm).

T : la température en (C°). Bagnoules et Gaussen définissent la saison sèche comme étant : « l'ensemble des mois où le total mensuel des précipitations exprimé en millimètre est Inférieur ou égal au double de la température moyenne mensuelle exprimée en degrés centigrades ($P \leq 2T$).

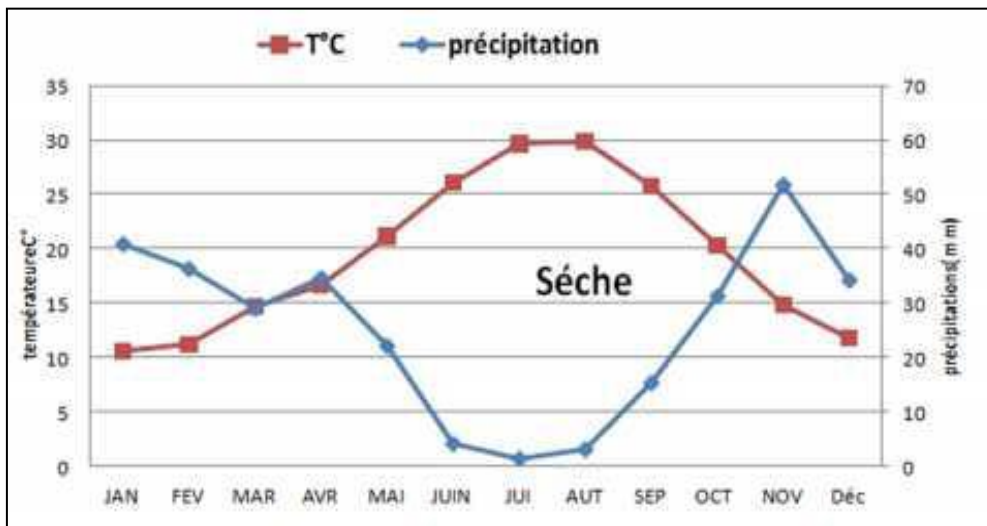


Figure 16 : Diagramme Ombrothermique de Gaussen e Bagnoles de la station de Relizane la période.

Le diagramme ombrothermique est l'évolution de deux phénomènes météorologique (la Température et la précipitation),qui marque deux périodes saisonnières de la région d'étude, Période humide s'étale entre fin de octobre jusqu'a fin avril avec un maximal de

précipitations de 51.69mm marqué pendant le mois de novembre ,cette période et caractérisée par une Formation végétale (agricole ou spontanés) ou groupements végétaux très diversifiés lorsque Dans la saison la température a été calculé (14.78 C°), et le taux de pluie est (51.69 mm) qui Aider à la croissance et la densité de la végétation.

II.7. Climatologique

II.7. 1.Climat

Le climat de la plaine de Chélif est typiquement méditerranée avec des Etés chauds et sec et des hivers frais et pluvieux.la pluviométrie est malgré tout très faibles, les moyenne annuelle pour les stations d'El khemis, Chélif et Ghilizane sont respectivement de 473mm 400mm et 325 mm les évapotranspirations potentielles annuelles (formule de turc) sont de 1145mm de haut Chélif, 1276 mm pour le moyen et 1300 pour le bas.

II.7.1.1. Précipitation et Température

a. Précipitation

Les précipitations constituent l'un des éléments les plus importants qui définissent le climat d'un lieu donné. Etant donné que La région d'étude est caractérisée par un climat semi Aride Ils ont été au cours des dernières années à des périodes illimitées de sécheresse.

Tableau 05: *Température et précipitation moyenne mensuelles de la région de Bas Chélif (1990 – 2013) (INRAA, 2013)*

| Mois | Température (°C) | Précipitation (mm) |
|---------|------------------|--------------------|
| Jan | 9.46 | 40.75 |
| Fév | 7.65 | 36.24 |
| Mars | 14.10 | 28.98 |
| Avr | 15.09 | 34.54 |
| Mai | 21.57 | 22.09 |
| Juin | 28.35 | 4.11 |
| Juil | 29.43 | 1.33 |
| Sept | 26.88 | 15.22 |
| Oct | 20.64 | 31.17 |
| Nov | 15.91 | 51.69 |
| Déc | 11.96 | 34.12 |
| Max | 29.43 | 51.69 |
| Min | 7.65 | 1.33 |
| Moyenne | 18.28 | 28.29 |

A identifié la proportion de taux de précipitations mensuelles d'environ 303.3 mm, La Grande quantité qui doit être tombe est trouve dans le mois de novembre qui estimait 51.69 mm, et dans le mois de juillet enregistre un faible taux de précipitation 1.33 mm (**Tableau 05**).

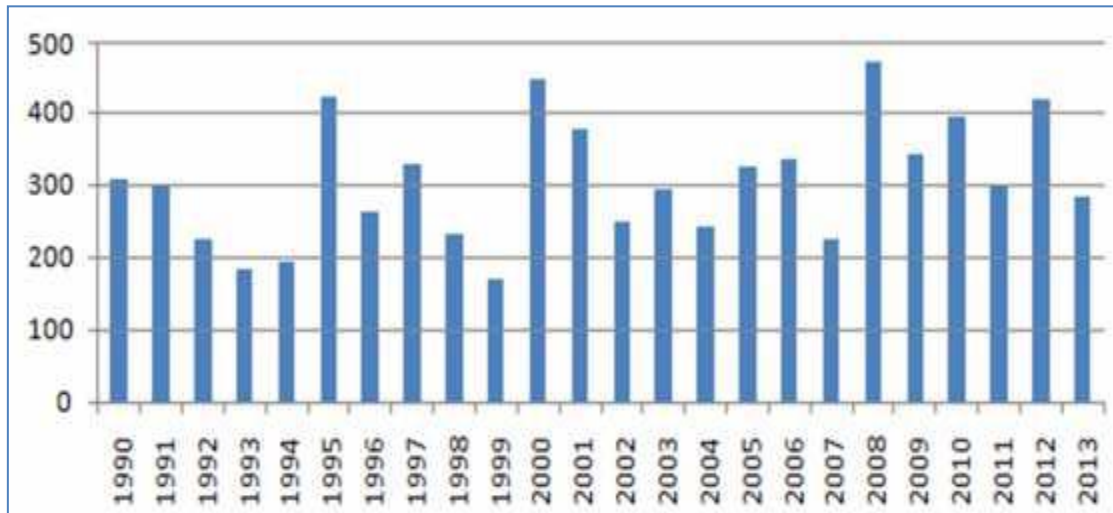


Figure 17 : Variation de la pluie annuelle dans la région de la station de recherche INRAA(1990-2013)

On a remarqué une variabilité et une irrégularité pluviométrique annuelle dans la figure, les années qui marquent une forte précipitation sont (1990, 1991, 1997, 2002, 2003, 2005, 2006 ,2011, 2013) avec des valeurs très élevées dépassent le 200 mm/an, et dans ces années il ya qui caractérisée par des inondations lequel (1995, 2000, 2001, 2008, 2010, 2012) par des valeurs des précipitations supérieures à 350 mm/an. Les années de la sécheresse qui marque des à 200 mm/an

b. Température

Le bassin du haut et du moyen Chélif est caractérisé par une température moyenne Interannuelle oscillant de 13 à 20°C, avec un maximum mensuel de plus de 30,6°C au Mois de juillet a la station d’Ain Defla et un minimum mensuel de 4,6°C au mois de Janvier à la station de Médéa;(ANRH ,2014). Comme la pluie il faut donner la Période d’observation.

La température moyenne interannuelle varie de 14 a 29°C dans le plaine du Bas Cheliff et de l’oued Mina, avec un maximum mensuel de 29,5°C au mois d’aout à la Station de Relizane et un minimum mensuel 6,1°C au mois de janvier a la station de Tiaret (ANRH,2014)

Dans le bassin du Cheliff à l’amant de Boughazoul la, température moyenne Interannuelle oscille de 13 à 16°C, avec un maximum mensuel 27°C au mois d’aout à La station de Ksar Chellala de wilaya de Tiaret. Toute cette variation est illustrée dans le (tableau 06), qui indique la température moyenne Annuelle dans 04 stations réparties sur l’ensemble du Cheliff.

Tableau 06:la température moyenne Annuelle à l’échelle des 4 stations pour le bassin cheliff.

| Années | Tiaret | Chlef | Miliana | k-chellala |
|--------|--------|-------|---------|------------|
| 2004 | 14,3 | 20,9 | 16,01 | 12,99 |
| 2005 | 15,7 | 19,6 | 19,76 | 13,85 |
| 2006 | 15,7 | 20 | 15,78 | 13,85 |
| 2007 | 15,9 | 20 | 18,34 | 13,85 |
| 2008 | 15,4 | 20,3 | 16,38 | 13,85 |

| | | | | |
|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| 2009 | 15,6 | 19,7 | 17,19 | 15,03 |
| 2010 | 15 | 20,2 | 16,09 | 19,29 |
| 2011 | 15 | 19,8 | 18,34 | 19,29 |
| 2012 | 15 | 19,8 | 16,09 | 13,75 |
| 2013 | 15 | 19,8 | 16,09 | 14,02 |
| 2014 | 15,8 | 19,8 | 16,02 | 16,60 |
| Max | 15,9 | 20,9 | 18,34 | 19,29 |
| Min | 14,3 | 19,6 | 15,98 | 19,99 |
| Ecart | 1,6 | 1,9 | 3,05 | 6,3 |
| Moy | 15,3 | 19,9 | 16,4 | 15,5 |

II.7.1.2. Evapotranspiration

L'évapotranspiration potentielle a été déterminée à partir des données fournies par l'ANRH qui concernent les 45 sous-bassins. La valeur moyenne du bassin a donc été déterminée par une pondération entre la superficie des sous-bassins et l'ETP (évapotranspiration potentielle) correspondant à chacune d'entre elles. Les valeurs les plus élevées correspondent aux sous-bassins de l'oued Touil, où elles excèdent les 1.500 mm/an.

On observe également dans le versant moyen de l'oued Mina des valeurs élevées d'évapotranspiration potentielle. La valeur la plus faible correspond au sous-bassin dénommé Oued Deurdeur, situé dans le secteur centre oriental du bassin, où la valeur estimée est de 1.300 mm/an. La valeur moyenne annuelle est de 1.455 mm. La répartition à l'échelle intra annuelle est présentée sur la Figure 18.

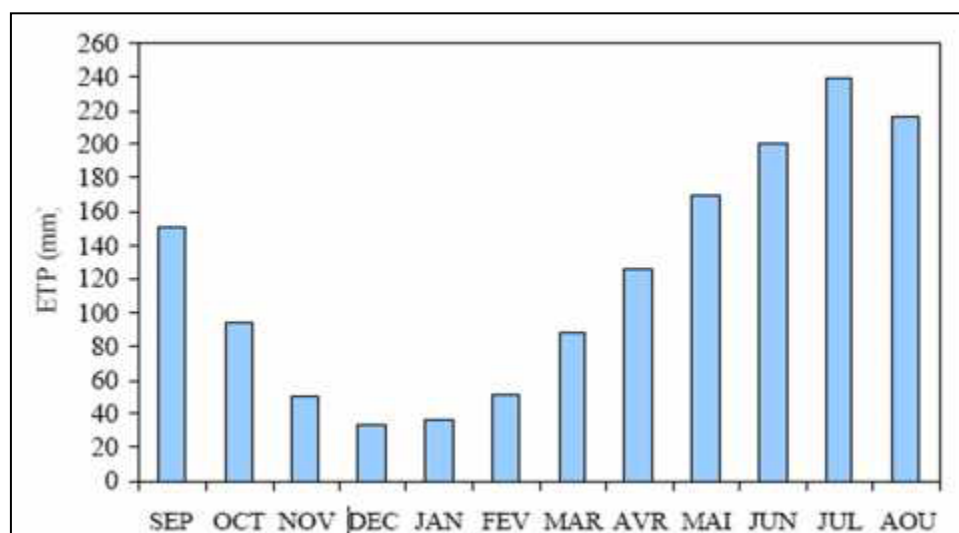


Figure 18: Distribution intra annuelle de l'évapotranspiration potentielle, selon les données fournies par l'ANRH.

En fin, on pourra conclure que l'évapotranspiration potentielle, calculée sur la base des données traitées et fournies par l'Agence de Bassin Cheliff – Zahrez, se distribue d'une manière relative et homogène, avec un intervalle de variation situé entre 1300 et 1500 mm.

L'évapotranspiration réelle a été estimée par diverses méthodes, en général, avec des résultats qui convergent; la valeur déduite pour le bassin Cheliff est de 295 mm/an.

II.7.1.3. Humidité relative

C'est la quantité de vapeur d'eau dans certain volume d'air. Elle est représentée par l'humidité relative comme l'un des éléments essentiels du cycle hydrologique. Les données d'humidité relatives de la station de Tiaret (située au centre du bassin du Cheliff) sont mentionnées dans le Tableau 07

Tableau 07: Humidité relative (%) enregistrée à la station de Tiaret (1980-2008) (Source : ANRH 2008).

| Mois | Sept | Oct | Nov | Dec | Janv | Fév | Mars | Avril | Mai | Juin | Juil | Aout | Annuel |
|------|------|-----|-----|-----|------|-----|------|-------|-----|------|------|------|--------------|
| Hr% | 55 | 64 | 73 | 78 | 76 | 69 | 66 | 56 | 54 | 48 | 38 | 45 | 60,17 |

Conclusion

La synthèse climatique réalisée en ce chapitre a permis d'identifier les grands traits du climat du bassin versant de l'Oued Cheliff en l'occurrence son caractère pluvieux. Il en ressort que notre zone d'étude est soumise exclusivement a un climat méditerranée avec été chaud et sec et hiver frais et pluvieux avec une pluie moyenne annelle du bassin 400mm/an (moyenne des trois stations d'El khemis, Chélif et Ghilizane), évapotranspiration potentielle moyenne annuelle (formule de turc) égal a 1240 mm/an et la valeur déduite pour le bassin est de 295 mm/an selon ANRH .La température moyenne annuelle modérée égale à 16,78°C.

Le régime pluvieux mensuel du bassin est marqué par un premier pic observé durant le mois de novembre et un second plus accentué qui se manifeste durant le mois de Janvier.

Sur l'échelle annuelle en remarque que les années 1995,2000 et 2008 sont par des valeurs des précipitations supérieures à 400 mm/an ; à l'opposé l'année1999 représente une année extrêmement sèche. La précipitation moyenne annuelle de cette année déficitaire est inférieure à 200 mm.



CHAPITRE III

**L'ÉTUDE DE TRANSPORT SOLIDE PAR
SUSPENSION**

Introduction

Le transport solide en Algérie est évalué au niveau des stations hydrométriques des bassins versants pour la quasi-totalité des épisodes d'écoulement. Généralement, on se limite au débit en suspension. Le charriage est estimé entre 15% et 25% de la suspension, selon plusieurs auteurs [57]. On tentera dans cette étape d'étudier la relation apport solide - débit liquide sur plusieurs années d'observations dans les stations hydrométriques. Dans ce chapitre en va faire une étude pour atteindre à une relation qui relie les différents paramètres de transport solide en suspension.

III.1 Collecte et mise en forme des données

La collecte et mise en forme des données et la phase la plus délicate et la plus difficile en hydrologie. La collecte des données consiste en un dépouillement systématique de tous les fichiers de hauteur d'eau, et de leurs concentrations en matière en suspension correspondantes en g/l.

Les deux stations de Djidiouia RN4 et Sidi Belatter dispose d'une longue série de mesure hauteur d'eau – débit liquide (1974 jusqu'à 2000 pour la station de Djidiouia RN4, et 1969 jusqu'à 2001 pour la station de Sidi Belatter).

Des prélèvements quotidiens des hauteurs d'eau, dont la fréquence augmente surtout en période de crue, sont effectués pour l'estimation du transport solide.

III.2 Dépouillement des données

Nous disposons d'une grande série de mesure aux deux stations, Djidiouia RN4 et Sidi Belatter, environ 7671 valeurs de débits instantanés Q_1 en m^3/l pour la station de Djidiouia RN4 et pour la station de Sidi Belatter on a 5814 valeurs de débits instantanés Q_1 en m^3/l .

Les données obtenues ont été classées donc par l'heure et la hauteur en cm. Cette banque de donnée a été sélectionnée pour la recherche d'un modèle mathématique entre le débit solide et le débit liquide.

La relation $Q_s=C.Q_1$ nous a permis d'obtenir le débit solide en kg/s pour chaque hauteur sur la base des matières en suspension.

Nous disposons donc d'un fichier global comprenant la date, l'heure, la hauteur d'eau en cm, le débit liquide instantané en m^3/s , la concentration en matière en suspension en g/l et le débit solide instantané en kg/s de tous les prélèvements effectués.

Il est à remarquer que nous ne disposons pas de toutes les valeurs relatives ou transport solide lors de crues qui varient d'une année à l'autre, charriant une quantité de sédiment variable dans le temps.

III.3 Classification et mise en forme des données

Nous avons dans notre fichier de base pour les deux stations, de 7671 couples de valeurs instantanés de débits solide et de débit liquide observées d'une période de 26 ans pour la station de Djidiouia RN4 et de 5814 observées d'une période de 32 ans pour la station de Sidi Belatter. Chaque année hydrologique a été marquée par ces évènements exceptionnels (crues) ou par l'absence de prélèvement pour certaines périodes pour des raisons bien différentes.

Pour bien mettre en forme toutes les données, qui seront exploitées, ces dernières ont été classées et ordonnées à partir d'un calcul détaillé de nombre exacts d'échantillons relatifs à chaque année tout en calculant le nombre de données mensuelles.

Le tableau suivant illustre tout les résultats obtenus. Les résultats du tableau III.1 nous renseignent sur la taille de la série de données et le nombre de prélèvements effectués au droit de chaque station.

A partir de ces résultats nous tirons plusieurs informations et nous procédons au traitement statistique.

Toutes les données dont la taille a été déterminée constituent des échantillons nécessaires à la recherche d'une relation significative reliant le débit solide au débit liquide.

Tableau 08 : Nombre de valeurs observées par station

| Totalité des valeurs observées | STATIONS | |
|--------------------------------|---------------|---------------|
| | Djidiouia RN4 | Sidi Belatter |
| 1969 | * | 55 |
| 1970 | * | 25 |
| 1971 | * | 144 |
| 1972 | * | 150 |
| 1973 | * | 171 |
| 1974 | * | 194 |
| 1975 | 44 | 154 |
| 1976 | 149 | 325 |
| 1977 | 275 | 129 |
| 1978 | 711 | 256 |
| 1979 | 221 | 282 |
| 1980 | 273 | 191 |
| 1981 | 157 | 89 |
| 1982 | 121 | 100 |
| 1983 | 112 | 68 |
| 1984 | 20 | 186 |
| 1985 | 55 | 230 |
| 1986 | 63 | 279 |
| 1987 | 404 | 144 |
| 1988 | 673 | 148 |
| 1989 | 171 | 137 |
| 1990 | 303 | 225 |
| 1991 | 652 | 174 |
| 1992 | 366 | 173 |
| 1993 | 390 | 140 |
| 1994 | 416 | 209 |
| 1995 | 555 | 216 |
| 1996 | 781 | 315 |

| | | |
|------|-----|-----|
| 1997 | 813 | 236 |
| 1998 | 212 | 83 |
| 1999 | 312 | 233 |
| 2000 | 36 | 145 |
| 2001 | * | 134 |

Plus le nombre de données est important, plus sa réduction au nombre d'un modèle donne une meilleure approximation possible ou problème posé.

