

Production et transport des sédiments en suspension dans l'oued Sikkak (Tafna – nord-ouest Algérie)

Production and transport of suspended sediment in Sikkak wady (Tafna – North West Algeria)

Abderrazak Bouanani, Kamila Baba-Hamed et Wassila Fandi

Volume 26, numéro 2, 2013

Reçu le 17 octobre 2011, accepté le 29 décembre 2012

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1016063ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/1016063ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Bouanani, A., Baba-Hamed, K. & Fandi, W. (2013). Production et transport des sédiments en suspension dans l'oued Sikkak (Tafna – nord-ouest Algérie). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 26(2), 119–132. <https://doi.org/10.7202/1016063ar>

Résumé de l'article

L'envasement et le transport solide constituent, par leur importance, un problème majeur en Algérie (dégradation des sols agricoles, alluvionnement des retenues). Les études d'aménagement hydrotechnique butent très souvent sur le problème du manque ou du nombre réduit de données relatives au transport solide. De nombreux chercheurs ont travaillé pour pallier ce problème en mettant au point des modèles spécifiques aux bassins étudiés. Ces derniers servent à combler les lacunes des mesures et à étendre la série existante en fonction du débit liquide souvent mesuré. Cette étude porte sur la quantification du transport solide et du taux d'érosion ainsi que sur la détermination des périodes d'érosion actives et la recherche d'un modèle reliant les débits solides aux débits liquides au niveau de l'oued Sikkak. Sous-bassin de la rivière Tafna, le bassin versant du Sikkak est situé dans le nord-ouest algérien et couvre une surface de 218 km² où est érigé un barrage d'une capacité de 30 Hm³. Les résultats d'analyse graphique des valeurs instantanées des débits solides en suspension dans l'oued Sikkak à la station d'Aïn Youcef et leurs relations avec les débits liquides (campagnes de prélèvement de 1972 à 1990), ont permis de montrer l'existence de deux périodes d'érosion active. 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 170 t•km⁻²•an⁻¹ variant de 4 à 745 t•km⁻²•an⁻¹. Ces taux de dégradation restent très modérés par rapport à ceux publiés pour d'autres bassins de l'Algérie et du Maghreb, mais très proches de ceux trouvés pour quelques sous-bassins de la Tafna.

PRODUCTION ET TRANSPORT DES SÉDIMENTS EN SUSPENSION DANS L'OUED SIKKAK (TAFNA – NORD-OUEST ALGÉRIE)

Production and transport of suspended sediment in Sikkak wady (Tafna – North West Algeria)

ABDERRAZAK BOUANANI¹, KAMILA BABA-HAMED², WASSILA FANDI³

¹Laboratoire N° 25, Département d'Hydraulique, Faculté de Technologie, Université Abou Bakr Belkaid, 13000, Tlemcen, Algérie.

²Laboratoire N° 25, Département des Sciences de la Terre et de l'Univers, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers, Université Abou Bakr Belkaid, 13000, Tlemcen, Algérie.

³Laboratoire N° 25, Département d'Hydraulique, Faculté de Technologie, Université Abou Bakr Belkaid, 13000, Tlemcen, Algérie.

Reçu le 17 octobre 2011, accepté le 29 décembre 2012

RÉSUMÉ

L'ensablement et le transport solide constituent, par leur importance, un problème majeur en Algérie (dégradation des sols agricoles, alluvionnement des retenues). Les études d'aménagement hydrotechnique butent très souvent sur le problème du manque ou du nombre réduit de données relatives au transport solide. De nombreux chercheurs ont travaillé pour pallier ce problème en mettant au point des modèles spécifiques aux bassins étudiés. Ces derniers servent à combler les lacunes des mesures et à étendre la série existante en fonction du débit liquide souvent mesuré. Cette étude porte sur la quantification du transport solide et du taux d'érosion ainsi que sur la détermination des périodes d'érosion actives et la recherche d'un modèle reliant les débits solides aux débits liquides au niveau de l'oued Sikkak. Sous-bassin de la rivière Tafna, le bassin versant du Sikkak est situé dans le nord-ouest algérien et couvre une surface de 218 km² où est érigé un barrage d'une capacité de 30 Hm³. Les résultats d'analyse graphique des valeurs instantanées des débits solides en

suspension dans l'oued Sikkak à la station d'Aïn Youcef et leurs relations avec les débits liquides (campagnes de prélèvement de 1972 à 1990), ont permis de montrer l'existence de deux périodes d'érosion active. 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 170 t•km⁻²•an⁻¹ variant de 4 à 745 t•km⁻²•an⁻¹. Ces taux de dégradation restent très modérés par rapport à ceux publiés pour d'autres bassins de l'Algérie et du Maghreb, mais très proches de ceux trouvés pour quelques sous-bassins de la Tafna.

Mots clés : *Sikkak, Tafna, érosion, sédiment, débit liquide, transport solide, modèle, Algérie,*

ABSTRACT

Silting and solid transport constitute, by their importance, a major problem in Algeria (agricultural land degradation,

silting up of reservoirs). Hydrotechnical design and planning studies very often come up against the problem of the lack or of the reduced availability of data on solid transport. Many researchers try to find a work around to tackle this problem by developing models specific to the watersheds studied. These are used to fill the gaps due to the lack of measurement data and to extend the existing series according to the water flow information that is often measured. The purpose of this study was to quantify solid transport and erosion rates in the Sikkak river basin, to determine periods of active erosion and to establish a model relating the transport of solids to the flow rate (Q_s as a function of Q_l). The Sikkak basin is located in north-western Algeria, covers an area of 218 km², and includes the Sikkak dam with a capacity of 30 Hm³. We used instantaneous water discharge and suspended sediment loads measured at the Aïn Youcef station from September 1972 to August 1990. Results of analysis of the instantaneous values of suspended solid flow and their relations with water discharge show the existence of two periods of active erosion. The annual solid and liquid contributions vary greatly from one year to the next. The mean of the soil erosion rate is evaluated at 170 t•km⁻²•yr⁻¹, varying between 4 and 745 t•km⁻²•yr⁻¹. These values are very moderate compared to those reported for other basins of the Algeria and the Maghreb, but are very close to the values for some of the Tafna basins.

Key words: *Sikkak, Tafna, erosion, suspended sediment, water discharge, transport, model, Algeria.*

INTRODUCTION

L'ampleur de l'alluvionnement et l'exhaussement du fond des barrages par dépôts successifs des sédiments ramenés, par les cours d'eau maghrébins, ont suscité l'intérêt d'un grand nombre de chercheurs qui ont tenté d'expliquer les mécanismes complexes du transport solide et de quantifier les volumes des sédiments transportés. Dans ce contexte, on notera les travaux de HEUSCH (1982), LAHLOU (1990), MILLIMAN et MEADE (1983), SOGREAH (1983), TIXERONT (1960) et WALLING (1984), et plus récemment PROBST et AMIOTTE-SUCHET (1992), qui ont tenté d'expliquer l'érosion mécanique et de déterminer les dégradations spécifiques des bassins versants de ces régions. Ils ont montré l'influence des différents paramètres (pluviométrie, ruissellement, lithologie et couvert végétal) sur l'érosion et, par conséquent, sur le transport solide. Selon HEUSCH (1970) et MEDDI (1992), en zone méditerranéenne et semi-aride,

l'énergie de ruissellement est plus importante que celle de la pluie.

