

Production et transport des matières solides en suspension dans le bassin versant de la Haute-Tafna (Nord-Ouest Algérien)

Production and transport of suspended sediment transport in the Upper-Tafna river bassin (North West Algeria)

A. MEGNOUNIF*, A. TERFOUS, A. BOUANANI

Reçu le 26 mars 2002, accepté le 23 mars 2003**.

SUMMARY

Knowledge of suspended sediment loads carried by rivers provides insight into the underlying erosion mechanisms. In Maghreb rivers there are few data available on suspended sediment transport (PROBST and SUCHET, 1992). In this context knowledge of suspended sediment loads in the Oued Sebdo River (Mediterranean Algeria), which is a main stream in the Upper-Tafna basin, is of interest. The purpose of this study was to determine periods of active erosion and estimate the contributions of slope erosion and channel erosion in this basin.

Situated in northwest Algeria, the Upper-Tafna basin covers an area of 256 km² (figure 1). Rising in Ouled Ouriach, the upper reaches of the river flow through Jurassic soils at altitudes up to 1400 m. These tributary streams join on the Sebdo plain (900 m), which is composed of Plio-quaternary alluviums. The soil is composed of calcareous-marnes, calcareous and Jurassic dolomites (BENEST, 1972; BENEST *et al.*, 1999) until the Beni-Bahdel dam.

The study zone is characterized by a semi-arid climate. Analysis of the rainfall data at the Beni-Bahdel station (X=34°42'33"; Y=01°29'48"; Z=660 m) from 1939-1940 to 1997-1998 (figure 2) demonstrates that the rain supply has decreased greatly since 1975, with more than an 18% decrease in rainfall amounts.

Hydrological data and methodology

The study used instantaneous water discharge and suspended sediment load values (1257 values) measured and supplied by the National Agency of Hydrologic Resources [ANRH]. Five annual water years have been investiga-

Laboratoire de Modélisation en Hydrologie et Hydrogéologie (L.A.M.HYD), Département d'Hydraulique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Aboubakr Belkaid Tlemcen, BP 230 Tlemcen 13 000 Algérie.

* Correspondance. E-mail : nl_megnounif@mail.univ-tlemcen.dz

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 mars 2004.

ted during the period from September 1988 to August 1993. The discharge values (Q_L , in m^3/s) were determined from the rating curve for the measured heights of the water at the gauging station. The suspended load (g/l) was determined on water samples taken from the stream channel banks. The number of samples taken was adapted to the hydrological regime (i.e. every other day or during flood periods) and samples were collected as frequently as increments of 10 cm.

The suspended sediments were carried from the slopes into the river by surface runoff or by stream channel erosion caused by flowing water. In order to express the contribution of these two mechanisms, we applied hydrograph separation methods used by ETCHANCHU (1988), ETCHANCHU and PROBST (1986), KATTAN *et al.* (1987) and PROBST and BAZERBACH (1986).

Balance sheet of solid and liquid contributions

The annual liquid contributions from 1988 to 1993 were evaluated to be 30.9 million m^3 . The abrupt slopes of the basin cause water to move quickly with a lot of force. In turn a large amount of suspended sediments (estimated at 286,000 tons) is generated, which corresponds to a soil erosion rate of 1120 tons/ km^2 /year. This value is comparable to those estimated by WAL-LING (1984) where the erosion rates ranged between 1000 and 5000 tons/ km^2 /year.

As seen in table 1, the annual suspended sediment load varies dramatically. In 1990/91, the soil erosion rate was estimated to be 4283 tons per km^2 ; this amount was 180 times higher than the sediment load in 1992/93 (24 tons per km^2). Furthermore, there is no relationship between annual suspended sediment load and water discharge or annual rainfall. The annual precipitation (355 mm) was recorded during the year 1988/1989, and generated a soil erosion rate evaluated at 1072 tons per km^2 . For a similar rainfall, 345 mm recorded during the year 1992/93, the erosion rate was only about 24 tons/ km^2 /year.

Autumn liquid contributions represent only about 17 % of the mean annual supply (figure 4). Furthermore the heavy rains produce higher peak flows as the rain encounters dry soil with less vegetation cover and produces large quantities of solid by heavy rain splash erosion. The mean seasonal suspended sediment concentration was higher representing approximately 44% of total annual production. Spring corresponds to a dilution in sediment concentration caused by a large groundwater contribution. The volume discharged by spring flow is about 60% of total annual river discharge. The solids transported during this period are mainly eroded from the stream banks and represent 36% of total annual sediment load.

