

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Ecole Nationale Polytechniques

Département Hydraulique

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master
en hydraulique



ANALYSE SPECTRALE DE TRANSPORT SOLIDE PAR
SUSPENSION DANS LE BASSIN VERSANT DE BENI AMRAN



Proposé par : Mr. LEFKIR. A

Encadré par : Mr. LEFKIR.A

Réalisé par : GUESMIA Khadidja

PROMOTION JUIN 2015
ENP 10, Avenue HASSEN BADI el Harrach Alger. Algérie

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mes chers parents

A qui je dois ce que je suis

A ceux qui m'ont tout donné sans rien en retour

Qu'ils trouvent dans ce site, le fruit de leurs sacrifices consentis pour mon éducation, et l'expression de mon amour et de ma gratitude pour la bienveillance avec laquelle ils m'ont toujours entouré.

Que dieu leur préserve longue vie et bonne santé

A ceux qui m'ont encouragé et soutenu dans mes moments difficiles

A mes adorables sœurs

A mes très chers frères

A mes nièces et neveux

A toute ma famille

A tous mes amis ainsi qu'à tous ceux qui me sont chers

*Que ce travail soit le témoignage sincère et affectueux
De ma profonde reconnaissance pour tout ce que vous avez
Fait pour moi.*

Khadija

Remerciement

*Avant toute personne, Je remercie **le bon Dieu** de m'avoir prêté vie, santé et volonté pour achever ce travail.*

*J'exprime ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon promoteur **Mr. Abdelouahab LEFKIR**, qui a dirigé les travaux de ce mémoire. Pour son soutien, sa patience, sa gentillesse, la confiance qu'il m'a témoigné et pour toute l'aide matérielle et morale qu'il a mis à ma disposition tout le long de mon travail, que celui-ci soit à la hauteur de ses attentes.*

*Je remercie très chaleureusement et j'exprime toutes mes reconnaissances à Monsieur **A.BERMAD**, le chef de département de l'hydraulique pour sa constante disponibilité et pour ses judicieux conseils.*

Les membres du jury, qui ont bien voulu évaluer mon travail et de me consacrer leurs précieux temps, trouveront ici mes remerciements les plus sincères.

Mes gratitudes vont aussi à tous mes enseignants et enseignantes, pendant tous mon cursus d'études, pour leur disponibilité et leurs sacrifices et pour tout le savoir qu'ils m'ont fidèlement transmis.

Enfin, mes sincères remerciements s'adressent à tous ceux qui m'apporté leur aide de près ou de loin, que ce soit par leur amitié, leurs conseils ou leur soutien moral pour mener à bien ce travail.

ملخص

الاحتياجات المائية، تتزايد باستمرار، مما يتطلب تسخير المياه السطحية من خلال بناء السدود، لكن سعة هاته الأخيرة مهددة باستمرار بفعل ظاهرة الرواسب. تطوير الأدوات والوسائل التي تسمح لنا بتقدير وتنبؤ كميات هاته الرواسب أصبح أمرا حتميا ولا بد منه، مما يؤدي إلى فهم ومحاكاة نقل وتموضع الرواسب في النظام (سد-وادي). المناهج المختلفة المعتمدة حتى الآن تنحصر في التحليل على نطاق سنوي، شهري أو حتى يومي. وقد تبين أن ظاهرة نقل الرواسب يتمخض أثناء الحدث الهيدرولوجي؛ وبالتالي التعمق والدراسة على نطاق الحدث يعتبر مهم جدا لأخذ تعقيد هاته الظاهرة بعين الاعتبار

تتمثل هذه الدراسة في إجراء تحليل طيفي لظاهرة نقل الرواسب على نطاق الحدث في مستجمعات المياه ببني عمران

بعد القيام بعملية الاستيفاء لمعطيات المحطة الهيدرومترية والتي تهدف الى تجانس فوارق الزمن بين المعطيات، تم تطبيق منهجية "معالجة الإشارات" مع التحليل في مجال التردد بهدف تحديد دالة التحويل المناسبة بين منحني الفيضانات ومنحني الرواسب الموافق له.

الكلمات المفتاحية: مستجمعات المياه، سد بني عمران، نقل الرواسب، تحليل طيفي، استيفاء، معالجة الإشارات.

Résumé

Les besoins en eau, en croissance perpétuelle, nécessitent la mobilisation des eaux de surface par la construction de barrages dont la capacité se voit menacée par les dépôts de sédiments. Un développement d'outils d'aide à la quantification et la prédiction de ces dépôts est indispensable, se traduisant par la compréhension et la modélisation du transport-déposition des sédiments dans le système barrage-cours d'eau.

Les différentes approches adoptées à ce jour se limitent à une analyse à une échelle annuelle, mensuelle voir même journalière. Il a été constaté que le phénomène de transport solide se manifeste suite à un événement hydrologique ; de ce fait, un approfondissement vers une échelle événementielle est nécessaire afin de tenir compte de toute la complexité du phénomène.

La présente étude consiste à faire une analyse spectrale à une échelle événementielle du phénomène de transport solide par suspension au niveau du bassin versant de Beni Amran. Après interpolation numérique des données de la station hydrométrique visant à homogénéiser les pas du temps, un traitement de signal par une analyse dans le domaine fréquentiel a été effectué afin de déceler la fonction de transfert appropriée entre l'hydrogramme de crue et sédimentogramme correspondant.

Mots clés : Bassin versant, barrage de Beni Amrane, transport solide, érosion, suspension, analyse spectrale, interpolation, traitement de signal.

Summary

Water requirements, constantly growing, require the mobilization of surface water by building dams whose capacity is threatened by sediment deposits. Development of tools for the quantification and prediction of these deposits is necessary, resulting in the understanding and modeling of the transport - deposition of sediment in the dam - river system.

The different approaches adopted to date are limited to an annual scale analysis, monthly or even daily one. It was found that the solid transport phenomenon occurs due to a hydrologic event; thereby deepening to an event- level is needed to take account of the phenomenon complexity.

The present study consist to make a spectral analysis to an event scale of the of sediment transport by suspension phenomenon at the Beni Amran watershed. After interpolation of the hydrometric station data in order to homogenize the time frame, a signal processing with an analysis in the frequency domain was effected in order to identify the appropriate transfer function between the flood hydrogramme and corresponding sédimentogramme.

Keywords: Watershed, dam Beni Amrane, sediment transport, erosion, suspension, spectral analysis, signal processing.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités	
I.1. Origine et mécanismes	3
I.2. Facteurs qui rentrent en jeu	4
I.3. Conséquences.....	5
I.4. Problème du transport solide en Algérie.....	5
Chapitre II : Etat de l'art	
II.1. Introduction.....	7
II.2. Typologie des modèles de quantification du transport solide.....	7
II.3. Modèles d'estimation de la charge sédimentaire.....	8
II.3.1. Etude sur un seul bassin versant	8
II.3.2. Etude sur plusieurs bassins versants.	9
II.4. Modèles d'estimation du taux d'abrasion.....	12
II.5. Approche retenue pour notre étude.....	13
Chapitre III : Traitement de signal	
III.1. Introduction	14
III.2. Interpolation numérique	14
III.3. Traitement de signal	15
III.3.1. Analyse dans le domaine temporel : Fonctions de corrélation	16
III.3.2. Analyse dans le domaine fréquentiel : Analyse spectrale	17
III.3.3. Les filtres.....	17
III.3.3.1. Les filtres idéaux.....	17
III.3.3.2. Les filtres réels.....	18
III.3.3.3. Les filtres adaptatifs.....	18
III.3.4. Filtre de Kalman	19
Chapitre IV : Application	
VI.1. Description de la zone d'étude.....	21
VI.1.1. Présentation du bassin versant de l'ISSER	21
VI.1.2. Caractéristiques climatologiques.....	21
VI.1.3. Hydrologie	22
VI.1.4. Le Barrage de BENI AMRAN	23
VI.2. Données	23
VI.3. Construction des signaux	25
VI.4. Analyse systématique du problème de transport en MES.....	28
VI.5 Conclusion	31
Références bibliographiques	

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Equation de SOGREAH selon la perméabilité du socle.	10
Tableau VI.1 : Caractéristiques hydrologiques du bassin versant.	22
Tableau VI.2 : Tableau comparatif du volume à l'ancienne cote	23

Liste des figures

Figure I.1 : Modes de transport solide	4
Figure III.1 : Exemple d'interpolation linéaire et cubique	16
Figure III.2 : Filtrage idéal d'une composante fréquentielle	18
Figure III.3 : Les quatre catégories de filtres idéaux	19
Figure VI.1 : Situation géographique du Bassin versant de l'Isser	21
Figure VI.2 : Distribution mensuelles des paramètres climatologiques	22
Figure VI.3 : Réseau hydrographique de l'Isser	22
Figure VI.4 : Couvert végétal de l'Isser	23
Figure VI.5 : Variation des caractéristiques statistiques du débit liquide dans le temps.	24
Figure VI.6 : Variation des caractéristiques statistiques des concentrations solide dans le temps.	24
Figure VI.7 : représentation graphiques des signaux bruts (A) et continus (B) des inputs et des outputs pour quelques évènements hydrologiques.	26
Figure VI.8 : Signal continu des débits liquides et concentrations en MES depuis 1971 jusqu'à 1991 "station de Lakhdaria "	27
Figure VI.9 : représentation graphique des DSP des inputs et des outputs pour quelques évènements hydrologique	29
Figure VI.10 : Démarche suivi pour l'analyse de notre système	29
Figure VI.11 : Graphe de corrélation des DSPO et DSPI pour différents types de régression	30



Introduction Général



Introduction générale

L'importance de l'eau en tant que support de vie et de facteur régulateur du développement d'un pays est universellement reconnue. En effet, la santé individuelle et collective en dépend, l'agriculture, l'industrie et la vie domestique y sont liées.

L'Algérie qui compte plus de 40 millions d'habitants, et qui se trouve dans une région semi-aride, souffre actuellement plus que jamais du problème d'insuffisance des ressources en eau.

Elle occupe actuellement le quatorzième rang mondial parmi les pays qui souffrent de manque d'eau, et s'il n'y aura pas de démarches réelles et efficaces, elle sautera à la sixième place d'ici l'an 2025 (Prof. KETTAB Ahmed. Cours de GIR 2013-2014).

Ainsi, l'utilisation de toutes les potentialités s'avère nécessaire et la moindre ressource hydrique doit faire l'objet d'une étude approfondie pour l'exploiter à fond et la gérer aussi rigoureusement que possible.

L'existence des petits oueds traversant plusieurs régions du pays a permis à l'Algérie de se pencher vers la construction de barrages pour stocker l'eau à des fins d'alimentation en eau potable ou l'irrigation et même pour des besoins industriels. Néanmoins, les réserves de stockage de ces barrages sont exposées à une perte de capacité qui ne cesse de croître au fil de ces derniers temps, suite au phénomène d'envasement.

L'envasement des retenues est le résultat de la sédimentation de particules arrachées des parties amont et transportées par les cours d'eau, au niveau de la cuvette du barrage.

L'agressivité du climat, l'alternance des périodes sèches et humides, la fragilité des formations géologiques et l'absence du couvert végétale suffisant, sont tous des facteurs qui expliquent les fortes concentrations en sédiments dans les cours d'eau algériens et le taux de l'érosion spécifique qui est à titre d'exemple de l'ordre de 2300 T/an/km² pour l'oued Isser à Lakhdaria (à 100 km au sud d'Alger). L'envasement des barrages est malheureusement le résultat de ce taux spectaculaire ainsi, durant la période 1940-1980, la capacité des retenues algériennes a chuté de 52% (Mr HASBAIA Mahmoud. Thèse de Doctorat : Etude critique du transport solide et ses conséquences sur les cours d'eau naturels).

L'envasement présente aussi un grand risque pour la stabilité de l'ouvrage par l'effet qui peut être provoqué par la poussée de la vase et le non fonctionnement de quelques organes annexes aux barrages telle que la vidange de fond.

Devant l'importance que revêt ce problème et dans le but de prolonger la durée de vie des ouvrages de stockage d'eau et garantir une meilleure exploitation, Il devient donc indispensable de développer des outils et des modèles qui permettent la compréhension du phénomène de transport solide, la quantification des matières transportées et la prévention de l'évolution de tel processus complexe au niveau d'un cours d'eau.