Des études ont été menées par quelques chercheurs (ACHITE, 2002; ACHITE et MEDDI, 2004, 2005; BENKHALED et REMINI, 2003; DEMMAK, 1982; DEMMAK et al., 1991; FOURNIER et HENIN, 1960; GHENIM, 2001, 2007, 2009; GHORBEL et CLAUDE, 1977; HAÏDA *et al.*, 1996; HEUSCH et MILLIES-LACROIX, 1971; KATTAN et PROBST, 1987; MEGNOUNIF *et al.*, 2003; MEGNOUNIF, 2007; MILLIMAN et MEADE, 1983; PROBST *et al.*, 1992; SERRAT *et al.*, 2001; SIBARI *et al.*, 2001; SNOUSSI, 1988; SNOUSSI *et al.*, 1990; STRAKHOV, 1967; TERFOUS *et al.*, 1999, 2001, 2003; TOUAÏBIA *et al.*, 2001; WALLING et WEBB, 1981) dans le but de mettre en évidence les relations entre les différents paramètres (hydroclimatiques, géomorphologiques et biologiques) et le transfert de matières solides dans plusieurs régions du globe affectées par cette même problématique. L'objectif de ces auteurs est, d'une part, d'expliquer les processus du transport solide dans les cours d'eau et, d'autre part, de mettre en évidence des modèles susceptibles d'être appliqués à des régions ou à des bassins versants où les mesures sont rares ou inexistantes.

L'Algérie dispose actuellement de plus de 72 barrages en exploitation, totalisant une capacité de 7,4 milliards de m³. Le taux d'envasement annuel est évalué à 32 millions de m³ et le nombre de réservoirs mis hors service par suite à l'alluvionnement est en augmentation constante (REMINI, 2006). Lors de l'élaboration des études de barrage, il est connu qu'en Algérie, l'étude du transport solide se limite à la détermination du volume mort dont le calcul est basé sur des formules empiriques qui ne s'adaptent pas forcément au cas étudié. En effet, nous avons trouvé dans quelques bassins de la Tafna une grande divergence entre les apports solides spécifiques issus des données de mesure et ceux calculés par la relation empirique de TIXERONT (1960) et le modèle de SOGREAH dont l'erreur commise est généralement très importante (TERFOUS *et al.*, 2003). Par conséquent, il est très important d'élaborer des études du transport solide basées principalement sur des mesures de débits et de concentrations en matières en suspension au niveau du cours d'eau concerné par l'ouvrage en question.

Cette étude porte sur la quantification du transport solide et du taux d'érosion ainsi que sur la recherche d'un modèle reliant les débits solides aux débits liquides au niveau de l'oued Sikkak, sous-bassin de la Tafna et où est érigé un barrage d'une capacité de 30 Hm³. Cet ouvrage a été mis en eau en 2003 et sert à l'alimentation en eau potable de la ville de Tlemcen et de toutes

les localités se trouvant dans le couloir (Aïn Youcef - Tlemcen), ainsi qu'à l'irrigation de la plaine d'El Fhoul et celle d'Hennaya.

conglomérats Plio-quaternaires sous les alluvions récentes de la plaine d'Hennaya (HAYANE, 1983).

- Au sud, et à l'est, les massifs montagneux où affleurent principalement des terrains jurassiques (grès, calcaires, marno-calcaires et dolomies) faillés et bien karstifiés (BENEST *et al.*, 1999).

1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU BASSIN VERSANT

Le bassin versant de l'oued Sikkak est situé au nord-ouest de l'Algérie. Il s'étend sur une superficie de 218 km² pour un périmètre de 65 km. Oued Sikkak, affluent rive gauche de l'oued Isser, lui-même affluent rive droite de l'oued Tafna (Figure 1), s'écoule sur une longueur de 20 km. Les limites amont et aval du bassin sont matérialisées respectivement par le barrage Mefrouche à 1 100 m et celui du Sikkak à 200 m d'altitude. L'altitude moyenne du bassin est de 475 m. Il est caractérisé par un relief assez marqué et un Indice global de Roche de 0,037. Le bassin du Sikkak est moyennement drainé. La densité de drainage qui est le rapport de la longueur de tous les cours d'eau par la superficie du bassin est de $Dd = 2,42 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$.

Sur le plan géologique, le bassin de l'oued Sikkak présente deux secteurs bien distincts :

- Au nord, une dépression dont le principal élément ayant contribué au remplissage est représenté par le Miocène marneux. Il est surmonté par les graviers argileux et

Les massifs jurassiques rocheux, calcaires et dolomitiques admettent une maigre couverture forestière. Les grès de Boumediene sont caractérisés par l'abondance de *cistus daniferus* et par *quercus suber* qui constituent les belles forêts d'Hafr et Zarifet. Les marnes miocènes et les alluvions quaternaires sont occupées par les céréales et les prairies naturelles.

Le bassin se trouve dans une région à climat semi-aride méditerranéen. La moyenne interannuelle des précipitations à la station de Tlemcen pour la période (72/73 - 99/00) est de 512 mm. Le régime annuel est très irrégulier (Figure 2). La période (1972 - 1980) correspond à des années relativement humides avec un maximum de 813,5 mm enregistré en (1972 - 1973). À partir de 1980, on assiste à une période de sécheresse qui perdure encore aujourd'hui, et ce, malgré la pluviométrie moyenne de ces dernières années. Les années les plus sèches où nous avons enregistré près de 200 mm correspondent à 1983/84 et 1994/95. Les variations des précipitations moyennes mensuelles montrent que les mois les plus pluvieux sont mars et avril. Les mois de juillet et août sont pratiquement secs. La distribution saisonnière montre que

