

ANALYSE DE LA RELATION DEBIT-MATIERE EN SUSPENSION DURANT LES CRUES DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED ISSER.

DEFFAF Ammar ¹, LOUAMRI Abdelaziz¹, TERFOUS Abdelali ²

1 Laboratoire des Sciences du Territoire, Ressources Naturelles et Environnement « LASTERNE », Faculté des Sciences de la Terre, Géographie et Aménagement du Territoire, Université Frères Mentouri Constantine 1, Algérie.

2 Design Engineering Laboratory, LGECO, ERESA, INSA Graduate School of Science and Technology, Strasbourg, France.

Reçu le 22/03/2018 – Accepté le 09/09/2020

Résumé

Ce travail s'intéresse à l'étude de la relation entre la concentration de sédiments en suspension C et le débit liquide QL pendant les crues, d'une part, et d'autre part, à la quantification du flux sédimentaire dans le bassin versant de l'oued Isser. L'analyse de 84 crues sur une période de 30 ans (1971/2001) montre une dynamique saisonnière de la disponibilité des sédiments en suspension, qui augmente en été (particulièrement au mois d'août) et en automne et diminue en hiver et au printemps lorsque le débit est élevé. L'analyse des événements enregistrés sur l'oued Isser est réalisée à partir de l'allure des graphes représentant C en fonction de QL qui dessinent quatre modèles d'hystérésis horaire, antihoraire, linéaire plus boucle et figure en huit. L'apport moyen annuel des crues en termes de transport solide en suspension est de 5.07 millions de tonnes, ce qui correspond à une dégradation spécifique de 1222 t.km⁻².an⁻¹. Le flux solide en suspension varie considérablement d'une crue à l'autre en fonction de nombreux facteurs tels que la saisonnalité et la durée de la crue. Les crues horaire et antihoraire sont les plus fréquentes et produisent 70% des sédiments totaux. L'analyse des rendements saisonniers a montré que l'hiver contribue pour une grande partie des sédiments (49%).

Mots clés : concentration des sédiments en suspension, débit liquide, flux sédimentaire, crue, hystérésis, oued Isser.

Abstract

This work focuses on the study of the relationship between suspended sediment concentration C and liquid flow Q during floods, on one hand, and the quantification of sedimentary flow in the watershed of the Isser wadi, on the other hand. The analysis of 84 floods over a 30-years period (1971/2001) shows a seasonal dynamic of suspended sediment availability, which increases in summer (especially in August) and autumn and decreases in winter and spring when flow is high. An analysis of the events recorded on the Isser wadi is made from the appearance of the graphs representing C as a function of Q which draws four hysteresis models hourly, counterclockwise, linear plus loop and figure in eight. The total flood performance in terms of suspended solid transport is 5.07* 10⁶ tonnes, which corresponds to a specific degradation of 1222 t.km⁻².year⁻¹. Suspended solid flux varies considerably from one flood to another depending on many factors such as seasonality and flood duration, and hourly and counterclockwise floods are the most frequent and produce 70% of total sediments. The analysis of seasonal yields has shown that winter contributes a great deal of sediment (49%).

Keywords: suspended sediment concentration, liquid flow, sediment flow, flood, hysteresis, wadi Isser,

ملخص

يتناول هذا العمل دراسة العلاقة بين تركيز الحمولة العالقة و التدفق السائل في مرحلة الفيضانات من جهة، من جهة أخرى، تقييم حجم التدفق الصلب في الحوض التجميحي لواد يسر. تحليل 84 فيضان خلال فترة 30 سنة (1971/72 - 2000/01) يوضح ديناميكية فصلية للحمولة العالقة، هذه الاخيرة تتزايد في فصلي الصيف (بالتحديد شهر اوت) و الخريف و تتناقص في فصلي الشتاء و الربيع حيث يكون التدفق السائل مرتفع. تم تحليل الفيضانات المسجلة في واد يسر من خلال قراءة اشكال موضحة لتركيز الحمولة العالقة بدلالة التدفق السائل والتي من خلالها استخرجنا اربع انواع هيبستيرية: في اتجاه عقارب الساعة، عكس عقارب الساعة، خط مستقيم مع انعطاف وشكل رقم ثمانية. الحصيلة الاجمالية للفيضانات فيما يخص التدفق الصلب هي 5.07 مليون طن في السنة، ما يمثل حمولة صلبة نوعية تقدر ب 1222 طن.كلم-2.سنة-1. يتغير التدفق الصلب بطريقة معتبرة من فيضان الى اخر وهذا لعدة عوامل ابرزها مدة الفيضان وفصله. الفيضانات في اتجاه عقارب الساعة و عكس عقارب الساعة هم الاكثر تردد في واد يسر ويمثلوا 70 % من الحجم الصلب الكلي. تحليل الانتاجية الفصلية يظهر بان فصل الشتاء يساهم بنسبة كبيرة في المواد المترسبة ما يمثل 49 %.

الكلمات المفتاحية: تركيز الحمولة العالقة، التدفق السائل، التدفق الصلب، فيضان، هيبستيرية، واد يسر.

I. INTRODUCTION :

L'Algérie est caractérisée, d'une part, par la faiblesse des précipitations sur une bonne partie du territoire, et d'autre part, par les phénomènes de crue-éclair, crue violente et de courte durée. L'Algérie a réalisé un effort considérable en infrastructures hydrauliques pour améliorer la disponibilité en eau pour les villes, l'irrigation des plaines et le développement de l'industrie. Cet effort est malheureusement contrarié par l'envasement des retenues de barrages provoqué par l'érosion hydrique sur les bassins-versants et les transports solides par les oueds. Les études sur les transports solides en suspension en Algérie ont montré que la sédimentation était importante, le taux d'érosion spécifique atteint la valeur de $5000 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ sur le bassin versant de l'oued Agrioune (Demmak, 1982). Cet auteur a estimé à environ 120 millions de tonnes les sédiments arrachés annuellement au niveau des bassins versants du nord algérien, une partie de cette masse se dépose dans les 74 grands barrages que détient l'Algérie. On évalue le dépôt sédimentaire annuel dans ces barrages à 65 millions de m^3 (Remini, 2017).

La quantité de sédiments en suspension transportée par les cours d'eau peut provenir de trois origines principales ;

- les sédiments en suspension déposés dans le lit de l'oued : ces stocks sont rapidement mobilisés au début des crues ;
- l'effondrement des berges ;
- et enfin, l'érosion des versants : la quantité de sédiments provenant de cette source dépend de certaines conditions (l'humidité du sol, l'intensité de la pluie et sa répartition spatio-temporelle, la densité de la couverture végétale, les formations lithologiques, la déforestation et l'utilisation des terres).

La relation entre la concentration des sédiments en suspension et le débit liquide d'un cours d'eau est fondamentale dans le domaine du transport solide en rivières. Cette relation puissance $C = a.QL^b$ entre les débits liquides et les concentrations instantanées permet de déterminer la charge solide en suspension dans un cours d'eau pour une période donnée (journalière, mensuelle, saisonnière et annuelle) ; elle a été appliquée par plusieurs auteurs (Achitte et Ouillon, 2007 ; Asselman, 1999 ; Khanchoul et Jansson, 2008 ; Ghenim, 2008). Cette méthode permet d'exploiter les données de débits liquides disponibles à l'échelle journalière. La principale critique formulée à son encontre est qu'elle sous-estime les apports solides.

D'autres chercheurs Megnounif et Ouillon (2013) ont caractérisé la relation concentration-débit à travers une série d'événements chronologiques (crues et phénomènes d'hystérésis).

Les crues sont ainsi responsables du transport de la majorité des sédiments et des concentrations les plus fortes. Megnounif et Ouillon (2013), ont montré, sur le

bassin de l'oued Seb Dou, que cinq crues seulement pouvaient exporter 64% du flux total des sédiments. Lors des crues, l'augmentation des concentrations avec le débit est très variable selon les sites, et selon les crues pour un même site. Un effet d'hystérésis est observé lorsque la concentration en matières en suspension présente différentes valeurs à des débits identiques à différents étages de la crue. Dans ce contexte, on notera les travaux de Walling et Webb, 1982 ; Klein, 1984 ; Williams, 1989 ; Asselman, 1998 ; Lenzi et Marchi, 2000 ; Jansson, 2002 ; Hudson, 2003 ; Picouet et al, 2003 ; Benkhaled et al, 2003 ; Seeger et al, 2004 ; Lefrançois et al, 2005 ; Achite et al, 2013. Ces auteurs ont pu identifier les sources de sédiments dans un système en analysant systématiquement les relations d'hystérésis.