C'est dans ce sens, que s'inscrit ce mémoire qui consiste à étudier le transport solide en suspension dans le bassin versant de l'oued ISSER pour une meilleure prise en charge du problème d'envasement du barrage de Beni Amran.

L'objectif principal est d'établir une relation traduisant les variations de l'une des caractéristiques fréquentielles des concentrations en MES en fonction de celles caractérisant les débits liquides pendant un événement hydrologique à partir des débits liquides et les concentrations de matières en suspension observés en amont du barrage de Beni Amrane très touchés par le problème d'engrèvement.

Pour aboutir à cet objectif, nous avons adopté la démarche suivante :

Le premier chapitre, est consacré à la description du phénomène d'érosion, les mécanismes de transport solide et ces conséquences sur l'environnement ;

Au deuxième chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les différents modèles développés et les différentes approches adoptées pour l'établissement de ces derniers ;

La troisième partie développe quelques outils de calcul numérique et de traitement de signal utilisé au cours de cette étude ;

Le quatrième et le dernier chapitre expose l'application de ces outils sur les données du bassin versant de Beni Amran et les résultats obtenus après une présentation sommaire de la zone d'étude.



Chapitre I

Généralités



I.1. Origine et mécanisme :

L'érosion est un phénomène complexe, qui menace particulièrement les potentialités en eau et en sol. Elle se définit comme le détachement et le transport de particules de sol de son emplacement d'origine par différents agents vers un lieu de dépôt.

Il est à signaler que les agents considérés comme les plus efficaces sont la pluie et le ruissellement superficiel et sont à l'origine du détachement, du transport et du dépôt des particules du sol arrachées. Bien qu'une certaine érosion se produise graduellement, le phénomène est surtout imputable à des événements météorologiques extrêmes (une forte pluie,....).

Les matériaux enlevés peuvent se redéposer un peu plus loin sans grandes conséquences apparentes pour l'environnement. Cependant, dans certains endroits, ces matériaux sont transportés jusqu'aux cours d'eau et aux lacs et même jusqu'aux océans, dont les eaux se dégradent considérablement.

Un cours d'eau ou un réseau de drainage transporte les sédiments provenant du ruissellement de surface des parties amont, c'est-à-dire, les sédiments provenant soit des pentes du bassin versant, des interfluves ou du lit de la rivière et des plaines d'inondation à l'amont, mais aussi les alluvions et les autres matériaux disponibles dans son lit majeur. On peut donc distinguer deux origines (externe et interne) des sédiments transportés dans un cours d'eau ou dans un réseau de drainage.

Il faut savoir qu'il existe 3 types de mécanisme de transport solide :

1. le transport par suspension : les particules restent dans le fluide et ne retombent que rarement au fond, bien qu'elles aient tendance à décanter. La mise en suspension et le fait que les grains ne retombent pas sont liés à la turbulence. Ce n'est que lorsque la composante de la vitesse turbulente est supérieure à sa vitesse de chute que le grain est susceptible d'être emporté par suspension malgré son poids ;

2. le transport par charriage : dans ce cas, les grains se déplacent en glissant ou en roulant, et restent en contact avec le fond. Ce mécanisme est principalement régi par les forces de gravités ;

3. le transport par saltation : les grains se déplacent par petits sauts. Ce n'est ni du charriage car les grains ne restent pas toujours en contact avec le fond, ni de la suspension car les particules retombent rapidement.

Ces 3 types de transport ne concernent pas les mêmes particules ; le charriage concerne plus particulièrement les sables, graviers, galets et blocs, par contre, la suspension concerne les sables, les limons et les argiles.

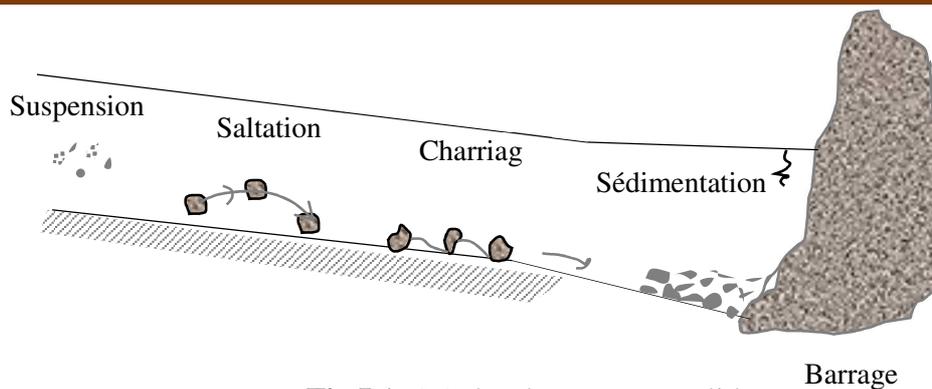


Fig I.1 : Modes de transport solide

Les débits solides et liquides dans les cours d'eau ont pour caractéristique une très grande variabilité naturelle. La variabilité du transport solide est étroitement liée au régime hydrologique et à l'état du bassin. Les variations saisonnières et annuelles des débits peuvent être considérables, en particulier dans les régions arides ou semi-arides.

I.2. Facteurs qui rentrent en jeu : (facteurs aggravant le phénomène)

Dans un bassin fluvial ou bassin versant, l'arrachement des particules sédimentaires de leur emplacement d'origine, leurs déplacements et leur dépôt dépendent de nombreux facteurs aussi bien naturels qu'anthropiques :

↳ Facteurs naturels :

Les facteurs naturels se résument aux caractéristiques de bassin qui peuvent être soit physiques, soit hydrologiques et sont fortement interdépendantes.

Les caractéristiques physiques du bassin versant : le relief, la nature géologique, les sols, la végétation, l'occupation des terres, la morphologie du réseau du drainage.

Les caractéristiques hydrologiques comprennent des facteurs climatiques : précipitations (volume et intensité), température et l'écoulement.

Les perturbations inhabituelles agissent également sur l'érosion et le mouvement des sédiments : tremblements de terre, avalanches, éruptions volcaniques, coulées de lave, orages convectives, glissement de terrain...etc.

↳ Facteurs anthropiques :

Divers sortes d'activités humaines, pratiques agricoles, exploitations forestières, surpâturage, incendies, les défrichements, construction de routes et bâtiments, Un exode rural important..., tendent à modifier les phénomènes d'érosion, en accélérant souvent de façon considérable le rythme en rendant les bassins-versants très vulnérables au ruissellement.

Les ouvrages hydrauliques dans un cours d'eau dérangent aussi les processus naturels d'érosion et ont un effet sur le transport des sédiments ; une retenue par exemple retient les

sédiments et le pouvoir érosif de l'écoulement à l'aval tend à s'accroître par rapport à la situation initiale, des lâchers d'eau d'un barrage peuvent aussi facilement augmenter l'apport des sédiments. [4]

I.3. Conséquences :

L'érosion, le transport solide est un problème grave dont les conséquences ont des répercussions directes tant à l'amont qu'à l'aval, parmi ces conséquences, on cite :

- L'érosion emporte la couche arable du sol, la plus propice au soutien de la vie microbienne et végétale. La disparition de la totalité ou d'une partie de cette couche superficielle diminue le potentiel de production d'un sol en réduisant sa fertilité, sa capacité d'accepter et d'emmagasiner l'eau et l'air ;
- Le transport solide provoque un colmatage superficiel des sols (sols lourds) et augmente le ruissellement aux dépens de l'infiltration [4] ;
- Un ravinement intense et des envasements des infrastructures de mobilisation d'eau (inondations et asphyxies des terres cultivées, envasement de barrages [4] ;
- L'affouillement et le comblement des lits des oueds ;
- Des pertes de vies humaines et matérielles ;
- Le détarage de stations hydrométriques.

I.4. Problème du transport solide en Algérie

L'érosion reste un problème majeur en Algérie dont le principal facteur est le ruissellement et dont la répartition spatiale est contrôlée par celles des précipitations, des caractéristiques géologiques et biophysiques (topographie, couvert, végétal,...).

En Algérie du Nord, particulièrement l'Ouest du pays, les conditions hydroclimatiques sont naturellement réunies pour intensifier et favoriser le déclenchement de ce mécanisme néfaste. En effet, Le climat dans cette zone est caractérisé par des pluies torrentielles, irrégulières aussi bien dans l'espace que dans le temps. Ces pluies sont nettement fréquentes en automne lorsque le couvert végétal est absent et le sol ameubli par les labours, le transport solide atteint donc ces valeurs maximales (Touibia, 2002 ; Achite et al.)

Ajoutons à cela la lithologie de la région qui est principalement formée de plus de 75% des argiles et des limons. Ces deux matériaux sont les plus sensibles à l'arrachement par le ruissellement et leur transport s'effectue facilement, même pour de faibles vitesses de l'écoulement. L'Algérie est alors classée parmi les pays aux sols les plus érodibles du monde.

L'intensité de l'érosion en Algérie du nord varie d'une zone à l'autre. La partie Ouest, où l'érosion touche 47 % de l'ensemble des terres, est la région la plus érodée du pays, viennent

ensuite les régions du Centre (27%) et de l'Est (26%) (Ministère de l'environnement et l'aménagement du territoire, 2000). [9]

En général, l'érosion spécifique varie entre 2000 et 4000 t/km².an (Demmak, 1982), l'Algérie est, de ce fait l'un des pays les plus menacés dans le monde par l'érosion.

Les conséquences de l'érosion en Algérie du Nord sont dramatiques surtout pour les infrastructures hydrauliques, notamment les barrages, qui sont amputées annuellement d'une capacité de 45 millions de m³ suite à l'envasement (Remini, 2004 ; Remini *et al.*, 2009)

Selon les derniers levés bathymétriques effectués par l'Agence Nationale des Barrages en 2003, le taux d'envasement moyen est de **16,33%** pour l'ensemble des barrages en exploitation, soit 12,21% pour les barrages de la région Est, 16,47 et 19,08% pour les barrages de la région centre et ouest du pays.

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

Parmi les autres conséquences qui sont pas moins importants que l'envasement des barrages, nous citons :

- La réduction de la production agricole (pertes en sol agricole) ;
- Une dégradation spécifique dépassant les 5000 t/km²/an [9] ;
- Une quantité de 120 millions de tonnes de sédiments rejeté en mer chaque année par les bassins tributaires de la méditerranée (Demmak, 1982) ;
- Un rehaussement des lits des oueds provoquant par la suite des inondations, menace les voies de communication et les ouvrages d'arts,...



Chapitre II

Etat de l'art



II.1. Introduction :

La recherche de modèles permettant la quantification et la prévision du transport solide a fait l'objet de nombreuses études : Walling D.E. et al. (1981), Demmak A. (1982), Megnounif A. et al. (2000, 2003), Katlan Z. et al. (1987), Probst J.L. et al. (1992), Terfous A. et al. (1999, 2001, 2003), Ghenim A., (2001), Achit M. (2002) Benkaled A. et al. (2003)...etc.

L'objectif de ces auteurs est d'expliquer les phénomènes de l'écoulement et du transport solide et de mettre en évidence des relations susceptibles d'être appliquées à des régions ou des bassins versants où les mesures sont rares ou inexistantes.

Les caractéristiques climatiques, morphométriques et morphologiques diffèrent d'une région à une autre ou d'un bassin à un autre. Aussi, il est admis aujourd'hui que les fluctuations climatiques sont des phénomènes quasi-cycliques (Kayzer N. et al., 1990 ; Tardy Y., 1994). En effet, du siècle écoulé, le climat du monde a changé. La pluviosité sur les continents, le débit des cours d'eau, la température ont augmenté dans plusieurs régions du monde et diminuer dans d'autres (Tardy Y., et al 1992 et 1995). Les caractéristiques morphométriques des bassins changent aussi au cours des années, on sait par exemple que le couvert végétal se développe et se conserve ou non en fonction de la pluviosité.

Tous ces paramètres font que les modèles diffèrent d'un auteur à un autre. Chacun tente de caractériser la région ou le bassin étudié par le modèle le plus représentatif et le plus fiable

Dans ce qui suit, nous allons donner un aperçu sur quelques études menées par différents auteurs et les différentes approches adoptées dans l'établissement de leurs modèles.

