



ANALYSE DE L'EFFET D'HYSTERESIS SUR LA RELATION CONCENTRATION DES SEDIMENTS EN SUSPENSION - DEBIT LIQUIDE (C-Q) DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED MINA (ALGERIE)

ANALYSIS OF HYSTERESIS EFFECT ON THE SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION - LIQUID FLOW (C-Q) RELATIONSHIP IN THE WADI MINA WATERSHED (ALGERIA)

GHERNAOUT R.¹, REMINI B.²

¹ Département de Génie Civil, Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées,
Université Akli Mohand Oulhadj, Bouira 10000, Algérie,

² Département des Sciences de l'Eau et Environnement, Faculté de Technologie,
Université Blida 1, Blida, 09000, Algérie.

rghernaout27@yahoo.fr, reminib@yahoo.fr

RESUME

La relation fondamentale entre la concentration des sédiments en suspension C , d'un cours d'eau et son débit liquide Q , durant les crues est étudiée de manière qualitative par analyse des graphiques temporels et des courbes d'hystérésis (C-Q). L'étude de 20 crues de chacune des deux stations hydrométriques du bassin versant de l'Oued Mina est orientée beaucoup plus vers l'aspect graphique et statistique que donnerait la mise en graphe de C et Q . L'analyse de l'effet d'hystérésis sur la relation, concentration - débit liquide, a permis à travers des séries d'événements chronologiques de caractériser la relation (C-Q), d'élaborer une classification de cette relation, et d'en ressortir les modèles de boucle d'hystérésis dominants. Les modèles sens des aiguilles d'une montre, sens contraire des aiguilles d'une montre et modèle en forme de huit sont les plus dominants sur le bassin versant de Oued Mina, aussi bien pour la station hydrométrique d'Oued El-Abtal que pour la station de Sidi AEK Djilali. L'analyse de l'hystérésis par classe a montré l'absence relative de l'effet saisonnier sur la forme de la boucle obtenue. Les saisons d'Automne, d'Hiver et

de Printemps présentent une hétérogénéité des classes à cause d'une hétérogénéité du bassin du point de vue lithologie et de point de vue de la répartition spatiale des pluies (irrégularité du régime pluviométrique et hydrologique du bassin) et de l'étalement de la période d'été.

Mots clés : crues; débit liquide; concentration des sédiments en suspension; hystérésis; bassin versant Oued Mina; Oued El-Abtal; Sidi AEK Djilali; Algérie

ABSTRACT

The fundamental relationship between the concentration of suspended sediment, C , of a river and its water discharge, Q , during floods is studied qualitatively by analyzing temporal graphics and hysteresis curves (C - Q) graphics. The study of 20 floods of both gauging stations in the Wadi Mina watershed is much more oriented toward the graphics and statistics that would give the development graph of C and Q . Analysis of the hysteresis effect on the relationship, concentration - liquid flow, enabled through a series of chronological events to characterize the relationship (C - Q), to develop a classification of this relationship, and emerge models dominant hysteresis loop. The models clockwise direction, counterclockwise direction and figure-eight are the most dominants in the Wadi Mina watershed, for both Wadi El-Abtal and Sidi AEK Djilali gauging stations. The hysteresis analysis by class showed the relative absence of the seasonal effect on the shape of the loop obtained. The Autumn, Winter and Spring seasons have heterogeneous classes due to the heterogeneity of the basin, in terms of lithology and spatial distribution of rainfall (irregular rainfall-runoff regime of the basin), and the spread of the summer period.

Key words: floods; liquid flow, concentration of suspended sediment; hysteresis; Wadi Mina watershed, Wadi El-Abtal; Sidi AEK Djilali; Algeria

INTRODUCTION

La relation entre la concentration des sédiments en suspension C et le débit liquide Q dans les rivières algériennes est complexe et difficile à évaluer. Certaines de ces difficultés sont liées aux méthodes d'échantillonnage et au manque de données particulièrement celles relatives à la concentration des sédiments en suspension (Ghernaout, 2014 ; Ghernaout & Remini, 2017). Le débit solide moyen des sédiments en suspension qui transitent une section

d'écoulement est le produit de la concentration moyenne des sédiments en suspension et du débit liquide moyen durant une période de temps donné. La concentration (ou le débit) des sédiments en suspension et le débit liquide évoluent en général suivant un modèle de puissance $Y=aX^b$ où a et b sont des paramètres généralement estimés par régression linéaire des variables transformées en log (Fleming, 1969 ; Batala & Sala, 1992 ; Benkhaled & Remini, 2003 ; Bouanani, 2004 ; Khanchoul & al., 2012, Ghernaout et Remini, 2014, Ghernaout et Remini, 2017). La méthode traditionnelle des mesures des débits liquides basée sur l'utilisation de la courbe de tarage, la méthode d'échantillonnage uni ponctuel et l'imprécision des mesures de concentrations des sédiments en suspension sont des contraintes rencontrées lors de la quantification du transport solide en suspension et lors des études des bilans sédimentaires ou d'analyse de la relation concentration (ou débit solide) – débit liquide.

Dans cette analyse, on cherche à caractériser et mieux connaître la relation (C-Q) à travers des séries d'événements chronologiques (crues). L'analyse à mener est orientée beaucoup plus vers l'aspect graphique que donnerait la mise en graphe selon l'ordre chronologique de C et Q. La dispersion des points est une caractéristique très importante qui, avec d'autres caractéristiques liées à l'allure du graphe (asymétrie et aplatissement), permettra d'effectuer des combinaisons en liaison avec le phénomène. L'objectif de ce travail est d'élaborer une classification de cette relation, et d'en ressortir les modèles de boucles d'hystérésis dominants, pour une meilleure compréhension du phénomène du transport solide en suspension dans le bassin versant de l'Oued Mina. L'analyse s'effectue principalement en deux étapes :

- a) Identification et classement des principaux types de la relation (C-Q);
- b) Analyse et discussion de chaque type de relation.

Ce travail servira également à décrire la dynamique sédimentaire en période de crues, propre au bassin considéré. Les boucles d'hystérésis de la relation (C-Q) sont représentées dans le tableau 1. Ce tableau représente probablement la majorité des boucles d'hystérésis relevées à travers les différentes recherches effectuées dans plusieurs bassins du monde.