Les périodes ou les prélèvements n'ont été pas effectués, peuvent avoir un effet direct sur le résultat final du traitement.

Avant toute tentative de traitement nous essayons de représenter graphiquement toutes les données afin d'avoir la présentation approximative des débits solides à différentes échelles (pour toute la période d'observation et saisonnière).

III.4. Répartition de la totalité des données

Pour prédire l'effet du transport solide par suspension et pour établir des relations empiriques entre les facteurs contribuant au phénomène et pour définir une relation entre les différentes paramètres débit liquide, le débit solide, l'analyse hydrologique emploie des méthodes ayant recours à la mathématique en général et à la statistique en particulier.

Ces méthodes statistiques exigent que les données soient bien organisées et bien stockée, pour parvenir à une décision ou une conclusion.

Le principal but à atteindre avec la présente étude est l'exploitation de cette banque de données pour l'estimation de sédiments qui transitent à travers le cours d'eau considéré.

A cet effet, nous avons soumis les données préparées à un traitement statistique et informatique pour identifier le meilleur modèle régressif entre la variable explicative (débit liquide) et la variable expliquée (débit solide). Ces deux variables aléatoires Q_s - Q_l constituent les paramètres clés de notre étude.

Les résultats auxquels nous avons aboutis et la visualisation de l'ensemble des données observées entre le débit solide et le débit liquide sont représentés sur la figure 19 et la figure 20.

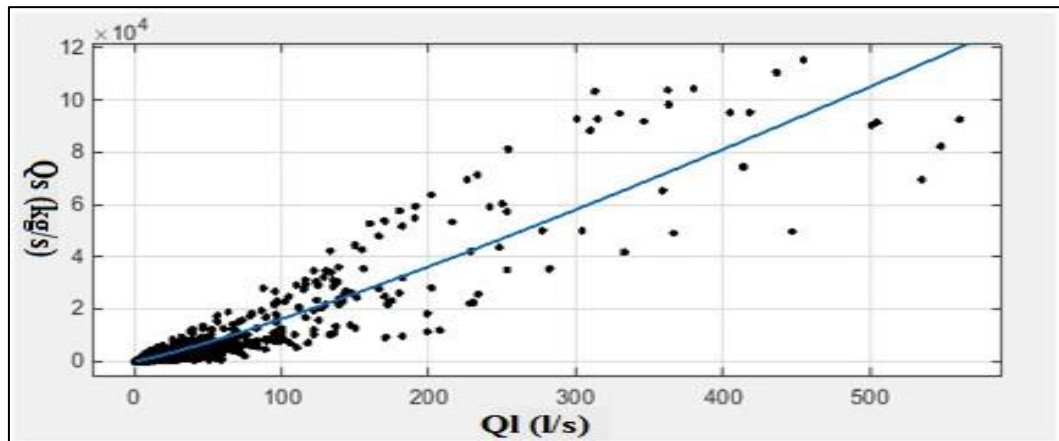


Figure 19: Répartition débit solide – débit liquide de la totalité des données de 1974-2000 de la station de Djidiouia RN4.

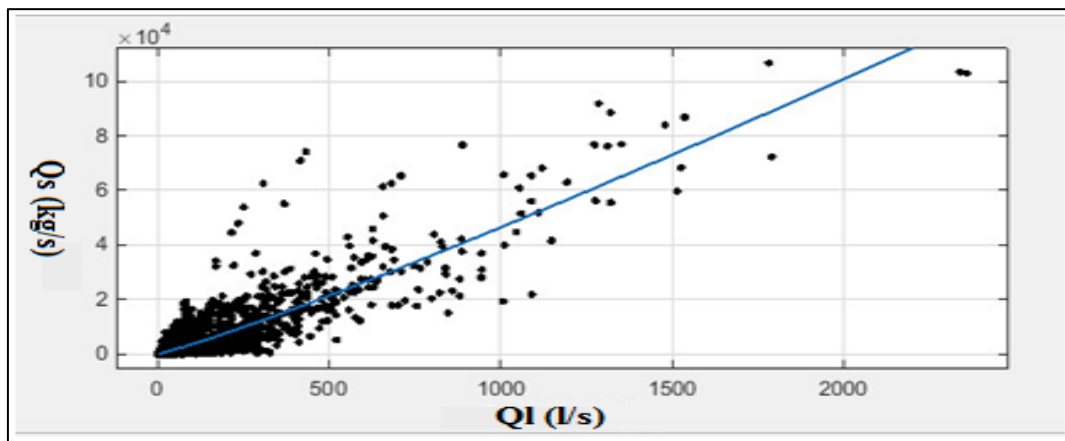


Figure 20: Répartition débit solide – débit liquide de la totalité des données de 1969-2001 de la station de Sidi Belatter.

Chaque station est marquée par une forme spécifique caractérisant la variation des apports solide en fonction des apports liquides, cette variation nous renseigne sur les limites que peut atteindre le couple (Q_s, Q_l) , ainsi que les périodes ou des évènements extrêmes ont été enregistrés.

Les relations entre le débit solide et le débit liquide des deux stations sont représentées dans le tableau 09.

Tableau 09 : Fonction de la relation débit solide-débit liquide des deux stations.

| Station | Fonction | R ² |
|---------------|--------------------------|----------------|
| Djidiouia RN4 | $Q_s = 76 Q_l^{1.16}$ | 0.86 |
| Sidi Belatter | $Q_s = 20,38 Q_l^{1.12}$ | 0.78 |

La longue série de données mise à notre disposition nous incite à rechercher les années qui peuvent avoir une influence directe sur le calcul des apports solides.

Les graphes qui représentent le couples (Q_s, Q_l) donnent au préalable toutes les informations relatives à l'évolution du couple (Q_s, Q_l) dans le temps et une meilleure explication de la variation du débit solide en fonction du débit liquide.

Les résultats représentés sur la figure 19 et 20 montrent que la corrélation entre le débit solide et le débit liquide suit bien la loi de puissance.

Le coefficient de corrélation est très significatif. Il est de l'ordre de 0,8. Le coefficient de corrélation révèle que le débit solide est fortement corrélé avec le débit liquide.

Les équations d'ajustement présentent des exposants de 1.16 pour la station de Djidiouia RN4 et 1.12 pour la station de Sidi Belatter. Ces exposants sont généralement conformes aux valeurs observées dans d'autres régions et notamment dans les bassins versants maghrébins, où celles-ci oscillent entre 1 et 2 [58].

Une partie de la variabilité de la relation peut être expliquée par l'observation au cours d'un événement de fort transport solide, mais également par les phénomènes de dépôt/reprise existant à l'échelle du bassin versant. Entre deux événements semblables d'un point de vue hydroclimatique, le flux de MES à l'exutoire peut se révéler très variable en fonction du stock de sédiments facilement mobilisables [59].

III.5. Répartition saisonnière des débits liquides- débits solides

Vu l'influence des saisons sur le phénomène du transport solide, la visualisation de l'ensemble des données à l'échelle saisonnière permet d'identifier la saison la plus contribuable à l'érosion du bassin de Chélif.

III.5.1. Répartition saisonnière des débits liquides- débits solides de la station de Djidiouia RN4

La figure 21 représente la répartition saisonnière des débits solides en fonction des débits liquides de la station de Djidiouia RN4.

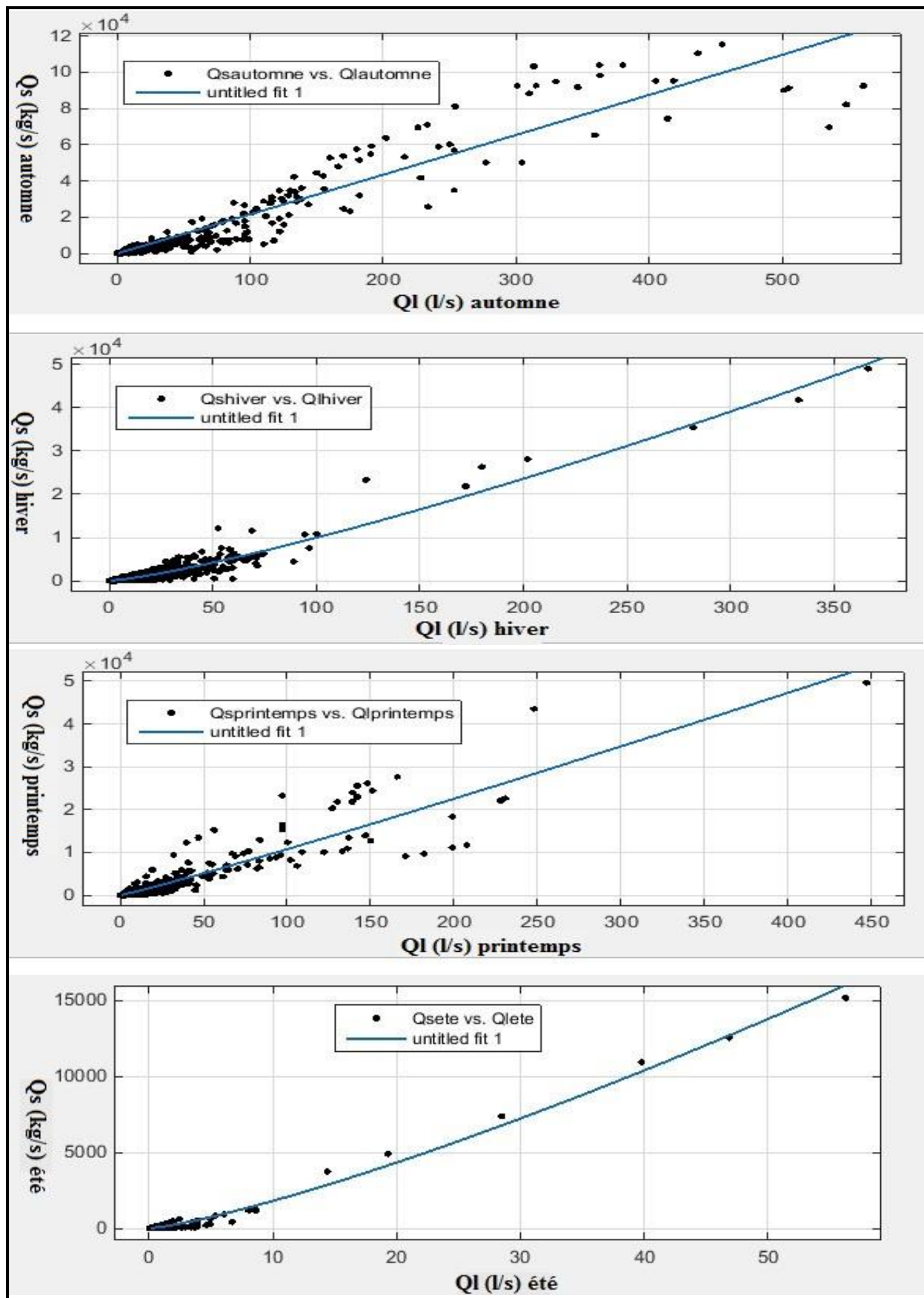


Figure 21 : Répartition saisonnière des débits solides – débits liquides de la station de Djidiouia RN4.

III.5.2. Répartition saisonnière des débits liquides- débits solides de la station de Sidi Belatter

La figure 22 représente la répartition saisonnière des débits solides en fonction des débits liquides de la station de Sidi Belatter.

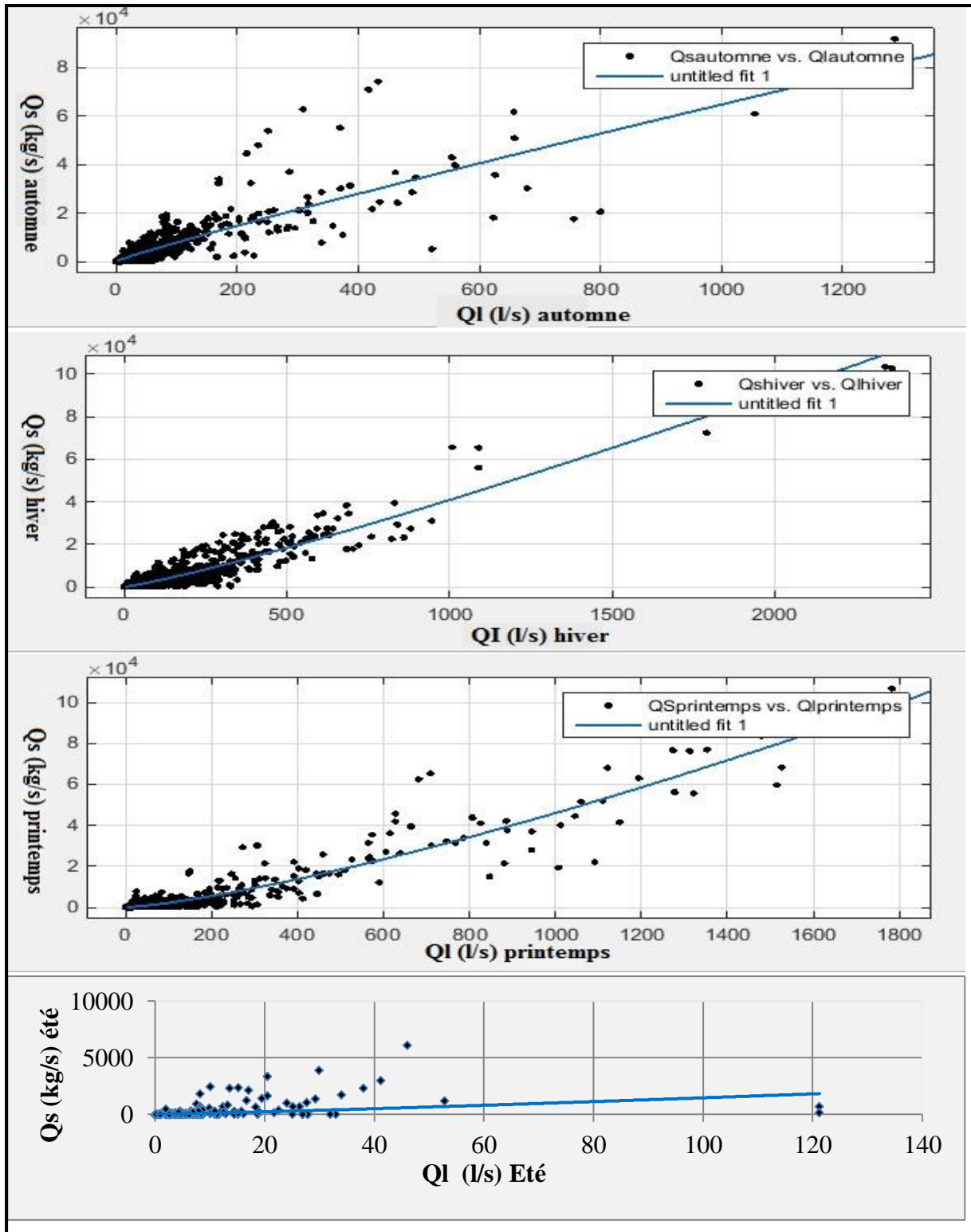


Figure 22 : Répartition saisonnière des débits solides – débits liquides de la station de Sidi Belatter.

Les fonctions représentant le débit solide avec le débit liquide sont représentées dans le tableau 10.

Tableau 10 : Fonction de la relation débit solide-débit liquide des deux stations à l'échelle saisonnière

| Stations | Saisons | Fonctions | R ² |
|----------------------|-----------|------------------------------|----------------|
| Djidiouia RN4 | Hiver | $Q_s = 31.92 * Q_l^{1.247}$ | 0.95 |
| | printemps | $Q_s = 78.27 * Q_l^{1.069}$ | 0.85 |
| | Eté | $Q_s = 98.56 * Q_l^{1.263}$ | 0.99 |
| | automne | $Q_s = 203.8 * Q_l^{1.012}$ | 0.91 |
| Sidi Belatter | Hiver | $Q_s = 13.61 * Q_l^{1.159}$ | 0.86 |
| | printemps | $Q_s = 5.051 * Q_l^{1.32}$ | 0.90 |
| | Eté | $Q_s = 6.426 * Q_l^{1.177}$ | 0.46 |
| | automne | $Q_s = 112.3 * Q_l^{0.9201}$ | 0.74 |

La corrélation à l'échelle saisonnière est plus importante pour les saisons automne, hiver et été. Cela peut s'expliquer par la régularité des apports durant ces saisons. Le coefficient de corrélation est de l'ordre de 0,8 pour les deux stations. Cela est proche des résultats trouvés par [60] où ils ont effectués une représentation saisonnière du débit liquide-débit solide de la station d'étude suivant quatre saisons: automne, hiver, printemps et été. Ainsi, les valeurs maximales de la turbidité sur la station du bassin s'observent au début en automne. La relation liant les débits liquides aux débits solides en suspension est de type puissance de forme générale $Q_s = aQ_l^b$ avec un coefficient de corrélation très significatif, variant entre 0,8 à 0,9.

Pour la station Djidiouia RN4, le transport solide dans les saisons d'automne et d'été est plus important que les autres saisons. L'apport solide quoiqu'il soit important au printemps reste inférieur à celui apporté en automne, une saison qui se caractérise par l'agressivité des pluies d'une part et le faible couvert végétal de la saison qui la précède (été) qui favorise la destruction des agrégats du sol. Tandis que l'hiver malgré qu'il engendre un apport liquide plus important que l'automne lui aussi intervient sur l'apport solide puisqu'il succède une saison de forte érosion. L'apport solide en été est important du fait, peut être, de l'apport liquide des crues en cette saison et l'absence du couvert végétal. Ce phénomène est relativement atténué pour la saison suivante (automne), il s'agit de l'hiver où les terres formant le bassin sont saturées et le couvert végétal développé. Les pluies qui tombent en octobre qui arrachera de grandes quantités de matières solides, qui seront par la suite véhiculées en suspension par le cours d'eau.

Pour la station **Sidi Belatter**, le transport solide dans les saisons d'automne et d'hiver est plus important que les autres saisons. A l'hiver, l'érosion du lit et des berges du cours d'eau devient importante en raison de l'augmentation des débits dans le chenal de l'oued. Sur les versants, les sols minces se saturent rapidement et développent une érosion importante en ravine et de mouvement de masse [61] De plus, à cette période, les crues ont un rôle important dans la production des sédiments dans les réseaux de drainages. Les pluies des

crues a largement élevé les hauteurs d'eau lues à l'échelle limnimétrique de la station et a maintenu un débit moyen journalier important. Lorsque la précipitation tombe sur tout un bassin versant, ou sur une portion de bassin versant les eaux ruissellent et se concentrent rapidement dans le cours d'eau engendrant des crues. Le cours d'eau transporte une quantité de sédiments ce qui se traduit par une érosion du lit et un dépôt de matières transportées.

