

Analyse de la relation de puissance : débit solide – débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'Oued Wahrane (Algérie)

Analysis of a sediment rating curve in Wahrane river basin (Algeria)

A. BENKHALED¹, B. REMINI*²

Reçu le 19 novembre 2001, accepté le 13 mars 2003**.

SUMMARY

Fluxes of suspended materials collected at gauge stations are closely related to flow discharges. In the absence of continuous recorded suspended sediment concentration data, hydrologists have used rating sediment transport curves to define the water discharge/suspended sediment relationship and to estimate (predict) suspended sediment concentrations for use in flux calculations. Although there are many methods for developing rating curves, the most common is a power function $Y = aX^b$ that relates suspended sediment concentration to water discharge. The discharge measurement is composed of independent variables and a and b are the intercept and slope of the rating curve, respectively. These rating curves are usually generated by least squares regression. Although the accuracy of this approach has been questioned, the applicability appears to be adequate for many purposes. In order to better understand the relationship, this paper reports a qualitative analysis of parameters a and b .

The average suspended sediment load for a cross-section of average stream discharge is the product of the average concentration of the suspended materials and the average flow discharge during the same period. The relation between sediment discharge and water discharge in Algeria rivers is unknown and difficult to assess. Some of these difficulties are related to sampling methods and a continuous record of suspended sediment concentrations is not available. This work will also be used to describe sedimentary dynamics specific to the basin during flood periods. The study was carried out on daily flow discharge data and the concentration of suspended materials collected from the gauging station on the Wahrane River (1972 to 1989). To determine the variation of the parameters a and b of the power relation, a methodology

1 Maître Assistant Chargé de Cours. Université de Chlef BP n° 225 Chlef, Algérie.

2 Maître de Conférences. Université de Blida BP n° 270 Blida, Algérie, tél : 213 25 43 39 40, fax : 213 25 43 11 64.

* Correspondance. E-mail : benkhaleddz@yahoo.fr, reminib@yahoo.fr

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

using regression models was used, based on an analysis on various scales of the parameters a and b of the equation of sediment transport in relation to the hydrological characteristics. The analysis reveals the evolution of the parameters a and b . Several temporal scales were used. An examination on an annual scale shows that it was possible to define a very strong relationship between a and the hydraulicity for the dry years and that indeed the factor a , indicating erodability, was well correlated with the hydraulicity during the dry period. The exponent b was correlated with hydraulicity only during the wet period. The relationship between a and mean rainfall was not significant. The seasonal scale revealed a very distinct effect.

The production of sediments was very strong in autumn and winter when sediment transport approached the very typical power model. The seasonal rainfall strongly explained the variations of a while the exponent b was related to peak discharge. The analysis carried out on a monthly scale essentially produced the same conclusions as the analysis on a seasonal scale. It was found that the variation of a was more significant in winter and autumn than in the other seasons, presumably because of the hydrologic and sedimentology activity during this period, and the nature and surface quality of the soil. The relation between parameter a and the monthly average rainfall was very good. Given that the storm is the temporal unit most adequate for hydrological analyses in relation to sediment transport, analysis of single hydrologic events in the Wahrane River yields more details on the variation of a and b . The study was extended to the decomposition of the rising and falling limbs of the hydrograms. The floods of March and October showed the evolution of the parameters a and b . First, the range of variation of a and b , which was narrow during the preceding analyses, was broader for the analysis of the rising limb of the hydrograms. Secondly, the values of a and b showed opposite temporal trends. The high values of b were particularly characteristic of the risings associated with the autumn, during which flow discharges are strongest. The risings of winter floods were marked by low values of a . February and December were characterized by lower values of a in the falling limb than in the rising limb and stronger values of b in falling limb. Lastly, analysis of the values of a with respect to the antecedent precipitations index, IPA, suggested that the highest values of a were related to a weak IPA and a strong soil erodability in the catchment, whereas low values of a would reflect soil saturation (i.e. a strong IPA).

The study showed that the power relationship between sediment load and stream flow was influenced by precipitation, runoff amount and soil moisture, and illustrated the complexity of solid transport.

Key-words: algeria, basin, wahrane river, sediment discharge, flow discharge, sediment, rating curve, power relation.

RÉSUMÉ

Les flux de sédiments en suspension recueillis à l'exutoire d'un bassin versant sont étroitement liés aux débits liquides. Les modèles de relation liant ces deux paramètres reposent sur des concepts similaires faisant intervenir la loi de puissance $Y = aX^b$. Bien que la validité d'une telle relation n'est pas à prouver, une analyse qualitative de la constante a et de l'exposant b a été effectuée pour un bassin versant situé en zone semi-aride : l'Oued Wahrane (Algérie). Les différentes échelles temporelles d'analyse utilisées ont permis d'expliquer le comportement des paramètres de l'équation en vue d'une meilleure compréhension de cette relation et de relier ces paramètres aux facteurs qui induisent le débit solide. L'objectif principal à trait aux aspects théoriques et pratiques du phénomène du transport solide en suspension. Les résultats ont permis d'identifier de manière assez concluante les modèles saisonniers. L'échelle saisonnière est très représentative du phénomène de

transport solide dans le bassin versant. D'autres part, l'événement averse-crue s'est avéré l'unité hydrologique la plus adéquate pour les analyses en relation avec le transport solide.

Mots clés : algérie, bassin versant, débit solide, débit liquide, Oued Wahrane, courbe de transport solide, relation de puissance.

1 – INTRODUCTION

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. Le débit solide moyen des sédiments en suspension Q_s qui transitent une section d'écoulement moyen est calculé par le produit de la concentration moyenne des sédiments en suspension C_s et du débit liquide moyen Q durant une période de temps donné (équation 1) :

$$Q_s = Q C_s \quad (1)$$

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

$$C_s = a Q^{b-1} \quad (2)$$

Une relation empirique, communément appelée courbe du transport solide (CAMPBELL *et al.* 1940 ; CRAWFORD, 1991) lie le débit solide au débit liquide (équation 3) :

$$Q_s = a Q^b \quad (3)$$

Les paramètres a et b sont généralement estimés par régression linéaire des variables transformées en log selon l'équation 4 :

$$\text{Log } Q_s = \text{Log } a + b \text{ log } Q \quad (4)$$

FERGUSON (1986) a démontré que cette équation sous-estimait le débit solide jusqu'à 50 % et a proposé un facteur correctif $\exp(2.65s^2)$ basé sur des considérations statistiques.

LEOPOLD *et al.* (1953) ont montré que l'exposant b variait entre 2 et 3 alors que LINSLEY *et al.* (1992) mentionnent que le coefficient a demeure très petit pour un débit liquide unité.

L'exposant b représente la pente de la courbe sur échelle log-log. BOGARDI (1974) suggère que l'exposant b et la constante a reflètent les caractéristiques du bassin versant, alors que VANONI (1977) considère que la constante a représente un indice d'érodabilité du sol.

Lorsque l'équation 2 est employée, l'exposant b peut raisonnablement prendre la valeur de 2 ou 3 pour les rivières à lit de sable (VANONI, 1977). Si l'exposant b est égal à l'unité, l'équation 2 conduit à admettre que C_s est constante et indépendante du débit liquide. FLEMING (1969) utilise les données

de 250 bassins à travers le monde et aboutit à la relation (1). L'exposant b selon FLEMING varie de 0,72 à 1,02, tandis que a varie de 4 000 à 446 000 pour différents couverts végétaux. LINSLEY *et al.* (1982) estime que des erreurs de l'ordre de $\pm 50\%$ sont escomptées pour la relation de FLEMING. DAWDY (1967) en analysant la relation de puissance, conclut que a est une constante pour n'importe quel canal et b est égal à 1,2. BATTALA *et al.* (1992) à partir de 241 mesures de concentration de sédiments en suspension sur la rivière Arbucies dans le Nord-Est de la péninsule Ibérique trouvent que l'exposant b est égal à 1,63 tandis que la constante a est petite. Le tableau 1 résume les différents résultats trouvés par les auteurs et concernant les paramètres de la relation de puissance débit solide – débit liquide.

Tableau 1 Valeurs caractéristiques des paramètres a et b de la relation de puissance débit solide - débit liquide données par différents auteurs.

Table 1 Characteristic values of the parameters of the sediment rating curve given by various authors.