Tableau 1 : Classes des relations (C-Q)

Classe	Modèle	Critère C/Q	Référence
I	Courbe simple (single line)	$(C/Q)_m \approx (C/Q)_d$	Wood (1977)
	Ligne droite	Les pentes des deux sections montée et décrue sont égales.	
	Courbe, la pente croit quand Q augmente	Les pentes des deux sections montée et décrue sont inégales.	
	Courbe, la pente décroît quand Q augmente	Les pentes des deux sections montée et décrue sont inégales.	
II	Boucle dans le sens des aiguilles d'une montre (Clockwise loop)	$(C/Q)_m > (C/Q)_d$ pour toutes les valeurs de Q.	Williams (1989)
III	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (Counterclockwise loop)	$C/Q)_m < (C/Q)_d$ pour toutes les valeurs de Q.	Axelson (1967)
IV	Linéaire simple plus une boucle (single line plus a loop)	$(C/Q)_m \approx (C/Q)_d$ pour une partie des valeurs de Q.	-
		$C/Q)_m > < (C/Q)_d$ pour une autre partie des valeurs de Q.	
V	Forme en huit (figure eight)	$(C/Q)_m > (C/Q)_d$ pour une partie des valeurs de Q.	Amborg et al. (1967)
		$C/Q)_m < (C/Q)_d$ pour l'autre partie des valeurs de Q.	

Les parties montée et décrue représentent les deux zones de base pour l'analyse des classes d'hystérésis. Le rapport C/Q, considéré comme étant le premier critère de base, est un critère simple, objectif et fiable. Les relations C/Q sont généralement assez différentes. Les notions du stock des sédiments disponibles, de l'escarpement des berges, des irrégularités des cours d'eau, de l'intensité et de la durée de l'averse peuvent expliquer cette diversité des relations C/Q.

PRESENTATION DE LA REGION D'ETUDE

Situé en zone semi aride, le bassin versant de l'Oued Mina répond à notre objectif en raison de sa forte érodabilité et de la disponibilité des données pluviométriques et hydrométriques. Situé à environ 300 kilomètres d'Alger,

Analyse de l'effet d'hystérésis sur la relation concentration des sédiments en suspension - débit liquide (c-q) dans le bassin versant de l'oued mina (Algérie)

entre 0°20' et 1°10'E et entre 34°40' et 35°40'N, le bassin versant de l'Oued Mina draine, au niveau de barrage de Sidi M'Hamed Ben Aouda, une superficie de 4900km² (Touaibia *et al.*, 2003, Ghernaout & Remini, 2014, 2017, 2018). L'Oued Mina est parmi les principaux affluents de l'Oued Cheliff. Il parcourt une distance de 90km environ entre les barrages de Bakhada et de Sidi M'Hamed Benaouda avec une orientation SE-NO (Figures 1.a et 1.b). Son relief est très accidenté et est qualifié d'assez fort selon la classification d'Orostrom (Dubreuil, 1974), les altitudes maximales et minimales étant respectivement de l'ordre de 1339m et de 145m avec une dénivelée spécifique de 505m. Le climat de la région est de type semi-aride méditerranéen avec une précipitation moyenne annuelle de 305mm marquée par une irrégularité aussi bien saisonnière qu'interannuelle (Touaibia, 2000 ; Touabia *et al.*, 2003). Le régime hydrologique des cours d'eau dépend essentiellement du régime pluviométrique (Meddi, 1995 ; Meddi, 1996). Il se caractérise par une grande variabilité spatio-temporelle, avec une succession de périodes de hautes et de basses eaux (Ghernaout, 2014). En outre, l'analyse de la répartition géographique des formations végétales, leurs diversités et leurs parts respectives sur le bassin versant de l'Oued Mina a montré deux parties bien distinctes: La zone du nord (éocène, miocène et oligocène) purement marneuse, fortement érodé et dépourvue de végétation et la zone jurassique du Sud moins érodée où près de 50 % de sa surface est recouverte par une végétation de densité variable (Ghernaout, 2014, Ghernaout & Remini, 2014 ; Ghernaout & Remini, 2018).

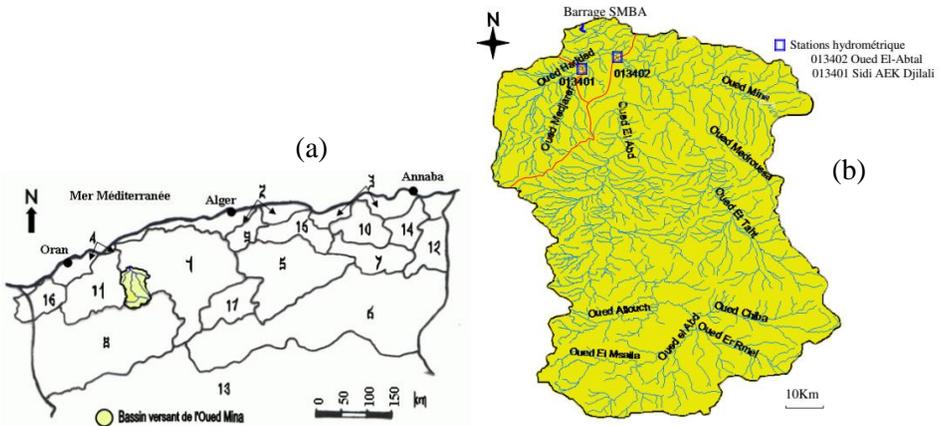


Figure 1 : Bassin versant de l'Oued Mina. (a) Situation géographique (Ghernaout, 2014), (b) Réseau Hydrographique

SELECTION DES CRUES

Bien que ce n'est pas toujours évident, vu le manque et l'imprécision des données, nous allons présenter, dans ce qui suit, les graphes des relations (C-Q) pour les plus importantes crues au niveau des deux stations hydrométriques Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali. Nous essayons en même temps de caractériser et de classer ces différentes relations pour une meilleure compréhension du phénomène. Vingt (20) crues pour chacune des deux stations hydrométriques réparties sur les périodes d'études ont été retenues et analysées représentant des épisodes ayant différentes caractéristiques (tableau 2). Cette sélection n'est pas exhaustive, mais elle permet de fournir le maximum d'information sur la relation (C-Q), en identifiant le modèle d'hystérésis dominant.

Tableau 2 : Chronologie des crues sélectionnées

N°	Station de Oued El-Abtal		Station de Sidi AEK Djilali	
	Date	Taille n	Date	Taille n
1	16-17 Oct. 1986	63	27 Nov. 1982	10
2	03-05 Oct. 1988	64	02 Mai 1985	08
3	31 Aou. -02 Sep. 1989	63	30 Sep. 1987	15
4	01-02 Mai 1990	59	01-02 Jan. 1988	15
5	05-07 Mai 1993	49	03 Oct. 1988	07
6	23-25 Sep. 1993	68	01 Mai 1990	07
7	19-21 Oct. 1993	31	11-12 Nov. 1990	13
8	28-29 Sep. 1994	23	29-30 Sep. 1994	50
9	16-20 Oct. 1994	75	12-13 Mar. 1995	31
10	12-15 Jan. 1996	119	09-10 Oct. 1995	49
11	07-08 Fév. 1996	36	05-06 Déc. 1995	44
12	13-14 Mar. 1996	29	08-09 Mar. 1996	14
13	21-23 Avr. 1997	65	09-10 Mar. 1996	32
14	25-26 Avr. 1997	30	20-21 Avr. 1997	17
15	22-24 Aou. 1997	43	25 Aou. 1997	46
16	25-27 Aou. 1997	48	07 Oct. 1997	45
17	18-19 Sep. 1997	36	13 Déc. 1997	17
18	27-29 Nov. 1997	48	16-17 Mar. 1999	21
19	27-28 Sep. 1999	47	28 Mar. 1999	09
20	07-09 Oct. 1999	46	27 Sep. 1999	23

Leopold *et al.* (1964) ont constaté, après avoir analysés les enregistrements des concentrations C et débits liquides Q dans plusieurs bassins versants des états unis, qu'une grande partie de la charge annuelle des sédiments s'est produite

durant des crues modérées avec répétition fréquente. De plus, les périodes des crues sont de courte durée, et la durée cumulée de tous les événements de crue représente, en effet, un faible pourcentage de temps annuel. Les données de débit liquide Q (m^3/s) et de concentration C (g/l) sont mises en graphe avec en ordonnée la concentration et le débit liquide, et en abscisse le temps comme variable indépendante (graphes temporels). Pour la représentation graphique de l'hystérésis, la concentration est prise en ordonnée et le débit liquide en abscisse.

IDENTIFICATION DES CLESSES DE LA RELATION (C-Q)

L'identification des différentes classes de relations (C-Q) est élaborée sur la base des résultats graphiques et statistiques des deux variables mises en relation. Les graphes temporels et d'hystérésis de quelques événements sélectionnés pour les deux stations hydrométriques Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali sont représentées dans les figures 2, 3 et 4. Les tableaux 3 et 4 présentent les grandeurs statistiques des crues sélectionnées dans cette étude. Ces paramètres fournissent des informations très importantes sur l'allure des graphes temporels et d'hystérésis et tentent d'élaborer une esquisse de classification de la relation (C-Q). Les paramètres d'aplatissement et d'asymétrie ont été considérés comme outils d'analyse statistique, bien que le nombre des données de concentration C et du débit liquide Q pour la station hydrométrique de Sidi AEK Djilali est relativement faible. Les problèmes de fréquence d'échantillonnage se répercutent sur la signification de l'utilisation de ces deux paramètres dans ce cas. Le tracé des vingt graphes temporels et d'hystérésis permet de constater les caractéristiques types pour chaque crue. La procédure de classement des crues sélectionnées est effectuée en regroupant les boucles ayant la même orientation, et en séparant les boucles d'une même classe ayant différentes formes en analysant les critères retenus dans le tableau 2. L'application de l'approche d'hystérésis, pour les différentes crues enregistrées au niveau des deux stations hydrométriques Oued El-Abtal et Sidi AEK Djilali durant les périodes de données disponibles, fait ressortir la distribution (tableau 5 et 6) des différentes classes d'évolution, des relations concentration en sédiments transportés C - débit liquide Q , et leur fréquence relative. Les résultats des tableaux 3, 4, 5 et 6 confirment bien que le rapport (C/Q) est le critère fondamental dans l'identification des boucles d'hystérésis (Benkhaled & Remini, 2003). Les autres paramètres n'apportent que des détails concernant la largeur et l'orientation de la boucle. L'asymétrie n'affecte ni la forme de la boucle ni son orientation.

ANALYSE DE L'HYSTERISIS

Le schéma classique de l'hystérésis ne se répète cependant pas lors de toutes les crues. L'hystérésis peut être inverse et il est parfois difficile de trouver une explication à ce phénomène, dans la mesure où le bassin est hétérogène du point de vue lithologique et du point de vue de la répartition spatiale des pluies. Les différentes relations entre charge solide et débit liquide visualisent les déphasages qui existent entre la propagation des ondes de crue et des ondes de matériel sédimentaire en suspension associées. Les courbes (figures 2, 3 et 4), montrent que l'évolution des concentrations en fonction des débits liquides pendant les crues, aussi bien à Oued El-Abtal qu'à Sidi AEK Djilali, suit principalement trois modèles:

Classe II. Presque 30% des crues de la station hydrométrique de Oued El-Abtal et 40% des crues de la station de Sidi AEK Djilali se présentent sous le modèle de la courbe de la classe II, boucle dans le même sens des aiguilles d'une montre «clockwise loop» pour les crues survenues en Automne (50% pour la station de Oued El-Abtal et 37.5% pour la station de Sidi AEK Djilali), au Printemps (33.33% pour la station de Oued El-Abtal et 25% pour la station de Sidi AEK Djilali) et en Hiver (16.67% pour la station de Oued El-Abtal et 37.5% pour la station de Sidi AEK Djilali). Les crues d'Automne surviennent après une saison sèche où le sol est particulièrement fragilisé et facilement érodable et/ou les pluies peuvent être violentes mais de courte durée. L'érosion est active dès les premières pluies qui, même si elles sont d'un faible apport liquide, peuvent donner des concentrations importantes en sédiments en suspension.

Pour les crues du Printemps et d'Hiver, ceci peut être dû à la disponibilité des sédiments produits par les crues précédentes d'Automne comparé, à un manque ou une diminution des réserves en sédiments à la fin de la saison sèche. Ceci permettra, l'apparition du pic des concentrations avant, le pic des débits liquides, surtout si l'averse est de faible intensité et de longue durée.

L'apparition du pic des concentrations avant le pic des débits liquides, peut donc être due essentiellement à l'existence d'une couche de pavage formée sur le lit de l'Oued antérieurement à la crue (Arnborg *et al.*, 1967). Les particules lâches du sol au début d'une averse sont érodées par le premier ruissellement direct en quantité appréciable. Cette situation peut avoir aussi lieu à un épuisement ou à une diminution du stock de sédiment disponible (Arnborg *et al.*, 1967; Walling, 1974; Wood, 1977; Battala & Sala, 1992; Benkhaled & Remini, 2003) ou à une limitation d'approvisionnement en matériaux solides

(Moog & Whiting, 1998) avant le maximum du débit liquide. L'épuisement ou la diminution des sédiments peut s'expliquer soit, par un petit apport disponible, soit par un débit liquide continu et/ou intense.

Selon, Heidel (1956), dans les petits cours d'eau, la concentration maximum des sédiments se produit habituellement avant le débit maximum.

Classe III. L'évolution de la relation concentration des sédiments en suspension - débit liquide se présente à 30% pour les crues de la station d'Oued El-Abtal et à 45% pour les crues de la station de Sidi AEK Djilali suivant le modèle de la courbe de la classe III, boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre «counterclockwise loop» pour les crues survenues en général en Automne (83.33% pour la station d'Oued El-Abtal et 55.56% pour la station de Sidi AEK Djilali), et au Printemps (16.67% pour la station d'Oued El-Abtal et 44.44% pour la station de Sidi AEK Djilali). Parfois en Automne et couramment au Printemps, le sol étant plus ou moins saturé par les crues antérieures (couvert au printemps) résiste à la pluie. L'érosion et le transport solide se verront légèrement retardés par rapport aux écoulements. Les irrégularités des cours d'eau du bassin versant d'Oued Mina expliquent d'avantage ce retard qui augmente avec la distance en aval. Ainsi, ce n'est qu'après une érosion prolongée que la concentration en matières en suspension augmente. Ceci permettra, l'apparition du pic des débits liquides avant celui des concentrations notamment si l'averse est de forte intensité et de courte durée.