Pour l'automne, la forte charge s'explique par le fait que les précipitations souvent tombent sur un sol asséché et mal protégé par la végétation. Le bassin d'oued est dénudé en automne et après une longue période chaude, les crues de la saison impliquent systématiquement des apports solides en suspension d'ordre maximal.

III.6. La comparaison avec les autres stations

On tentera dans le tableau 11 si dessous qui étudier la relation apport solide - débit liquide sur plusieurs années d'observations dans les stations hydrométriques : EL Ababsa , Marabout Blanc ,Tamezguida, Ouled farese, Bir oulde taher et notre station Sidi Belattar et Djidiouia RN4 .

Tableau 11 : la comparaison des relations débit liquide- débit solide .

| L'auteur | Station | a | b | R ² | Equations |
|--|-----------------|--------|--------|----------------|-------------------------------|
| Mémoire de Belhadj N et Bouabdallah M [62] | EL ABABSA | 0.2373 | 0.6146 | 0.7235 | $Q_s = 0.2373 * Q_l^{0.6146}$ |
| | MARABOUT BLANC | 9.6397 | 1.2592 | 0.7635 | $Q_s = 9.6397 * Q_l^{1.2592}$ |
| | TAMEZGUIDA | 4.9577 | 1.7915 | 0.9151 | $Q_s = 4.9577 * Q_l^{1.7915}$ |
| | Ouled Faresse | 4.3169 | 1.4851 | 0.8308 | $Q_s = 4.3169 * Q_l^{1.4851}$ |
| | Bir Oulde Taher | 14.625 | 1.3781 | 0.789 | $Q_s = 14.625 * Q_l^{1.3781}$ |
| Notre station | SIDI BEL ATTER | 76 | 1.163 | 0.8622 | $Q_s = 76 * Q_l^{1.163}$ |
| | Djidiouia RN4 | 20.38 | 1.119 | 0.7845 | $Q_s = 20.38 * Q_l^{1.119}$ |

Les valeurs des paramètres a et b de la relation $Q_s = a * Q_l^b$ varient peu d'une station à l'autre. Pour le paramètre a, il varie à 0.23 pour la station EL ABABSA à 9.63 pour la station MARABOUT BLANCL. L'exposant b est compris généralement entre 0.6 et 1.79 qui s'approchent de 2, et nous avons noté une valeur maximale atteindre de pour la station.

Les valeurs de a et b sont très variées d'une station à l'autre on remarque une valeur très important 0,915 pour la station Tamezguida et des valeurs assés importantes entre 0.6 et 0.8 pour les stations Marbout blanc, Sidi bel atter, djidiouia , Ouled Faresse ,Bir Oulde Taher qui explique la bonne corrélation entre le débit liquide Q_l et le débit solide Q_s .

Conclusion

L'aptitude du bassin versant de Oued Cheliff en termes de production des sédiments est examinée à travers les paramètres a et b du modèle en puissance, $Q_s = aQ_l^b$, généralement, utilisé pour estimer la charge solide transportée par les cours d'eau. On retient alors que les paramètres a et b changent en fonction des caractéristiques physique et dynamique d'érosion dans le cours d'eau et le bassin versant. De plus, on remarque que le paramètre b change peu d'une année à une autre est reste stable aussi bien pour les modèles annuels que saisonniers. . Contrairement à cela, le paramètre 'a' n'est pas stationnaire et change aussi bien pour les modèles annuels que saisonniers. Ce qui montre que la configuration du bassin a changé durant les années.



CHAPITRE IV

**MODÉLISATION PAR LES RÉSEAUX DE
NEURONES ARTIFICIELS**

Introduction

Chaque décennie, voire chaque année, une nouveauté s'y affiche, l'ordinateur est aujourd'hui beaucoup plus puissant qu'il était il y'a quelques années [63] ; n'empêche que la résolution de certains problèmes d'optimisation restent un souci considérable chez les informaticiens, c'est pour cela que plusieurs algorithmes ont fait surface pour pallier a ce genre de problèmes, et parmi ces algorithmes, on trouve le Réseau De Neurones artificiel (Artificiel Neural Network[64][65].

L'objectif de ce Réseau est d'imiter, à l'aide d'algorithmes exécutés par des ordinateurs, la capacité qu'ont les êtres vivants à apprendre par l'exemple [66], ces réseaux ont affiché des résultats spectaculaires depuis quelques années.

Dans ce chapitre, on étudiera le réseau de neurones artificiel, son modèle mathématique, ses architectures ainsi que ses domaines d'applications.

IV.1. Historique de Réseau De Neurone Artificiel

1890 : La loi de fonctionnement pour l'apprentissage est présentée par W. James.

1943 : Warren Mc Culloch et Walter Pitts proposent le premier modèle du neurone formel.

1949 : Règle de Donald Hebb qui décrit que si les neurones d'une synapse sont activés d'une façon synchrone et répétée, la force de connexion synaptique est croissante [67].

1958 : Création du premier réseau de neurones par Rosenblatt, le "perceptron", ce dernier est inspiré du système visuel. Il permet d'apprendre et d'identifier des formes simples et aussi de calculer certaines fonctions logiques.

1969 : Marvin Minsky et Seymour Papert montrent les limites du perceptron, surtout à l'incapacité de résoudre des problèmes non linéairement séparables (exemple du XOR) [68].

≈≈ Période noire des Réseaux de neurones (≈ 15 ans) et beaucoup de déception chez les amateurs de l'intelligence artificielle.

1975 : Werbos propose l'idée d'une possible utilisation d'une rétropropagation du gradient.

1982 : John Hopfield réactive l'intérêt de l'utilisation de ce domaine grâce a sa découverte sur l'utilisation des réseaux récurrents (feed-back) après la première classe du perceptron [69].

1985-1986 : [70] et [71] continuent leurs recherches du principe de [72], mais les travaux de [73] furent le vrai départ de l'apprentissage des réseaux de neurones multicouche avec la méthode de rétropropagation du gradient.

IV.2 Réseaux des neurones artificiels (ANN)**IV.2.1 Définition**

Un réseau de neurones artificiels ou Neural Network est un système informatique s'inspirant du fonctionnement du cerveau humain pour apprendre. Découvrez tout ce que vous devez savoir sur cette technologie d'intelligence artificielle de la famille du Deep Learning.[74]

➤ Avantage

Les principales qualités des réseaux de neurones sont leur capacité d'adaptabilité et d'auto-organisation et la possibilité de résoudre des problèmes non-linéaires avec une bonne approximation [75][76].

Ils ont une bonne immunité aux bruits et se prêtent bien à une implantation parallèle. La rapidité d'exécution est une qualité importante et elle justifie souvent à elle seule le choix d'implanter un réseau de neurones. Ces qualités ont permis de réaliser avec succès, plusieurs applications : classification, filtrage, compression de données, contrôleur, etc...

➤ Inconvénients

La difficulté d'interpréter le comportement d'un réseau de neurones est un inconvénient pour la mise au point d'une application. Il est souvent impossible d'utiliser les résultats obtenus pour améliorer ce comportement. Il est également hasardeux de généraliser à partir d'expériences antérieures et de conclure ou de créer des règles sur le fonctionnement et le comportement des réseaux de neurones.

IV.2.2 Domaines d'applications

Cette dernière décennie a vu l'intégration de plusieurs branches de différents secteurs dans le monde de l'informatique notamment les réseaux de neurones [77]; et ce grâce à sa capacité à résoudre pas mal de problèmes, on y trouve: le secteur des finances (prévision de bourse), le secteur des transports (détection des défauts dans les métros), le secteur des sciences et d'ingénierie (pilotage des véhicules autonomes), ou encore le secteur de la médecine (diagnostiquer les maladies et prédire la gravité d'une maladie quelconque).

IV.2.3 Principe de neurone artificiel

Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones en amont ou des capteurs composant la machine dont il fait partie. A chacune de ses entrées est associé un poids représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones en aval. A chaque connexion est associé un poids.

Il est commode de représenter graphiquement un neurone comme indiqué sur la figure 23.

Cette représentation est à l'origine de la première vague d'intérêt pour les neurones formels, dans les années 1940 à 1970. [78]

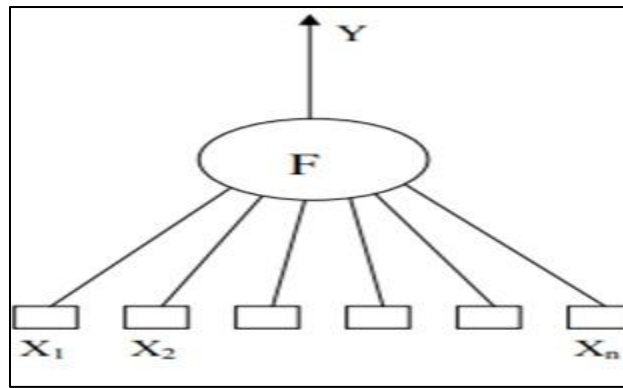


Figure 23 : Neurone artificiel.[78]

L'équation de sortie O_i du neurone i est donnée par :

$$O_i = f(L_i)$$

Où :

$$L_i = \sum W_{ij}^k E_{ij} - W_{i0}^k$$

Les coefficients de pondération W_{ij} sont appelés coefficients synaptiques.

Souvent, il y a un paramètre additionnel W_{i0} , ce terme est considéré comme la valeur du seuil interne du neurone [79].

IV.3 Neurone biologique

Les cellules nerveuses appelées " neurones ", sont les éléments de base du système nerveux central. Elles sont constituées de trois parties essentielles : le corps cellulaire, les dendrites et l'axone figure 24. [80]

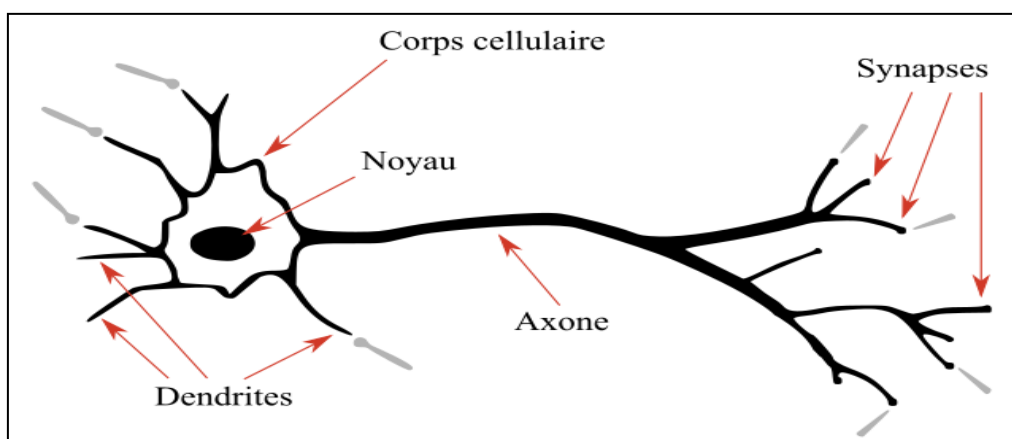


Figure 24 : Neurone biologique.

IV.3.1 Corps cellulaire

Il contient le noyau du neurone et effectue les transformations biochimiques nécessaires à la synthèse des enzymes et des autres molécules qui assurent la vie de neurone. Sa forme est pyramidale ou sphérique dans la plupart des cas, elle dépend souvent de sa position dans le cerveau. Ce corps cellulaire fait quelques microns de diamètre.

IV.3.2 Les dendrites

Chaque neurone possède une chevelure de dendrites. Celles-ci sont de fines extensions tubulaires, de quelques dixièmes de microns de diamètre et d'une longueur de quelques dizaines de microns. Elles sont les récepteurs principaux du neurone qui servent à capter les signaux qui lui parviennent.

IV.3.3 L'axone

L'axone, qui est à proprement parler la fibre nerveuse, sert de moyen de transport pour les signaux émis par le neurone. Il se distingue des dendrites par sa forme et par les propriétés de sa membrane externe. En effet, il est généralement plus long que les dendrites, et se ramifie à son extrémité, là où il communique avec les autres neurones, alors que les ramifications des dendrites se produisent plutôt près du corps cellulaire.

IV.4 Neurone formel

IV.4.1 Définition

Le neurone formel est le modèle mathématique du neurone biologique. Il fait la somme pondérée de ses entrées, suivie d'un non linéarité (élément de décision pour les classifieurs) appelée fonction d'activation ou fonction de seuil.

Les entrées d'un neurone sont soit des entrées externes, soit des sorties d'autres neurones [69].

La modélisation mathématique du neurone formel est la base des réseaux de neurones, c'est la succession de deux opérations telles que le montre la figure 25.

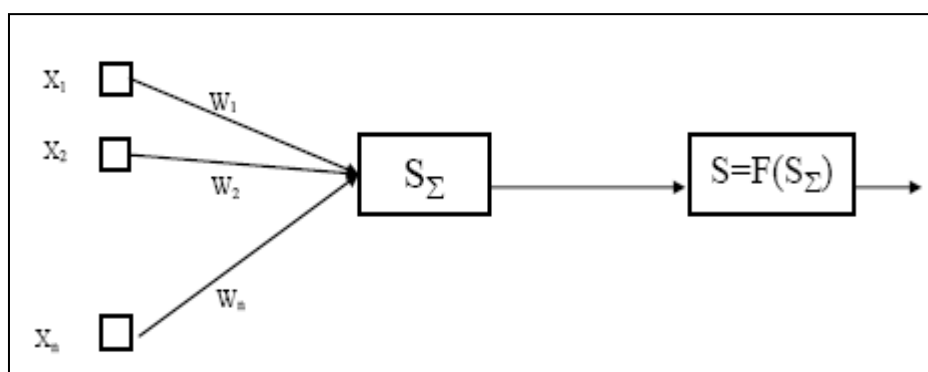


Figure 25 : Schéma d'un neurone forme.

Où :

$$S = F(S_{\Sigma})$$

$$S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n X_i W_i = W^t X$$

Avec :

S_{Σ} : le potentiel d'activation

X : Vecteur entrée du neurone

F : La fonction d'activation

W :Le vecteur poids

IV.4.2 Fonction d'activation

C'est une fonction présentée généralement par un non linéarité appelée aussi fonction de seuil. Elle permet de définir l'état interne du neurone en fonction de son entrée totale, Les fonctions les plus souvent utilisées sont représentées par la figure 26. [81] , [82].

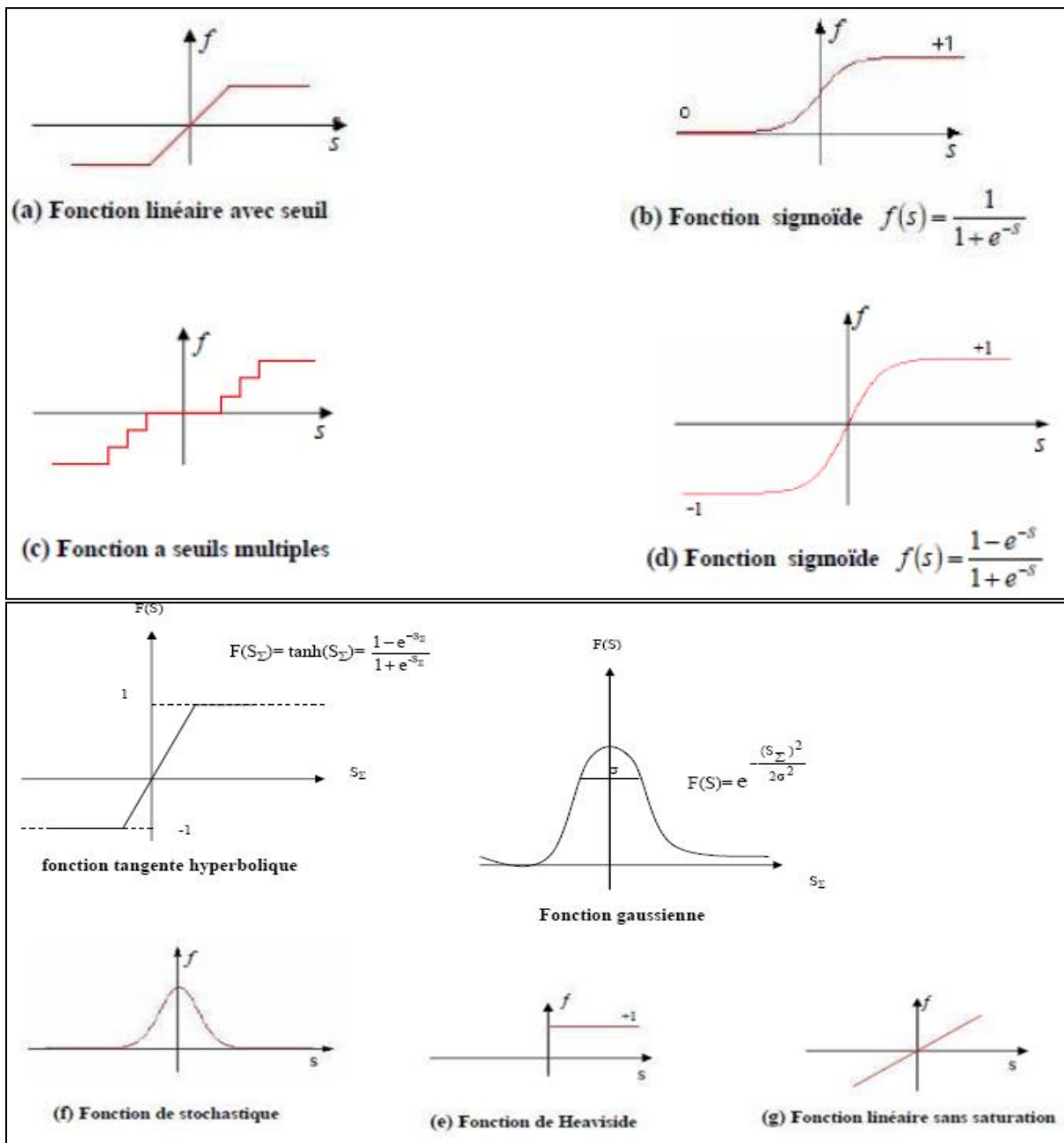


Figure 26 : Les différentes formes de la fonction d'activation

Toutes les fonctions d'activation utilisées doivent être différentiables, car l'architecture du réseau de neurones l'impose pour que l'apprentissage soit possible.

IV.5 Propriétés des réseaux de neurones

L'intérêt porté aujourd'hui aux réseaux de neurones tient sa justification dans quelques propriétés intéressantes qu'ils possèdent et qui devraient permettre de dépasser les limitations de l'informatique traditionnelle, tant au niveau programmation qu'au niveau machine [81].

IV.5.1 Parallélisme

Cette notion se situe à la base de l'architecture des réseaux de neurones considérés comme ensemble d'entités élémentaires travaillant simultanément. Avec l'étude du fonctionnement des réseaux de neurones, on pourrait aboutir à des nouvelles techniques de formalisation de problème qui permettraient de les traiter en parallèle [79].

IV.5.2 Capacité d'adaptation

Celle-ci se manifeste par la capacité d'apprentissage qui permet de tenir compte des nouvelles contraintes ou des nouvelles données du monde extérieur. Certains réseaux se caractérisent aussi par leur capacité d'auto organisation qui assure leur stabilité en tant que systèmes dynamiques capables de tenir compte des situations non encore connues [79].

