

# **RESUME ETENDU**

Présenté par

Madame HALLOUZ Née BELHADJ BOUCHAIB Faiza

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE  
D'HYDRAULIQUE**

Domaine :  
**Hydraulique**

Sujet de la thèse :

**MODELISATION DU TRANSPORT SOLIDE DANS LE  
BASSIN D'EL OUED MINA ET DE LA SEDIMENTATION DU  
BARRAGE S.M.B.A**

Mr MEDDI Mohamed  
Mr MAHE Gil

Professeur  
Directeur de recherche

Directeur de thèse  
Co-Directeur de thèse

Année Universitaire 2012/2013

Cette thèse a été réalisée dans le cadre du projet :



# Introduction générale

## 1. Contexte et problématique

Au sein du cycle hydrologique (figure 0.1), les précipitations sont les principaux agents de mobilisation des particules terrigènes et génèrent le ruissellement qui en assure le transport, suivant les modifications des conditions locales et régionales de surface. Les pluies qui tombent sur les versants désagrègent et mettent en suspension les particules du sol par effet « splash ». Les eaux chargées de ces matières ruissellent en nappes, en rigoles puis dans des ravines avant de rejoindre les artères principales du réseau hydrographique, les dépressions continentales et les milieux marins. Cette mobilisation de la matière tend à niveler les surfaces à l'échelle du globe.

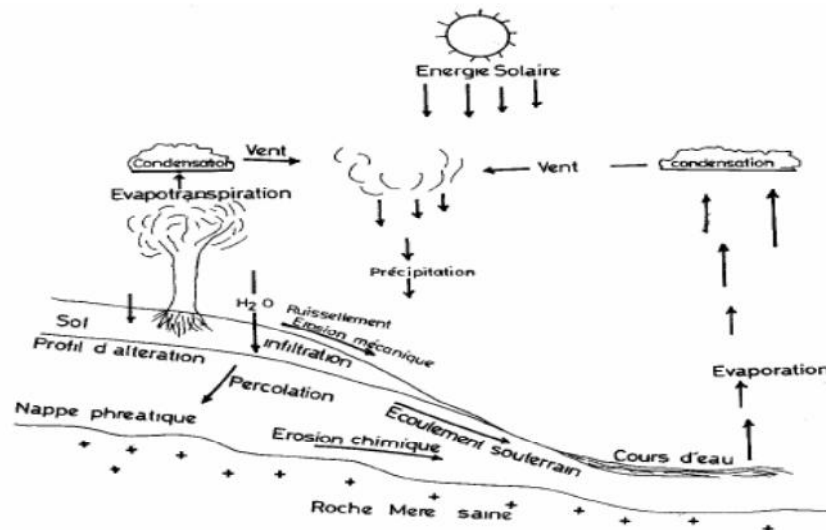


Figure 0.1. Schéma simplifié du cycle hydrologique

Le milieu physique, notamment le couvert végétal, a une influence notable sur ce phénomène, en protégeant les sols contre les agressions diverses. Il joue ainsi un rôle essentiel sur le cycle hydrologique et le transport de matières. Mais les activités humaines telles que l'ouverture des routes, l'urbanisation, les pratiques agricoles et pastorales, tendent à meurtrir les formations végétales et à accélérer de fait la mobilisation des particules terrigènes. Les sédiments ainsi érodés, riches en éléments fertilisants, se déposent à différentes échelles de l'espace, dès que diminue la vitesse de l'agent de transport (Diallo, 2000), depuis le champ jusqu'au bassin fluvial. Ces phénomènes ont pour conséquence la stérilisation, la disparition des terres fertiles et, comme corollaire, la baisse de la production agricole. Les exemples sont frappants : en Afrique, chaque hectare de terrain perd en moyenne par an 7,1 tonnes de terre, 7 tonnes pour l'Amérique du Sud, 6,1 tonnes pour l'Asie, 4,5 tonnes pour l'Amérique du Nord et Centrale, 8,4 tonnes pour l'Europe (Solter, 1992).

Pour pallier à l'irrégularité des régimes des pluies, des réservoirs naturels ont été très tôt mis à profit. Mais, en précipitant une quantité importante de matières en suspension, la sédimentation dans ces retenues d'eau contrarie les apports en éléments nourriciers, destinés naturellement à certaines dépressions continentales (Liénoy *et al.*, 2003).

En outre, elle entraîne également le comblement des aménagements, augmente les risques d'eutrophisation et réduit de ce fait leur durée de vie.

De part leur position géographique, situés en zone aride à semi-aride, trois pays du Maghreb (Algérie, Maroc, Tunisie) ont eu depuis des millénaires une évolution fortement liée au climat de la région et à sa variabilité. Ce climat se caractérise par des contrastes importants avec des types de climats très différents et ce en relation avec les particularités géographiques et écologiques de cette région (Agoumi, 2003).

Les données climatiques relevées dans la région durant le 20<sup>ème</sup> siècle indiquent un réchauffement durant ce siècle estimé à plus de 1°C avec une tendance accentuée les 40 dernières années (Agoumi, 2003). Ces données montrent aussi une augmentation nette de la fréquence des sécheresses et inondations. Toutes les conditions se trouvent remplies dans cette région où on observe le taux le plus élevé d'érosion spécifique dans le monde (Lahlou, 2002) :

- Une érosion forte avec une grande dégradation des sols
- Un ruissellement de surface excessif et parfois violent (intensités maximales instantanées dépassant les 2 mm mn<sup>-1</sup>)
- Un transport solide significatif : de 500 à 2 000 tonnes km<sup>-2</sup>an<sup>-1</sup>

A ces problèmes s'ajoutent des effets et impacts anthropiques exogènes, le Nino Southern Oscillation, le Global Warm, les gaz à effet de serre, qui alourdissent les déficits en ressources hydriques et compliquent davantage la compréhension des processus de transport solide.

En Algérie, le taux d'érosion spécifique atteint les valeurs les plus élevées d'Afrique du Nord. Selon Demmak (1982), ceux-ci dépassent 2000 Tonnes km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> dans les bassins versants de l'Atlas Tellien. Les concentrations des sédiments en suspension dans les cours d'eau dans les régions semi-arides où l'on pratique une agriculture intensive sont élevées. Il n'est pas rare de trouver des concentrations de 200 grammes par litre à certain endroits pendant ou immédiatement après des pluies abondantes.

Cette problématique a attiré un bon nombre d'ingénieurs et chercheurs Algériens et étrangers. En plus des aspects environnementaux de l'érosion, ils ont aussi étudié les conséquences à prévoir sur le côté social et particulièrement la vie des populations vivant à l'amont de ces bassins versants. La protection contre l'érosion en milieux marneux a constitué le problème le plus sensible dans la zone de l'Algérie du Nord.

## **2. Plan d'étude**

Après une synthèse bibliographique sur les processus du transport solide en liaison avec l'érosion hydrique, cette thèse se présente sous la forme d'une succession de travaux d'analyse.

La première partie de cette synthèse passe en revue les processus et paramètres mis en cause dans le phénomène de transport solide en faisant plus particulièrement référence aux mécanismes propres à la région d'étude. Dans la deuxième partie, sont présentées les principales approches de mesure et d'estimation du transport en suspension.

Après une présentation détaillée du bassin d'étude, on procède à l'étude des variabilités des chroniques pluviométriques des années 1930 à 2007 et hydrométriques des années 1968 à 2007 dont elles ont fait l'objet d'une publication.

L'analyse du transport solide constitue le fond de la thèse et est articulée sur plusieurs aspects de quantification et de caractérisation de la relation concentration débit liquide sur une période allant de 1971 à 2002.

### **Description de l'étude :**

#### **I. Première partie :**

Décrit une synthèse bibliographique sur les processus du transport solide en liaison avec l'érosion hydrique et aussi :

## I.1 - Milieu physique

L'oued Mina, principal et dernier affluent de la rive gauche du Cheliff, prend sa source dans les monts de Frenda pour confluer avec l'Oued Chélif après un parcours de 125 km. Il parcourt une distance de 135km environ entre les barrages de Bekhadda et de Sidi M'Hamed Ben Aouda, avec une orientation Sud-est, Nord-Ouest. Durant son parcours, l'oued Mina reçoit quelques affluents : l'oued Haddad, l'oued El Abd, l'oued Taht et l'oued Medroussa. L'oued el Abd est formé à l'amont par la confluence de l'oued Chiba et l'oued Dez. Le premier est également formé par la confluence de l'oued Tounkira et l'oued Sidi Yahia, l'oued Tounkira prenant sa source aux environs d'Ain Kermès (cote 1100-1150m), le deuxième, dans la daïra de Frenda (1100-1200m). Il traverse les monts de Saïda, avec une orientation SE - NW.

L'oued Haddad suit une direction SW - NE. Il collecte les eaux des oueds Baloul, Rekada et Medjaref. Il prend sa source dans le djebel Bazita (cote 1000-1100 m).

L'oued Taht prend sa source aux environs de Frenda (cote 1100-1200 m). Il suit une direction SE - NO.

La longueur de l'oued Mina est d'environ 90 km avec une pente moyenne de 3.37 m/km.

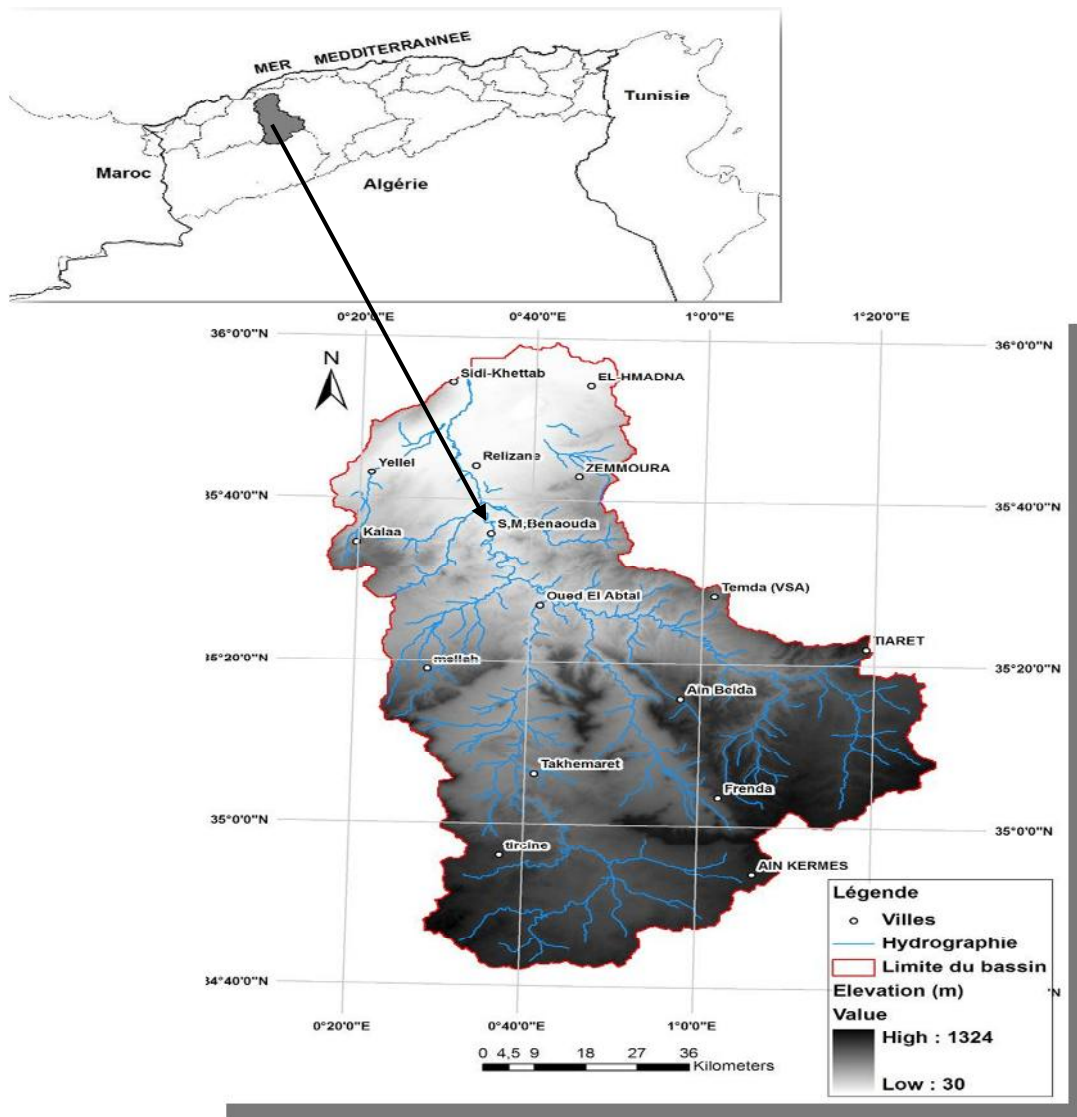


Figure I.1 : Situation du bassin versant de l'oued Mina (Toumi, S., 2011)

Au terme de ce chapitre qui présente les fondements géographiques du bassin versant de la Mina, quelques points caractéristiques sont à relever :

## **TOPOGRAPHIE**

La topographie exerce une influence directe sur la répartition spatiale de la pluie. Cette influence s'exerce également sur les modalités du ruissellement, l'infiltration, le mouvement de la nappe phréatique et la stagnation de l'eau en surface (Pouquet J. 1952). La conjugaison des facteurs morphométriques : forme, altitude, pente et relief intervient dans les modalités de l'écoulement. Banling H., (1959) disait, que la morphométrie peut rendre des services appréciables à condition qu'elle propose des problèmes simples et bien définis.

A partir des courbes hypsométriques et des courbes des fréquences altimétriques, on peut tirer les conclusions suivantes : les tranches d'altitude supérieure à 1200 m sont très peu étendues dans le bassin versant de l'oued Mina, 3.08% de surface dans le bassin versant de l'oued El Abd à Takhmert. Au niveau du bassin versant de l'oued Haddad, 0.28% de la surface est représentée par des altitudes supérieures à 1100 m. pour le bassin versant de l'oued Mina à l'oued Abtal, 1.64% de la superficie est représentée par des altitudes supérieures à 1200m.

L'indice de compacité, qui traduit la forme du bassin, a une influence sur l'écoulement (un bassin très allongé ne réagira pas de la même qu'un bassin de forme très ramassée, Roche M., (1963)). D'après les valeurs de cet indice, on constate que les bassins versants de l'oued Haddad (1.35), l'oued Mina amont à Sidi Ali ben Amar (1.43) et celui de l'oued El Abd à Ain Hamara et Takhmert (1.56), (1.61) sont plus allongés. Donc, on peut dire que les deux premiers sont les mieux disposés à l'écoulement rapide.

## **LITHOLOGIE**

La géologie d'un bassin versant est un facteur très important dans la détermination du régime des cours d'eau qui drainent ce bassin. Elle influe directement sur l'évapotranspiration par l'effet thermique dû à la couleur des sols et par le développement de la végétation.

Nous allons essayer d'établir une classification hydrogéologique des formations supérieures du bassin versant, à partir de la méthode adoptée par l'IRD (ex. O.R.S.T.O.M) (Dubreuil P. et Guiscafre J., 1971). Cette classification est basée théoriquement sur la structure physique des roches.

Cette classification, nous permet de distinguer quatre catégories de formation :

- Zone perméable à aquifère draine : elle est représentée par les formations quaternaires. Elle se trouve le long de l'oued Mina, de l'oued Haddad et la partie supérieure de l'oued el Abd.
- Zone à perméabilité moyenne ou faible (formations alternées d'argiles, grès et calcaires). On trouve cette formation dans le Nord du bassin versant de l'oued Mina et de petites surfaces du bassin versant de l'oued el Abd à Ain Hamara.
- Zone perméable en grand (calcaires). Cette formation est la plus étendue dans le bassin versant de l'oued Mina.
- Zone relativement imperméable (argiles et marnes). Ces formations occupent la partie Nord du bassin versant de l'oued Mina.

Ces constatations nous permettent de relever en premier lieu la prédominance au niveau de l'ensemble des bassins versants des terrains perméables. Par contre, dans la partie Nord, on trouve des sols purement imperméables.

## **LE COUVERT VEGETAL**

Le couvert végétal influe fortement les quantités d'eau disponible pour l'écoulement de surface. Une bonne couverture végétale limite l'érosion en dissipant l'énergie des pluies, en les interceptant, et favorise l'infiltration et le ruissellement hypodermique (Wischmeier S., 1978). En hiver, durant lequel l'évapotranspiration est faible, l'eau interceptée par la végétation est en grande partie restituée au sol par égouttage. Donc, partie des précipitations peut atteindre le sol après un certain temps, et la quantité perdue est négligeable. En été, la quantité interceptée par la végétation est plus importante. En cette période, le pouvoir évaporant est grand par conséquent, cette quantité sera évaporée avant d'avoir atteint le sol (Meddi M., 1992).

## CLIMAT

Le climat de la région est de type semi-aride méditerranéen (pluie d'hiver, sécheresse estivale). Les températures moyennes annuelles affichent une tendance à la diminution du Nord du bassin vers l'intérieur (25.85C° à Chlef, 19.97C° au barrage SMBA et 18.34C° à Frenda) et les températures moyennes annuelles oscillent entre 10C° et 16C° en janvier et entre 28C° et 37C° en août.

L'humidité relative, sur ce bassin, en hiver varie de 69 à 78 % et en été de 38 à 48 % et une ETP de l'ordre de 990 mm.

Le bassin versant de l'oued Mina est marqué par une faible pluviosité (environ 350 mm pour la période 1931/2007), et une évapotranspiration annuelle de l'ordre de 910,07 mm.

## Deuxième Partie

### II.1 Analyse des pluies

#### II.1.1 Origine des données

Les données pluviométriques proviennent essentiellement de la banque de données de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). Elles sont enregistrées à partir de 26 postes pluviométriques (tableau. II.1) répartis sur le bassin versant et dont la taille des observations varie d'une station à une autre, et sont structurées suivant l'année hydrologique (du 1<sup>er</sup> septembre au 31 août). La répartition spatiale de ces postes est très hétérogène.

**Tableau II.1** Inventaire des stations pluviométriques utilisées dans l'étude

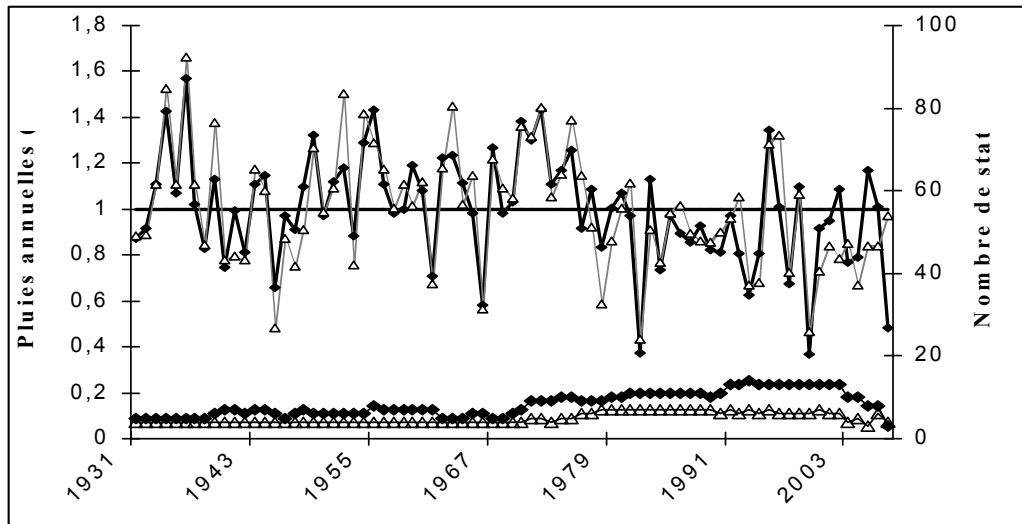
Ordre	Id station Code ANRH	Id Secondaire	Nom	Latitude	Longitude	Altitude	Période
1	012507	S1	Oued Lili	35.50417	1.288056	588	1969-2007
2	012703	S2	Djdiouia amont	35.6525	0.8277778	562	1930-2003
3	012901	S3	Bekhadda Bge	35.35444	1.035	572	1972-2007
4	012909	S4	Sidi Ali Benamar	35.32444	1.129722	630	1971-1994
5	012917	S5	Tiaret-ANRH	35.38528	1.306944	1106	1990-2007
6	013302	S6	Ain Amara	35.38028	0.6797222	288	1968-2007
7	013306	S7	Oued El-Abtal	35.46056	0.6972222	354	1952-1968
8	013401	S8	Sidi AEK Djillali	35.48555	0.5877778	236	1968-2007
9	013410	S9	SMBA	35.58528	0.5944445	195	1968-2007
10	013505	S10	Relizane DEMRH	35.76278	0.5347222	58	1966-2005
11	013506	S11	El Matmar	35.72333	0.4847222	70	1990-2007
12	013507	S12	L' Hillil	35.72556	0.3480555	120	1968-2006
13	013511	S13	Relizane aval	35.73695	0.5336111	69	1938-1969
14	111401	S14	Mascara	35.38278	0.2408333	487	1930-1961
15	111404	S15	Aouf	35.18639	0.3688889	968	1930-1959
16	111405	S16	Motmor	35.33333	0.2	470	1930-2003
17	111407	S17	Tighenif	35.42417	0.3252778	540	1938-1969
18	111418	S18	Nesmoth	35.25945	0.3913889	906	1990-2007
19	111609	S19	Bouguirat	35.76472	0.2291667	65	1930-2003
20	080504	S20	Bled Bel Hammar	34.73583	0.22	1170	1970-2006
21	080606	S21	Maamora	34.68389	0.5269445	1148	1974-2007
22	080701	S22	Medrissa	34.89611	1.233333	1110	1930-2006
23	111216	S23	Med El Habib	34.8	0.2541667	1106	1930-2007
24	013201	S24	Ain Kermès	34.90861	1.1025	1112	1976-2007
25	013204	S25	Sidi Yousef	34.80056	0.5944445	1091	1930-2007
26	013304	S26	Takhmert	35.115	0.6913889	663	1930-2007

#### II.1.1- Régionalisation climatique

Une régionalisation à partir des données pluviométriques a été réalisée qui a pour principal but, comme son nom l'indique, d'étudier les variations climatiques à une échelle régionale en considérant plusieurs stations.

Nous avons alors choisi d'effectuer la régionalisation grâce à la méthode du vecteur régional avec plusieurs objectifs : constituer des unités climatiques homogènes avec des critères automatiques ; et, reconstituer les données manquantes au pas de temps mensuel et annuel.

### II.1.1.2 Résultats et discussions



**Figure II.3** Fluctuations annuelles des pluies pour les régions Nord et Sud : Pluies annuelles Mina Nord ( —■— ), pluies annuelles Mina Sud ( ..... ) Nombre de stations par an Mina Nord ( —▲— ), Nombre de stations par an Mina Sud ( —■— ) Moyenne ( — ) de 1930/31 à 2006/07, en valeurs centrées réduites.

Comme l'indique la figure II.3, les fluctuations interannuelles sont très importantes pour les deux régions. En outre, ces deux régions montrent une diminution durable des précipitations à partir de 1976, confirmant ainsi les résultats de Meddi, (2001) ; Meddi et Hubert, (2003) et Talia et Meddi, (2004) pour l'Ouest de l'Algérie.

La figure II.3 donne les valeurs des indices de pluies annuelles et le nombre de stations ayant été utilisées dans les calculs. On note que la moyenne de ces indices de pluies est égale à 1 pour les années à précipitations proches de la moyenne (ex. 1937 région Mina Nord).

On remarque aussi que dans le jeu de données utilisé pour cette étude, le nombre de stations n'est élevé que durant la période allant de 1971 à 2004. On peut aussi constater sur les deux régions que la fluctuation de l'indice des pluies annuelles diminue avec le nombre de stations observées par an. En effet, de 1931 à 1971, les indices des pluies annuelles fluctuent avec une grande amplitude et ne sont alors représentatifs que d'un nombre peu important de stations. Après 1971, les stations observées sont plus nombreuses et l'indice des pluies annuelles calculé par le vecteur régional est alors plus représentatif et voit sa variabilité réduite en fonctions des années.

Ceci nous permet de conclure que la quantité de données constitue une limite de la qualité des indices des pluies annuelles des vecteurs régionaux.

Pour déterminer si une station pluviométrique possède une variabilité climatique homogène à celle de la région, nous nous sommes appuyés sur le critère de calcul de la corrélation par rapport au vecteur. Cette valeur est calculée pour chaque station par le logiciel Hydraccess, on remarque que la station de Mesmoth dans la région Mina Nord, et les stations de Bled Bel Hammar et Maamora dans la région Mina Sud, présentent des coefficients de corrélation plus faibles que la moyenne, donc soit ces stations présentent un problème de qualité, soit elles n'appartiennent pas à la même zone climatique que les autres.

### II.1.3- Les analyses statistiques

D'une façon générale, parmi les procédures statistiques souvent utilisées dans des études des séries météorologiques, trois sont mis en œuvre. Elles ont été largement utilisées

pour l'étude de la stationnarité de séries chronologiques (Hubert et Carbonnel, 1989 ; Servat *et al.*, 1998 et 1999 ; Paturol *et al.* 1997a) :

- Procédure Bayésienne de Lee et Heghinian qui ne suppose aucune propriété particulière de la série chronologique à étudier et qui analyse le caractère aléatoire de la série ;
- Le test de Pettit, adapté à la détection de ruptures dans une série chronologique. Une rupture peut être définie de façon générale par un changement dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné, le plus souvent inconnu ;
- Une procédure de segmentation, appropriée à la recherche de multiples changements de moyenne au sein d'une série chronologique.

## Résultats

### II.1.4.1- Analyse de données des précipitations :

Les tests de rupture sont appliqués aux séries chronologiques mensuelles observées (tableau II.2) et les séries chronologiques annuelles observées et reconstituées pour toutes les stations du bassin versant de l'oued Mina. La reconstitution signifie que les valeurs manquantes sont comblées en fonction de la valeur du vecteur de chaque région. Il est indispensable pour le test de rupture que les lacunes dans les séries soient comblées.

**Tableau II.2** Détection des ruptures dans les séries de pluies annuelles observées des deux régions

Nom des régions	Nom de station	Période	Rupture
<b>Mina Nord</b>	O. Lili	1969 – 2007	1981*, 1974**, 1974***
	Smba	1968 – 2007	1969**
	Motmor	1930 – 2003	1976*, 1976**, 1976***
	Bouguirat	1930 – 2003	1976*, 1976**, 1976***
	A. Amara	1968 – 2007	1981*, 1975***
	Bekhadda barrage	1972 – 2007	2006**
	El matmar	1990 – 2007	2005**
	Hillil	1968 – 2006	1980*, 1975**, 1975***
	Mascara	1930 – 1961	1960**
	O. Abtal	1952 – 1968	1964**
	Relizane aval	1938 – 1969	1965**
	Relizane demrh	1966 – 2005	1975**, 1980***
	S.a.djillali	1968 – 2007	1975**, 1975***
	Mesmoth	1990 – 2007	2004**, 2004***
	S.a.b.amar	1971 – 1994	1981**
	Tighenif	1938 – 1969	1967**
Djdiouia amont	1930 – 2003	1976*, 1976**, 1976***	
Tiaret anrh	1990 – 2007	1993**	
Aouf	1930 – 1959	1932**	
<b>Mina Sud</b>	Sidi youcef	1930 – 2007	1976*, 1976**, 1976***
	Bled bel hamar	1970 – 2006	1977**
	Medrissa	1930 – 2006	1976*, 1998***, 1998**
	Med el habib	1930 – 2007	1976*, 1976**, 1976***
	A. Kermes	1976 – 2007	PAS DE RUPTURE
	Maamora	1974 – 2007	1989**
	Takhmert	1930 – 2007	1976*, 1976**, 1976***

\*Test de Pettit, \*\*Procédure Bayésienne de Lee et Heghinian, \*\*\*Segmentation de Hubert

Cette approche statistique nous a permis de constater que la reconstitution de données indiquait des dates de ruptures différentes. Certaines dates de ruptures peuvent apparaître ou même disparaître. Enfin les données reconstituées présentent moins de dates de ruptures voir une seule date, que les données observées. Nous pouvons alors dire que la reconstitution permet de mieux représenter la variabilité climatique régionale.

