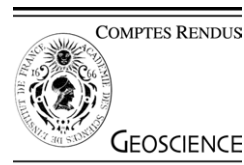




Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 337 (2005) 1131–1139



<http://france.elsevier.com/direct/CRAS2A/>

Geomaterials (Sedimentology)

Estimates of present-day erosion based on sediment transport in rivers: a case study in Taiwan

Fung-Chun Li ^{a,*}, Jacques Angelier ^{b,c}, Rou-Fei Chen ^b, Hui-Ming Hsieh ^d,
Benoît Deffontaines ^e, Ching-Ruey Luo ^f, Tso-Tchang Wu ^f, Ming-Chao Lin ^g

^a Department of Computer aided media design, Chang Jung Christian University, 396, Sec. 1, Chang Jung Rd., Kway Jen, Tainan 711, Taiwan

^b Observatoire océanologique de Villefranche-sur-Mer, université Pierre-et-Marie-Curie, Géosciences Azur, Port de la Darse, BP 48, 06235 Villefranche-sur-Mer cedex, France

^c Institut universitaire de France, 103, bd Saint-Michel, 75005 Paris, France

^d Department of Information Management, Diwan College of Management, No. 87-1, Nanshai Li, Madou Jen, Tainan, Taiwan

^e Laboratoire de géomorphologie, École pratique des hautes études, 15, bd de la Mer, 35800 Dinard, France

^f Department of Nature Sciences Education, National Tainan Teachers College, 33, Sec. 2, Sulin St., Tainan, Taiwan

^g Department of Earth Sciences, National Taiwan Normal University, 162, HoPing E. Road, Sec. 1, Taipei, Taiwan

Received 7 October 2004; accepted after revision 20 April 2005

Available online 27 July 2005

Written on invitation of the Editorial Board

Abstract

We discuss the present-day sediment transport by rivers, and hence the erosion rate in upstream basins, based on the example of Taiwan Rivers where large datasets are available. After data correction, the values of the suspended sediment load in the lower Kaoping River are nearly three times smaller than those from the literature. On the other hand, we add the bed load evaluated from numerical modelling, despite limitations from data and models. Whereas the contribution of the chemical denudation rate in Taiwan is minor, the bed load is significant and must be evaluated. We point out that biases in data collection may favour high values of suspended load data, and that large series of datasets are needed to reduce uncertainties and smooth the time variability effect. **To cite this article:** F.-C. Li et al., *C. R. Geoscience* 337 (2005).

© 2005 Published by Elsevier SAS on behalf of Académie des sciences.

Résumé

Estimation de l'érosion actuelle à partir du transport de sédiments par les rivières : une étude de cas à Taiwan. La mesure du transport des sédiments par les rivières permet la détermination du taux d'érosion dans les bassins en amont. Nous examinons cette approche pour les rivières de Taiwan, pour lesquelles d'abondantes données sont disponibles. Après

* Corresponding author.

E-mail addresses: game@mail.cju.edu.tw (F.-C. Li), jacques.angelier@geoazur.obs-vlfr.fr (J. Angelier), hmsieh@mail.dwu.edu.tw (H.-M. Hsieh).

correction de celles-ci, nous obtenons, pour le cours inférieur de la rivière Kaoping, des valeurs de la charge sédimentaire en suspension presque trois fois moindres que dans les précédentes études. En revanche, nous ajoutons la charge de fond, calculée par modélisation numérique, en dépit des incertitudes. Alors que la contribution de la dissolution au taux d'érosion est mineure à Taiwan, la charge de fond joue un grand rôle et doit être évaluée. Nous soulignons que les biais dans la collecte de données ont pu induire une surestimation de la charge en suspension et que de grandes séries de données sont requises afin de limiter les incertitudes et atténuer les effets des variations temporelles. *Pour citer cet article : F.-C. Li et al., C. R. Geoscience 337 (2005).* © 2005 Published by Elsevier SAS on behalf of Académie des sciences.