II.2. Typologie des modèles de quantification de transport solide :

Pour quantifier et prévoir la quantité des solides transportés dans un cours d'eau, 3 types de modèles mathématiques sont utilisés :

Les modèles empiriques : consistent à mettre une relation entre le flux de sédiments à l'exutoire et les différentes variables explicatives climatiques et biophysiques du bassin qui est considéré comme une entité unique. Ces modèles donnent donc une estimation globale (ex. : modèle de WISCHMEIER et SMITH (1960)) ;

Les modèles conceptuels : ce type de modèle prend en compte les différents mécanismes et processus élémentaires (tels que le détachement de sédiments) et considère le bassin versant comme un ensemble de réservoirs interconnectés (ex. : Modèle de VAN SICKLE et BESCHTA, 1983) ;

Les modèles physiques distribués : qui explorent des lois physiques (telles que l'équation de Saint-Venant) et prend explicitement la variabilité spatiale de l'érosion et des caractéristiques du bassin versant. Cependant, ils nécessitent l'introduction d'un nombre élevé de paramètres.

On distingue deux approches pour l'estimation des apports solides dans un cours d'eau : la première approche vise à prédire la charge sédimentaire à l'exutoire tandis que la seconde estime les taux de production de sédiments à la source.

Les études sur le transport solide peuvent être examinées en travaillant uniquement sur un seul bassin versant pour obtenir des relations spécifiques à celui-ci ou en travaillant dans plusieurs oueds pour ainsi obtenir une équation reliant le transport solide à diverses caractéristiques d'un bassin versant.

II.3. Modèles d'estimation de la charge sédimentaire : [8]

II.3.1. Etudes sur un seul bassin versant :

A l'échelle de l'événement, Demmak (1982), après l'étude de 34 crues dans le bassin de l'oued Allalah, a constaté un faible lien entre les concentrations de sédiments en suspension et les débits et il a estimé que 80% des apports annuels de sédiments étaient associés à des crues supérieures à 30 m³/s.

A l'échelle de la saison, Bourouba (1997), Bourouba (1998) a observé que l'érosion minimale survient de l'hiver au printemps. Alors que, de l'été à l'automne, l'érosion est maximale en raison des pluies torrentielles. Pour un autre bassin versant, Bourouba (1998) a cependant observé que l'hiver et le printemps sont également des périodes de forte.

Pour le bassin versant de l'Oued Mouilah, Terfous et al. (2001) ont constaté que les saisons de forte érosion sont l'automne et le printemps car les sols sont très arables en raison des cycles gel-dégel qui déstabilisent leur structure.

Megnounif et al. (2003) ont également démontré l'effet de la saison sur la charge sédimentaire, et ils ont remarqué que, pour le bassin versant de la Haute-Tafna, le flux de la charge en suspension a été plus important en automne qu'au printemps et ce malgré des crues printanières plus importantes. Les auteurs ont attribué ceci à la plus grande violence des orages qui génèrent alors une charge élevée de sédiments avec un faible apport en eau par rapport à la force érosive limitée de l'eau de fonte de la neige au printemps.

A l'échelle mensuelle, Touaïbia et al. (2001) ont étudié les relations reliant les débits solides Q_s aux débits liquides Q pour deux bassins versants. Ils ont constaté que le modèle de puissance $Q_s = aQ^b$ est le plus performant avec des valeurs des coefficients a et b fluctuant selon le mois et le bassin versant.

Benkhaled et Remini (2003) ont examiné attentivement les fluctuations des paramètres a et b de cette dernière relation à diverses échelles temporelles pour le bassin versant de l'oued Wahrane. Leur étude a démontré qu'entre les saisons le paramètre a est relié à la pluviométrie moyenne et qu'à l'intérieur d'une saison, ce même paramètre est relié à l'état du sol avec les

valeurs les plus faibles lorsque les sols sont saturés. Pour sa part, le coefficient b est relié aux caractéristiques de l'écoulement tel que le débit maximal quel que soit l'échelle temporelle.

II.3.2. Etude sur plusieurs bassins versants :

En incluant des facteurs physiques, l'étude de l'érosion sur plusieurs bassins permet d'élaborer des modèles applicables pour les bassins ne possédant pas de station de mesure.

Dans cette optique, en utilisant les données de 104 bassins versants provenant de différentes régions du globe, Fournier (1960) a développé un modèle global applicable quel que soit la situation géographique du bassin :

$$E = \frac{1}{36} \left(\frac{P_m^2}{P_{an}} \right)^{2,65} \left(\frac{h^2}{S} \right)^{0,46}$$

Avec : E : Apport solide spécifique moyen annuel (t/km²/an) ;

P_m : Pluie mensuelle moyenne du mois le plus pluvieux (mm) ;

P_{an} : Pluie moyenne annuelle (mm) ;

h : Dénivelé moyen (m) ;

S : Superficie du bassin (km²).

▪ Influence de l'emplacement géographique

L'application de la formule de Fournier (1960) sur des bassins versants algériens a donné des résultats médiocres (P.N.U.D. et O.P.E. 1987). Ceci démontre bien l'importance de la prise en compte des conditions propres (physiographie, relief,...) du pays.

En travaillant sur des bassins versants magrébins, Tixeront (1960) a proposé pour l'Algérie un modèle basé sur deux équations reliant les apports solides (A en t/km²/an) à l'écoulement annuel total (R en mm) selon la position géographique :

$$\text{Pour l'est de l'Algérie} \quad A = 92 R^{0,21}$$

$$\text{Pour le centre} : A = 2000$$

Inspirée par l'équation de Tixeront, la firme française SOGREAH (1969) a développé un modèle basé sur cinq équations fonction non pas de l'emplacement géographique mais de la perméabilité ces équations sont données dans le tableau suivant :

Perméabilité	Equation
élevée	$A = 8.5 R^{0.15}$
Moyenne à élevée	$A = 75 R^{0.15}$
Faible à moyenne	$A = 350 R^{0.15}$
Faible	$A = 1400 R^{0.15}$
Imperméable	$A = 3200 R^{0.15}$

Tableau II.1 : Equation de SOGREAH selon la perméabilité du socle.

Toutefois, Abdelali et al. (2003) ont démontré la faible performance de ce type de modèle en comparant les mesures réelles d'apports spécifiques avec ceux obtenues par le modèle de SOGREA pour trois bassins versants dans le Nord-Ouest de l'Algérie. Ils ont démontré que ce dernier modèle sous estimait jusqu'à 34 fois les mesures réelles

▪ Influence de la lithologie

Heusch et Milliès-Lacroix (1971), en étudiant l'influence de la lithologie sur les équations décrivant le transport solide pour une vingtaine de bassins versants maghrébins, ont constaté que les bassins constitués de grès, calcaire et limons possédaient des faibles concentrations de sédiments relativement aux bassins constitués de roches tendres (marne et schiste).

Demmak (1982 et 1984) a également examiné l'aspect de la lithologie en Algérie, il a proposé un modèle statistique pour prédire le transport solide spécifique moyen annuel (TSS) pour des bassins versants variant de 100 à 3000 km².

L'équation est la suivante :

$$TSS = 26,62 IL + 5,07IP + 9,77CT + 593,56 \quad ; \quad IL > 10\% \text{ et } P_{an} > 300mm$$

Avec : *TSS* : Transport solide spécifique moyen annuel ;

IL: Pourcentage de la superficie d'un bassin couverte de formations marneuses et argileuses du Crétacé supérieure et du Tertiaire ;

P_{an}: Pluviométrie moyenne annuelle ;

IP : Indice d'énergie du ruissellement qui est le produit du pourcentage et de la fréquence des précipitations annuels en considérant uniquement les événements supérieurs à 20 mm ;

CT: Coefficient de torrentialité qui est une mesure de l'intensité du chevelu hydrographique.

Le coefficient de torrentialité est le produit de la densité de drainage *D_d* par la fréquence des talwegs d'ordre 1 *F₁* (Husson 1975)

$$CT = D_d \cdot F_1 = \frac{\sum L}{A} \cdot \frac{N_1}{A}$$

Avec: $\sum L$: Longueur totale de tous les talwegs ;

N₁ : Nombre de talwegs d'ordre 1 ;

A : Surface du bassin versant ;

L₁ : Longueur des talwegs d'ordre 1.

Saidi (1991) a lié l'érosion spécifique mesurée à 18 barrages algériens en étudiant uniquement des données hydrologiques et climatiques :

$$E_S = 29,8 M_O^{1,2} C_e^{-0,732}$$

M_O : Module spécifique ; $M_O = \frac{Q_{moy}}{S}$

C_e : Coefficient de ruissellement.

Pour prédire la production moyenne annuelle de sédiments W_{an} en Algérie, Gavrilovic (1992) a appliqué une équation développée en Yougoslavie qui intègre la température moyenne annuelle t° , la pluviométrie moyenne annuelle H_{an} , la superficie du bassin F et un coefficient d'érodabilité Z

$$W_{an} = T H_{an} \pi \sqrt{Z^3 F}$$

Avec : $T = \sqrt{t^0/10} + 0,1$

$$Z = Y X a (\varphi + \sqrt{J_{sr}})$$

Où : Y : Valeur réciproque du coefficient de résistance du sol à l'érosion

X : Coefficient de protection naturelle des sols (végétation)

a : Coefficient de protection anthropique des sols (pratiques antiérosives)

φ : Équivalent numérique des processus d'érosion visibles et distincts

J_{sr} : Pente moyenne du bassin

Toutefois, cette équation nécessite a priori une excellente connaissance du bassin versant car le choix de la valeur du coefficient d'érodabilité (Z) tient compte de l'état actuel d'érosion du bassin versant (φ).

Touaïbia et Achite (2003) ont également étudié statistiquement le lien entre les taux d'érosion spécifique (E_S en t/ha) et près d'une dizaine de facteurs favorisant ou limitant l'érosion pour 16 sous bassins versants du bassin versant de l'Oued Mina. Ils ont trouvé que l'érosion spécifique pouvait être estimée par une simple équation utilisant la superficie du bassin versant (S) et le couvert végétal (%)

$$E_S = 19,36 S^{-0,134} \cdot C_{veg}^{-0,308}$$

Ramdane (1989) et Smati (1996) ont tous les deux souligné le problème d'extrapolation de modèles présentés dans la présente section pour estimer la charge sédimentaires dans d'autres bassins versants dans le but de faire un tri des bassins selon le degré de gravité du problème de transport solide. Cela revient au fait que les bassins étudiés ne sont pas toujours représentatifs de l'ensemble des bassins du pays mais aussi ces modèles ne sont pas adéquates pour des bassins de plus de 100 km² (Smati (1996))

Pour palier à ce problème, Touaïbia et Achitte (2003) proposent de cibler prioritairement les zones à fort taux d'ablation au lieu de considérer l'ensemble d'un bassin comme étant homogène.

II.4. Modèles d'estimation du taux d'abrasion

Le modèle empirique universel (USLE) qui permet d'estimer le taux de perte de sol se présente comme suit :

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

Avec : R : Facteur d'érosivité de la pluie

K : Facteur d'érodabilité du sol

L_S : Facteur topographique intégrant le dénivelé et la longueur du versant

C : Facteur de protection du sol par le couvert végétal

P : Facteur de protection du sol par les pratiques agricoles.

Dans le cadre d'une thèse de doctorat, Arabi (1991) a examiné la relation entre les différents paramètres de l'équation universelle et l'érosion des sols mesurée pour 15 parcelles combinant trois types de sol (vertisol, fersiallitique et brun calcaire) et quatre systèmes de production (agro-pastoral, vigne, arboriculture et sylvo pastoral) et il a tiré les conclusions suivantes :

Facteur	Observation
R	Il a distingué 2 types de pluie : - automnales d'intensité élevée et de faible fréquence - hivernales et printanières moins intenses mais plus fréquentes
K	les vertisols sont les sols les plus résistants
C	l'érosion est faible en milieu cultivé et naturel comparativement aux sols nus

Concernant les facteurs R et L_S Arabi (1991) n'a pas observé de liens significatifs entre l'érosion et ces deux facteurs. Par contre, Brahamia (1993) qui a également travaillé en parcelles a démontré que l'érosion est sensible à l'augmentation de la pente et à la longueur du versant.

Brahamia (1993) et Touaïbia et al. (1999) ont appliqué l'équation universelle sur une partie de leurs parcelles et ils ont jugé que cette équation sous-estime le taux d'abrasion ; les valeurs estimées étaient nettement inférieures à celles mesurées.

