

## LES REGIMES DES RIVIERES ET LEURS TRANSPORTS EN SUSPENSION SOUS LES DIFFERENTS CLIMATS

par Margareta B. JANSSON\*

( traduit de l'anglais par A. PISSART )

**Mots clés :** rivières, transport en suspension.

**Key words:** rivers, suspended transport.

### Résumé

Le présent article rassemble les connaissances se rapportant aux régimes hydrologiques des rivières et aux sédiments en suspension qu'elles transportent. Les paramètres retenus pour caractériser les rivières considérées sont: les variations de débit au cours de l'année, l'écoulement annuel moyen, la charge moyenne annuelle en sédiments, les variations saisonnières de charge et de concentration de sédiments et, enfin, la fréquence et l'ampleur des événements extrêmes. Tous les paramètres ont été, dans une certaine mesure, pris en compte. Après la présentation des variations saisonnières d'écoulement et celle de la charge des rivières pour les principaux climats, la signification des variations de concentration mensuelles moyennes des sédiments est discutée pour chaque milieu climatique. Cette discussion est suivie par une analyse de la relation, pendant l'année, de la quantité d'eau et de la quantité de sédiments des rivières pour les différents groupes climatiques.

Le régime du transport des sédiments suit d'habitude le régime des eaux, cependant la relation entre les débits et la charge en suspension est différente suivant les climats. En distinguant cette relation pour chacun des mois, on obtient des figurations du cycle annuel représentées par des boucles. Celles-ci sont ouvertes dans les groupes climatiques Af et Cs. Pour d'autres climats, les boucles sont plus ou moins étroites, ce qui signifie que les concentrations en sédiments sont à peu près semblables pour les mêmes débits, aussi bien au moment de la montée des eaux qu'au moment de la baisse. Pour les rivières de haute montagne, les boucles sont souvent plus ouvertes que les rivières de plaine.

### Abstract

*A review of water and sediment regimes in different climates is presented. Parameters related to the hydrological regime of a river are, besides mean water runoff variations during the year, also mean annual runoff, mean annual sediment yield, seasonal variations in sediment yield and concentration, and frequency and magnitude of extreme events. All these parameters have been treated to some extent. After a presentation of seasonal variations in water runoff and sediment yield of rivers within major climatic groups, there is a discussion of ranges of monthly mean sediment concentrations during the year within different climates. This is followed by an analysis of the water-sediment covariation during the year in rivers of the different climatic groups.*

*The sediment regime usually follows the water regime but the covariation between water and sediment varies with climate. Water-sediment loops are open in the "Af" and "Cs" climatic groups. In other climates the loops are more or less narrow, which means that the sediment concentrations are about the same level in both rising and falling stages at the same runoff. Rivers in high mountains often have somewhat more open loops than in plain rivers.*

## I. INTRODUCTION

Le but de notre étude est de présenter une revue des régimes hydrologiques et des sédiments transportés par les rivières dans différents climats. Ce travail continue les recherches de l'auteur sur la répartition générale de l'érosion.

Celles-ci ont débuté par la présentation d'une thèse (M.B. JANSSON, 1982) sur le sujet et se sont poursuivies par la réalisation d'une carte globale de la charge annuelle en sédiments des rivières (M.B. JANSSON, 1988). La base de données utilisée ici comprend des valeurs mensuelles de débit et de charge en suspension. Ces données ont été recueillies à partir de sources très différentes, avec la collaboration de Ake Sundborg. Certaines, et elles sont nombreuses, ont été obtenues par correspondance auprès d'instituts hydrologiques nationaux, de ministères et d'organisations nationales; d'autres ont été extraites de rapports publiés ou stencillés, par exemple de publications anciennes de l'Unesco et de l'AIHS (1974).

Nous considérons ici les variations saisonnières de l'écoulement des eaux et de la charge en suspension sous les différents climats. Après une présentation des régimes de plusieurs rivières appartenant à des groupes climatiques importants, nous discuterons des valeurs de la charge en sédiments. Enfin nous analyserons les caractéristiques de la relation eau-sédiment pour les différents groupes climatiques.

Les variations du débit pendant l'année constituent le régime hydrologique. Les caractéristiques de ce régime dépendent de nombreux facteurs. Le climat est le facteur le plus important. Il contrôle la quantité totale de précipitations, l'intensité des pluies, l'importance des chutes de neige, la présence de glaciers et les conditions de température qui déterminent l'évaporation. A côté du facteur climatique, l'environnement du bassin versant est aussi fondamental. Il intervient entre autres par le relief, la présence de lacs, la nature des roches, l'épaisseur des sols et aussi les altérations humaines de l'environnement. L'homme influence, en effet, le régime hydrologique principalement par la déforestation, l'agriculture, le détournement des eaux et la construction de réservoirs. Tous ces facteurs déterminent de nombreuses et importantes caractéristiques du régime des rivières et ne contrôlent pas uniquement les valeurs d'écoulement moyen pendant l'année.

Un certain nombre de paramètres sont en relation étroite avec le régime hydrologique des rivières et, par exemple, l'écoulement moyen annuel, la charge moyenne annuelle en sédiments, les variations saisonnières de charge en sédiments, la fréquence et l'importance des événements extrêmes (L. STARKEL, 1983). Des changements dans le régime hydrologique d'une rivière provoqués par les activités humaines peuvent affecter l'érosion des

sédiments et la capacité de transport de la rivière, ce qui peut entraîner des implications morphologiques. