

Production de sédiments en suspension et typologie des crues dans les zones steppiques algériennes : cas du bassin versant de l'oued Saida.

Production of suspended sediment and flood typology in areas of Algerian steppe : the watershed of Wadi Saida.

Fouad YLES (1) & Abderrazak BOUANANI (2)

Abstract: This work focuses on the quantification of sediment flux and the study of the relationship between the concentration of suspended sediment C and the liquid flow rate Q_L for a hydrological event such as floods. The results of analysis (sampling campaigns from 1980 to 2010) have shown the importance of seasons in the understanding of hydrological processes in the basin. The mean of the soil erosion rate is evaluated at 55 t.km⁻².an⁻¹ varying between 2 and 276 t.km⁻².an⁻¹. The analysis of 11 floods recorded on river Saida is made from the look of graphs representing C depending Q_1 that draw three models of hysteresis curves: clockwise, counterclockwise and shaped eight. Of the 11 flood studied those with an hourly pace for the C- Q_1 relationship are maximum concentrations and generally high flows. Loops in the counterclockwise and eight-shaped direction of the relationship C- Q_1 characteristics of winter and spring floods present the lowest concentrations, soil conditions, and ground cover are the erosive action is diminished.

Key words: suspended matter, sediment discharge, flood, hysteresis, steppe zone

Résumé: Ce travail s'intéresse à la quantification du flux sédimentaire et l'étude de la relation entre la concentration de sédiments en suspension C et le débit liquide Q_I, pour un événement hydrologique tel que les crues. Les résultats d'analyse (campagnes de prélèvement de 1980 à 2010), ont permis de montrer l'importance des saisons dans la compréhension des phénomènes hydrologiques dans ce bassin. Le flux de matières solides en suspension dans le cours d'eau est très variable d'une année à une autre et la dégradation spécifique moyenne annuelle est estimée à 55 t.km⁻².an⁻¹ variant de 2 à 276 t.km⁻².an⁻¹. L'analyse de 11 crues enregistrées sur l'oued Saida est réalisée à partir de l'allure des graphes représentant C en fonction de Q₁ qui dessinent trois modèles de courbes d'hystérésis : dans le sens horaire, antihoraire et en forme de huit. Sur les 11 crues étudiées, celles présentant une allure horaire pour la relation C-Q₁ correspondent à des concentrations maximales et des flux généralement élevés. Les boucles dans le sens antihoraire et en forme de huit de la relation C-Q₁ caractéristiques des crues d'hiver et de printemps présentent les concentrations les plus faibles, l'état du sol et la couverture végétale font que l'action érosive se trouve diminuée.

Mots clefs : Matières en suspension, débit solide, crue, hystérésis, zone steppique

INTRODUCTION

L'eau est devenue, ces dernières années pour de nombreux pays dont l'Algérie, une problématique d'ordre stratégique. En effet, l'Algérie est confrontée aujourd'hui à un manque d'eau important dû à la semi-aridité de son territoire, aux faibles précipitations et à la sécheresse qui sévit d'année en année. L'érosion hydrique en Algérie, varie d'une région à l'autre. La partie ouest du pays est la plus érodée, où l'érosion touche 47% de l'ensemble des terres, suivie du centre 27% et de l'est 26%. La forme la plus grave de l'érosion en Algérie est l'érosion par ravinement du réseau d'écoulement qui peut représenter à elle seule plus de 50 % de l'apport solide annuel, (TOUAÏBIA, 2010).

Dans les zones steppiques, et plus particulièrement dans la région de Saida, le climat est très agressif. Les pluies torrentielles sont fréquentes en automne, au moment où la couverture végétale est absente. Des intensités, dépassant 36 mm/h ont été observées, générant des crues violentes, rapides et chargées, ayant une efficacité élevée en transport solide.

La crue dépend essentiellement de la quantité et de l'intensité de la pluie. La vitesse de montée de débit est largement influencée par le couvert végétal, la lithologie et les paramètres morphométriques du bassin (indice de compacité, densité de drainage, rapport des confluences et des longueurs, pente des talwegs et forme du lit, (COSANDEY & ROBINSON, 2000). L'origine des sédiments dans le réseau d'écoulement et l'érosion en nappe des versants n'apporte qu'une faible part au transport solide des oueds (DEMMAK, 1982).

⁽¹⁾ Université Dr Moulay Tahar de Saida, Département d'hydraulique, BP 138 Saida 20000 Algérie. Courriel : ylesfouad@yahoo.fr

⁽²⁾ Université de Tlemcen, Département d'hydraulique, BP 119 Tlemcen 13000 Algérie

Les sources majeures des sédiments directement mobilisés par les oueds lors des fortes crues se trouvent au niveau des ravinements, des éboulements en masse des versants entaillés par l'érosion des oueds.

L'analyse du transport solide par événement peut permettre de déterminer la provenance des sédiments transportés par l'analyse des courbes représentant la concentration en fonction du débit liquide. Plusieurs études sur l'évaluation et l'analyse spatiale de la variabilité temporelle des sédiments en suspension ont été menées par différents chercheurs au cours de la dernière décennie, (EVANS & DAVIES, 1998), (MEGNOUNIF et al., 2013), (ACHITE & MEDDI, 2005), (ACHITE & OUILLON, 2007), (GHENIM et al., 2008), (BATTALA & SALA, 1994), (CHIKITA et al., 2002) et (ZABALETA et al., 2007). Ces auteurs ont analysé les facteurs qui agissent à la fois sur le débit liquide et le débit solide dans les cours d'eau. Un effet d'hystérésis est observé lorsque la concentration de matières en suspension présente différentes valeurs à des débits identiques à différentes étapes de la crue. Dans ce contexte, on notera les travaux de (WILLIAMS,1989), (WALLING, 1974), (ASSELMAN & MIDDLEKOOP, 1998), (HODKINS, 1999), (PICOUET et al., 2000), (JANSSON, 2002), (BENKHALED et al., 2003), (LE FRANCOIS et al., 2003), (BACCA, 2008), (GURNELL, 1987), (LENZI & MARCHI, 2000), (BRASINGTON & RICHARD, 2000), (TAVARES,2010), (SEEGER et al., 2004), (GELLIS, 2013) qui ont pu identifier les sources de sédiment dans un système en analysant systématiquement ces relations d'hystérésis. La relation entre la concentration en matières en suspension et le débit est influencée par la succession de trois périodes.

La première période (désagrégation) est caractérisée par une forte augmentation de la concentration de sédiments en suspension et du débit. Cette phase est définie par l'arrivée des premières quantités de matériaux en suspension produites essentiellement par l'effet *splash* des pluies érosives dans les zones de ruissellement proches de l'exutoire du bassin (BENKHALED & REMINI, 2003-a). Cette période peut aussi correspondre à la remobilisation des matériaux déposés sur le fond du cours d'eau lors des basses eaux (KATTAN *et al.*, 1987).

La seconde période (transport) est caractérisée par une diminution de la concentration des matières en suspension et une forte augmentation du débit. Cette phase de transport correspond à la dilution de la concentration en sédiments. Pendant cette période peut également se produire l'érosion des berges du cours d'eau (KATTAN et al., 1987), (DINEHART, 1992).

La troisième période (dépôt) est caractérisée par une diminution conjointe de la concentration de matières en suspension et du débit. Cette phase correspond au dépôt des matériaux sur le lit des cours d'eau et dans les zones alluviales du bassin (BENKHALED & REMINI 2003-b)

D'autres facteurs que l'enchaînement désagrégation-transport-dépôt contrôleraient également l'hystérésis, notamment la taille du bassin versant, la hauteur des pluies et l'humidité du sol (KLEIN, 1984).

L'étude a été menée dans le bassin versant de l'oued Saida. L'oued contribue à l'envasement du barrage de Wizert, barrage en service depuis 1978. La capacité de stockage qui était initialement de 100 millions de mètres cubes a été estimée à 44,8 millions de mètres cubes en 1994 à cause de l'envasement (DJEZIRI, 1998). Devant de tels problèmes et afin de déterminer la durée de vie des barrages, il faut mettre en application une meilleure stratégie de gestion de ressources en eau. La recherche sur la dynamique des sédiments souligne la nécessité d'une meilleure compréhension des variations de l'érosion, le dépôt, le stockage et la dynamique des sédiments dans une variété de bassins versants et des rivières.

L'objectif de ce travail est la quantification des sédiments en suspension et du taux d'érosion d'une part et d'autre part, l'analyse détaillée des boucles d'hystérésis montrées par les relations C-Ql durant la période hydro-pluviométrique étudiée. Nous essayons par la suite de caractériser et de classer ces différentes relations pour une meilleure compréhension du phénomène afin d'identifier la source de provenance des sédiments.

ZONE D'ÉTUDE

Le bassin versant de l'oued Saida fait partie du grand bassin de la Macta qui s'étend au nord-ouest de l'Algérie, dans les derniers contreforts tabulaires du versant sud de l'Atlas tellien, formé par les monts de Tlemcen, de Daya et de Saida, au seuil des hautes plaines steppiques. Il est situé entre l'extrémité des monts de Daya au nord et la région des hauts plateaux au sud. Il est entouré par les monts de Daya à l'ouest (Sidi Ahmed Zeggai), au sud par la montagne de Sidi-Abdelkader et les fameux tétons de Aicha, à l'est par les monts de Saida avec entre autre le djebel Tiffrit qui culmine à 1200m. Le bassin versant occupe la partie sud-est de la Macta, sa structure est celle d'une vallée entaillée du Sud au Nord (Figure 1). Le bassin d'oued Saida occupe une superficie de 543 km² pour un périmètre de 131 km. Il est de forme modérément allongée (coefficient de compacité Kc = 1,61). La topographie du bassin est marquée par une dénivelée assez importante présentant un relief accidenté dominé par des pentes allant jusqu'à 25% sur la partie amont du bassin, tandis que les pentes inférieures à 3 % correspondent aux plaines situées à l'aval du bassin. Le réseau hydrographique présente un chevelu bien hiérarchisé, de faible densité mais assez ramifié. Le bassin est caractérisé par différents types de sols décrits et répertoriés par l'étude de pédologie effectuée par la (DSA, 2010). Ils se classent comme suit : les versants sont occupés par des sols minéraux bruts comportant très peu d'éléments friables, à l'origine des sols bruns calcaires et rouges fersialitiques.

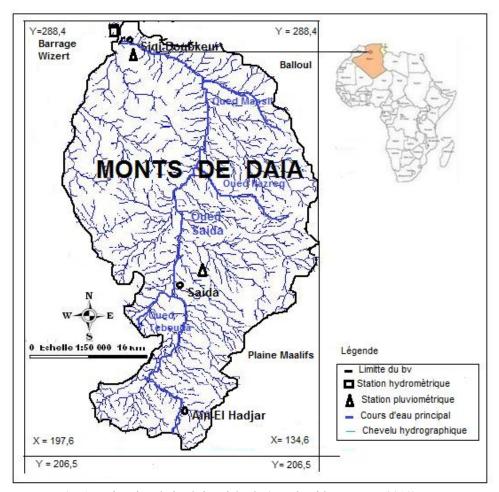


Fig. 1: Situation de la région d'étude (Oued Saida, O.N.I.D 2010).

Le bassin versant est essentiellement rural avec un mélange de terre arable et pastorale, où l'agriculture est pratiquée dans les basses terres région de Sidi Khaled et les pâturages des moutons dans les hautes terres région de Ain el Hadjar. Les potentialités forestières sont importantes, cependant la majorité de ces formations sont à l'état de maquis, donc dégradées, qu'il conviendrait de densifier et d'aménager afin de renforcer la stabilité physique du bassin (DGF, 2010). Les caractéristiques biogéographiques montrent un faible taux de recouvrement du sol. Les végétations steppiques très dégradées en association avec des groupements d'Alfa sont des parcours dégradés à très dégradés où l'homme a sérieusement endommagé la nature en faisant disparaître toute végétation naturelle de type arborescent, arbustif et même buissonneux. L'équilibre écologique du milieu est rompu sur toute la partie sud des hauts plateaux saïdiens. Cette rupture est la résultante d'une dégradation générale provoquée par une série de facteurs naturels et anthropiques.

Le plateau de Saida qui fait partie des Monts de Daïa et de Saida, est constitué essentiellement de terrains jurassiques. Quelques terrains primaires ainsi que des terrains éruptifs apparaissent dans la région de Tiffrit—Balloul, limitant ainsi le bassin versant de l'oued saïda dans la partie est. Dans les dépressions ainsi que la vallée et le lit de l'oued, on trouve des terrains d'origine continentale (fluviatile et éolienne) d'âge tertiaire souvent indifférencié : (Mio-Pliocène) et Quaternaire. Le faciès continental est également caractérisé par la présence de tufs et travertins calcaires plus ou moins récents et correspondants à d'anciens griffons de sources. Le bassin est formé d'un plateau pourvu de deux axes principaux tectoniques riches en failles formant un plexus au centre, dont la lithologie est composée de calcaires dolomitiques et d'argiles gréseuses qui affleurent de l'est à l'ouest de l'oued Saida. Ces terrains présentent une très grande sensibilité à l'érosion hydrique et participent pour beaucoup à la production des sédiments à l'aval et couvrent pratiquement 60% de la surface du bassin. Le système de failles du plateau est en communication avec le réseau de failles de la zone effondrée de la vallée de Saïda au niveau de la région de Nazereg (Rebahia). L'ensemble de cette tectonique détermine la karstification et le fonctionnement du système hydraulique de la région (PITAUD, 1973).

Le climat du bassin versant de l'oued Saida est de type semi-aride et caractérisé durant l'année par deux grandes saisons, qui partagent le cycle climatique en deux grandes périodes. Un semestre très froid s'étend de novembre à avril, dont la température minimale avoisine les 2 °C et un semestre sec et chaud avec une température maximale estimée à 37°C. Durant la période hivernale, les températures saisonnières s'abaissent

parfois en dessous de 0°C, d'où l'apparition de phénomènes de gelée et de verglas. À la lumière de ces résultats, on peut dire que la zone d'étude connaît des hivers assez froids et des étés assez chauds. L'évaporation potentielle moyenne annuelle est de 835 mm (YLES, 2014). En matière de précipitations, le bassin versant de l'oued Saida est soumis à l'influence de deux régimes saisonniers opposés. Le premier est sous influence méditerranéenne dominante avec des entrées marines provoquant de fortes précipitations en hiver. Le second est caractérisé par les orages des saisons estivales.