Le bassin versant de l'oued Isser a été choisi étant donné son importance vis-à-vis des ouvrages hydrauliques qui alimentent la capitale algérienne en eau potable, l'irrigation de la plaine de Mitidja et l'importance de l'érosion dans cette région.

L'objectif de ce travail est d'analyser la dynamique temporelle des matières en suspension à l'échelle des crues, et les boucles d'hystérésis montrées par les relations débit-concentration en MES durant la période hydro-pluviométrique étudiée. Nous essayons par la suite de caractériser et de classer les différentes relations pour une meilleure compréhension du phénomène d'hystérésis. Enfin, nous quantifions les flux hydro-sédimentaires pendant les crues pour une période de 30 ans (septembre 1971/ septembre 2001).

II. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE :

Le bassin versant de l'oued Isser est situé au sud-est à 100 km d'Alger. D'une superficie de 4149 km^2 , il présente une forme allongée sur l'axe sud-ouest (Ain Boucif/Beni Slimane) à nord-est vers la mer méditerranéenne (figure 1). Il prend sa source de la montagne de djebel Serane de Barouaghia (1327 m) et collecte les eaux des oueds (Hammam, Yaggour, Zeroua, Mellah Est et Ouest, Bouhamoude et oued djemaa). Le bassin de l'oued Isser est du type montagneux avec une altitude moyenne de 750 m, il se caractérise par des formations lithologiques assez érodables qui sont constituées à 60% de formations marneuses et marno-calcaires appartenant au Crétacé Inférieur, Moyen et Supérieur. Le couvert végétal peu dense est localisé au centre et représente 20% de la superficie totale, le reste de la surface soit 80% est occupé par des cultures essentiellement céréalières et fourragères. Le climat du bassin versant de l'oued Isser est de type semi-aride sur les 2/3 de sa surface. Le bassin reçoit une moyenne interannuelle de pluie de 511 mm.

ANALYSE DE LA RELATION DEBIT-MATIERE EN SUSPENSION DURANT LES CRUES DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED ISSER.

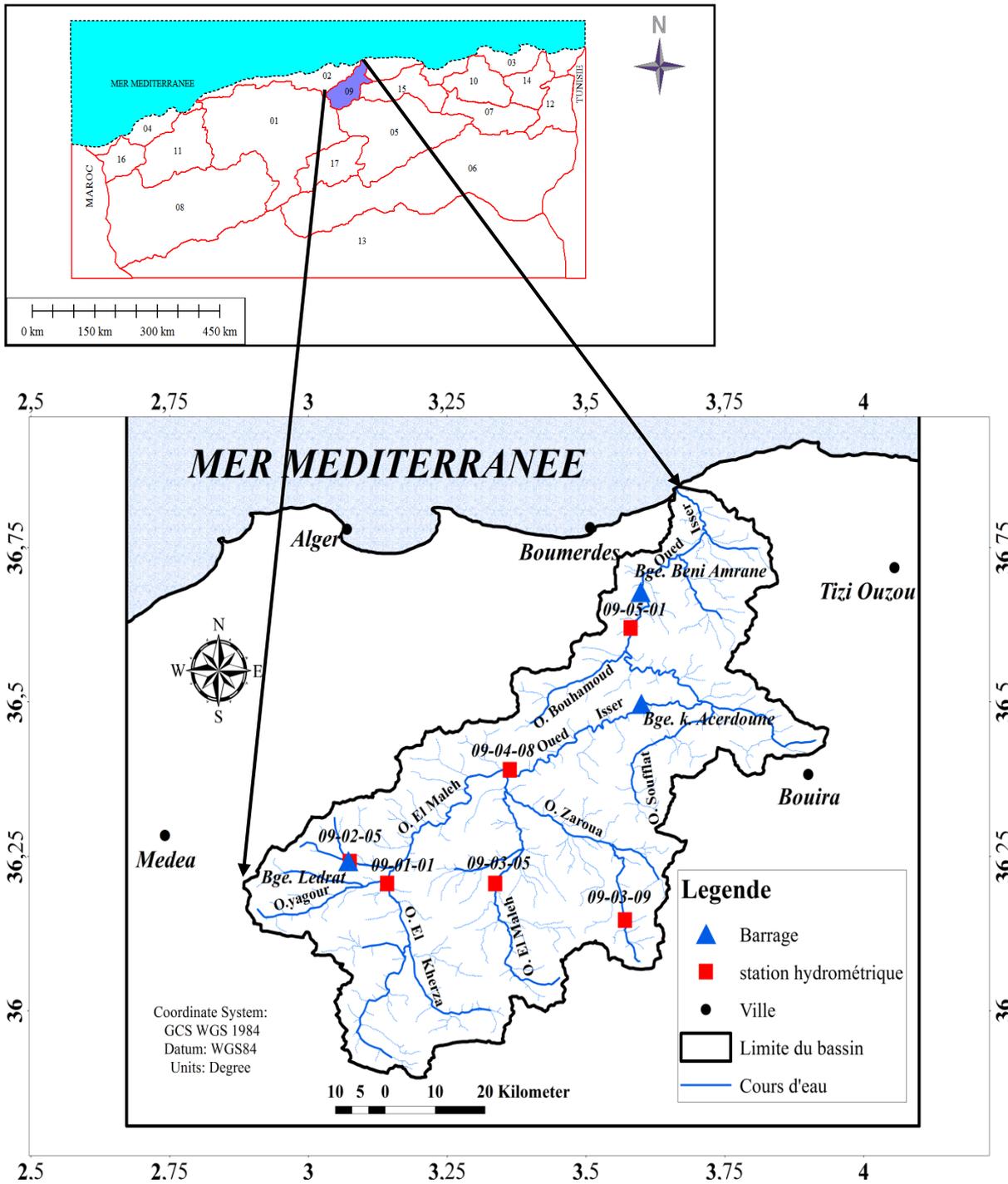


Figure 1 : Situation du bassin versant de l'oued Isser

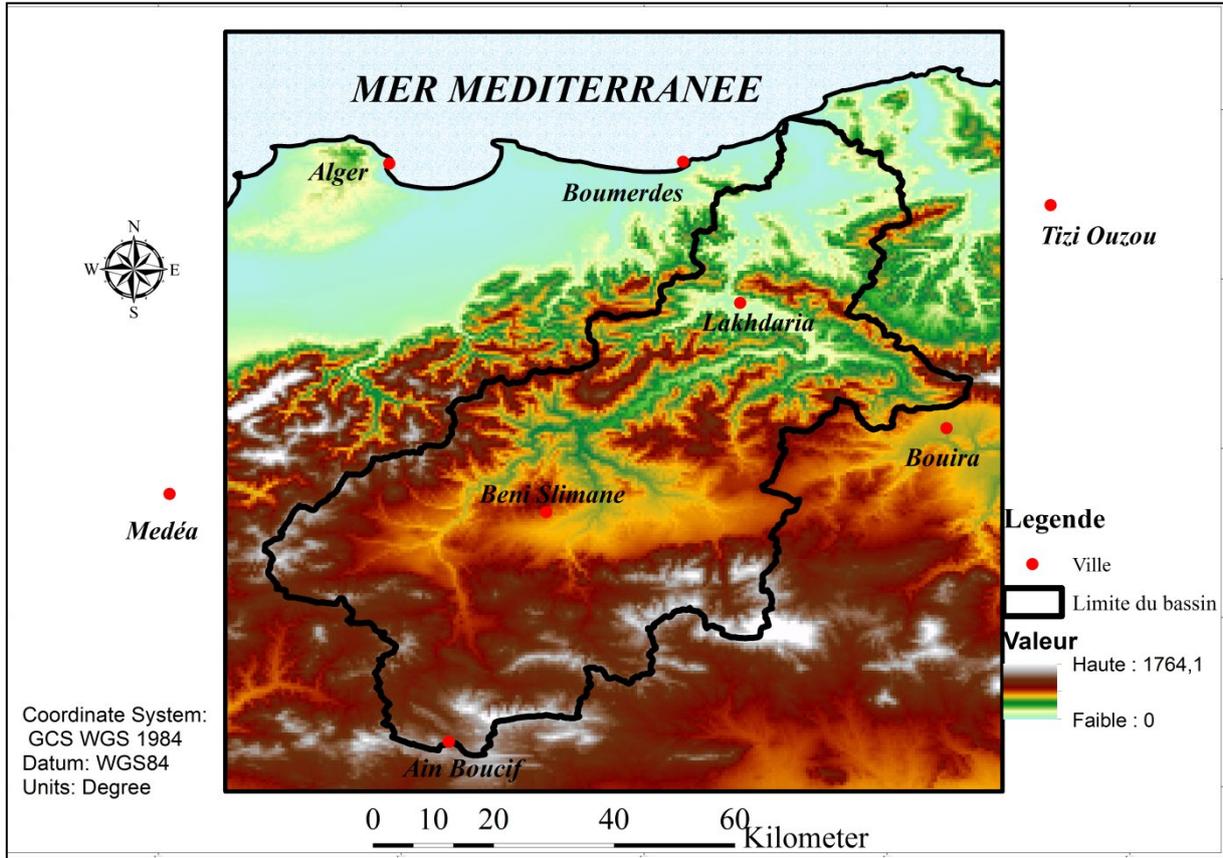


Figure 2 : Le bassin versant de l'oued Isser: Modèle Numérique de Terrain

Tableau 1 : Principaux paramètres du bassin versant étudié.