Les auteurs attribuent cette différence au fait que d'autre forme d'érosion se présentent en passant à l'échelle du bassin versant, Il est donc important d'étudier l'érosion à grande échelle.

A l'échelle de bassin versant, L'érosion a été cartographiée qualitativement en utilisant des méthodes qui reposent sur la télédétection et le traitement des images satellitaires (Guettouche (1991)) et grâce au développement des systèmes d'information géographiques SIG au cours de la dernière décennie, il est maintenant possible de modéliser quantitativement l'érosion des sols dans les champs à l'échelle des bassins versants.

II.5. Approche retenue pour notre étude

Afin de pouvoir décrire la dynamique du transport solide par suspension dans le bassin versant de Beni Amran, Nous proposons dans la présente étude d'effectuer une analyse systématique du phénomène. C'est-à-dire assimiler le système étudié (le bassin versant) à une "boîte noire" dont on ignore le contenu et en étudier le comportement.

La finalité de cette analyse réside dans la caractérisation du système par sa fonction de transfert, c'est-à-dire décrire le mécanisme qui modifie l'entrée pour la relier à une sortie par une relation de cause à effet. Cette fonction est appelée la réponse impulsionnelle du système.

Etant donné la complexité du phénomène, nous avons jugé plus pratique d'effectuer cette analyse non pas dans le domaine temporel mais dans le domaine fréquentiel.

Les observations montrent que l'essentiel du transport en suspension survient en évènement de crue (Jean-Paul Branvard et François Petit – « Les cours d'eau, dynamique du système fluvial », Armand Colin éditions, 1997), en dehors de ces évènements, les cours d'eau permanents répondent au régime hydraulique d'eau claire.

La mesure des évènements du cours d'eau est donc un moyen de quantifier les phénomènes érosifs survenant à la surface du bassin versant associé

Partant de ce fait, nous avons mené notre étude à l'échelle des évènements hydrologiques.



Chapitre III

Traitement de signal



III.1. Introduction :

Au cours de ce travail, nous avons utilisé des techniques issues du traitement de signal, cette section présentera quelques notions de base sur ces techniques. Mais, avant cela, nous passerons d'abord par un petit rappel sur l'interpolation numérique, cette technique qui a été fondamentale pour la construction et l'homogénéisation des deux signaux de départ.

III.2. Interpolation numérique : [10]

L'interpolation est une opération mathématique permettant de construire une courbe à partir de la donnée d'un nombre fini de points, ou une fonction à partir de la donnée d'un nombre fini de valeurs. La solution du problème d'interpolation passe par les points prescrits, et, suivant le type d'interpolation, il lui est demandé de vérifier des propriétés supplémentaires.

Plus précisément, étant donné $n + 1$ couples (x_i, y_i) , il faut trouver une fonction $\varphi = \varphi(x)$ telle que $\varphi(x_i) = y_i$ pour $i = 0, \dots, m, m \leq n$.

▪ Interpolation polynomiale :

Une première classe de problèmes est de rechercher une fonction φ sous forme d'un polynôme de degré n qui passe par les $n + 1$ points du support d'interpolation. On montre mathématiquement que si ces $n + 1$ sont distincts, alors il existe un polynôme unique.

L'interpolation polynomiale possède deux défauts majeurs inévitables :

- Le coût des calculs devient élevé lorsque le degré du polynôme est grand.
- Les effets de bord sont importants si l'intervalle d'interpolation est grand.

▪ Interpolation locale :

Une seconde classe de problèmes n'est plus de chercher un polynôme unique qui passe par la totalité du support d'interpolation, mais plutôt de chercher une succession de polynômes de degré faible (en général 0, 1, 2 ou 3) qui passent par quelques points du support d'interpolation. C'est l'interpolation par morceaux.

L'interpolation linéaire par morceaux consiste à chercher l'ensemble des polynômes de degré 1 qui passent par deux points successifs du support d'interpolation ; en d'autres termes, on recherche les segments de droites successifs entre 2 points.

L'interpolation parabolique par morceaux consiste à chercher l'ensemble des polynômes de degré 2 qui passent par trois points successifs du support d'interpolation.

L'interpolation cubique par morceaux consiste à chercher l'ensemble des polynômes de degré 3 qui passent par quatre points successifs du support d'interpolation.

Dans Matlab, la fonction **interp1** permet de calculer les valeurs des polynômes d'interpolation par morceaux :

```
1 | >> yq = interp1(x,y,xq,'method')
```

Les coordonnées du support d'interpolation sont fournies dans x et y . On cherche les valeurs des polynômes yq pour différentes valeurs de xq . Le type d'interpolation par morceaux est fourni par l'intermédiaire d'une chaîne de caractères ('method') qui peut soit être égale à :

'Linear', 'spline','cubic'. Les lignes suivantes fournissent un exemple générique :

À partir de cinq points (x_i, y_i) , on cherche une interpolation $\varphi(x)$ entre ces cinq points.

```
1 | xi = [-1 -1/2 0 1/2 1];
2 | yi = [1.5 1 0 1 1/2];
3 | x = -1:0.1:1;
4 | ylinear = interp1 (xi, yi, x);
5 | ycubic = interp1 (xi, yi, x, 'cubic');
6 | plot(xi,yi,'o', x,ylinear,'-', x,ycubic,'--')
7 | legend('Données', 'Interpolation linéaire', 'Interpolation cubique')
```

La figure suivante illustre les interpolations linéaires (en traits pleins) et cubiques (en traits pointillés) obtenues par `interp1` sur ces 5 points (illustrés par des cercles). Notons que l'interpolation cubique ne fonctionne que pour des nombres de points impairs et fournit une interpolation de classe C^1 .

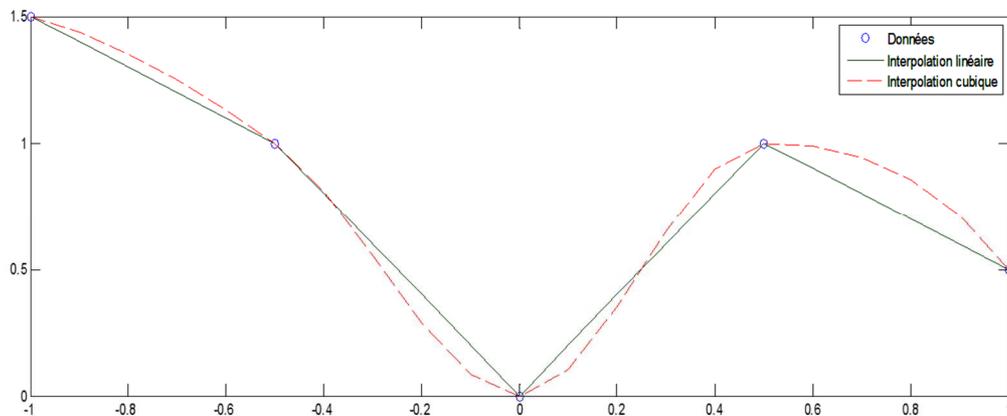


Figure III.1. Exemple d'interpolation linéaire et cubique

III.3. Traitement de signal :[6],[13]

Les phénomènes dynamiques couramment rencontrés en ingénierie sont généralement mesurés sous forme d'amplitude d'une grandeur physique variant en fonction du temps.

Il y a donc deux échelles à considérer :

L'amplitude instantanée du signal peut représenter toute quantité physique : dans notre cas débit et concentration ;

Le Temps : l'axe des temps qui peut être affecté au temps absolu ou au temps relatif.

Pour certains phénomènes physiques, on peut prédire avec une certaine précision l'évolution temporelle des signaux mesurés. On parle alors de *signaux déterministes*

Mais les ingénieurs sont le plus souvent confrontés à des signaux dont rien ne peut être dit *a priori* et dont chaque nouvel enregistrement est différent du précédent. On parle alors de *signaux aléatoires*, C'est le cas de nos signaux

Les applications d'ingénierie qui nous concernent consistent à établir les relations, linéaires ou non, qui existent entre deux ou plusieurs processus aléatoires. Ces relations sont exprimées via les *fonctions de corrélation* ou leur transformée de Fourier qui définit la *densité spectrale* et porte la même information.

La corrélation est issue des statistiques. La densité spectrale a été développée par les ingénieurs pour identifier les corrélations non pas en fonction du temps, mais en fonction de la fréquence.

III.3.1. Analyse dans le domaine temporel : Fonctions de corrélation

Considérons deux processus aléatoires x et y mesurés simultanément.

Les fonctions de corrélation permettent de mesurer la ressemblance et la similitude entre deux processus en fonction du temps. Il s'agit de comparer les échantillons non pas seulement aux mêmes instants mais aussi avec un décalage temporel, nouvelle variable notée τ .

Ceci nous amène à définir deux fonctions qui sont le plus couramment utilisées :

La fonction d'intercorrélation : Elle permet de voir la dépendance (intercorrélation) entre deux chroniques (entrée et sortie) dans le temps :

$$R_{xy}(\tau) = E[x(t)x(t + \tau)]$$

En pratique, si T est le temps de mesure des signaux, l'estimation de $R_{xy}(\tau)$ est donnée par

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau)dt$$

La représentation graphique de cette fonction donne le *corrélogramme croisé*.

La fonction d'autocorrélation : Elle met en évidence la dépendance des événements entre eux : elle traduit, par conséquent, la mémoire du système étudié :

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t + \tau)dt$$

La représentation graphique de cette fonction donne le *corrélogramme simple*.

III.3.2. Analyse dans le domaine fréquentiel : Analyse spectrale

Les ingénieurs ont inventé l'analyse statistique des signaux aléatoires dans le domaine fréquentiel en introduisant les densités spectrales de puissance (DSP). Assez naturellement ils les ont définies comme les transformées de Fourier (TF) des fonctions de corrélation.

Alors que les fonctions de corrélation indiquent les ressemblances des processus en fonction du temps, les densités spectrales les trouvent en fonction de la fréquence. Ainsi, considérant deux processus aléatoires $x(t)$ et $y(t)$, les DSP cherchent à répondre aux questions suivantes :

« Quelles fréquences les processus x et y ont-ils en commun ? » ou encore « A quelles fréquences communes les processus x et y expriment-ils le plus d'énergie »

Il faut savoir cependant que les procédures mises en œuvre pour le calcul des DSP sont fondées sur des algorithmes de transformée de Fourier rapide (*fft* pour fast fourier transform). Elles sont numériquement beaucoup plus rapides que les opérations de corrélation telles que décrites plus haut. C'est pourquoi les systèmes modernes d'analyse des signaux en temps réel évaluent directement les DSP.

III.3.3. Les filtres :

Pour des raisons multiples, l'information utile peut être dissimulée au sein d'un signal complexe. Dès lors que le spectre de l'information est suffisamment isolé vis-à-vis des composantes indésirables, il est possible de l'extraire par filtrage.

D'une manière générale, un filtre est un système linéaire dont le rôle est de modifier la composition spectrale d'un signal sans y ajouter de nouvelles composantes. Il permet le renforcement ou l'atténuation d'une ou plusieurs bandes de fréquences.

III.3.3.1. Les filtres idéaux : [6]

Le cas idéal est un filtrage qui élimine totalement les bandes indésirables sans transition et sans introduire de déphasage dans les bandes conservées. (Figure III.2)

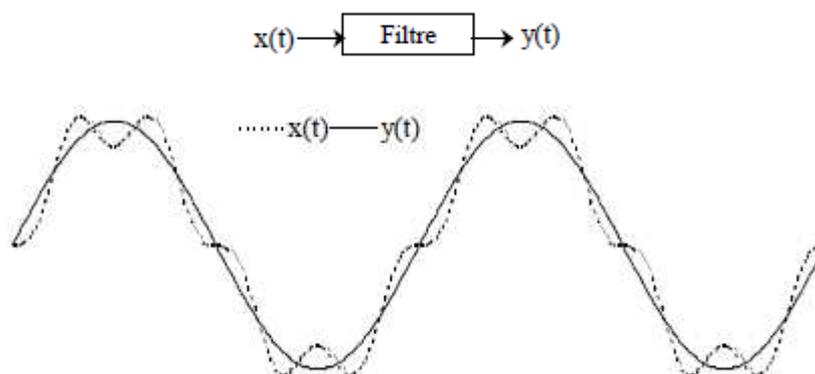


Figure III.2 : Filtrage idéal d'une composante fréquentielle.