En effet, nous avons noté une rupture correspondant à une diminution des précipitations en 1976 au niveau du bassin de l'oued Mina (Tableau 6.6), date avancée par de nombreux chercheurs dont Touazi et Laborde, 2000 ; ANRH, 1993 ; ANRH, 2010, qui ont déjà évoqué



la tendance à la sécheresse à partir des années 1970 sur l'Algérie du Nord. Ces résultats sont en accord avec les travaux récents de Meddi et al. (2002) qui ont conclu à une diminution des pluies constatées durant les trente dernières années, qui a touché l'ensemble de l'Algérie mais surtout l'Ouest, se chiffrant à : (a) 30 à 40% à l'échelle annuelle et plus de 40% en hiver et au printemps dans la région de Mascara; (b) 20 à 30% sur le littoral allant du centre à l'Ouest du pays; et (c) 20% à l'échelle annuelle et 25% en hiver au centre du pays. Ils confirment également ceux de Meddi et Hubert, (2003), sur la réduction des totaux précipités pour les bassins de l'extrême Ouest d'Algérie, dont la rupture s'est manifestée durant les années 1979-1980 et pour le bassin de l'oued Mina, aux stations Oued El Abtal et Ain Amara, où la rupture a été observée en 1972, ainsi, pour la partie centrale de l'Ouest algérien, où la rupture s'est produite en 1976 avec une diminution de l'ordre de 55%.

### II.1.5- Les pluies moyennes sur les sous bassins de l'oued Mina

La **méthode polygonale de Thiessen** utilisée ici manuellement et via le logiciel Hydraccess pour calculer les pluies moyennes consiste à pondérer les données de chaque station en tenant compte de la surface élémentaire du bassin versant dont la station est censée être représentative.

Ainsi, les résultats obtenus par les deux méthodes ont donné lieu à une comparaison des écarts affichés dans le tableau ci-dessous:

**Tableau II.4.** Comparaison des pluies moyennes annuelles et mensuelles calculées par les deux méthodes

Bassins	Bassin O. Mina	O. Abd Aval à A. Hamara	O. Abd Aval à Takhmert	O. Mina Amont	O. Mina Haddad à S. A.D	O. Mina à O. Abtal	Exutoire barrage SMBA
<b>Ecart %</b>							
<b>Pluies annuelles</b>	-1	2	0	4	6	5	6
<b>Pluies mensuelles</b>	4	-2	0	6	6	-4	2

On voit bien que les deux méthodes utilisées donnent des résultats semblables du fait que l'écart maximal est de 6% pour la station de S.A. Djillali, et le minimal d'écart est de -1% pour l'ensemble du bassin de l'oued Mina.

### II.1.6- Etude des sécheresses via l'indice standardisé des pluies

On a choisi, pour notre étude, le **SPI**, développé en 1993 par McKee et qui a été employé par de nombreux auteurs sur diverses régions du globe (Giddings et al, 2005 ; Wu et al, 2001, Sönmez et al, 2005) : selon Lloyd-Hughes et Saunders (Lloyd-Hughes et Saunders, 2002), cet indice donne une meilleure représentation spatiale que le PDSI qui a été également beaucoup utilisé. Il semble également. Enfin, on ne dispose pas dans notre cas de nombreuses variables qui sont parfois nécessaires (PDSI...), mais pas dans le cas du SPI. Ce dernier dispose de 3 avantages majeurs (Lloyd-Hughes et Saunders, 2002) : il est simple à calculer car il se fonde uniquement sur des données de pluie, il peut-être calculé pour des pas de temps variables ce qui permet d'adapter la fenêtre temporelle au but de l'étude, et enfin sa normalisation, issue de sa méthode de calcul, assure que la fréquence d'occurrence des événements extrêmes est la même partout.

#### II.1.6.1- Résultats et discussions

Sur la base de ces indices exprimés par les données pluviométriques pour la période 1968-2007, au niveau du sous bassin I contrôlé par la station de Sidi Aek Djillali, 36% des années d'observation ont subi une sécheresse modérée et seulement 13 % correspondent à un régime de sécheresse forte. A l'opposé, sur la même période, 33% des années se déroulant sous un régime à humidité modérée et les 18% restants correspondent à une humidité allant de forte à

extrême. Les valeurs du SPI exprimés sont une caractéristique d'une sécheresse allant de fort (8%) à modérée (61%). Les 34% des années restantes sont caractérisées par une humidité à intensité variable. Plus au Sud du bassin de l'oued Mina et précisément sur le sous bassin IV contrôlé par la station de Takhmert, 41% des années d'observation ont subi une sécheresse modérée et seulement 13 % correspondent à un régime de sécheresse forte. A l'opposé, sur la même période, 30% des années se déroulant sous un régime à humidité modérée et les 16% restants correspondent à une humidité allant de forte à extrême. Sur l'ensemble des deux paramètres SPI, la sécheresse revêt un caractère globalement modéré. En revanche, un nombre d'années non négligeable ont subi de très forte sécheresse.

### II.1.7- Calcul du cumul de déficit de pluie

La méthode des cumuls de déficit de pluie permet de dégager les grandes tendances, et la figure 6.8, traduit l'évolution de ces cumuls sur chaque sous bassin. Un caractère excédentaire des pluies depuis 1968 jusqu'au milieu des années 70. Cependant, certains épisodes à la baisse sont enregistrés durant la fin des années 60 et le début des années 70; durant cette période, la station d'Oued El Abtal enregistre une tendance à la hausse (le nombre d'années déficitaires ne dépasse pas 3 années consécutives). Depuis les années 80 jusqu'à nos jours, cette zone a connu l'une des périodes les plus déficitaires en intensité et en persistance. On constate donc que la variation des pluies traduit bien l'évolution et changement du régime pluviométrique dans cette zone. Mais la sécheresse observée durant ces dernières décennies est principalement due à la baisse des pluies et l'augmentation des températures.

### II.2. Analyse des écoulements

Pour l'étude des débits, nous nous sommes basés sur les données des stations d'Ain Hamara et Takhmert sur l'oued Abd aval, Sidi AEK Djillali sur oued Mina Haddad, Oued El Abtal sur oued Mina, Sidi Ali Ben Amar sur oued Mina Amont pour une période de 40 ans (1968-2007) (tableau II.6).

**Tableau II.6** Stations hydrométriques du bassin versant de l'oued Mina

Bassins	S/Bassins	Stations	Surface km <sup>2</sup>	X deg.dec	Y deg.dec	Z m
Oued Abd Aval	III	Ain Hamara	2 474	35.38028	0.6797222	288
	IV	Takhmert	1 488	35.115	0.6913889	663
Oued Mina Amont	V	Sidi Ali Ben Amar	1 163	35.32444	1.129722	630
Oued Mina	II	Oued el Abtal	5 365	35.58528	0.5944445	195
Oued Mina Haddad	I	Sidi Aek Djillali	499	35.48555	0.5877778	236

#### II.2.1-Mesures hydrométriques

L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques maintient l'activité autour des stations du réseau national. Mais les stations utilisées pour notre étude présentent quelques anomalies très apparentes. Ainsi, les cinq stations choisies pour cette étude ont nécessité de contrôler leur courbes d'étalonnage.

##### II.2.1.1- Etalonnage des stations

Comme le lit des cours d'eau est susceptible de changer, les relations hauteur - débit établies à un instant donné peuvent devenir rapidement obsolètes. Ceci a nécessité la vérification des relations hauteur - débit établies par le passé avant de les utiliser. Nous signalons dans cette partie les jaugeages effectués au cours de la période d'étude.

Les opérations des jaugeages ont été réalisées via le logiciel Hydraccess.

Ces stations avaient été longtemps suivies par les secteurs de l'ANRH. Mais il était important, après toute cette période de vérifier la validité des relations hauteur - débit qui ont été établies par le passé. Au début du travail, les courbes de tarage ont été assez variées selon le type de cours d'eau et l'emplacement de la station hydrométrique mais Hydraccess a pu gérer ces courbes qui ont été de type non univoque, c'est-à-dire qu'à une cote peuvent correspondre plusieurs débits et ce, par la méthode du gradient limnimétrique.

En l'absence de courbes définies préalablement pour une station, tous les jaugeages de la Station - Capteur sont affichés, et une période de validité provisoire est définie à la date du premier jaugeage. L'allure du nuage de points de jaugeages donne déjà des renseignements sur la difficulté plus ou moins grande que l'on aura pour établir l'étalonnage. Si les points sont déjà alignés sur une seule courbe (cas des stations de Sidi Aek Djillali, d'oued El Abtal, de Takhmert et celle de Ain Hamara), il y a de bonnes chances que la station soit stable et facile à étalonner. Si le nuage de points n'a pas de forme ni d'organisation bien définie (cas de la station de Sidi Ali Ben Amar), on peut prévoir des difficultés. Durant une période bien définie, les erreurs peuvent être dues au matériel utilisé (moulinet détaré), au mode opératoire, à la méthode de calcul du jaugeage ou encore à une hétérogénéité dans la chronique limnimétrique. En outre, il est à signaler dans cette critique de la qualité des jaugeages que le cas des interventions humaines n'est pas à négliger puisque des prélèvements de sables, autorisés, sont dûment effectués au droit et à l'amont des stations hydrométriques.

### II.2.1.2-Etude statistique des modules

La forte dispersion des débits annuels mise en évidence par les valeurs du coefficient de variation (Cv), laisse supposer une distribution dissymétrique des échantillons, cette dissymétrie apparaît nettement en portant les points représentatifs des Log de Q en face de leurs fréquences expérimentales sur un papier Gausso- arithmétique.

L'ajustement à une distribution de type Galton ou Log normale à nos bassins donne les résultats du tableau II.7 ci-dessous :

**Tableau II.7 :** Ajustement à une loi Lognormale des modules annuels des oueds Abd Aval, Mina Amont, Mina Haddad et oued Mina.

Bassins	Paramètres statistiques		Droite d'Henry
	Moy Qlog	$\sigma$ Qlog	
Oued Abd Aval	0.19	0.25	Qlog = 0.19 + 0.25 u
	0.93	0.82	Qlog = 0.93 + 0.82 u
Oued Mina Amont	0.08	0.55	Qlog = 0.08 + 0.55 u
Oued Mina	0.52	0.82	Qlog = 0.52 + 0.82 u
Oued Mina Haddad	-2.18	1.30	Qlog = 1.30 u - 2.18

### II.2.1.3-Analyse des données hydrologiques

Des tests de rupture ont aussi été appliqués sur les séries chronologiques des débits moyens mensuels ainsi qu'annuels via le logiciel Khronostat.

**Tableau II.8 :** Détection des ruptures dans les séries des débits annuelles et mensuelles (1967/68- 2006/07)

Station	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Débit annuel
Ain Hamara	72		99	71	74	06	81	84	<b>80</b>	70	00	79	80
Takhmert	93	<b>75</b>	96	89		95				02	97		94
Sidi Ali Ben Amar		74	82	<b>82</b>	<b>83</b>	88	<b>87</b>	87	<b>87</b>	89	90	90	82
Oued El Abtal	73	<b>73</b>		<b>70</b>		95	72	81	<b>80</b>	<b>76</b>	79	75	74
Sidi Aek Djillali	70	<b>75</b>	90	<b>70</b>	90	87	91	75	76	<b>76</b>	75	74	75

Dates de ruptures détectées par trois tests statistiques (gris foncé), par au moins deux tests statistiques (gris clair : ruptures probables) sur les bassins versants (en gras : les dates de ruptures détectées par plus d'un bassin versant la même année ou le même mois) (case vide = aucune rupture probable détectée).

Les débits d'écoulements annuels connaissent une diminution globale depuis les années 1970 (tableau II.8). Pour les débits, des ruptures probables sont observées aussi bien en saison de pluie qu'en saison sèche. Au pas de temps annuel, les dates de ruptures probables sont 1974, 1975 et 1980 et correspondent généralement aux ruptures détectées au pas de temps mensuel. D'après ces résultats obtenus, nous constatons donc une concordance satisfaisante avec les dates détectées sur les pluies annuelles de la fin des années 1970 / début des années 1980. Nous supposons donc que la diminution des écoulements serait due à une diminution globale des précipitations sur le bassin versant de l'oued Mina.

D'après ces résultats, nous constatons une concordance satisfaisante avec les dates détectées sur les pluies annuelles et mensuelles de la fin des années 1970 / début des années 1980. Nous supposons donc que la diminution des écoulements serait bien due à une diminution globale des précipitations sur le bassin versant de l'oued Mina.

## **II.2.2-Lois de distribution :**

### **1.- Etude des crues**

Le logiciel HYFRAN-PLUS, développé par l'Institut canadien (INRS-ETE), est utilisé pour ajuster une série de données de crues qui vérifient les hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité. Un Système d'Aide à la Décision (SAD) a été utilisé pour permettre de choisir la classe de distributions la plus adéquate afin d'estimer les quantiles de période de retour élevée (B. Bobée et al., 2008).

### **Résultats**

De façon générale, les débits de crues sur l'ensemble du bassin de l'oued Mina se classent dans la catégorie C et suivent une loi GEV.

Les résultats des tests d'hypothèses de stationnarité et d'indépendance des données étudiées relatives aux crues annuelles des stations des sous bassins de l'oued Mina montrent :

\_ Au niveau de la station d'Ain Amara, la stationnarité a été acceptée à un niveau de signification de 1% par contre l'indépendance a été acceptée à un seuil de 5%.