équation	a	b	Source
$Q_s = Q C_s$	4000 à 4446000	2 à 3	LEOPOLD <i>et al.</i> (1953)
		0,72 à 1,02	FLEMING (1969)
		1,2	DAWDY (1967)
$C = a Q^{b-1}$	0,0004	1,63	BATTALA <i>et al.</i> (1992)
		2 à 3	(VANONI, 1977)

Le transport solide en suspension dans les cours d'eau en Algérie est très élevé. Il est mal connu et mal quantifié en raison du manque de données et particulièrement celles relatives à la concentration des sédiments en suspension. Les erreurs et l'imprécision de ces mesures sont aussi des contraintes rencontrées lors des études des bilans sédimentaires ou d'analyse de la relation débit solide - débit liquide. La présente étude a pour objectif de mieux connaître cette relation. Une approche à différentes échelles temporelles fournira des informations très utiles pour l'estimation des apports solides. Ce travail servira aussi à décrire la dynamique sédimentaire en période de crues, propre au bassin considéré.

2 – BASSIN D'ÉTUDE

Le bassin versant de Oued Wahrane s'étend sur 270,15 km² et est situé dans la partie nord du grand bassin du Cheliff (figure 1). L'Oued Wahrane est un petit affluent de l'Oued Cheliff. Ce bassin (figure 2) est contrôlé par trois postes pluviométriques et une station hydrométrique. Le bassin de l'Oued Wahrane est limité à l'est par le bassin de l'Oued Fodda, à l'ouest par le bassin Oued Ras, au nord par le bassin de l'Oued Allala, au sud par le bassin de l'Oued Sly. Il s'étend entre les longitudes 1° et 1°3' E et entre les latitudes 36° et 36°24' N.

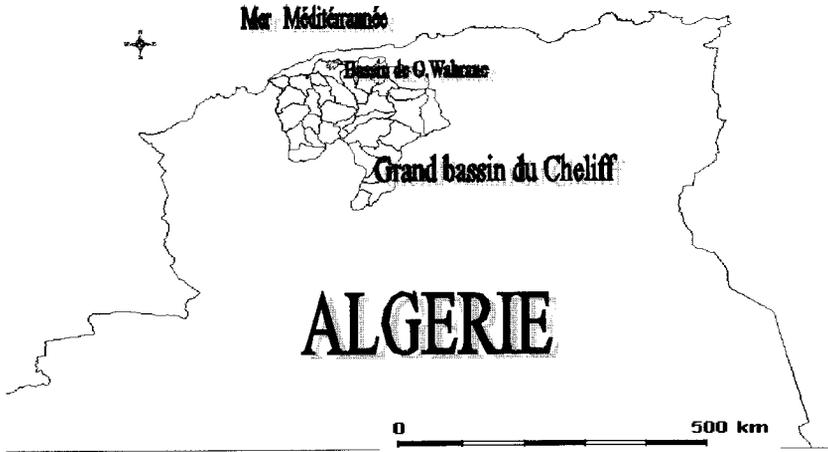


Figure 1 Carte de situation du bassin d'étude.
The Wahrane river basin.

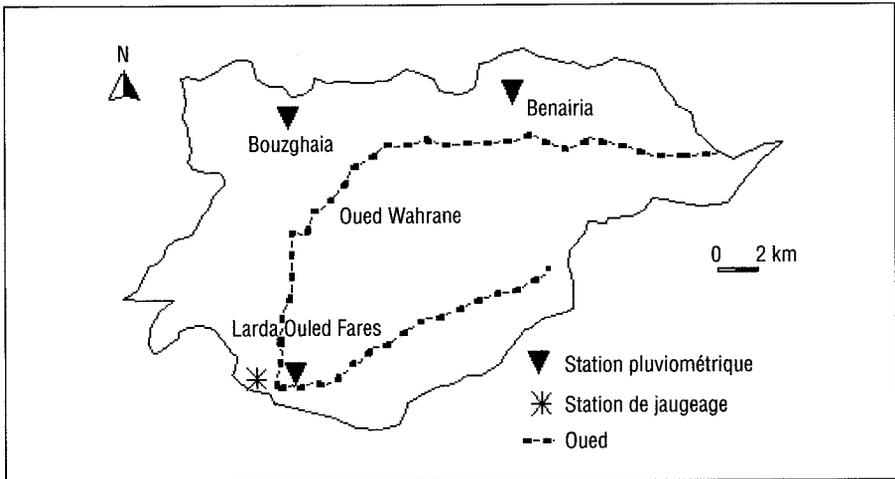


Figure 2 Carte du bassin versant de Oued Wahrane.
Hydrographical map of the Wahrane catchment area.

Le bassin versant de Oued Wahrane est influencé par le climat méditerranéen avec une moyenne pluviométrique de 389 mm. La répartition spatiale des précipitations indique deux tranches pluviométriques opposant deux secteurs différents :

- le secteur de Ouled Farès recevant moins de 400 mm de pluie qui se situe au dessous de 200 m. Il occupe près de 40 % de l'étendue du bassin.
- le secteur de Benairia situé à plus de 350 m. La moyenne pluviométrique annuelle varie entre 280 et 740 mm. Ce secteur occupe environ 60 % de l'étendue du bassin.

La température moyenne annuelle est de 18 °C. Le débit moyen annuel est de l'ordre de 0.39 m³/s.

Le bassin versant de Oued Wahrane est caractérisé par un substratum marneux imperméable couvrant 80 % de la surface du bassin. Ces formations lithologiques tendres localisées au Nord du bassin sont continuellement soumises à une forte érosion mécanique, contrairement aux formations situées dans la partie Sud du bassin, constituées de conglomérat et sable rouge et caractérisées par une perméabilité moyenne.

Du point de vue occupation du sol, la principale activité agricole est la polyculture et la céréaliculture dans le bassin versant de Oued Wahrane.

3 – DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE

L'étude est réalisée à partir des données collectées durant la période 1972 à 1989, constituées des débits moyens journaliers et des concentrations des sédiments en suspension. L'analyse sommaire de ces données montrent une variation d'année en année et de saison en saison en volume et en quantité de sédiments charriés.

La méthode d'échantillonnage systématique du transport solide sur la plupart des cours d'eau Algériens est l'échantillonnage uni ponctuel. Un échantillon est prélevé par l'observateur en un point de la section mouillée au niveau de la station hydrométrique. L'analyse de laboratoire des échantillons prélevés est effectuée selon les procédés classiques à savoir filtrage, séchage à l'étuve et pesée. L'évaluation du transport solide durant une crue est effectuée de la même façon que pour les débits liquides, sur la base d'un dépouillement des enregistrements.

Concernant les débits liquides, les lectures de hauteur d'eau effectuées sont transformées en débits liquides grâce aux barèmes d'étalonnage établis par les services de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques d'Alger de 1972 à 1989.

Le nombre des prélèvements, leur échelonnement correct dans le temps conditionnent la fiabilité et la précision de la relation de puissance débit solide – débit liquide.

Pour déterminer la variation des paramètres *a* et *b* de la relation de puissance, une approche à différentes échelles temporelles, basée sur les modèles de régression, est adoptée, en tenant compte des données hydro-pluviométriques du bassin de l'Oued Wahrane.

4 – RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

L'analyse de la relation de puissance à l'échelle du bassin versant de l'oued Wahrane laisse apparaître une certaine tendance d'évolution des paramètres a et b . Le comportement de ces derniers est étudié à plusieurs échelles temporelles.

4.1 Échelle annuelle

Selon le critère relatif à l'hydraulicité, paramètre utilisé particulièrement dans les études de régularisation et qui est défini comme étant le rapport du débit moyen annuel de l'année considérée sur le débit moyen inter annuel, dix modèles de puissance représentatifs de la période 72/89 ont été obtenus comme suit :

Tableau 2 Relation débit solide - débit liquide à l'échelle annuelle.

Table 2 Main characteristics of the events used on an annual scale.