Selon la bande rejetée, on rencontre les quatre grandes catégories de filtres décrites en figure III.3 :

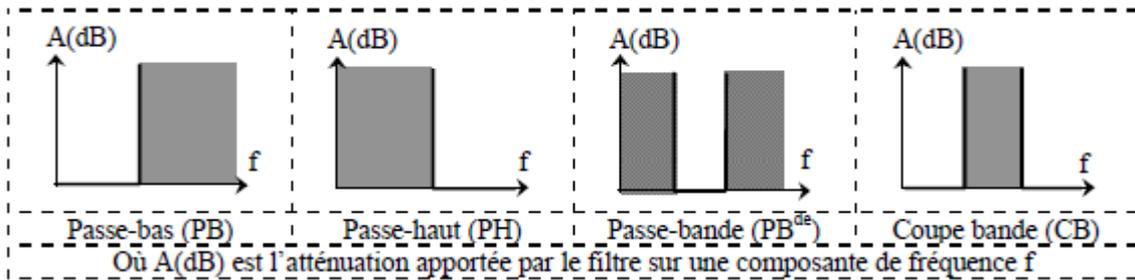


Figure III.3 : Les quatre catégories de filtres idéaux.

III.3.3.2. Les filtres réels :

Les filtres idéaux, très utiles en pratique, sont physiquement irréalisables. On ne peut réaliser physiquement de filtres à coupure raide pour les fréquences situées immédiatement après la bande passante.

De nombreuses relations de filtres réalisables ont été envisagées pour approcher des filtres idéaux : certains sont dits de type *polynomial*, d'autres à pointes d'atténuation infinie. Il s'agit, grâce à une approximation mathématique, de trouver une expression de la fonction de transfert qui se rapproche au mieux de la forme idéale.

III.3.3.3. Les filtres adaptatifs : [10]

De façon générale les filtres adaptatifs sont des systèmes appliqués sur des données bruitées pour obtenir une information utile à un certain instant t , ces systèmes étant mis en œuvre dans trois configurations :

- Le filtrage c'est à dire l'extraction de cette information au temps t à partir des données bruitées mesurées jusqu'au temps t inclus.
- Le lissage qui utilisera aussi les données postérieures au temps t .
- La prédiction qui ne se sert que des données jusqu'au temps $t-\tau$ pour déduire l'information qui nous intéresse au temps t .

L'approche statistique du problème (filtrage de Wiener) suppose la disponibilité de certaines grandeurs statistiques (moyenne et autocorrélation) du signal utile et du bruit. L'approche consiste alors à minimiser la moyenne statistique du carré de l'erreur (EQM ou MSE en anglais) entre l'information désirée et la sortie du filtre.

Ce filtrage de Wiener est inadéquat pour les situations dans lesquelles le signal ou le bruit sont non stationnaires. Dans de telles situations le filtre optimal doit être variable dans le temps. La solution à ce problème est fournie par le filtrage de Kalman.

Par rapport au filtrage classique le filtrage adaptatif comporte une mise à jour récursive des paramètres (coefficients) du filtre. L'algorithme part de conditions initiales prédéterminées et modifie de façon récursive les coefficients du filtre pour s'adapter au processus. Si celui-ci est stationnaire l'algorithme doit converger vers la solution optimale de Wiener, sinon il présentera une capacité à suivre des variations des grandeurs statistiques du processus.

III.3.4. Filtre de Kalman [7]

Le filtre de Kalman est une méthode visant à estimer des paramètres d'un système évoluant dans le temps à partir de mesures bruités.

Pour appliquer un filtre de Kalman, il faut avant tout modéliser le système pour lequel on veut estimer les paramètres, de manière linéaire.

La force de ce filtre est sa capacité de prédiction des paramètres et de rectification des erreurs, non seulement des capteurs, mais aussi du modèle lui-même !

Le filtre de Kalman intègre un terme d'imprécision sur le modèle lui-même, ce qui lui permet de donner des estimations correctes malgré les erreurs de modélisation (pour peu que les erreurs restent raisonnables). Par contre, dans une méthode d'estimation classique (par exemple, la méthode des moindres carrés), une simple erreur dans la modélisation du système entraîne inévitablement une erreur au niveau de l'estimation.

Un autre point fort du filtre de Kalman est sa capacité à déterminer l'erreur moyenne de son estimation. En effet, l'outil Kalman fournit un vecteur contenant les paramètres estimés, mais aussi une matrice de covariance de l'erreur ! Cette matrice nous renseigne donc sur la précision de l'estimation. Un autre atout du filtre de Kalman est que la convergence de cette erreur est garantie !

Considérant le système décrit par les équations d'état suivantes :

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_k + u_k + \alpha_k & : \text{équation d'état} \\ y_k = C_k x_k + \beta_k & : \text{équation d'observation} \end{cases}$$

Où α_k et β_k sont des signaux aléatoires gaussiens indépendants entre eux et blancs dans le temps ($\alpha_k \sim \mathcal{N}(0, \Gamma_{\alpha_k})$ et $\beta_k \sim \mathcal{N}(0, \Gamma_{\beta_k})$). Elles modélisent respectivement les changements aléatoires de l'état du système et le bruit de mesure.

Le filtre de Kalman alterne deux phases : *la correction* et *la prédiction*

Plaçons-nous à l'instant k et supposons que nous ayons déjà traité les mesures y_0, y_1, \dots, y_{k-1}

A ce stade le vecteur d'état, noté $x_{k|k-1}$ est représenté par une estimée $\hat{x}_{k|k-1}$ et une matrice de covariance $\Gamma_{k|k-1}$.

La correction : Récoltant la mesure y_k . Le vecteur représentant l'état est désormais $x_{k|k}$, son estimée et la matrice de covariance associée sont donnés par les équations suivantes :

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \tilde{y}_k \quad (\text{estimée corrigée})$$

$$\Gamma_{k|k} = (I - K_k C_k) \Gamma_{k|k-1} \quad (\text{covariance corrigée})$$

$$\tilde{y}_k = y_k - C_k \hat{x}_{k|k-1} \quad (\text{innovation})$$

$$S_k = C_k \Gamma_{k|k-1} C_k^T + \Gamma_{\beta_k} \quad (\text{covariance de l'innovation})$$

$$K_k = \Gamma_{k|k-1} C_k^T S_k^{-1} \quad (\text{gain de Kalman})$$

La prédiction : Sachant les mesures y_0, y_1, \dots, y_k , le vecteur d'état est désormais $x_{k+1|k}$. Son espérance $\hat{x}_{k+1|k}$ et sa matrice de covariance $\Gamma_{k+1|k}$ se calculent comme suit :

$$\hat{x}_{k+1|k} = A_k \hat{x}_{k|k} + u_k$$

$$\Gamma_{k+1|k} = A_k \Gamma_{k|k} A_k^T + \Gamma_{\alpha_k}$$

Le filtre de Kalman complet est donné par les équations suivantes :

$$\hat{x}_{k+1|k} = A_k \hat{x}_{k|k} + u_k \quad (\text{estimée prédite})$$

$$\Gamma_{k+1|k} = A_k \Gamma_{k|k} A_k^T + \Gamma_{\alpha_k} \quad (\text{covariance prédite})$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \tilde{y}_k \quad (\text{estimée corrigée})$$

$$\Gamma_{k|k} = (I - K_k C_k) \Gamma_{k|k-1} \quad (\text{covariance corrigée})$$

$$\tilde{y}_k = y_k - C_k \hat{x}_{k|k-1} \quad (\text{innovation})$$

$$S_k = C_k \Gamma_{k|k-1} C_k^T + \Gamma_{\beta_k} \quad (\text{covariance de l'innovation})$$

$$K_k = \Gamma_{k|k-1} C_k^T S_k^{-1} \quad (\text{gain de Kalman})$$

Pour pallier au problème de modélisation linéaire du système, un filtre de Kalman étendu a été développé et permet de prendre en compte une modélisation non linéaire. Néanmoins, cette technique a quelques défauts. En premier lieu, la covariance de l'erreur (la précision des estimations) ne converge pas obligatoirement (comme c'était le cas avec une modélisation linéaire). Le second défaut est son coût calculatoire plus important. En effet, de nouvelles matrices coûteuses rentrent en jeu (les matrices des dérivés partielles des équations d'états et de mesures modélisant le système), ce qui peut être une limite à son utilisation, surtout dans des systèmes embarqués très restreint au niveau de la puissance de calcul.



Chapitre IV

Application



VI.1. Description de la zone d'étude : [11]

VI.1.1. Présentation du bassin versant de l'ISSER :

Le bassin versant de l'oued Isser se situe au nord de l'Algérie à environ 70 Km au Sud Est d'Alger. Il draine une superficie de 4 170 km², et se situe entre les latitudes 35°90' et 36°85' Nord et les longitudes 2°88' et 3°95' (Figure VI.1).

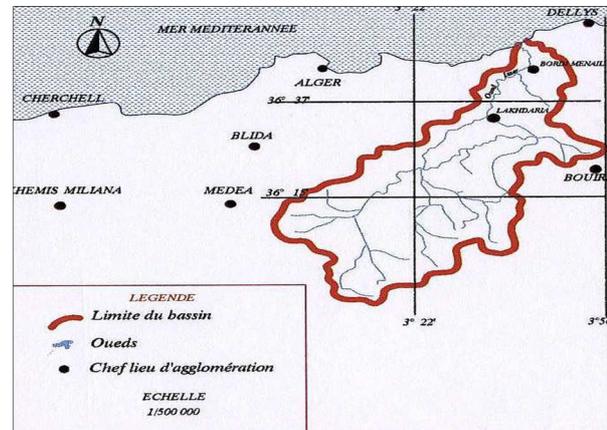


Figure VI.1 : Situation géographique du Bassin versant de l'Isser.

VI.1.2. Caractéristiques climatologiques

Les principales caractéristiques climatiques influençant le processus d'érosion sont la pluviométrie, la température, et l'humidité.

Le régime pluviométrique (entre 700 et 800 mm annuel) se caractérise par des pluies abondantes, concentrées surtout en hiver (140 mm en décembre), qui diminuent presque régulièrement au printemps et atteignent en été quelques millimètres par mois. Le climat de ce bassin est considéré comme semi-aride.

La température moyenne annuelle est de 17°C, pour les mois les plus froids, elle varie entre 5°C et 6°C et entre 27°C et 31°C pour les mois chauds.

L'humidité est modérée pendant toute l'année, avec des valeurs d'environ 70% le matin et le soir en été et de 80% en hiver ; les valeurs à midi sont d'environ 57% en avril et octobre, 60% en été et 64% en hiver. L'humidité moyenne de l'air varie entre 72% en été et 80% en hiver.

Les distributions mensuelles de ces paramètres climatologiques enregistrées à la station de Dar el Beïda sont données ci- dessous (Source : Office Nationale de la Météorologie (ONM), Période 1975-94).

Couvert végétal

En ce qui concerne le couvert végétal, le bassin est caractérisé par une faible densité végétale, il représente environ 20% de la superficie totale, ce qui accélère le phénomène de l'érosion.

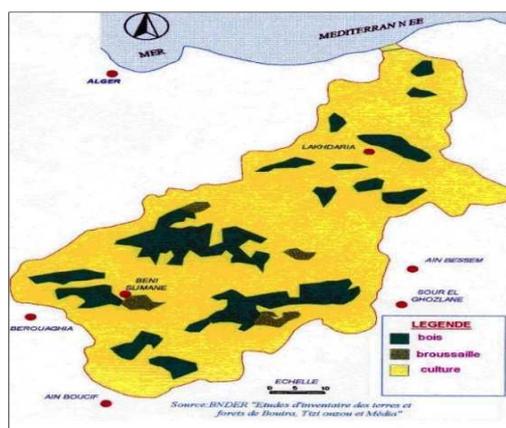


Figure VI.4 : Couvert végétal de l'Isser

VI.1.4. Le Barrage de BENI AMRAN

Le barrage de BENI AMRAN créé sur l'oued Isser est un barrage de transfert vers le barrage de KEDDARA qui alimente la ville d'Alger en eau potable. Ce barrage a été construit et mis en service en 1988. Il a été surélevé en juillet 2003 et la cote de la retenue normale qui était de 63.00 m est actuellement fixée à 67.00 m. le niveau des plus hautes eaux est à 76,10 m.