Keywords: River; Erosion; Sediment; Suspended load; Bed load; Denudation rate; Hydrological stations; Taiwan

Mots-clés : Rivière ; Érosion ; Sédiment ; Charge en suspension ; Charge de fond ; Taux de dénudation ; Stations hydrologiques ; Taiwan

Version française abrégée

1. Introduction

L'île tropicale de Taiwan (Fig. 1a) correspond pour 32 % à des montagnes de plus de 1000 m et pour 31 % à des collines et plateaux de 100 à 1000 m. Pour la plupart, les montagnes sont faites de roches relativement tendres, notamment des schistes. Il existe 129 rivières, avec des cours généralement brefs et à forte pente, des bassins versants réduits et de grandes différences de débit entre les saisons sèche et humide. De 1958 à 2003, 210 typhons et plus de 1000 tempêtes ont affecté Taiwan [1]. L'influence des pluies sur le débit des rivières est immédiate, les inondations sont fréquentes. La pluviosité annuelle atteint 2500 mm, deux fois et demie la moyenne mondiale [9]. La pluie, les crues et les typhons provoquent une forte érosion en été. De fréquents séismes favorisent les instabilités gravitaires et les glissements de terrain jouent un rôle majeur [2].

Taiwan se prête bien à l'évaluation des taux d'érosion dans un contexte géodynamique dominé par une surrection rapide. Dans son étude du taux de dénudation actuel de la chaîne centrale, Li [6] a lié l'importante valeur minimum obtenue, $1300 \text{ mg cm}^{-2} \text{ an}^{-1}$ (soit $13\,000 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$), à ce soulèvement rapide de Taiwan. Les taux d'érosion de la période 1970–1999 ont récemment été évalués [3]. Dans cette note, nous quantifions le transfert de sédiments par les rivières en combinant les données disponibles sur les teneurs en sédiments et sur les débits, ces dernières étant de loin les plus nombreuses. De telles données proviennent de plus de 150 stations hydrologiques à Taiwan [1,9]. Cette approche réduit les incertitudes dans le calcul de la quantité de sédiments transportés de la montagne à la mer, donc du taux d'érosion. Nous prenons pour

exemple le bassin de la rivière Kaoping, dans le Sud de Taiwan (Fig. 1b).

2. Recueil des données et première analyse

La validité et la précision des données hydrologiques sont primordiales pour la gestion des ressources en eau. Le recueil et l'archivage des données hydrologiques à Taiwan ont débuté en 1936, avec la *Water Conservancy Agency (WCA)* [9]. Le ministère de l'Économie (MOEA) a réalisé de grands travaux pour contrôler les crues. Un annuaire hydrologique de Taiwan est édité pour dispenser l'information sur les débits, les taux de sédiments en suspension et la qualité de l'eau. Dans chaque station hydrologique, le débit a été mesuré quotidiennement. Le taux de sédiment en suspension a été mesuré avec une fréquence moyenne de 30 échantillons par an.

Le transport de sédiments dépend des propriétés de l'écoulement, de la nature du lit et de l'afflux provenant de l'amont. La détermination des conditions critiques entraînant le déplacement des sédiments joue un rôle majeur en ingénierie hydraulique. Une relation simple entre débit et teneur en sédiment a été proposée par Fleming [4], à partir d'une étude de 250 bases de données dans le monde. La teneur en sédiment, ou concentration instantanée de sédiment en suspension, C (en ppm ou mg l^{-1}) est donnée par :

$$C = a Q_w^b \quad (1)$$

où Q_w est le débit (habituellement en $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), a et b étant des constantes empiriques. Connaissant C pour une station, la charge en suspension, ou débit instantané de sédiment en suspension, Q_s (en tonnes/jour), est donnée par :

$$Q_s = k C Q_w \quad (2)$$

où k est un facteur de conversion qui dépend des unités (0,0864 avec le choix ci-dessus). À partir des mesures de C et des équations (1) et (2), on calcule aisément le débit de sédiments en fonction du débit :

$$Q_s^{\text{calc}} = A Q_w^b \quad (3)$$

avec $A = ka$ et $B = b + 1$.

Nous calculons les paramètres a et b , ou A et B , par régression portant sur les valeurs de Q_w et C recueillies simultanément. Par exemple, 199 couples sont disponibles de 1991 à 2001 pour la station LLBA (pont de Lin-Ling) dans la basse vallée de la rivière Kaoping (Fig. 2) : nous obtenons $A = 1,016$ et $B = 1,68$, avec un coefficient de corrélation $R = 0,85$. Ensuite, la loi de puissance de l'équation (3) est appliquée à chaque donnée journalière de débit, Q_w (4018 données pour cette station et cette période), ce qui fournit des valeurs calculées de Q_s^{calc} . Nous aboutissons à une moyenne de 27 339 tonnes de sédiment par jour (environ 107 t par an), pour un débit moyen de $225 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Cette valeur moyenne implique un taux de dénudation minimum de $345 \text{ mg cm}^{-2} \text{ an}^{-1}$ ($3450 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$), la surface du bassin étant 2895 km^2 .