\_ Les deux stations Takhmert et Oued El Abtal ont été acceptées par les deux tests à un niveau de signification de 5%.

\_ La stationnarité a été acceptée au niveau de signification de 5% pour les stations de Sidi Ali Ben Amar et Bekhadda Bge, par contre l'indépendance a été rejetée à un seuil de 1% pour la station de Sidi Ali Ben Amar.

### **2. Variabilité de la Récurrence des crues autour des dates de rupture**

Nous avons étudié la variabilité de la récurrence des crues avant et après les ruptures, à titre d'exemple et au niveau de la station d'Ain Amara. Avant la rupture de 1992, les crues d'une intensité inférieure à  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  ne sont de retour qu'une fois tous les 5 ans. Par contre, et au delà de cette valeur, précisément à partir de  $99 \text{ m}^3/\text{s}$ , les crues présentent des périodes de retour longues (20 ans) à très longues (100 ans).

Mais après cette même date de rupture et pour les mêmes périodes de retour, les crues ont significativement diminué. Par exemple et au niveau de la station d'Ain Amara, avant la date de rupture (1992), la crue d'une intensité de  $99 \text{ m}^3/\text{s}$  avait un temps de retour de 20 ans or cette même crue est devenue centennial après cette date de rupture.

## **II.2.3-Calculs des Indices Hydrométriques (SRI)**

Les données hydrométriques enregistrées au niveau des stations de travail, à travers les indices, caractérisent une situation majoritairement dominée par une sécheresse modérée et dans une moindre mesure une sécheresse forte.

Sur le sous bassin I contrôlé par la station de Sidi Abdel Kader Djillali, ces indices sont caractéristiques d'une sécheresse (69%) allant de forte (8%) à modérée (61%) et 34% des années restantes ont subi une humidité à intensité variable, du même pour le sous bassin II contrôlé par la station de Oued Abtal, 46% d'années étudiées sont dominées par une humidité modérée (41%) à humidité extrême (3%) ou forte (2%) alors que les 54% qui restent oscillent entre sécheresse forte (3%) à modérée (51%).

Plus au Sud du bassin de l'oued Mina et précisément sur le sous bassin (IV) contrôlé par la station de Takhmert, nous voyons bien qu'une sécheresse (56%) allant de forte (10%) à modérée (46%) a frappé cette zone.

En outre, un phénomène climatique partagé entre humidité modérée (41%) et sécheresse modérée (41%) a marqué le sous bassin de Oued Mina amont (V). Sur l'ensemble de ces paramètres hydroclimatiques, la sécheresse revêt un caractère globalement modéré.

#### **II.2.4- Calcul du coefficient d'écoulement standard**

Afin de caractériser la capacité d'un bassin versant à ruisseler et connaître les changements des états de surface, un coefficient d'écoulement ( $C_e$ ) est utilisé.

A une échelle annuelle, les variations des régimes hydrologiques des oueds du bassin de l'oued Mina révèlent des irrégularités à tendance généralisée à l'ensemble du bassin. Ces irrégularités ou pulsations climatiques, peuvent être étudiées à partir des variations annuelles du coefficient de ruissellement standard ( $C_e$ ).

Les variations de ce coefficient en fonction des années montrent qu'au cours de l'épisode compris entre 1968 et 1981, le bassin de l'oued Mina a connu un épisode déficitaire très important suivi d'une période excédentaire ne dépassant pas 3 ans consécutifs.

Depuis le milieu des années 70 et jusqu'au milieu des années 80, une période très sèche s'est installée sur ce bassin. Après cette date, on remarque une alternance de valeurs négatives et valeurs positives, reste à préciser qu'à partir de la décennie 2000 une tendance à la baisse de ce coefficient est très apparente.

### **Troisième Partie**

L'objectif de cette partie est de présenter et tester des modèles de transport en suspension capables de reproduire les flux de sédiments et leur variabilité. Celui-ci doit répondre à la demande opérationnelle des gestionnaires d'ouvrages hydrauliques. Il doit donc être en mesure d'une part de décrire les flux mesurés, mais également de reconstituer de longues chroniques non mesurées à partir des données hydroclimatiques disponibles sur des périodes plus longues. Autres aspects seront également abordés : Différentes approches de modélisation seront testées et comparées pour déterminer celle(s) permettant de reproduire les meilleures estimations des flux annuels.(1) la mise en évidence de la variabilité saisonnière et journalière des flux et l'impact des événements de crues sur la quantification des flux ; (2) la description des relations entre les concentrations en MES et les débits lors d'événements de crues, illustrée par des cycles d'hystérésis.

#### **III.2- Les périodes de calage, validation**

Afin de déterminer d'une manière fiable les paramètres du modèle les plus représentatifs du comportement du bassin versant, Il est indispensable de disposer de chroniques suffisamment longues sur la période de calage. Dans le cas où les séries de données disponibles ne sont pas assez longues, les paramètres peuvent être ajustés de manière à reproduire au mieux les flux sur la période de calage. Mais, ils peuvent générer des flux de sédiments erronés sur la période de validation et dans ce cas le modèle ne peut être représentatif du comportement réel du bassin versant à plus long terme. En effet, nous avons basé dans le choix des périodes de validation sur le fait qu'elles doivent inclure des années de forts comme de moyen à faible transport solide.

### III.2.1-Critères d'évaluation des modèles utilisés

Il est important de définir précisément les outils qui nous permettront d'évaluer et de comparer la qualité des modélisations. Ces critères seront calculés à partir des paramètres mesurés et modélisés. Parmi les critères existants, on pourra retenir :

**Tableau III.1-** Répartition des données de calage et validation en vue de la paramétrisation des modèles.

sous bassin versant	Stations	Calage		Validation	
		Début	Fin	Début	Fin
Oued Abd Aval	Ain Hamara	1971/1971	1996/97	1997/98	2001/02
	Takhmert	1971/1971	1996/97	1997/98	2001/02
Oued Mina Amont	Sidi Ali Ben Amar	1971/1971	1997/98	1998/99	2001/02
Oued Mina	Oued El Abtal	1971/1971	1996/97	1997/98	2001/02
Oued Mina Haddad	Sidi Aek Djillali	1971/1971	1996/97	1997/98	2001/02

### III.3- Modèles statistiques

#### III.3.1- Le modèle « rating-curve »

On peut tenter d'établir un modèle de nature purement empirique, ajusté sur des données expérimentales, qui se présentent le plus souvent sous la forme d'une loi de puissance liant la concentration  $C$  (ou le débit solide  $Q_s$ ) au débit liquide  $Q$  (Asselman, 2000; Ferguson, 1986; Jansson, 1996; Mossa, 1996; Verhoff et al., 1980; Walling, 1977). Ce modèle statistique simple a été largement appliqué sur beaucoup de bassins versants algériens. Il a donné des résultats significatifs notamment en ce qui concerne la relation débit solide/débit liquide (Demmak, 1982; Terfous et al., 2001; Benkhaled, 2003; Bouanani et al., 2004; Achite et al., 2005 et 2007; Meguenni et al., 2008; Touaibia et al., 2011; Bouchelkia et al., 2011).

$$Q_s = aQ^b$$

Avec

- $Q_s$  : concentration en sédiment (g/l) ;
- $Q$  : Débit liquide ( $m^3/s$ ) ;
- $a$  et  $b$  : coefficients empiriques ;

#### III.3.2- Modélisation à partir de la relation débit liquide/débit solide à l'échelle instantanée

L'application du modèle « rating-curve » a porté sur les valeurs instantanées des débits liquides en  $m^3/s$  et des débits solides en  $kg/s$ , mesurées au niveau des cinq stations étudiées, sur les périodes de calage. Ainsi, les résultats ont montré que, malgré une certaine dispersion des valeurs, il existe une relation puissance évidente entre les deux paramètres. Les équations d'ajustement présentent des exposants de 1.6, 1.45, 1.57, 1.61 et 1.51, conformes aux valeurs généralement observées dans d'autres régions et notamment dans les bassins versants algériens, où celles-ci oscillent entre 1 et 2 (Achite, 2005; Ben Khaled et al., 2003; Bouannani et al., 2004...).

Les flux modélisés sur les stations étudiées peuvent être réalistes et utilisables. La qualité des flux modélisés est encore plus meilleure puisque les critères d'évaluation sont en effet tous bons notamment sur la station d'Ain Hamara. Pour la station d'Oued Abtal, les critères Nash et EAM sont moins bon en calage et en validation (tableau 9.3). Si l'on ne dispose que de données instantanées des débits, ce modèle peut être envisagé afin de compléter des séries incomplètes.

### III.3.3-Modélisation à partir de la relation débit/concentration à l'échelle journalière

L'application du modèle « rating curve » a porté sur les valeurs journalières des débits liquides en  $m^3/s$  et des concentrations en  $g/l$ , mesurées au niveau des cinq stations: O. Abtal sur la période 1971-1997 ; S. A. Djillali de 1971 à 1997, A. Hamara de 1971-1997, Takhmert de 1971-1997 et en fin la station de S. A. B. Amar sur la période 1971-1997. Sans tenir en compte des valeurs nulles (qui représentent les jours où l'oued est en sec).

Ainsi, les résultats obtenus ont montré que les courbes de transport sédimentaire peuvent varier significativement d'une station à l'autre, les droites de régressions apparaissent surestimer les concentrations en MES correspondant à des débits faibles à élevés. La grande diversité des phénomènes hydroclimatiques rend la relation entre les débits moyens journaliers et les concentrations moyennes journalières très variable. Malgré que les coefficients de détermination figurés dans les graphiques montrent qu'il existe une relation puissance évidente entre les deux paramètres, mais les critères d'évaluation sont tous moins bons, les concentrations modélisées sur les cinq stations sont irréalistes et inutilisables. Ce type de modèle n'est pas du tout en mesure de représenter les concentrations journalières, que ce soit en calage ou en validation.

### III.3.4- Modélisation par corrélation multiple

L'estimation des flux peut être améliorée au travers d'une corrélation multiple, ce modèle peut être appliqué si l'on dispose de données supplémentaires comme la pluie et la température par exemple.

#### III.3.4.1-Modélisation par corrélation multiple appliquée à l'échelle journalière

Dans cette partie, les variables explicatives utilisées sont : le débit moyen journalier et son carré ( $Q_j$  et  $Q_j^2$ ), le cumul de pluie liquide journalier, celui de la veille et leur carré respectif ( $P_{tj}$ ,  $P_{tj-1}$ ,  $P_{tj}^2$  et  $P_{tj-1}^2$ ). Les carrés des variables sont introduits afin de prendre en compte les non linéarités des relations entre les flux de sédiments et les débits ou les pluies. La pluie au jour  $j-1$  est utilisée de manière à prendre en compte la réponse du bassin versant et le temps de transfert des sédiments (Mano et al., 2006). Malheureusement nous ne disposons pas de données de pluies journalières des quatre stations O. Abtal, S A Djillali, Takhmert et S A B Amar, donc cette partie de modélisation va concerner uniquement la station d'A. Hamara.

En utilisant l'algorithme de sélection ascendante pas à pas (Deguen Séverine, 1998), toutes les variables explicatives citées plus haut sont introduites dans le modèle. Le tableau III.2 présente les coefficients  $a_i$  calés.

**Tableau III.2-** Coefficients de régression multiple, obtenus sur la période de calage (1971-1997), pour la station d'A. Hamara.

Les variables explicatives $X_i$	$Q_j$	$Q_j^2$	$P_{tj}$	$P_{tj-1}$	$P_{tj}^2$	$P_{tj-1}^2$	$b$
les coefficients $a_i$	3861,59	4,21	-2907,01	945,46	231,55	-113,21	-4364,16

#### III.4.2-Modélisation par corrélation multiple appliquée à l'échelle mensuelle

Une modélisation par régression multiple va être aussi appliquée à l'échelle mensuelle. les variables explicatives utilisées dans ce cas sont: le débit moyen mensuel et son carré ( $Q_{moy}$  et  $Q_{moy}^2$ ), le cumul de pluie liquide mensuel, celui du mois précédent et leur carré respectif ( $P_{tm}$ ,  $P_{tm-1}$ ,  $P_{tm}^2$  et  $P_{tm-1}^2$ ), ainsi que les pluies journalières maximales ( $P_{jmax}$ ) et leur carrés .

La pluie au mois  $m-1$  est utilisée afin de prendre en compte l'état de saturation du sol et les temps de transfert sur le bassin versant. Les  $P_{jmax}$  sont introduites dans le modèle pour prendre en considération l'influence des pluies intenses dans le bilan sédimentaire mensuel.

Toutes les variables explicatives définies précédemment sont introduites pour toutes les stations.

#### **Résultats :**

Pour toutes les stations, le modèle régression multiple présente des résultats déjà intéressants, en période de calage. Cependant, les critères de validation chutent de manière impressionnante lorsque l'on utilise le modèle en validation pour les stations de Sidi Ali Ben Amar et Takhmert. Cette mauvaise représentativité du modèle en validation peut être due soit à une surestimation importante des flux simulés sur cette période, caractérisée par une dynamique sédimentaire faible en comparaison à la période de calage soit à la qualité des données. Les flux modélisés en dehors de la période de calage sont très éloignés de la réalité, donc ce modèle n'est pas en mesure de retranscrire la variabilité des flux en validation sur ces stations.

### **III.4- Optimisation des relations $\log(MES) = f \log(\text{débit})$**

#### **III.4.1- Principes et objectifs**

La quantification du flux des MES à l'échelle du bassin versant de l'Oued Mina a montré la forte contribution des événements de crue dans la quantité totale des sédiments transportés. Il est donc indispensable d'adapter des fréquences de mesure adéquates pour quantifier correctement les flux annuels transportés. Mais celles-ci peuvent être difficiles à mettre en œuvre notamment en épisode de fortes crues. Un recours à l'insuffisance des mesures de haute résolution, est de déterminer les courbes de transport sédimentaire « rating curves », (Coynel, 2005) qui permettent de reconstituer les valeurs manquantes des flux à partir des seules mesures de débits.