N	Année	Pluie en mm	$Q_s = a Q^b$	Hydraulicité (Ki)	R
221	72/73	359,60	1,92 $Q^{1.67}$	2,43	0,96
306	73/74	548,40	1,46 $Q^{1.34}$	2,79	0,89
303	75/76	460,20	1,65 $Q^{1.32}$	2,26	0,85
270	76/77*	468,00	3,89 $Q^{1.56}$	0,45	0,67
242	77/78*	348,10	4,79 $Q^{1.60}$	0,18	0,80
225	78/79	549,60	1,80 $Q^{1.38}$	3,15	0,86
161	82/83	357,10	2,29 $Q^{1.95}$	1,16	0,87
221	83/84*	304,40	6,43 $Q^{1.75}$	0,39	0,77
242	84/85*	345,60	3,09 $Q^{1.77}$	0,16	0,86
234	86/87	423,10	2,75 $Q^{1.51}$	2,05	0,88

* année sèche.

N : nombre de données.

R : coefficient de corrélation.

Le graphe de la figure 3 a été réalisé dans le but de connaître la variation de a par rapport à b . On constate que l'exposant b varie entre 1,32 et 1,95 alors que a varie entre 1,46 et 6,43.

Les relations obtenues montrent que pour les années sèches, la valeur de a est élevée, b varie très peu. Pour les années à écoulement abondant, lorsque l'hydraulicité croît, a diminue de manière très nette et b varie très peu. Le bassin est bien drainé particulièrement pendant les années 72/73, 73/74, 74/75, 78/79 et 86/87. Le facteur b étant lié directement à la superficie de drainage en période de crues, on observe aussi une faible variation de cet exposant ($C_v = 0,12$). De même, le paramètre a explique l'état du sol d'un bassin d'une manière générale et son degré de saturation en particulier, notion très influente sur l'écoulement. Sa variation au cours des années sèches est très marquée. Ce paramètre est bien lié à l'indice K_f avec un $R > 0,85$ (figure 4). En décompo-

sant la période d'analyse, la relation est très forte entre a et Ki pour les années sèches (figure 5). Par contre, elle l'est moins pour les années humides (figure 6) avec un coefficient R = 0,60. Les figures 5 et 6 montrent qu'effectivement le facteur a, désignant l'érodabilité, est bien corrélé à l'hydraulicité en période de sécheresse. Les figures 7 et 8 montrent, quant à elles, que l'exposant b est corrélé à Ki uniquement en période humide.

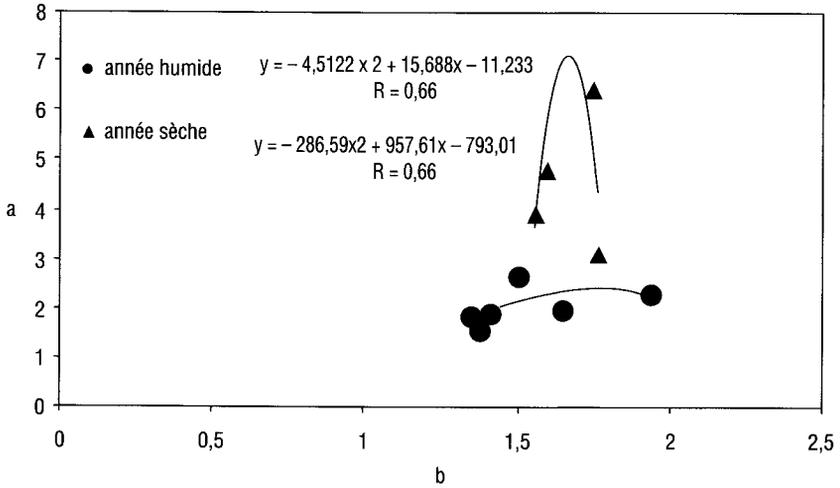


Figure 3 Relation annuelle entre le paramètre a et l'exposant b.
Annual relation between parameter a and exponent b.

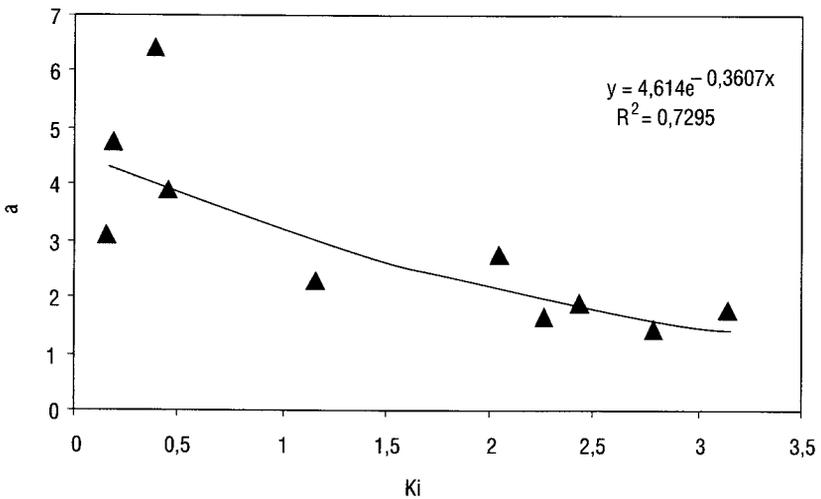


Figure 4 Variation de (a) en fonction de l'Hydraulicité Ki.
Variation of a as function of hydraulicity Ki.

Les années ayant un indice d'hydraulicité inférieur à l'unité montrent une évolution particulière de a et b . On remarque que lorsque K_i augmente, les valeurs de a évoluent dans le même sens, tandis que celles de b évoluent dans le sens contraire.

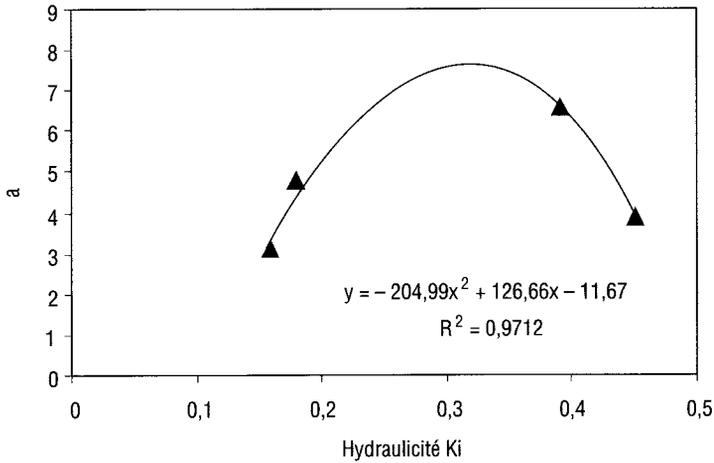


Figure 5 Variation de a en fonction de l'Hydraulicité K_i (années sèches).
Variation of a as function of Hydraulicity, K_i , for dry conditions.

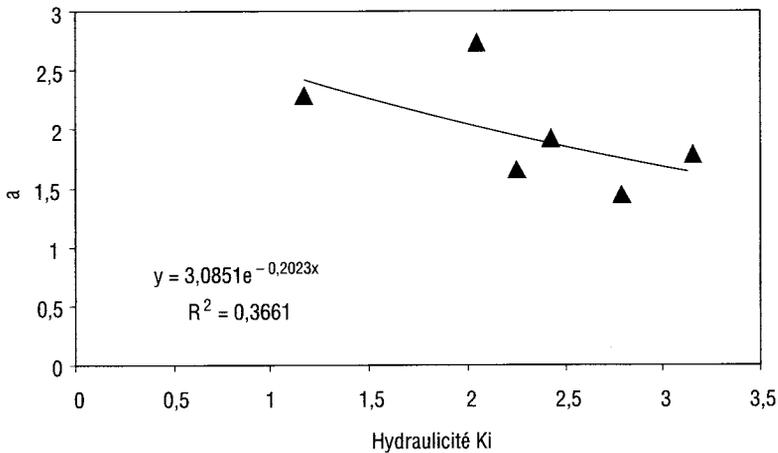


Figure 6 Variation de a en fonction de l'Hydraulicité K_i (années humides).
Variation of a as function of hydraulicity, K_i , for wet conditions.