Calculated values of monthly suspended sediment load and water supply are reported in table 3. The monthly suspended sediment load carried by the river was very irregular. The majority (94%) of the total sediment load was transported in only three months, 45% in September, 30% in March and 19% in July. The monthly amounts varied from year to year, and this can be explained by the occurrence of floods (table 4).

The river suspended sediments were carried from the slopes into the river by surface runoff water or by stream channel erosion. Using a hydrograph separation method, the contributions of these two mechanisms are summarized in table 4. According to these values we observed that :

- The contribution of slope erosion processes represents an average of 62% of the total river-suspended sediment transport.
- The second contribution from channel erosion represents at least 38% of the total river transport. This percentage is comparable with those obtained by ETCHANCHU and PROBST (1986) for the Garonne River

basin (30%). This contribution is higher than those estimated by KATTAN *et al.* (1987) (22% for the Senegal River basin) and by ROBINSON (1977) for some American rivers.

- This contribution was far less than those estimated by DUYSSING (1985) for a forest stream in Luxemburg, where sediment produced by surface runoff was about 62% of annual suspended sediment loads.
- This estimate is comparable to those estimated by where the erosion rates range between 1000 and 5000 tons/km²/year.
- Although the annual amount of suspended sediment was variable, the relative contributions of the slope and channel erosion were less variable from year to year.

Key-words: *liquid discharge, suspended sediment load, period of active erosion, slope erosion, channel erosion, oued Seb dou river basin, Algeria.*

RÉSUMÉ

Dans ce travail on s'intéresse aux sédiments transportés en suspension par le cours d'eau Oued Tafna à Beni-Bahdel. Une analyse de la variabilité de la charge en suspension de l'eau quant aux fluctuations des régimes hydro-climatiques, pour la période allant de septembre 1988 à août 1993, montre que la production des sédiments est très forte en automne mais de faible ampleur au printemps. En été, des crues éphémères fortement chargées sont parfois observées. En automne, le flux des matières solides en suspension représente 44 % du flux annuel estimé à 286 000 tonnes, alors que les apports en eaux ne représentent que 17 % de l'apport annuel moyen évalué à 30,9 millions de m³. Au printemps, malgré l'augmentation des débits (60 % de l'apport total annuel), la charge en suspension diminue de façon significative.

Cependant, les sédiments ramenés par le cours d'eau sont produits soit par ruissellement superficiel sur les versants soit arrachés du lit et des berges du cours d'eau. On montre alors que la contribution de ces deux mécanismes d'érosion reste remarquablement constante d'une année à une autre. La production du ruissellement superficiel en matières solides représente alors 62 % du flux annuel alors que l'érosion du cours d'eau contribue par 38 %.

Mots-clés : *débit liquide, charge solide en suspension, période d'érosion active, dégradation des versants, érosion du lit et des berges du cours d'eau, bassin versant, oued Seb dou, Algérie.*

1 – INTRODUCTION

En raison de son climat semi-aride, de la présence de relief abrupt et de la pauvreté de la végétation, le Maghreb est l'une des régions les plus vulnérables au monde à l'érosion des sols. Cependant, malgré cette grande vulnérabilité, peu d'études existent encore sur ce phénomène d'érosion comme l'avaient déjà souligné PROBST et SUCHET (1992) notamment. Pourtant comme on le sait, cette érosion entraîne un appauvrissement progressif des sols affectant ainsi la production agricole, d'une part, et une diminution des réserves des nappes d'eau, d'autre part. Ces conséquences apparaissent sans nul doute comme une menace sérieuse au développement socio-économique de cette

région confrontée déjà à une démographie galopante concentrée le plus souvent dans quelques régions agricoles. L'étude de l'érosion des sols se justifie donc pleinement afin de quantifier le phénomène et de proposer des mesures de protection adéquates.

Les études consacrées à l'érosion des sols par le biais de la charge en suspension ont révélé une forte variabilité temporelle et spatiale de cette charge au Maghreb (BOUROUBA, 1997, 1998 ; DEMMAK, 1982 ; GHORBAL et CLAUDE, 1977 ; HEUSH et MILLIES-LACROIX, 1971 ; PROBST et SUCHET, 1992 ; SIBARI *et al.*, 2001 ; SNOUSSI *et al.*, 1990 ; SOGREAH, 1967 ; TERFOUS *et al.*, 1999, 2001). Cette étude vise à quantifier la charge en suspension mesurée pendant cinq ans dans un petit bassin versant caractérisé par des pentes relativement élevées et par la présence des formations carbonatées bien karstifiées (COLLIGNON, 1986) afin de la comparer à celle estimée dans d'autres bassins versants de la région.