L'application du modèle « rating curves »,  $C = aQ^b$  à l'échelle journalière sur le bassin étudié, n'a pas abouti à des résultats encourageants.

Dans ce contexte et dans le but de linéariser les séries de débit qui se suivent pas une loi normale qui est une condition de la corrélation multiple, le choix de la fonction Log a été adopté et nous allons dans ce qui suit appliquer le modèle « rating curves » séparément par années et sur la période totale, pour évaluer les variations interannuelles des régressions au niveau des stations étudiées. Nous allons aussi calculer les flux annuels en utilisant différentes approches de modélisations et nous déterminerons par la suite, celles qui reproduisent au mieux les flux.

#### **III.4.2- Variation interannuelle des courbes de transport sédimentaire**

Cette partie est basée sur l'interprétation de la relation  $C = aQ^b$  établie entre les concentrations et les débits enregistrés durant les périodes d'études des cinq stations.

#### **Résultats**

La courbe de régression présentant la pente la plus faible est l'année 1985-86 au niveau de la station d'Oued Abtal, cette année est hydrologiquement sèche, mais elle présente de faibles à moyennes concentrations en MES (maximum 59.63 g/l) et le débit journalier maximum est de l'ordre de 261.13 m<sup>3</sup>/s. En effet, le faible nombre de crues majeures durant cette année a pu influencer l'allure de la droite de régression. La plus grande part (55%) du flux total annuel est transitée durant une crue enregistrée pendant le mois de mars où le débit maximum instantané atteint 364 m<sup>3</sup>/s. La courbe qui présente la pente la plus faible à Sidi Aek Djillali correspond aussi à une année sèche (1985-1986). Les concentrations durant l'année 1985/86 sont importantes par rapport aux débits enregistrés, la concentration maximale journalière (262.62 g/l) est liée à un débit de 1.28 m<sup>3</sup>/s, enregistré pendant le mois de novembre, alors que le débit journalier maximum (64.41 m<sup>3</sup>/s) correspond à une concentration de 68.29 g/l enregistrée pendant le mois d'octobre. Donc, le paramètre débit ne permet pas à lui seul d'interpréter la variabilité interannuelle des courbes de régression. Pour la station d'Ain Hamara, la courbe de l'année 1993-94 montre la pente la plus faible sur la période d'étude, cette année est hydrologiquement sèche.



La concentration maximale journalière de l'année 1994/95 (57.10 g/l) est liée à un débit de 139.21 m<sup>3</sup>/s ce qui correspond à une crue survenue le 22 septembre.

Les résultats de la station de Ain Hamara semblent assez bons pour les paramètres a, b et R<sup>2</sup> comparés aux autres stations.

La courbe qui présente la pente la plus faible à Takhmert correspond aussi à une année sèche (1984-1985). Les concentrations durant l'année 1985/86 sont importantes par rapport aux débits enregistrés, la concentration maximale journalière (39.25 g/l) est liée à un débit de 3.70 m<sup>3</sup>/s, enregistré pendant le mois de juillet, alors que le débit journalier maximum (16.82 m<sup>3</sup>/s) correspond à une concentration de 9.70 g/l enregistrée pendant le mois de novembre. A signaler que durant l'année 1993-94, la concentration maximale journalière était de 2294g/l contre un débit de 17.60m<sup>3</sup>/s, il s'agit d'une crue en mois de septembre.

A la station de Sidi Ali Ben Amar, la courbe de l'année 1986-87 montre la pente la plus faible sur la période d'étude avec une concentration maximale journalière égale à 25.90g/l et un débit de 90.20m<sup>3</sup>/s.

À l'inverse, il apparaît que les courbes des années 1994-95, 1971-72, 1998/99, 1987/88 et 1989/90, respectivement pour Oued Abtal, Sidi Abdel Kader Djillali, Ain Hamara, Takhmert et Sidi Ali Ben Amar, sont caractérisées par les plus fortes pentes. L'année 1998-99 est l'une des années caractérisée par un fort transport solide sur la station d'Ain Hamara. Cette année est hydrologiquement sèche, ce qui explique bien les fortes concentrations en MES enregistrée notamment en octobre. Outre ces faibles débits, l'année 1993-94 à oued Abtal est une année hydrologiquement sèche, elle succède à une autre année sèche qui enregistre des crues inférieures à 120 m<sup>3</sup>/s durant la saison du printemps et par une longue période d'étiage couvrant la saison d'été et plongeant jusqu'à l'automne de l'année en question. A signaler que, des valeurs correspondant à des crues importantes (Q<sub>max</sub>>300 m<sup>3</sup>/s) sont enregistrées durant les saisons d'automne à partir de l'année 1993/94. L'année 1979/80 au niveau de la station d'Ain Hamara, est caractérisée par de faibles débits avec quelques crues modérées durant l'automne, le printemps et l'été. De plus, elle succède à une année sèche caractérisée par un apport solide limité. Ces cinq années présentent un exemple de la présence de matériels facilement mobilisables pour des débits modérés. Il est intéressant de signaler également que les coefficients a et b de la droite de régression sont fortement influencés par le nombre important des valeurs faibles de débits et de concentrations notamment sur l'affluent de l'oued Mina en amont de la station de Sidi Ali Ben Amar.

### **III.4.3- Détermination des courbes de transport tronquées**

Vu la grande variabilité du régime hydrologique à l'échelle du bassin étudié, marqué par les grands écarts entre les débits annuels et les débits instantanés ou journaliers, nous avons effectué plusieurs essais en filtrant toutes les concentrations en MES correspondant à des débits inférieurs à un multiple de débit interannuel. Nous avons choisi par la suite de filtrer les concentrations en MES correspondant à des débits inférieurs à 6 fois le débit interannuel, pour toutes les stations retenues. Cependant, lors de l'étude de la relation  $C = aQ^b$  (répartition des flux en MES en fonction des débits), nous avons constaté, qu'au niveau de la station de Sidi Aek Djillali, se sont les débits moyens qui contribuent d'une façon importante dans la charge solide totale transitée. Alors, c'est la raison pour laquelle nous avons jugé utile de prendre aussi en considération les débits moyens dans la détermination des courbes tronquées. Ceci pourra se faire par une suppression des concentrations associées aux débits inférieurs à 1.5 fois le débit interannuel. Il faut noter que, la gamme de débit concernée par les deux types de suppressions, ayant peu d'impact en termes de flux. À titre d'exemple, à la station de S A Djillali les flux de MES correspondant aux débits inférieurs à 6Q<sub>m</sub> ont contribué à 199 034 t en 1993-94 (soit 5.7% du flux annuel), et ce, en 303 jours.

## **Résultats**

Quelles que soient les valeurs de corrélation, les coefficients des régressions des différentes stations sont comparés entre eux pour analyser les variations temporelles et

spatiales. Ces coefficients de régression de l'ensemble des stations étudiées, ont mis en évidence de disparités suivant les stations.

Les droites de régressions moyennes déterminées à partir de l'intégralité des données disponibles pour les cinq stations étudiées, à l'échelle instantanée et journalière, indiquent que la plus forte valeur de concentration en MES ( $C_{\#}$ ) est obtenue à l'échelle journalière, pour la station d'O. Abtal (~12 g/l) liée à un débit de 6  $Q_m$ . Le bassin de l'oued Mina à la station d'O. Abtal et Sidi Aek Djillali est caractérisé par des quantités importantes du matériel mobilisable. Il faut rappeler, que la station d'Oued Abtal est située à la confluence des deux branches principales (oued Mina amont et oued Abd) drainant quatre sous bassins versants de typologies différentes. Ce qui justifie l'importance des valeurs de turbidités par rapport aux trois autres stations (Ain Hamara, Takhmert et Sidi Ali Ben Amar). A l'inverse, les stations de Ain Hamara et Sidi Ali Ben Amar présentent des valeurs faibles de turbidité notamment pour 1.5 $Q_m$ , ceci est dû à l'influence de la pluie, l'humidité du sol et la température de l'eau (Meddi, 1992), ainsi que les facteurs topographiques, du bassin de l'oued el abd à A. Hamara, qui sont moins favorables à l'écoulement (pentes modérées) et un couvert végétal caractérisé par un surpâturage et une discontinuité étendue.

Il faut signaler, qu'il n'existe pas de grandes différences entre les deux régressions appliquées à l'échelle instantanée et journalière, sauf pour les stations d'Ain Hamara et Sidi Ali Ben Amar, où l'écart entre les coefficients semble un peu important. Les données de ces stations s'écartent de ce comportement notamment à l'échelle instantanée, car c'est des stations à fort impact anthropique.

Par ordre croissant de valeur de pente, la succession des stations étudiées est : Sidi Ali Ben Amar < Ain Hamara < Takhmert < Sidi Aek Djillali < Oued Abtal pour les courbes tronquées liées aux débits inférieurs à 6,0 $Q_m$ . Dans le cas des débits inférieurs à 1,5 $Q_m$ , c'est l'inverse : Oued Abtal < Sidi Aek Djillali < Takhmert < Ain Hamara < Sidi Ali Ben Amar. (Pour les données journalières), ce résultat confirme l'importance des débits moyens dans le transport des sédiments à l'échelle des stations Ain Hamara et Sidi Ali Ben Amar.

Les coefficients des équations de régression obtenus à partir des relations entre les concentrations tronquées et les débits étudiés séparément par année permettent une comparaison plus directe de différentes années. A titre d'exemple pour la station de Sidi Aek Djillali, les valeurs de la pente sont comprises entre -0.14 et 0.78 pour 6 $Q_m$ ; elles correspondent respectivement à 1975-76 et 1990-91. Les valeurs de  $C_{\#}$  sont comprises entre 21.83 g/l (1975-76) et 3.35 g/l (1990-91). L'ajustement des courbes tronquées dépendrait donc des conditions hydrologiques car la plus forte valeur de la pente correspond à une année humide (1990-91), où nous avons enregistré l'apport solide le plus important (débit solide moyen 249.7kg/s) alors que durant l'année 1975-76 l'apport solide était limité (débit solide moyen =37.7kg/s). Mais cette remarque n'est pas toujours évidente car plusieurs facteurs naturels et anthropiques entrent en jeu dans la dynamique sédimentaire.

Une corrélation négative est observée entre les  $C_{\#}$  et les pentes, la courbe la plus redressée est celle d'oued Abtal pour 6 $Q_m$  avec un coefficient de corrélation de -0,84. La position du couple de coefficients (pente et  $C_{\#}$ ) varie d'une année à l'autre et pourrait être reliée aux caractéristiques du bassin évoluant elles-mêmes avec le temps (disponibilité des sédiments, débit maximum...) (Coynel,2005).

### **III.5-Calcul des flux par la méthode $\log(C)=f \log(Q)$ et $\log(Q_s)=f \log(Q)$**

Le choix d'une méthode de calcul performante est devenue une préoccupation majeure, afin d'estimer au mieux les flux annuels. Dans cette partie, les flux sont calculés en utilisant les courbes sédimentaires  $\log(C)=f \log(Q)$  et  $\log(Q_s)=f \log(Q)$ , les incertitudes des deux méthodes sont évaluées à partir des données journalières de débits (solides et liquides) et des concentrations en MES.

En plus de la période totale, nous avons sélectionné pour chaque station, trois années de données  $\log(C)$ ,  $\log(Q_s)$  et  $\log(Q)$ , représentant différentes conditions hydrologiques, une année sèche, (Oued Abtal : 1993-94, S A Djillali : 1992-93, Ain Hamara : 1993-94, Takhmert : 1998-99 et Sidi Ali Ben Amar :1992-93) ; une année humide (1995-96 pour les

stations de Oued Abtal, Ain Hamara et Takhmert et l'année 1994-95 pour les stations de S A Djillali et Sidi Ali Ben Amar) et une année normale (Oued Abtal et Ain Hamara :1990-91, Sidi Aek Djillali et Takhmert : 1997-98 et Sidi Ali Ben Amar : 1995-96). Pour chaque année, deux courbes de régression ( $\log(C)=f \log(Q)$  et  $\log(Q_s)=f \log(Q)$ ) ont été effectuées, les mêmes régressions ont été également établies sur les périodes totales (figure 9.5, 9.6, 9.7, 9.8 et 9.9). Les concentrations en matières en suspension C, les débits solides  $Q_s$  et les flux annuels en matières en suspension (Flux prédit) ont été recalculés à partir des droites de régressions en utilisant les débits mesurés.

Pour les deux types de régressions, les flux mesurés sont différents parce que les méthodes de calcul du débit solide sont différentes. Le calcul des débits solides journaliers pour la régression  $\log(C)=f \log(Q)$  a été effectué en multipliant directement les débits moyens journaliers par les concentrations moyennes journalières.

## Résultats

Des différences peuvent être établies entre les paramètres (concentrations en MES et débits solides) mesurés et ceux prédits, mettant en évidence une grande tendance à la sous-estimation qu'à la surestimation notamment pour les débits solides (e.g. sous-estimation de – 3346.2 Kg/s, surestimation de 11.56 Kg/s en 1993-94). Or, nous avons également soulevé des comportements inverses au niveau de la relation  $\log(C)=f \log(Q)$ , mais dans tous les cas on ne préjuge de la pertinence de ces régressions dans l'estimation du flux. L'écart-type des erreurs varie considérablement lors d'une utilisation d'une régression à une autre, d'une station à l'autre et d'une année à l'autre. De même, un des critères de jugement d'un modèle peut être l'erreur faite entre le flux « prédit » et le flux « mesuré », exprimée en %, . Cette erreur apparaît faible lors de l'utilisation des régressions pour les années sèches et moyennes, mais il en est l'inverse lors des années humides et les périodes totales. Il faut signaler également que, les comparaisons dans les données (concentrations en MES et débits solides) mesurées et prédites de la station de Sidi Aek Djillali montrent des surestimations importantes pour les deux types de régressions. En effet, ces régressions ne permettent pas, de représenter correctement le comportement des flux au niveau de cette station, car le nuage de point est probablement influencé par le fort poids des faibles valeurs.