La valeur moyenne de Q_s^{calc} obtenue est environ 20 fois moindre que celle de Q_s , issue des 199 couples de données. Cette différence s'explique par la fréquente absence de mesure de la teneur en sédiment lorsque le débit est faible, favorisant artificiellement les fortes valeurs de C et Q_s lorsque seules les mesures couplées sont utilisées. Le biais technique est d'ailleurs aggravé par la présence et la répétition de valeurs inscrites, mais non mesurées dans les listes, ce qui a exigé un examen critique et une étude statistique poussée au début de notre analyse. La valeur de Q_s issue des couples de données seuls n'est pas fiable.

En 1976, Li [6] a calculé le taux de dénudation physique actuel («PDR») à partir de stations des cours inférieurs des principales rivières de Taiwan. Les valeurs obtenues pour chacune de ces stations permettent de déduire le taux d'érosion pour l'ensemble du bassin versant en amont. Li a utilisé la formule suivante :

$$\text{PDR} = \sum_{i=1}^{365} a Q_i^{b+1} / U \quad (4)$$

où Q_i est le débit en mètres cube par jour i , U la superficie du bassin versant en amont, a et b étant les constantes empiriques de l'équation (1).

Deux difficultés apparaissent, toutes deux induisant une sous-estimation. Premièrement, les grains et galets charriés au fond et près du fond de la rivière sont, par définition, ignorés dans les données de sédiment en suspension, bien que la charge de fond puisse être importante. Cet aspect, en cours d'étude, est effleuré dans le Section 3. Deuxièmement, on peut mettre en doute la validité des équations (1)–(3), notamment pour des débits anormalement forts (typhons par exemple). Nous avons tiré parti de la grande quantité de données (Q_w et C) disponibles à Taiwan pour vérifier cet aspect.

Des exemples sont fournis sur la Fig. 2 et sur le Tableau 1, pour les principales stations du bassin de la rivière Kaoping. Compte tenu de la distribution des stations (Fig. 1b), les résultats sont cohérents et confirment la détermination de la station LLBA. En première approximation, les points de données s'ajustent dans tous les cas sur une ligne droite en coordonnées logarithmiques pour Q_s et Q_w , en bon accord avec la loi de puissance. Un meilleur ajustement est obtenu pour l'équation (3) avec A et B , qui sépare les variables, que pour l'équation (1) avec a et b , où le sédiment intervient des deux côtés (Q_s et C).

3. La charge de fond : contribution du modèle NETSTARS

L'évolution des lits de rivières a fait l'objet d'études analytiques et numériques [5,7,8]. Tout modèle de transport de sédiment est fonction de la taille des éléments et des conditions d'écoulement. Lorsque la contrainte d'entraînement de fond excède la valeur critique pour initier le mouvement, un élément commence à se déplacer en glissant, en roulant ou en sautant sur le fond de la rivière. Ce mode de déplacement caractérise la charge de fond.

NETSTARS est un modèle analytique–numérique visant à simuler les conditions de transport de sédiments dans un réseau de drainage [5]. Il traite séparément la charge en suspension et la charge de fond, et il peut reproduire le comportement de dépôt des sédiments en suspension sans exiger des conditions d'équilibre. En l'absence de mesures directes de la charge de fond, nous avons utilisé NETSTARS afin d'évaluer cette charge. Pour la rivière Kaoping (Fig. 1b), des données précisent depuis 1989 les coupes du chenal et la nature des matériaux de fond.

La distribution des sédiments en suspension en fonction du débit aide à définir les conditions aux limites en amont. Mais, pour différents systèmes d'équations, les résultats diffèrent, sans que les données de terrain permettent de choisir un sous-modèle précis. Les incertitudes sont importantes : à la station LLBA, la charge de fond calculée vaut 12 à 42 % de la charge totale en sédiments, soit 14 à 72 % de la charge en suspension.