Le barrage de Beni Amran est parmi les barrages les plus touchés par le problème d'envasement en Algérie et sa capacité diminue chaque année d'une manière considérable. D'après les levés bathymétriques effectués par l'ANBT en 2004, la perte de capacité annuelle des 8 dernières années est de 0.18 Hm³/an avec un taux d'envasement de 63.65%

Le tableau ci-dessous met en évidence la perte en capacité de stockage de ce barrage dans le temps

Année du levé	1988	1996	2004
Capacité (Hm ³)	15.6	7.08	5.67
Perte de capacité (Hm ³)	0	8.52	1.41
Nombre d'année	0	8	8
Perte de Capacité annuelle (Hm ³)	0	1.06	0.18

Tableau VI.2 : Tableau comparatif du volume à l'ancienne cote (RN=63.0 m) (ANB 2004).

VI.2. Données

Le réseau de mesures hydrométriques de l'oued Isser et ses affluents, implanté et géré par l'ANRH, est équipé d'un réseau de 7 stations de jaugeage : El Omaria (091205), Dechmia (090309), Beni Slimane (090305), Mezahim (030191), Aoamar Gare (090416), Pont de la Traille (090408) et Lakhdaria (090501).

Dans cette étude, nous avons utilisé les données de la station de Lakhdaria (Code : 090501) qui parcourt la partie Nord-Ouest de la wilaya de Bouira et qui draine un bassin versant de 3620 km² et qui présentent une qualité de mesure raisonnable.

Les données de cette station, fournie par l'ANRH, sont composées de deux séries de mesure :

i) celle des débits moyens liquides instantanés ii) celle des concentrations solides instantanés s'étendant sur une période allant de 1971/1972 à 1990/1991 soit 20 années d'observation d'où le fichier des couples débits liquides/ concentrations solides exprimé a un pas du temps horaire est élaboré.

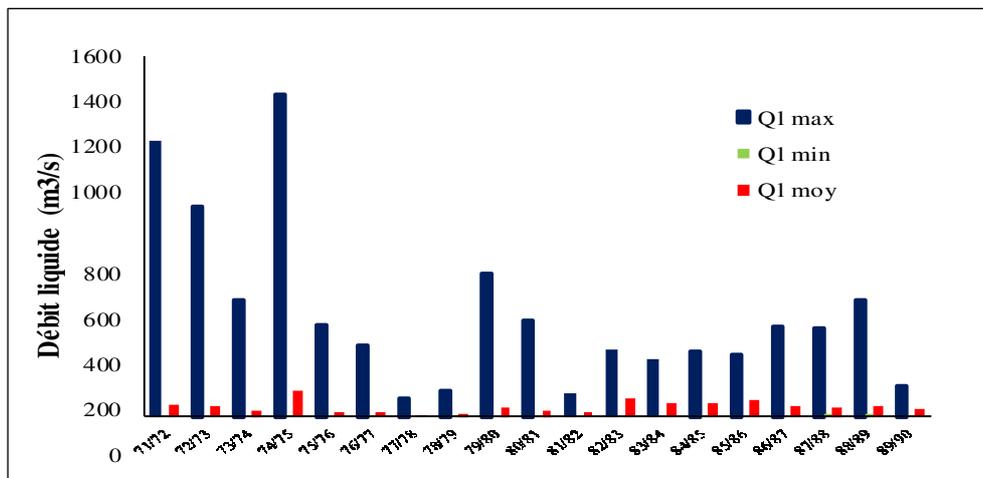


Figure VI.5 : Variation des caractéristiques statistiques du débit liquide dans le temps.

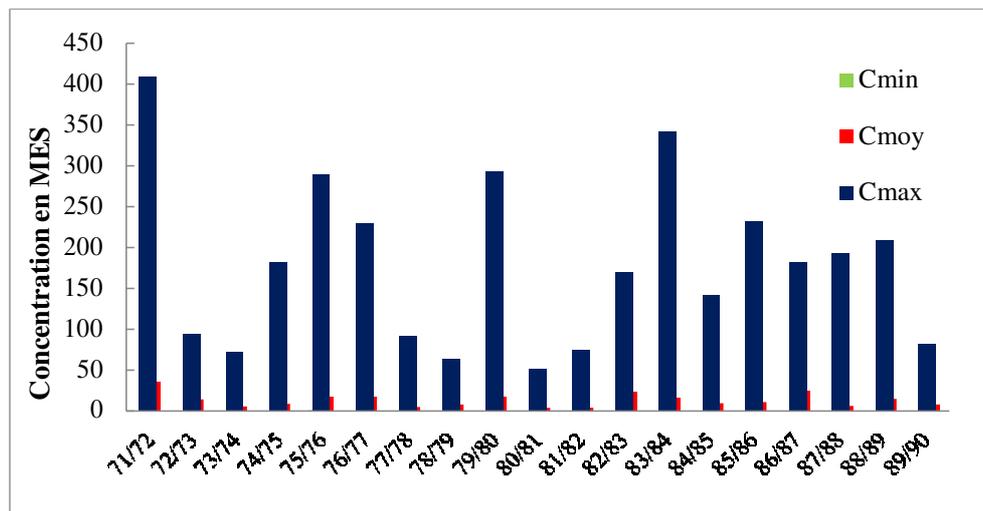


Figure VI.6 : Variation des caractéristiques statistiques des concentrations solide dans le temps.

VI.3. construction des signaux :

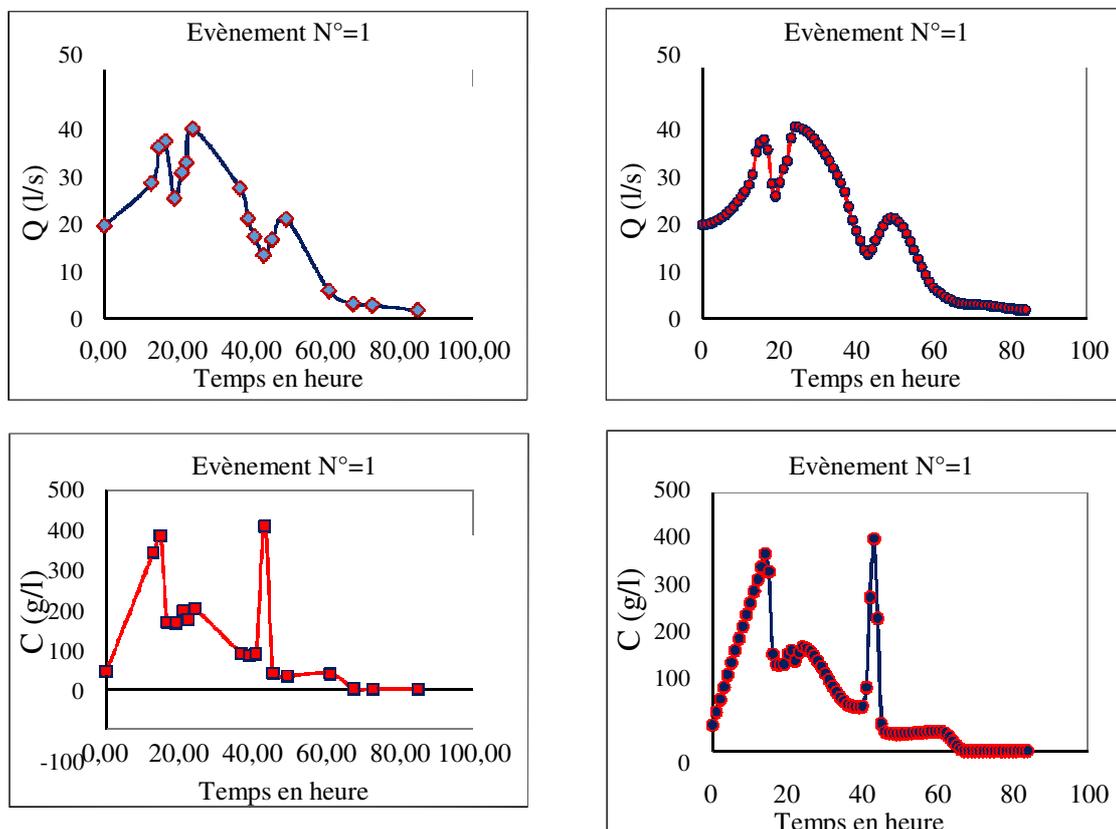
L'application de certaines techniques issues de traitement de signal sur des signaux discrets recommande que ces derniers soient continus, cela vaut dire que si on travaille sur un signal temporel, le pas du temps doit être régulier.

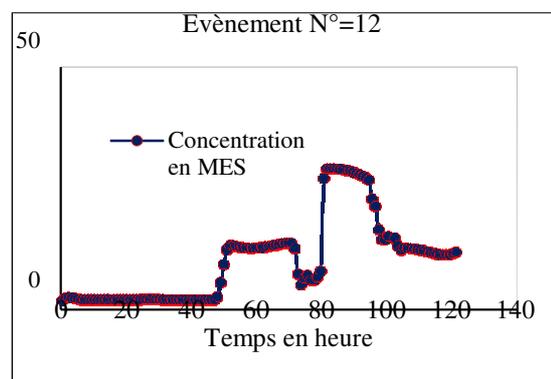
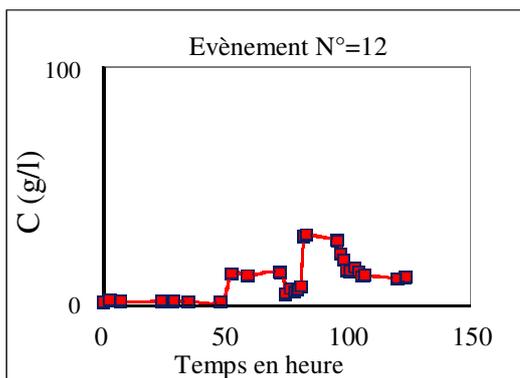
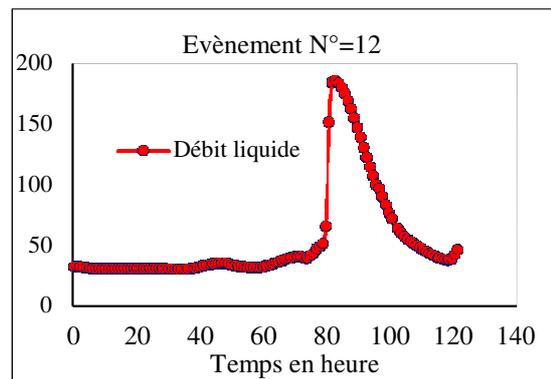
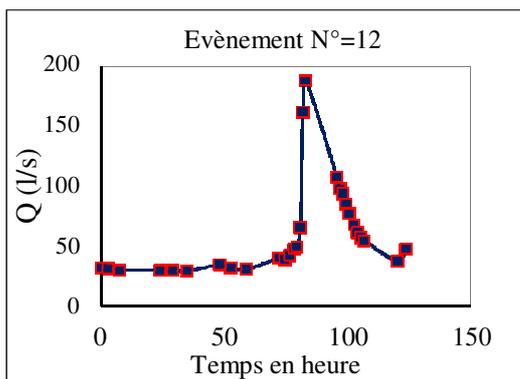
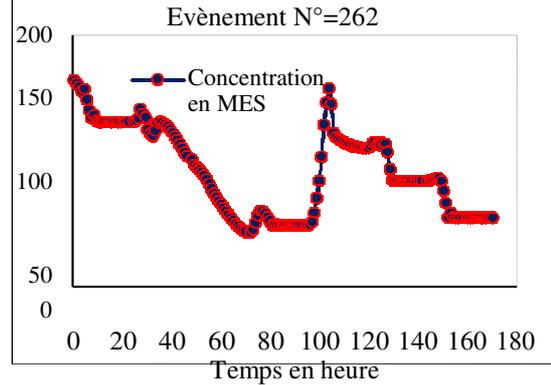
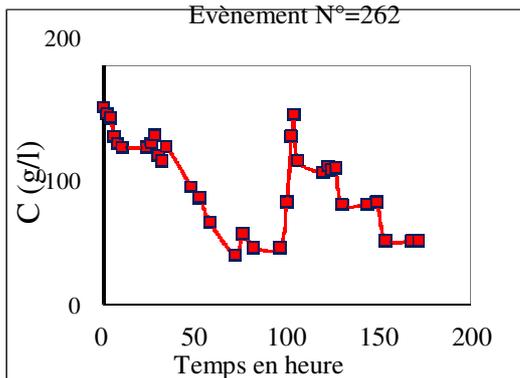
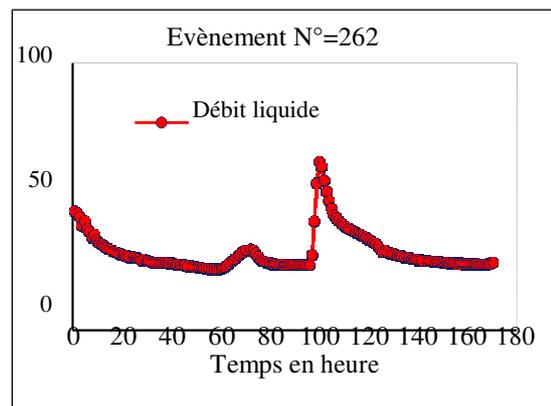
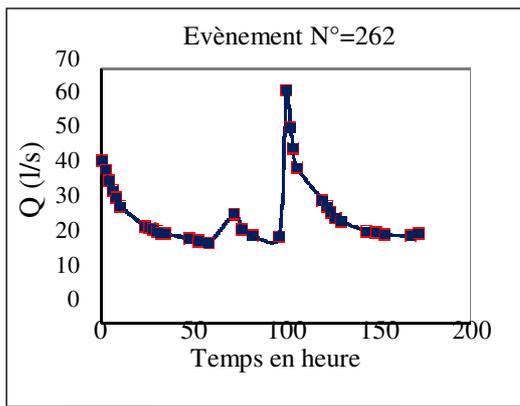
La cadence de mesure des débits liquides et des concentrations des matériaux solides en suspension au niveau de la station de Lakhdaria n'étant pas uniforme ; les mesure n'ont pas été effectué d'une manière régulière dans le temps, l'homogénéisation des deux séries de données dans le temps était indispensable. Pour cela, nous avons eu recours à l'interpolation numérique.