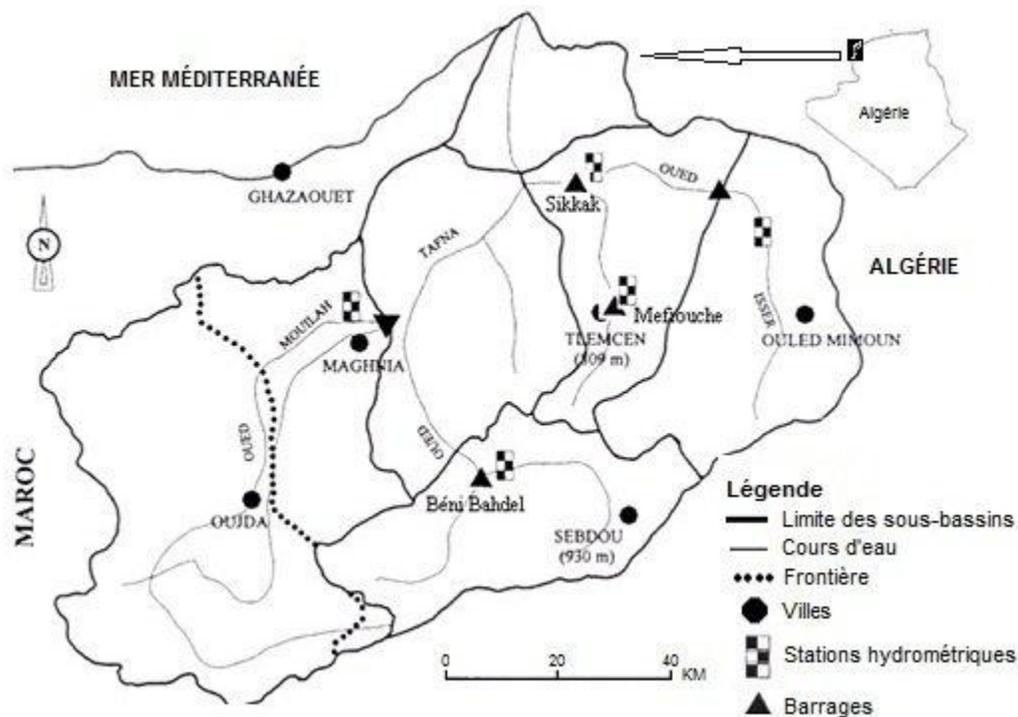


Figure 1. Situation géographique du bassin de la Tafna (NW – Algérie).
Geographical location of the Tafna basin (NW Algeria).

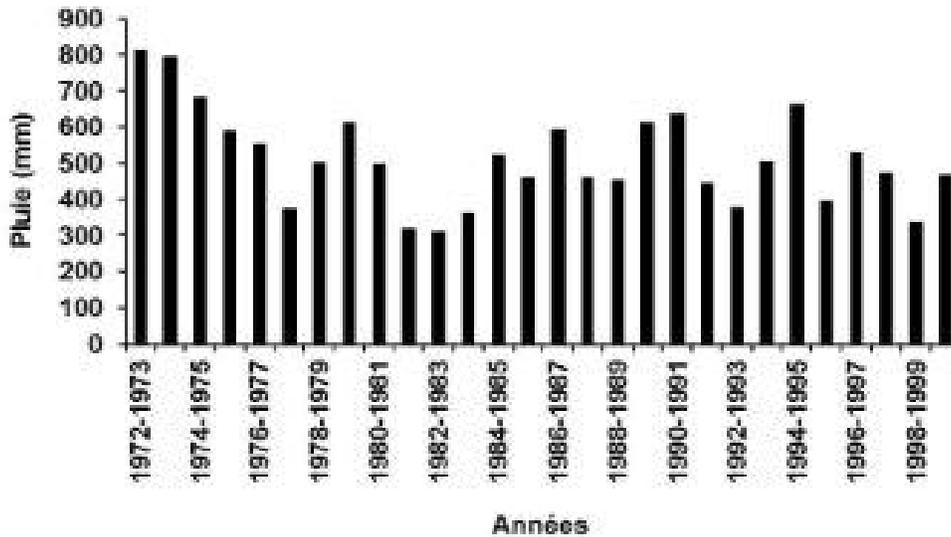


Figure 2. Variations interannuelles des précipitations à la station de Tlemcen.
Interannual variations of rainfall at the Tlemcen station.

l'hiver (177 mm) et le printemps (209 mm) sont les saisons les plus humides, et l'été (18 mm) la saison la plus sèche.

Le bassin du Sikkak draine en moyenne $0,648 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Le régime hydrologique annuel, en relation avec les apports pluviométriques, est très irrégulier. La période des hautes eaux se manifeste à partir de décembre. Le barrage du Mefrouche et les formations karstiques en amont retardent l'arrivée à l'exutoire du Sikkak des pluies importantes d'automne sur les monts de Tlemcen. En effet, le réseau de failles et fissures existant dans les dolomies jurassiques des monts de Tlemcen, au niveau d'oued Nachef en amont du Sikkak, favorisent l'infiltration des eaux dans l'aquifère karstique sous le barrage du Mefrouche. Une partie des eaux est stockée dans la zone souterraine du barrage et l'autre sortira plus tard pour rejoindre le ruissellement de surface par l'intermédiaire des sources (BABA HAMED, 2001).

2. DONNÉES ET MÉTHODES

2.1 Présentation des données

L'étude est basée sur les valeurs instantanées des débits liquides (QL en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et des concentrations en matières en suspension (C en $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) mesurées entre septembre 1972 et août 1990 à la station d'Aïn Youcef. Les données nous ont été fournies par les services de l'A.N.R.H. (Agence Nationale des Ressources Hydriques, Direction Régionale d'Oran). 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, d'autre part. La concentration est obtenue d'après le protocole suivant. À chaque mesure de hauteur d'eau, on prélève un échantillon d'eau chargée, sur la rive à la surface de l'eau, au moyen d'un flacon de 50 cL. À chaque prélèvement, les échantillons sont transférés dans des bouteilles en plastique, puis stockés dans une glacière à basse température ($T = 4 \text{ }^\circ\text{C}$). Les échantillons sont ensuite ramenés au laboratoire pour analyse. La filtration de l'eau en vue de recueillir les matières en suspension est réalisée sur du papier-filtre de type Whatman (porosité du filtre égale à $10 \text{ }\mu\text{m}$, temps de filtration $t = 10,5 \text{ s}$). Les filtres sont ensuite séchés à l'étuve. Ramenée à l'unité de volume (1 litre), la charge en suspension se calcule alors par la relation suivante :

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

C : La concentration exprimée en ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)

P_1 : Le poids du papier filtre sec et vide exprimé en gramme avant la pesée de l'échantillon.

P_2 : Le poids du papier filtre avec les sédiments en suspension exprimé en grammes.

V : Le volume de l'échantillon.

Cette charge solide mesurée est attribuée à la concentration instantanée en matières en suspension véhiculées par le cours d'eau en ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$).

Le nombre de prélèvements a été adapté au régime hydrologique. Ces derniers sont effectués un jour sur deux. En période de crue, les prises sont intensifiées jusqu'à des intervalles de temps d'une heure ou même de 30 minutes en fonction de la vitesse de l'augmentation des débits liquides.

Le débit des matières en suspension est donc le produit de la concentration évaluée en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ par le débit liquide correspondant mesuré en $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

$$Q_s = C \cdot Q_L \quad (1)$$

Q_s : Débit solide en suspension ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$);

Q_L : Débit liquide ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$);

C : Concentration ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

2.2. Calcul des apports

Les apports solides en tonnes ou en millions de tonnes, A_s (10^6 t ou MT) et les apports spécifiques en tonnes par kilomètre carré par an, Ass ($\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$) sont donnés par :

$$A_s = Q_s \cdot t \cdot 10^{-9} \quad (2)$$

$$Ass = (A_s \cdot 10^6) / S \quad (3)$$

avec :

A_s : apport solide annuel, mensuel ou saisonnier (MT);

Q_s : débit solide annuel, mensuel ou saisonnier ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$);

t : temps en secondes (s);

Ass : apport solide spécifique ($\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$);

S : superficie du bassin versant (km^2).