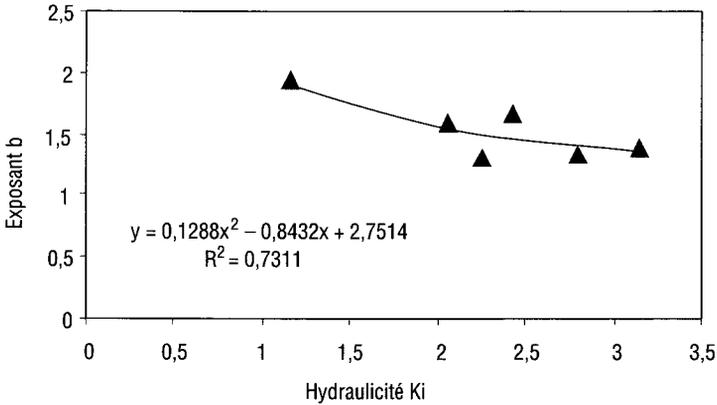


Figure 7 Variation de l'exposant (b) en fonction de l'Hydraulicité Ki (années humides).

Variation of exponent b as function of hydraulicity, Ki, for wet conditions.

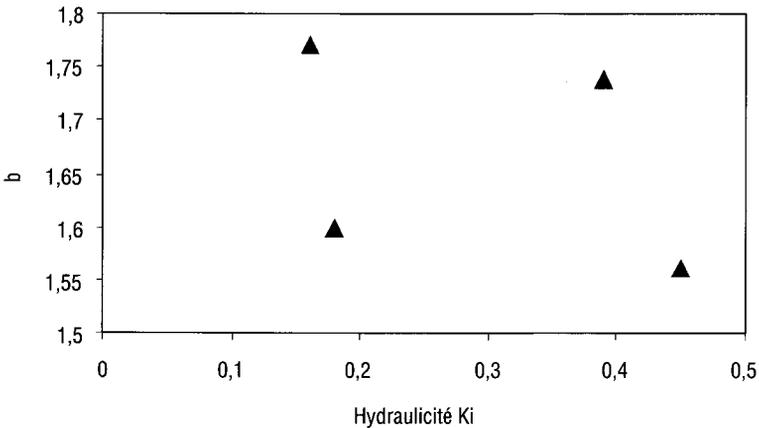


Figure 8 Variation de l'exposant (b) en fonction de l'Hydraulicité Ki (années sèches).

Variation of exponent b as function of hydraulicity, Ki, for dry conditions.

La relation entre a et la pluie moyenne annuelle (figure 9) n'est pas significative ($R = 0,67$ pour une parabole du second degré). À cette échelle, l'indice d'érodabilité ne permet pas d'appréhender les variations de la pluviométrie. Le minimum de l'hyperbole laisse supposer qu'à partir de ce seuil, l'évolution de a s'oppose à celle de la première phase. Mais en ajustant encore mieux les points, les résultats (figure 9) montrent que a varie inversement avec la pluie, jusqu'au seuil de 450 mm, ensuite il y a opposition dans l'évolution des deux paramètres. On observe que a est grand pour une pluie inférieure à la moyenne

et qu'il est petit pour une pluie s'éloignant fortement de cette moyenne. Il est à remarquer que dans ce cas, le paramètre a varie inversement avec la pluie moyenne annuelle. Un cas particulier est à remarquer dans cette analyse, celui de l'année 76/77, considérée comme année à faible hydraulicité, alors qu'on enregistre un total pluviométrique de 468 mm. Ce dernier se concentre surtout en octobre, décembre et janvier (60,7 %), mais aussi en mai avec un total de 62 mm. Cependant l'application de la notion d'hydraulicité lui confère le caractère d'année sèche. La lame moyenne écoulée annuelle est de l'ordre de 20,89 mm. Les données relatives à ce dernier paramètre ont été mis en relation avec a (figure 10). L'amélioration de la relation n'a pas été sensible ($R = 0,69$), mais l'allure de la variation est meilleure. Cela est dû au fait que le ruissellement est le facteur inductif du débit solide, tandis que la hauteur de la pluie est un bon estimateur du débit solide. Le graphe de la figure 10 montre deux zones distinctes, l'une pour la période sèche et l'autre pour la période humide. Si pour le premier intervalle de la lame écoulée (7-20 mm), la variation de a en fonction de la lame écoulée est nette, au-delà de 20 mm le paramètre a n'évoque guère. Ce constat marque bien les années à forte hydraulicité. Le résultat trouvé ici confirme d'une autre manière celui montré en figures 4, 5 et 6.

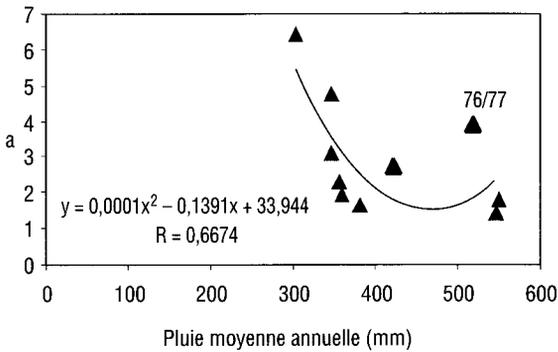


Figure 9 Relation entre a et la pluie moyenne annuelle.
Relation between a and mean annual rainfall.

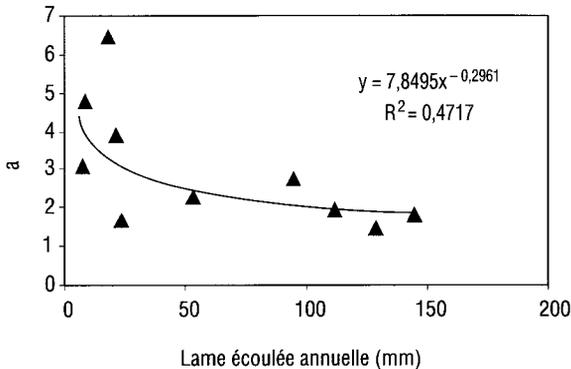


Figure 10 Relation entre a et la lame écoulée annuelle.
Relation between a and annual runoff.

4.2 Échelle saisonnière

Les modèles obtenus pour l'échelle saisonnière sont regroupés au tableau 3.

Tableau 3 Relations débit solide - débit liquide à l'échelle saisonnière.

Table 3 Main characteristics of the events used on a seasonal scale.

N	Saison	$Q_s = a Q^b$	R
1020	Septembre - Octobre - Novembre	2,89 $Q^{1,52}$	0,79
1344	Décembre - Janvier - Février	2,96 $Q^{1,53}$	0,81
1169	Mars - Avril - Mai	1,94 $Q^{1,43}$	0,81
462	Juin - Juillet - Août	0,45 $Q^{1,22}$	0,85

Le tableau 3 révèle un effet saisonnier très distinct. Le transport solide en suspension s'affaiblit considérablement en été, où on observe parfois une absence totale de transport solide due simplement à l'absence d'écoulement. Avec les premiers orages de l'automne, la concentration en suspension augmente brusquement, puis chute en hiver et reprend en Mars. Cette variation est liée essentiellement aux premiers lessivages des pluies d'automne, après une longue saison chaude où les matériaux fins sont déjà préparés sur place au transport. On observe la même tendance d'évolution des paramètres a et b . La production des sédiments est très forte en automne et en hiver où le transport solide approche le modèle $Q_s = 3 Q^{1,5}$. Ce modèle se confirme davantage par l'allure de la relation entre a et b (figure 11).

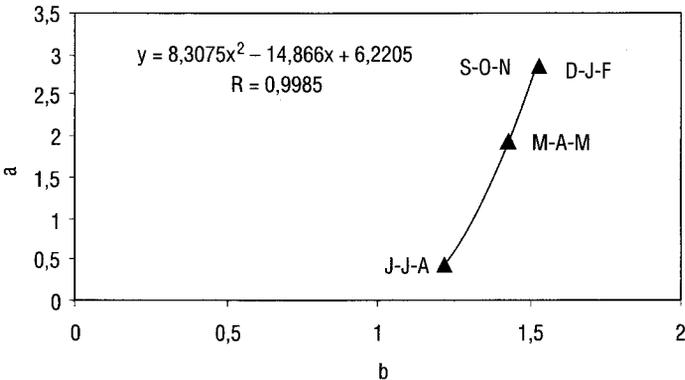


Figure 11 Relation saisonnière entre le paramètre (a) et l'exposant b .
Seasonal relation between parameter a and exponent b .

La relation graphique entre le paramètre a et l'exposant b illustrée dans la figure 11 montre que cette échelle d'analyse est très représentative du phénomène de transport solide dans un bassin semi aride.