La variabilité spatiotemporelle de la précipitation illustrée par les différentes stations pluviométriques appartenant au même bassin, semble expliquer aussi l'origine de cette forme de boucle (apparition du pic des concentrations après, le pic des débits liquides). Plusieurs auteurs ont confirmé l'existence de cet effet (Williams, 1989; Zhang *et al.*, 1990). Les crues de cette classe sont caractérisées en général, par un temps de montée inférieur au temps de concentration du bassin et une concentration en sédiments très élevée.

Classe V. Presque 40% des crues de la station hydrométrique d'Oued El-Abtal et 15% des crues de la station de Sidi AEK Djilali se présentent sous le modèle de la courbe de la classe V, boucle en forme de huit «figure eight» pour les crues survenues surtout en Automne (62.50% pour la station de Oued El-Abtal et 33.33% pour la station de Sidi AEK Djilali), au Printemps (25% pour la station de Oued El-Abtal et 66.67% pour la station de Sidi AEK Djilali), et à un degré moindre en Hiver (12.5% pour la station de Oued El-Abtal et 0% pour la station de Sidi AEK Djilali). La forme en huit de la classe V, combine des parties de la classe II et III. En effet, si l'averse est de faible intensité et de longue durée et à l'existence d'une couche de pavage formée sur le lit de l'Oued

antérieurement à la crue influencée par la variabilité spatiotemporelle de la précipitation, l'augmentation de C peut être plus rapide que celle de Q et le pic de la concentration vient avant celui du débit. Ceci donnera une boucle dans le même sens des aiguilles d'une montre, pendant la montée de la crue. Après le pic, la concentration diminue lentement en fonction du temps, relativement aux débits liquides, pendant la décrue et on obtient une boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre pour la relation (C-Q).

Analyse de l'effet d'hystérésis sur la relation concentration des sédiments en suspension - débit liquide (c-q) dans le bassin versant de l'oued mina (Algérie)

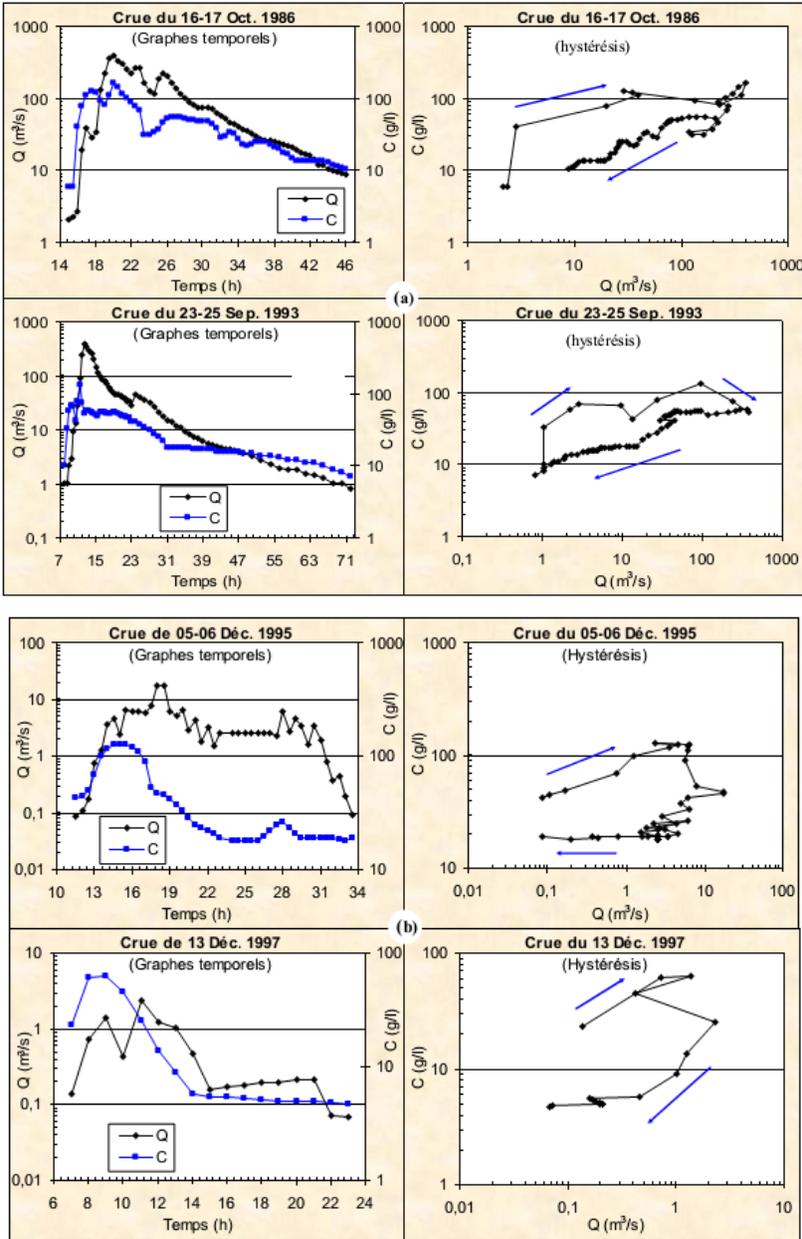


Figure 2 : Dynamique du transport solide en suspension (a) Station de Oued El-Abtal (b) Station de Sidi AEK Djilali (exemples du modèle en boucle dans le sens des aiguilles d'une montre)