Le flux annuel des matières solides en suspension exporté par les différents oueds étudiés est calculé par la formule :

$$A_s = \sum_1^N (t_{j+1} - t_j) Q_j C_j \quad (4)$$

où : C_j est la concentration mesurée à l'instant t_j correspondant au débit liquide Q_j ; N est le nombre de prélèvements effectués sur l'année considérée; $t_{j+1} - t_j$ est le pas de temps séparant deux prélèvements consécutifs. Au moment des crues, les prélèvements sont intensifiés et donc, par suite, le pas de temps est réduit. De même, A_L (m^3), l'apport liquide annuel engendrant le flux A_s est calculé par la formule :

$$A_L = \sum_1^N (t_{j+1} - t_j) Q_j \quad (5)$$

2.3 Modélisation

Pour déterminer la relation débit solide - débit liquide, une approche à différentes échelles temporelles (instantanée et saisonnière), basée sur les modèles de régression, est adoptée. La mobilisation des matériaux solides sur les versants et leur transport éventuel par les cours d'eau, représentent deux phénomènes distincts, mais liés entre eux. Depuis longtemps, on a essayé de corrélérer les débits solides aux débits liquides et de déterminer une relation qui permettrait d'estimer les premiers à partir des seconds. À ce titre, nous citons les travaux de JAKUSCHOFF (1932) sur les rivières de Turquie et ceux de STRAUB (1936) sur le fleuve du Missouri (USA) dans EINSTEIN (1950), LEOPOLD et EMMETT (1976).

La concentration des sédiments en suspension C_s et le débit liquide évoluent en général suivant un modèle de puissance $Y = a X^b$ (ETCHANCHU et PROBST, 1986; WALLING et WEBB, 1981; WOOD, 1977).

$$C_s = a Q_L^{b-1} \quad (6)$$

Une autre relation empirique, communément appelée courbe du transport solide (CAMBELL *et al.*, 1940; CRAWFORD, 1991), lie le débit solide au débit liquide :

$$Q_s = a Q_L^b \quad (7)$$

Ce type de relation a été proposé par KENEDY dès 1895, EINSTEIN (1937). Depuis, plusieurs chercheurs ont essayé d'identifier surtout la valeur de l'exposant b . LEOPOLD *et al.* (1976) proposent pour les rivières de l'ouest des États-Unis d'Amérique des valeurs de b variant entre 2 et 3, d'autres auteurs tels que MULLER et FORSTNER (1968), BRUSCHIN et TRAU (1977), WOOD (1977), VIVIAN (1980), WALLING et WEBB (1981,1982), MEYBECK (1984) ainsi que PROBST et BAZERABACHI (1986), KATTAN et PROBST (1987) les limitent entre 1 et 2, en fonction des caractéristiques physiques, climatiques et hydrologiques des bassins versants, ou des conditions hydrauliques de l'écoulement dans les cours d'eau.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Les apports annuels

Les variations interannuelles des apports solides montrent de grandes fluctuations, liées à l'irrégularité des précipitations et donc des apports liquides. En effet, on peut voir (Figure 3), que de 1972/73 à 1974/75, les apports aussi bien liquides

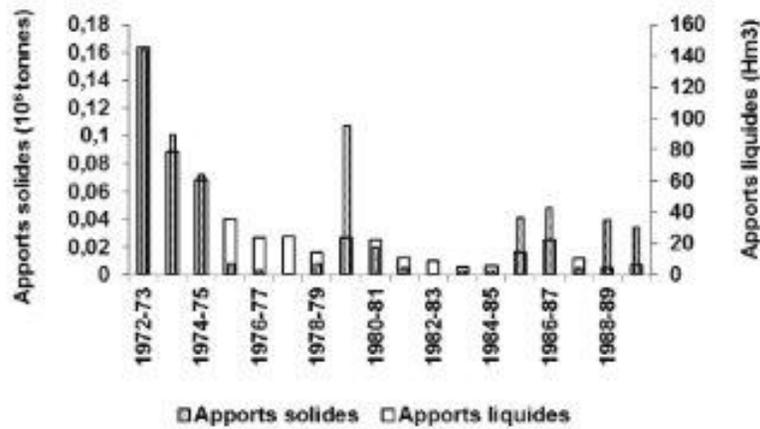


Figure 3. Apports liquides et solides annuels de l'oued Sikkak à Ain Youcef (1972/1990).

Annual solid and liquid contributions in the Sikkak wadyr (1972-1990).

que solides sont plus importants par rapport au reste de la période puisque la région a connu une sécheresse depuis 1975. Toutefois, l'année 1972/73 est assez remarquable par son apport liquide et son apport solide spécifique de $745 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$, quatre fois plus grande que la moyenne interannuelle qui est de $169 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$. La crue de mars 1973 avec un débit de $176 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ a drainé 70 % de l'apport liquide total annuel. Pendant la période de sécheresse, l'année 1979/80 a enregistré quelques crues qui ont permis un apport solide appréciable et une dégradation de $494 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$, trois fois supérieure à la moyenne interannuelle.

Ces taux de dégradation restent très modérés par rapport à ceux publiés pour d'autres bassins de l'Algérie et du Maghreb. Toutefois, ils sont très proches de ceux trouvés pour quelques sous-bassins (BOUANANI, 2004) de la Tafna (Tableau 1).

WALLING (1984), en se fondant sur les travaux réalisés au Maghreb, estime que les apports solides spécifiques dans le bassin versant varient entre 1 000 et 5 000 $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$. D'autres auteurs ont proposé des valeurs encore plus élevées. Ainsi, PROBST et AMIOTTE-SUCHET (1992) ont avancé des valeurs supérieures à 5 000 $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ pour cinq bassins versants. C'est le cas d'oued Agrioun en Algérie où la dégradation spécifique a été estimée à 7 200 $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$. D'autre part, sur la base de données de mesure de la charge en suspension réalisées dans 130 bassins versants des trois pays du Maghreb (Maroc, Algérie et Tunisie), PROBST et AMIOTTE-SUCHET (1992) ont estimé que la dégradation spécifique moyenne est respectivement de 400 et 610 $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ pour les oueds qui se jettent dans la mer Méditerranée et l'océan Atlantique. Des valeurs encore plus faibles ont été estimées dans certains bassins versants. C'est le cas notamment de l'oued Leham en Algérie orientale ($104 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$) (BOUROUBA, 1998).

Dans le cas du bassin de la Tafna, SOGREA (1967) a estimé la dégradation spécifique moyenne à $150 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$, valeur proche de celles des oueds Sikkak et Isser ($180 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$) mais inférieure à celles des autres sous-bassins de la Tafna Mouilah ($364 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$) et Sebdou ($934 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$) (BOUANANI, 2004).

3.2 Apports mensuels

Le flux mensuel des matières solides en suspension exportées par l'oued Sikkak est calculé de la même manière que le flux annuel, pour chaque mois considéré de l'année.

Le comportement du bassin de l'oued Sikkak diffère légèrement des autres bassins de la Tafna (BOUANANI, 2004), puisque c'est au mois de mars (Figure 4) que les apports aussi bien liquides que solides sont les plus importants (Tableau 2).

En effet, le mois de mars assure près de 31 % des apports liquides annuels et 52 % des apports solides. Les crues violentes sont responsables de la plus grande partie des transports solides et des dégradations des bassins versants. La plus importante crue enregistrée sur les 18 ans de mesures de l'oued Sikkak est celle du 26 mars au 3 avril 1973. Avec un débit de pointe de $176 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ et une concentration de pointe de $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, elle a généré un apport solide de 157 103 tonnes (soit 91 %) de l'apport annuel.