Comme le but de cette étude est de caractériser le transport solide à l'échelle de l'évènement, le choix du pas du temps avec lequel on devait effectuer l'interpolation est basé sur cette échelle même et qui ne peut être que l'heure, En effet, certains évènements hydrologiques ne durent que quelques heures.

A l'aide de l'outil de tabulation Excel et du logiciel de calcul Matlab, et en utilisant la fonction « interp1 » défini dans le chapitre précédent, nous avons interpolé les valeurs des débits liquides et des concentrations en MES a l'intérieur de 567 évènements hydrologiques enregistrés dans la station de Lakhdaria pendant 20 ans et on a obtenu enfin des signaux continus à un pas du temps horaire.

Les figures VI.7 et VI.8 illustrent des signaux issus de quelques évènements hydrologiques et le signal complet issu de toute la période de mesure avant et après interpolation.





(A)

(B)

Figure VI.7 : représentation graphiques des signaux bruts (A) et continus (B) des inputs et des outputs pour quelques évènements hydrologiques.

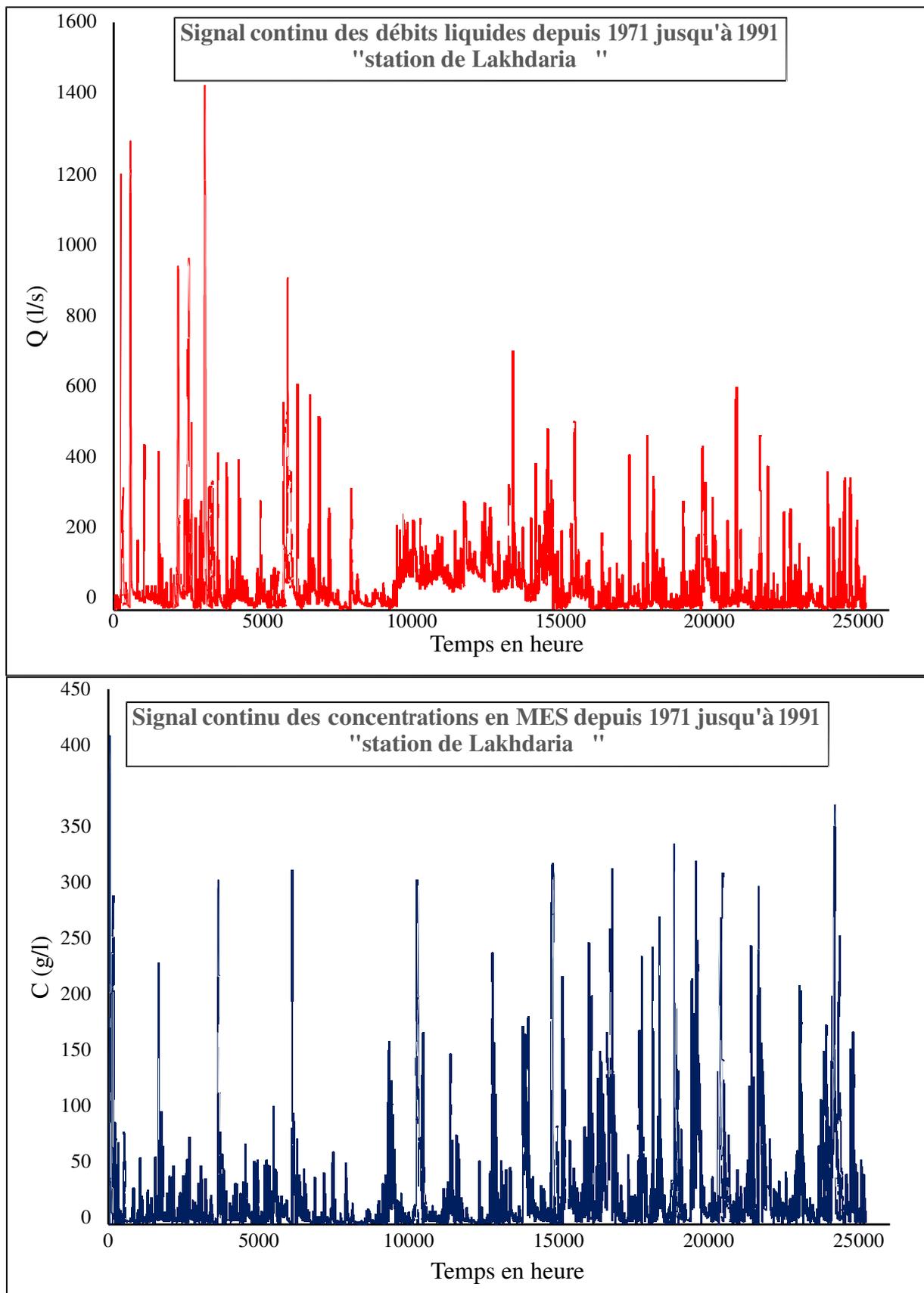


Figure VI.8 : Signal continu des débits liquides et concentrations en MES depuis 1971 jusqu'à 1991 "station de Lakhdaria "

VI.4. Analyse systématique du problème de transport en MES

Comme nous l'avons annoncé précédemment, notre analyse systématique du phénomène de transport solide par suspension au niveau du bassin de l'oued ISSER va se dérouler dans le domaine fréquentielle.

Le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel a été assuré par le calcul des densités spectrales de puissance (DSP) qui sont définies comme les transformées de Fourier (TF) des fonctions de corrélation. Cela a été appliqué sur tous les signaux d'entrées et de sorties (débits liquides- concentrations en MES) et pour toutes les évènements.

Sous Matlab, ce calcul se fait par un petit programme qui utilise l'algorithme de la fft (Fast Fourier Transform) pour le calcul des coefficients de Fourier du signal puis il relie chaque coefficient à la fréquence correspondante et permet en fin de tracer le graphe représentant la densité spectrale de puissance en fonction des fréquences.

La fenêtre suivante illustre un exemple simple de calcul de DSP d'un bruit blanc gaussien :

```
1  = (x est notre signal de N point)
2  = (1, ); % synthèse d'un bruit blanc gaussien
3  = ( ); % est un vecteur de N point contenant les coefficients de Fourier
4  = [0 : /2 - 1 - /2 : -1] * / ; % définition du vecteur de fréquence si N paire
5  = [0 : ( - 1)/2 - 1 - ( - 1)/2 : -1] * / ; % vecteur de fréquence si N impaire
6  "# = ( $( ( ) ). ^2 ; % estimation du spectre
7  ()* ( ,%#) ; % affichage
```

La figure VI.9 représente les DSP obtenus pour quelques évènements hydrologiques.

Ainsi nous avons obtenu pour chaque signal un vecteur de la densité spectrale de puissance correspondant au vecteur de fréquence qui est commun pour les deux signaux d'entrée et de sortie pour chaque évènement.

Parmi l'ensemble de fréquences obtenues pour un seul évènement, nous avons choisi celle pour laquelle l'input ou l'output exprime le plus d'énergie, et on garde la valeur de cette énergie et cela a été fait pour toutes les évènements.

A la fin nous avons construit un vecteur des plus grandes DSP des inputs « DSPI » et un vecteur des plus grande DSP des outputs « DSPO »

Maintenant, notre idée est de corrélérer les DSPO aux DSPI et déterminer une relation qui permet d'estimer les premiers à partir des secondes pour un ensemble d'évènement et valider cette dernière avec le reste des évènements. La démarche de notre analyse est illustrée à la figure VI.10.

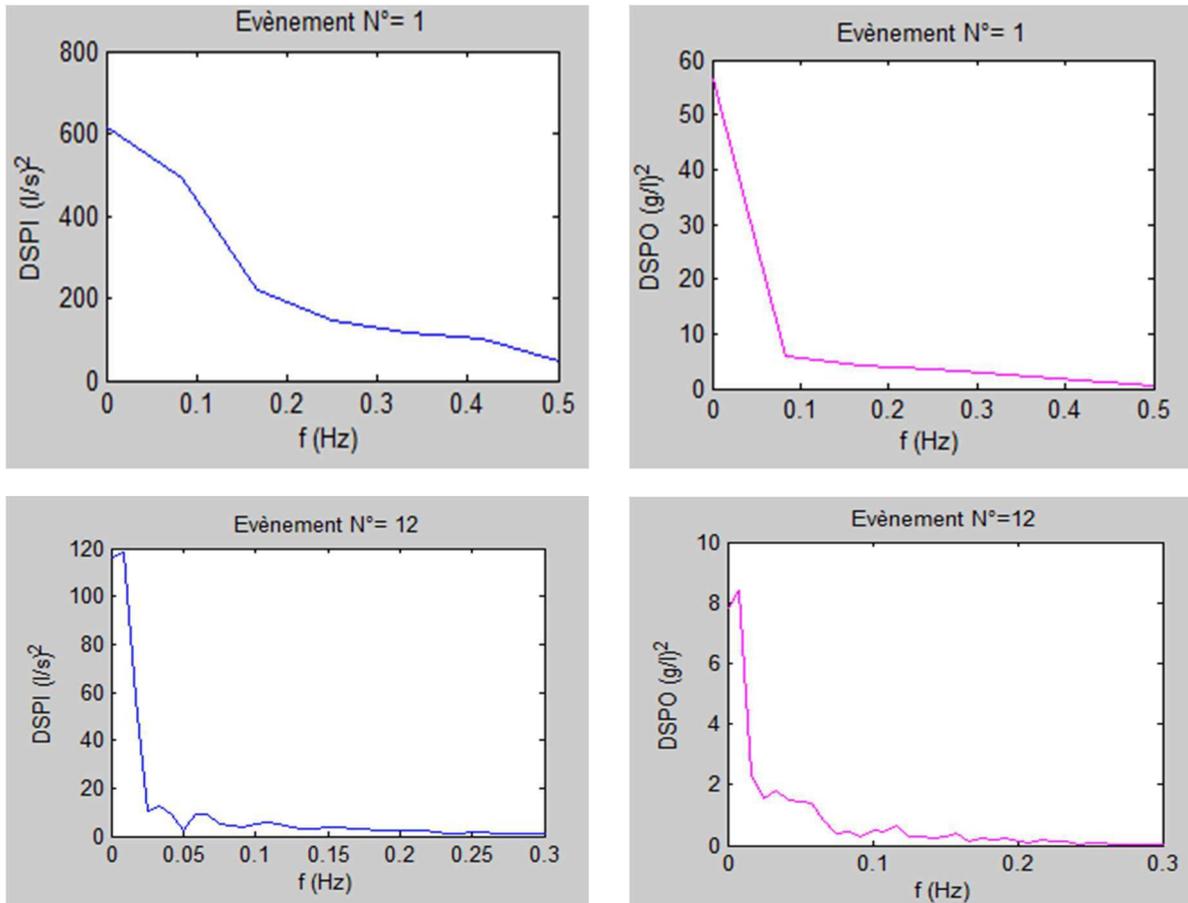


Figure VI.9 : représentation graphique des DSP des inputs et des outputs pour quelques évènements hydrologique