2 - DESCRIPTION GÉNÉRALE DU BASSIN VERSANT DE LA HAUTE-TAFNA

Situé au nord-ouest d'Algérie, le bassin versant de la Haute-Tafna couvre une superficie de 256 km² (figure 1). Il est drainé par l'oued Sebdou qui prend naissance dans les Ouled Ouriache. Le cours d'oued se subdivise en plusieurs ramifications creusées dans les terrains Jurassiques principalement carbonatées qui peuvent atteindre des sommets de plus de 1400 m d'altitude. Ces ramifications se réunissent au niveau de la plaine de Sebdou située à 900 m d'altitude et constituée des alluvions Plio-Quaternaires. L'oued entaille ensuite une vallée encaissée (le fossé de la Tafna), constituée des roches carbonatées (marno-calcaires, calcaires et Dolomies du Jurassique) (BENEST, 1972 et BENEST *et al.*, 1999), jusqu'au barrage de Béni-Bahdel. L'altitude moyenne du bassin versant est de 1058 m, et près de 49 % de la surface présentent des pentes supérieures à 25 %. La dénivelée moyenne donnée par l'indice de pente de Roche est de 0,077.

Le climat de la région est semi-aride du type méditerranéen avec une saison des pluies en hiver et une saison sèche en été (figure 2). Les mois les plus pluvieux sont décembre (74 mm) et mars (71 mm). La moyenne annuelle des totaux pluviométriques mesurée à la station Beni-Bahdel ($X = 34^{\circ}42'33''$; $Y = 01^{\circ}29'48''$ et $Z = 660$ m) depuis 1939 est de 481,5 mm. D'autre part, depuis 1975, la région est confrontée à une sécheresse persistante (figure 3). Celle-ci a provoqué une diminution des précipitations de l'ordre de 18 %. L'intrusion des masses d'air polaire dans la région s'accompagne souvent par des orages qui peuvent déverser jusqu'à 200 mm en 24 heures (DEMMAK, 1982).

La répartition de la végétation dans le bassin versant est fonction de la pluviométrie, de la nature du sol et des activités anthropiques. Au nord du bassin versant, les croûtes calcaro-gréseuses et marno-gréseuses ainsi que les argiles de décalcification sont couvertes par une végétation forestière (20 % de la superficie totale du bassin versant). On y pratique une arboriculture fruitière et

un élevage de montagne. Dans le secteur sud caractérisé par des pentes relativement élevées, on rencontre les forêts claires. Celles-ci protègent mal le sol. Les pentes dénudées par l'agriculture sont en cours de reboisement. Enfin, les sols alluvionnaires de la cuvette de Sebdo (16 % de la superficie totale du bassin versant) sont utilisés pour des cultures extensives principalement céréalières.

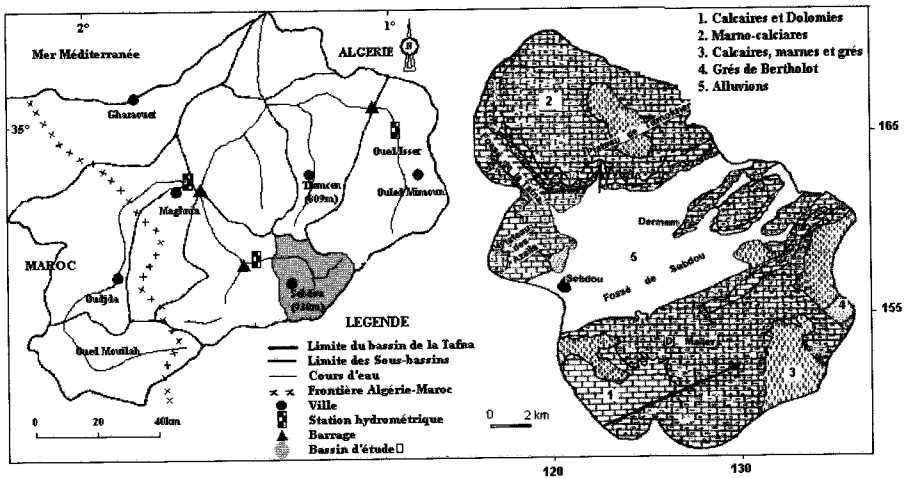


Figure 1 Situation générale du bassin versant de la Haute-Tafna.
General description of the Upper-Tafna basin.