3.3 Apports saisonniers

Sur l'oued Sikkak (Tableau 3), c'est au printemps et en hiver qu'on enregistre les forts écoulements qui engendrent les

Tableau 1. Valeurs de quelques paramètres d'écoulement et du transport solide dans quelques sous-bassins de la Tafna (BOUANANI, 2004).

Table 1. Values of some flow and sediment transport parameters for some sub-basins of the Tafna.

Bassins	Sebdou	Mouilah	Isser	Sikkak
Ec (mm)	99,86	18	12	113
Qs (kg•s ⁻¹)	7,6	35	6,6	2
As (tonnes)	240 000	965 000	206 000	37 000
Ass (t•km ⁻² •an ⁻¹)	937	364	180	170

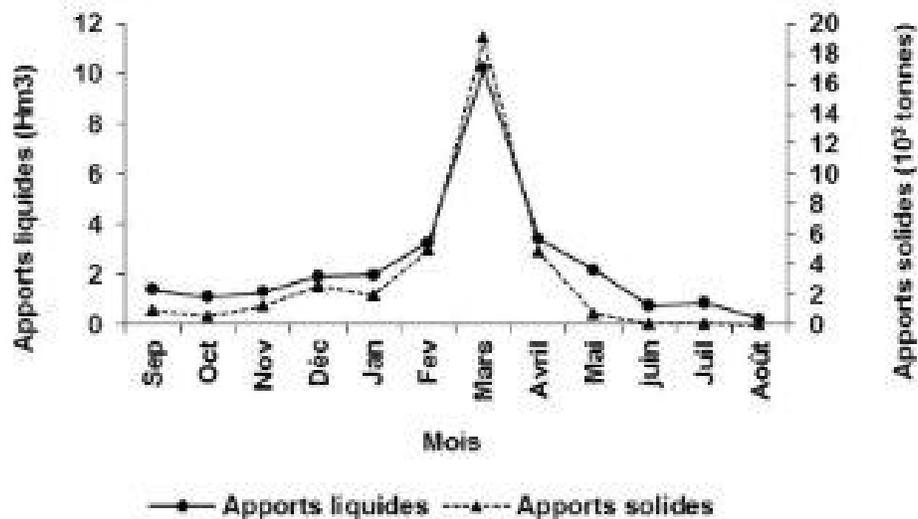


Figure 4. Apports liquides et solides moyens mensuels de l'oued Sikkak (1972/1990).
Monthly liquid and solid contributions in the Sikkak wady (1972-1990).

Tableau 2. Apports liquides et solides moyens mensuels de l'oued Sikkak (1972/90).
Table 2. Monthly liquid and solid contributions in the Sikkak wady (1972-90).

MOIS	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août
Al (Hm ³)	1,392	1,113	1,302	1,938	1,971	3,278	10,210	3,397	2,170	0,757	0,866	0,226
E (mm)	6,386	5,105	5,973	8,891	9,042	15,036	46,834	15,585	9,954	3,471	3,972	1,034
As (tonnes)	976,43	561,3	1242,4	2523,9	1941,9	4912,6	19040	4822,5	712,6	58,12	55,99	8,889
Ass t•mois ⁻¹ •km ⁻²	4,479	2,575	5,699	11,578	8,908	22,535	87,339	22,122	3,269	0,267	0,257	0,041

Tableau 3. Apports liquides et solides moyens saisonniers de l'oued Sikkak (1972/90).
Table 3. Seasonal liquid and solid contributions in the Sikkak wady (1972-90).

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Été	Année
Al (Hm ³)	3,81	7,19	15,78	1,8	28,62
E (mm)	17,46	32,97	72,37	8,49	131,28
As (tonnes)	2780,1	9378,4	24574,9	123,0	36856,5
Ass (t•km ⁻² •an ⁻¹)	12,7	43,02	112,7	0,6	169,06

plus forts flux en suspension. Avec 67 % par rapport au total annuel, l'oued Sikkak véhicule 24 575 tonnes de matières en suspension au printemps. L'automne, avec un apport liquide deux fois plus faible qu'en hiver, ramène trois fois moins de sédiments (Figure 5). L'été reste une saison sèche avec un transport quasi nul. GHENIM *et al.* (2009), dans leur étude sur les fluctuations hydro-pluviométriques du bassin de l'oued Tafna, montrent que sur 25 % du temps annuel, soit trois mois, les précipitations sont quasiment nulles et représentent moins de 1 % de l'apport pluviométrique moyen annuel.

3.4 Évolution des débits solides en fonction des débits liquides

3.4.1 Analyse des débits instantanés

On trouve (Figure 6) une bonne relation en puissance [$Q_s = 0,29 Q^{1,47}$] reliant le débit des matières solides en suspension en kg•s⁻¹ au débit liquide en m³•s⁻¹ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,74$. On notera que les valeurs de l'exposant b de nos modèles sont proches de celles trouvées par bon nombre de chercheurs ayant travaillé dans des régions semi-arides (Tableau 4).

Une première analyse graphique montre qu'à de faibles débits liquides (moins de 1 m³•s⁻¹) peuvent être associés de forts débits solides (près de 10 kg•s⁻¹) déclenchés probablement à la suite d'orages violents ou de remobilisation de sédiments issus d'une crue précédente et fraîchement déposés dans le lit de l'oued. De même, de fortes valeurs des débits liquides n'ont engendré qu'un faible transport solide dû à la vidange des nappes survenue à la suite d'une crue importante et/ou à la non-disponibilité de sédiments mobilisables en fonction de l'état du sol pouvant être saturé et recouvert de végétation.

3.4.2 Analyse saisonnière

Pour étudier les réponses des bassins aux débits liquides et matières en suspension au cours de l'année hydrologique, nous avons jugé utile de regrouper, suivant différentes saisons, les valeurs instantanées (prélevées sur les 18 années d'étude) et d'analyser la relation liant les débits liquides aux débits solides en suspension.

- En automne, le bassin du Sikkak ne présente pas une activité érosive importante, la valeur de $b = 1,4$ est relativement faible;

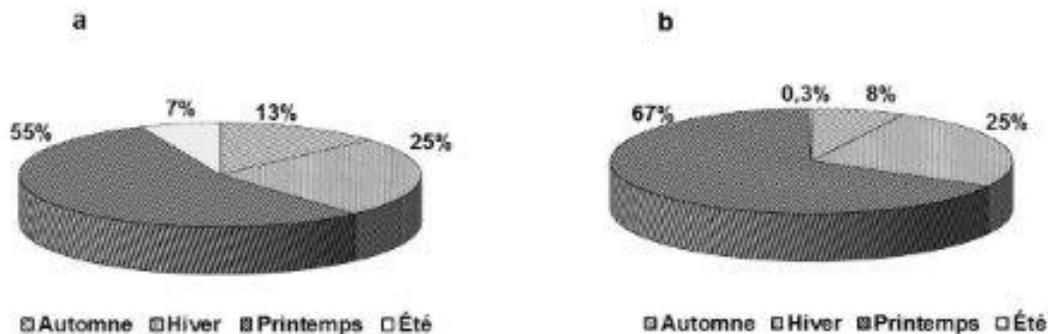


Figure 5. Répartition des apports liquides (a) et solides saisonniers (b) de l'oued Sikkak (1972/90).
Distribution of the seasonal liquid (a) and solid (b) contributions in the Sikkak wady (1972-90).