La pluie saisonnière explique fortement les variations de a (figure 12), tandis que l'exposant b est bien relié au débit liquide maximum (figure 13). À elle seule, la pluie tombée durant la saison d'hiver représenterait environ 42 % du total annuel. Le volume d'apport solide de la saison d'hiver est le plus élevé. La pluie ayant contribué à cet apport représente 14 % de la pluie totale tombée sur la période considérée. En automne et au printemps, l'intensité de la pluie explique mieux l'activité hydro sédimentologique du bassin de Oued Wahrane. À titre d'exemple, le 05/02/76 les 104 mm de pluie tombés avec une intensité maximale de 50 mm/h ont mobilisé 5 182,30 tonnes/km², tandis qu'en automne l'intensité de 34 mm/h de l'averse du 20/09/79, n'aurait mobilisé que 472,3 tonnes/km². Pour le cas de la pluie de février on notera ici, l'effet combiné à la fois de la hauteur de pluie et de son intensité sur l'apport de sédiments.

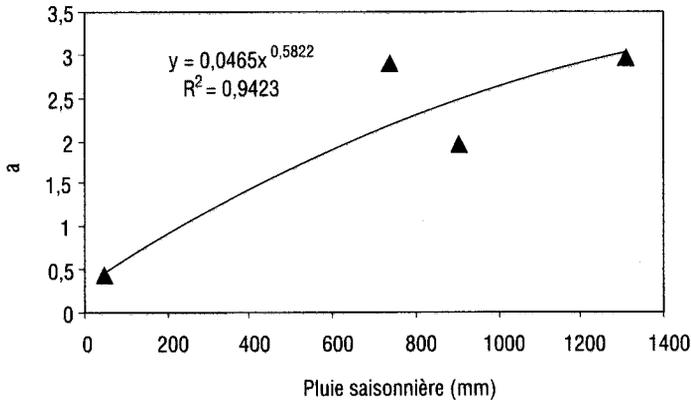


Figure 12 Relation entre a et la pluie saisonnière.
Relation between a and seasonal rainfall.

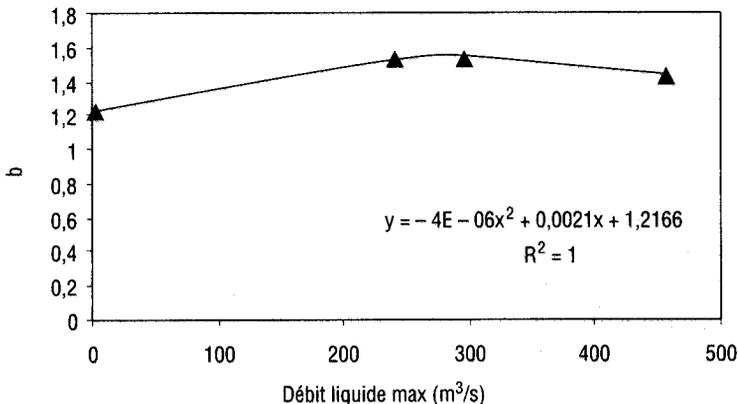


Figure 13 Variation de b en fonction du débit liquide max.
Variation of exponent b as function of annual peak discharge.

4.3 Échelle mensuelle

L'analyse effectuée à l'échelle mensuelle fait ressortir pratiquement les mêmes conclusions qu'à l'échelle saisonnière (tableau 4).

Tableau 4 Relations débit solide - débit liquide à l'échelle mensuelle.

Table 4 Main characteristics of the events used on a monthly scale.

N	Mois	$Q_s = a Q^b$	R
304	Septembre	$0,99 Q^{1,8}$	0,79
334	Octobre	$3,46 Q^{1,53}$	0,76
375	Novembre	$3,04 Q^{1,44}$	0,81
445	Décembre	$3,50 Q^{1,5}$	0,80
509	Janvier	$3,63 Q^{1,65}$	0,77
390	Février	$2,68 Q^{1,58}$	0,86
466	Mars	$1,67 Q^{1,21}$	0,71
383	Avril	$1,74 Q^{1,45}$	0,86
320	Mai	$1,66 Q^{1,45}$	0,81
227	Juin	$0,57 Q^{1,22}$	0,85
199	Juillet	$0,67 Q^{1,27}$	0,75
36	Août	$0,34 Q^{1,13}$	0,77

Les faibles valeurs de a et b concernent les mois d'été. Le même ordre de grandeur de a et b est respecté pour l'ensemble des mois. La valeur moyenne de a est de 2,00 avec un $C_v = 0,61$, conservant ainsi le même ordre de variation des échelles temporelles précédentes. Par contre, pour l'exposant b , son coefficient de variation est plus faible ($C_v = 0,14$). Le résultat à l'échelle de la saison est retrouvé sur la figure 14 où l'on constate une variation nette mais faible de a et b des mois de juin, juillet et août. La variation de a est plus importante en hiver et en automne que celle de b , en raison de l'activité hydro sédimentologique durant cette période et précisément de la nature et de l'état de surface du sol.

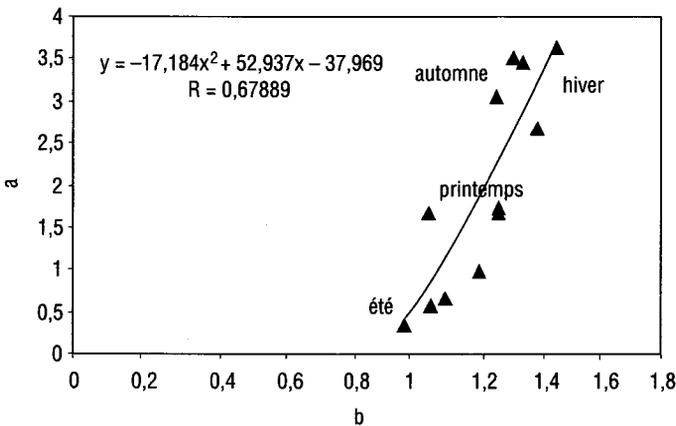


Figure 14 Relation mensuelle entre (a) et l'exposant b .

Monthly relation between parameter a and exponent b .

D'autre part, la relation entre le paramètre a et la pluie moyenne mensuelle est très bonne (figure 15). Alors que celle définissant la variation de b à partir du débit liquide mensuel maximal est moins évidente (figure 16).

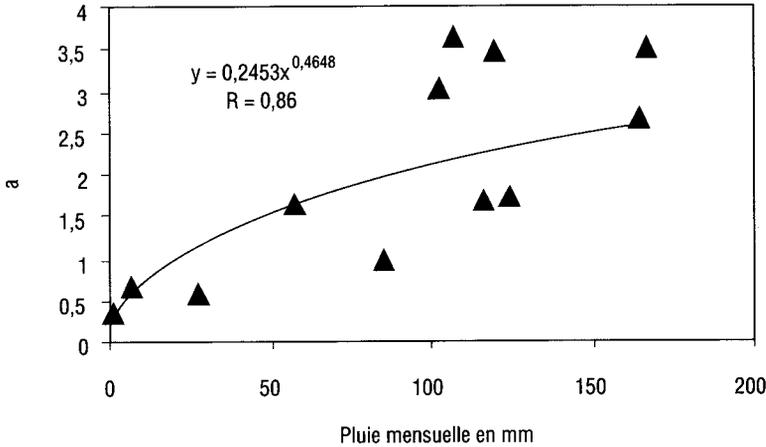


Figure 15 Relation entre a et la pluie moyenne mensuelle.
Relation between a and mean monthly rainfall.

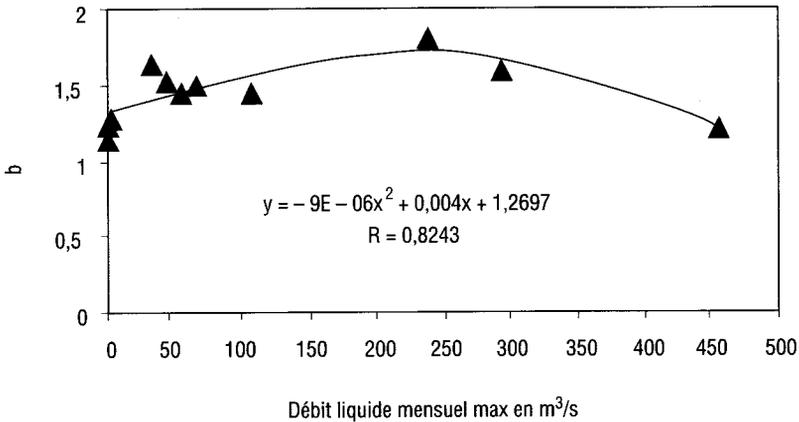


Figure 16 Variation de b en fonction du débit liquide mensuel max.
Variation of exponent b as function of monthly peak discharge.