IV.5.3 Mémoire distribuée

Dans les réseaux de neurones, la mémoire correspond à une carte d'activation de neurones. Cette carte est en quelque sorte un codage du fait mémorisé ce qui attribue à ces réseaux l'avantage de résister aux bruits (pannes) car la perte d'un élément ne correspond pas à la perte d'un fait mémorisé [79].

IV.5.4 Capacité de généralisation

Cette capacité est importante surtout dans le cas où la constitution de recueils d'expertise pour un système expert devient difficile (reconnaissance intuitive ou implicite). Les réseaux neuronaux peuvent apprendre à retrouver des règles à partir des exemples [79].

IV.6 Structure générale des réseaux de neurones

On distingue deux types de réseaux:

IV.6.1 Réseaux de neurones monocouche

Tels que le Perceptron et l'Adaline, ces réseaux sont exploités essentiellement dans la classification des données.

IV.6.2 Réseaux de neurones multicouches

Développés par [83] et [84], ces réseaux peuvent constituer une solution aux problèmes non-linéaires, et cela par l'introduction de fonctions non-linéaires et le nombre de couches cachées.

Un réseau de neurones multicouches est formé d'un assemblage d'éléments (neurones), chacun d'eux est lié à d'autres neurones. Ceux-ci sont disposés dans une série de couches : la

première couche (couche d'entrée), la (ou les) seconde(s) couche(s) intermédiaire(s) (appelées couches cachées), et la dernière appelée couche de sortie. Donc un réseau neuronal contient (n-2) couches cachées. Seules les couches d'entrées et de sorties peuvent coder les informations spécifiques au problème traité (contrairement aux couches cachées). Les neurones des couches cachées sont reliés (connectés) aussi bien par ceux de la couche d'entrée que ceux de la couche de sortie, et donc chaque neurone peut recevoir une variété d'entrées et produire une seule sortie. Il n'y a pas de connexion entre les neurones au sein d'une même couche [85] La première couche appelée couche d'entrée reçoit les informations, le rôle principal de cette couche réside dans la fonction d'identité, c'est-à-dire que le nombre d'entrées dans cette couche est égal au nombre de sorties effectuées par celle-ci.

La dernière couche génère les sorties (ou résultats) finales du réseau. Chaque point de connexion (appelé coefficient ou poids) entre deux neurones joue le rôle d'une synapse, l'élément principal d'interaction entre les neurones.

Les neurones des couches cachées transforment les entrées en sorties et cela en deux étapes.[85]

- Pour chaque neurone, chaque entrée (dans notre cas, le débit) est multipliée par son poids correspondant.

-L'entrée du neurone est transformée en sortie (concentration simulée): chaque neurone reçoit des entrées sous forme vectorielle (X), effectue une somme pondérée (a), et génère à l'aide d'une fonction de transfert (G) un résultat réel (Y):

$$Y = G(WX + b).$$

W = (w_n, w_{i2} ..., w_{in}) représente les poids du neurone (ou matrice des poids) ;
X = (x_n, x_{i2} ..., x_{in}) sont les entrées du neurone i (ou vecteur d'entrée), b est le biais du neurone ou valeur seuil.

La fonction d'activation généralement non linéaire classique est la fonction sigmoïde inspirée par le neurone formel, définie par :

$$G(\alpha) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha}}$$

IV.7 Présentation du modèle

Le Perceptron Multicouches (PMC) est un réseau de neurones non bouclé caractérisé par une structure bien particulière : ses neurones sont organisés en couches successives où les informations circulent dans un seul sens, de la couche d'entrée vers la couche de sortie. Les neurones d'une même couche ne sont pas interconnectés. Un neurone ne peut envoyer son résultat qu'à un neurone situé dans une couche postérieure à la sienne. Le PMC est composée de plusieurs couches, qui s'appellent, par convention la Couche d'entrée, la couche cachée et la couche de sortie (voir figure 27 ci dessous) [79] [86].

Le concept de réseau de neurones repose sur trois étapes principales [87] Pour chaque neurone dans une couche, multiplier la valeur d'entrée par le poids.

1. Ensuite, pour chaque couche, additionner toutes les pondérations des neurones et ajouter un biais.
2. Enfin, appliquer la fonction d'activation sur cette valeur pour calculer une nouvelle sortie.

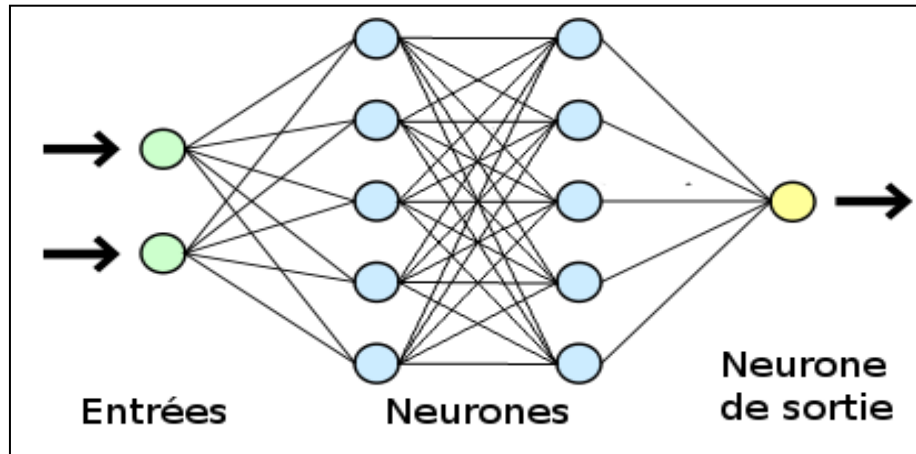


Figure 27: Réseau De Neurone Artificiel. [88]

IV.7.1 Couche d'entrée

Cette couche représente toujours une couche virtuelle associée aux entrées du système, composée des cellules d'entrée qui correspondent aux k variables d'entrée. Ces neurones ont une fonction d'activation dite 'identité', laissant passer l'information sans la modifier.

IV.7.2 Couches cachées

Chaque couche est composée d'un ou plusieurs neurones, dont la fonction d'activation est de la famille des sigmoïdes. Ces neurones n'ont aucun lien avec l'extérieur et sont appelés neurones cachés.

IV.7.3 Couche de sortie

Elle constitue l'interface du réseau avec l'extérieur. Les neurones de cette couche ont une fonction d'activation linéaire ou non, suivant la nature du problème à résoudre. Ses sorties correspondent aux sorties du système. Les neurones sont reliés entre eux par des connexions pondérées ; ce sont les poids de ces connexions qui gouvernent le fonctionnement du réseau et programment une application de l'espace des entrées vers l'espace des sorties, à l'aide d'une transformation non linéaire.

IV.8 Architecture des réseaux de neurones

On distingue différents types de réseaux de neurones. En règle générale, les Neural Networks sont catégorisés en fonction du nombre d'épaisseurs qui séparent l'entrée de données de la production du résultat, en fonction du nombre de nœuds cachés du modèle, ou encore du nombre d'entrées et de sorties de chaque nœud.

Les architectures de réseaux neuronaux peuvent être divisées en 4 grandes familles : [88]

- Réseaux de neurones Feedforwarded

- Réseaux de neurones récurrent (RNN)
- Réseaux de neurones à résonance
- Réseaux de neurones auto-organisés

Il ya deux structures de réseau, en fonction du graphe de leurs connexions, c'est-à dire du graphe dont les nœuds sont les neurones et les arêtes les «connexions» entre ceux-ci :

- Les réseaux de neurones statiques (ou non bouclés).
- Les réseaux de neurones dynamiques (ou bouclés).

IV.8.1. Réseaux de neurones non bouclés

Dans ce type de structure dite 'feed forward', la propagation de l'information se fait uniquement de l'entrée vers la sortie. Les neurones de la même couche peuvent se connecter uniquement avec les neurones de la couche suivante. L'architecture la plus utilisée est le perceptron multicouche.

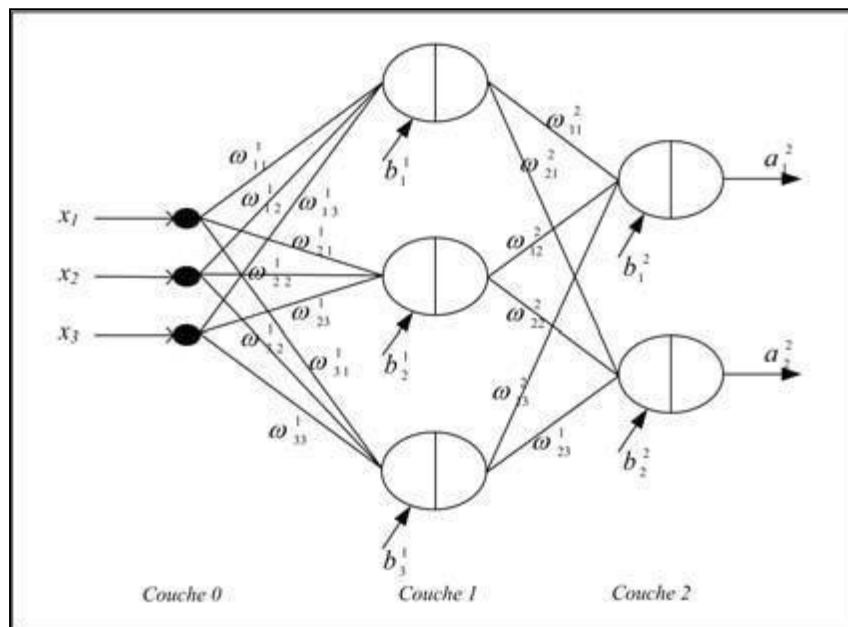


Figure 28 : Perceptron à une couche cachée [89][90].

IV.8.2. Réseaux de neurones bouclés

Un réseau dynamique ou récurrent possède la même structure qu'un réseau multicouche muni de rétroactions. Les connexions rétroactives peuvent exister entre tous les neurones du réseau sans distinction, ou seulement entre certains neurones. La figure 29 montre deux exemples de réseaux récurrents. Le premier est un simple multicouche qui utilise un vecteur d'entrée qui contient les copies des activations de la couche de sortie du réseau et le deuxième est un réseau à mémoire se distingue du premier par la présence des unités mémoires [91].

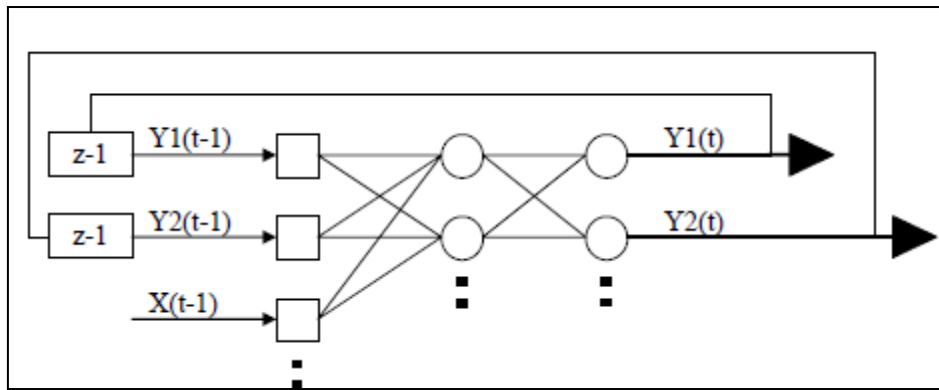


Figure 29 : Réseau de neurone bouclé.

IV.9 Apprentissage de réseau de neurones

IV.9.1 Définition

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré [85].

[92] Ont montré comment mettre en place un mode d'apprentissage optimal en tenant compte des connaissances que l'on a du bruit et des perturbations opérant sur le modèle postulé, modèle hypothétique représentant le processus physique que l'on cherche à reproduire.

Il existe plusieurs règles d'apprentissage qui peuvent être regroupées en trois catégories [85] :

- Apprentissage supervisé (ou à partir d'exemples)

Associe une réponse spécifique à chaque signal d'entrée. La procédure s'effectue progressivement, jusqu'à ce que l'erreur entre les sorties du réseau et les résultats désirés (données observées) soit minimisée.

- Apprentissage non supervisé

Consiste à ajuster les poids à partir d'un seul ensemble d'apprentissage formé uniquement de données, aucun résultat désiré n'est fourni au réseau.

- Apprentissage renforcée

Représente une technique nouvelle, qui a en commun avec l'apprentissage supervisé, la présence d'un superviseur régi par une mesure de degrés de performance (un grade ou score) qui juge l'évolution de l'apprentissage du réseau après quelques itérations, et une similitude avec l'apprentissage non supervisé, puisqu'il nécessite que des variables d'entrées, sans définir.

IV.10 Algorithme d'apprentissage

L'algorithme d'apprentissage est la méthode mathématique qui va modifier les poids de connexions afin de converger vers une solution qui permettra au réseau d'accomplir la tâche désirée. L'apprentissage est une méthode d'identification paramétrique qui permet d'optimiser les valeurs des poids du réseau.

L'algorithme d'apprentissage permet de "prédire" une valeur cible étant donnée une ou des valeurs d'entrées. Dans le cas où cette valeur cible est discrète (dans un ensemble fini), la tâche réalisée par l'algorithme est appelée classification supervisée puisqu'il s'agit de trouver la classe correspondant à un exemple donné en entrée. Quand la valeur cible appartient à un ensemble continu (par exemple \mathbb{R} ou $[0 ; 1]$), la tâche est appelée régression. Elle représente le plus souvent la prévision d'une ou de plusieurs valeurs futures correspondant à une suite de valeurs passées. Dans cette thèse, on s'intéressera uniquement à cette dernière tâche, à savoir la prévision des séries temporelles.

Soit $\{(x(t), y(t)) \in \mathbb{R}^d \times \mathbb{R} / 0 \leq t \leq N\}$ l'ensemble de données qui peut être une base d'apprentissage ou une base de test. $X(t)$ est le vecteur d'entrée à l'instant t , $X(t) \in \mathbb{R}^d$. $y(t)$ représente la valeur cible correspondant à $X(t)$ et N le nombre d'exemples dans la base. Le but de l'algorithme d'apprentissage est de trouver une fonction f , la représentation mathématique du modèle obtenu, qui soit le plus proche possible de la fonction cible F . On notera que F est toujours inconnue et dans de nombreux cas hypothétique. Le système pourra être évalué à la fin par l'erreur MSE :

$$MES = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^N (\hat{y}(t) - y(t))^2$$

Où $\hat{y}(t)$ est la valeur prédite c'est-à-dire $f(X(t)) = (t)$ l'approximation de la valeur $y(t)$. Pour répondre à ce problème, plusieurs méthodes ont été développées. Une méthode peut être décrite par un modèle dans lequel on définit la fonction f et un algorithme d'apprentissage par lequel cette fonction a été déterminée. Parmi les algorithmes les plus utilisées pour l'apprentissage, on trouve :

A. Algorithme de rétro propagation

Cet algorithme que l'on désigne couramment par "Back-propagation" est le plus populaire parmi les deux techniques d'apprentissage des réseaux multicouches.

L'algorithme de rétro propagation est basé sur la généralisation de la règle de Widrow-Hoff [93].

en utilisant une fonction d'activation sigmoïde. Le réseau utilisé est un réseau à couches où chaque neurone est connecté à l'ensemble des neurones de la couche suivante. Le principe de cet algorithme est la propagation d'un signal provenant des nœuds d'entrée vers la sortie et ensuite on propage l'erreur commise de la sortie vers les couches internes jusqu'à l'entrée [94].

Formulation : Pour un exemple de données à apprendre, on note x le vecteur d'entrées et y le vecteur de sortie désirée. Supposant que notre réseau a n nœuds d'entrée et m neurones de sortie, on a donc : $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ et $(y_1, y_2, y_3, \dots, y_{dm})$

On note $y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_{dm})$ le vecteur des sorties obtenues effectivement à l'issue de rétro-propagation du vecteur. On cherche à minimiser l'erreur quadratique entre les sorties désirées et les sorties obtenues, cette erreur étant considérée comme une fonction des poids des connexions :

$$E(w) = \sum_{i=1, m} (y_{di} - y_i)^2$$

La règle de modification des poids à la présentation numéro k de l'exemple x est la suivante:

$$W_{ij}(k) = W_{ij}(k-1) - e(k) \cdot d_i \cdot o_j$$

Où est calculé de proche en proche, de la couche de sortie à la couche d'entrée :

$D_i = 2 \cdot (y_i - y_{di}) \cdot f'(l_i)$ pour la couche de sortie

$D_i = \sum_h y_h \cdot w_{hi} \cdot f'(l_i)$ pour la couche caches

Où, 'h' parcourt les neurones vers lesquels le neurone i envoie une connexion.
 f est la fonction sigmoïde d'un neurone. f' est sa dérivée ; o_j est la sortie du neurone j ; l_i est l'entrée du neurone.

$\eta = \sum_j w_{ij} \cdot o_j \cdot e(k)$ est le pas du gradient à l'étape k .

Nous utilisons trois variantes de l'algorithme de rétro propagation dans notre travail : Levenberg– Marquardt (**RNA_LM**), Bayesian Regularization (**RNA_BR**), et scaled conjugate gradient (**RNA_SCG**).

A.1. Levenberg–Marquardt algorithm

L'algorithme de Levenberg-Marquardt converge plus rapidement que les autres algorithmes cités, mais il demande plus de mémoire lorsque le réseau devient grand. La règle de correction des poids est la suivante ; [95] et [96].

$$\Delta W = [j^t j + \mu I]^{-1} j^t e$$

j : la matrice jacobienne des dérivées de l'erreur ;

μ : scalaire ;

e : vecteur d'erreur.

Lorsque μ est grand, l'algorithme se rapproche de la méthode de descente du gradient. Par contre, si μ est petit, l'algorithme se rapproche de la méthode de Gauss Newton. La procédure de l'algorithme est la suivante :

1. présentation du vecteur d'entrée en propageant celui-ci jusqu'à la sortie et calcul de l'erreur quadratique,
2. calcul de la matrice Jacobienne,
3. calcul de ΔW pour corriger les poids du réseau,
4. calcul des nouveaux poids, ajustement du paramètre et vérification de la convergence vers l'erreur demandée.

A.2. Bayesian Regularization algorithm

BR est un algorithme de formation qui met à jour les valeurs de pondération et de biais en fonction de LM optimisation [97][98]. Il minimise une combinaison D'erreurs au carré et de poids, puis détermine la combinaison correcte de manière à Produisent un réseau qui se

généralise bien [99]. BR présente Pondre le réseau dans la fonction d'objectif de formation qui est désignée par $F(w)$ dans et expliqué par [100].

$$F(w) = \alpha E_w + \beta E_D$$

Où E_w est la somme des poids de réseau au carré et E_D est la somme du réseau les erreurs. Les deux paramètres α et β sont les paramètres objectifs de la fonction.

Dans le cadre BR, Les poids du réseau sont considérés comme des variables aléatoires, puis la répartition des poids du réseau et l'ensemble de formation sont considérés comme une distribution gaussienne.