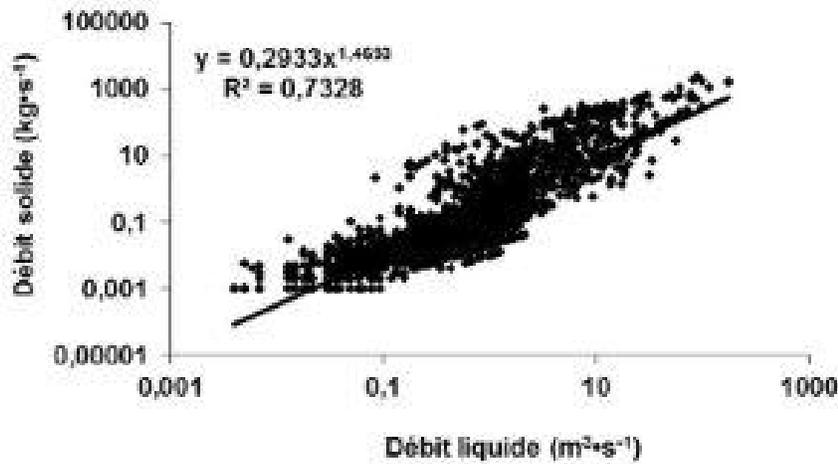


Figure 6. Relations entre les débits liquides et solides instantanés de l'oued Sikkak (1972/90).
Relationship between instantaneous liquid discharge and suspended sediment load in the Sikkak wady (1972-90).

Tableau 4. Quelques valeurs de « b » publiées pour des bassins versants voisins.
Table 4. Some values of "b" published for neighbouring watersheds.

Bassin versant	L'exposant « b »	Auteurs
Tafna (Algérie)	1,70	TERFOUS <i>et al.</i> (2001)
Oued Wahrane	1,32-1,95	BENKHALED et REMINI (2003)
Oued Haddad (Algérie)	1,45	ACHITE et MEDDI (2004)
Oued Mina (Algérie)	1,33	ACHITE et MEDDI (2005)
Rivière Arbucies (Nort-Est) Péninsule Ibérique	1,63	BATTALA et SALA (1992)
Haute Tafna (Algérie)	1,57	MEGNOUNIF (2007)

- En hiver, le modèle de l'oued Sikkak, dont l'activité érosive est assez importante, voit son exposant b augmenter pour atteindre la valeur de 1,8;
- Au printemps, le facteur a et l'exposant b présentent des valeurs moyennes entre celles de l'automne et celles de l'été et sont proches de ceux du modèle global. Ceci exprime bien que le modèle du printemps est plutôt un modèle représentatif moyen. Aussi, le meilleur coefficient de corrélation est donné au printemps. La figure 7 montre que

- les nuages de points sont répartis de manière quasi-uniforme autour de la droite de régression. Au printemps, l'état du sol et la couverture végétale font que l'action érosive se trouve diminuée par rapport aux écoulements abondants;
- En été, l'exposant b est plus faible et est inférieur à 1, cela s'explique par de faibles écoulements et donc de faibles transports solides. Le nuage de points de la figure 7 montre bien que les valeurs aussi bien des débits liquides que celles des débits solides ne dépassent guère l'unité.

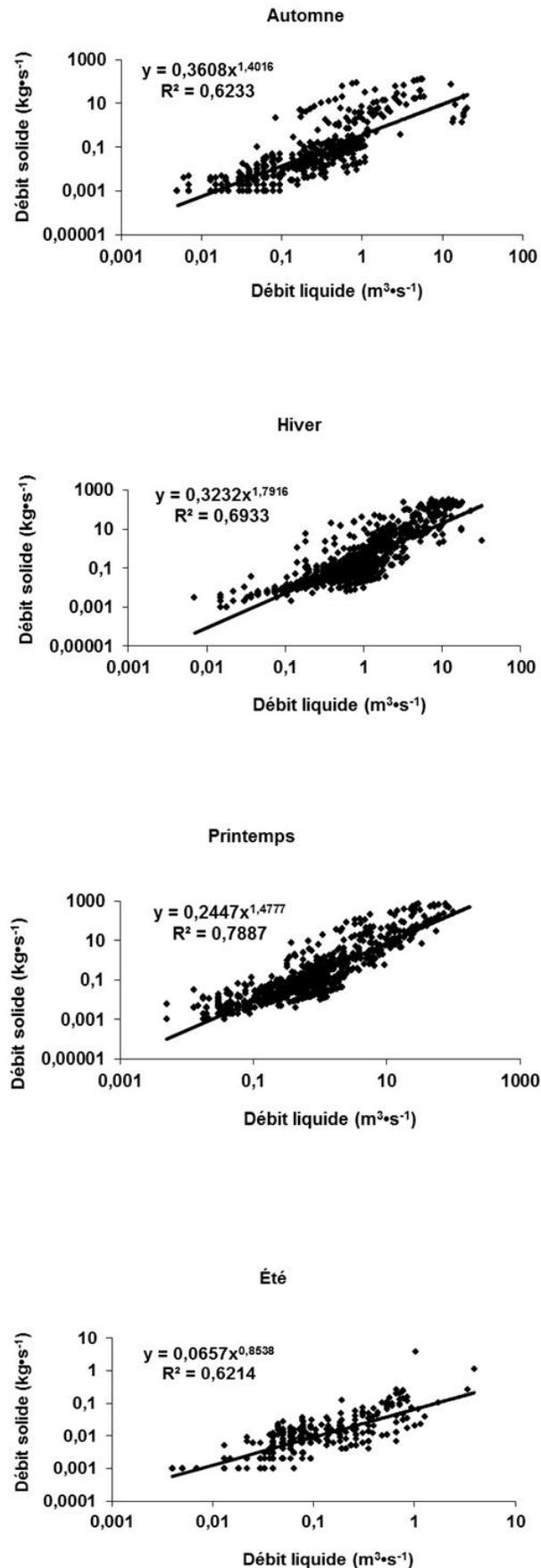


Figure 7. Relations débit solide – débit liquide saisonniers de l'oued Sikkak (1972-90).

Relationship between seasonal liquid discharge and suspended sediment load in Sikkak wady (1972-90).

Le facteur b est peut-être lié directement à la superficie de drainage en période de crue (BENKHALED et REMINI, 2003), mais il exprime aussi l'importance du taux du transport solide. Le paramètre a exprime l'état du sol d'un bassin d'une manière générale et son degré de saturation en particulier (BENKHALED et REMINI, 2003). Pour le Sikkak, ce paramètre a reste en général inférieur à 1, et plus particulièrement en été. En effet, pendant l'été, la pluviométrie est presque nulle, les sources les plus importantes au niveau du bassin sont presque toutes captées et les apports aussi bien liquides que solides se trouvent ainsi réduits.