### III.5.1- Correction des données par les méthodes de Ferguson et de Duan

L'utilisation de modèle puissance dans un repère arithmétique sous-estime systématiquement les flux annuels. C'est lors de la transformation mathématique de l'espace logarithmique «  $\log Y = a \log X + b$  » à l'espace arithmétique «  $Y=10^a Q^b$  » que le biais statistique apparaît (Coynel, 2005 ; Petelet-Giraudet *et al.*, 2005 ; Mano 2008). Ce biais augmente de plus en plus en fonction du degré de dispersion des points autour de la droite de régression. Il est donc primordial d'avoir recours à des facteurs correctifs, dans notre cas nous avons utilisé deux facteurs correctifs celui de Ferguson CF1 et l'autre de Duan CF2.

## Résultats

D'une façon générale, les flux prédits à partir des régressions et avec correction (Flux corrigé) minimisent les sous-estimations des flux sans correction (Flux prédit), ce résultat est plus marqué en utilisant le coefficient de correction CF2, et aussi lors des années humides (figures 9.5, 9.6, 9.7, 9.8 et 9.9). Au niveau de la station d'Oued Abtal, la sommation des flux prédits individuellement par année permet d'acquérir des estimations du flux total (de 1971 à 2002) avec une précision de -48% à l'aide des régressions  $\log(Q_s)=f \log(Q)$  et avec correction(en utilisant le CF2) et de +78% avec la régression  $\log(C)=f \log(Q)$ . Les précisions sont respectivement de -53% et +103 % si l'on utilise une unique régression « moyenne », en utilisant respectivement les relations  $\log(Q_s)=f \log(Q)$  et  $\log(C)=f \log(Q)$  , établie à partir du cumul des 32 années de données. On peut donc remarquer que l'utilisation de la sommation de régressions individuelles permet de reproduire avec une meilleure précision le flux total durant la période 1971-2002 que celui obtenu à partir des régressions moyennes. Ce résultat

soulignerait la difficulté d'élaborer une courbe de régression moyenne pouvant s'adapter à l'estimation des flux pour des situations hydrologiques distinctes. Cette remarque a été déjà soulevée par d'autres auteurs (Horowitz, 2002; Coynel, 2005), toutefois plus marqué en utilisant le coefficient de correction CF2.

### III.6-Calcul des flux par la méthode des relations tronquées

Dans ce qui précède, nous avons constaté que l'élaboration des courbes de transport, peut être fortement influencé par le fort pourcentage des faibles valeurs des concentrations en MES et de débits, qui forment un nuage de points diffus. Ainsi, vu la faible contribution de ces faibles valeurs au flux annuel, l'estimation des flux à partir des régressions tronquées devrait donc dépendre de la validité de ces courbes. Toutefois, le calcul des flux à partir des régressions tronquées a été établi en adoptant une méthodologie de calcul proposée par Coynel, 2005 et dont les résultats étaient satisfaisants. Cette technique de calcul peut s'opérer en deux étapes :

- 1) la première étape vise à calculer les flux en substituant les valeurs de débits supérieurs à  $6Q_m$  dans l'équation de régression tronquée.
- 2) la deuxième étape consiste à estimer les flux en MES pour les jours où les débits étaient inférieurs à  $6Q_m$ . Cette estimation est effectuée en attribuant une valeur moyenne des concentrations (moyenne arithmétique calculée à partir des valeurs de concentrations correspondant aux débits inférieurs à  $6Q_m$ ), à tous les débits filtrés.

### Résultats

Les résultats issus de l'application des deux régressions couplées sur Oued Abtal et Sidi Aek Djillali, montrent une amélioration bien nette des estimations des flux annuels et pluriannuels, au regard des régressions présentées précédemment. Cependant, la prédiction des flux de quelques années reste médiocre (eg. 1993-94, pour oued Abtal et 1998-99 pour S A Djillali). Cette moins bonne précision est partiellement inhérente au fait que la contribution au flux annuels des débits inférieurs à  $6Q_m$ , durant ces années est plus importante.

Toutefois les flux totaux correspondant aux périodes (1971-2002) pour Oued Abtal S A Djillali, sont reproduits respectivement avec des erreurs de -12% et -6,54 % à partir de la somme des estimations individuelles et -12.67%, -21.43% par les estimations basées sur l'intégralité des données. Cette bonne précision notamment pour la somme des flux individuels, pourrait être partiellement liée à l'effet de compensation des erreurs entre les années.

### III.7- Comparaison de la validité des courbes de transport dans l'estimation des flux

Au terme de cette partie concernant les courbes de transport sédimentaire, nous proposons d'effectuer une analyse comparative de la pertinence des différentes techniques appliquées pour l'estimation des flux annuels. Pour cela, nous avons retenu trois méthodes appliquées sur les données des deux stations : Oued Abtal et Sidi Aek Djillali vu que ces deux stations contrôlent des sous bassins qui sont responsables du transport solide dans le bassin de l'oued Mina, en effet la station d'oued Abtal contrôle le 5/6 du bassin de l'oued Mina soit plus de 5000km<sup>2</sup> ainsi que la station de Sidi Aek Djillali contrôle une zone marneuse d'environ 500km<sup>2</sup> :

- 1)-les courbes de transport «  $\log Q_s = b \log Q + \log a$  » représentant l'intégralité des données : méthode M1.
- 2) -les courbes de transport tronquées : méthode M2.
- 3) -les relations entre les flux annuels et les débits annuels, et les coefficients « *Four* » : méthode M3.

## 1. La station d'Oued Abtal

La méthode qui semble suivre au mieux les variations des flux est la méthode M2. La méthode M3, estime les flux de manière globale au travers du débit moyen annuel et de l'indice « *Four* », il semble donc que l'équation de régression ne parvient pas à prendre en compte la dynamique du transfert sédimentaire (saisonnalité du transport solide), en outre, les valeurs des erreurs calculées sont très élevées en particulier pour l'année 1984/1985 (Année à faible transport de sédiments). Les flux de sédiments sont généralement sous-estimés pour les années de fort et faible transport, alors que les années de moyen transport, montrent une forte tendance à la surestimation (e.g.1985-86,1993-94). Au contraire, ces années moyennes sont estimées d'une manière précise et acceptable en utilisant la méthode M1 sans correction.

## 2. La station de Sidi Aek Djillali

À part les deux méthodes de correction où les flux sont presque tous surestimés, les autres techniques de calcul que celles utilisées pour la station d'Oued Abtal ont été effectuées sur les données de S A Djillali. Comme, nous l'avons déjà constaté pour la station d'oued Abtal, la méthode M2 semble apporter d'importantes améliorations par rapport à la méthode M1. La dynamique et la variabilité des flux sont bien reproduites sur les années d'étude. Cependant, la méthode M3 semble prise à défaut, sur l'année 1999-00(année de faible transport), où l'erreur est très importante. De même, les flux de sédiments sont généralement sous-estimés pour les années de fort et faible transport, alors que les années de moyen transport, montrent une forte tendance à la surestimation (e.g.1989-90,1996-97). Sur l'ensemble du sous bassin, les erreurs sur les flux reproduits restent importantes, ceci peut s'expliquer par le fait que, l'oued Haddad à la station de Sidi Aek Djillali reste responsable de la forte dynamique sédimentaire à l'oued Mina (région marneuse).

## III.8- Modèle d'érosion en fonction de la concentration des sédiments en suspension et du débit liquide durant les crues et le phénomène d'Hystérésis

### III.8.1-Ajustement du modèle puissance ( $C=aQ^b$ ) à l'échelle de la crue

L'examen des données instantanées des débits et des concentrations mesurés au niveau des cinq stations à savoir: Oued Abtal, S. A. Djillali, Ain Hamara, Takhmert et S. A. B Amar durant les périodes considérées, nous a permis de sélectionner les crues durant la période d'étude. La concentration des sédiments en suspension  $C$  et le débit liquide évoluent également suivant un modèle de puissance  $Y = a X^b$  (Etchanchu *et al.*, 1986 ; Walling *et al.*, 1981 ; Wood,1977). En effet, nous avons analysé cette relation (débit / concentration) pour des crues individualisées sur les données des cinq stations étudiées.

Les résultats trouvés, montrent la prédominance des crues automnales avec plus de 48 %, 45%, 46%, 58% et 26% du total recensé, respectivement pour Oued Abtal, S A Djillali, Ain Hamara, Takhmert et S A B Amar. On observe cependant, l'absence de fortes crues durant la saison d'hiver notamment pour les stations de Takhmert et S. A. B. Amar, ceci est due essentiellement aux pluies de fortes intensités de la saison d'automne (Meddi, 1992). L'examen des coefficients de détermination montre que l'ajustement au modèle puissance à l'échelle de la crue est acceptable, malgré que la signification statistique reste médiocre à faible pour quelques crues. Cependant, l'augmentation des débits s'accompagne de l'accroissement des concentrations en matière en suspension dont le pic de concentration peut s'observer soit en concomitance avec celui des débits soit déphasé avec la possibilité d'être avant ou après le pic de débit. La dispersion de la relation concentration-débit peut être liée à l'écart entre les concentrations en sédiments pour des mêmes valeurs de débits situées soit lors des phases montantes, soit lors des phases descendantes (d'où le phénomène d'hystérésis).

### III.8.2- Modélisation par régression multiple à l'échelle de la crue

Une partie de la variabilité des relations entre les concentrations en MES et les débits à l'échelle de la crue semblent pouvoir être reliées aux conditions antécédentes à l'échelle du bassin versant (le phénomène d'hystérésis et la notion du stock sédimentaire). Deux événements similaires d'un point de vue hydroclimatique, peuvent engendrer des quantités de flux de MES très différentes, et ceci en fonction du stock de sédiments facilement mobilisables. Ainsi, toujours en se basant sur la relation puissance une modélisation par régression multiple peut être également envisagée. Il s'agit de prendre en considération l'influence des événements passés dans l'application de ce modèle (Hiromu *et al.*, 2002), en introduisant les différentes durées dans la corrélation multiple.

D'après Hiromu *et al.* 2002, la durée  $D_2$  permet une explication de variance maximale dans la corrélation multiple. La corrélation sera meilleure en utilisant la forme :

$$C = aQ^b D_2^c$$

L'application de cette relation a amélioré considérablement les coefficients de détermination à l'échelle de toutes les crues sélectionnées, un résultat similaire présenté dans une publication ((Hiromu *et al.*, 2002)), a déjà été relevé. L'introduction de  $D_2$  dans la relation puissance a permis de tenir compte des phénomènes de dépôt/reprise.

### III.8.3-Evolution de la concentration des sédiments et du débit liquide à l'échelle de la crue

Parmi ces crues, 25 événements ont été analysés représentant des épisodes ayant différentes caractéristiques. Cette sélection n'est pas exhaustive, mais elle permet de fournir le maximum d'informations sur la relation C-Q, en identifiant le modèle d'hystérésis dominant, en insistant en particulier sur l'effet saisonnier.

Léopold *et al.* (1964) ont analysé les enregistrements de concentration des sédiments en suspension-débit liquide dans plusieurs bassins des Etats Unis et ont constaté qu'une grande partie de la charge annuelle de sédiments s'est produite durant les crues modérées avec répétition fréquente.

### III.8.4- Caractérisation des boucles d'hystérésis

Le tracé des graphes temporels de la concentration et du débit, pour l'ensemble des sous bassins, a permis de constater les caractéristiques typiques pour chaque crue. La procédure de classement des crues sélectionnées est effectuée de la manière suivante :

- (a) regrouper les boucles qui ont la même orientation et la même forme.
- (b) séparer les boucles d'une même classe ayant différentes formes en analysant les critères retenues dans la bibliographie.

## Résultats

Les résultats obtenus confirment bien que le rapport C/Q est le critère fondamental dans l'identification des boucles d'hystérésis. Les autres paramètres n'apportent que des détails concernant la largeur et l'orientation de la boucle. Néanmoins, les valeurs du coefficient de variation  $C_v$  donnent une idée sur l'intensité des fluctuations des concentrations et de débits, ce paramètre indique aussi, l'orientation des boucles : un coefficient de variation faible indique une orientation presque horizontale (Benkhaled et Remini, 2003), (La crue du 23-24/08/1997 Sidi Aek Djillali et la crue du 17/08/1996 Oued Abtal, tableau III.3., L'asymétrie n'affecte ni la forme de la boucle ni son orientation.

### II.8.5. Interprétation de l'hystérésis observées à l'échelle du bassin versant

#### - Classe II

Le modèle « clockwise loop » se présente essentiellement en hiver et au printemps. Cependant, en référant aux crues analysées dans ce chapitre, nous remarquons que les crues enregistrées ayant des mesures de la concentration sont plus fréquentes en hiver et au printemps dans les stations d'oued Abtal, Takhmert, S.A.B. Amar, Ain Hamara et S.A.

Djillali. Ce modèle apparaît en été et au printemps dans les stations de SA Djillali, S.A.B. Amar et Ain Hamara, sachant que dans la station de S.A. Djillali les crues survenues en automne sont plus importantes que celles d'hiver.

Suivant que les boucles possèdent un axe à orientation horizontale telles que les crues du 08/03/1986 (O. Abtal), du 01/01/1988 (S.A.D.) et celle du 25/08/1997 (A. Hamara) ou un axe à orientation verticale (le reste des crues), le caractère cyclique de la relation C-Q peut être illustré en trois phases dans la boucle (ex. crue du 6-8/03/1986 de la figure 10.4.). La première phase est caractérisée par une forte augmentation de sédiments en suspension et du débit (Benkhaled et Remini, 2003). Cette phase reflète l'arrivée successive des premières charges fines de sédiments issus de l'effet du « splash » des pluies torrentielles dans les zones de ruissellement proches de l'exutoire du bassin. Elle peut correspondre également à la remobilisation des matériaux déposés sur le fond lors des basses eaux (Kattan et al., 1987). La seconde phase se distingue par une diminution de la concentration en suspension et une forte augmentation du débit. Cette phase de transport correspond à la dilution de la concentration des sédiments et peut être également attribuée à l'érosion des berges du cours d'eau (Kattan et al., 1987). La troisième phase est caractérisée par une diminution de la concentration en suspension et du débit. Elle correspond particulièrement au dépôt des sédiments sur le lit de l'oued et dans les zones alluviales (Benkhaled et Remini, 2003).