paramètres		valeurs
Surface	km ²	4149
Périmètre	km	434
Indice de pente globale Ig	m/km	32.98
Indice de compacité		1.88
Rectangle équivalent	km	98.20
Altitude maximale	m	1810
Altitude moyenne	m	750
Densité de drainage	km/km ²	3.6
Temps de concentration	h	19

2001) (figure 3). Les débits liquides sont obtenus à partir de la courbe de tarage qui permet de transformer les hauteurs d'eau en débits. Quant à la concentration, à chaque lecture de hauteur d'eau, on prélève un échantillon d'eau turbide à proximité de la rive à la surface de l'oued au moyen d'un flacon de 50 cl. Les sédiments filtrés sur papier filtre (0.45µm) sont ensuite séchés à l'étuve pendant 30 minutes à une température de 105 c°. Ramenée à l'unité de volume (1 litre), cette charge est attribuée à la concentration en matières en suspension instantanées véhiculée par le cours d'eau en (g.l⁻¹). En période de crue, les mesures sont intensifiées jusqu'à des intervalles de temps d'une heure et même 15 minutes en fonction de la vitesse d'augmentation des débits liquides. Les mesures de débit liquide et de concentration sont à la fois discontinues et effectuées avec une faible fréquence temporelle.

3. DONNEES ET METHODES

3.1 Les données de mesures hydrologiques :

L'étude est basée sur les mesures instantanées des débits liquides en m³.s⁻¹ et des concentrations en matières en suspensions en g.l⁻¹ effectuées à la station hydrométrique de Lakhdaria (09-05-01), obtenues auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H) (figure 1). Les données de mesures sont disponibles pour une période de 30 ans (septembre 1971 à septembre

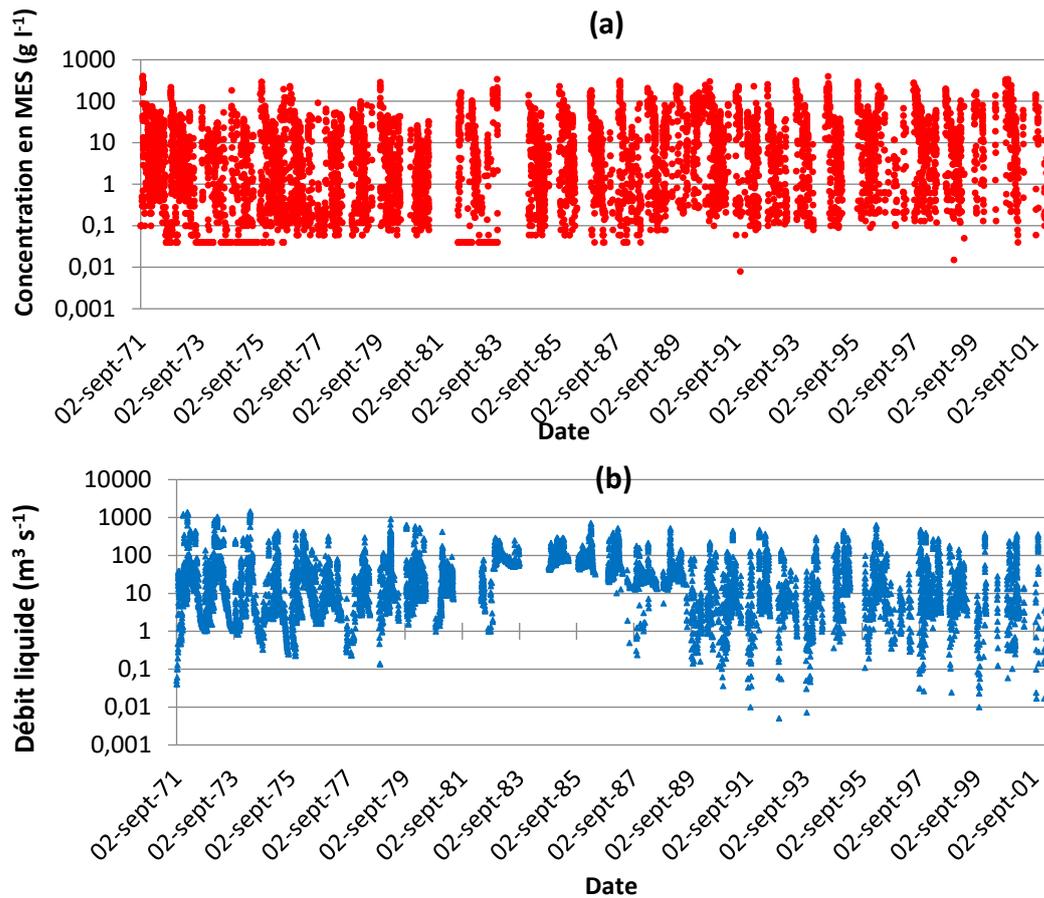
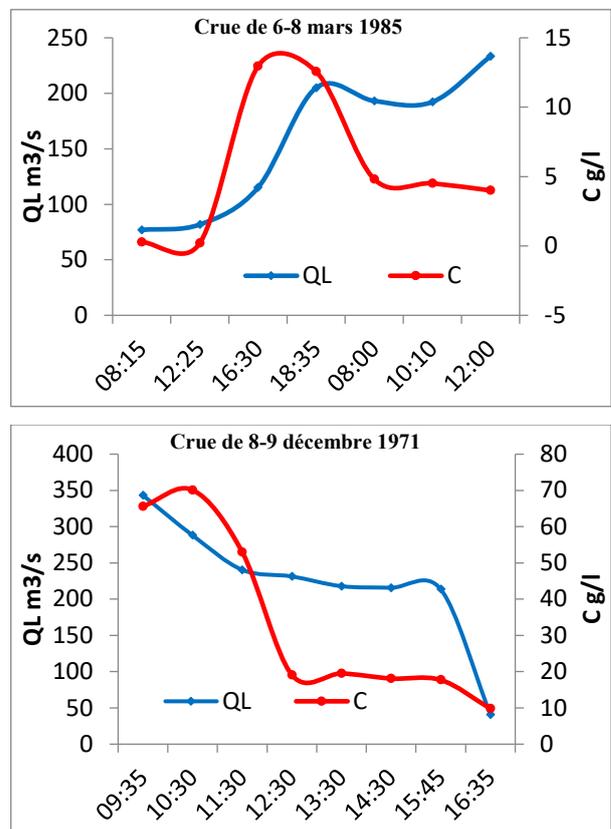


Figure 3 : Chronologie des mesures (a) concentrations en MES mesurées ; et (b) débits liquides à la station de Lakhdaria durant la période d'étude.

3.2 Représentativité des données de mesure

Le choix de la station hydrométrique de Lakhdaria est dicté par la disponibilité des données de mesures des concentrations en MES pendant une longue période de septembre 1971 jusqu'à aout 2001 (N= 8500 mesures). Cette station celle qui est située le plus en aval du bassin de l'oued Isser. Elle couvre les parties amont et aval du bassin et représente 83% de la surface totale du bassin de l'oued Isser.

Au cours de la période 1971/2001, 111 évènements de fort transport solide ont été détectés. Certaines crues ont été mal échantillonnées. A partir de ces 111 évènements, on a procédé à une sélection selon des critères sévères qui nous ont permis de faire ressortir 84 crues qui ont été bien échantillonnées. La figure 4 correspond à des crues mal échantillonnées, où les mesures ont été réalisées soit pendant la montée uniquement, ou pendant la décrue. De ce fait, ces données sont insuffisantes pour tracer un hydrogramme et un turbidigramme parfait de la crue.