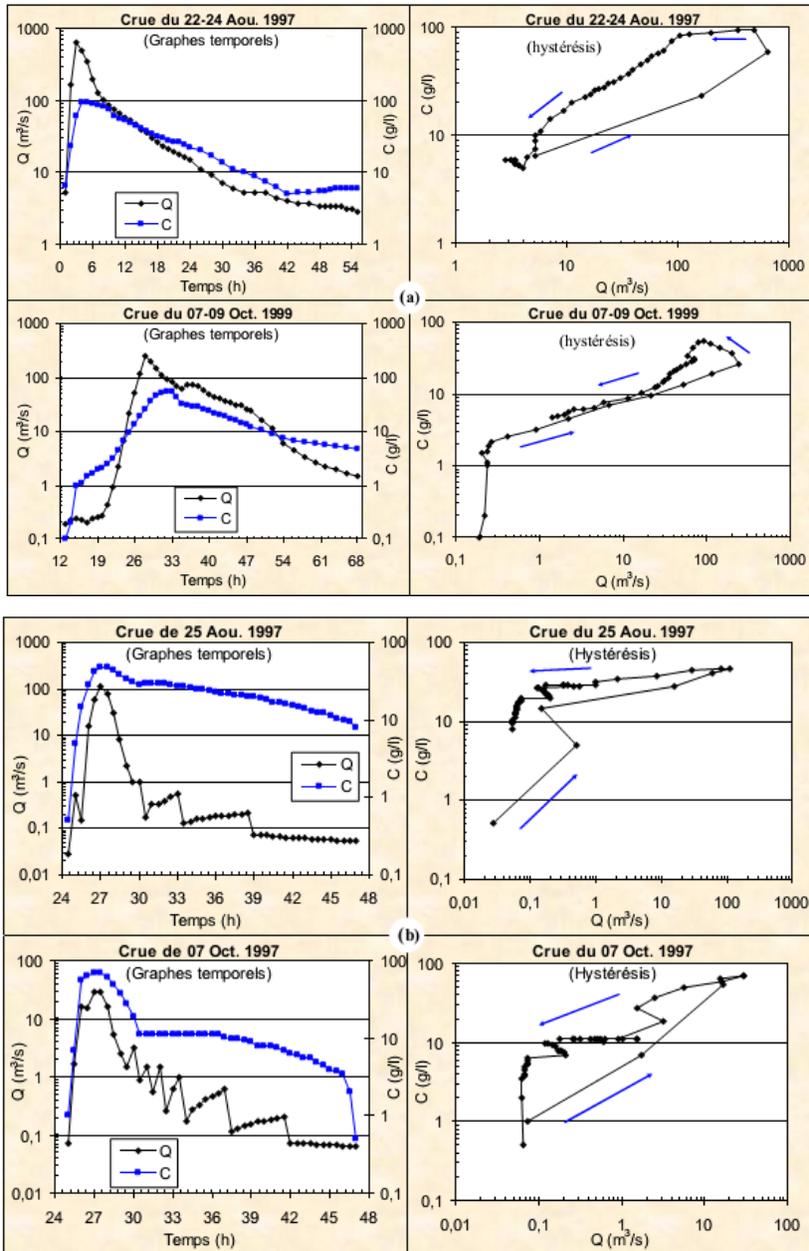


Figure 3 : Dynamique du transport solide en suspension (a) Station de Oued El-Abtal (b) Station de Sidi AEK Djilali (exemples du modèle en boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre)

Analyse de l'effet d'hystérésis sur la relation concentration des sédiments en suspension - débit liquide (c-q) dans le bassin versant de l'oued mina (Algérie)

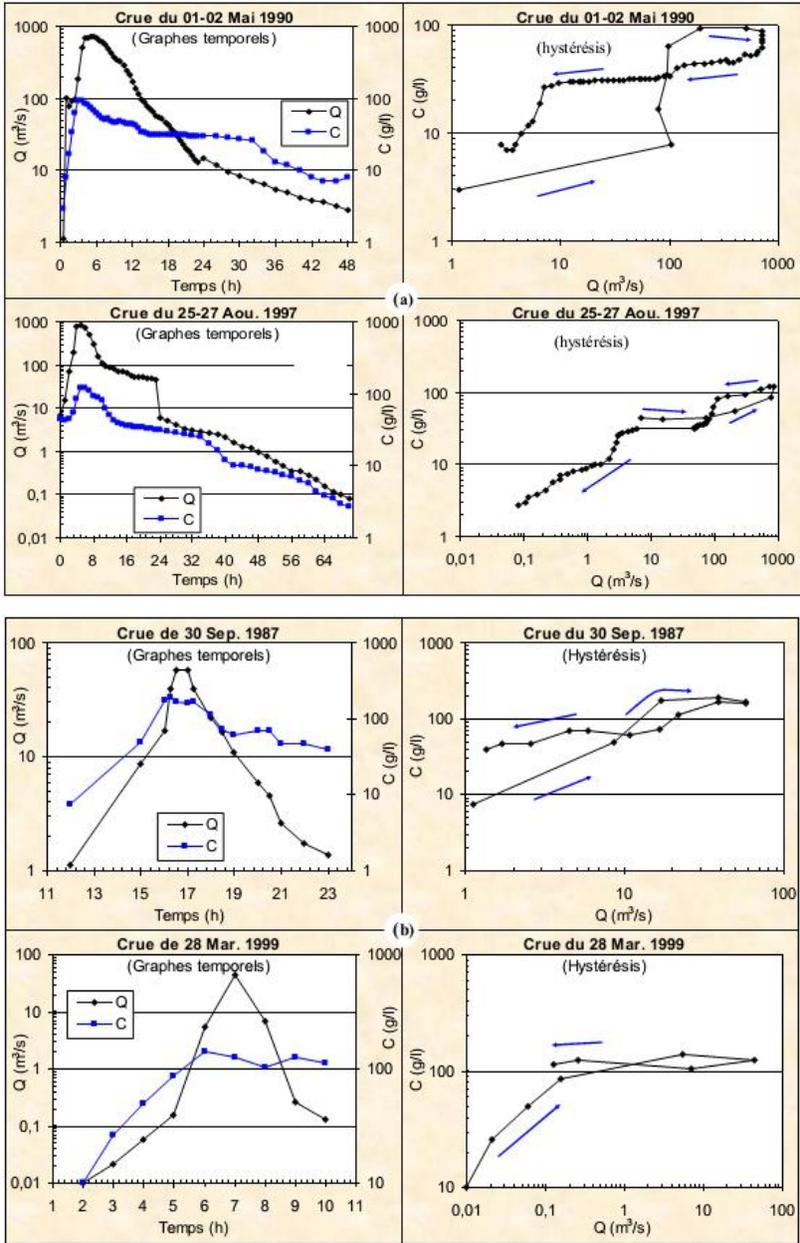


Figure 4 : Dynamique du transport solide en suspension (a) Station de Oued El-Abtal (b) Station de Sidi AEK Djilali (exemples du modèle en forme de huit)

Tableau 3 : Paramètres statistiques des crues sélectionnées (Station de Oued El-Abtal)