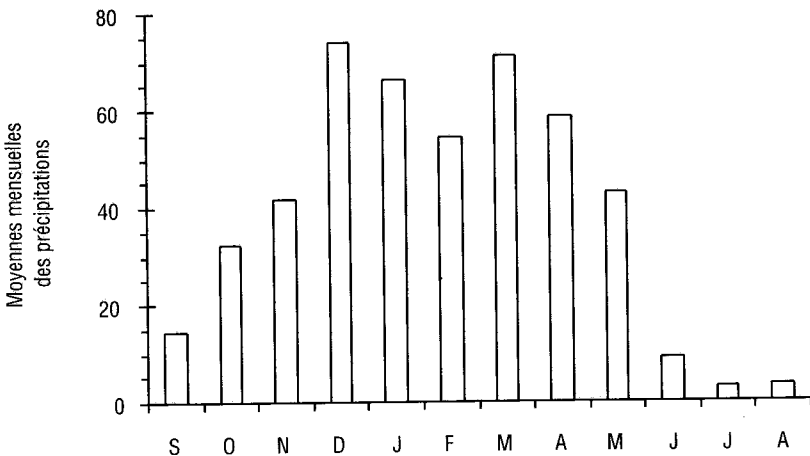


Figure 2 Hauteurs moyennes mensuelles. Station Beni-Bahdel (1939-1940 à 1997-1998).
Average monthly runoff for the Beni-Bahdel station (1939-1943 to 1997-1998).

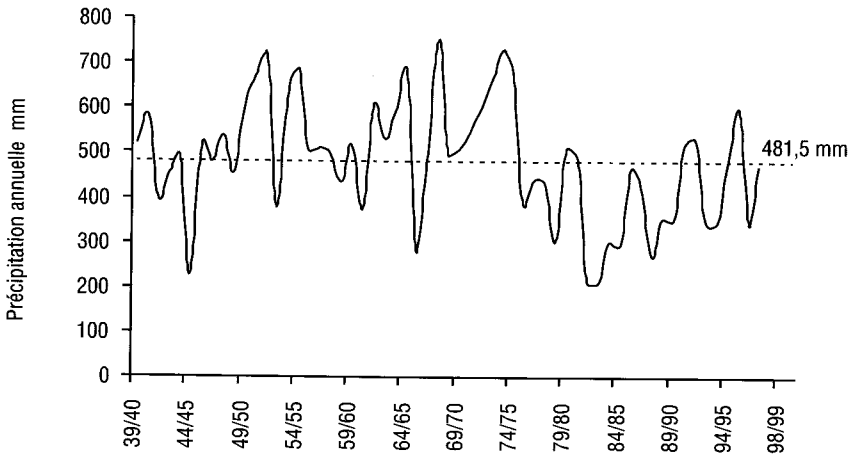


Figure 3 Variation inter-annuelle des précipitations. Station de Beni-Bahdel (1939-1940 à 1997-1998).

Fluctuations in the annual rainfall at the Beni-Bahdel station during the period from 1939-1940 to 1997-1998.

3 – SOURCES DES DONNÉES ET MÉTHODES D'ÉTUDES

Les valeurs des débits liquides sont calculés au moyen de la courbe de tarage à partir de la lecture des hauteurs d'eau faite sur une échelle limnimétrique d'une part et le dépouillement des hauteurs d'eau enregistrées par un limnigraphe à flotteur, d'autre part. Quant au débit solide, à chaque lecture de hauteur d'eau, on prélevait un échantillon d'eau chargée sur la rive gauche de l'Oued au moyen d'un conteneur de capacité 75 cl. La boue recueillie sur un papier filtre est pesée après séchage à l'étuve à 105 °C pendant 30 minutes. Ce qui permet de déduire la concentration de la charge en suspension en g/l. Cette étude est fondée sur 1 257 mesures des débits liquides et de la turbidité effectuées à la station de jaugeage Beni-Bahdel. Celle-ci est située à l'exutoire du bassin versant à environ 1 000 m en amont du lac de barrage. Ces mesures couvrent une période de cinq ans (septembre 1988 à août 1993). Elles ont été réalisées par les services de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques [ANRH]. La fréquence des prélèvements effectués dépendait de la variation de la hauteur d'eau. En période de crue, à chaque variation de 10 cm de hauteur d'eau, on prélevait un échantillon d'eau. En période de décrue, on prélevait une fois tous les deux jours.

Enfin, pour séparer la quantité des sédiments fournie par l'érosion des berges et du lit de celle arrachée aux versants, nous avons appliqué la méthodologie préconisée notamment par ETCHANCHU (1988), ETCHANCHU et PROBST (1986), KATTAN *et al.* (1987) et PROBST et BAZERBACH (1986). C'est une méthodologie fondée sur la séparation des écoulements d'un hydrogramme de crue.