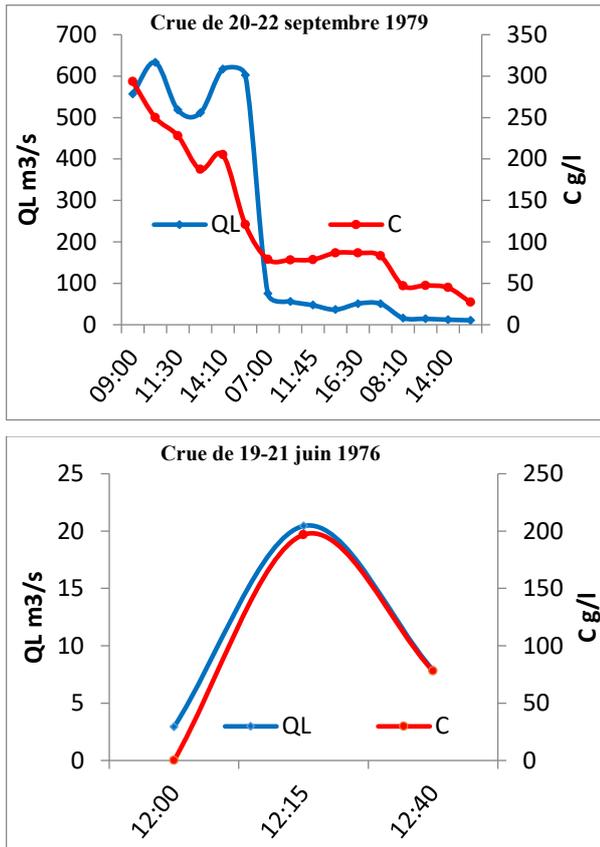


Figure 4 : Exemples des événements de crues non retenus dans l'étude

La méthode d'échantillonnage systématique du transport solide sur la plupart des cours d'eau algériens est l'échantillonnage uni ponctuel dans la section mouillée. Plusieurs études sur les erreurs induites par la représentativité spatiale des échantillons ont été faites. En effet, les particules en sédiments varient le long d'une section de mesure (Demmak, 1982 ; Touat, 1989). Ces particules fines en suspension présenteraient un gradient vertical de concentration de la surface vers le fond (Filizola, 2003 ; Coynel, 2005 ; Mano, 2008) et un gradient horizontal plus faible sur l'ensemble d'une section de mesure (Mano, 2008).

En plus de cette non uniformité de la concentration en MES dans la section de mesure, il y'a aussi la représentativité temporelle des échantillons. En effet, les échantillons de mesures se distinguent bien au cours des mois pluvieux. Les fréquences d'échantillonnage sont irrégulières à l'échelle annuelle et interannuelle, elles présentent parfois des lacunes d'observation.

3.3 Les critères de sélection des crues :

- A) La réalisation d'un hydrogramme complet avec une montée de la crue et une décrue ;
- B) Le débit liquide dépasse la moyenne annuelle ;
- C) Une crue non complexe ;
- D) Un échantillon comportant des crues fortes et faibles de débit ;

E) Une fréquence d'échantillonnage de la crue suffisante (turbidigramme bien suivi).

3.4 Quantification des flux des sédiments en suspension :

L'estimation des flux des sédiments en suspension transportés par le cours d'eau se fait selon la formule suivante :

$$AS = \sum_{i=1}^N (T_{i+1} - T_i) \cdot (Q_i \cdot C_i) \cdot 10^{-3}$$

Où C_i est la concentration en matières en suspension g.l⁻¹ mesurée à l'instant T_i exprimé en secondes correspondant au débit liquide Q_i en m³s⁻¹ ; 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 flux solides en suspension sont exprimés en tonnes ou en millions de tonnes As (tonnes ou M tonnes).

3.5 Phénomènes d'hystérésis :

Lors des crues, la dynamique des matières en suspension avec le débit est très variable. Différents modèles d'hystérésis dans la relation concentration en MES en fonction du débit peuvent être identifiés. Williams (1989) a proposé une typologie de ces relations basées sur le rapport C/Q durant les phases de montée de crue et de décrue. Cinq modèles de relations sont ainsi établis: ligne simple, hystérésis horaire, hystérésis antihoraire, linéaire simple plus boucle et figure en huit. Des interprétations en termes de processus de chacun de ces modèles ont été proposées, la plupart de ces interprétations sont reliées aux sources actives des sédiments, qui peuvent être soit éloignées de la station hydrométrique, ou bien proches de celle-ci (Walling et Webb, 1982 ; Klein, 1984 ; Williams, 1989 ; Hudson, 2003 ; Picouet et al, 2003 ; Lefrançois et al, 2005 ; Achite et al, 2013). D'autres facteurs contrôlent également l'hystérésis, notamment la taille du bassin versant, la quantité de pluie et l'humidité du sol (Klein, 1984 ; de Boer et Campbell, 1989 ; Seeger et al, 2004).

Pour classer les crues en fonction de leur boucle d'hystérésis, les graphes concentrations en MES-débits ont été tracés avec des axes linéaires pour les deux variables. La classification a été faite graphiquement selon les classes établies par Williams 1989.

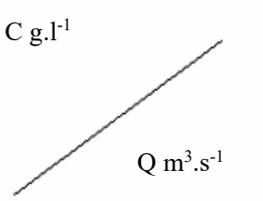
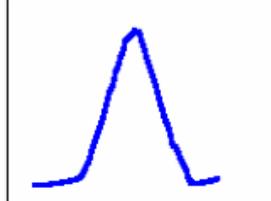
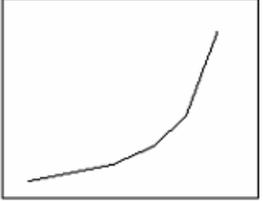
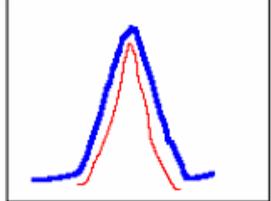
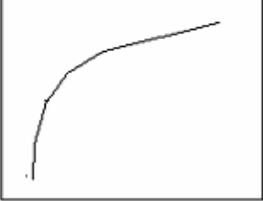
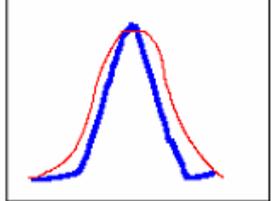
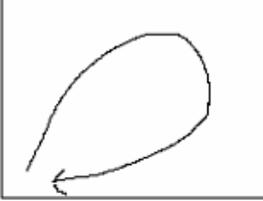
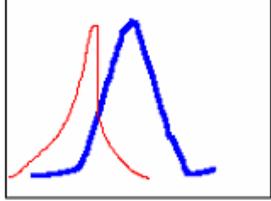
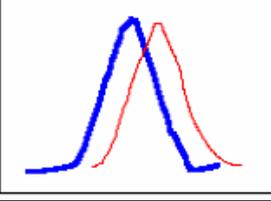
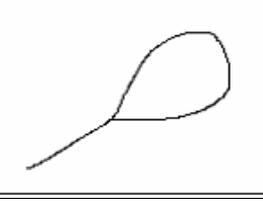
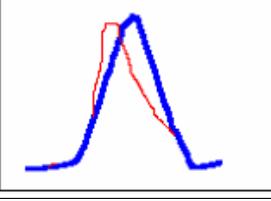
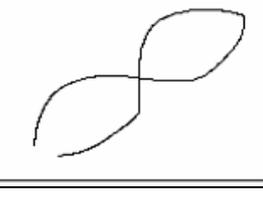
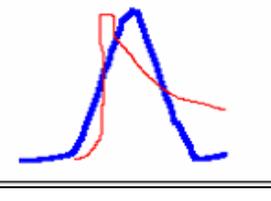
Classe	Type de relation	Illustration — Débit —	Concentration MES
I	a- Rectiligne		
	b- Curviligne convexe		
	c- Curviligne concave		
II	Boucle horaire (clockwise loop)		
III	Boucle antihoraire (counterclockwise loop)		
IV	Rectiligne plus boucle (single line plus a loop)		
V	Figure en huit (figure eight)		

Figure 5 : Les différentes classes d'hystérésis dans les relations concentration en MES-débit liquide (Williams, 1989).

3.6 Identification des classes

3.6.1 Classe I :

Cette classe représente la relation C-Q la plus simple. Ce modèle indique que les concentrations en matières en suspension doivent augmenter ou diminuer en parfaite synchronisation avec le débit liquide. Dans cette classe, la disponibilité en particules ne se limite pas à la période de la crue (Williams, 1989 ; Jansson, 2002 ; Lefrançois, 2007).

3.6.2 Classe II : (Clockwise loop)

Dans le modèle boucle horaire, le pic de la concentration arrive avant le pic de débit (figure 5). L'augmentation des concentrations en MES accompagne d'abord l'augmentation du débit en début de crue. Puis, le débit continue à augmenter mais les concentrations en MES diminuent. La disponibilité en particules n'est plus suffisante pour poursuivre la tendance initiale, soit parce que cette disponibilité a diminué dans l'absolu, soit parce que le débit augmente plus vite entraînant un effet de dilution (Lefrançois, 2007). Ce type d'hystérésis est souvent expliqué par un épuisement du stock de sédiments disponibles avant le maximum du débit (Aromborg et al, 1967 ; Walling, 1974 ; Walling et Webb, 1981 ; Wood, 1977 ; Wansickel et Beschta, 1983 ; Seeger et al, 2004). On peut expliquer ce type d'hystérésis par la distance entre les sources de sédiments et l'exutoire. Lorsque ces sources actives sont localisées près de l'exutoire, on assiste à une arrivée rapide de sédiments, produisant des boucles d'hystérésis horaire.