Les facteurs α et β sont définis en utilisant le théorème de Bayes. Le théorème de Bayes Relie deux variables (ou événements), A et B, en fonction de leur précédent (ou marginal) Probabilités et probabilités postérieures (ou conditionnelles) comme montre l'équation [101]:

$$P(A/B) = \frac{P(B/A)P(A)}{P(B)}$$

Lorsque $P(A | B)$ est la probabilité postérieure de A conditionnelle sur B, $P(B | A)$, le précédent de B.

Conditionnel sur A, et $P(B)$ la probabilité antérieure non nulle de l'événement B, qui fonctionne comme une constante de normalisation. Afin de trouver l'espace de poids optimal, la fonction objective (ci-dessus) doit être minimisée, ce qui équivaut à maximiser la postérieure Fonction de probabilité donnée comme dans suit :

$$P(\alpha, D / \beta, M) = \frac{P(D / \alpha, \beta, M) P(\alpha, \beta / M)}{P(D / M)}$$

Où α et β sont les facteurs nécessaires à être optimisé, D est la distribution du poids, M représente l'architecture de réseau neuronal particulier, $P(D|M)$ est le facteur de normalisation, $(, |M)$ est la densité uniforme avant pour les paramètres de régularisation et $(D| \alpha, \beta, , M)$ est la fonction de vraisemblance de D donné α, β, M . La maximisation de la fonction postérieure $(\alpha, \beta, |D, M)$ est équivalent à maximiser la fonction de vraisemblance $P(D/ \alpha, \beta, M)$. A la suite de ce processus, les valeurs optimales pour α et β pour un espace donné de poids se trouvent. Ensuite, l'algorithme se déplace en phase LM où les calculs de Hessien lieu et met à jour l'espace de poids afin de minimiser la fonction objective. Ensuite, si la convergence n'est pas satisfaite, l'algorithme estime de nouvelles valeurs et toute la procédure se répète jusqu'à ce que la convergence soit atteinte [100].

A.3. Scaled conjugate gradient algorithm

L'algorithme de rétro propagation de base ajuste les coefficients de pondération dans la direction de descente la plus forte, à savoir dans la direction du gradient négatif, étant la direction dans laquelle la fonction de performance diminue plus rapidement [95]. Il se trouve que cette direction n'est pas forcément celle de la convergence plus rapide. Dans un

algorithme de gradient conjugué, en faisant une recherche du minimum dans des directions conjuguées, qui produit généralement une convergence plus rapide que la direction de la pente la plus forte 'steepest descent directions'. Tous les algorithmes de gradient conjugué commencent par la recherche dans le sens inverse du gradient de la première itération et réinitialiser la méthode à toutes les m itérations. Voici les principales étapes de l'algorithme :

1. $t = 0$;
2. Choisir la prochaine direction conjuguée de recherche :

$$P_k = -g_k + \beta_k P_{k-1} \text{ si } \text{mod}(k, m) \neq 0$$

$$P_k = -g_k \text{ si } \text{mod}(k, m) = 0$$

β_k est calculé comme à l'équation suivante :

$$\beta_k = \frac{\Delta g_{k-1}^T g_k}{\Delta g_{k-1}^T p_{k-1}} \quad \beta_k = \frac{g_k^T g_k}{\Delta g_{k-1}^T g_{k-1}} \quad \beta_k = \frac{\Delta g_{k-1}^T g_k}{\Delta g_{k-1}^T g_{k-1}}$$

- 3 .Faire un pas comme à l'équation 11, en choisissant de manière à minimiser la fonction F dans la direction de recherche P_k :

$$X_{k+1} = X_k + \alpha_k P_k$$

Où X_k est le vecteur de poids et biais actuels, g_k est le gradient courant, et α_k est le taux d'apprentissage et $P_1, P_2, P_3, \dots, P_k$ un ensemble de vecteurs de poids non nuls.

4. $t = t + 1$;
5. Si le critère d'arrêt n'est pas atteint, alors recommencer à l'étape 2.

IV.11 Modélisation avec le réseau de neurones artificiels

IV.11.1. Collecte des données

Dans notre étude, les entrées du modèle sont les valeurs instantanées des débits liquides (m³/s) pour plusieurs stations de mesure et les valeurs de sorties sont les débits solides (kg/s) des pluies observées à des instants précédents. L'architecture du modèle est représentée sur la figure 30.

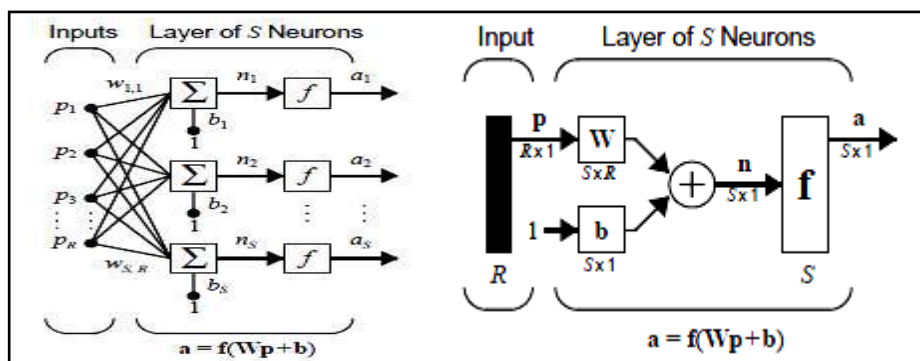


Figure 30 : Architecture de modèle choisi dans notre cas.

La base de données a été divisée en trois phases : La phase d'apprentissage, la phase de test et la phase de validation. L'apprentissage est la propriété la plus intéressante dans les réseaux de neurones. Pour apprendre, le réseau doit connaître la réponse qu'il aurait dû donner.

C'est la phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement souhaité : c'est la validation. La méthode la plus simple pour faire la validation est de garder une partie de l'échantillon réservé à l'apprentissage pour la validation et faire ainsi une validation hors échantillon.

A. Préparation des données débit liquide débit solide pour les réseaux de neurones multicouches

Avant de commencer le processus de conception du réseau, on doit d'abord recueillir et préparer des données (QI-Qs). Il est généralement difficile d'intégrer des connaissances antérieures dans un réseau de neurones, donc le réseau ne peut être aussi précis que par les données qui sont utilisées pour son apprentissage. Il est important que les données (QI-Qs) couvrent la gamme d'entrées pour lesquelles le réseau sera utilisé. Les réseaux multicouches peuvent être exécutés pour généraliser bien dans la gamme d'entrée pour laquelle ils ont été exécutés. Cependant, ils n'ont pas la capacité d'extrapoler avec précision au delà de cette plage, il est donc important que les données (QI-Qs) d'entraînement couvrent toute la gamme de l'espace d'entrée.

B. Choix des fonctions de traitement des entrées-sorties du réseau neuronal

L'apprentissage du réseau de neurone peut être plus efficace si on effectue certaines étapes de prétraitement sur les entrées et les cibles du réseau. Cette section décrit plusieurs routines de prétraitement qu'on peut utiliser. Généralement, l'étape de normalisation est appliquée à la fois aux vecteurs d'entrée et aux vecteurs cibles dans l'ensemble de données (QI-Qs). De cette façon, la sortie peut alors être transformée en retour dans les unités des données cibles originales lorsque le réseau est mis à utiliser dans le champ.

Il est plus facile de penser au réseau neuronal comme ayant un bloc de prétraitement (pre-processing) qui apparaît entre l'entrée et la première couche du réseau et un bloc de post traitement (post-processing) qui apparaît entre la dernière couche du réseau et la sortie. La plupart des fonctions de création de réseau dans la boîte à outil (toolbox), y compris les fonctions de création de réseau multicouches, attribuent automatiquement des fonctions de traitement aux entrées et aux sorties du réseau. Ces fonctions transforment les valeurs d'entrée et de cible en valeurs qui conviennent mieux à la formation en réseau.

C. Division des données (QI-Qs) pour un apprentissage optimal sur les réseaux de neurone

Lors de l'apprentissage réseaux multicouches, la pratique générale consiste à diviser les données en trois sous ensembles. Le premier sous ensemble est l'ensemble d'apprentissage, qui est utilisé pour calculer le gradient et mettre à jour les poids w et les biais b du réseau. Le second sous ensemble est l'ensemble de validation. L'erreur sur l'ensemble de validation est surveillée pendant le processus d'apprentissage. L'erreur de validation diminue normalement pendant la phase initiale l'apprentissage, de même que l'erreur de l'ensemble d'entraînement. Cependant, lorsque le réseau commence à surcharger les données, l'erreur sur l'ensemble de validation commence généralement à augmenter. Les poids et les biais de réseau sont enregistrés au minimum de l'erreur de validation. L'erreur de test n'est pas utilisée pendant l'apprentissage, mais elle est utilisée pour comparer différents modèles. Il est également utile de tracer l'erreur de test lors du processus d'apprentissage. Si l'erreur sur l'ensemble de test atteint un minimum à un nombre d'itérations significativement différent de l'erreur de validation, cela peut indiquer une mauvaise division de l'ensemble de données. Pour notre

problème, les relations pour l'apprentissage, les tests et la validation sont respectivement 70%, 15% et 15%.

D. Exécution et application d'un réseau de neurones multicouches.

Le processus d'apprentissage RNA consiste à accorder les valeurs des poids w et des biais b du réseau pour optimiser les performances du réseau. La fonction de performance des réseaux feed forward utilisé dans notre cas est l'erreur quadratique moyenne.

Pour l'apprentissage de réseau feedforward multicouches, n'importe quel algorithme d'optimisation numérique standard peut être utilisé pour optimiser la fonction de performance, mais il y a quelques clés qui ont montré une excellente performance pour l'apprentissage du RNA. Lors d'apprentissage de grands réseaux, et lors de l'entraînement des réseaux de reconnaissance de formes, trainbfg et trainrp sont de bons choix. Leurs besoins de mémoire sont relativement faibles, et pourtant ils sont beaucoup plus rapides que les algorithmes de descente en gradient standard. On lance maintenant notre réseau de RNA pour chaque station de mesure avec Q_1 comme données d'entrée (Input) et Q_s comme cible (Target), basant sur les étapes de calcul citées auparavant.

E. Amélioration des résultats

Si le réseau formé n'est pas suffisamment précis (ne donne pas de bon résultats), on essaye de réinitialiser le réseau et l'exécuter à nouveau. Chaque fois qu'on initialise un réseau feedforward, les paramètres réseau sont différents et peuvent produire des solutions différentes. En tant que deuxième approche, on peut augmenter le nombre de neurones cachés au dessus de 10. Un plus grand nombre de neurones dans la couche cachée donne au réseau plus de flexibilité. Une troisième option est d'essayer les différentes fonctions d'apprentissage. Enfin, des données supplémentaires pour le réseau est plus susceptible de produire un réseau qui se généralise bien à de nouvelles données.

IV.11.2. Modélisation de la relation débit solide - débit liquide et leur variation de l'erreur

Dans cette étude, les modèles de réseaux neuronaux ont été appliqués pour prévoir le transport solide pour les deux stations de Djidiouia RN4 et Sidi Belatter.

La figure 31 représente la relation entre le débit solide simulé et le débit solide mesuré de la Djidiouia RN4.

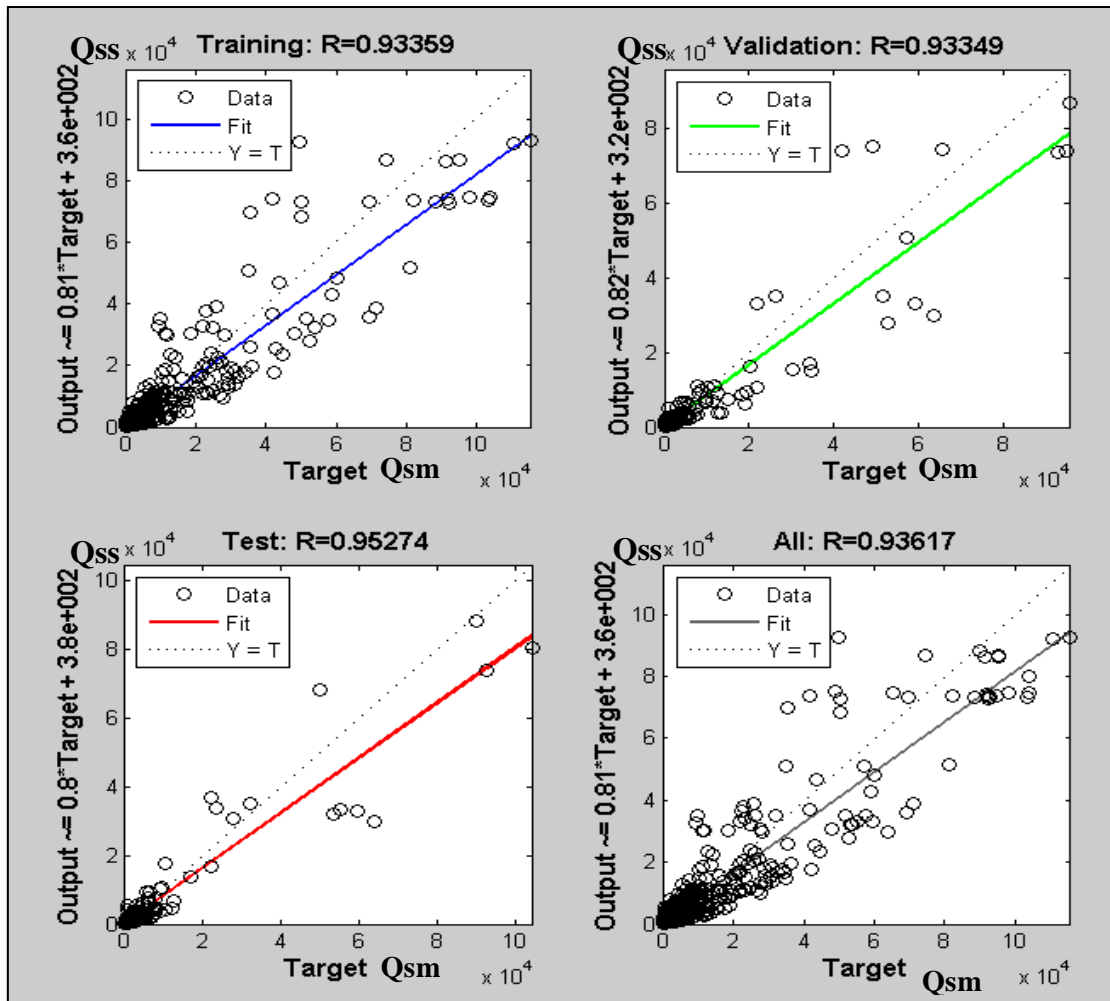


Figure 31 : Variation de débit solide simulé en fonction de débit solide mesuré de la Djidiouia RN4

D'après la figure, on remarque que la ligne d'entraînement a été alignée avec la ligne du best fit (d'équation $Y = T$), ainsi que la ligne (fit) proche de la ligne idéale avec le coefficient de corrélation varié entre $R = 0.93$ et $0,95$.

La relation reliant le débit simulé avec le débit mesuré est représentée par une fonction linéaire de type :

$$output = C1 \times target + C2$$

Avec :

Output : représente le débit solide simulé

Target : représente le débit solide mesuré ou observé.

Les relations sont récapitulées dans le tableau 12

Tableau 12 : Fonction reliant le débit solide et le débit liquide.

| Classe | Fonction | R ² |
|---------------|--------------------------|----------------|
| Apprentissage | Output= 0.81*Target+3600 | 0.93 |
| Test | Output= 0.8*Target+3800 | 0.95 |
| Validation | Output= 0.82*Target+3200 | 0.93 |
| Ensemble | Output= 0.81*Target+3600 | 0.94 |

On a constaté que le débit solide simulé est extrêmement proche des valeurs mesurées. Le résultat de la validation a également montré que l'équation du modèle pourrait être utilisée pour prédire le débit solide simulé précisément avec R² = 0,94. Le coefficient de corrélation (R²=0.94) révèle que la relation entre le débit solide simulé est fortement corrélé avec le débit solide mesuré.

La figure 32 représente la variation de l'erreur entre le débit solide simulé et le débit solide mesuré.

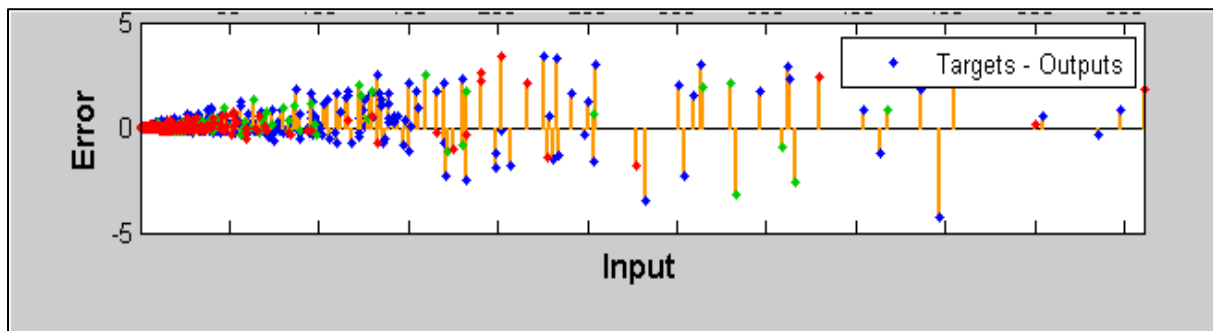


Figure 32 : Variation de l'erreur entre le débit solide simulé et le débit solide mesuré de la Djidiouia RN4.

La performance de validation pour le débit liquide et débit solide est représentée sur la figure 33.

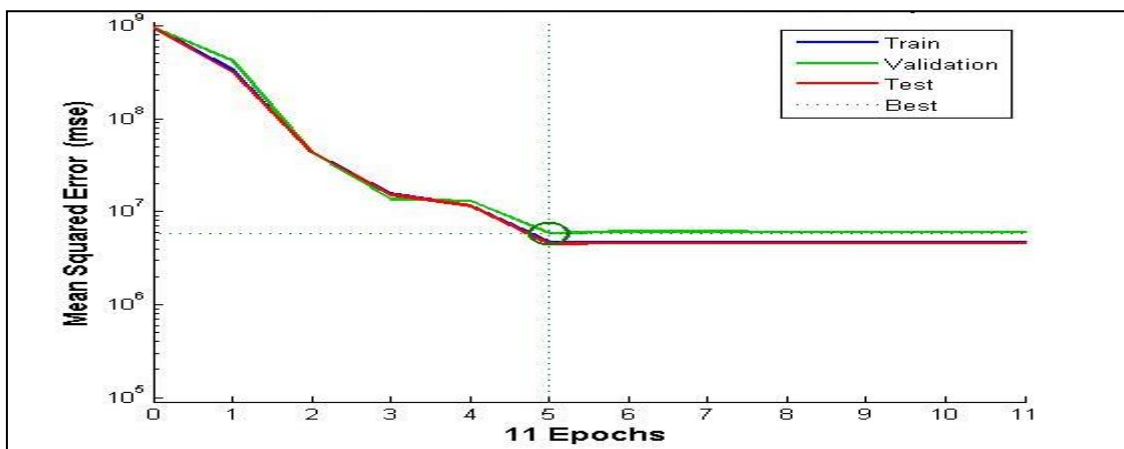


Figure 33 : Performance de validation Q1-Qs du perceptron multicouche de la station Djidiouia RN4.