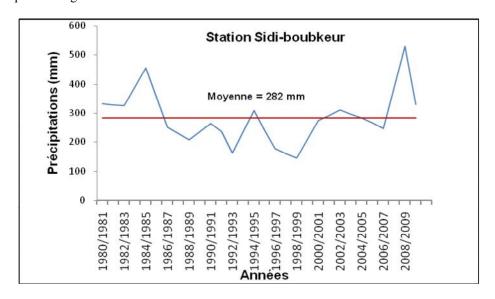


Figure 2. Variation interannuelle des précipitations (1980/81-2009/2010)

Le bassin reçoit entre 144 mm et 530 mm de pluie par an au cours de la période d'étude. La pluviosité moyenne interannuelle est de 288 mm (figure 2) (YLES & BOUANANI, 2012). La région de Saida fait partie des régions de l'Algérie où la moyenne des précipitations annuelles est au-dessous de la moyenne des précipitations au niveau national, un déficit en précipitation semble donc bien marquer la région notamment durant la période (septembre 1985 - août 2003). Le bassin est contrôlé par la station hydrométrique de Sidiboubkeur (Latitude : 35°02' N, Longitude 00°57' E et Z = 540 m).

ACQUISITION DES DONNEES DE PLUIE, DEBIT ET SUR LES SEDIMENTS EN SUSPENSION

Les précipitations utilisées dans cette étude sont celles obtenues à partir d'une commande faite auprès de l'Office National de la Météorologie de Saida (ONMS). La station pluviométrique retenue pour cette étude est celle de Sidi-boubkeur La station est équipée d'un pluviographe destiné à l'enregistrement sur bande papier des évènements pluvieux. Il permet de déterminer non seulement la hauteur de précipitation, mais également sa répartition dans le temps et donc son intensité.

Les débits d'eau et les concentrations de sédiments en suspension ont été fournis par l'Agence Nationale des Ressources Hydrologiques (ANRH, 2010), responsable des stations et des mesures de jaugeage en Algérie (http://www.anrh.dz). Les méthodes de mesures des débits liquides et des concentrations des matières en suspension sont les mêmes dans l'oued Saida que dans les autres rivières de l'Algérie (TERFOUS *et al.*, 2001), (BENKHALED & REMINI, 2003-b), (ACHITE & OUILLON, 2007). Les mesures des débits liquides sont obtenues de deux façons : sur la base de la courbe de tarage à partir des hauteurs d'eau lues sur une échelle limnimétrique d'une part, et par dépouillement des hauteurs d'eau enregistrées par un limnigraphe à flotteur. Les échantillons prélevés manuellement sont stockés dans une glacière à basse température (t = 4 °C) et sont soumis au protocole standard de l'ANRH, pour mesurer les concentrations des sédiments en suspension. Le protocole de l'ANRH est le suivant : les sédiments en suspension sont définis comme la partie totale des particules retenues par une membrane en fibre de verre (Whatman GF/F) de porosité 0,2 μm. Les filtres sont ensuite séchés à l'étuve pendant 1 heure à une température de 105 °C. La charge en suspension se calcule alors par la relation suivante :

$$C = (P_2 - P_1) / V$$

C : La concentration exprimée en grammes par litre.

P₁: La masse du filtre en fibre de verre sec et vide exprimée en grammes avant la filtration.

P₂: La masse du filtre en fibre de verre avec les sédiments en suspension exprimée en grammes.

V : Le volume de l'échantillon filtré exprimé en litres.

Cette charge solide mesurée est attribuée à la concentration instantanée en matières en suspension véhiculées par le cours d'eau en (g.L⁻¹). Le nombre de prélèvements a été adapté au régime hydrologique, iIs sont effectués un jour sur deux. Cependant, en période de crue les prises sont intensifiées jusqu'à des intervalles de temps d'une heure ou même de 30 min en fonction de la vitesse de l'augmentation des débits liquides. Le débit des matières en suspension est donc le produit de la concentration par le débit liquide Q₁ correspondant mesuré en m³.s⁻¹

$$Qs = C.Q_1$$

Qs: Débit solide en suspension en (kg.s⁻¹).

 Q_I : Débit liquide en (m³.s⁻¹).

C: Concentration en (g.L⁻¹).

Le flux des matières solides en suspension exportées par le cours d'eau est calculé par la relation suivante :

$$As = \sum_{i=1}^{N} (t_{i+1} - t_i).(Q_i.C_i).10^{-3}$$

où C_i est la concentration en (g.L⁻¹) mesurée à l'instant t_i exprimé en (s) correspondant au débit liquide Q_i ; N est le nombre de prélèvements effectués pendant la crue; $(t_{i+1}-t_i)$ est le pas de temps séparant deux prélèvements consécutifs. Les apports solides sont exprimés en tonnes ou en millions de tonnes, As (10^6 t ou MT) et les apports spécifiques en tonnes par kilomètre carré par an, Ass (t.km⁻².an⁻¹), la superficie du bassin en (km²).

$$Ass = (As.10^6)/S$$

L'apport liquide Al en (m^3) engendrant le flux As est calculé par la relation suivante :

$$Al = \sum_{i=1}^{N} (t_{i+1} - t_i).Q_i$$

LE REGIME HYDROLOGIQUE DE L'OUED SAIDA

L'alternance des saisons sur le bassin versant s'accompagne d'une certaine divergence quant à la réponse hydrologique du bassin aux différents événements pluvieux. Quoique la lame d'eau écoulée maximale 17,2 mm ait été enregistrée au mois de mars, le mois le plus pluvieux 65,3 mm, il est intéressant de constater qu'en hiver, où le taux de précipitations est le plus élevé avec une moyenne mensuelle de 51,2 mm, la lame d'eau écoulée moyenne était de 5,8 mm, alors qu'à l'automne la hauteur moyenne précipitée de 31mm a donné lieu à un écoulement de 8,7mm. Toutes ces observations sont des moyennes sur la période comprise entre 1982-2009 (Figure 3).

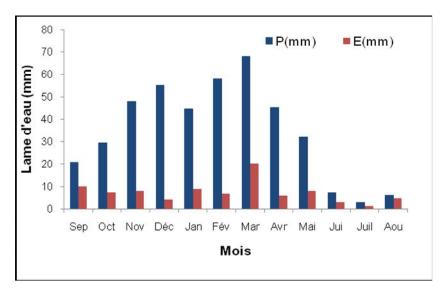


Figure 3. Variation mensuelle des lames d'eau précipitées et écoulées.

Ceci s'explique par le fait que l'eau précipitée dans ce bassin en hiver s'est vraisemblablement infiltrée suite à l'existence de réseau de failles et de formations karstiques, assurant le remplissage des réserves souterraines. Par ailleurs, les premières pluies d'automne trouvent un sol complètement sec, leur apparition sous forme d'averses intenses fait croître brutalement l'écoulement. Ce n'est qu'au mois de mars, où les nappes aquifères sont pleines et le sol saturé, que les maxima des lames écoulées correspondent aux maxima des lames précipitées. En mars ont lieu les dernières fortes pluies de l'hiver et cet apport alimente de nombreuses sources qui voient leur débit tripler ou quadrupler (BOUANANI, 2004). La répartition des pluies quotidiennes sur la période d'étude a montré que la durée de temps sans pluie est évaluée à 80 % sur l'année. Les journées ayant une intensité de pluie comprise entre 5 mm et 20 mm ont correspondu à une moyenne de 20 jours par an et ont contribué à 40 % du total des précipitations annuelles. Près de 20 % des précipitations annuelles ont eu lieu avec une intensité supérieure à 20mm par jour. Les orages de fortes intensités peuvent atteindre 70 mm en 24 heures. Le débit moyen interannuel est de 0,114 m³.s⁻¹ (figure 4).