CONCLUSION

La lame d'eau écoulee moyenne au niveau du bassin de l'oued Sikkak est de $113 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$, apportant en moyenne $0,037 \text{ MT}$ de sédiments par an avec un débit solide moyen annuel de $2 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. La dégradation spécifique moyenne est de $170 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$. Si l'on regarde la variabilité interannuelle de ce phénomène, on constate que la dégradation spécifique varie considérablement; ainsi, on passe de 4 à $745 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$.

La comparaison des valeurs de dégradation spécifique révèle une très forte disparité spatiale du taux d'érosion des sols au Maghreb. Cette disparité résulte principalement de la différence de la lithologie, du couvert végétal, de la pente et de la taille des bassins versants (PROBST et AMIOTTE-SUCHET, 1992; FOX et MOORE, 1993). À cette variabilité spatiale s'ajoute la variabilité temporelle aux échelles annuelle, saisonnière et mensuelle. À l'échelle saisonnière, sur l'oued Sikkak c'est au printemps que le phénomène est le plus accentué.

En tout état de cause, cette variabilité temporelle dépend de la fréquence des orages et de leur période d'occurrence. En effet, ce sont ces orages qui génèrent la plus grande partie de la charge en suspension.

La relation liant les débits liquides aux débits solides en suspension pour le bassin du Sikkak est de type puissance de forme générale ($Q_s = aQ_l^b$).

Le modèle instantané montre que les paramètres $0,2 < a < 0,4$ et $1,5 < b < 1,8$ sont proches de ceux trouvés par bon nombre de chercheurs ayant travaillé dans des régions semi-arides ou non.

Les modèles saisonniers donnent, pour l'automne, l'hiver et le printemps, des valeurs de b proches de celles des modèles instantanés et sont comprises entre 1,4 et 2,2; pour l'été, b est inférieur à 1. De même, le paramètre a , compris entre 0,25 et 0,4 pour l'automne, l'hiver et le printemps, est proche du

modèle instantané (0,3). Pour l'été, il est inférieur à 0,1, ceci exprime la faiblesse de l'écoulement et du transport solide conséquence d'un déficit pluviométrique estival.

4. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACHITE M. (2002). Approche statistique d'évaluation du transport solide dans le bassin versant de l'oued Mina (Nord-ouest algérien). Dans : *Watmed*, Tunisia, 10-13 octobre, vol. 2, pp. 894-899.
- ACHITE M. et M. MEDDI (2004). Estimation du transport solide dans le bassin versant de l'oued Haddad (Nord-Ouest Algérien). *Sécheresse*, 4, 367-373.
- ACHITE M. et M. MEDDI (2005). Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride. Cas du bassin de l'oued Mina (Nord-Ouest Algérien). *Rev. Sci. Eau*, 18 (spécial), 37-56.
- BABA-HAMED K. (2001). *Contribution à l'étude hydrologique de trois sous-bassins de la Tafna (bassin de Sebdou, de Mouilah et d'Isser)*. Mémoire de Magistère, Univ. Oran, Algérie, 195p.
- BATTALA R. et M. SALA (1992). Temporal variability of suspended sediment in a Mediterranean river. Dans : *International Conference*, Canberra, Australia, IAHS Pub., 224, 229-305.
- BENEST M., M. BENSALAH, H. BOUABDELLAH et T. OURDAS (1999). La couverture mésozoïque et cénozoïque du domaine tlemcenien (Avant pays Tellien d'Algérie occidentale) : Stratigraphie, paléoenvironnement, dynamique sédimentaire et tectogénèse alpine. *Bull. Serv. Géol. Algérie*, 10, n°2.
- BENKHALED A. et B. REMINI (2003). Analyse de la relation de Puissance : débit solide – débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'oued Wahrân (Algérie). *Rev. Sci. Eau*, 16, 333-356.
- BOUANANI A. (2004). *Hydrologie, transport solide et modélisation : étude de quelques sous bassins de la Tafna*. Thèse de Doct. Es-sciences, Univ. Tlemcen, Algérie, 247 p.
- BOUROUBA M. (1998). Phénomène de transport solide dans les Hauts Plateaux Orientaux. Cas de l'Oued Logmane et oued Leham dans le bassin de la Hodna. *Rev. Sci. Technol.*, 9, 5-11.

- BRUSCHIN J. et W. TRAU (1977). Évaluation de la durée utile des observations du transport d'alluvions en suspension dans les rivières. *IAHS - AISH Pub.*, 122. Published with the financial assistance of UNESCO.
- CAMBELL F.B. et H. BAUDER (1940). A rating curve method for determining silt discharge of stream. *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, 21, 603-607.
- CRAWFORD C.G. (1991). Estimation of suspended-sediment rating curves and mean suspended-sediment load. *J. Hydrol.*, 129, 331-348.
- DEMMAK A. (1982). *Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale*. Thèse de doctorat-ingénieur, Paris, France, 323 p.
- DEMMAK A., M. OUAAR et A. GUEDJAL (1991). *Quantification de l'érosion à l'exutoire de micro-bassins en zone semi-aride*. Éd. AUPELF-UREF, pp. 179-188.
- EINSTEIN H.A. (1937) *Bed load transport as a probability problem*. Thèse de Doctorat, Federal Institute of Technology, Zurich, 105 p.
- EINSTEIN H.A. (1950). *The bed-load function for sediment transportation in open channel flows*. United States Department of Agriculture - Soil Conservation Service, Washington, 71 p.
- ETCHANCHU D. et J.L. PROBST (1986). Érosion et transport de matières en suspension dans un bassin versant en région agricole. Méthode de mesure du ruissellement superficiel, de sa charge et des deux composantes du transport solide dans un cours d'eau. *CR Acad. Sci. Paris*, 302, série II, 17, 1063-1067.
- FOURNIER F. et S. HENIN (1960). Étude de la forme de la relation existant entre l'écoulement mensuel et le débit solide mensuel. Bari : Association internationale des sciences hydrologiques (AIHS), 1962, 353-358.
- FOX H.R. et H.M. MOORE (1993). Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). Discussion, *Hydrol. Sci. J.*, 38, 621-637.
- GHENIM A., A. TERFOUS et A. SEDDINI (2007). Étude du transport solide en suspension dans les régions semi-arides méditerranéennes : cas du bassin versant de l'Oued Sebdu (Nord-Ouest algérien). *Sécheresse*, 18, 39-44.
- GHENIM A., A. SEDDINI et A. MEGNOUNIF (2009). Évolution de la pluviométrie et son impact sur les apports en eau superficielle : cas du bassin versant du Mefrouche-Algérie. Dans : *XXVII^e Rencontre Universitaire du Génie Civil - Génie Civil et Développement Durable*, AUGC, St-Malo, France, 3, 5 juin, pp. 1-12.
- GHORBEL A. et J. CLAUDE (1977). Mesure de l'envasement dans les retenues de sept barrages en Tunisie : estimation des transports solides. Dans : *Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters*. IAHS Pub., 122, 219-232.
- HAIDA S., M. SNOUSSI, C. LATOUCHE et J.L. PROBST (1996). Géodynamique actuelle du bassin versant de l'oued Tensit (Maroc) : Érosion mécanique et bilan des transports solides fluviaux. *Bull. Sci. Geol.*, 49, 1-4, Strasbourg, pp. 7-23.
- HAYANE S.M. (1983). *Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du bassin versant de l'oued Sikkak (région de Tlemcen)*. Thèse de Dotorat 3e cycle, Univ. Oran, Algérie. 236 p., 91 fig.
- HEUSCH B. (1970). L'érosion du Pré-Rif occidental : une étude quantitative de l'érosion hydrique dans les collines marseuses du Pré-Rif occidental. *Ann. Rech.s For. Maroc*, 12, 9-176.
- HEUSCH B. et A. MILLIES-LACROIX (1971). Une méthode pour estimer l'écoulement et l'érosion dans un bassin. Application au Maghreb. *Mines Géol.*, (Rabat), 33, 21-39.
- HEUSCH B. (1982). *Étude de l'érosion et des transports solides en zone semi-aride. Recherche bibliographique sur l'Afrique du Nord*. Projet RAB/80/04. PNUD.
- KATTAN Z. et J.L. PROBST (1987). Transport en solution et en suspension par la Moselle en période de crues. Dans : *Actes Journées d'Hydrologie « Crues et Inondations »*, Strasbourg, France, pp. 16-18.
- LAHLOU A. (1990). Envasement du barrage Mohamed Benabdelkrim Al Khattabi et lutte antiérosive du bassin versant montagneux situé à l'amont. *IAHS*, 194, 243-252.
- LAHLOU A. (1994). *Envasement des barrages au Maroc*. Casablanca, Maroc, Éditions Wallada, 277 p.
- LEFORT P. (1992). *Cours de transport solide dans le lit des cours d'eau*. Institut national polytechnique de Grenoble, France (INP), 225 p.
- LEOPOLD L.B. et W.W. EMMETT (1976). Bedload measurements, East Fork River, Wyoming. Dans : *Proc. Nat. Acad. Sci., USA*, 73, 1000-1004.