N°	n	Var.	σ	Moy	Mod	Méd	CV	Cp	Cs	Max
1	63	Q	101.12	91.27	116.80	40.44	1.11	1.12	1.43	397.00
		C	38.10	46.38	14.00	33.50	0.82	1.30	1.37	170.00
2	64	Q	77.32	59.63	66.21	23.04	1.30	2.04	1.67	313.28
		C	15.62	31.72	50.00	30.90	0.49	-0.76	-0.19	56.00
3	63	Q	104.49	86.72	21.18	21.18	1.21	-1.03	0.87	287.60
		C	9.36	20.64	17.50	17.50	0.45	-0.10	0.56	41.00
4	59	Q	236.17	180.92	79.58	66.21	1.31	0.37	1.34	723.16
		C	21.16	37.65	32.00	32.00	0.56	0.79	0.86	94.00
5	49	Q	52.32	31.54	41.40	15.80	1.66	15.17	3.79	283.92
		C	48.78	51.45	34.00	35.00	0.95	3.05	1.90	222.00
6	68	Q	84.59	49.46	1.05	13.72	1.71	6.53	2.62	384.26
		C	23.64	35.14	18.00	29.50	0.67	3.04	1.26	135.00
7	31	Q	97.15	81.88	15.00	44.16	1.19	4.99	2.25	406.10
		C	19.60	38.90	28.00	31.00	0.50	-0.22	0.55	81.00
8	23	Q	185.75	164.29	68.52	68.52	1.13	-0.27	1.06	564.44
		C	23.16	56.13	48.00	48.00	0.41	0.48	1.08	116.00
9	75	Q	182.00	114.37	55.08	40.00	1.59	2.97	2.01	688.60
		C	46.13	55.60	45.00	46.00	0.83	-1.23	0.43	143.00
10	119	Q	74.29	64.86	64.80	49.92	1.15	2.68	1.77	302.32
		C	40.86	44.51	5.00	24.00	0.92	-1.19	0.58	126.00
11	36	Q	180.07	162.23	576.20	84.88	1.11	0.32	1.25	576.20
		C	16.02	27.85	17.00	26.00	0.58	-0.72	0.39	63.00
12	29	Q	49.73	63.98	57.36	46.20	0.78	2.22	1.63	210.60
		C	10.94	20.03	6.00	18.00	0.55	-1.02	0.43	38.50
13	65	Q	61.44	69.98	35.76	38.94	0.88	0.88	1.85	293.12
		C	48.02	38.35	21.00	15.00	1.25	-0.44	1.57	181.00
14	30	Q	57.91	50.20	10.25	17.06	1.15	0.28	1.27	189.80
		C	10.92	37.10	19.50	35.95	0.29	-0.87	0.19	56.50
15	43	Q	129.39	64.74	3.42	16.28	2.0	10.79	3.22	632.50
		C	28.23	31.01	5.90	23.50	0.91	-0.18	1.00	93.50
16	48	Q	203.79	97.18	53.64	6.59	2.10	7.59	2.87	873.27
		C	31.71	35.83	43.00	31.75	0.89	1.10	1.30	122.00
17	36	Q	72.47	38.77	6.08	6.99	1.87	9.06	2.96	335.50
		C	34.50	49.72	55.00	52.00	0.69	-0.58	0.51	120.00
18	48	Q	78.35	50.56	4.30	8.83	1.55	2.98	1.98	291.70
		C	19.11	21.31	4.00	13.75	0.90	0.28	1.06	72.00
19	47	Q	88.63	47.62	0.42	8.63	1.86	7.44	2.72	406.10
		C	16.19	30.69	33.00	28.00	0.53	-0.34	0.72	70.00
20	46	Q	53.45	39.78	71.68	22.44	1.34	4.92	2.07	244.52
		C	15.15	16.13	18.60	11.20	0.94	0.27	1.08	53.50

N° : numéro de la crue, n : taille de la crue, Var : variables, σ : écart type, Moy : moyenne
 Mod : mode, Méd : médiane, CV : coefficient de variation, Cp : coefficient d'aplatissement,
 Cs : coefficient d'asymétrie, Max : valeur maximale.

*Analyse de l'effet d'hystérésis sur la relation concentration des sédiments en suspension
- débit liquide (c-q) dans le bassin versant de l'oued mina (Algérie)*

Le phénomène s'inverse avec le temps dès l'épuisement du stock de sédiment surtout si l'averse est de forte intensité et de courte durée. L'augmentation de Q peut être plus rapide que celle de C et le pic de la concentration apparaît après ou avec celui du débit liquide. Ceci donnera une boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre pendant la montée de la crue. Après le pic, la concentration diminue lentement en fonction du temps, relativement aux débits liquides pendant la décrue et on obtient une boucle dans le même sens des aiguilles d'une montre pour la relation (C-Q).

Tableau 4 : Paramètres statistiques des crues sélectionnées (Station de Sidi AEK Djilali)

N°	n	Var.	σ	Moy	Mod	Méd	CV	Cp	Cs	Max
1	10	Q	8.47	9.90	18.92	7.90	0.86	-0.64	0.79	25.52
		C	13.88	28.32	37.68	28.07	0.49	0.62	0.61	56.40
2	8	Q	16.26	17.48	/	15.36	0.93	-2.13	0.18	37.00
		C	67.40	115.61	/	144.24	0.58	-1.10	-0.84	178.10
3	15	Q	19.81	18.94	/	10.81	1.05	-0.14	1.07	57.54
		C	60.00	95.19	/	69.90	0.63	-1.45	0.40	189.58
4	15	Q	17.12	16.68	/	9.09	1.03	-1.56	0.63	43.50
		C	46.97	52.41	/	51.54	0.90	-1.07	0.56	142.06
5	7	Q	30.14	33.88	/	27.58	0.89	-1.50	0.54	74.35
		C	32.03	120.25	/	104.94	0.27	-2.02	0.43	161.94
6	7	Q	18.51	19.72	/	15.37	0.94	-2.15	0.29	42.45
		C	21.98	48.05	/	42.56	0.46	-1.39	0.65	80.98
7	13	Q	22.11	22.64	/	24.22	0.98	-1.61	0.38	58.88
		C	59.44	70.56	/	31.50	0.84	-2.03	0.27	156.20
8	50	Q	35.97	15.24	17.00	0.63	2.36	12.34	3.27	193.40
		C	13.42	17.31	9.70	10.72	0.78	-0.23	1.01	48.00
9	31	Q	8.27	3.98	0.05	0.06	2.08	5.19	2.43	30.54
		C	21.59	27.65	10.00	17.00	0.78	-0.57	0.92	73.00
10	49	Q	5.05	2.56	0.02	0.08	1.98	4.03	2.21	17.48
		C	35.38	42.46	24.00	28.00	0.83	0.65	1.39	128.00
11	44	Q	3.66	3.61	1.54	2.54	1.01	7.76	2.50	17.44
		C	36.17	43.44	19.00	24.00	0.83	0.61	1.44	127.06
12	14	Q	6.02	3.84	/	1.48	1.57	2.42	1.88	17.46
		C	15.45	22.42	13.00	16.50	0.69	-0.63	0.87	51.00
13	32	Q	29.61	9.83	0.02	0.20	3.01	16.67	3.93	149.00
		C	33.45	41.93	18.00	35.75	0.80	-0.97	0.49	108.00
14	17	Q	10.16	8.29	/	4.34	1.23	0.44	1.27	30.28
		C	80.36	146.07	/	156.00	0.55	-1.27	-0.35	252.00
15	46	Q	22.04	6.89	0.06	0.16	3.20	14.56	3.79	113.25
		C	10.62	22.18	29.00	21.25	0.48	0.12	0.49	47.00
16	45	Q	7.07	2.97	0.07	0.26	2.38	8.21	2.96	29.85
		C	19.41	16.55	11.00	10.30	1.17	2.54	1.96	72.00
17	17	Q	0.62	0.54	/	0.21	1.15	3.25	1.84	2.33
		C	20.08	17.17	5.00	5.50	1.17	1.35	1.62	62.40
18	21	Q	4.36	1.90	/	0.07	2.29	5.47	2.50	15.28
		C	53.93	73.47	64.00	60.00	0.73	3.24	1.90	232.64
19	9	Q	14.21	6.28	/	0.16	2.26	8.09	2.81	43.50
		C	47.01	86.56	125	104.00	0.54	-1.13	-0.66	140.00
20	23	Q	0.78	0.33	/	0.08	2.37	9.79	3.24	3.18
		C	25.41	25.41	9.00	17.00	1.00	2.88	1.84	93.02