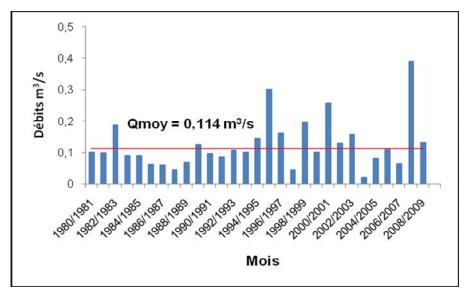


Figure.4 Variation interannuelle des modules de l'Oued Saida

MISE EN ÉVIDENCE DU PHÉNOMÈNE D'HYSTÉRÉSIS DANS LES RELATIONS C-QI.

Cette étude est basée sur les travaux de (WILLIAMS, 1989). Selon cet auteur, les relations entre concentrations de sédiments en suspension C et les débits liquides Q_l pour un événement hydrologique tel que les crues peuvent être étudiées qualitativement par l'analyse des courbes de concentration et des débits liquides en fonction du temps. A cet effet, l'auteur propose une classification de ces relations basée sur le rapport C/Q_l durant les phases de montée de crue et de décrue. Cinq modèles de relations sont ainsi établis (Tableau I).

Les crues représentent un des traits fondamentaux du régime d'un cours d'eau, malheureusement nous ne possédons pas de longues séries de crues pour pouvoir tirer des conclusions globales. Nous nous contentons donc d'exploiter les données disponibles. Les 11 crues prises en considération sont celles qui se manifestent par une variation importante du débit liquide, et dépassent le débit moyen interannuel.

ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSION.

Variabilité de la concentration des matières en suspension

Durant la période d'étude (1980-2010), nous avons analysé un total de 11 crues durant lesquelles nous remarquons une forte variabilité de la concentration des matières en suspension (Tableau II).

Les crues d'hiver et de printemps présentent les concentrations maximales les plus faibles variant entre 10,2 g.L⁻¹ et 27,3 g.L⁻¹. Durant cette période le sol étant plus ou moins saturé et bien couvert résiste mieux à la pluie. En revanche, la saison d'automne est la plus dégradante, car les pluies atterrissent sur une surface asséchée par une absence de pluies de 3 à 4 mois et également fragilisée par la quasi-inexistence du couvert végétal. Ceci explique que la concentration de MES soit la plus importante à cette saison, variant entre 25,5 g.L⁻¹ et 72,5 g.L⁻¹.

Tableau I. Classes des relations C- Q_1 d'après WILLIAMS (1989)

Classe	Modèle	Critère C/Q ₁
I	- Courbe simple (single line), ligne droite.	-(C/Q ₁)m=(C/Q ₁)d. Les pentes des deux sections montée et décrue sont égales.
	- Courbe, la pente croit quand Q ₁	- Les pentes des deux sections montée et
	augmente.	décrue sont inégales.
	- Courbe, la pente décroit quand Q_l augmente.	- Les pentes des deux sections montée et décrue sont inégales.
II	- Boucle dans le sens des aiguilles d'une montre (Clockwise loop).	-(C/ Q_1)m>(C/ Q_1)d. Pour toutes les valeurs de Q_1 .
III	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (Counter-	$-(C/Q_1)m$ $<(C/Q_1)d$. Pour toutes les valeurs de Q_1
	clockwise loop).	-(C/Q ₁)m=(C/Q)d. Pour une partie des valeurs de Q ₁
IV	- Linéaire simple plus une boucle	$-(C/Q_1)m>(C/Q_1)d$. Pour l'autre partie des
	(single line plus a loop).	valeurs de Q ₁
		-(C/Q ₁)m>(C/Q ₁)d. Pour une partie des valeurs de Q ₁
		- $(C/Q_1)m < (C/Q_1)d$. Pour l'autre partie
\mathbf{V}	- Forme en huit (figure eight).	des valeurs de Q ₁

Tableau II. Bilan des précipitations, concentrations, débits liquides et apports liquides pendant les crues enregistrées à la station de Sidi-boubkeur oued Saida (1982-2009)

Date des crues	Saisons	Pj max (mm)	C max (g/L)	Débits max (m³/s)	Flux liquides (10 ³ m ³)	Flux solides (t)
18/09/1982	A	22,9	72,5	1,78	89,0	7321
01 au 02/03/1983	Н	71,7	27,3	3,46	370,0	3055
15/10/1983	A	28,5	47,3	2,24	560,0	9261
11/03/1994	Н	42,5	18,4	4,20	1800,0	4011
28/03/1996	P	18,6	15,6	1,82	850,0	1285
10/01/2001	Н	23,3	18,6	1,66	610,0	1305
10/10/2001	A	19,4	25,5	1,36	1020,0	1712
24/04/2005	P	15,8	10,2	1,76	305,0	0766
27/10/2008	A	29,0	44,5	1,65	701,0	1420
03/12/2008	A	38,8	53,4	2,39	558,0	1146
09 au 10/09/2009	Н	11,3	34,8	1,05	462,0	3025

A: Automne H: Hiver P: Printemps Pj max: Précipitations journalières maximales

Les concentrations des matières en suspension obtenues dans le bassin versant de l'oued Saida sont inférieures aux concentrations mesurées dans certaines régions affectées par l'érosion hydrique : 500 g.L⁻¹ dans l'oued Wahran (BENKHALED & REMINI, 2003), 650 g.L⁻¹ dans l'oued Mouillah (GHENIM *et al.*, 2008), 87 g.L⁻¹ dans l'oued Zita en Tunisie (COLOMBANI *et al.*, 1984). Mais il existe aussi une forte variabilité spatiale de la concentration des matières en suspension dans certaines régions du Sahel soumises à l'érosion hydrique. En effet, la valeur moyenne obtenue dans certains bassins versant du Sahel est nettement inférieure, 1 g.l⁻¹ ChariTchad, 0,230 g.l⁻¹ au Sénégal (OLIVERY *et al.*, 1997).

Bilan des apports solides annuels.

Le calcul du flux en suspension se fait sur une période de 30 années allant de 1980/1981 à 2009/2010. Les résultats obtenus sont représentés dans le (tableau III).

Tableau III. Répartition annuelle des flux solides (en tonnes) et des dégradations spécifiques en (t.km⁻².an⁻¹) dans le bassin versant de l'oued Saida

Année	P (mm)	$A_s(10^6t)$	Ass (t.km ⁻² .an ⁻¹)
80/81	332	0,039	72
81/82	328	0,049	91
82/83	326	0,150	276
83/84	392	0,015	29
84/85	456	0,040	75
85/86	354	0,011	20
86/87	250	0,027	50
87/88	229	0,004	08
88/89	207	0,010	19
89/90	235	0,031	58
90/91	263	0,010	19
91/92	236	0,011	21
92/93	161	0,009	18
93/94	234	0,051	94
94/95	308	0,007	14
95/96	242	0,032	60
96/97	177	0,001	03
97/98	160	0,040	07
98/99	144	0,001	02
99/00	209	0,026	48
00/01	275	0,076	140
01/02	292	0,018	33
02/03	310	0,005	10
03/04	296	0,009	18
04/05	283	0,016	30
05/06	266	0,004	08
06/07	247	0,012	22
07/08	388	0,112	206
08/09	530	0,087	161
09/10	330	0,013	24
Moyenne	282	0,0296	55

Les variations interannuelles des apports solides montrent de grandes fluctuations, liées à l'irrégularité des précipitations. La phase comprise entre les années 1986/1987 et 2000/2001 est marquée par une tendance à la baisse des précipitations qui sont toujours inférieurs à cette valeur moyenne de 282 mm. Il s'agit d'une période de sécheresse longue de 14 années. On remarque aussi, que l'année 1982/1983 est assez remarquable par son apport solide spécifique de 276 t.km⁻².an⁻¹, cinq fois plus grand que la moyenne interannuelle qui est de 55 t.km⁻².an⁻¹. La crue d'octobre 1983, avec un débit de 2,24 m³.s⁻¹ a engendré un flux sédimentaire de 9261 t. Ces taux de dégradation restent cependant très modères par rapport à ceux publiés pour d'autres bassins de l'Algérie On peut citer l'oued Sikkak et Isser (Tafna) avec respectivement (170 et 180 t.km⁻².an⁻¹) (BOUANANI, 2004), l'oued Leham en Algérie orientale (104 t.km⁻².an⁻¹). Mais cette valeur est relativement grande par rapport à

d'autres oueds en Afrique, Sassandra Côte-D'ivoire (12,9 t.km⁻².an⁻¹) (AGRI, 2010), Godim Cap-Vert (10,1 t.km⁻².an⁻¹) (TAVARES, 2010), zone de savane Soudanaise (12,9 t.km⁻².an⁻¹), (DROUX, 2003).