Les particules arrachées au sol par splash ou par ruissellement sont transportées sur des distances plus ou moins longues. Les pentes des versants et le type de couvert végétal ont chacun un rôle important lié à la pluie et au ruissellement. En cherchant à intégrer le rôle du relief quant à l'érodabilité des sols du bassin versant de l'Oued Wahrane, il paraît difficile de commenter l'aptitude au ruissellement des sols, car les pentes varient en même temps que les types de

sol. Sur la base de ces considérations, nous avons établi une relation entre le paramètre a et le débit spécifique (ou rapport débit liquide moyen / superficie du bassin). La figure 17 montre qu'il existe une relation assez bonne entre les deux paramètres.

En considérant que b dépend dans une large mesure des conditions d'écoulement et du drainage du bassin en termes hydrologiques, la relation liant b au débit spécifique mensuel n'est pas bien évidente bien qu'un regroupement saisonnier est apparent sur le graphe (figure 18).

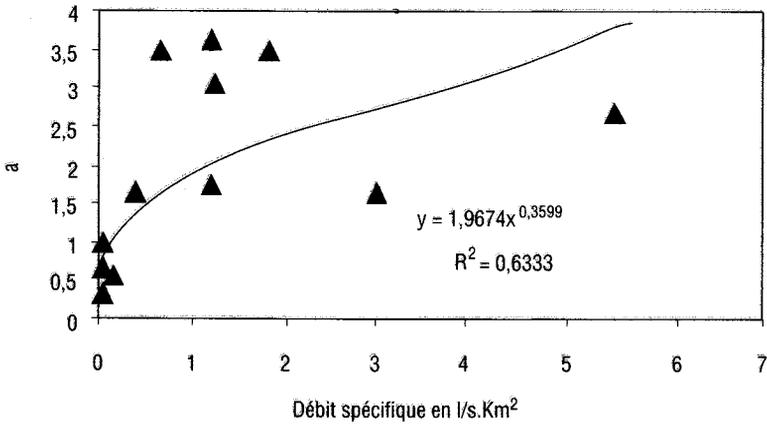


Figure 17 Relation entre (a) et le débit spécifique.
Relation between a and specific discharge.

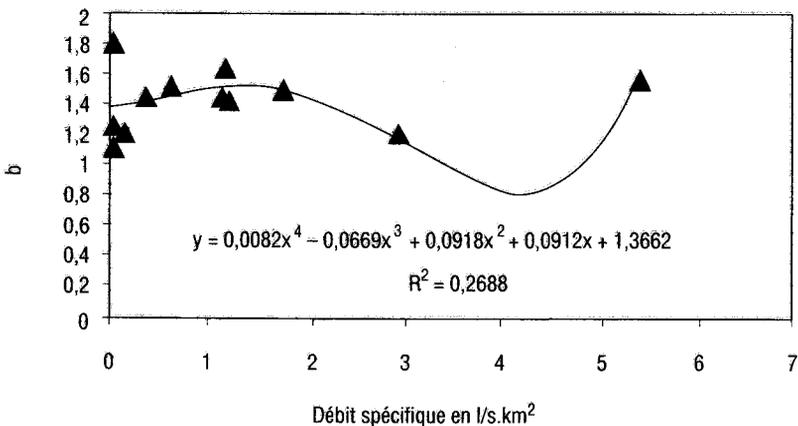


Figure 18 Relation entre l'exposant b et le débit spécifique.
Relation between b and specific discharge.

4.4 Échelle des Crues

L'averse est l'unité temporelle la plus adéquate pour les analyses hydrologiques en relation avec le transport solide (GUY, 1964). L'analyse de quelques crues survenues durant la période considérée apporte des différences assez concluantes. Si pour les échelles temporelles précédentes la limite de variation de a et b était plutôt faible, on constate qu'elle est plus étendue à l'échelle des crues (tableau 5). Les coefficients de variation de a et b sont respectivement de 0,86 et 0,23. Les crues d'avril 74, de mars 75, de novembre 75, de février 76, d'octobre et de décembre 86 marquent une évolution inverse des paramètres a et b .

Tableau 5 Relations débit solide - débit liquide des crues considérées.

Table 5 Main characteristics of the flood events.

N	Date	Équation $Q_s = a Q^b$	R
11	15 avril 74	$Q_s = 2,11 Q^{2,01}$	0,9758
08	18 octobre 74	$Q_s = 49,58 Q^{1,43}$	0,9877
10	05 mars 75	$Q_s = 6,56 Q^{1,5}$	0,9708
22	02 novembre 75	$Q_s = 23,11 Q^{1,2}$	0,9767
12	02 février 76	$Q_s = 0,60 Q^{2,61}$	0,9255
13	01 mai 76	$Q_s = 13,08 Q^{1,91}$	0,9591
10	19 octobre 78	$Q_s = 11,73 Q^{1,56}$	0,9684
09	22 novembre 83	$Q_s = 27,84 Q^{1,40}$	0,9790
17	13 octobre 86	$Q_s = 40,65 Q^{1,45}$	0,9759
18	10 décembre 86	$Q_s = 9,4 Q^{1,68}$	0,9908
21	23 décembre 86	$Q_s = 12,06 Q^{1,41}$	0,9831
08	19 mars 89	$Q_s = 15,94 Q^{1,41}$	0,9981

Pour l'ensemble des valeurs de a et de b , il y a une tendance inverse d'évolution des deux paramètres (figure 19). Les crues donneraient beaucoup plus de détails sur le comportement de a et b ainsi que sur leur signification.

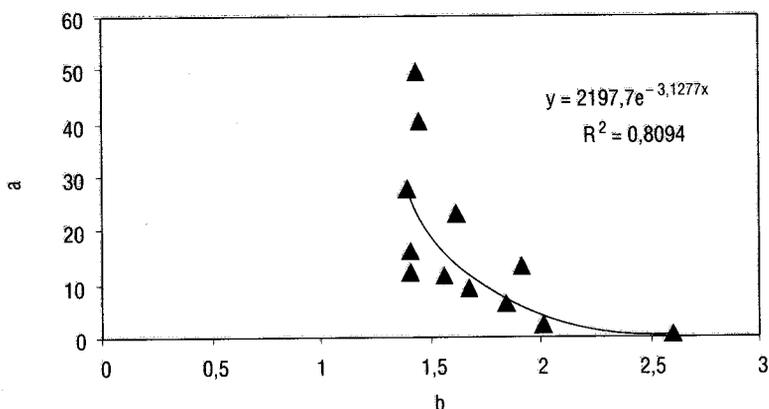


Figure 19 Relation entre (a) et l'exposant b .

Relation between parameter a and exponent b .

Ainsi, à la valeur la plus forte de b , correspond la valeur la plus petite de a ($b = 2,61$ et $a = 0,6$). Les fortes valeurs de b caractériseraient en particulier les crues associées à la saison d'automne (septembre-octobre-novembre). Durant cette saison, on enregistre aussi les plus forts débits liquides pour la période concernée par l'analyse. L'évolution de a et b pour le mois d'octobre est très nette. La saison d'hiver est marquée par de faibles valeurs de a . La saison de printemps est marquée par une même tendance d'évolution en général.

Un transport solide nécessite une source d'énergie. De nombreux auteurs ont montré le rôle de la pluie dans le processus d'érosion des sols. (HENENSAL, 1986 ; KEITH *et al.* 1980 ; WISCHMEIER *et al.* 1978). L'énergie des gouttes précipitées désagrège les fines particules du sol qui peuvent ensuite être entraînées par le ruissellement en fonction de sa capacité de transport.

Le facteur a étant lié indirectement à l'état du sol, il a été corrélé avec la hauteur de l'averse ainsi qu'à son intensité max (figure 20 et 21).