Tableau 5 : Classement et caractéristiques des crues sélectionnées (Station de Oued El-Abtal)

Classe	Fréq	Sous classe	Crues	Caractéristiques	Boucle d'hystérésis
II	30%	A	5, 6, 13	$(C/Q)_m > (C/Q)_d$, C_{max} avant Q_{max} , $C_s > 0$, $C_p > 0$ pour Q et varie pour C.	Boucle dans le sens des aiguilles d'une montre (Clockwise loop). Boucle moins large sauf pour la crue 13.
		B	1, 10, 18	$(C/Q)_m > (C/Q)_d$, C_{max} avec Q_{max} , $C_s > 0$, $C_p > 0$ pour Q et varie pour C.	Boucle dans le sens des aiguilles d'une montre (Clockwise loop). Boucle de largeur remarquable.
III	30%	A	7, 14, 15, 19	$(C/Q)_m < (C/Q)_d$, C_{max} avec Q_{max} , $C_s > 0$, $C_p > 0$ pour Q et $C_p < 0$ pour C	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (Counterclockwise loop). Boucle de largeur moyenne.
		B	2, 20	$(C/Q)_m < (C/Q)_d$, C_{max} après Q_{max} , $(C_s, C_p) > 0$ pour Q et varient pour C.	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (Counterclockwise loop). Boucle rétrécie pour la crue 20 et assez large pour la crue 2.
V	40%	A	3, 4, 9	$(C/Q)_m < (C/Q)_d$ pour une partie des valeurs de Q, $(C/Q)_m > (C/Q)_d$ pour une autre partie des valeurs de Q, C_{max} avant Q_{max} , $C_s > 0$, C_p varie pour Q et C.	Forme en huit (figure eight). Boucle dans le même sens des aiguilles d'une montre pendant la montée de la crue.
		B	8, 11, 12 16, 17	$(C/Q)_m > (C/Q)_d$ pour une autre partie des valeurs de Q, $(C/Q)_m < (C/Q)_d$ pour une autre partie des valeurs de Q, C_{max} avec Q_{max} , $C_s > 0$, C_p varie pour Q et C.	Forme en huit (figure eight). Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre pendant la montée de la crue.

*Analyse de l'effet d'hystérésis sur la relation concentration des sédiments en suspension
- débit liquide (c-q) dans le bassin versant de l'oued mina (Algérie)*

Tableau 6 : Classement et caractéristiques des crues sélectionnées (Station de Sidi AEK Djilali)

Classe	Fréq	Sous classe	Crues	Caractéristiques	Boucle d'hystérésis
II	40%	A	5, 11	$(C/Q)_m > (C/Q)_d$, C_{max} avant Q_{max} , $C_s > 0$, C_p varie pour Q et C.	Boucle dans le sens des aiguilles d'une montre (Clockwise loop). Boucle rétrécie sauf pour la crue 11.
		B	1, 4, 6, 7, 14	$(C/Q)_m > (C/Q)_d$, C_{max} avec Q_{max} , $C_s > 0$ sauf pour C de la crue 14, C_p varie pour Q et C.	Boucle dans le sens des aiguilles d'une montre (Clockwise loop). Boucle de largeur remarquable sauf pour les crues 1 et 14.
		C	17	$(C/Q)_m > (C/Q)_d$, C_{max} après Q_{max} , $C_s > 0$, $C_p > 0$.	Boucle dans le sens des aiguilles d'une montre (Clockwise loop). Boucle assez large et nette.
III	45%	A	2, 8, 10, 12, 15, 16, 18	$(C/Q)_m < (C/Q)_d$, C_{max} avec Q_{max} , $C_s > 0$ sauf pour C de la crue 2, $C_p > 0$ pour Q sauf pour la crue 2 et varie pour C.	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (Counterclockwise loop). Boucle rétrécie sauf pour les crues 8, 9 et 16.
		B	9, 20	$(C/Q)_m < (C/Q)_d$, C_{max} après Q_{max} , $C_s > 0$, $C_p > 0$ pour Q et varie pour C.	Boucle dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (Counterclockwise loop). Boucle assez large.
V	15%	A	3, 19, 13	$(C/Q)_m < (C/Q)_d$ pour une partie des valeurs de Q, $(C/Q)_m > (C/Q)_d$ pour une autre partie des valeurs de Q, C_{max} avant Q_{max} , $C_s > 0$ pour Q et varie pour C, $C_p < 0$ pour C et varie pour Q.	Forme en huit (figure eight). Boucle dans le même sens des aiguilles d'une montre pendant la montée de la crue.

La forme des graphiques temporels et des courbes d'hystérésis dépend principalement du temps et du volume des sédiments provenant de différentes sources jusqu'à la station de mesures et de la proximité de la ressources des sédiments par rapport à la station. Le rapport C/Q pendant la phase de montée est inférieur au rapport C/Q pendant la phase de décrue, pour environ 55% des crues de la station d'Oued El-Abtal et 60% des crues de la station de Sidi AEK Djilali. Ce rapport traduit une érosion et un transport solide en suspension retardés par rapport aux écoulements, provoqués par des averses souvent courtes et violentes sur des sols généralement secs, fragiles et peu protégés.

CONCLUSION

Ce travail a fait l'objet d'une contribution à la compréhension du phénomène du transport solide en suspension dans le bassin versant de l'Oued Mina au droit du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda (SMBA) dit Es-saada représentant un échantillon des bassins du Nord de l'Algérie, qui sont généralement caractérisés par un taux de transport solide élevé en raison de nombreux facteurs mis en jeu.

La variation de la concentration des sédiments en suspension; résultant de la mobilisation, la rétention, la réduction et l'épuisement des sédiments dans le bassin fluvial amont de l'Oued Mina à l'échelle d'une crue est très grande. Elle est influencée principalement par les caractéristiques morphologiques et hydrologiques du bassin et par la capacité de la crue à briser ou rompre la couche de pavage. Les débris organiques peuvent également avoir une influence, si de tels débris piègent ou libèrent des sédiments. L'homme joue également un rôle non négligeable dans le processus de genèse des sédiments en suspension par les pratiques culturelles.