Cette figure nous montre qu'après 5 échantillons (Epochs) notre perceptron multicouche a réussi d'avoir l'erreur minimal de validation qui est le best fit, sachant que son erreur d'entraînement pour les autres échantillons du réseau de neurones est dans un état décroissant.

La figure 34 représente la relation entre le débit solide simulé et le débit solide mesuré de la station Sidi Belatter.

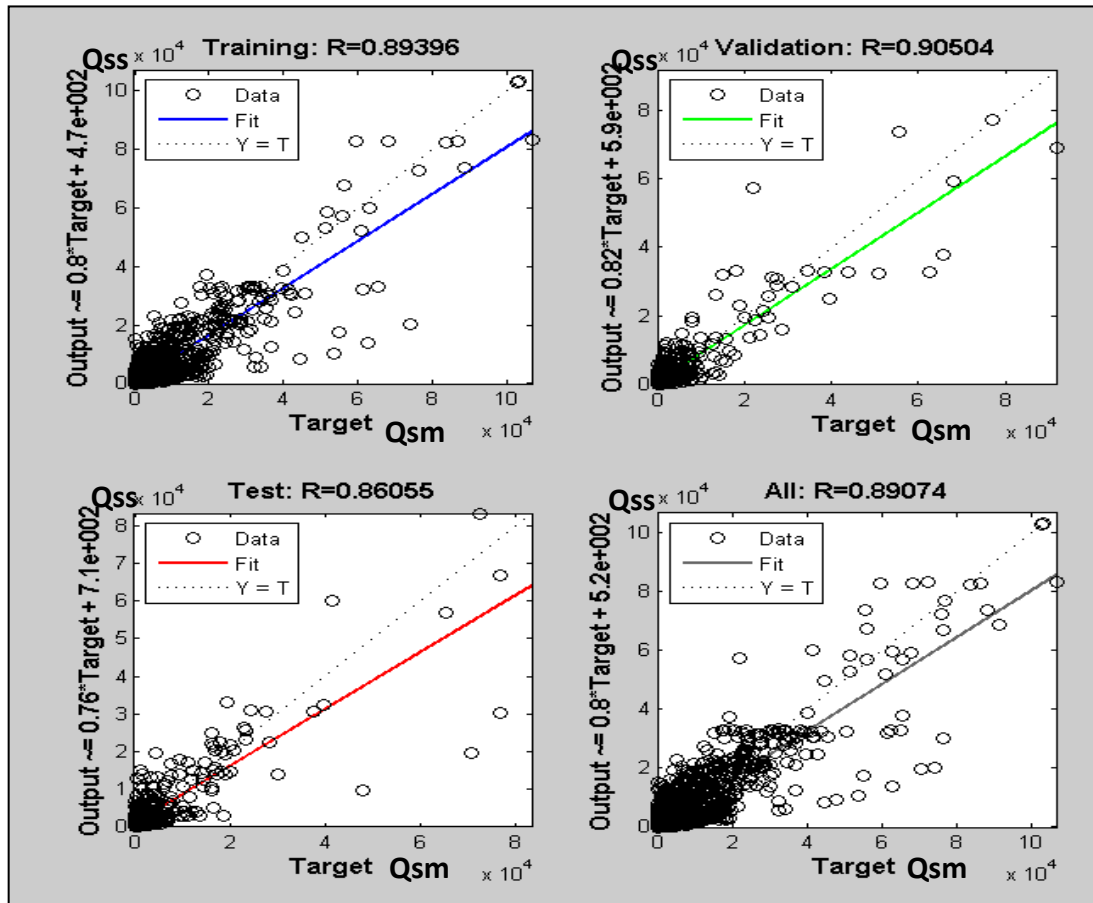


Figure 34: Variation de débit solide simulé en fonction de débit solide mesuré de la station Sidi Belatter.

D'après la figure, on remarque que la ligne d'entraînement a été alignée avec la ligne du best fit (d'équation $Y = T$), ainsi que la ligne (fit) proche de la ligne idéale avec le coefficient de corrélation varié entre $R = 0.86$ et 0.90 .

La relation reliant le débit simulé avec le débit mesuré est représentée par une fonction linéaire de type :

$$output = C1 \times target + C2$$

Avec :

Output : représente le débit solide simulé

Target : représente le débit solide mesuré ou observé.

Les relations sont récapitulées dans le tableau 13.

Tableau 13 : Fonction reliant le débit solide et le débit liquide.

| Classe | Fonction | R ² |
|---------------|--------------------------|----------------|
| Apprentissage | Output= 0.8*Target+4700 | 0.89 |
| Test | Output= 0.76*Target+7100 | 0.86 |
| Validation | Output= 0.82*Target+5900 | 0.90 |
| Ensemble | Output= 0.8*Target+5200 | 0.89 |

On a constaté que le débit solide simulé est extrêmement proche des valeurs mesurées. Le résultat de la validation a également montré que l'équation du modèle pourrait être utilisée pour prédire le débit solide simulé précisément avec $R^2 = 0,90$. Le coefficient de corrélation ($R^2=0.90$) révèle que la relation entre le débit solide simulé est fortement corrélé avec le débit solide mesuré.

La variation de l'erreur entre le débit solide simulé et le débit solide mesuré de la station de Sidi Belatter est représentée sur la figure 35.

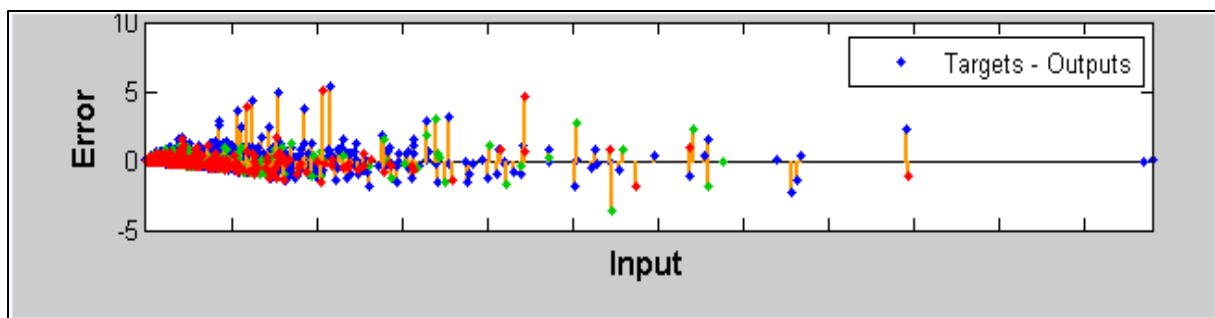


Figure 35 : Variation de l'erreur entre le débit solide simulé et le débit solide mesuré de Sidi Belatter.

La performance de validation pour le débit liquide et débit solide est représentée sur la figure 36.

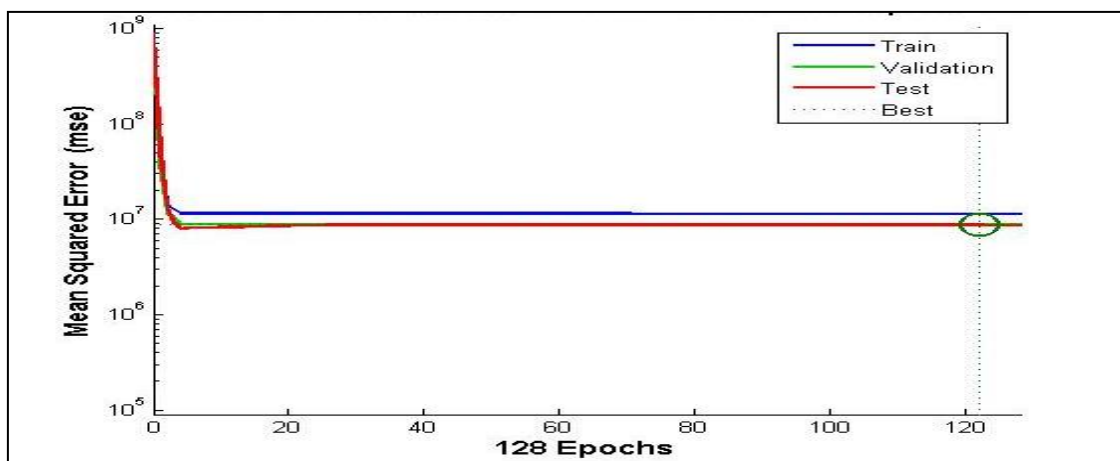


Figure 36: Performance de validation QI-Qs du perceptron multicouche de la station Sidi Belatter.

Cette figure nous montre qu'après 128 échantillons (Epochs) notre perceptron multicouche a réussi d'avoir l'erreur minimal de validation qui est le best fit, mais l'erreur d'entraînement pour le réseau de neurones continue sa décroissance monotone.

Les représentations graphiques ci-dessous obtenues à l'aide de réseau de neurones montrent la variation de débit solide simulé et le débit solide mesuré pour les deux stations hydrométriques (données de cible). L'illustration graphiques montrent les variations des données (Qssim-Qsmes), en l'occurrence le Qssim se sont les données de sortie du modèle construit de réseau de neurones en fonction de Qsmes leur cible. On aperçoit une régression linéaire entre (Qssim-Qsmes). Les données d'apprentissage indiquent un bon ajustement. Les résultats de validation et de test montrent également des valeurs de corrélation très significative.

Pour les deux stations étudiées, le résultat obtenu par RNA montre une excellente approche, les valeurs mesurées de chaque station de mesure sont presque les mêmes et les variables s'agglutinent sur un meilleur ajustement par des droites linéaires croissants.

IV.11.3 Modélisation de débit solide en fonction de temps et leur variation de l'erreur d

Le résultat obtenu de la modélisation de débit solide en fonction de temps pour la station de Djidioua RN4 est représenté sur la figure 37.

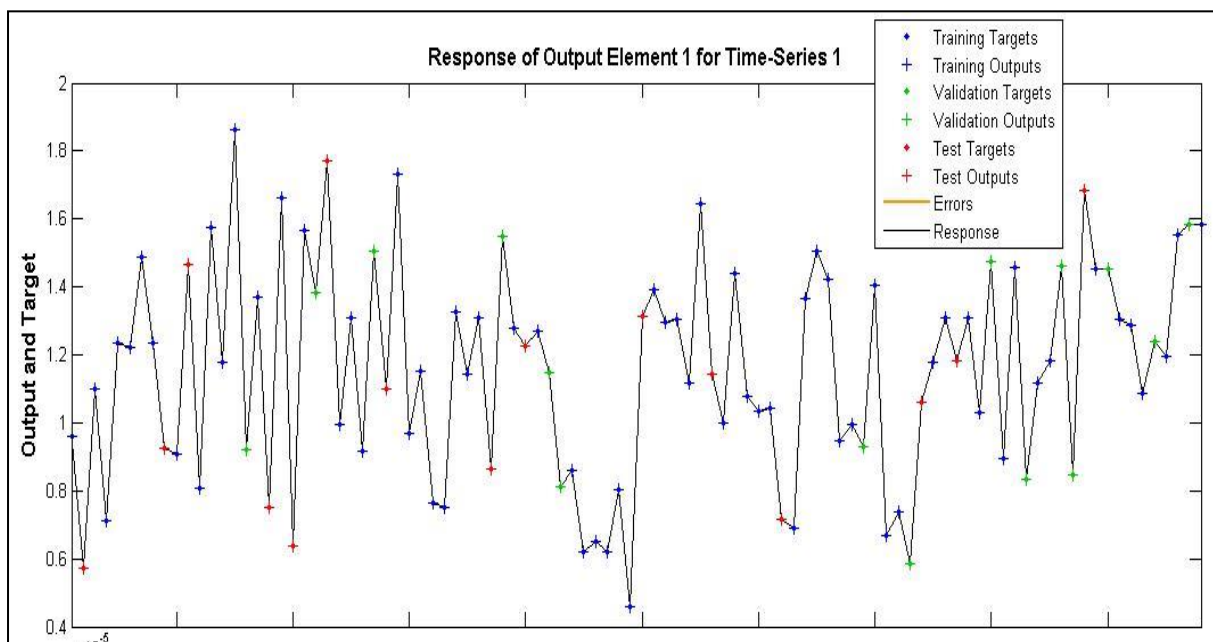


Figure 37 : Modélisation de débit solide en fonction de temps pour la station de Djidioua RN4

La figure 38 représente la variation de l'erreur en fonction de temps pour la station de Djidioua RN4.

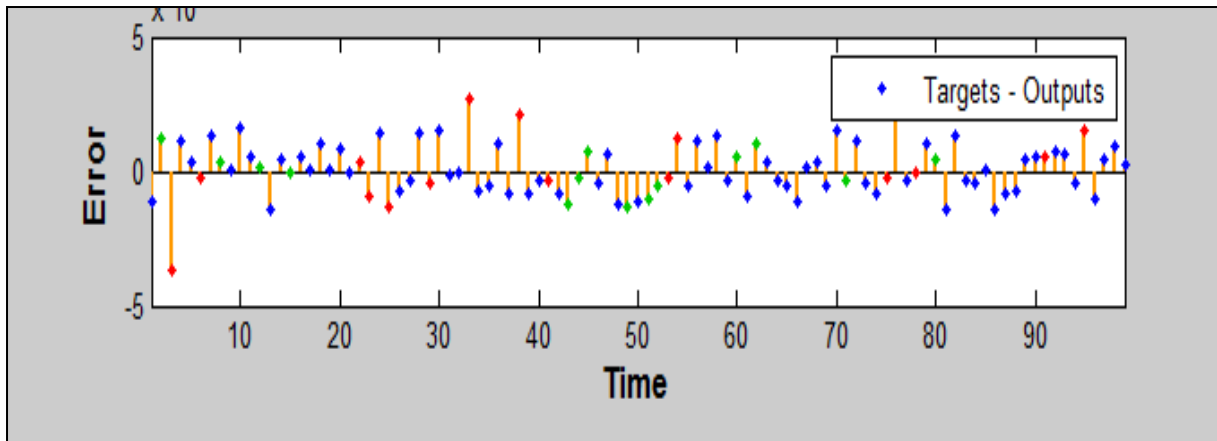


Figure 38 : Variation de l'erreur en fonction de temps pour la station de Djidioua RN4.

La performance de validation est représentée sur la figure 39.

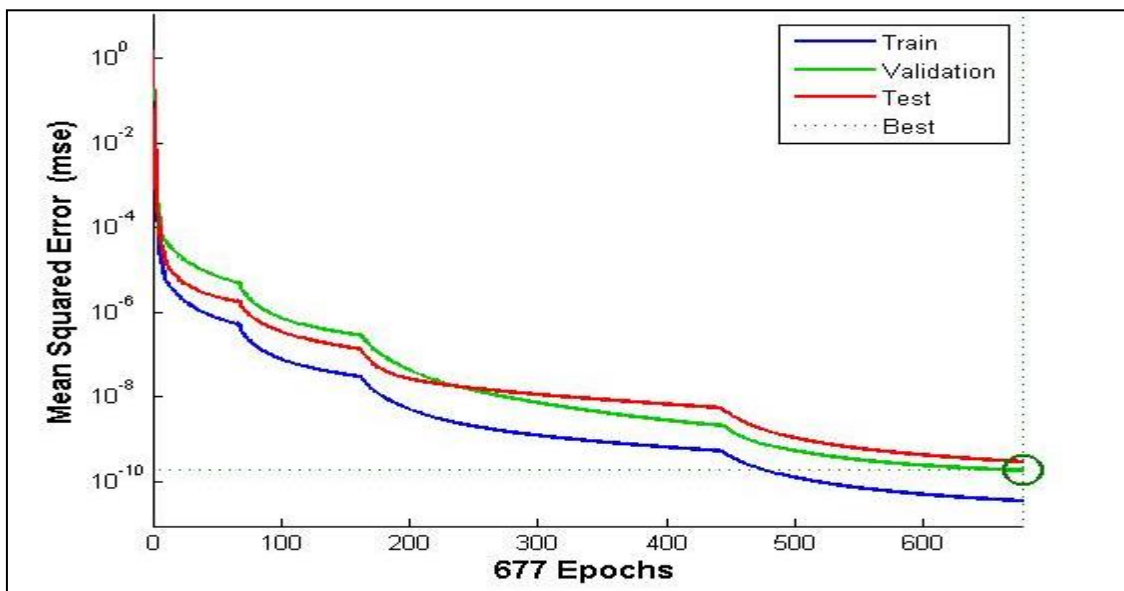


Figure 39 : Performance de validation multicouche de la station Djidiouia RN4.

Les résultats obtenus de la modélisation de débit solide en fonction de temps pour la station de Sidi Belatter est représentée sur la figure 40.

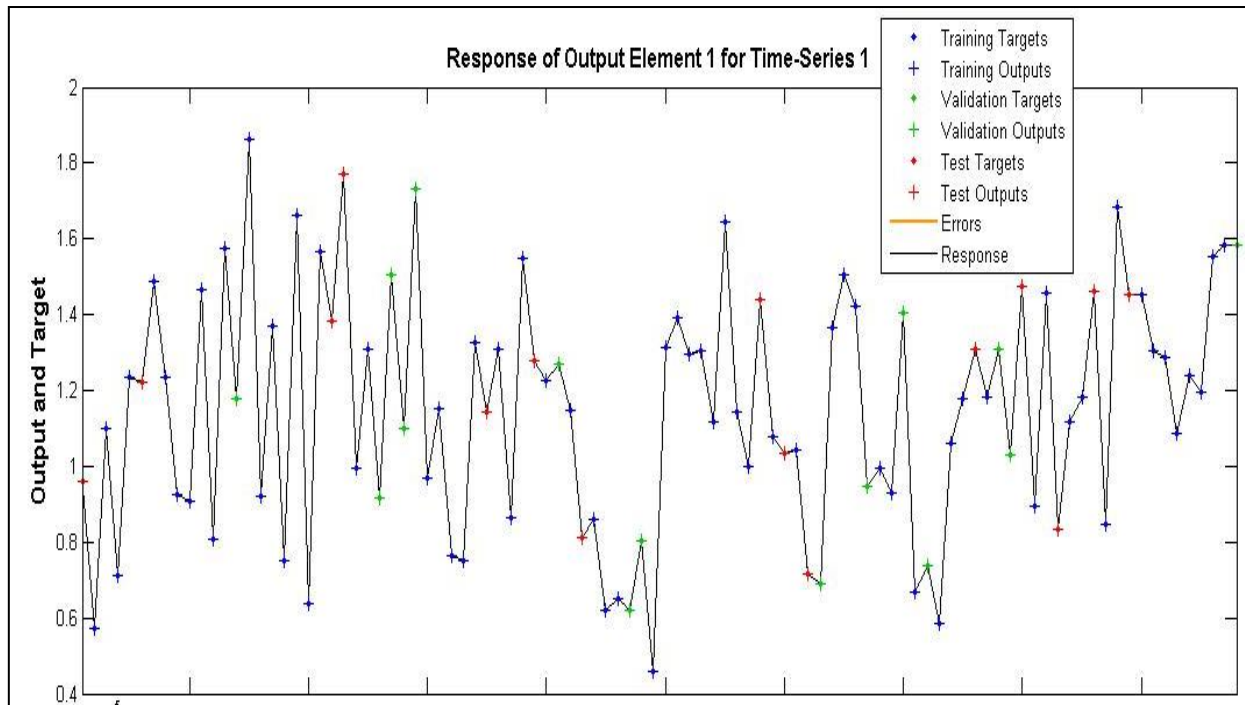


Figure 40 : Modélisation de débit solide en fonction de temps pour la station de Sidi Belatter

La figure 41 représente la variation de l'erreur en fonction de temps pour la station de Sidi Belatter.