3.6.3 Classe III : (Counterclockwise loop)

Le pic de la concentration arrive plus tard que le pic de débit et la relation concentration-débit décrit une boucle d'hystérésis antihoraire. Ce type est expliqué par une production de sédiments répartis sur le haut du bassin versant et qui ne sont pas épuisés rapidement (Lenzi et Marchi, 2000 ; Brasington et Richards, 2000 ; Suter et al 2000 ; Seeger et al, 2004 ; Chikita et al 2005). Ces derniers mettent alors plus de temps à arriver à l'exutoire. Une autre explication possible de l'hystérésis antihoraire provient de la différence entre la vitesse de l'onde de crue et la vitesse de l'écoulement. En effet, les particules se déplacent à la vitesse du courant, qui est inférieur à la vitesse de l'onde de crue (Williams 1989). Cette différence de vitesse engendre alors un retard de l'arrivée de sédiments par rapport au pic de la crue. On peut aussi expliquer cette classe par l'effondrement de berges juste après le passage du pic de crue (Sarma, 1986 ; Ashbridge, 1995).

3.6.4 Classe IV modèle rectiligne plus boucle : (Single line plus a loop)

Ce modèle combine le modèle I et le modèle II ou III. La concentration des sédiments en suspension augmente et diminue en synchronisation avec le débit liquide pendant les premières et les dernières phases de la crue. Lors de la crue, le pic de la concentration vient avant celui du débit liquide, et produit des hystérésis avec

boucle horaire. Inversement, lorsque le pic de la concentration vient après le pic de débit, on obtient des hystérésis avec boucle antihoraire.

3.6.5 Classe V Le modèle en forme de huit :

Le modèle d'hystérésis en forme de huit, n'a été décrit que dans quelques publications (Arnborg et al. 1967, Williams 1989 ; Seeger, 2004). La forme en huit combine des parties des modèles II et III. Toutefois, dans certaines conditions, se développe une boucle de huit indépendamment des pics des variables Q et C, les deux parties de huit sont dirigées séquentiellement dans les directions opposées, le rapport C/Q pour différentes valeurs de Q explique l'orientation des courbes en fonction du temps sous une forme en huit pour les relations C-Q. En effet, bien que les maximums des concentrations et des débits arrivent au même moment, l'augmentation de C est plus rapide que celle de Q et le pic de la concentration vient avant celui du débit. Ceci donnera une boucle horaire, pendant la montée de la crue, Après, le pic de la concentration diminue doucement en fonction du temps, relativement au débit liquide, pendant la décrue et on obtient une boucle antihoraire.

4 RESULTATS ET DISCUSSION

4.1 La variabilité annuelle des débits liquides et des matières en suspension lors des crues

Durant la période d'étude (1971/2001), nous avons sélectionné les données de 84 crues comprenant 1228 couples de concentrations en MES-débits instantanés. L'analyse de ces variables montre une forte variabilité annuelle (figure 6), le débit liquide moyen interannuel des crues sélectionnées est de $123 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et le débit de pointe est de $1432 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ enregistré le 31 mars 1974 pour une concentration de $22.56 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$, les débits les plus faibles ont été enregistrés en été. Concernant les concentrations en MES, la moyenne interannuelle pendant les crues est de $40 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ avec des valeurs de pic comprises entre $0.01 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ (enregistrées à plusieurs dates) et $410 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$, enregistrée le 27 septembre 1971 pour un débit de $12.76 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. On remarque que les années 1982/83, 1987/88, 1989/90 et 1998/99 ont connu des valeurs élevées de la concentration en MES. Ceci explique par la dynamique érosive durant ces années.

Les valeurs instantanées de concentrations mesurées à la station hydrométrique de Lakhdaria sont très élevées, conformes aux valeurs observées dans d'autres régions et notamment dans les bassins versant algériens. Demmak, (1982) cite une valeur de $407 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ sur l'oued EL-Abiod. Ghernaout, (2014) a trouvé une valeur de $510 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ sur l'oued Tafna. Benkhaled et Remini, (2003), ont trouvé une valeur de $500 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ sur l'oued Wahran.

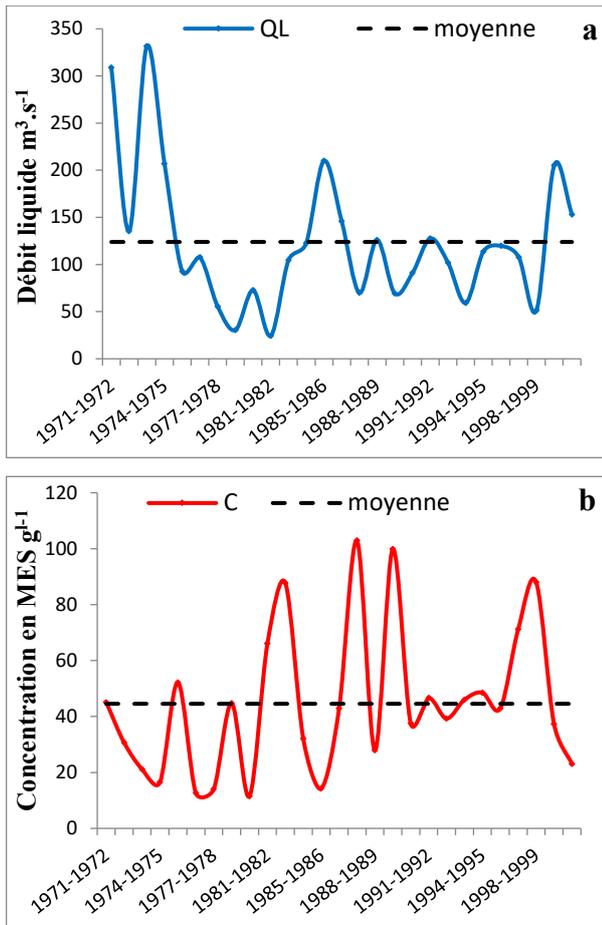


Figure 6 : La variabilité annuelle des débits liquides instantanés (a) et de la concentration en MES (b) lors des crues durant la période (1971/2001).

4.2 Analyse des différentes classes d'hystérésis :

A partir des données collectées sur une période de 30 ans (1971/2001), 84 crues ont été sélectionnées, la durée totale des crues sélectionnées est de 482.21 jours, soit 4.4 % de la période totale, le nombre annuel moyen des crues est de 2.8 crues/an et le nombre des jours moyens annuels est de 16.07 jours/an. Les relations débit-concentrations en MES présentent quatre types d'hystérésis, horaire 23.8%, antihoraire 41.66%, linéaire plus boucle 13.09% et figure en huit 21.42%.

4.2.1. Hystérésis horaire :

Les crues à hystérésis horaire sont plus fréquentes en hiver (10/20, soit 50%) parce que les fortes valeurs de débits liquides peuvent réduire significativement la disponibilité des sédiments en suspension, surtout si l'averse est de faible intensité et de longue durée. Ceci permet l'apparition du pic des concentrations avant le pic des débits. La diminution de la concentration de matières en suspension avant la diminution du débit liquide indique que les sources de sédiments sont limitées et rapidement appauvries. Ce modèle est aussi fréquent en automne où l'épuisement du stock des sédiments déposés dans le cours d'eau est rapidement mobilisé pendant la montée de la crue, ceci est confirmé par les plus fortes

concentrations en MES observées au début de la crue pour des débits faibles. Dans ce modèle, la concentration moyenne est de 45.13 g.l⁻¹, et les concentrations maximales sont enregistrées en automne et sont arrivées au début des crues (montée de la crue) (figure 7, a).

4.2.2. Hystérésis antihoraire : les crues à hystérésis antihoraire sont les plus fréquentes dans le bassin versant de l'oued Isser. Elles représentent (35/84) soit 41.66% de la contribution totale des événements. La taille et la superficie du bassin peuvent expliquer cette fréquence. Les sources de sédiments sont lointaines et répandues dans tout le bassin versant et ne sont pas épuisées rapidement, la taille et la superficie font que les sédiments en suspension transportés depuis l'amont du bassin ont besoin de plus de temps pour arriver à l'exutoire. Ce type d'hystérésis est plus fréquent au printemps (14/35) soit 40%, il se produit lorsque le sol est saturé, les écoulements sont très élevés avec une moyenne de débit de 99.3 m³.s⁻¹ ce qui engendre l'effondrement des berges avec une arrivée tardive des sédiments en suspension. Dans ce modèle d'hystérésis, la concentration moyenne est de 60.93 g.l⁻¹, les concentrations maximales sont enregistrées pendant la phase de décrue (figure 7, b).