Analyse des apports saisonniers.

Dans le bassin versant de l'oued Saida, c'est en automne qu'on enregistre le plus fort flux de matières en suspension. Avec 60 % par rapport au total annuel, l'oued Saida véhicule une moyenne saisonnière de 17796 t de matières en suspension. L'hiver avec un apport liquide plus important que l'automne, ramène trois fois moins de sédiments en suspension, avec un apport solide de 6 704 t de matières en suspension ce qui représente 22 % par rapport au total annuel (Tableau IV).

Tableau IV. Répartition saisonnière des flux liquides Al (en m³), des flux solides As (en tonnes) et des dégradations spécifiques Ass en (t.km²².an¹¹).

Automne	Hiver	Printemps	Eté	Année
4350	5060	2330	1140	12880
17796	6704	4724	706	29654
32,7	12,3	8,7	1,3	55
	4350 17796	4350 5060 17796 6704	4350 5060 2330 17796 6704 4724	4350 5060 2330 1140 17796 6704 4724 706

Au printemps, la charge en suspension n'augmente pas proportionnellement aux apports pluviométriques, la présence de la végétation et l'humidification des sols réduisent considérablement la migration des particules par l'érosion hydrique durant cette saison. L'été reste une saison sèche avec un transport quasi-nul soit environ 3 % d'apport solide annuel. Les précipitations durant cette saison sont quasiment nulles et représentent moins de 1 % de l'apport pluviométrique annuel.

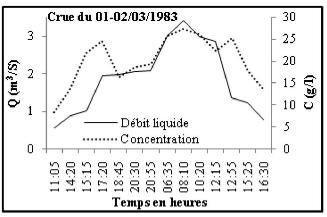
Analyse des différentes classes d'hystérésis.

L'analyse des relations d'hystérésis, pour les 11 crues enregistrées au niveau du bassin versant de l'oued Saida (1980-2010), fait ressortir la distribution des crues dans les différentes classes définies par WILLIAMS (1989), en fonction de la forme et des caractéristiques de la relation entre C et Q_l (Tableau V). Le tracé des graphes temporels ainsi que celui représentant l'hystérésis est donné en Figure 5. Les crues sont classées selon les années)

Figure: (5-a) 2 Crue du 18/09/1982 80 Crue du 18/09/1982 80 Classe II 1,5 60 60 40 20 Débit liquide 20 Concentration 0 12:15 13:40 14:45 0 0,5 1,5 1 Q (m3/s)Temps en heures

Figure: (5-c)

2



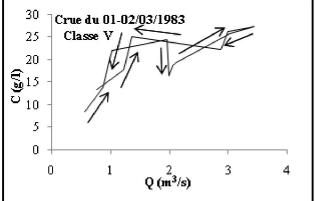
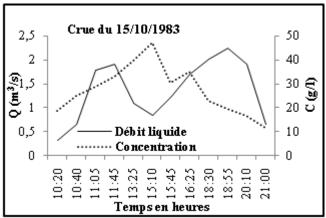
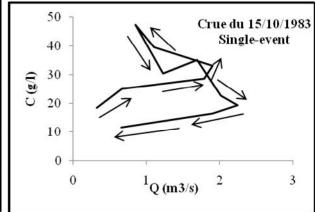
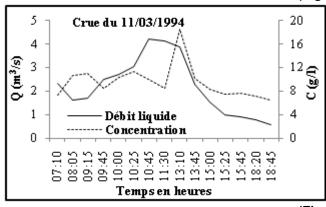


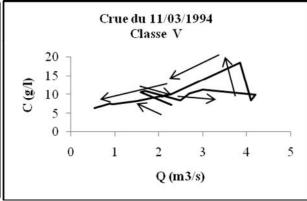
Figure (5-k)



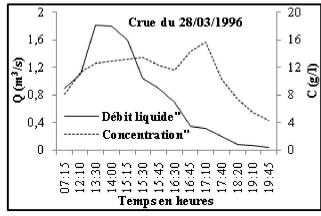


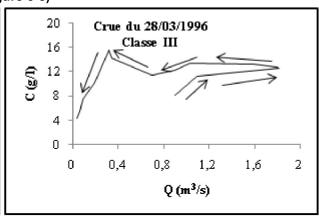
(Figure 5-d)



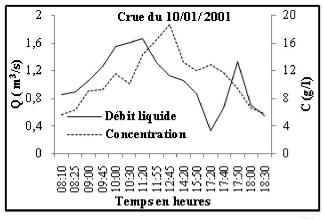


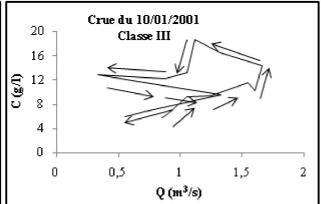
(Figure 5-e)



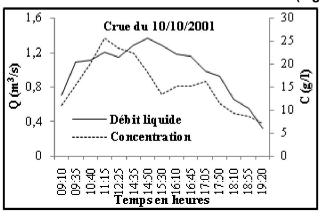


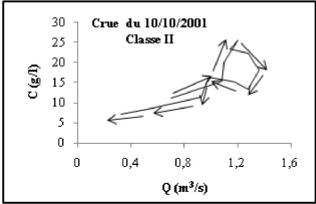
(Figure 5-f)



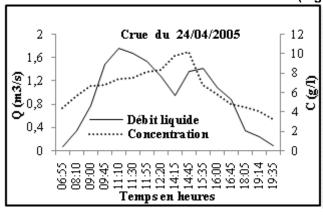


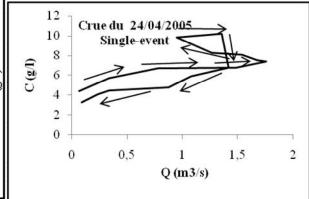
(Figure 5-b)



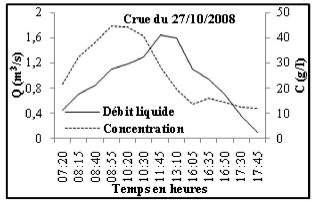


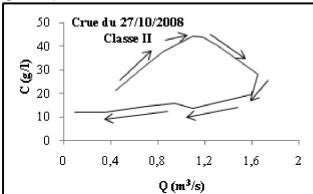
(Figure 5-L)





(Figure 5-i)





(Figure 5-j)

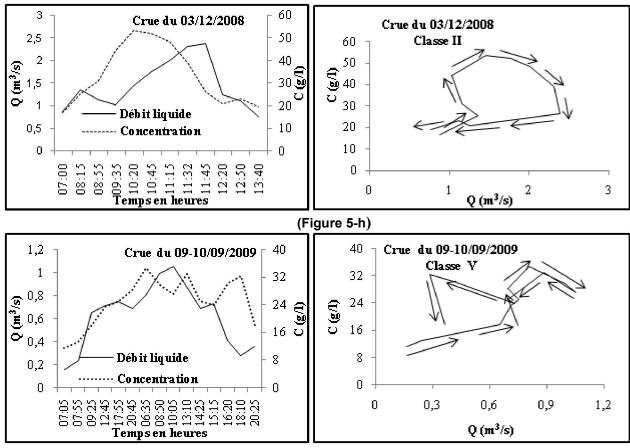


Figure.5 Variation des concentrations des sédiments et des débits liquides et classification des relations C- Q_l (à gauche est représentée la chronologie des variations de C et Q_l et à droite l'hystérésis).