4. Discussion et conclusion

À partir de données sur les sédiments en suspension de la basse rivière Kaoping, Li [6] a calculé un PDR de $960 \text{ mg cm}^{-2} \text{ an}^{-1}$ (soit $9600 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$). Nos résultats préliminaires fournissent, pour les seuls sédiments en suspension, une valeur moindre, à savoir 345. Les résultats obtenus après analyse statistique poussée diffèrent peu de ceux des estimations préliminaires. Ce contraste peut être attribué aux différences entre les données utilisées (nous avons fait appel à des données plus nombreuses et plus récentes), les pluviométries (les moyennes sont plus significatives sur une période de 11 ans que pour de courtes durées) et les modifications artificielles des cours d'eau (réduisant le transport de sédiment vers l'aval). L'absence d'indication précise sur les données utilisées par Li [6] interdit de reproduire son calcul et ne permet que des conjectures. Il est possible que le déficit en mesures de C pour les faibles débits soit en grande partie responsable de la surévaluation.

Si, à Taiwan, la contribution de la dissolution au taux d'érosion est très mineure, environ 0,4 % [5], la charge de fond ne peut être négligée. D'après notre modélisation NETSTARS, le transport total de sédiment, charge de fond comprise, atteint $1,14$ à $1,72 \times 10^7 \text{ t an}^{-1}$ à la station LLBA. Le PDR correspondant est 393 – $593 \text{ mg cm}^{-2} \text{ an}^{-1}$ (3930 – $5930 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$), encore inférieur de moitié aux déterminations précédentes.

Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes : (1) les évaluations de la charge en suspension peuvent avoir été faussées vers le haut, peut-être à cause des déficiences des mesures pour les faibles débits ; (2) la charge de fond devra être calculée en dépit des difficultés techniques et des incertitudes, car elle apporte une contribution notable par rapport à la charge en suspension ; (3) de grandes séries de

données sont indispensables pour diminuer les incertitudes et lisser les effets des variations temporelles à court terme ; (4) une meilleure connaissance des propriétés morphologiques et hydrologiques est requise, afin de pouvoir choisir le sous-modèle le mieux adapté pour calculer la charge de fond.

1. Introduction

The island of Taiwan (Fig. 1a) occupies a total area of $36\,000 \text{ km}^2$ and the Tropic of Cancer crosses its southern part. Mountain ranges with elevation higher than 1000 m occupy 32% of the island, hills and plateaus between 100 and 1000 m in elevation cover 31% and the remaining area corresponds to plains with altitude smaller than 100 m . Most mountains are composed of relatively soft material, including slates and argillaceous schists. There are 129 rivers, with rather short and steep watercourse, small drainage basins and large runoff difference between wet and dry seasons. From 1958 to 2003, 210 typhoons and more than 1000 storms occurred in Taiwan [1]. River discharges quickly respond to changes in rainfall and flood flows are common. The annual rainfall is 2500 mm , 2.5 times the world average [9]. Because of rainfall, rapid flows and typhoons, severe erosion occurs in summer. Frequent earthquakes affect the stability of mountain slopes, and landslides favour river erosion because of the weak mechanical properties of disrupted masses [2].

For the above reasons, the Taiwan Island allows estimation of erosion rates in a geodynamic context dominated by rapid tectonic uplift. Studying the present-day denudation rate of the Central Range, Li [6] considered the high minimum value of $1300 \text{ mg cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ (i.e. $13\,000 \text{ t km}^2 \text{ yr}^{-1}$) as a consequence of the rapid uplift of Taiwan Island. This fast denudation of the mountain belt, in turn, favours further uplift of the island through isostatic adjustment. Mountain erosion rates have recently been estimated for the interval 1970–1999 [3]. In this paper, we quantify the sediment transfer in the rivers running from high mountains to the sea, combining the sediment content data with the more numerous water discharge data. Such data have been recorded at over 150 stations across Taiwan [1,9]. This approach results in reduced – albeit still large – uncertainties while calculating the amount of sedi-

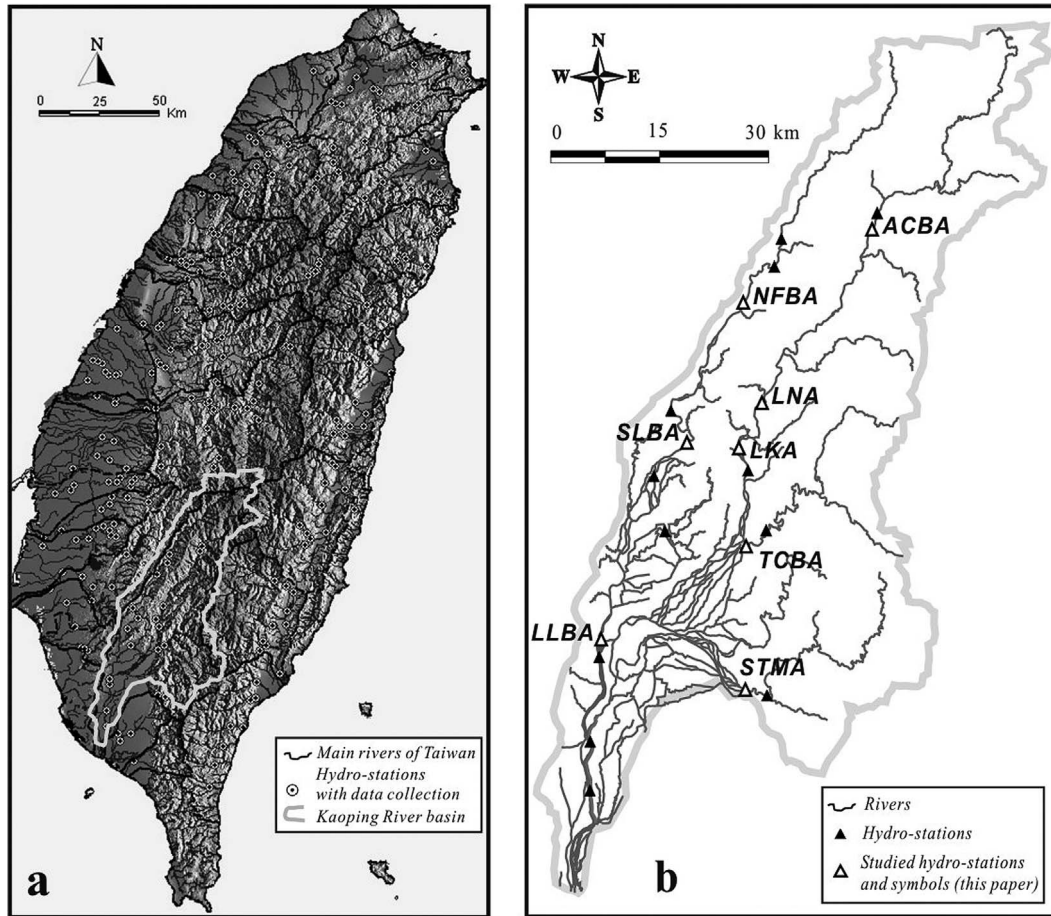


Fig. 1. Location map. (a) Shaded relief map of Taiwan, with hydro-stations as small dots and Kaoping basin as thick line. (b) Map of the Kaoping basin, with hydro-stations shown.

Fig. 1. Carte de localisation. (a) Carte de Taiwan (relief ombré), avec les stations hydrologiques (symboles ronds) et le bassin de la rivière Kaoping (trait épais). (b) Carte du bassin de la rivière Kaoping, avec ses stations hydrologiques.

ment involved in transfer from mountain to sea, and hence the erosion rate. As an example, we consider the drainage basin of the Kaoping River in South Taiwan (Fig. 1b).

2. Data collection and primary analysis

Reliability and accuracy in hydrological data collection are crucial in the management and planning of water resources. The evaluation of water conservancy projects are based on analysis of the results obtained after collection, evaluation, sorting and analysis of all relevant hydrological data. The collection and storage

of hydrological data in Taiwan have begun in 1936, by the Water Conservancy Agency (WCA) of the Central Government. The Ministry of Economic Affairs (MOEA) has devoted major effort to control flood by undertaking levee construction, dredging, flood diversion, flood detention, watershed management and drainage improvement. The bureau edited the yearly ‘Hydrological year book of Taiwan’, displaying information on water discharge, suspended sediment records and water quality, with increasing detail and accuracy with time. Updated compilation is available at the WCA website [9]. At each hydrological station, the water discharge was measured daily; suspended sediment contents were measured with an average fre-

quency of 30 samples per year, using depth-integrating suspended sediment tools.