### - Classe III

Le modèle « counterclockwise loop » devient moins fréquent dans les sous bassins étudiés (tableau 10.4). Les crues de ce modèle surviennent essentiellement en hiver et au printemps, sauf pour les stations de SA Djillali, Ain Hamara et SAB Amar qui montre des crues opérant aussi en automne, par contre la station d'Oued Abtal affiche une crue en été. Contrairement au modèle de la classe II dont la plupart de la charge des sédiments est sujette à un transport sans un dépôt net dans le cours d'eau, le modèle de la classe III, défini par un débit de pointe se plaçant avant la concentration maximale, reflète un dépôt net des sédiments dans le cours d'eau (Jansson, 2002). La boucle « counterclockwise loop » peut se former aussi quand le graphe C et le graphe Q ont des montées simultanées pour atteindre le même maximum. C'est le cas de la crue du 03/11/1982 au niveau de la station de SA Djillali et la crue 23/09/1993 à SAB Amar (Fig. 10.6.).

D'une manière générale, les crues de cette classe sont caractérisées par un temps de montée supérieur au temps de concentration des bassins et une concentration en suspension qui peut atteindre des valeurs assez élevées (environ 100 g/l). Cela peut être indicatif quant à l'érodibilité du sol, plus au moins saturé et moins couvert.

Ce modèle représenté par les crues des figures 10.2.3.4.5.6, peut être le résultat de deux possibilités :

### - Classe V

Cette classe en huit comporte des crues qui surviennent principalement en hiver et au printemps avec une certaine proportionnalité, en relation avec ces deux saisons, en automne dans les stations d'Oued Abtal et S.A. Djillali, Ain Hamara. Concernant ces crues, la montée de crue (sédiment et débit) commence en même temps. Le taux de montée de la concentration est plus grand que le débit dans la crue du 06-07/03/1986 (Ain Hamara) et la concentration maximale arrive avant le débit de pointe (fig. 10.4). Ceci donne une boucle dans le sens des aiguilles d'une montre « clockwise loop ». La disponibilité des sédiments après le pic et le transport est assez élevé d'où une diminution moins rapide de la concentration avec le temps. A des débits faibles, les rapports C/Q sont plus grands en décrue qu'en montée de crue. Ceci signifie que les valeurs de C en décrue sont plus élevées que celles pendant la montée de crue. C'est donc la boucle « counterclockwise loop » qui se produit.

Les autres crues présentent une augmentation moins brusque et une montée plus au moins simultanée des deux graphes jusqu'au maximum, après une certaine valeur de C. la décrue apporte encore une importante à assez importante quantité de sédiments, le sol paraît encore érodable ou disposé à alimenter les cours d'eau de matériaux fins.

En plus, l'ensemble des crues analysées montre une convergence des extrémités de la boucle à cause de l'étalement des deux distributions de C et Q, surtout au niveau des crues de S.A. Djillali et Oued Abtal.

## **II.9. Analyse de la pertinence des courbes de transport dans l'estimation des flux pour les événements de crue**

Cette étude porte sur les valeurs instantanées des débits liquides (Q en m<sup>3</sup>/s), des concentrations (C en g/l) et des débits solides (Q<sub>s</sub> en kg/s), des crues mesurées au niveau des sous bassins de l'Oued Mina, respectivement aux stations d'Oued Abtal et S.A. Djillali. Les couples (C,Q) et (Q<sub>s</sub>,Q) des crues sélectionnées de chaque saison ont été regroupés par saison afin de déterminer les droites de régression de type :

$$\log Q_s = (b+1)\log Q + \log(a) \quad (Q_s = a Q^{b+1}) \quad \text{et} \quad \log C = b\log Q + \log a \quad (C = a Q^b)$$

Des flux ont été déterminés (flux prédits) à partir de l'application des régressions, déterminée pour chaque saison, un flux total prédit à partir d'une régression moyenne sur l'ensemble des crues est également calculé. Outre les coefficients de corrélation, la représentativité du modèle est évaluée par l'erreur sur les flux prédits.

Au regard des coefficients de corrélation, les résultats des modèles d'ajustement: débit solide/débit liquide sont assez significatifs, (coefficient de corrélation varie entre 0.87 et 0.95) pour toutes les applications. En ce qui concerne la relation liant les débits liquides aux concentrations, on note une amélioration remarquable en comparaison au modèles appliqués sur l'ensemble de la donnée instantanée, et ce malgré que les coefficients de corrélation restent faible à médiocre.

Il apparaît également à travers les résultats que le calcul des flux à partir des courbes de transport à l'échelle des crues, montre de bonnes précisions, notamment pour la station d'Oued Abtal. Les erreurs entre les flux établis et les flux de référence, sont faibles et ce, particulièrement pour les saisons d'hiver et de printemps.



## Conclusion

Au terme de cette étude, nous pensons avoir contribué à la connaissance des problèmes de transport solide en suspension en particulier dans le bassin de l'oued Mina. On parvient aux conclusions suivantes :

1- Tout d'abord, en ce qui concerne la synthèse bibliographique et qui a traité les différents aspects relatifs au transport solide en suspension. Au travers de cette étude bibliographique nous avons donc pu nous rendre compte des connaissances acquises dans ce domaine. Mais des lacunes subsistent dans la connaissance des processus de transport solide. Il apparaît que le transport solide dans les cours d'eau ne correspond pas à une propriété facilement mesurable. Il est maintenant considéré comme une combinaison de réponses complexes influencées par les caractéristiques intrinsèques des sols et des variables extrinsèques environnementales (pluviométrie, lithologie, couvert végétal, pente).

Dans le domaine du transport solide en suspension, le problème fondamental demeure la relation concentration — débit liquide ou débit solide-débit liquide. De récents développements ont été faits en matière de mesure et d'estimation des charges solides. Les approches d'estimation sont multidisciplinaires. L'exposé des différentes méthodes d'estimation a permis d'adopter dans le reste du travail une approche par régression qui est à notre avis performante selon le type d'échantillonnage adopté sur le réseau hydrométrique Algérien.

2- L'objectif principal de l'étude étant la compréhension du phénomène et l'estimation du transport solide en suspension, ce travail, basé sur les données observées, durant la période 1971-2002, a été conduit sur le bassin de l'Oued Mina. Ce bassin représente un échantillon des bassins du Nord de l'Algérie qui sont caractérisés par un taux de transport solide élevé en raison de nombreux facteurs mis en jeu.

Ce travail est divisé en trois parties :

1- Tout d'abord, nous avons essayé de caractériser les principaux facteurs physico-géographiques qui ont un rôle déterminant dans le mécanisme hydrologique.

L'étude cartographique des facteurs géomorphologiques (lithologie, pente, couvert végétal) montre que la lithologie est un facteur prépondérant dans l'induction du débit solide.

Le bassin versant est caractérisé par des altitudes allant de 100 m à 1300m, et par des pentes très favorables à l'écoulement dans le bassin versant de l'oued Haddad, et des pentes moins favorables à l'écoulement dans les bassins versants de l'oued El Abd aval.

Du point de vue lithologique, le bassin versant est caractérisé par une dominance de calcaires (jurassique supérieur et moyen, Miocène supérieur marin, Crétacé inférieur marin, Crétacé moyen, Pliocène continental), et des argiles et des marnes en faible pourcentage.

2- dans la deuxième partie, nous avons analysé de manière beaucoup plus détaillée la pluviométrie et les écoulements sur le bassin.

De 1968 à 2007, la variabilité hydroclimatique s'est matérialisée par une alternance d'années humides et sèches au regard de l'évolution des indices pluviométriques et hydrométriques. Sur l'ensemble des sous bassins du bassin de l'oued Mina et après le milieu des années 70, on enregistre des indices pluviométriques positifs. Ceci est caractéristique de pluies annuelles supérieures à la moyenne interannuelle du fait d'un régime pluviométrique excédentaire pendant cette période. Pour la séquence 1976-1994, près de 90% des années concernées correspondent à des indices pluviométriques et hydrométriques négatifs traduisant un régime pluviométrique déficitaire. Un retour aux années excédentaires a lieu après cette séquence déficitaire jusqu'en 1998. A partir de 98, on enregistre une alternance d'indices positifs et négatifs.

Par conséquent, le régime hydrologique du bassin de l'oued Mina est directement influencé par celui des précipitations mais subit aussi, avec un effet retard, l'incidence du cumul de déficits pluviométriques répétés.

Un caractère excédentaire des pluies depuis 1968 jusqu'au milieu des années 70. Cependant, certains épisodes à la baisse sont enregistrés durant la fin des années 60 et le début des années 70.

Depuis les années 80 jusqu'à nos jours, cette zone a connu l'une des périodes les plus déficitaires en intensité et en persistance. On constate donc que la variation des pluies traduit bien l'évolution et le changement du régime pluviométrique dans cette zone. Mais la sécheresse observée durant ces dernières décennies est principalement due à la baisse des pluies.

3- Cette troisième partie a été consacrée à l'étude du transport solide en suspension.

L'analyse de l'évolution des concentrations en suspension en fonction des débits liquide durant les crues des cinq sous bassins versants de l'oued Mina a fait montrer trois (03) modèles de courbe (dans le sens d'une aiguille d'une montre 'clockwise loop », dans le sens contraire d'une aiguille d'une montre « counterclockwise loop » et forme de huit). Les modèles des classes II et V sont les plus fréquents, traduisant ainsi une forte disponibilité des sédiments après une saison sèche où le sol est particulièrement fragilisé et l'apparition des concentrations en suspension se pointer avant le débit de pointe. Nous ne pouvons pas négliger le modèle de la classe III qui s'impose également. Il reflète un approvisionnement en sédiments même pendant la décrue.

Ces études, bien que sur du long terme, montrent la nécessité d'acquérir des données supplémentaires, continues et précises, pour permettre une meilleure compréhension des cycles d'apport de MES et pouvoir modéliser finement les relations concentrations en  $MES = f(Q)$ . Les transports en suspension de l'oued Mina et de ses affluents présentent des variations spatio-temporelles considérables. Elles seraient dues au régime pluviométrique, au couvert végétal et à la lithologie. En général, les variations saisonnières des apports solides suivent celles des apports liquides. Les valeurs maximales des apports solides, pour l'ensemble des sous bassins, sont observées en début d'automne et à la fin du printemps, cette variabilité s'explique par la variation du couvert végétal (sols nus) durant l'année et à la nature agressive des pluies d'automne (fortes intensités). Ces deux facteurs permettent aux premières crues d'automne de transporter des quantités importantes de sédiments (Plus de 80%) après une longue saison sèche caractérisée par de fortes températures et par la destruction des agrégats du sol.

Enfin, les phénomènes érosifs, conditionnés par les crues, leurs impacts notamment sur les barrages peuvent être considérable. Une bonne gestion de ces réservoirs au cours des crues et une mise en place de dispositifs pour empêcher ces sédiments de s'accumuler s'avère indispensable pour limiter l'alluvionnement très rapide.

Tout au long de ce travail, nous avons essayé d'exploiter le maximum de données d'observations et de bibliographique. Des lacunes existent, nous en sommes conscients. Beaucoup d'efforts et de progrès ont été accomplis dans ce domaine en Algérie. Une méthodologie de travail existe.

Nous pensons que les résultats obtenus, doivent être améliorés en augmentant la taille des séries de données disponibles et au fur et à mesure que de nouvelles techniques de mesure et d'analyse apparaissent. Nous recommandons :

- D'étudier le processus d'épuisement des sédiments, à la condition qu'un grand nombre de données concernant les surfaces ou états de sol soient disponibles (donc implantation de bassins expérimentaux et disponibilité d'images satellisables) .

- Déterminer les formes d'érosion dominantes dans ce bassin.  
Détermination des taux d'érosion des berges, car les flux annuels de sédiments en suspension arrivant à l'exutoire du bassin de l'oued Ouahrane, n'ont, pour l'heure, pas été quantifiés.
- Une estimation du transport solide total par la mesure du charriage.
- Un effort supplémentaire doit être fait en matière de qualité des données par l'utilisation d'échantillonneurs automatiques et l'emploi de la méthode d'exploration du champ de vitesses.

## Références bibliographiques

A.B.H., 2004. Cadastre hydraulique du bassin hydrographique Cheliff. 1ere et 2<sup>eme</sup> partie. Ministère des ressources en eau. pp 1-62 et 1-52

A.N.R.H., 1993. Carte Pluviométrique de l'Algérie du Nord à l'échelle 1/500000. Agence Nationale des Ressources Hydriques. Ministère de l'Equipement. Ed. I.N Alger.

A.N.R.H, 2010. Les changements climatiques et leur impact sur les ressources en eau en Algérie. Assises Nationales sur l'Eau. ANRH. Alger, 41 p.

Diallo, D. (2000) Erosion des sols en zone soudanienne du Mali: transfert des matériaux érodés dans le bassin versant de Djitiko (Haut Niger). Université Joseph Fourier; IRD, Grenoble I, France.

Achite M. et Meddi M., 2005: Variabilité spatiotemporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride. Cas du bassin versant de l'Oued Mina (nord-ouest algérien). Rev. Sci. Eau, 18, 37–56.

Achite M. and Ouillon S., 2007: Suspended sediment transport in a semiarid water-shed, Wadi Abd, Algeria (1973–1995). J. Hydrol, 343, 187–202.

Agoumi, A., 2003. Vulnérabilité des pays du Maghreb face aux changements climatiques. Institut international du développement durable. Winnipeg (Manitoba)

Asselman, N.E.M., 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves. Journal of Hydrology N° 234. pp 228-248.