L'analyse de la figure5 montre qu'à l'oued Saida l'évolution des concentrations en fonction des débits suit principalement 3 modèles. Le modèle de type horaire est surtout caractéristique des crues de la saison d'automne, il s'agit principalement des crues du (18/09/1982), du (10/10/2001), du (27/10/2008) et du (03/12/2008). Lorsque la relation est de type horaire, cela indique que la source de sédiment est proche de l'exutoire, soit déjà dans le fond du cours d'eau soit dans des zones qui lui sont proches (SLATTERY et al., 2002), (RODRIGUEZ-BLANCO et al., 2008), (LE FRANCOIS et al., 2007) (AMBORG et al., 1967), (VAN SICKLE & BESCHTA, 1983), (KLEIN, 1984), (JEJE et al., 1991), (ASSELMAN & MIDDLEKOOP, 1998). D'autres auteurs indiquent que l'hystérésis de type horaire peut être causé par la forte intensité des pluies au début de l'orage (DOTY & CARTER, 1965). Ces crues arrivent juste après la fin du mois d'août qui marque la transition entre la longue saison sèche et la saison des pluies. La pluie qui a généré ces crues s'est abattue sur des sols très secs dépourvus de couvert végétal et venant juste d'être perturbés par les premiers labours de la saison. Ainsi du fait de la faible rugosité des sols, le ruissellement superficiel est élevé provoquant une érosion quasi instantanée. C'est la mobilisation des sédiments proche de l'exutoire qui expliquerait la relation d'hystérésis de type horaire. Pour ces crues, le pic de concentration de matières en suspension arrive avant celui du débit liquide (Figure 5, a, b, i et j). Une autre hypothèse est la présence d'une couche de pavage formée sur le lit de l'oued antérieurement à la crue (AMBORG et al., 1967). La formation d'une telle couche peut être due à une fixation partielle du lit par une sélection des plus gros éléments des alluvions qui ne sont plus repris que par les crues exceptionnelles. Elle peut aussi être obtenue lorsqu'il y a une réduction des matériaux en suspension juste avant l'obtention du débit maximal (WOOD, 1977), (BATTALA & SALA, 1992). Ces sources de sédiments, fortement mobilisés en montée de crues, vont à leur tour alimenter en sédiments le cours d'eau provenant probablement des versants les plus éloignés de l'exutoire. Ces crues de type horaire observées durant cette période se caractérisent par des concentrations maximales et des flux généralement élevés. Les concentrations maximales sont respectivement (72,5 g.L⁻¹), (25,5 g.L⁻¹), (72,5 g.L⁻¹) et (53,4 g.L⁻¹) pour les crues du 18/09/1982, du 10/10/2001, du 27/10/2008 et du 03/12/2008. Ces quatre crues totalisent ensemble un flux solide évalué à 11599 t (Tableau II). On note que la variabilité de la concentration des matières en suspension de ce bassin est proche de celle trouvée par bon nombre de chercheurs ayant travaillé dans des régions semi-arides, telles que oued Sebdou (MEGNOUNIF et al., 2013), et l'oued Abd's (ACHITE & OUILLON, 2007).

Les relations entre concentration et débit liquide qui décrivent des courbes dans le sens antihoraire, sont caractéristiques surtout des crues d'hiver et de printemps. Il s'agit principalement des crues du (11/03/1994), du

(28/03/1996) et du (10/01/2001). Pour ces trois crues les concentrations maximales sont parmi les plus faibles. Ces crues arrivent après les fortes pluies de la saison d'automne. Les eaux de ruissellement sont donc moins chargées en particules solides car la quasi-totalité des sédiments du lit a été transportée lors des premières crues de la saison d'automne. Durant cette période, le sol étant moins saturé et plus couvert résiste mieux à la pluie. Ce mode d'évolution se manifeste par un décalage entre l'onde de crue qui affecte les masses d'eau et le transfert plus lent des matériaux fournis à partir des versants. Ces crues sont généralement générées par de grosses averses qui trouvent un sol humide. L'eau présente dans le sol avant la crue permet d'augmenter les forces de cohésion du sol et diminue le taux de détachement des particules. La source principale de la charge solide en suspension est alimentée par l'érosion en ravines et la dégradation des berges du cours d'eau. Le pic de la courbe de concentration des matières en suspension est atteint après celui du débit liquide, ce qui correspond à une arrivée tardive des particules (WILLIAMS, 1989), avec un décalage de 1h30, 2 h ou jusqu'à 4 h entre le débit de pointe et la charge maximale en sédiments, respectivement pour les crues du 11/03/1994 (Figure 5-d), du 10/01/2010 (Figure 5-f) et du 28/03/1996 (Figure 5-e). Une même boucle d'hystérésis a été trouvée dans le bassin du Wadi Wahrane en Algérie (BENKHALED & REMINI, 2003-a).

La forme en huit résulte de la combinaison de deux hystérésis : la relation de type horaire et antihoraire (WILLIAMS, 1989). Elle correspondrait selon (AMBORG *et al.*, 1967) à la montée conjointe des débits liquides et solides dès le début de la crue. La forme en huit de la relation C – Q_l se présente pour la crue du 01 au 02/03/1983. Cette crue est caractérisée par de fortes pluies tombant à la fin d'un hiver relativement pluvieux et intervient dans un contexte où le sol reste saturé en eau accentuant encore le ruissellement superficiel, donc le transport des sédiments en suspension. Nous assistons alors à une montée conjointe des débits liquides et solides dès le début de la crue (Figure 5-c). Cette forme en huit se présente aussi pour la crue du 09 au 10/09/2009 (Figure 5-h). Une cause certaine semble expliquer l'origine de cette forme de boucle, l'année 2008/2009 est une année hydrologiquement humide (Figure 2). La forte pluviométrie enregistrée durant cette année a permis une bonne alimentation de l'oued et la recharge des nappes souterraines. Les nappes permettent grâce à la lithologie de la région de soutenir l'écoulement superficiel, ce qui explique cette montée conjointe des débits liquides et solide dés le début de la crue. Plusieurs auteurs ont confirmé l'existence de cet effet (ZHANG *et al.*, 1990); (EL-MAHI *et al.*, 2012).

Les crues du 15/10/1983 et 24/04/2005 figure (5-k) et (5- L): sont des crues complexes car le débit augmente à nouveau au cours de la décrue du premier événement (crues successives). La classification de Williams qui emploie le terme *single-event* ou *single hydrological event* pour désigner les événements pris en compte, ne s'applique pas à ces crues successives.

Tableau V. Typologie des crues basées sur le rapport C/Q (classification de Williams, 1989).