Sediment transports are a function of flow hydraulics, bed composition, and upstream sediment supply. Determining the critical condition for sediment incipient motion and the sediment transport rate is important in hydraulic engineering. A simple relationship between discharge and sediment content was proposed by Fleming [4], who analysed 250 different databases of drainage basins in the world. The sediment content, or instantaneous suspended-sediment concentration, C (in ppm or mg l^{-1}), is given by:

$$C = aQ_w^b \quad (1)$$

where Q_w is the water discharge (usually in c.m.s., i.e. $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), while a and b are empirical constants. Knowing C , the suspended load of a known station, or instantaneous suspended-sediment discharge, Q_s (in metric tons per day), is obtained as:

$$Q_s = kCQ_w \quad (2)$$

where k is a conversion factor that depends on the adopted units (0.0864 with the above units). Based on measurements of C , and using Eqs. (1) and (2), one easily calculates the quantity of sediments as a function of water discharge:

$$Q_s^{\text{calc}} = A Q_w^B \quad (3)$$

with $A = ka$ and $B = b + 1$.

Using these equations, we calculate the parameters a and b , or A and B , based on a regression analysis of the available couples of data Q_w and C collected simultaneously. For instance, 199 couples were available from 1991–2001 at station LLBA (Lin-Ling Bridge) of the lower Kaoping River (Fig. 2): we obtain $A = 1.016$ and $B = 1.68$ with a correlation coefficient $R = 0.85$. Then, the power law of Eq. (3) is applied to each daily water discharge datum Q_w (4018 data for the same station and period), giving calculated values Q_s^{calc} . We obtain a mean value of 27 339 tons of sediment per day (about 10^7 metric tons per year), for an average water discharge of $225 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. This average Q_s implies a minimum denudation rate of $345 \text{ mg cm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ($3450 \text{ t km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) for a basin area of 2895 km^2 .

The average value of Q_s^{calc} that we obtained is about 20 times smaller than the average Q_s from the

199 couples of data. This is because the absence of sediment content measurement for low discharge introduced a bias towards high values of C and Q_s while using only these couples of data. The technical bias is increased by the presence and repetition of values that do not correspond to any measurement, so that careful examination and statistical evaluation of data lists were necessary. The average Q_s obtained from couples of data only cannot be considered reliable. In 1976, Li [6] calculated the present-day physical denudation rate (PDR) from data collected in stations located in the downstream segments of all major rivers of Taiwan. The values obtained at each of these stations described the inferred amount of erosion in the whole drainage basin located upstream. Li used the following formulation:

$$\text{PDR} = \sum_{i=1}^{365} a Q_i^{b+1} / U \quad (4)$$

where Q_i is the water-flow rate in cubic metres per day i , U the upstream basin area, while a and b are empirical constants from Eq. (1).

Two difficulties arise, both leading to underestimated PDR values. First, the coarser sand grains and pebbles transported near and on the riverbed are by definition ignored in suspended sediment load data, although this bed load contribution to sediment transport may be significant. This aspect is discussed in Section 3. Second, one may question the validity of Eqs. (1)–(3), especially in abnormally high conditions of water discharge (e.g., typhoons). We took advantage of the large datasets available in Taiwan to check this aspect, considering all couples of measured Q_w and C and paying special attention to high values.

Examples are provided in Fig. 2 and Table 1, for the main hydro-stations of the Kaoping River basin. Taking the station distribution into account (Fig. 1b), the results are consistent and in all cases support the determination at station LLBA discussed above. In the first approximation, for Q_s the data points fit a straight line in logarithmic coordinates, consistent with a power law. The best fit level in linear regression is given by Eq. (3), which involves A , B and separate variables, whereas Eq. (1), which involves a , b and the sediment on both sides (Q_s and C) yielded higher dispersion. However, PDR estimates made using C and Q_s did not reveal large difference considering the range