RÉSULTATS

Le tableau 1 présente les valeurs de la charge en suspension (volume total transporté et dégradation spécifique) mesurée durant la période 1988-1993 en relation avec les totaux pluviométriques et le volume d'écoulements. Il ressort de ce tableau deux faits saillants suivants :

- La charge en suspension est très variable d'une année à l'autre. En effet, la dégradation spécifique varie de 24 (1992/1993) à 4 283 t/km²/an (1990/1991) soit un rapport de 1 à 180. La dégradation spécifique moyenne mesurée sur 5 ans est de l'ordre de 1 120 t/km²/an ; ce qui correspond à une concentration moyenne annuelle de l'ordre de 10 g/l.
- Il n'existe aucun lien entre la quantité de la charge en suspension et les totaux pluviométriques ainsi que les volumes d'écoulement. En effet, pour deux années recevant presque la même quantité des précipitations, la quantité de la charge en suspension peut être très différente. À titre d'exemple, en 1988/1989, on a mesuré 1 072 t/km²/an pour une lame d'eau précipitée de 355 mm alors qu'en 1992/1993, presque pour la même quantité des précipitations (345 mm), on a mesuré seulement 24 t/km²/an.

Tableau 1 Bilan annuel des précipitations P (mm), d'apport liquide A_L (million de m³), d'apport solide A_S (million de tonnes), des concentrations C (g/l), de la lame d'eau écoulée L_E (mm) et de la dégradation spécifique A_{SS} (tonne par km² et par an) mesurés dans le bassin versant de la Haute-Tafna pour la période de septembre 1988 à août 1993.

Table 1 Annual balance of rainfall (P in mm), water discharge (A_L in million m³), suspended load (A_S in million tons), suspended sediment concentrations (C in g/l), river flow depth (L_E in mm) and specific transport (A_{SS} in tons by km² per year) for the period from September 1988 to August 1993.

Année	P (mm)	A _L (M.m ³)	A _S (M.T)	C (g/l)	L _E (mm)	A _{SS} (t/km ² /an)
1988/89	355	23,7	0,274	11,62	92	1072
1989/90	352	10,9	0,014	1,24	43	53
1990/91	516	77,9	1,094	14,05	305	4283
1991/92	527	26,7	0,041	1,54	105	161
1992/93	345	15,1	0,006	0,40	59	24
Moyenne	419	30,9	0,286	9,25	121	1119

La figure 4 présente la relation entre la quantité de la charge en suspension et les totaux pluviométriques saisonniers. Presque près de la moitié de la charge en suspension (43,7 %) est transportée en automne alors que les apports liquides durant cette saison ne représentent que 17,2 %. Ceci s'explique par le fait que les précipitations, souvent intenses, tombent sur un sol asséché et mal protégé par la végétation (CHIBBANI *et al.*, 1999 ; COSANDEY *et al.*, 2002 ; ROOSE *et al.*, 1999). Au printemps, la charge en suspension n'augmente pas proportionnellement aux apports pluviométriques si bien que le flux

saisonnier reste inférieur à celui mesuré en automne malgré une hausse très significative des totaux pluviométriques. La présence de la végétation et l'humidification des sols réduisent la vulnérabilité des particules à l'érosion hydrique durant cette saison. Donc, contrairement à d'autres zones climatiques (PROBST, 1992), au Maghreb, les plus fortes concentrations de la charge en suspension ne sont nécessairement pas mesurées durant les périodes de hautes eaux.

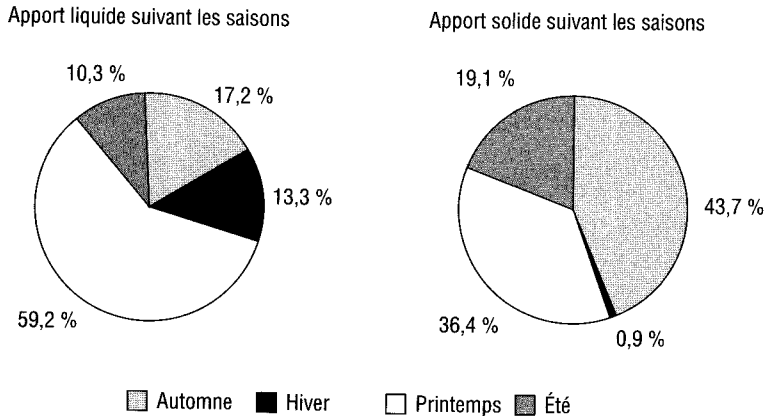


Figure 4 Contribution des apports liquides et solides moyens suivant les différentes saisons (septembre 1988 - août 1993).

Seasonal contributions of river discharge and suspended load from September 1988 to August 1993.