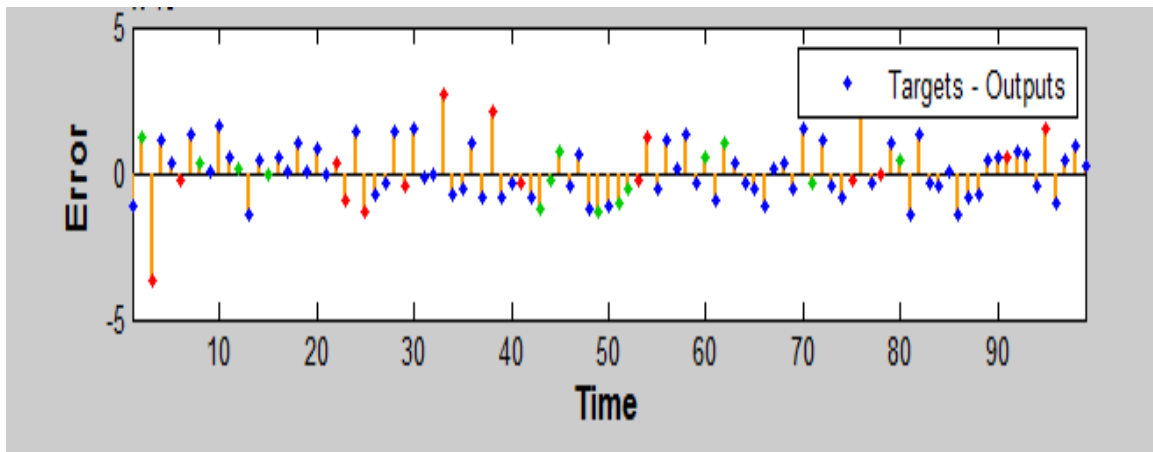


Figure 41 : variation de l'erreur en fonction de temps pour la station de Sidi Belatter.

La performance de validation est représentée sur la figure 42.

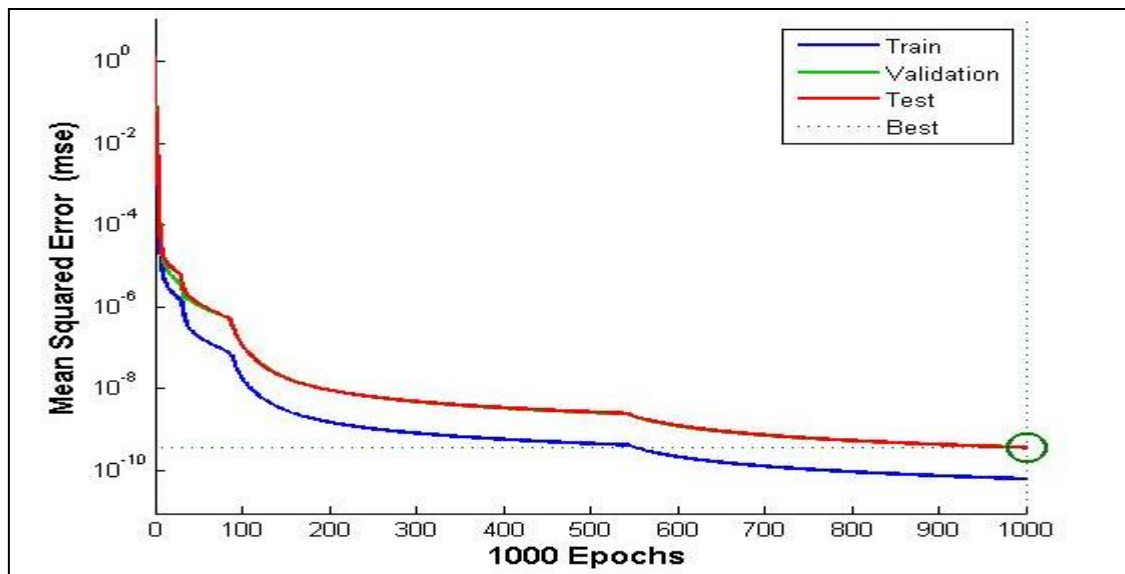


Figure 42 : Performance de validation multicouche de la station Sidi Belatter.

En examinant les résultats représentés sur les figures ci-dessus on constate que la relation entre les combinaisons d'entrées et de sorties a montré d'excellent résultats.

On a constaté que les valeurs prédites sont extrêmement proche des valeurs mesurées. Le coefficient de corrélation pour les deux stations est égal à ($R^2=1$). Cette valeur révèle que la modélisation est très significative.

La valeur de MSE montre que la relation entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées sont hautement significative. Pour les deux stations étudiées, les valeurs de l'erreur moyenne quadratique MSE sont représentées dans le tableau 14.

Tableau 14 : Erreur moyenne quadratique MSE des deux stations.

| Station | Classe | R^2 | MSE |
|---------------|---------------|-------|-----------------|
| DJIDIOUIA RN4 | Apprentissage | 1 | $3,49.10^{-11}$ |
| | Test | 1 | $2,94.10^{-10}$ |
| | Validation | 1 | $1,84.10^{-10}$ |
| SIDI BELATTER | Apprentissage | 1 | $6,22.10^{-11}$ |
| | Test | 1 | $3,62.10^{-10}$ |
| | Validation | 1 | $3,65.10^{-10}$ |

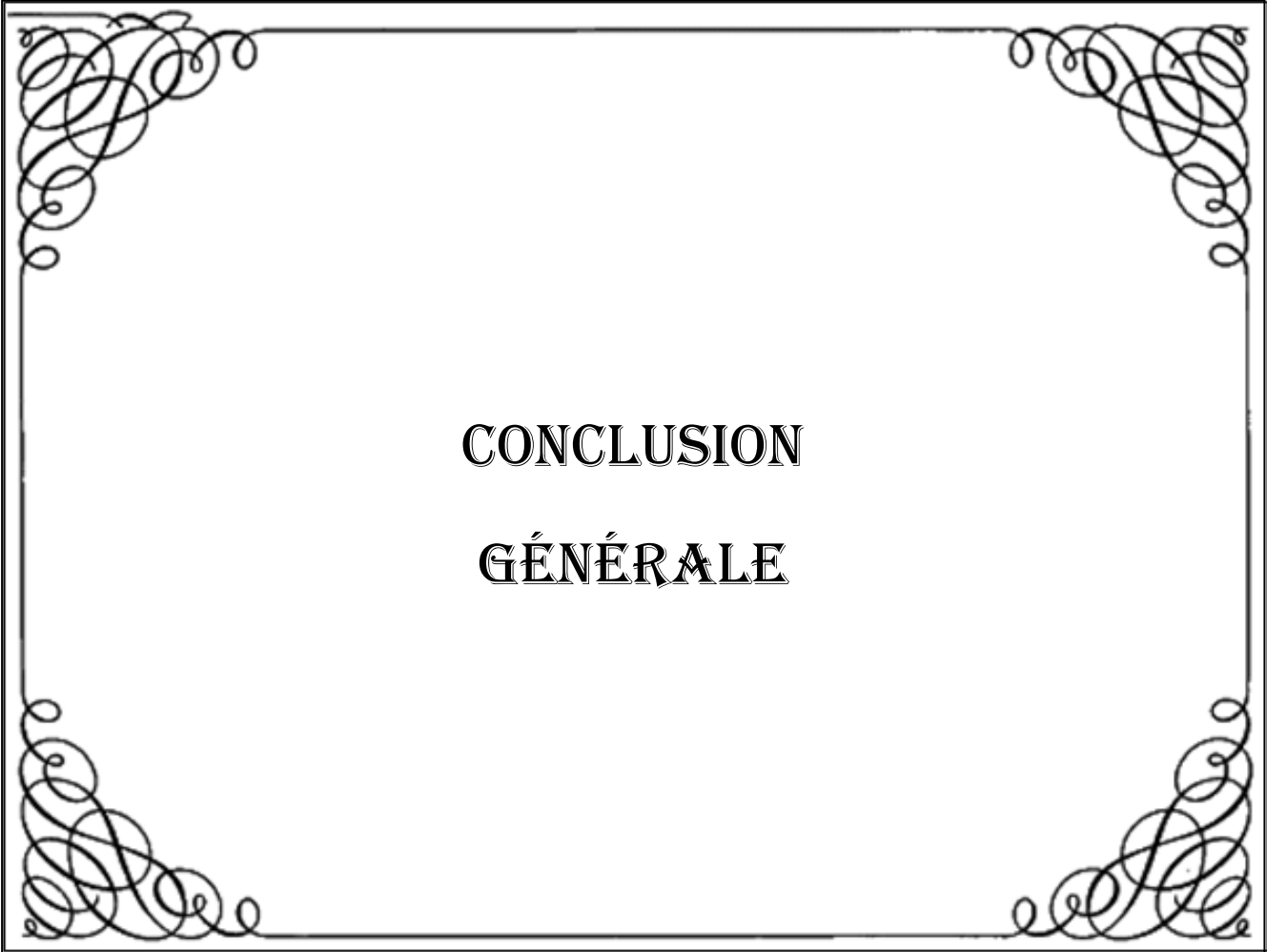
Les figures de performance nous montrent qu'après 677 échantillons (Epochs), pour la station Djidiouia RN4, notre perceptron multicouche a réussi d'avoir l'erreur minimal de validation qui est le best fit, mais l'erreur d'entraînement pour le réseau de neurones continue sa décroissance monotone. Par contre, pour la station de Sidi Belatter, la performance montre qu'après 1000 échantillons (Epochs) notre perceptron multicouche a réussi d'avoir l'erreur minimal de validation qui est le best fit, mais l'erreur d'entraînement pour le réseau de neurones continue sa décroissance monotone.

Conclusion

La prédiction des débits solides fait partie des tâches les plus importantes en hydrologie du fait, qu'elle permet d'anticiper l'évolution des flux de transports solides à l'exutoire d'un bassin, ou en amont des barrages. Ce modèle peut être utilisé dans la gestion des ressources en eau (ex : gestion d'un barrage) et aussi dans la protection contre les inondations (ex : comme outil de prévention des crues).

Le modèle RNA a donné des résultats satisfaisants dans cette étude, et a montré que cette technique est très robuste et efficace pour la prévision de sédiments en suspension. Nous avons également montré que l'utilisation de débit liquide et solide comme entrées est très efficace. L'application de ce modèle est bien fiable et peut être utilisée pour bien gérer les ressources en eau dans les bassins versants, la prévision de l'érosion et la charge sédimentaire qui affecte négativement à l'environnement des eaux.

La méthode de calcul a prouvé son efficacité de calcul, vu les résultats obtenus. Ces derniers sont parfaits et présentent des corrélations idéales ; ce modèle a été testé sur plusieurs données historiques de débit liquide de chaque station hydrométrique afin d'avoir sa fiabilité dans le temps.



CONCLUSION
GÉNÉRALE

Conclusion général

D'après cette étude, il est important à signaler qu'une grande partie des terrains du bassin versant Oued Cheliff présente une forte sensibilité à l'érosion. Celle-ci résulte de la conjonction de plusieurs facteurs : l'agressivité des pluies ; l'érodibilité des sols ; la raideur du relief et la faiblesse du couvert végétal.

Les transports solides en suspension d'Oued Cheliff et de ses affluents présentent des variations spatio-temporelles considérables. Elles sont dues essentiellement au régime pluviométrique, à la densité du couvert végétal et à la lithologie.

En général, il a été observé dans les deux stations que la corrélation à l'échelle saisonnière est plus importante pour les saisons automne, hiver et été. Cela peut s'expliquer par la régularité des apports durant ces saisons. Le coefficient de corrélation est de l'ordre de 0,8.

Le transport solide d'automne reste le plus élevé dépassant significativement les autres saisons. Cette variabilité s'explique par l'absence du couvert végétal durant les mois d'été (sols nus) et la nature agressive des pluies d'automne. Ces deux facteurs permettent aux premières crues d'automne de transporter des quantités considérables de sédiments après de longs mois secs caractérisés par de fortes températures et par la destruction des agrégats du sol par ces dernières.

La relation liant les débits liquides aux débits solides en suspension pour notre stations hydrométrique est de type puissance de forme générale ($Q_s = aQ_l^b$).

Dans le dernier chapitre nous avons étudié la modélisation du transport sédimentaire par des réseaux de neurones artificiels. Ce dernier est un puissant outil d'extrapolation non linéaire qui agit par apprentissage des données d'entrées et des données de sortie. De façon générale, en comparant les résultats des modèles régressifs avec ceux obtenus par les réseaux de neurones artificiels on remarque aisément la puissance des réseaux de neurones en particulier en phase de test.

Enfin, d'après les résultats trouvés, on peut dire que le transport solide est un processus très important à prendre en considération par les différents chercheurs afin de quantifier les pertes en sol du fait qu'il est peu visible d'une année à l'autre. On peut le considérer comme une maladie dangereuse qui affecte le corps humain et on ne se rend compte de la maladie qu'à la phase finale de la dégradation du corps.

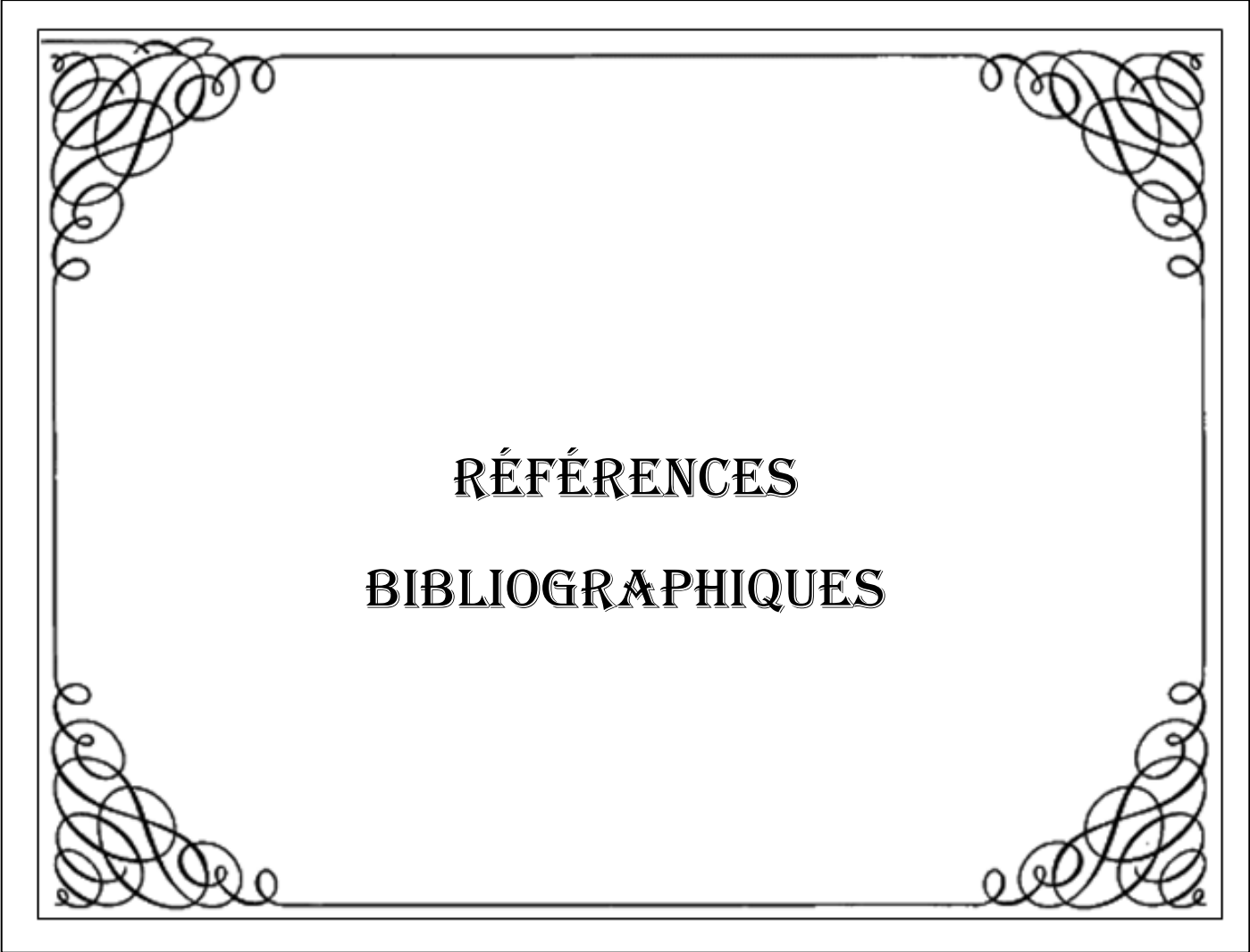
Un certain nombre de perspectives peuvent être envisagées concernant le travail présenté. Après avoir identifié les paramètres érosifs liés au phénomène, il serait intéressant d'étudier également de manière plus précise leurs évolutions de tel sorte à :

- Donner une attention particulière aux données recueillies, et de prévenir pour des futures études une modélisation mécanique ou même physique du phénomène de transport solide.
- Les services concernés doivent prendre conscience de la nécessité des données mesurées et d'avoir le maximum possible de données afin d'élaborer un modèle efficace et très proche de la réalité.
- Le transport solide par charriage doit être faire l'objet d'une étude ultérieure afin de cerner le phénomène et avoir des modèles acceptables en utilisant les différentes

Conclusion général

formules existantes dans le littérature et faire attention aux conditions d'application de chaque formules.

- L'utilisation des autres outils de modélisation afin de les comparer aux résultats trouvés et choisir un modèle adéquat.



RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Référence Bibliographique

- [1]:**Bakker, M. M., Govers, G., Jones, R. A., & Rounsevell, M. D. A. (2007).** The Effect of Soil Erosion on Europe's Crop Yields. *Ecosystems*, 10(7), 1209-1219. doi: 10.1007/s10021-007-9090-3.
- [2]:**Kassoul, M., Abdelgader, A., & Belorgey, M. (1997).** *Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie.* Revue des sciences de l'eau, 10(3), 339. doi: 10.7202/705283.
- [3]:**Milliman, J. D., & Syvitski, J. P. M. (1992).** Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *The Journal of Geology*, 525-544.
- [4]:**Khanchoul, K., & Jansson, M. B. (2008).** Sediment rating curves developed on stage and seasonal means in discharge classes for the Mellah wadi, Algeria. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 90(3), 227-236.
- [5]:**Touaibia .B, 1999.** Approche quantitative de l'érosion hydrique à différentes l'échelles spatiales :bassin versant de l'oued Mina.Journal des sciences hydrologiques,44(6) decembre 1999.
- [6]:**Meguenni et Reminni B .** Evaluation du debit solide dans le bassins versant de HERREZA (Algerie).Larhyss Journal ,ISSN 1112-3680 ,n07,juin 2008,pp.7-19
- [7]:**Milliman, J. D., & Syvitski, J. P. M. (1992).** Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *The Journal of Geology*, 525-544.
- [8]: <http://www.bf.refer.org/toure/pageweb/erohydriy.htm>. (Consulté le 06/04/2021)
- [9]: <https://www.who.int/globalchange/ecosystems/desert/fr/>(Consulté le 06/04/2021)
- [10]:**Arabi, M., & Roose, E. (1989).** Influence de quatre systeme de production en zone méditerranéenne de moyenne montagne en Algérie. *Bulletin Réseau Erosion*, 9, 39-51.
- [11]:**Colombani, J., Olivry, J.-C., & Kallel, R. (1984).**Phénomènes exceptionnels d'érosion et de transport solide en Afrique aride et semi-aride.
- [12]:**Vanmaercke, M., Poesen, J., Broeckx, J., & Nyssen, J. (2014).** Sediment yield in Africa. *Earth-Science Reviews*, 136, 350-368.
- [13]:**Sherbinin A.,2002.** "Land-Use and Land-Cover Change," A CIESIN Thematic Guide, Palisades, NY : Center for International Earth Science Information Network of Colombia University. Retrieved From <http://sedac.ciesin.colombia.edu/tg/guide>.
- [14]:**Bennari A., El Harti A, Haboudane I, Bachaoui M, et EL Ghmari A, 2007,** Intégration des variables spectrales et géomorphologique dans un SIG pour la cartographie des aires exposés à l'érosion. télédétection, Vol .7,N° 1-2-3-4, p 327-342.
- [15]:**FAO,1995.** Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties.(CDROM).FAO Land and Water Digetal Media Series.
- [16]:**Ellison, W.D., 1947.** Soil erosion studies.Agricultural Engineering.V. 28, p. 402-405.
- [17]:**Einstein, H. A., 1950.** The bed load function for sediment transportation in open channels.Washington, U.S. Departement of Agriculture.78p. (Soil Conservation Service.Technical Bulletin 1026).

Référence bibliographique

- [18]:**De Ploey, J., and J. Savat, 1968.**Contribution to the study of splash erosion. *Z. Geomorphology* 12: 174-193.
- [19]:**Souter Marc, André Mermoud et André Musy, 2007.** Ingénierie des eaux et du sol processus et aménagement. La collection « science et technologie de l'environnement » 289p.
- [20]:**Foster, G. R., 1982. Modelling the Erosion Process.**In : **C. T. Haan, H. P. Johnson and D. L. Brakensiek (eds.)**. Hydrologic Modelling of Small Watershed. ASAE Monograph 5, St Joseph, MI, 297-308.
- [21]:**Rose C. W., 1994.** Research Progress on Soil Erosion Processes and a Basis for Soil Conservation Practices.In :R. Lal (ed.). Soil Erosion.Research Methods.Soil and Water Conservation Soc. And St. Lucie Press, 2nd Edition, 159-178.
- [22]:https://library.ensh.dz/images/site_lamine/pdf/these_master/2017/6-0041-17.pdf
(Consulté le 08/04/2021)
- [23]: <https://planet-terre.ens-lyon.fr> (Consulté le 08/04/2021)
- [24]:**Mokhtari Elhadj. (2008-2009) ;**contribution à l'étude du transport solide en suspension Bassin de l'oued Chellif. Ghrib, Th. Magister, Université Mentouri-Constantine. 37 P.
- [25]:**Demmak, A., 1982.** Contribution à l'étude des écoulements solides des cours d'eau d'Algérie, Inst Nat des Ressources Hydrauliques.
- [26]:**Heusch, B., 1970.**L'érosion du Pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré-Rif occidental ; Thèse et annales de la station de Recherches Forestière de Rabat; Tome 12, 176 p.
- [27]:**Chebbani, R., Djilli, k. et Roose, E., 1999.** Etude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser. Bull. Réseau – Erosion n°17, Ed. IRD (ex. Orstom), Montpellier, 85- 95.
- [28]:**Roose E., 1994 -** Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bull. Pédol. FAD, 70, 420 p.
- [29]:**Tixeront, J. (1960).**Débit solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie. In: Assemblée Générale d'Helsinki 25 juillet-6 août, 26-41. IAHS Publ. no. 53.
- [30]:**M.Henri PELLERAY,** Etude sommaire des transports solides dans un petit bassin du nord — cameron, Service Hydrolqgique de l'ORSTOM au Cameroun.
- [31]:**Benaicha .A,** Etude des processus des transports solide et leur impact sur l'alluvionnement des barrages, Mémoire de Magister en Hydraulique, Option : Simulation Numérique Des Ecoulements Polyphasiques, université de Batna.
- [32]:**Musy A,Higy C. (2004),**« Hydrologie une science de la nature », EPFL-La suisse p324.
- [33]: <http://didac.free.fr> . (Consulté : 16/04/2021)
- [34]:**Bouguerra. S., (2014).**Etude de La Qualité des eaux de transport solide dans l'Oued Rhumel, UniversitéLarbi Ben M'hidi OUM BOUAGHI, Page 21.
- [35]:**Belhadj N, Bouabdallah M, 2020.**Essai de Modélisation de Transport Solide sur Les Bassins Versants de Haut Cheliff , Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana, Page 14.
- [36]: <http://theses.univ-lyon2.fr> (consulté le 16/04/2021)
- [37]:**Jean P.G.(1993, Juin).** La mesure in situ du debit solide des cours d'eau. ORSRROM sérvise hydrologique.
- [38]:**Recking 2012, A. (s.d.).**Cours d'hydraulique et de transport solide. Master II Paris 6.
- [39]: <http://theses.univ-lyon2.fr> (consulté le 16/04/2021)

Référence bibliographique

- [40]:**Belhadj N, Bouabdallah M, 2020.**Essai de Modélisation de Transport Solide sur Les Bassins Versants de Haut Cheliff , Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana, Page 15.
- [41]:www.geolsed.ulg.ac.be (consulté le 16/04/2021).
- [42]:**Khanchoul, K., & Jansson, M. B. (2008).** Sediment rating curves developed on stage and seasonal means in discharge classes for the Mellah wadi, Algeria. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 90(3), 227-233.
- [43]:**Khanchoul, K., & Jansson, M. B. (2008).** Sediment rating curves developed on stage and seasonal means in discharge classes for the Mellah wadi, Algeria. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 90(3), 233-236.
- [44]:**Wischmeier W. H., Smith D. D., 1978** - Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. US Department of Agriculture, agricultural handbook n° 537, Science and Education Administration USDA, Washington DC.58 p.
- [45]:**Magali Jodeau (2004).** Etude expérimentale des mécanismes de transport solide par charriage torrentiel.
- [46]:**Mohamed Achite- Mohamed Meddi(2004).** Estimation du transport solide dans le bassin-versant de l'oued Haddad(Nord-Ouest algérien). *Sécheresse (Montrouge)*, issn : 1147-7806, 2004, vol. 15, n°. 4, p. 367-373, nombre de pages : 7.
- [47]:**ANRH 1970**, Etude de Transport Solide dans le Nord Algerie. Rapport de L'agence Nationale des Ressources Hydriques. Alger.
- [48]:**Sogreah 1969.** Etude général des aires d'irrigation et d'assainissement agricole en Algérie . Dossier. Alger : ministère de l'agriculture et de la réforme agraire.
- [49]:**Fournier F., 1960.** Climat et érosion. Presses universitaire de France, Paris, France.
- [50]:**Walter H.Graf-M.S.Altinakar(2000).**Hydraulique fluviale : écoulement et phénomène de transport solide dans les canaux à géométrie simple.
- [51]:**Cheniti Naoual(2003).** Contribution à la contification du transport solide au droit de deux stations hydrométriques.
- [52]:**Tourki M,(2010).** Etude de l'érosion et du transport solide dans le bassin versant de l'Oued el Kebir Est Nord –Est Algérien, université Badji Mokhtar, Page 78-79.
- [53]:**Souhila Benkaci , Dehbia Abir , Aziz Oumellal et Boualem Remini (2018).** Modélisation de l'érosion du bassin haut et moyen Cheliff par l'application Model builder sur ArcGis. *Journal of materials and engineering structures* 5 (2018) 81–93.
- [54]:**Bouzada Nacera, 2013.**caractérisation géochimique des eaux souterraines utilisée dans l'irrigation dans les plaines du Cheliff. Thèse de magister, université de Hassiba Ben Bouali Cheliff.
- [55]:**Perrodon, A, 1597.** « Étude géologique des bassins néogènes sub-littoraux de l'Algérie occidentales » Publication, service carte géologique de l'Algérie, bulletin numéro 12.
- [56]:**Chekhchoukh F, khadraoui A, 2016.** Contribution de quantification de transport solide par l'approche de régression (cas de bassin du haut et moyen Cheliff), université de Djilali Bounaama khemis Miliana.
- [57]:**Abir D, Oumellal A 2015.** Cartographie des rrisques d'érosion et évaluation de transport solide de bassin versant haut et moyen Cheliff, université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, page 75.

Référence bibliographique

- [58]:El Mahi, A., Meddi, M., et Bravard, J.-P., 2012. Analyse du transport solide en suspension dans le bassin versant de l'Oued El Hammam (Algérie du Nord). *Hydrological Sciences Journal*, 57 (8), 1–20.
- [58]:Achite, M. et Meddi, M., 2005. Variabilité spatio-temporelle des apports liquides et solides en zone semi-aride. Cas du bassin versant de l'Oued Mina (Nord-Ouest algérien). *Revue des Sciences de l'Eau*, 18 (n° spécial), 37–56.
- [58]:Ben Khaled, A. et Remini, B., 2003. Analyse de la relation de puissance: débit solide–débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'oued Wahran (Algérie). *Revue des Sciences de l'Eau*, 16 (3).
- [58]:Bouanani, A., 2004. Hydrologie, transport solide et modélisation, étude de quelques sous-bassins de la Tafna (NO-Algérie). Thèse de doctorat d'état, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- [58]:Meybeck, M., 1984. Les fleuves et les cycles géochimiques des éléments. Thèse Sciences, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France.
- [58]:Muller, G. et Forstner, V., 1968. General relationship between suspended sediment concentration and water discharge in the Alpenhein and some other rivers. *Nature*, 217, 244–250.
- [58]:Walling, D.E. et Webb, B., 1981. The reliability of suspended sediment load data. In: *Erosion and sediment transport measurement*. Wallingford, UK: IAHS Press, IAHS Publ. 133, 177–194.
- [58]:Walling, D.E. et Webb, B.W., 1982. Sediment availability and the prediction of storm period sediment yields. In: D.E. Walling, ed., *Recent developments in the explanations and prediction of erosion and sediment yield*. Wallingford, UK: IAHS Press, IAHS Publ. 137, 327–337.
- [58]:Wood, P.A., 1977. Controls of variation in suspended sediment concentration in the River Rother, West Sussex, England. *Sedimentology*, 24, 437–445.
- [58]:Bouguerra, S. A., Bouanani, A. & Baba-Hamed, K., 2016. Transport solide dans un cours d'eau en climat semi-aride : cas du bassin versant de l'Oued Boumessaoud (nord-ouest de l'Algérie). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 29(3), 179–195.
- [59]: Mano, V., 2008. Processus conditionnant les apports de sédiments fins dans les retenues—optimisation des méthodes de mesure et modélisation statistique. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble 1, France.
- [60]:EL AMINE CHERIF, MOHAMED ERRIH & HAYET MADANI CHERIF, 2009. Modélisation statistique du transport solide du bassin versant de l'Oued Mekerra (Algérie) en zone semi-aride méditerranéenne, *Hydrological Sciences Journal*, 54:2, 338-348.
- [61]:Rose, C.W., J.-Y. Parlange, I.G. Lisle, W.L. Hogarth, P.B. Hairsine, G.C. Sander. 1998. Unsteady Soil Erosion Due to Rainfall Impact and Sediment Transport. *Hydrology Days*. AGU pub.18:245-258
- [62]:Belhadj N, Bouabdallah M, 2020. Essai de modélisation du transport solide sur Les bassins versants du Haut Chelif, Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana, page
- [63]:<http://josich.over-blog.com/article-19490539.html> (Consulté le 06/07/2021) .
- [64]:Xavier ANTOINE , Pierre DREYFUSS et Yannick PRIVAT, " Introduction `a l'optimisation : aspects théoriques, numériques et algorithmes", Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique,

Référence bibliographique

Ecole Nationale Supérieure des Mines de Nancy, Département de Génie Industriel, et Institut Elie Cartan Nancy (IECN), Université Henri Poincaré Nancy 1, B.P. 239, F-54506 Vandoeuvre-lès-Nancy, France, (2006-2007).

[65]: **GEORGES KOEFLER**, "Optimisation et algorithmique", UFR DE MATHÉMATIQUES ET INFORMATIQUE, MASTER 1 MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES, <http://www.math-info.univ-paris5.fr/~gk/OptiAlgo/OptiAlgo.pdf>, 2014-2016.

[66]: **Pr.M.Laghrouche.2016**. Essai de Implémentation d'un réseau de neurones dans un microcontrôleur . University MOULOUD MAMMERI TIAI OUAOU, page 02.

[67]: **DONALD HEBB**, The Organization of Behavior. Wiley, New York, 1949.

[68]: **MARVIN MINSKY, SEYMOUR PAPERT**, Perceptrons, An Introduction to Computational Geometry M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1969.

[69]: **J.J. HOPFIELD**, "Neural Networks and physics Systems with emergent collective Computational Abilities.

[70]: **Le Cun, Y. (1985)**. A learning scheme for asymmetric threshold networks. In Proceedings of Cognitzva 85, pages 599-604, Paris, France.

[71]: **Parker, D B. (1985)**. Learning-logic. Technical report, TR-47, Sloan School of Management, MIT, Cambridge, Mass.

[72]: **Werbos, E (1975)**. Beyond regression: New tools for prediction and analysis in behavioral sciences. (Doctoral thesis and published report). Cambridge, MA: Harvard University.

[73]: **Rumelhart, D.E., Hinton, G.E., Williams, R.J. (1986)**. Learning representations by back propagating errors, Nature, Vol 323, 533-534.

[74]: <https://www.lebigdata.fr/reseau-de-neurones-artificiels-definition> (Consulté le 06/09/2021)

[75]: **Anand, Mehrotra, Mohan et Ranka**, «Intelligent Control Using Neural Networks», IEEE Control System mag; Avril, pp 11-18, 1992.

[76]: **R.L. Watrous**, « Learning Algorithms for Connectionist Networks: Applied Gradient Methods of Nonlinear Optimization», IEEE First International Conference on Neural Networks, 2, pp 619-627, 1987.

[77]: **P.E. KELLER**, Commercial applications of artificial neural networks.

[78]: **Mc Culloch W.S et Pitts W.**, A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity .Bulletin of Math Biophysics, vol.5, pp.115-133(1943).

[79]: **I. RIVALS**, "Les réseaux de neurones formels pour le pilotage de robots mobiles,"

[80]: **E. DAVALDO, P. NAÏM**, Des Réseaux de Neurones. Préface de F. M. CLEMENT, deuxième édition, deuxième tirage, Edition EYROLLES 1993.

[81]: **E. DAVALDO, P. NAÏM**, Des Réseaux de Neurones. Préface de F. M. CLEMENT, Edition EYROLLES. Deuxième édition, deuxième tirage 1993.

[82]: **A.KHEDIM** : « Mesure et caractéristique Thermodynamique d'une nouveau Système solaire de Dessalement de l'Eau de Mer avec Récupérateur de Chaleur » Rev.Energ.Ren : 11èmes journées Internationales de thermique 2003.

[83]: **Minsky, Marvin and Papert, Seymour**. Perceptrons: Aft Introduction to Computational Geometry. Cambridge, Mass.: M.I.T. Press, 1969.

Référence bibliographique

- [84]:**Rumelhart, D.E. (1986).** Learning sensorimotor programs in parallel distributed processing systems. Paper presented at US-Japan Joint Seminar on Competition and Cooperation in Neural Nets, II, Los Angeles, CA.
- [85]:**Benkaci T.(2006).**modélisation des débits mensuels par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous, vol.19,no3,p.247-257.
- [86]:**K. FRAMLING,** Les réseaux de neurones comme outils d'aide à la décision floue, Rapport de DEA, INSA de Lyon, Juillet 1992.
- [87]:<https://moncoachdata.com/blog/comprendre-les-reseaux-de-neurones/>. (Consulté le 16/09/2021)
- [88]:<https://www.juripredis.com/fr/blog/id-19-demystifier-le-machine-learning-partie-2-les-reseaux-de-neurones-artificiels>. (Consulté le 16/09/2021)
- [89]:**Cybenko, G. (1989).** Approximation by superpositions of a sigmoidal function,Mathematics.
- [90]:**Hornik, K., M. Stinchcombe et H. White (1989).** Multilayer feedforward networks are universal approximators. Neural Networks 2(5), 359–366.
- [91]:**Sastry, P.S., G. Santharam et K.P. Unnikrishnan (1994).** Memory neuron networks for identification and control of dynamical systems. IEEE Transactions on Neural Networks (2), 306–319.
- [92]:**Nerrand, O., Roussel-Ragot, P., Personnaz, L. and Dreyfus, G. (1993).** Neural networks and non-linear adaptive filtering: unifying concepts and new algorithms. Neural Computing 5, 165—199.
- [93]:**Hui, S., & Zak, S. H. (1994).** The Widrow-Hoff algorithm for McCulloch-Pitts type neurons. IEEE Transactions on Neural Networks, 5(6).
- [94]:**Dumolard P., (1994).** Les réseaux de neurones [compte-rendu] **Jodoin J.-F. (1994).** Les Réseaux de neurones. Principes et définitions. Paris : Hermès. - (1994). Réseaux neuromimétiques. Modèles et applications. Paris. 23-3 pp. 287-288.
- [95]:**Demuth, H., & Beale, M. (2002).** Neural Network Toolbox User's Guide - Version 4. Natick: The MathWorks.
- [96]:**Hagan, M.T., H.B. Demuth, and M.H. Beale,** Neural Network Design, Boston, MA: PWS Publishing, 1996.
- [97]:**Foresee, F.D. and Hagan, M.T. (1997).** Gauss-Newton Approximation to Bayesian Regularization. Proceedings of the 1997 International Joint Conference on Neural Networks, pp. 1930-1935.
- [98]:**MacKay, D.J.C. (1992).** A Practical Bayesian Framework for Backpropagation Networks. Neural Computation, Vol. 4(3), pp. 448-472.
- [99]:**Xinxing Pan, Lee, B., & Chunrong Zhang. (2013).** A comparison of neural network backpropagation algorithms for electricity load forecasting. 2013 IEEE International Workshop on Intelligent Energy Systems (IWIES).
- [100]:**Yue, Z., Songzheng, Z., Tianshi, L. (2011).** "Bayesian regularization BP Neural Network model for predicting oil-gas drilling cost," Business Management and Electronic.
- [101]:**Li, H., & Shi, Y. (2012).** Robust H_∞ filtering for nonlinear stochastic systems with uncertainties and random delays modeled by Markov chains. Automatica, 48(1), 159–166.