- MEDDI M. (1992). *Hydro-pluviométrie et transport solide dans le bassin-versant de l'Oued Mina (Algérie)*. Thèse de Doctorat, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, France, 285 p.
- MEGNOUNIF A., A. TERFOUS et A. BOUANANI (2003). Production and transport of suspended sediment transport in the Upper-Tafna river basin (North-West Algeria). *Rev. Sci. Eau*, 16, 369-380.
- MEGNOUNIF A. (2007). *Étude du transport des sédiments en suspension dans les écoulements de surface*. Thèse de Doctorat, Univ. Tlemcen, Algérie, 164 p.
- MEYBECK M. (1986). Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *Am. J. Sci.*, 287, 401-428.
- MILLIMAN J.D. et R.H. MEADE (1983). World-wide delivery of river sediment to the oceans. *J. Geol.*, 91, 1-21.
- MUELLER E.R. (2005). Variation in the reference Shields stress for bed load transport in gravelbed streams and rivers. *Water Resour. Res.*, 41, W04006 (04001-04010).
- PROBST J.L. et P. AMIOTTE-SUCHET (1992). Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). *Hydrol. Sci. J.*, 37, 621-637.
- PROBST J.L. et A. BAZERBACHI (1986). Transport en solution et en suspension par la Garonne supérieure. *Sci. Geol. Bull.*, 39, 79-98.
- REMINI B. (2006). *Envasement des barrages; actualisation*. CIPPRE2006, Université Saad Dahleb de Blida, 18-19 février.
- SERRAT P., W. LUDWIG, B. NAVARRO et J.-L. BLAZI (2001). Variabilité spatio-temporelle des flux de matières en suspension d'un fleuve côtier méditerranéen : La Têt (France). *Geosci. Surf.*, 333, 389-397.
- SIBARI H., S. HAIDA et A. AIT FORA (2001). Typologie des crues et érosion mécanique dans un bassin versant de zone semi-aride : Bassin versant de l'Inaouène, Maroc. *Sécheresse*, 3, 187-193.
- SNOUSSI M., J.M. JOUANNEAU et C. LATOUCHE (1990). Flux de matières issues de bassins versants de zones semi-arides (Bassins du Sebaou et du Souss, Maroc). Importance dans le bilan global des apports d'origine continentale parvenant à l'Océan Mondial. *J. Afric. Earth Sci.*, 11, 43-54.
- SNOUSSI M. (1988). *Nature, estimation et comparaison des flux de matières issues de bassins versant de l'Adour (France), de Sebou et de l'Oum-Er_Rbia (Maroc). Impact du climat sur les apports fluviaux à l'océan*. Mémoire de l'Institut de Géologie du Bassin de l'Aquitaine, Bordeaux, France, N°22.
- SOGREAH (1967). *Étude générale des aires d'irrigation et d'assainissement agricole en Algérie*. Dossier, Ministère de l'agriculture et de la réforme agraire, Algérie. Mémoire de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine, Bordeaux, France, N°22.
- SOGREAH (1983) *Érosion et transport solide au Maghreb. Analyse bibliographique*. Rapport de Projet RAB/80/011, PNUD, 64 p.
- STRAKHOV N.M.N. (1967). *Principles of lithogenesis*. Vol.1., Trans. J.P. Fitzsimmons, OLIVER et BOYD (Éditeurs), Edinburgh, UK, 577 p.
- TERFOUS A., A. MEGNOUNIF et A. BOUANANI (2001). Étude du transport solide en suspension dans l'oued Mouilah (Nord-Ouest Algérien). *Rev. Sci. Eau*, 14, 175-185.
- TERFOUS A., A. MEGNOUNIF et A. BOUANANI (2003). *Détermination des dégradations spécifiques dans trois bassins versants des régions méditerranéennes algériennes : Hydrology in the mediterranean and semi-arid regions*. SERVAT E., W. NADJEM, C. LEDUC et A. SHAKEEL (Éditeurs). (Proc. Sympo. Montpellier, France, avril, 366-372. IAHS Pub. 278, IAHS Press, Wallingford, UK.
- TIXERONT J. (1960). Débit solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie. Dans : *Assemblée Générale d'Helsinki*, 25 juillet-6 août. IAHS pub N°53, 26-41.
- TOUABIA B., A. AIDAOUI, D. GOMER et M. ACHITE (2001). Quantification et variabilité de l'écoulement solide en zone semi-aride, de l'Algérie du Nord. *Rev. Sci. Hydrol.*, 46, 41-53.
- VIVIAN H. (1980). *Érosion et transports solides dans le bassin du Drac au Sautet*. CNRS, Équipe de recherche 30 C/O biologie végétale Grenoble, France, pp. 349- 358.
- WALLING D.E. et B.W. WEBB (1981). The reliability of suspended load data. Dans : *Erosion and Sediment Transport Measurement*. IAHS Publ., 133, 177-194.

WALLING D.E. et B.W. WEBBB (1982). Sediment availability and the prediction of stormperiod tel-00659445, version 1 - 12 Jan 2012226 sediment yields. Dans : *Recent Developments in the Explanations and Prediction of Erosion and Sediment Yield* (Proceedings of the Exeter Symposium, juillet). IAHS Publ. 137, 327-337.

WALLING D.E. (1984). The sediment yields of African rivers. Dans : *Harare Symposium*, IAHS Publ., 144, 265-283.

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