Dans le tableau 2 sont consignées les valeurs mensuelles de la charge en suspension et les apports liquides. Ce tableau révèle une forte variabilité mensuelle de la charge en suspension. 91 % de cette charge est mesurée au cours de trois mois seulement : en septembre (43,2 %), en mars (28,8 %) et en juillet (18,8 %). Cette variabilité inter-mensuelle de la charge en suspension est due à la fréquence des crues importantes. En effet, c'est durant les périodes de crues qu'une grande partie de la charge en suspension est souvent transportée en raison d'un ruissellement superficiel important sur les versants (tableau 3). C'est ainsi que par exemple durant la saison 1990/1991, 56 % de la charge annuelle en suspension ont été mesurés lors de la crue survenue entre le 2 et 21 septembre 1990. Mais comme on le sait, la quantité de la charge en suspension générée par une crue dépend de l'intensité des précipitations. Ainsi, les crues, provoquées par la fonte des neiges, génèrent très peu de charge en suspension comparativement aux crues provoquées par les orages. Par exemple en 1989, une crue causée par la fonte de neiges survenue au mois d'avril n'a généré que 1 % de la charge annuelle en suspension alors que son apport annuel en eau était de 60 %. En revanche, une crue provoquée par un orage violent en juillet de la même année a généré 98 % de la charge annuelle en suspension pour un apport en eau relativement faible de l'ordre de 2,5 millions de m³. La fréquence des orages violents explique aussi en grande partie

l'absence de corrélation entre la charge en suspension et les totaux pluviométriques d'une part, et la variabilité de cette charge d'autre part, observées aux échelles annuelle, saisonnière et mensuelle.

Tableau 2 Variation mensuelle des précipitations P (mm), de la lame d'eau écoulée L_E (mm), de la concentration C (g/l) et de la dégradation spécifique A_{SS} ($t/km^2/an$).

Table 2 Monthly fluctuation of rainfall P(mm), runoff depth L_E (mm), concentrations C(g/l) and soil erosion rate A_{SS} ($t/km^2/year$).

Moyenne	P (mm)	L_E (mm)	C (g/l)	A_{SS} ($t/km^2/an$)
S	10	12,8	38,0	484
O	18	3,5	0,8	3
N	36	4,4	0,3	1,3
D	39	4,6	0,1	0,5
J	40	6,1	1,2	7,3
F	41	5,2	0,3	1,6
M	111	42,8	7,5	322
A	47	12,9	2,3	29,3
M	60	11,7	1,2	14,4
J	8	6,7	0,8	5,2
J	5	4,9	42,7	210
A	4	2,1	0,6	1,2

Tableau 3 Charges liquides et solides mesurées lors de quelques crues.

Table 3 Liquid and solid supply calculated of some floods.

Date	A_L Mm ³	A_S tonnes	Q_L max. m ³ /s	C max. g/l	C moy. g/l
2 au 21 septembre 1990	13,5	613 000	103,4	105,8	45,4
18 février au 3 mai 1991	55	472 000	84,5	23,7	8,7
18 mars au 19 avril 1989	8,9	1 931	104,6	6,4	0,22
21 au 24 juillet 1989	2,5	2 686 309	29,8	115,6	105

En ce qui concerne l'origine des sédiments, le tableau 4 révèle que 62 % des sédiments transportés en suspension proviennent de l'érosion des versants et 38 %, de l'érosion des berges et du lit de l'oued. Ces deux taux varient peu à l'échelle annuelle mais beaucoup à l'échelle saisonnière. L'apport des sédiments provenant de l'érosion des versants est important en automne. Il s'élève à 97 000 tonnes, soit une contribution estimée à 80 % de l'apport total moyen enregistré durant cette saison. Au printemps, l'érosion du lit et des berges du cours devient importante en raison de l'augmentation des débits dans le chenal de l'oued et du développement de la végétation sur les versants. Cette végétation assure une meilleure protection des sols contre l'érosion hydrique. L'érosion des berges et du lit fournit ainsi plus des sédiments en suspension que la dégradation des versants. Elle est de l'ordre de 71 000 tonnes alors que la charge ruisselée ne représente que 33 000 tonnes,

soit un taux de contribution de 32 %. En été, lorsque les débits diminuent dans le chenal, les sédiments proviennent exclusivement de l'érosion des versants lors des épisodes orageux.

Tableau 4 Bilan annuel de la production des sédiments par ruissellement superficiel A_{SR} et des berges du cours d'eau A_{SLB} en million de tonnes, et leurs contributions respectives.

Table 4 Annual suspended load produced respectively by slope erosion (A_{SR}) and channel erosion (A_{SLB}) in million tons and their annual contributions.