Les modèles sens des aiguilles d'une montre, sens contraire des aiguilles d'une montre et modèle en forme de huit sont les plus dominants dans le bassin versant de l'Oued Mina, aussi bien pour la station hydrométrique d'Oued El-Abtal que pour la station de Sidi AEK Djilali. L'analyse de l'hystérésis par classe montre l'absence relative de l'effet saisonnier sur la forme de la boucle obtenue. Les saisons d'Automne, d'Hiver et de Printemps présentent une hétérogénéité de classes à cause d'une hétérogénéité du bassin du point de vue lithologie et du point de vue de la répartition spatiale des pluies (irrégularité du régime pluviométrique et hydrologique du bassin) et de l'étalement de la période d'été.

L'analyse de l'effet d'hystérésis sur la relation concentration – débit liquide a montré aussi qu'une grande partie du transport solide en suspension proviennent

des zones géographiquement éloignées du bassin versant. En générale, ce sont les terres qui recueillent les précipitations en amont du bassin hydrographique qui produisent la plus grande charge solide en suspension.

Les résultats découlant de cette étude peuvent être validés et/ou améliorés plus tard en augmentant la taille des séries de données disponibles. En outre, et du point de vue sédimentation, l'érosion du sol semble être un problème majeur dans le bassin versant de l'Oued Mina. Par conséquent, une approche intégrée doit être étudiée pour déterminer les zones productives de sédiments et lutter contre l'érosion et l'envasement du barrage de SMBA.

RÉFÉRENCES

- ARNBORG L., WALKER H. J., PEIPPO J. (1967). Suspended load in the Colvill River, Alaska. *Geogr. Ann.* 49A, pp. 131-144.
- AXELSSON V., (1967). The laitaure delta. A study of deltaic morphology and processes. *Geogr. Ann.* 49A, pp. 1-127.
- BATTALA R., SALA M., (1992) Temporal variability of suspended sediment in a Meiterranean river. In: *Variability in Stream Erosion and Sediment Transport* (ed. by L. J. Olive, R. J. Loughran & J. A. Kesby) (Proc. Canberra Conf., December 1994). IAHS Publ. No. 224, pp. 229-305.
- BENKHALED A., REMINI B. (2003). 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, pp. 333-356.
- BENKHALED A., REMINI B. (2003). Variabilité temporelle de la concentration en sédiments et phénomène d'hystérésis dans le bassin de l'Oued Wahrane (Algérie). *Hydr. Sci. J.* 48(2), pp.243-255.
- BOUANANI A. (2004) Hydrologie transport solide et modélisation: étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW-Algérie). Thèse, Doct. Es. Sci. Univ. Tlemcen, Algérie, 247p.
- DEMMAK A. (1982) Contribution à l'étude de l'érosion et du transport solide en Algérie Septentrionale. Thèse Université Pierre et Marie Curie, Paris, France. Dubreuil P., 1974. *Initiation à l'analyse hydrologique*. Editions Masson & Cie et ORSTOM, Paris, France.
- FLEMING G. (1969) Design curves for suspended load estimation. *Proc. Inst. Civ. Eng.*, 43, pp. 1-9.

- GHERNAOUT, R. (2014) Impact du transport solide en suspension sur l'envasement du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda. Thèse de doctorat, Université de Blida, Algérie, 222p.
- GHERNAOUT R., REMINI B. (2014) Impact of suspended sediment load on the silting of SMBA reservoir (Algeria). *Environ. earth sci.*, Vol.72, Issue 3, 915-929.
- GHERNAOUT R., REMINI B. (2017) Analyse du transport solide en suspension dans le bassin versant de l'oued Mina (NO Algérie). *La Houille Blanche*, n°3, pp.47-63.
- GHERNAOUT R., REMINI B. (2018) Analyse multidimensionnelle des précipitations annuelles dans le bassin versant de l'Oued Mina (Algérie). *Larhyss Journal*, n°34, pp.97-114.
- HEIDEL S.G. (1956) The progressive lag of sediment concentration with flood waves. In : *Sediment concentration versus water discharge during single Hydrologic events in rivers* (ed. by G.P., Willams, 1989). *J. Hydrol.*, 111: 89-106.
- KHANCHOUK K., BOUKHRISZA Z. E., MAJOUR H. (2012) Statistical modelling of suspended sediment transport in the Cherf drainage basin, Algeria. *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét.*, 1: 13-17.
- MEDDI M. (1995) Écoulement moyen annuel dans le nord de l'Algérie (esquisse cartographique). Premier Colloque maghrébin sur l'hydraulique, Sidi Feredj (Alger), 16-17 mai, pp. 280-288.
- MEDDI M. (1996) Étude de l'écoulement moyen annuel dans le nord de l'Algérie: Proposition de formules d'estimation du débit moyen annuel. *Rev Algérie Équipement*; (8): pp.5-8.
- MOOG, D. B., WHITING P. J. (1998). Annual hysteresis in bed load rating curves. *Water Resour. Res.* 34(9), pp.2393-2399.
- LEOPOLD L. B., WOLMAN M. G., MILLER J. P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*, 64. Freeman and Co., San Francisco, USA.
- TOUAIBIA B. (2000). Erosion -Transport solide - Envasement de barrages, Cas du bassin versant de l'Oued Mina. Thèse de doctorat d'état, INA, El-Harrach, Algérie.
- TOUAIBIA B., ACHITE M. (2003). Contribution à la cartographie de l'érosion Spécifique du bassin versant de l'Oued Mina en zone semi aride de l'Algérie Septentrionale. *Hydrl. Sci. J.* 48(2), pp.235-242.
- TOUAT S. (1989). Contrôle de la représentativité de l'échantillon des transports solides en suspension. *Revue Eaux et Sols d'Algérie* 3, pp.48-54.
- WILLIAMS G. P. (1989). Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *J. Hydrol.* 111, pp.89-106.

*Analyse de l'effet d'hystérésis sur la relation concentration des sédiments en suspension
- débit liquide (c-q) dans le bassin versant de l'oued mina (Algérie)*

- WOOD P. A. (1977). Controls of variation in suspended sediment concentration in river Rother, West Sussex, England *Sedimentology* 24, pp.437-445.
- WALLING D.E. (1974). Suspended sediment and solute yield from small catchment prior to urbanisation in: *Sediment concentration versus water discharge during single Hydrologic events in rivers* (ed. by G.P., Willams, 1989). *J. Hydrol.*, 111, pp. 89-106.
- ZHANG J., HUANG W. W., SHI M. C. (1990). Hwangue (Yellow River) and its estuary: sediment transport and deposition. *J. Hydrol.* 120, pp. 203-233.