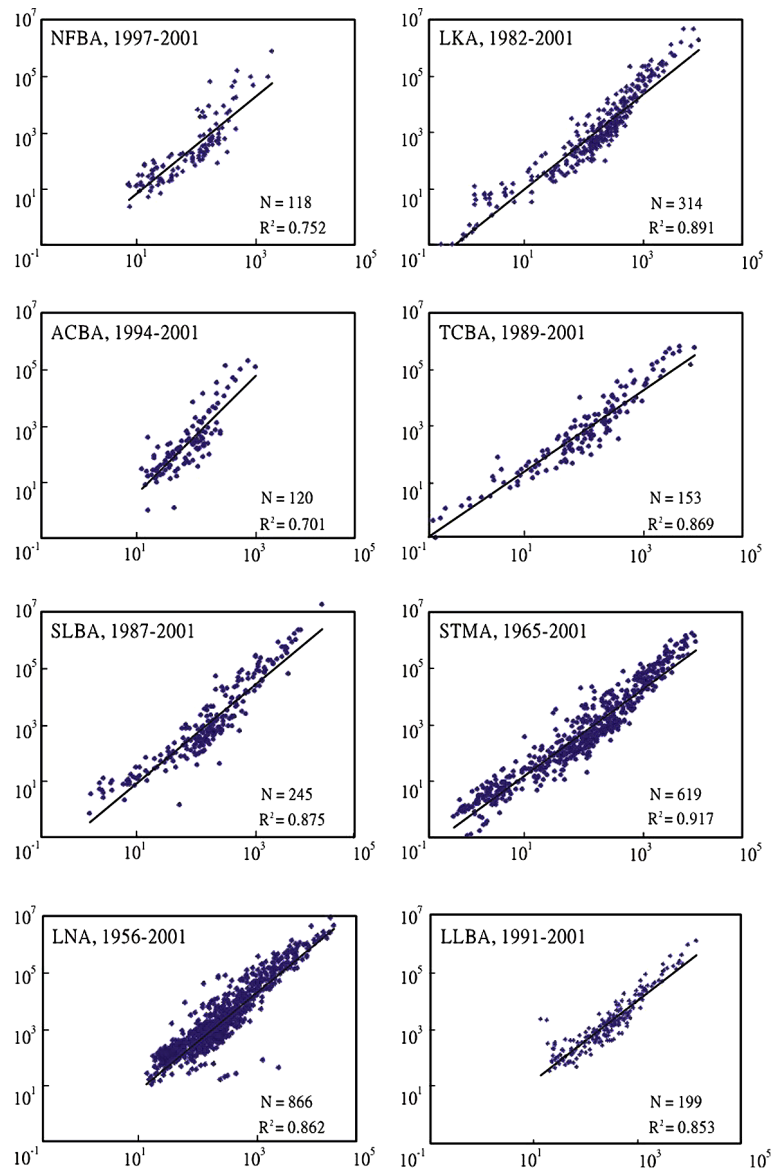


Fig. 2. Suspended-sediment discharge, Q_s (ordinates) versus water discharge, Q_w (abscissas), in logarithmic coordinates. Station names as in Fig. 1, data period indicated.

Fig. 2. Quantité de sédiment, Q_s (ordonnées) en fonction du débit, Q_w (abscisses), en coordonnées logarithmiques. Noms des stations comme sur la Fig. 1, périodes de mesures indiquées.

of uncertainties. Based on this preliminary analysis, we carried out a variety of regression analyses depending on station grouping, time window and so on, taking into account the along-stream location of stations and their position on different tributaries (e.g., Fig. 1b).

3. The bed load: contribution of the NETSTARS model

The riverbed evolution in alluvial channels has been studied based on analytical and numerical approaches [5,7,8]. The model of sediment transport is

Table 1

Main characteristics for eight major hydro-stations of the Kaoping River basin. Station names as in Fig. 1, main results and regression adjustment of Eq. (3) in Fig. 2

Tableau 1

Caractéristiques majeures des huit stations hydrologiques principales du bassin de la rivière Kaoping. Localisation sur la Fig. 1, ajustement de l'équation (3) sur la Fig. 2

Hydrostation	Catchment area (km ²)	Annual mean discharge (CMS)	Annual runoff (CMS-day)	Period of record
NFBA	354.3	28.1	5583.7	1997–2001
TCBA	375.1	28.0	7228.7	1989–2001
ACBA	403.9	25.5	6199.0	1994–2001
STMA	408.5	35.0	6323.1	1960–2001
SLBA	519.5	35.9	7337.6	1987–2001
LNA	812.0	66.4	12 053.8	1956–2001
LKA	853.0	61.4	12 341.6	1982–2001
LLBA	2894.8	215.8	43 492.6	1991–2001

dependent on the size of the bed materials and the flow condition. When the bed-shear stress exceeds the critical value for initiation of motion, a grain begins to move by sliding or rolling over the bed. The transport of particles by rolling, sliding, and saltating is called bed load transport.

NETSTARS is an uncoupled sediment-routing model simulating scouring and deposition behaviours in a channel network [5]. Suspended load and bed load are processed separately, and the depositional behaviour of the suspended sediment under non-equilibrium process can be simulated. An internal boundary condition based on the sediment transport capacity distributes the incoming sediment load into the downstream links. The governing equations for sediment routing include sediment continuity equation, sediment concentration convection–dispersion equation and bed load equation.