Benkhaled, A., Remini, B., 2003. Analysis of a sediment rating curve in Wahrane river basin (Algeria). Revue des Sciences de l'Eau N° 16/3. pp 333-356

Benkhaled, A., Remini, B., 2003. Influence des paramètres hydrométéorologiques sur l'estimation des apports solides dans un bassin versant de zone semi aride. L'oued Ouahrane. Colloque International Oasis, Eau et Population. Biskra. 22-23 et 24 Septembre.

Benkhaled, A., Remini, B., 2003. Temporal variability of sedithent concentration and hysteresis phenomena in the Wadi Wahrane basin. Algeria. Hydrological Sciences Journal. N° 48(2). pp 243-255

Benkhaled, A., Remini, B., Mehaiguene, M., 2004. Influence of antecedent precipitation index on the hydrograph shape. Case of Ouahrane river basin. Algeria Proceedings of British Hydrological Society International Conference Imperial College 12-16 July 2004 London pp 81-87.

Bobee, B., El Adlouni, S., Hamdi, Y., Mario, H., Fortin, V., 2008. HYFRAN – PLUS 1.2 INRS-Eau with collaboration of Hydro- Québec Hydraulic Service (Department Hydrology) in the framework of Hydro-Québec/CRSNG statistical hydrology Chair.

Bouanani A., Mania J., Bensalah M., Baba Hamed K., 2004. Le comportement d'un système hydrologique en climat méditerranéen par l'analyse corrélatrice et spectrale des débits et des pluies : cas de trois sous- bassins sud méditerranéens (oueds Sebdu, Mouilah et Isser – Tafna- NW Algérie). Pub. Soumise, Rev. Sci. De l'eau.

Bouchelkia M, Belarbi F et Remini B., (2011). Quantification du transport solide en suspension par analyse statistique : Cas du bassin versant de Mouilah. Revue Scientifique et Technique. LJTE n°19. Décembre 2011.

Boulaine, J., 1956. Etude des sols de la plaine du Chélif.

Cosandy C., 1984. Recherche sur le bilan de l'eau dans l'ouest du massif Américain. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Paris IV, 515 p, 1984.

Coynel A. (2005). Érosion mécanique des sols et transferts géochimiques dans le bassin Adour- Garonne. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1.

Deguen, S., 1998. Méthode de multivariées la régression linéaire multiple. Sang Thrombose, volume 10, numéro 9.586-90 novembre 1998. Note méthodologique.

Demmak, A., 1982. Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de docteur-ingénieur, Paris, 323 p.

Demmak, A., Ouair, M., Guedjtal, A., 1991. Quantification de l'érosion l'exutoire de micro-bassins en zone semi-aride. Séminaire Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride. Ed John Libbey. Paris. Pp 179-188

Diallo, D. (2000) Erosion des sols en zone soudanienne au Mali, transfert des matériaux érodés dans le bassin versant de Djitiko (haut Niger). Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble I, France, 200 p.

Dubreuil, P., Guiscafne, J., 1971. La planification du réseau hydrométrique minimal. Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie, vol. VIII, n°2, 3-38.

Etchanchu D., Probst J.L. 1986. Erosion et transport de matières en suspension dans un bassin versant en région agricole. Méthode de mesure du ruissellement superficiel, de sa charge et des deux composantes du transport solide dans un cours d'eau, C.R Acad. SCI. Paris, série II, 30, 17, 1063-1068.

Ferguson, R.I., 1986. River loads underestimated by rating curves. Water Resources Research N° 22. pp 74-76.

Ferguson, R.I., 1987. Accuracy and precision of methods for estimating river loads. Earth Surf Processes and Landforms. N° 12. pp 95-104

Hallouz, F., Meddi, M., Mahe, G., 2013. Modification du régime hydroclimatique dans le bassin de l'oued Mina (Nord Ouest d'Algérie). Revue des Sciences de l'Eau, 26, 1, 33-38.

Hiromu O., Tetuaki N., Takashi I. et Tadao Y. (2002). Effect of previous flood on suspended sediment transport during rainstorm runoff. 12th ISCO conference, Beijing.

- Horowitz, J.A., 2002. The use of rating (transport) curves to predict suspended sediment transport concentration: a matter of temporal resolution. Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop, April 30 - May 2. 2002. Reno. NV
- Hubert, P., Carbonnel, J.P., Chaouche, A., 1989. Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, vol.110, 349- 367.
- HYDRACCESS: <http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/hydraccess.htm>. Version 4.3
- Jansson, M.B., 1996. Estimating a sediment rating curve of the Reventazon river at Palomo using logged mean loads within discharge classes. *Journal of Hydrology* 183, 227–41.
- Jansson, M.B., 1997. Comparison of sediment rating curves developed on load and on concentration. *Nordic Hydrology* 28 (3), 189e200.
- Kassoul, M., Albdelkader, A., Belorgey, M., 1997. Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie revue des sciences de l'eau
- Kattan, Z., Gac, J.Y., Probst, J.L., 1987. Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senegal basin. *Journal of Hydrology*. N° 92. pp 59-76.
- Keith. R., Cooley, R., 1980. Erosivity values for individual design storms. *Journal of Irrigation and Drainage* N° 106. pp 135-145.
- Kergoet, M., 2001. Exemple d'étude de traitement pour déterminer l'emploi d'un sol en couche de forme bulletin L P C Est parisien
- Khanchoul, K., 2006. Quantification de l'érosion et des transports solides dans certains bassins versants du Nord-Est algérien. Unpublished Ph.D. thesis, Department of Geology, University of Annaba, Algeria.
- Lahlou, A., 2002. Nécessité d'une gestion appropriée du bipole eaux-dévidés en Afrique du Nord. Colloque International sur l'eau Chlef 05-05 Fév. 2002.
- Laouina, A., Aderghal, M., Al Karkouri, J., Chaker, M., Machmachi, I., Machouri, N., Sfa, M., 2010. Utilisation des sols, ruissellement et dégradation des terres, le cas du secteur Sehoul, région atlantique, Maroc. *Sécheresse*, 21, 4, 309-316.
- Léopold, L.B, Wolman, M.G. et Miller, J.P., 1964. *Fluvial processes in geomorphology*, San Francisco.
- Liéno, G., Sighomnou, D., Sigha Nkamdjou, L., Mahé, G., Ekodeck, G.E., Tchoua, F. (2003) Système hydrologique du Yaéré (Extrême-Nord Cameroun), changements climatiques et actions anthropiques : conséquences sur le bilan des transferts superficiels. In : *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions. Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003* (ed. by Servat E., Najem w., Leduc C., Shakeel A.), 215-222, IAHS publ. 278.
- Lienou, G., 2007. Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et le transport des matières en suspension de quelques bassins-versants représentatifs des unités climatiques au Cameroun. Thèse de doctorat PhD, université de Yaoundé I.

- Lienou, G., Mahé, G., Olivry, J.C., Naah, E., Servat, E., Sigha-Nkamdjou, L., Sighomnou, D., Ndam Ngoupayou, J., Ekodeck, G.E., Paturel J.E., 2005. Régimes des flux de matières solides en suspension au Cameroun : revue et synthèse à l'échelle des principaux écosystèmes ; diversité climatique et actions anthropiques. *Hydrol Sci J*, 50, 111-23.
- Lloyd-Hughes, and. Saunders, M.A. 2002. A Drought climatology for Europe. *International journal of climatology Int. J. Climatol.* **22**: 1571–1592 (2002).
- Mahe, G., Aderghal, M., AlKarkouri, J., Benabdelfadel, H., Bensafia, D., Brou, T., Chaker, M., Chikhaoui, M., Coupleux, S., Crouzevialle, R., Dieulin, C., Emran, A., Ezzaouini, M., Goussot, E., Hallouz, F., Khomsi, K., Laouina, A., Machouri, N., Maleval, V., Meddi, M., Nging, M., Planchon, O., Remini, B., Rouche, N., Saadi, H., Sfa, M., Sinan, M., Snoussi, M., Taibi, S., Toumi, S., Tra Bi, A., Yahiaoui, S., Zerouali, A., 2013. Etude de l'évolution de l'occupation du sol sur deux grands bassins d'Algérie et du Maroc, et relation avec la sédimentation dans les barrages. In: *Considering hydrological change in reservoir planning and management*, (A. Schumann, V.B. Belyaev, E. Gargouri, G. Kucera, G. Mahe, Eds), IAHS Publ. 362, 115-124.
- Mano, V. 2008. Processus fondamentaux conditionnant les apports de sédiments fins dans les retenues - optimisation des méthodes de mesure et modélisation statistique – Thèse de doctorat. Université Joseph-Fourier - Grenoble
- Mano V., Moatar F., Coynel A., Etcheber H., Ludwig W., Meybeck M., Nemery J., Poirel A., Blanc G. et Schafer J. (2006). Space and time variability of suspended particulate matter (SPM) transport in 32 French Rivers (100 to 100 000 km<sup>2</sup> ; daily to yearly). In *Sediment Dynamics and the Hydromorphology of Fluvial Systems* (Poster Report Booklet), ICCE IAHS International Symposium, Dundee, Scotland, pp. 29–37.
- Meddi, M., 1992. Hydro-pluviométrie et transport solide dans le bassin-versant de l'Oued Mina (Algérie). Thèse de doctorat Uniq, université Louis Pasteur, Strasbourg, 285 p.
- Meddi, H., 2001. Quantification des précipitations : application au Nord Ouest Algérien-méthodologie Pluvia. Mémoire de Magister, Centre Universitaire de Mascara, 160 p.
- Meddi M, Meddi H. Sécheresse météorologique et agricole dans le nord-ouest de l'Algérie. Deuxième colloque méditerranéen sur l'eau et l'environnement, Alger, 2002.
- Meddi M, Hubert P, Bendjoudi H. Évolution du régime pluviométrique du Nord-Ouest de l'Algérie. Actes du colloque international sur l'eau dans le Bassin Méditerranéen (WATMED) « Ressources et développement durable », Monastir (Tunisie), 2002.
- Meddi, M., Hubert, P., 2003. Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-ouest de l'Algérie *Hydrology of die Mediterranean and Semiarid Regions* (Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003). IAHS Publ. no. 278.
- Meddi, M., Meddi, H., Assani, Ali, A., 2010. Variabilité temporelle des précipitations dans les bassins de la Macta et la Tafna, Nord Ouest d'Algérie. *Water Ressource Management*.
- Meguenni, K., Remini, B., 2008. Evaluation du débit solide dans le bassin versant de Harreza (Algérie). *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 07, Juin 2008, 7-19.
- Moss A.J., Walker P.H. et Hutka J. (1979). Raindrop-stimulated transportation in shallow water flows : an experimental study. *Sedimentary Geology* 22, pp. 165–184.

Mounirou, L.A., 2012. Etude du ruissellement et de l'érosion à différentes échelles spatiales sur le bassin versant de Tougou en zone sahélienne du Burkina Faso : Quantification et transposition des données. Thèse de doctorat. Université de Montpellier II, France.

Paturel, J.E., Serval, E., Kouame, B., Lubes, H., Ouedrogo, M. Masson, J., 1997. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea, Part 11: An integrated regional approach. *J. Hydrol.* 191, 16-36.

Pouquet J. (1952) - Les Monts du Tessala (chaînes sud-telliennes d'Oranie). Essai morphogénétique. Thèse de Doctorat d'État, Édit. SÉDES, Paris, 351 p.

Roche, M., 1960. Hydrologie de surface. Gauthier VILLARS. Paris.430 p

Servat, E., Paturel, J.E., Kouamé, B., Travaglio, M., Ouedraogo, M., Boyer, J.F., Lubès-Niel, H., Fritsch, J.M., Masson, J.M., Marieu, B. (1998) Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. In : *Water Resources Variability in Africa during the Xxth century. Proceeding of Abidjan '98 Confrence held at Abidjan, Côte d'Ivoire, Novembre 1998* (ed. by Servat E., Hughes D., Fritsch J.M. et Hulme M.), 323-337. IAHS Publ. 252.

Servat, E., Paturel, J.E., Lubès-Niel, H., Brou, K., Masson, J.M., Travaglio, M., Marieu, B. (1999) De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale. *Revue des sciences de l'eau* **12**(2), 363-387.

Solter, D. (1992) Les bases de la production végétale, le sol – le climat – la plante. Tome 2; Le climat : Météorologie - Pédologie - Bioclimatologie.

Talia, A., Meddi, M., 2004. La pluvio- variabilité dans le Nord de l'Algérie. Actes du colloque « Terre et Eau » (Annaba, 2004), p. 477-480.

Terfous, A., Meghnounif, A., Bouanani, A., 2001. Etude du transport solide en suspension dans l'oued Mouillah (Nord Ouest Algérien). *Rev. Sci. Eau*, 14 : 173-185.

Touaibia, B., 2000. Erosion - Transport solide – Envasement de barrage. Cas du bassin versant de la Mina dans la wilaya de Relizane. Thèse de Doctorat d'Etat en aménagement hydraulique. Institut National Agronomique. Alger.

Touaïbia, B., Gomer, D., Aïdaoui, A., Achite, M., 2001. Quantification et variabilité temporelles de l'écoulement solide en zone semi-aride, de l'Algérie du Nord. *Hydrol. Sci. J.* 46(1), 41–53.

Touazi, M., Laborde, J.P., 2000. Cartographie des pluies annuelles en Algérie du Nord. *Association Internationale de climatologie*, 13, 192-198.

Verhoff F.H., Melfi D.A. and Yaksich S.M., 1980. River Nutrient and Chemical Transport Estimation. *Journal of the Environmental Engineering Division*, Vol. 106, No. 3, May/June 1980, pp. 591-608.

Walling, D.E., Webb, D.W., 1981. The reliability of suspended sediment load data. Erosion and sediment transport measurement, *Proceedings of the Florence Symposium, June 1981*) IAHS Publ. No. 133.

Wischmeier W.H. et Smith D.D. (1978) - *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. Édit. US Department of Agriculture, Washington, vol. 537, 58 p.

Wood P.A., 1977. Controls of variation in suspended sediment concentration in river Rother, West Sussex, England. *Sedimentology*, 24, 437-445.