Date de la crue	Critères	Forme et caractéristiques de la crue		
18/09/1982	(C/Q) _m >(C/Q) _d Cmax avant Qmax.	Sens horaire, boucle non fermée et nette		
01 au 02/03/1983	$(C/Q)_m$ > $(C/Q)_d$ Pour une partie de $Q_1C/Q)_m$ < $(C/Q)_d$ Pour l'autre partie de Q_1 . Cmax avec Qmax.	Boucle en forme de huit, moins large		
11/03/1994	$(C/Q)_m \le (C/Q)_d$ Qmax avant Cmax.	Sens anti-horaire, convergence des extrémités		
28/03/1996	$(C/Q)_m < (C/Q)_d$ Qmax avant Cmax.	Sens anti-horaire, boucle très nette		
10/01/2001	$(C/Q)_m(C/Q)_d\ Qmax\ avant\ Cmax.$	Sens anti-horaire.		
10/10/2001	$(C/Q)_m > (C/Q)_d$ Cmax avant Qmax.	Sens horaire, boucle fermé.		
27/10/2008	$(C/Q)_m > (C/Q)_d$ Cmax avant Qmax.	Sens horaire, boucle très nette		
03/12/2008	$(C/Q)_m > (C/Q)_d$ Cmax avant Qmax.	Sens horaire, boucle assez large		
09 au 10/09/2009	$C/Q)_m > (C/Q)_d$ Pour une partie de Q_1 , $(C/Q)_m < (C/Q)_d$ Pour l'autre partie de Q_1 , Cmax avant Qmax	Boucle en forme de huit, très rétrécie à la montée linéaire		

CONCLUSION

Les transports solides en suspension dans le bassin versant de l'oued Saida se font essentiellement durant trois périodes, la première intense en automne, les deux autres à plus faible ampleur en hiver et au printemps. Si l'on regarde la variabilité interannuelle de ce phénomène, on constate que la dégradation spécifique varie considérablement ainsi, on passe de 2 à 276 t.km⁻².an⁻¹. L'apport moyen annuel en sédiments enregistré à l'exutoire du bassin versant de l'oued Saida est évalué à 29667 tonnes, ce qui correspond à une dégradation spécifique de 55 t.km⁻².an⁻¹. A l'échelle saisonnière, l'automne est responsable de 60 % du flux annuel alors que le printemps n'en totalise que 14 %. L'évolution des concentrations des sédiments en fonction des débits liquides pendant les crues à l'oued Saida suit principalement trois modèles de courbes : dans le sens horaire, antihoraire et en forme de huit. La variation de la concentration à l'échelle d'une crue est très grande. Les caractéristiques morphologiques et hydrologiques du bassin de l'oued Saida en sont les causes principales. Le modèle horaire révèle un accroissement rapide des concentrations par rapport aux débits liquides, dû en bonne partie à la remise en suspension des dépôts fins dans le lit fluvial. Ce modèle horaire est surtout observé pour des crues d'automne. Les hystérésis antihoraire et en forme de huit sont surtout caractéristiques des crues d'hiver et de printemps. Durant ces deux saisons l'érosion est ralentie par la présence de la végétation et l'humidité des sols. L'analyse de l'hystérésis par classes montre un effet de saison sur la forme de la boucle obtenue.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier beaucoup Monsieur le Directeur régional de L'ANRH d'avoir mis à notre disposition tous les moyens humains et matériels. Nos remerciements vont également aux inspecteurs, ingénieurs et laborantins, de nous avoir assistés durant ce travail et de nous avoir accompagnés sur le terrain malgré l'éloignement et les conditions climatiques difficiles de cette région.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A.N.R.H. 2010 - Agence Nationale des Ressources Hydriques. Direction régional de Saida (Algérie). Station Hydrométrique de Sidi Boubkeur code 11.11.02 (http://www.anrh.dz).

AMBORG, L., WALKER, H.J. & PEIPPO, J. 1967 - Suspended load in the Colville River, Alaska 1962 Sediment concentration versus water discharge during hydrologic events.

ACHITE, M. & MEDDI, M. 2005 - Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride. Cas du bassin de l'oued Mina (nord-ouest Algérien). Revue des Sciences de l'eau 18 (spécial), pp : 37-56.

ASSELMAN, N.E.M & MIDDLEKOOP, H. 1998 - Temporal variability of contemporary floodplain sedimentation in the Rhine Meuse Delta the Netherland. *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 595–609.

ACHITE, M. & OUILLON, S. 2007 -. Suspended sediment transport in a semiarid water shed Wadi Abd Algérie (1973-1995). *Journal of Hydrology* 343, 187-202.

AGRI, L., BAMBA, S.B., DOUMOUYAI, I., & SAVANE, I. 2010 - Bilan des flux de matières particulaires et dissoutes de Sassandra à Gaoulou pont (Côte-D'ivoire). *Sciences & nature* vol.7 N° 02 : 107-108.

BOUANANI, A. 2004 - Hydrologie, transport solide et modélisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW-Algérie). Thèse de Doctorat, Université Abou-Bakr Belkaid Tlemcen Algérie, 250p.

BRASINGHTON, J. & RICHARD, K. 2000 - Turbidity and suspended sediment dynamics in small catchement in the Nepal Middle Hills. *Hydrol Process* 14, 2559-2574.

BENKHALED, A. & REMINI, B. 2003-a - Variabilité temporelle de la concentration en sédiments et phénomène d'hystérésis dans le bassin de l'Oued Wahrane (Algerie). *J. Sci. Hydrol.* 48 (2), 243–255.

BENKHALED A. & REMINI, B. 2003-b - Analyse de la relation de puissance débit solide-débit liquide à l'échelle du Bassin versant de l'Oued Wahran (Algérie). Revue des Sciences de l'eau, 16/3 333-356.

BATTALA, R. J. & SALA, M. 1992 - Temporal variability of suspended sediment in a Mediterranean River, International Conference Canberra Australia, *International Association of Hydrological Sciences Publication* 224, 229-305.

BATTALA, R. J. & SALA, M. 1994 - Temporal variability of suspended sediment transport in a Mediterranean sandy gravel-bed river, Variability in Stream Erosion and Sediment Transport, *IAHS Publ 244* Canberra pp 299-305.

BACCA, P. 2008 - Hysteresis effect in suspended sediment concentration in the Rybarik basin Slovakia. *Hydrol. Sci. J.* 53(1), 224-235.

COLOMBANI, J., OLIVRY, J.C & KALLELI, R. 1984 - Phénomènes exceptionnels d'érosion et de transport solide en Afrique aride et semi-aride. *Challenges in African Hydrology and Water Resource* (Proceedings of the Harare Symposium, July 1984). *IAHS Publ.* no. 144, pp 295-300.

COSANDEY, C., & ROBINSON, M. 2000 - Hydrologie continentale p 360-128 Ed. Armand Calin.

CHIKITA, K., KEMMITZ, H.R. & KUMAI, R. 2002 - Characteristics of sediment discharge in the Subartic Yukon River Alaska. Catena, 48(4): 235-253.

DIRECTION GENERALE DES FORETS. 2010 - Rapport national de l'Algérie sur la mise en œuvre de la convention de lutte contre la désertification, DGF Algérie 35p.

DINEHART, R.L. 1992 - Sediment data for streams near Mount St. Helens, water years 1984–1987. US Geol. Survey Open File Report 91–219, vol. 3.

DIRECTION DES SERVICES AGRICOLES. 2010 - Irrigation et mise en valeur de la vallée de l'oued Saida. Rapport pédologique, DSA Algérie 20p.