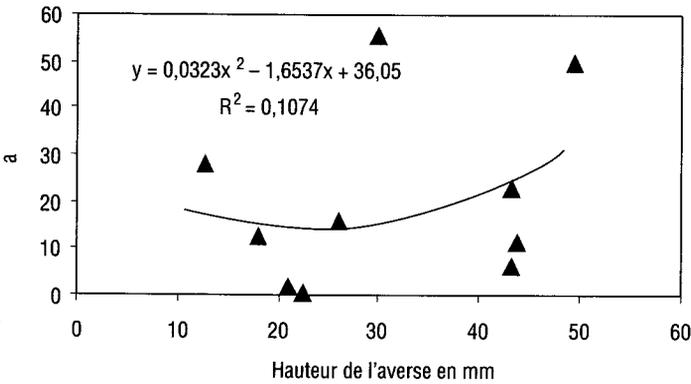


Figure 20 Relation entre (a) et la hauteur de l'averse.
Relation between a and storm height.

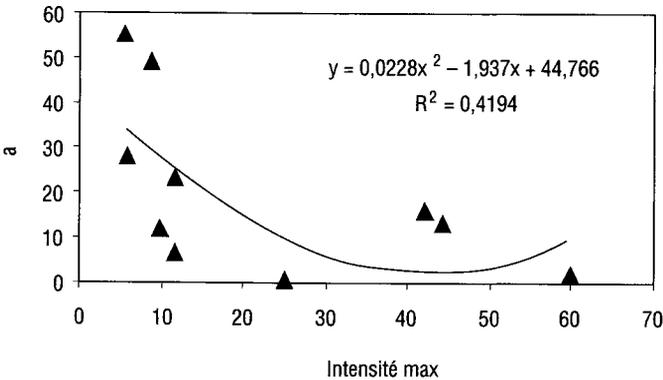


Figure 21 Relation entre (a) et l'intensité max. de l'averse.
Relation between a and storm intensity.

À l'échelle d'un événement averse – crue le paramètre a semble peu lié aux composantes de la pluie. La tendance est une diminution de a lorsque l'intensité maximale augmente. L'effet saisonnier est retrouvé ici. Pour de faibles intensités, le paramètre a est élevé. C'est le cas des mois d'octobre et de novembre. Le mois de février constitue une transition. Les valeurs respectives de $a = 0,6$ et $I_{\max} = 25,2$ mm/h sont des opposées, si on les compare au reste des données. Pour les fortes intensités la valeur de a ne varie pas. Aux mois de mars et de mai, on remarque une reprise de l'évolution de a et I_{\max} dans le même sens.

Les valeurs de a ont aussi été analysées en relation avec un indice pluviométrique antérieur (IPA) de 10 jours (tableau 6). Cette analyse montre que les valeurs de a les plus élevées caractériseraient un IPA faible et une forte érodabilité des sols du bassin, tandis que les faibles valeurs de a signifieraient un état de saturation du sol, soit un IPA fort.

Tableau 6 Valeurs de l'Indice de pluies antécédentes ou IPA des événements considérés.

Table 6 Values of the Antecedent Precipitation Index for the events considered.

Date	IPA(mm)	Paramètre a
15 avril 74	42,0	2,11
18 octobre 74	48,6	49,58
05 mars 75	31,2	6,56
02 novembre 75	2,0	23,11
02 février 76	62,5	0,6
1 ^{er} mai 76	16,9	13,08
22 novembre 83	32,0	27,84
13 octobre 86	6,2	40,65
10 décembre 86	3,8	9,4
23 décembre 86	51,4	12,06
19 mars 89	1,1	15,94

La mise en graphe du tableau 6 illustre la difficulté d'une telle liaison (figure 22). Particulièrement durant l'automne, et quel que soit la grandeur IPA, la valeur de a est élevée. Cela implique sans aucun doute une forte production de sédiments.

Le paramètre a a été relié au débit liquide maximal (figure 23). L'évolution des deux paramètres s'effectue en deux phases différenciées par le minimum de l'hyperbole ($a = 0,6$ et $Q = 56,35$ m³/s). Le facteur a diminue inversement au débit liquide max jusqu'au seuil de 60 m³/s pour ensuite évoluer dans le même sens et de manière presque linéaire. L'allure de la courbe ainsi que le coefficient de corrélation ($R = 0,64$) permettent de conclure que la relation n'est pas directe. Concernant l'exposant b , celui-ci est marqué par trois ordres de variation observées pour l'ensemble des données de crues analysées (figure 24). Pour la gamme des débits élevés (108 ; 137 ; 200) ainsi que pour les plus petits débits (23,2 ; 32,7) l'exposant b n'évolue guère et il est pris respectivement égal à 1,47 et 1,41. Entre les deux gammes b évolue inversement au débit max.

On obtient sur ce même intervalle les plus fortes valeurs de b , la valeur moyenne étant d'environ 2. Par ailleurs, en considérant que l'exposant b est la pente de la courbe sur échelle log-log, il apparaît visiblement que la crue du 2 février 1976 est l'unique événement qui montre une variation de Q_s et de Q assez proportionnelle. La pente de la droite d'ajustement de la variable transformée est de 0,41.

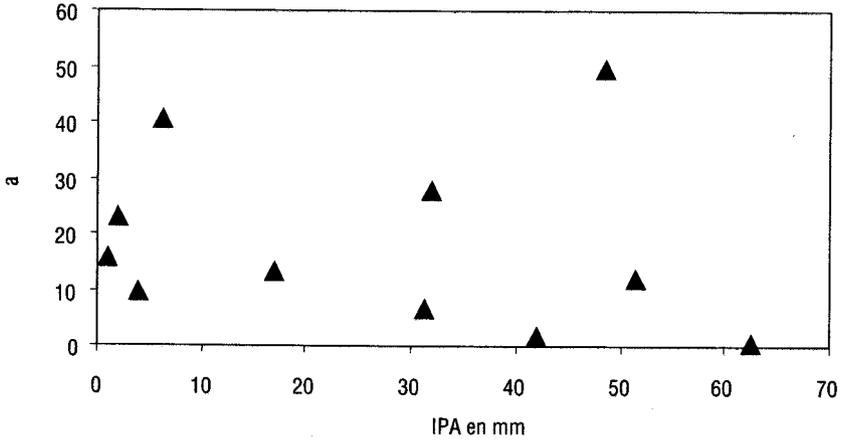


Figure 22 Variation de (a) en fonction de l'indice pluviométrique antérieur de 10 jours.
Variation of parameter a as a function of the 10 day antecedent precipitation index.

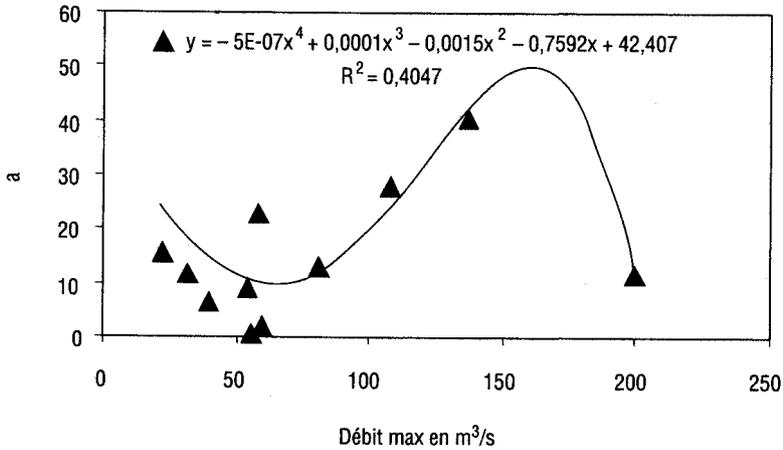


Figure 23 Variation du paramètre (a) en fonction du débit max. de la crue.
Variation of parameter a as a function of peak discharge.

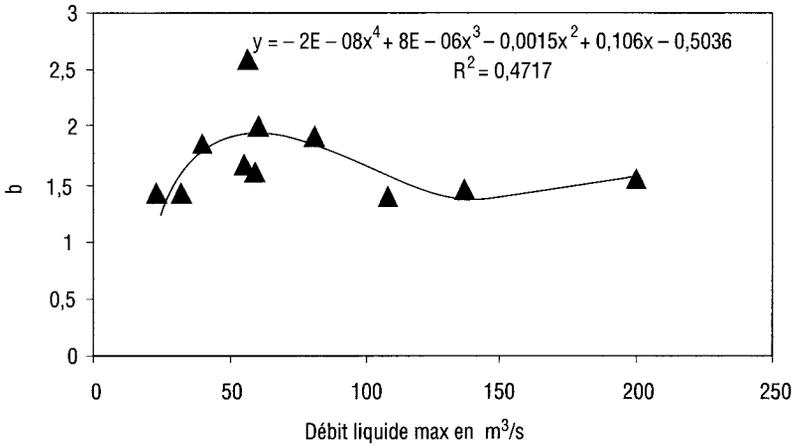


Figure 24 Variation de l'exposant b en fonction du débit max. de la crue.
Variation of exponent b as a function of peak discharge.