Année	A_{SLB} (M.T)	A_{SR} (M.T)	Cont. A_{SLB}	Cont. A_{SR}
1988/89	0,018	0,255	6,7 %	93,3 %
1989/90	0,005	0,008	40,0 %	60,0 %
1990/91	0,466	0,629	42,5 %	57,5 %
1991/92	0,020	0,021	49,5 %	50,5 %
1992/93	0,003	0,003	49,8 %	50,2 %
Moyenne	0,103	0,183	37,7 %	62,3 %

4 – DISCUSSION ET CONCLUSION

Sur la base des mesures continues (1988-1992) de la charge en suspension réalisées en cinq ans (1988-1992) dans le bassin versant de la Haute-Tafna en Algérie septentrionale, nous avons estimé la dégradation spécifique moyenne annuelle à environ 1 120 t/km²/an. Ce taux de dégradation se situe dans la fourchette des valeurs proposées par WALLING (1984). En se fondant sur les travaux réalisés au Maghreb, cet auteur estime que les dégradations spécifiques dans les bassins versants varient entre 1 000 et 5 000 t/km²/an. D'autres auteurs ont proposé des valeurs encore plus élevées. Ainsi, PROBST et SUCHET ont avancé de valeurs supérieures à 5 000 t/km²/an pour cinq bassins versants. Comme c'est le cas du bassin Agrioun en Algérie où la dégradation spécifique a été estimée à 7 200 t/km²/an. D'autre part, des valeurs de dégradation spécifique nettement inférieures à celle estimée dans le bassin de la Haute-Tafna ont été observées dans certains bassins versants du Maghreb. Sur la base des données de mesure de la charge en suspension réalisée dans 130 bassins versants dans les trois pays du Maghreb (Maroc, Algérie et Tunisie), PROBST et SUCHET ont estimé que la dégradation spécifique moyenne est respectivement de 400 et 610 t/km²/an pour les rivières qui se jettent dans la mer Méditerranée et dans 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 t/km²/an) étudié par BOUROUBA (1998). Dans le cas du bassin de la Tafna, SOGREA (1967) a estimé la dégradation spécifique à 150 t/km²/an. Cette valeur est supérieure à celle (126 t/km²/an) de son affluent, l'oued Mouilah (TERFOUS *et al.*, 2001). Toutefois, ces auteurs ont montré qu'au cours de certaines années, cette valeur peut atteindre 1 015 t/km²/an.

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, de la taille des bassins versants (PROBST et SUCHET, 1992 ; FOX et MOORE, 1993). À cette variabilité spatiale s'ajoute la variabilité temporelle aux échelles annuelle, saisonnière et mensuelle. Dans le cas du bassin étudié, nous avons montré que la dégradation spécifique mesurée sur cinq ans varie entre 24 t/km²/an et 4 283 t/km²/an. À l'échelle saisonnière (figure 4), la production des sédiments est forte au début de l'automne, mais faible au printemps. Avec une contribution importante de sédiments produits par le ruissellement superficiel sur les versants, l'automne est responsable de 44 % du flux annuel alors que les apports liquides ne représentent que 17 %. Par contre, le printemps totalise près de 60 % de l'apport annuel en eau, mais ne produit que 36 % de matières solides arrachées essentiellement du lit et des berges. 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.

Enfin, en ce qui concerne la source des sédiments, 62 % sont fournis par l'érosion des versants et 32 %, par l'érosion des berges et du lit de l'oued. Ce dernier pourcentage est comparable à celui estimé par ETCHANCHU et PROBST (1986) pour la Garonne au sud de la France. En revanche, il est inférieur à celui (53 %) estimé par DUYSINGS (1977) pour un cours d'eau dans un bassin versant boisé au Luxembourg, mais supérieur à ceux estimés par KATTAN *et al.* (1987) pour le fleuve du Sénégal (22 %) et par ROBINSON (1977) pour les rivières des États-Unis (24 %). Si l'apport de ces deux sources restent presque constants d'une année à l'autre, il varie cependant d'une saison à l'autre. L'érosion des versants est ainsi plus importante en automne qu'au printemps, période durant laquelle les débits élevés favorisent l'érosion des berges et du lit alors que sur les versants, l'érosion est ralentie par la présence de la végétation et l'humidification des sols.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BENEST M., 1972. Les formations carbonatées et les grands rythmes du Jurassique supérieur des monts de Tlemcen (Algérie). *C. R. Acad. Sci. Paris. Serie D*, t. 275, 1469-1471, 2 fig.
- BENEST M., ELMI S., BENSALAH M., 1999. La couverture mésozoïque et cénozoïque du domaine tlemcenien (avant pays d'Algérie occidentale) : stratigraphie, paléoenvironnement, dynamique sédimentaire et tectogénèse alpine. *Bull. Serv. Géol. Algérie*. Vol. 10, n° 2, 127-157, 7 fig.
- 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. *Bull. ORSTOM*, 17, 345-360.
- 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. *Revue des Sciences et Technologie*, 9, 5-11.
- CHIBBANI R., DJILLI K., ROOSE E., 1999. Étude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser. *Bull. ORSTOM, Rés. Eros.*, 19, 85-95.
- COLLIGNON B., 1986. Hydrologie appliquée des aquifères karstiques des Monts de Tlemcen. Thèse Doc., Univ. Avignon, t 1, 114 p.
- COSANDEY C., LAVABRE J., FOLTON N., MARTIN C., DIDON-LESCOT J.F.,