4.2.3. Hystérésis rectiligne plus boucle : Les crues à hystérésis plus boucle sont les moins fréquentes dans le bassin versant de l'oued Isser, soit 13.09 % de la contribution totale des événements. Les caractéristiques générales de cette boucle d'hystérésis sont difficiles à résumer en raison de leur complexité. Ce type est plus fréquent en hiver 8/11 soit 72%. L'hystérésis rectiligne plus boucle dans le sens antihoraire s'explique par l'arrivée tardive des sédiments en suspension à cause de l'érosion du sol et des versants dans des zones éloignées de la station hydrométrique et de l'effondrement des berges. Dans ce type d'hystérésis, la concentration en MES moyenne est de 63.94 g.l⁻¹ (figure 7, c).

4.2.4. Hystérésis figure en huit : Ce type d'hystérésis comporte deux modèles (horaire et antihoraire). Leur répartition saisonnière est pratiquement équivalente pour l'automne, l'hiver et le printemps. Ce type n'est pas enregistré en été. Durant la première étape, l'hystérésis part dans le sens horaire, les sources des sédiments en suspension sont proches de l'exutoire et produisent une hystérésis horaire. Au fur et à mesure, ces zones contributives sont rapidement épuisées. Durant la décrue, les débits diminuent en concomitance avec l'arrivée des sédiments en MES des sources lointaines et on observe une orientation de la boucle vers le sens antihoraire. Dans ce type d'hystérésis, la concentration en MES moyenne est de 32.43 g.l⁻¹ (figure 7, d).

Classe	Saison	F	D	\bar{C}	\bar{Q}	Cmax	Q cor Cmax	Al	As
II	Automne	5/20	15.65	99.53	94.21	386	34.5	127.3	12.67
	Hiver	10/20	76.4	21.70	217.2	81.67	371.7	1433.7	31.11
	Printemps	5/20	31.1	14.16	243	52	109	652.95	9.24
	Eté								
	Total	20/20	123.1	45.13	184.8	386	34.5	2214	53.03
III	Automne	10/35	30.84	91.87	35.62	300.89	22.24	94.9	8.71
	Hiver	8/35	61.12	25.85	135.21	98.28	59.8	714	18.45
	Printemps	14/35	87.08	28.58	99.3	153.4	21.48	747.1	21.34
	Eté	3/35	11.17	97.45	50.91	194.51	126.7	49.13	4.78
	Total	35/35	190.21	60.93	80.26	300.89	22.24	1605.1	53.28
IV	Automne	1/11	2.41	94.64	56.84	134.44	150.8	11.83	1.12
	Hiver	8/11	61.5	34.78	45.86	79.94	102.64	243.6	8.47
	Printemps	1/11	5.30	26.12	208.21	56	380	95.34	2.49
	Eté	1/11	4.17	100.2	93.72	341.7	169	33.76	3.38
	Total	11/11	73.38	63.94	101.1	341.7	169	384.6	15.46
V	Automne	7/18	19.17	63.69	74.56	311.8	135	123.5	7.87
	Hiver	7/18	53.48	20.37	184.5	73.92	231	852.5	17.3
	Printemps	4/18	24.88	13.24	182.8	46.16	661.16	392.9	5.18
	Eté								
	Total	18/18	97.56	32.43	147.2	311.8	135	1368.9	30.35
Total	Automne	23/84	68.07	87.43	65.3	386	340.5	357.54	30.37
	Hiver	33/84	252.5	25.67	145.72	98.28	59.8	3243.8	75.33
	Printemps	24/84	148.3	20.52	183.3	153.4	21.48	1888.3	38.25
	Eté	4/84	13.34	98.84	72.31	341	169	82.89	8.16
	Total	84/84	482.21	58.11	116.66	386	34.5	5572.5	152.11

F : fréquence de la crue ; D : durée de la crue (jour) ; C : concentration en MES moyenne en (g.l^{-1}) ; Q : moyen des débits liquides instantanés de la saison en ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) ; C max : concentration maximale (g.l^{-1}) ; Al : apport liquide des crues de la saison en (hm^3) ; As : Apport solide en ($*10^6$ Tonnes) ; Q cor Cmax : débit liquide instantané correspondant à Cmax

ANALYSE DE LA RELATION DEBIT-MATIERE EN SUSPENSION DURANT LES CRUES DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED ISSER.

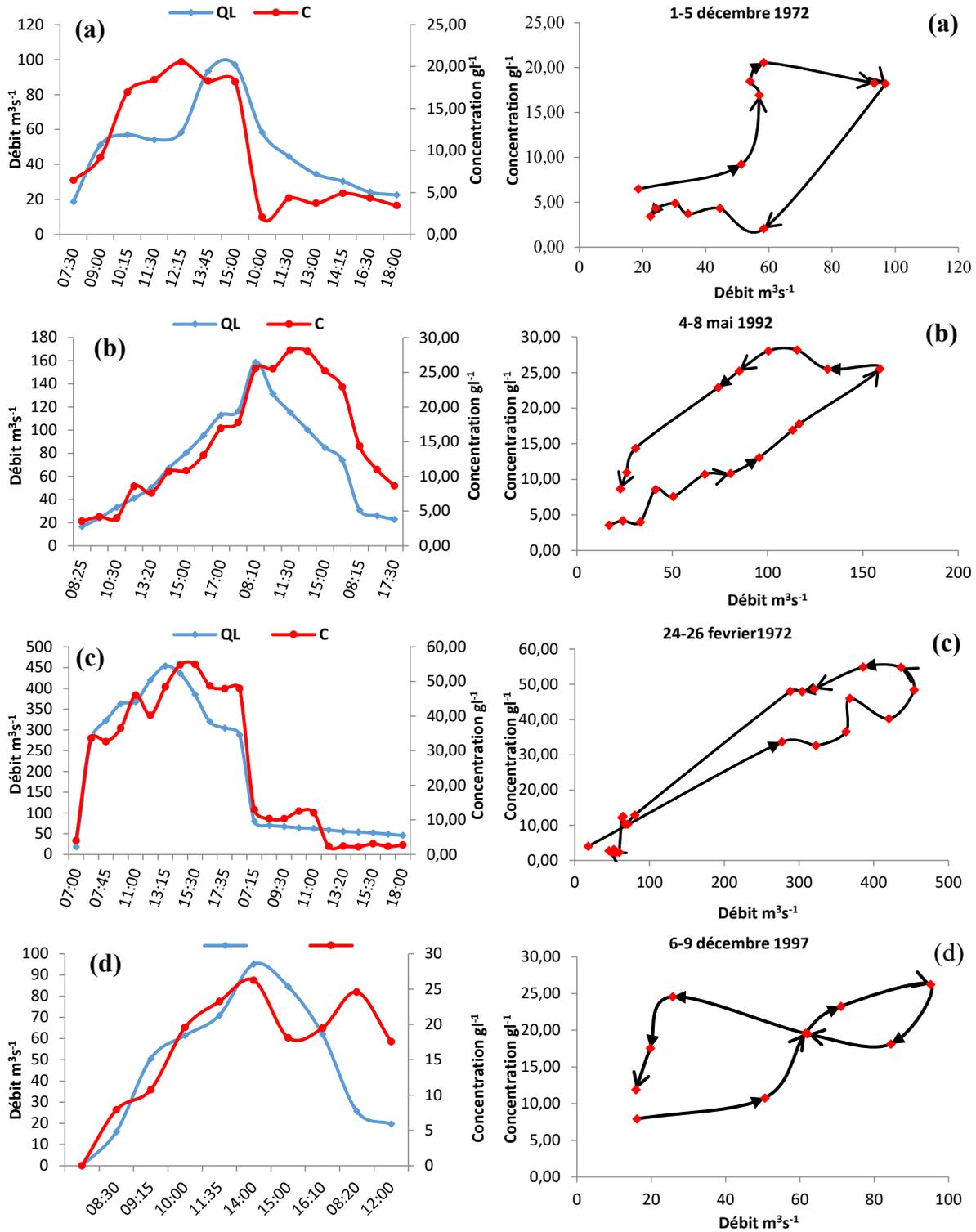


Figure 7 : Evolution des concentrations de MES et des débits en fonction du temps lors des crues, (a) hystérésis horaire ; (b) hystérésis antihoraire ; (c) rectiligne simple plus boucle ; (d) figure en huit

Les concentrations en MES sont plus élevées en hystérésis antihoraire 60.93 g.l^{-1} que pour l'hystérésis horaire 45.13 g.l^{-1} . Elles s'expliquent par la présence dans la partie aval du bassin, sources proche de la station de jaugeage, d'un couvert forestier bien développé. La partie aval du bassin fournit moins de sédiments en suspension par rapport à la partie amont (sources lointaines de la station de jaugeage), qui se caractérise par un couvert végétal faible et dégradé, et qui est occupé par des cultures essentiellement céréalières et fourragères.