L'analyse à l'échelle de la crue a été étendue à la décomposition de l'hydrogramme selon les phases de montée et de décrue. Les résultats sont détaillés dans le tableau 7.

Tableau 7 Valeurs caractéristiques des paramètres de la relation de puissance lors de la montée et de la décrue.

Table 7 *Characteristic values of the parameters of the power relation for the rising and falling limbs of the flood hydrogram.*

Paramètres de l'équation $Q_s = a Q^b$	Montée			décrue		
	a	b	R	a	b	R
40,65Q ^{1,4524}	25,596	14367	0,9640	47,631	1,5031	0,9919
15,94Q ^{1,4184}	14,779	1,4225	0,9995	18,685	1,4399	0,9961
0,6Q ^{2,61}	1,8146	2,3194	0,83	0,425	2,6417	0,9849
8,70Q ^{1,6751}	13,59	1,5407	0,9837	7,184	1,7279	0,9988
11,96Q ^{1,9341}	6,6798	2,0674	0,9810	18,851	1,8273	0,9517
23,11Q ^{1,6208}	16,755	1,7175	0,9817	31,57	1,5086	0,9704
2,11Q ^{2,0148}	3,6354	1,9663	0,9826	1,3541	2,055	0,9918
6,56Q ^{1,8491}	8,8076	1,8434	0,9739	5,3392	1,8604	0,9815
49,58Q ^{1,4353}	44,84	1,4424	0,8803	66,231	1,453	0,9974
11,73Q ^{1,563}	3,376	1,5211	1,0	17,314	1,5351	0,9803
27,87Q ^{1,4054}	12,344	1,109	0,9907	33,682	1,3909	0,9843
12,06Q ^{1,412}	18,682	1,2715	0,9822	7,1516	1,6196	0,9879

Les crues des mois d'octobre et de mars apportent des réponses quant au comportement des paramètres a et b . Les mois de décembre et février sont caractérisés par des valeurs de a en décrue plus faibles qu'en montée et des valeurs de b plus fortes en décrue. Nous résumons ces observations dans les tableaux 8 et 9.

Tableau 8 Caractéristiques des crues d'octobre.

Table 8 *Characteristics of floods occurring in october.*

a montée	a décrue	Concentration maximale (g/l)	Position du maximum de C	Temps de montée (heures)	a décrue / a montée
3,376	17,314	249,9	Avant le max de Q	9,5	5,128
25,506	47,631	418,31	Avant le max de Q	6,5	1,867
44,840	66,231	364,62	Position simultanée	4	1,477

Sur l'ensemble des données les valeurs de a pour le mois d'octobre sont les plus élevées, inversement à celles de b qui sont assez faibles et stables. Le rapport de variation en décrue par rapport à la montée est également élevé. Pour les deux premières crues, on enregistre la production de la concentration maximale avant celle du débit liquide maximal. Ce décalage signifierait que a serait indépendant du débit liquide maximal, résultat confortant les analyses précédentes.

Tableau 9 Caractéristiques des crues de mars.

Table 9 *Characteristics of the flood that occurred in march.*

a montée	a décrue	Concentration maximale (g/l)	Position du maximum de C	Temps de montée (heures)	a décrue / a montée
14,779	18,68	65,52	Avant le max de Q	25	1,26
8,8076	5,3392	115,21	Avant le max de Q	16	1,65

Le mois de mars est caractérisé par des valeurs de a en décrue plus faibles qu'en montée et des valeurs de b plus fortes en décrue. La variation de a en mars n'est pas forte, de plus les concentrations sont inférieures à celles d'octobre. Le temps de montée dépasse le temps de concentration du bassin qui est de 10 heures environ.

5 – CONCLUSIONS

L'étude à différentes échelles temporelles, de la relation de puissance a permis d'appréhender la complexité d'approche du transport solide et d'analyser le comportement des paramètres de l'équation. Il a été possible de définir

une relation très forte entre a et l'hydraulicité pour les années sèches. L'analyse à l'échelle saisonnière de la relation puissance débit solide – débit liquide est très représentative du contexte semi – aride du bassin étudié. En effet, le transport solide s'affaiblit en été et avec les premiers orages de l'automne, la concentration des sédiments en suspension reprend, se stabilise en hiver et chute au printemps. L'exposant b est bien relié au caractère de l'écoulement, tandis que a est considéré comme paramètre représentatif de l'état du sol, constant pour un même bassin et une même saison. L'analyse à l'échelle mensuelle fait ressortir pratiquement les mêmes conclusions qu'à l'échelle saisonnière. En particulier, la relation paramètre a – pluie moyenne mensuelle est très bonne. À l'échelle de l'événement averse-crue, le modèle varie d'une crue à une autre. De plus le comportement de a et b est plus détaillé. Ainsi, les faibles valeurs de a signifieraient un état de saturation du sol, alors que les fortes valeurs de b caractériseraient l'écoulement durant la saison d'automne.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BATTALA R., SALA M., 1992. Temporal variability of suspended sediment in a Mediterranean river. International conference Canberra, Australia, *IAHS Publications* 224, 229-305.
- BOGARDI J.L., 1974. Sediment transport in alluvial streams. *International courses in Hydrology*. Budapest, *Academiai Kiado Press*, 812 p.
- CAMPBELL F.B., BAUDER H. A., 1940. A rating-curve method for determining silt-discharge of streams, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, 21, 603-607.
- CRAWFORD C.G., 1991. Estimation of suspended-sediment rating curves and mean suspended-sediment loads, *Journal of Hydrology*, 129, 331-348
- DAWDY R.D., 1967. A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams, *Teknisk Forlag*, Copenhagen, pp, 1-62.
- ETCHANCHU D., PROBST J.L., 1986. Erosion 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, *Comptes Rendus Académie des Sciences*. Paris, vol. 17, 1063-1068.
- FERGUSON R.I., 1986. River loads underestimated by rating curves. *Water Resources Research*, 22(1), 74-76.
- FLEMING G., 1969. Design curves for suspended load estimation. *Proc. Inst. Civ. Eng.*, Vol. 43, 1-9.
- GUY H.P., 1964. An analysis of some storm-period variables affecting stream sediment transport: U.S. Geological Survey, *Professional Paper* 462-E, 46 p.
- HENENSAL P., 1986. L'Érosion externe des sols par l'eau. Approche quantitative et mécanismes. Laboratoire des ponts et chaussées, *Rapport de recherche* n° 138, 76 p.
- KEITH R., COOLEY R., 1980. Erosivity values for individual design storms. *Journal of Irrigation and Drainage*, 106, 135-145.
- LEOPOLD L.B., MADDOCK T.G., 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. Washington D.C U.S. Geological. Survey. *Professional Paper*, 252 p.
- LINSLEY K.R., KOHLER A.M., PAULHUS H.L.J., 1982. Erosion, Sedimentation, and the River Basin. In *Hydrology for engineers*. Mc Graw Hill [Ed], pp, 328-331.
- LINSLEY K.R, FRANZINI J.B., 1992. Sediment transport by streams. In *Water resources engineering*, Mc Graw Hill [Ed], pp, 196-199.
- VANONI V.A., 1977. Erosion rates from sediment sources. In *Engineering sedimen-*

- tation, Manual ASCE, New York, pp 472-480.
- WALLING D.E., WEBB D.W., 1981. The reliability of suspended sediment load data. Erosion and sediment transport measurement, *Proceedings of the Florence Symposium*, Florence, *IAHS Publications* 133, 177-194.
- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. US Department of Agriculture, *Handbook n° 537*, 58 p.
- WOOD P.A., 1977. Sediment transport in the Hope River, Jamaica. A tropical basin drainage characterized by seasonal flow. *Proc. Symposium. IAHS Publications* 122, 149-256.