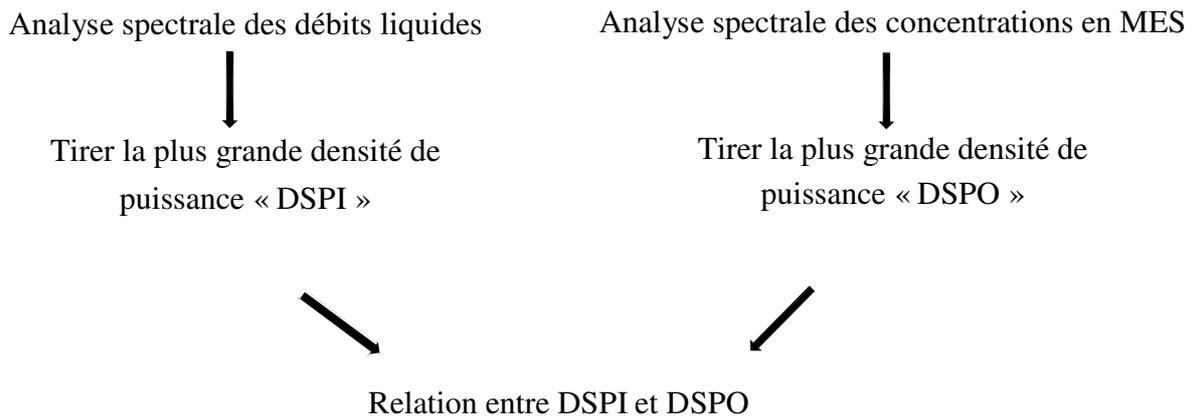


Figure VI.10 : Démarche suivi pour l'analyse de notre système.

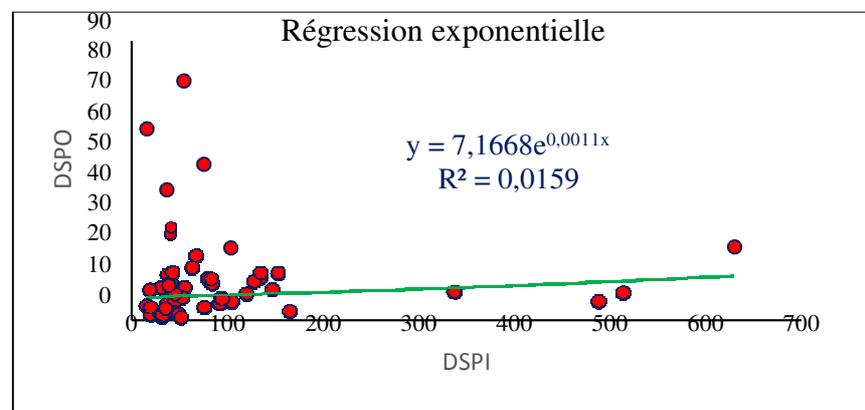
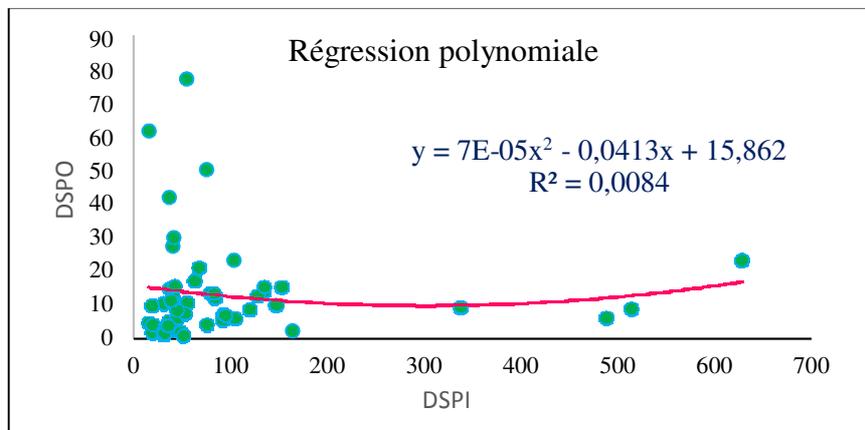
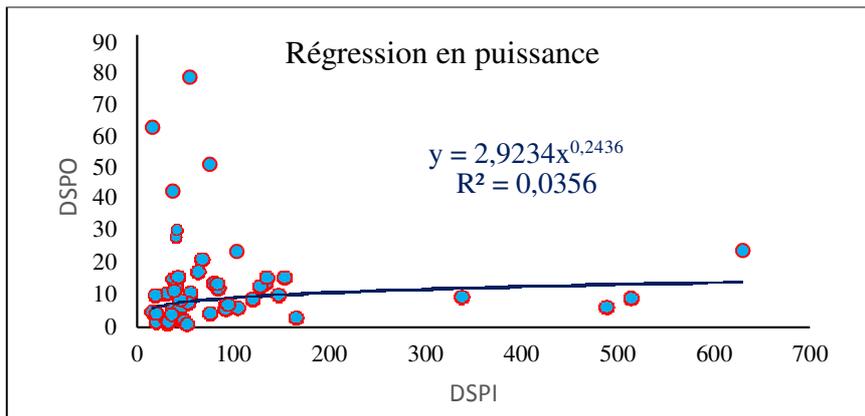
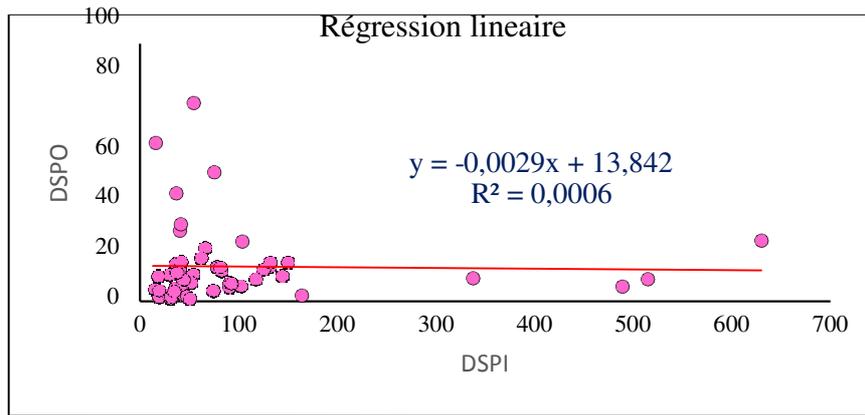


Figure VI.11 : graphe de corrélation des DSPO et DSPI pour différents types de régression

Pour cela, nous avons représenté sur un graphique les DSPO en fonction des DSPI (graphe de corrélation), et on a essayé d'approcher la relation entre ces deux quantités par différents types de modèles de régression (linéaire, polynomiale, puissance et exponentielle).

Malheureusement, la relation entre les DSPO et les DSPI ne peut être approchée par aucun de ses modèles, les coefficients de détermination étant tous inférieurs à 0,1 ($r^2 < 0,1$) et le nuage de points est très loin d'être proche de part et d'autre des représentations graphiques de l'un de ses modèles.

On remarque que pour la régression linéaire, ce coefficient est pratiquement nul et la droite de régression est presque horizontale, cela veut dire que les deux variables DSPO et DSPI sont complètement décorrelées et sont fortement indépendantes à l'échelle de l'évènement.

VI.5. Conclusion

Le résultat obtenu est complètement étonnant. En effet, il existe une relation naturelle de cause à effet entre les deux processus ; un fort débit entraîne une grande quantité de matière en suspension.

Nous attribuons ce résultat à l'une des causes suivantes :

- L'influence des évènements antécédents qui n'a pas été pris en compte (déphasage de réponse entre un ou plusieurs évènements). Effectivement, un faible débit (ou une faible pluie) précédé d'un fort débit peut produire une érosion plus intense que celle produite par le premier débit étant donné que la contrainte seuil de mise en mouvement des particules n'a pas été atteinte dans le premier cas ;
- La présence de bruit et des aberrations au niveau des signaux de départ et qui peuvent être expliquées par le fait d'exécuter des lâchées au niveau du barrage qui se situe à l'amont du barrage de Beni Amran ou tout simplement aux glissements de terrains et effondrements qui peuvent survenir à l'amont et qui modifient le processus naturel de transport ;
- La mauvaise qualité des mesures ;
- La complexité du problème posé et qui ne peut trouver un élément de réponse en utilisant cette démarche.

Bien qu'on n'a pas abouti à des résultats positifs, ce travail constitue une première contribution dans l'analyse des relations débits liquides- concentration en MES au niveau du bassin versant de Beni Amran dans le domaine fréquentielle.

Comme perspective de prochains travaux, nous proposons :

Le traitement préalable des signaux par filtrage pour éliminer des éventuels bruits avant d'entamer l'analyse du problème ;

L'exploration d'autres techniques plus poussées pour la détermination de la relation qui existe entre les DSPO et DSPI tels que les techniques dérivées de l'intelligence artificielle : réseau de neurones, logique flou...etc.

Références bibliographiques

- [1] **Abderrazak BOUANANI**. Hydrologie, Transport solide et modélisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW- Algérie). Thèse de doctorat d'état. Université ABOU BEKR BELKAID TLEMCEN.
- [2] **BEKKAR Mohammed Reda, BOUZIDI Aomer**. Estimation de la fréquence cardiaque à partir de signaux fortement bruités obtenus par photopléthysmographie : Algorithmes et implémentation temps réel. Mémoire de fin d'études. ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE (2015).
- [3] **BENAICHA amar cherif**. Etude des processus des transports solide et leur impact sur l'alluvionnement des barrages. Mémoire de Magister en Hydraulique. UNIVERSITE HADJ LAKHDAR BATNA.
- [4] **Bénina Touaibia**. Problématique de l'érosion et du transport solide en Algérie septentrionale. Sécheresse en ligne (2010).
- [5] **DEMMAK, A. (1982)**. Contribution à l'étude des écoulements solides des cours d'eau d'Algérie, Institut national des ressources hydrauliques.
- [6] **E.TISSERAND, J.F.PAUTEX, P.SCHWEITZER**. Analyse et traitement des signaux- Méthodes et applications au son et à l'image. Editions DUNOD-2004.
- [7] **Ferdinand Piette**. Le filtre de Kalman : intérêts et limites.
- [8] **F.OLLIVIER** 2013-2014. Analyse des signaux aléatoires & identification des systèmes linéaires en vibrations et acoustique.
- [9] **Hamide BOUCHELKIA, fadila BELARBI, Boualem REMINI**. Quantification du transport solide en suspension par analyse statistique : cas du bassin versant de Mouillah.
- [10] **J.-F. Bercher & P. Jardin** – ESIEE Paris : Introduction au filtrage adaptatif
- [11] **LEFKIR A., T.BENKACI & N. DECHEMI (2006)**. Quantification du transport solide par la technique floue, application au barrage de Beni Amrane(Algérie). Revue des Sciences de l'Eau 19(3) (2006) 247-257.
- [12] **Mohammed ACHITE, Bénina TOUAIBIA & Sylvain OUILLON**. Erosion hydrique en Algérie du nord : Ampleur, Conséquences & perspectives (2006).
- [13] **Patrick Fischer, Lisl Weynans, Charles Dossal**. Interpolation et ondelettes.
- [14] **Touaïbia, B. et M. Achitte (2003)**. Contribution à la cartographie de l'érosion spécifique du bassin versant de l'Oued Mina en zone semi-aride de l'Algérie septentrionale. Hydrological Sciences - Journal - des Sciences Hydrologiques 48(2): 235-242.
- [15] **Terfous, A., A. Megnouif & A. Bouanani (2001)**. Étude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouillah (Nord-Ouest Algérien). Revue des sciences de l'eau 14(2): 173- 185.
- [16] **Vinay K. Ingle, John G. Proakis**. Digital Signal Processing Using MATLAB Third Edition. Northeastern University.