La figure 7 présente 4 phénomènes de crues de types différents sélectionnés dans l'étude et montre bien les caractéristiques de chaque type d'hystérésis. Elle met en évidence clairement l'évolution des concentrations en MES en fonction de débits liquides.

4.3 Saisonnalité des crues sélectionnées

L'étude des relations débit-concentration en MES lors des crues sur le bassin versant de l'oued Isser sur une période de 30 ans (1971/2001) a mis en évidence une forte variabilité saisonnière de la dynamique des matières en suspension.

4.3.1. En automne, 23 événements présentent quatre modèles d'hystérésis, horaire 5.88%, antihoraire 11.76%, rectiligne simple plus boucle 1.17% et figure en huit 8.23%, soit 27.05% de la contribution totale des événements. Les crues d'automne sont caractérisées par une courte durée (en moyenne 2.95 jours/crue) et par de fortes valeurs des concentrations en MES, la moyenne arithmétique de la concentration en MES est de 87.43 g.l^{-1} pour plus de 23 événements. Cette quantité est attribuée à la disponibilité des matières en suspension, liée à la présence d'un stock important de sédiments en suspension où après une saison sèche, le sol est particulièrement fragilisé, mal protégé par le couvert végétal et facilement érodable. Ces facteurs sont associés à des pluies pouvant être violentes et de courte durée, l'érosion est active dès les premières pluies qui, même si elles génèrent un faible débit liquide, peuvent véhiculer des concentrations de sédiments en suspension très élevées comme la crue des 25-26 septembre 1971 avec un débit de $34 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ et une concentration en MES de 386 g.l^{-1} .

4.3.2. En hiver et au printemps, 33 et 24 événements ont été enregistrés respectivement, soit 39.28% et 28.57% du nombre total des événements. Les crues de ces saisons sont caractérisées par une longue durée (7.65 jours/crue pour l'hiver et 6.17 jours/crue pour le printemps). Les crues fréquentes en hiver et au printemps sont caractérisées par des débits liquides moyens élevés soit $145.72 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en hiver et $183.3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ au printemps. La moyenne arithmétique des concentrations en matières en suspension est faible en hiver (25.67 g.l^{-1} pour les 33 crues) et plus faible au printemps (20.52 g.l^{-1} pour 24 crues). Les eaux de ruissellement sont donc moins chargées en particules en suspension puisque la quasi-totalité des sédiments du lit et du versant a été transportée lors des premières crues de la saison d'automne. Durant

ces deux saisons, le sol, plus ou moins saturé et bien couvert résiste mieux à la pluie. L'érosion et le transport solide sont légèrement retardés par rapport aux écoulements.

4.3.3. En été, la fréquence des événements est très faible parce que cette saison correspond au régime d'étiage, avec des pluies et des crues plus rares. Seules 4 crues ont été enregistrées représentant 4.76% du nombre total des événements. Les crues d'été sont caractérisées par une courte durée soit 3.33 jours/crue, et également par des concentrations en matière en suspension élevées 98.84 g.l^{-1} .

Dans le bassin versant de l'oued Isser, les crues se caractérisent par des courtes durées et une forte turbidité en automne et en été (particulièrement au mois d'août), avec une plus faible fréquence des événements en été. Par contre, les crues les plus fréquentes et de longue durée se déroulent en hiver et au printemps, avec une turbidité plus faible.

4.4 Rendement des crues sélectionnées :

Dans le bassin versant de l'oued Isser, l'apport liquide moyen annuel lors des crues au cours de la période (1971/2001) est de 185.75 hm^3 par an. La répartition saisonnière des apports liquides indique que 108.12 hm^3 et 62.94 hm^3 ont été écoulés respectivement pendant l'hiver et le printemps. Ces quantités représentent 58.21% et 33.88% soit 92% du rendement total de volume d'eau, le reste soit 8% est réparti en automne et en été (figure 8, a). Cette variabilité s'explique par les quantités de pluie tombées en hiver et au printemps et également par la durée et la fréquence de ces crues.

L'apport solide en suspension moyen annuel estimé pour les 84 crues de la période d'étude (1971/2001) est de 5.07 millions de tonnes, ce qui correspond à une dégradation spécifique aux crues de $1222 \text{ t.km}^{-2}\text{an}^{-1}$ en moyenne inter-annuelle. La répartition saisonnière des flux sédimentaires indique que 2.51Mt, 1.27Mt, 1.01Mt et 0.27 millions de tonnes ont été transportés respectivement pendant l'hiver, le printemps, l'automne et l'été (figure 8, b). Les tonnages importants des transports sédimentaires en hiver et au printemps sont dus aux forts apports liquides durant ces saisons. En automne, malgré les apports liquides plus faibles que l'hiver et le printemps (6.41%), la part des apports solides est de 19.96 % de la contribution totale des sédiments en suspension. Ceci s'explique par le fait que la saison d'automne arrive après une longue période sèche où les précipitations plus ou moins violentes, tombent sur un sol asséché et mal protégé par la végétation (Chébbani et al, 1999 ; Roose et al, 1999). Elle produit alors pour de faibles écoulements des apports solides en suspension importants.

Les classes de crues à hystérésis horaire et notamment antihoraire sont largement majoritaires, elles sont liées principalement à la taille et la forme du bassin. Elles représentent 66% des événements totaux et sont responsables de la production de 3.54 millions de tonnes par an, soit 70% des flux de sédiments en suspension

totaux. Ces quantités de sédiment en suspension sont essentiellement dues à la disponibilité en particules mobilisables, qui dépend elle-même du stock de sédiments déposés au niveau des sources lointaines et des sources proche avec faible ampleur. Ainsi, les particules en suspension proviennent essentiellement du cours d'eau lui-même, où l'érosion des berges constituée une source importante de sédiments correspond aux berges désolidarisées voire effondrées dans le cours d'eau. Les classes rectiligne plus boucle et figure en huit n'en totalisent que 30%, soit 1.52 millions de tonnes par an. Ces classes sont rarement détectées au niveau du bassin de l'oued Isser.

La plus grande crue en terme d'apport solide en suspension a été enregistrée en hiver pendant l'évènement de crue de 18 au 24 janvier 1972 et a enregistré un volume d'eau de 556 hm³ avec un débit liquide moyen de 841 m³.s⁻¹ et un débit de pointe qui a égalé 1360 m³.s⁻¹ et a permis de transporter 24.85 millions de tonnes, soit 15.77% de la contribution totale des sédiments sur 30 ans. Les sept crues principales (8.33% des évènements totaux) donnent des apports de sédiments en suspension de 62.34 million de tonnes, ce qui représente 41% de la contribution totale des sédiments en suspension sur 30 ans.

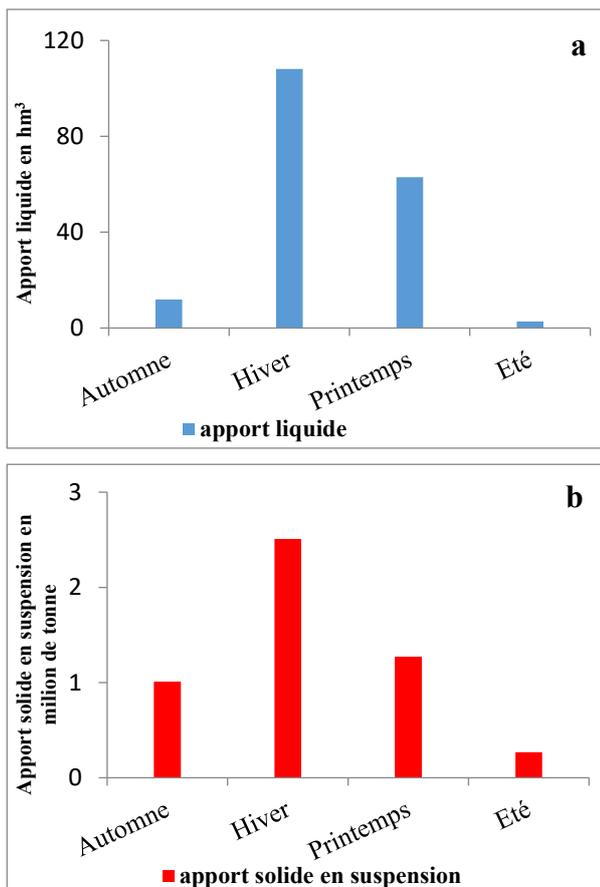


Figure 8 : Répartition saisonnière des flux hydrosédimentaires des crues sélectionnées **a :** apport liquide en hm³, **b :** apport solide en suspension en 10⁶ tonnes.

4. CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons examiné la relation entre la concentration des sédiments en suspension C et le débit liquide QL pendant les évènements de crues dans le bassin versant de l'oued Isser d'une superficie de 4149 km² sur une période 30 ans (1971/2001). L'étude est basée sur les données de débits liquides et de concentrations représentant 84 évènements de crues. Le bassin de l'oued Isser est caractérisé par des concentrations de matières en suspension très élevées qui atteignent la valeur de 410g.l⁻¹. L'analyse statistique des variables QL et C montre une variabilité inter-annuelle et saisonnière très importante, la concentration en MES est très élevée en automne et en été (particulièrement au mois d'août) et faible en hiver et au printemps. L'évolution des concentrations des sédiments en fonction des débits liquides pendant les crues présente quatre modèles d'hystérésis : horaire, antihoraire, rectiligne plus boucle et figure en huit.

L'analyse par hystérésis montre l'importance de l'effet saisonnier sur la forme des boucles obtenues, d'une part. D'autre part, elle montre que la partie amont du bassin fournit plus de sédiments en suspension que la partie avale. Ceci est à attribuer à la présence dans la partie avale du bassin, d'un couvert forestier bien développé. Par contre, la partie amont du bassin se caractérise par un couvert végétal faible et dégradé, et elle est occupée par des cultures essentiellement céréalières et fourragères.

L'analyse saisonnière des crues montre que les crues d'automne et d'été sont de courte durée avec une turbidité assez forte. En hiver et au printemps, les crues sont de longue durée avec une turbidité assez faible.

L'apport moyen annuel des crues en termes de transport solide en suspension est de 5.07 millions de tonnes, ce qui correspond à une dégradation spécifique en moyenne annuelle lors des crues de 1222 t.km⁻².an⁻¹. La dégradation spécifique annuelle égale à 504 t.km⁻².an⁻¹, intègre les différents cycles de l'écoulement annuel (basses, moyennes et hautes eaux). Cette valeur (1222 t.km⁻².an⁻¹) est supérieure à celle trouvée par Megnounif et al (2013) pour le bassin de l'oued Sebdu, qui a trouvé en utilisant la même méthode 341 t.km⁻².an⁻¹ produits pendant les crues. Cette différence reflète l'importance de l'érosion dans le bassin de l'oued Isser et notamment dans sa partie amont.

Le modèle à hystérésis antihoraire est prédominant sur le bassin versant de l'oued Isser. Ceci est dû essentiellement à la taille et la forme du bassin. L'hiver est responsable de 49.52% du flux de sédiment total, les hystérésis horaire et antihoraire sont les plus fréquentes et sont responsables de 70% de flux total de sédiments.

REFERENCES :

- Achite, M. Meddi, M. 2004. Estimation du transport solide dans le bassin versant de l'Oued Haddad (Nord-Ouest Algérien). *Sécheresse*, 15 (4), 367–373.
- Achite, M., Ouillon, S., 2007. Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973–1995). *J. Hydrol.* 343, 187–202.
- Asselman, N.E.M., 1999. Suspended sediment dynamics in a large drainage basin: the River Rhine. *Hydrol. Proc.* 13, 1437–1450.
- Baca, P., 2008. Hysteresis effect in suspended sediment concentration in the Rybárik basin, Slovakia. *Hydrol. Sci. J.* 53 (1), 224–235.
- 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.
- Benkhaled, A., Remini, B., 2003a. Variabilité temporelle de la concentration en sédiments et phénomène d'hystérésis dans le bassin de l'Oued Wahrane (Algérie). *J. Sci. Hydrol.* 48 (2), 243–255.
- Benkhaled, A., Remini, B., 2003b. Analyse de la relation de puissance: débit solide – débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'Oued Wahrane (Algérie). *Rev. Sci. Eau* 16 (3), 333–356 .
- Bouanani, A., 2004. Hydrologie, transport solide et modélisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW–Algérie). Ph.D. Thesis, Tlemcen University, Algeria, 250p.
- Bourouba, M., 1997. Les variations de la turbidité et leurs relations avec les précipitations et les débits des oueds semi-arides de l'Algérie orientale. *Bulletin de l'ORSTOM*, 17, 345–360.
- Elmahi, 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.
- Ghenim, A., Seddini, A., Terfous, A., 2008. Variation temporelle de la dégradation spécifique du bassin versant de l'Oued Mouilah (nord-ouest Algérien). *Hydrol. Sci. J.* 53 (2), 448–456 .
- Ghenim, A., Terfous, A., Seddini, A., 2007. Etude du transport solide en suspension dans les régions semi-arides méditerranéennes: cas du bassin versant de l'oued Sebdu (nord-ouest algérien). *Sécheresse* 18 (1), 39–44 .
- Ghorbal, A., Claude, J., 1977 . Mesure de l'envasement dans les retenues de sept barrages en Tunisie: estimation des transports solides, vol. 122. IAHS Publication, pp. 219–232.
- Heidel, S.G., 1956. The progressive lag of sediment concentration with flood waves. *Trans. Am. Geophys. Union* 37, 56–66 .
- Hudson, P.F., 2003. Event sequence and sediment exhaustion in the lower Panuco basin, Mexico. *Catena* 52, 57–76 .
- Jansson, M.B., 2002. Determining sediment source areas in a tropical river basin, Costa Rica. *Catena* 47, 63–84 .
- Kassoul, M., Abdelgader, A., Belorgey, M., 1997. Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie. *Rev. Sci. Eau* 3, 339–358 .
- Khanchoul, K., Jansson, M.-B., 2008. Sediment rating curves developed on stage and seasonal means in discharge classes for the Mellah Wadi, Algeria. *Geogr. Ann.* 90A (3), 227–236 .
- Klein, M., 1984. Anti clockwise hysteresis in suspended sediment concentration during individual storms: Holbeck catchment; Yorkshire, England. *Catena* 11, 251–257.
- Lefrançois, J. Grimaldi, C. Gascuel, O. Gilliet, N. 2003. Origins and dynamic sediment in small agricultural catchment. The Fourth International Celtic colloquium on Hydrology, Guimarães Portugal. July 11 -14, 1 -13.
- Lefrançois, J., Grimaldi, C., Gascuel-Oudou, C. & Gilliet, N. (2007) Suspended sediment and discharge relationships to identify bank degradation as a main sediment source on small agricultural catchments. *Hydrol. Processes* 21, 2923–2933
- Lenzi, M. A. & Marchi, L. (2000) Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy). *Catena* 39, 267–282.
- Megnounif, A. Terfous, A. Ghenaim, A. Poulet, J.B., 2007. Key processes influencing erosion and sediment transport in a semi-arid Mediterranean area: the upper Tafna catchment, Algeria. *Hydrol. Sci. J.* 52 (6), 1271–1284.
- Megnounif, A., Terfous, A. Ouillon, S. 2013. A Graphical method to study suspended sediment dynamics during flood events in the Wadi Sebdu. N.W (Algeria) (1973 -2004). *Journal of hydrology* 497, 24 -36.
- Picouet, C., Hingray, B., Olivry, J.C., 2001. Empirical and conceptual modelling of the suspended sediment dynamics in a large tropical African river: the upper Niger river basin. *J. Hydrol.* 250, 19–39.
- Roose, E., Arabi, M., Chebbani, M., Mazour, M., Morsli, B., 1998. Les montagnes méditerranéennes d'Algérie. Impact de l'intensification de l'agriculture de montagne sur l'environnement et les revenus. *ORSTOM Actualité Spécial Erosion* 56, 26–27.
- 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. Hydrol.* 288, 299–311.
- Terfous, A., Megnounif, A., Bouanani, A., 2001. Study of the suspended load at the river Mouilah (north west Algeria). *Rev. Sci. Eau* 14 (2), 173–185.
- Walling, D.E., Webb, B.W., 1981. The reliability of suspended load data. *Erosion and Sediment Transport Measurement*, vol. 133. IAHS Publication, pp. 177–194.
- Walling, D.E., Webb, B.W., 1982. *Sediment Availability and Prediction of Stormperiod Sediment Yields*, vol. 13. IAHS Publication, pp. 327–337.
- Williams, G.P., 1989. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *J. Hydrol.* 111, 89–106.