Because of the absence of direct measurements of bed load, we used the NETSTARS modelling tool to estimate the bed load as a function of available parameters. Along the Kaoping River, we used field data since 1989, including stream cross-sections and local information on bed material. Rating curves of suspended sediment versus water discharge were used to define upstream boundary conditions. Sub-models with unsteady-flow momentum equations or variants of simple back-water routing processes yielded different 11 results that could not be discriminated by data. We thus had to accept large dispersion of the results. At station LLBA, and depending on the sub-model adopted, the estimated bed load ranges from 12

to 42% of the total load, that is, 14–72% of the suspended load.

4. Discussion and conclusion

Using suspended load data from the lower Kaoping River, Li [6] obtained PDR values of 960 mg cm² yr⁻¹ (i.e., 9600 t km⁻² yr⁻¹). Our results involve a lower corresponding PDR, i.e. 345. Concerning the suspended sediment transport, the results of final determinations refined using statistical analyses do not differ much from simple preliminary estimates. This contrast probably results from differences in datasets (the dataset used herein is more recent and larger), rainfall (more significant estimates are obtained with a time span of 11 years than for few years) and channel management (reducing downstream sediment transport). Because no accurate information was given concerning the data used by Li [6], his calculation cannot be reproduced and explanation is uncertain. The under-representation of the measurements of *C* for low water discharges may partly explain an overestimation in total sediment discharge.

Whereas the role of the chemical denudation rate in Taiwan is very minor, about 0.4% according to Li [6], the bed load largely influences sediment transport. After NETSTARS bed load modelling, we obtain a total sediment transport at station LLBA of 1.14 to 1.72 × 10⁷ metric tons per year. The resulting PDR is 393–593 mg cm⁻² yr⁻¹ (3930–5930 t km⁻² yr⁻¹), still smaller by one half than the previously calculated values.

The conclusions of this study are as follows: (1) significant biases may have favoured high values in suspended load data analysis, perhaps because data collection for small discharge was poor; (2) the bed load must be calculated in spite of technical difficulties and uncertainties, because it adds significant contribution with respect to the suspended load; (3) large series of datasets are required to reduced uncertainties and smooth time variability; (4) a better knowledge of riverbed morphological and hydrological properties is required in order to choose the best sub-model for bed load evaluation.

Acknowledgements

This research was supported by the National Science Council of Taiwan grant NSC 12 90-2116-M-001–030 and by the Taiwan–France cooperation in Earth Sciences (French Institute in Taipei, NSC of Taiwan and French CNRS, PICS Taiwan). Help by Prof. Wu Ming-Chee, Tainan, and the 6th River Bureau, Fengshan, is gratefully acknowledged. We also thank anonymous referees for constructive comments.

References

- [1] Central Weather Bureau, Central Government the Ministry of Transportation and Communications, <http://www.cwb.gov.tw/index-f.htm>.
- [2] R.-F. Chen, Y.-C. Chan, J. Angelier, J.-C. Hu, C. Huang, K.-J. Chang, T.-Y. Shih, Large earthquake-triggered landslides and mountain belt erosion: the Tsaoling case, Taiwan, C. R. Geoscience 337 (2005), 10.1016/j.crte.2005.04.017, submitted for publication.
- [3] S.J. Dadson, N. Hovius, H. Chen, W.B. Dade, M.-L. Hsieh, S.D. Willett, J.-C. Hu, M.-J. Horng, M.-C. Chen, C.P. Stark, D. Lague, J.-C. Lin, Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen, Nature 426 (2003) 648–651.
- [4] G. Fleming, Computer Simulation Techniques in Hydrology, Elsevier, 1975, 333 p.
- [5] H.-Y. Lee, H.-M. Hsieh, Numerical simulations of scour and deposition in a channel network, Int. J. Sediment. Res. 18 (1) (2003) 1–17.
- [6] Y.-H. Li, Denudation of Taiwan island since the Pleistocene epoch, Geology 4 (2) (1976) 105–107.
- [7] D.J. Milliman, J.P.M. Syvitski, Geomorphic/Tectonic control of sediment discharge to the ocean: The importance of small mountainous rivers, J. Geol. 100 (1992) 525–544.
- [8] B. Rondeau, D. Cossa, P. Gagnon, L. Bilodeau, Budget and sources of suspended sediment transported in the St. Lawrence River, Canada, Hydrol. Processes 14 (2000) 21–36.
- [9] Water Conservancy Agency, Central Government the Ministry of Economic Affairs, <http://www.wra.gov.tw/>.