- MATHYS N., RICHARD D., 2002. Conséquences de la forêt méditerranéenne sur les écoulements de crue. Synthèse de recherches menées en France. *Colloque International sur l'Eau « Gestion Quantitative des Ressources en Eau »*, Chlef Algérie, 05- 06 février 2002, 130-141.
- DEMMAK A., 1982. Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Th. Docteur-Ingénieur Univ. Paris, France.
- DUYSING J.J. H.M., 1985. Streambank contribution to the sediment budget of forest stream. Unpubl. Ph. D. Th., Lab. Phys. Geogr. Soil Sci., Univ. Amsterdam, 190 p.
- ETCHANCHU D., 1988. Géochimie du bassin des eaux de la Garonne, transferts de matière dissoutes et particulaires vers l'océan Atlantique. Th. Doct. Univ. Paul-Sabatier, Toulouse, 178 p.
- ETCHANCHU D., PROBST J.L., 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. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 302, série II, n° 17, 1063-1067.
- FOX, H.R., MOORE, H.M., 1993. Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). Discussion. *Hydrol. Sci. J.*, 38, 621-637.
- GHORBAL A., CLAUDE J., 1977. Mesure de l'envasement dans les retenues de sept barrages en Tunisie : estimation des transports solides. *Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters*. (Proc. Paris Symp., July 1977), I.A.H.S. Bull., n° 122, 219-232.
- HEUSCH B., MILLIES-LACROIX A., 1971. Une méthode pour estimer l'écoulement et l'érosion dans un bassin. Application au Maghreb. *Mines et Géologie Rabat*, 33, 21-39.
- KATTAN Z., GAC J.L., PROBST J.L., 1987. Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senegal basin - Estimation of the surface runoff concentration and relative contributions of channel and slope erosion. *J. Hydrol.*, 92, 59-76.
- PROBST J.L., 1992. Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale. Mécanismes, bilan global actuel et fluctuations au cours des 500 derniers millions d'années. *Sci. Géol. Bull.*, mémoire n° 94, 161 p.
- PROBST J.L., AMIOTTE SUCHET P., 1992. Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). *Hydrol. Sci. J.*, 37, 621-637.
- PROBST J.L., BAZERBACHI A., 1986. Transports en solution et en suspension par la Garonne supérieure. *Sci. Géol. Bull.*, 39, 1, 79-98.
- ROBINSON A. R., 1977. Relationships between soil erosion and sediment delivery. *Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters*. (Proc. Paris Symp., July 1977), *IAHS Bull.*, n° 122, 159-167.
- ROOSE E., CHIBBANI R., BOUOUROUGAA L., 1999. Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. *Bull. ORSTOM*, Rés. Eros., 19, 85-95.
- SIBARI H., HAIDA S., AIT FORA A., 2001. Typologie des crues et érosion mécanique dans un bassin versant de zone semi-aride : bassin versant de l'In-aouène, Maroc. *Sécheresse*, 12, 187-193.
- SNOUSSI M., JOUANNEAU J.M., LATOUCHE C., 1990. Flux de Matières issues de bassins versants de zones semi-arides (Bassins du Sebou 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.
- 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.
- TERFOUS A., MEGNOUNIF A., BOUANANI A., 2001. Étude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord Ouest Algérien). *Rev. Sci. Eau*, 14, 175-185.
- TERFOUS A., BOUANANI A., MEGNOUNIF A., 1999. Évaluation du transport solide dans le bassin de l'Isser (N-O Algérie) 2^e séminaire maghrébin sur l'eau. Tizi Ouzou, 28-29 juin.
- WALLING D. E., 1984. The sediment yields of African rivers. *IAHS Publ.*, Harare Symp., 144, 265-283.