DEMMAK, A. 1982 - Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale, thèse de Docteur-Ingénieur, Paris, 323p

DJEZIRI, L. 1998 - Envasement des barrages, mobiliser le maximum des capacités. Revue Symbiose 2, 18-21.

DOTY, C.W. & CARTER, C.E. 1965 - Rates and particle-size distribution of soil erosion from unit source areas. Trans. Am. Soc. Agric. Engrs., 8: 309-311.

DROUX, J.P., MIETTON, M & OLIVERY, J.C. 2003 - Flux de matières particulaires en suspension en zone de savane Soudanaise : l'exemple de trois bassins versants Maliens représentatifs. *Géomorphologie : relief, processus, environnement. Avril-Juin, vol.9, pp, 99-110.*

EL-MAHI, A., MEDDI, M., & BRAVARD, J.P. 2012 - Analyse du transport solide en suspension dans le bassin de l'oued el-Hammam (Algérie Nord). *Hydrological Sciences Journal* Volume 57, Issue 8 pp. 1642-1661.

EVANS, C., & DAVIES, T.D. 1998 - Cause of concentration/discharge hysteresis and its potential as a tool for analysis of episode hydrochemistry water resources research, vol. 34, no. 1, pages 129-137.

GURNELL, A. M. 1987 - Suspended Sediment In Glacio Fluvial Sediment Transfert. Gurnell AM, Clark MJ (eds) Wiley. Chichester, 305–354.

GELLIS, A. C. 2013 - Factors influencing storm-generated suspended-sediment concentrations and loads in four basins of contrasting land use, humid-tropical Puerto Rico. CATENA 104, (39-57).

GHENIM A., SEDDINI, A. & TERFOUS, A. 2008 - Variation temporelle de la dégradation spécifique du bassin versant de l'oued Mouillah (Nord Ouest Algérien). *Hydrology Science Journal*, 53(2) 448-456.

HODKINS, R. 1999 - Controls on suspended-sediment transfer at a high-arctic glacier, determined from statistical modeling. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24: 1-21.

JANSSON, M. B. 2002 - Determining sediment source areas in a tropical river basin, Costa Rica. Catena 47, 63-84.

JEJE, L.K., OGUNKOYA, O.O. & OLUWATIMILEHIN, J.M. 1991 - Variation in suspended sediment concentration during storm discharges in three small streams in upper osun basin, central western Nigeria. *Hydrological Processes* 5, 361–369.

KATTAN, Z., GAC, J.Y. & PROBST, J.L. 1987 - Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senegal basin – estimation of the runoff concentration and relative contributions of channel and slope erosion *Journal of Hydrology*. 92, 59-76.

KLEIN M.(1984). Anti clockwise hysteresis in suspended sediment concentration during individual storms Holberck Catchment Yorkire England Catena, 11: 251-257.

LE FRANCOIS, J., GRIMALDI, C., GASCUEL, O. & GILLIET, N. 2003 - Origins end dynamic sediment in small agricultural catchement. *The Fourth Inter-Celtic colloquium on Hydrology,* Guimares Portugal. July 11-14, 1-13.

LENZI, M. & MARCHI, L. 2000 - Suspended sediment load during floods in a small stream of the dolomites *Northeasten Italy Catena*, 39: 267–282.

LE FRANCOIS J., GRIMALDI, C., GASCUEL, O., DROUX, J.P. & GILLIET, N. 2007 - Suspended sediment and discharge relations chips to identify bank degradation as a main source on small agricultural. Catchement *Hydro. Process* 21, 2923–2933.

MEGNOUNIF, A., TERFOUS, A. & OUILLON, S. 2013 - A Graphical method to study suspended sediment dynamics during flood events in the Wadi Sebdou. N.W (Algeria) (1973-2004). *Journal of hydrology* 497, 24-36.

O.N.I.D. 2010 - Office national de l'irrigation et du drainage "Etude du système d'irrigation à partir des eaux de la vallée de l'oued Saida – Janvier 2010.

OLIVERY, J. C., BRICQUET, J.P., MAHE, G., BAMBA, F., DIARRA, M., MATHIEUX, A., TUREAUX, T., ORANGE, D., & PICOUET, C. 1997 - Erosion et transport particulaire par le Niger: du bassin supérieur a l'exutoire du delta intérieur (bilan de cinq années d'observation). FRIEND'97 — Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management. (Proceeding of the Postojna, Slovenia Conference (September - October 1997). *IAHS Publ* n° 246 - 1997. J-3-5

PITAUD, G. 1973 - Etude hydrogéologique pour la mise en valeur de la vallée de l'Oued Saida (rapport de synthèse), division ressource hydrique.

PICOUET, C., HINGRAY, B. & OLIVERY, J.C. 2000 - Modélisation conceptuelle globale du régime du transport particulaire sur les fleuves tropicaux d'Afrique : application aux basins du Niger supérieur et du Bani Mali. *Rev. Sci. Eau*, 13/4, 463-481.

RODRIGUEZ-BLONCO, M.L., TABAODA-CASTRO, M.M & OROPEZA-MOTA, J.L. 2008 - Suspended sediments discharge hysteresis during rainfall events in a small headwater catchement in the NW spain, pp. 205-217.

SEEGER, M., ERREA, M.P., BEGUERIA, S., ARNAEZ, J., MARTI, C., & GARCIA-RUIZ, J.M. 2004 - Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees. *J. of Hydrol* 288: 299-311.

SLATTERY, M.C., GARES, P.A. & PHILIPS, J.D. 2002 - Slope-channel linkage and sediment delivery on North Carolina Coastal Plain Cropland Earth Surf Process. Land Forms. 27: 1377-1387.

TAVARES, J.P. 2010 - Erosion des sols au cap - vert : Etude des processus et quantification à l'échelle de trois bassins versants de l'île de Santiago. Thèse de Doctorat en Sciences de la terre et de l'environnement, université de Bourgogne France, p 227.

TERFOUS, A., MEGNOUNIF, A & BOUANANI, A. 2001 - Etude du transport solide en suspension dans l'oued Mouilah (Nord-Ouest-Algérien). *Rev. Sci. Eau*, 14, 175-185.

VANSICKEL, J. & BESCHTA, R.L. 1983 - Supply based models of suspended sediment transport in streams *Water Resource* 19/3, 768 - 778.

WOOD, P. A. 1977 - Controls of variation in suspended sediment concentration in river Rother West Sunex England Sedimentology 24, 437 – 445.

WILLIAMS, G. P. 1989 - Sediments concentrations versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *Journal Hydrology* 111, 89-106.

WALLING, D.E. 1974 - Suspended sediment and solute yield in small catchment prior to urbanisation in Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers (ed. by G.P., Williams, 1989). *J. Hydrol.*, 111: 89-106.

YLES, F. & BOUANANI, A. 2012 - Quantification et modélisation du transport solide dans le bassin-versant de l'Oued Saida (Hauts-Plateaux-Algériens). Revue sécheresse et changement planétaires, volume 23, N°4. P 289-296.

YLES, F. 2014 - Hydrologie – *Modélisation pluie-débit et transport solide dans le bassin versant de l'oued Saida.* Thèse de Doctorat, Université Abou-Bakr Belkaid Tlemcen, Algérie p 142.

ZABALETA, A., MARTINEZ, M., URIARTE, J.A & ANTIGÜEDAD, I. 2007 - Factors controlling suspended sediment yield during runoff events in small head water catchement of the Basque Country Catena.

ZHANG, J., HUANG, W.W & SHI, M.C. 1990 - Hwangue (Yellow River) and its estuary: sediment transport and deposition. *J. Hydrol.* 120, 203–233.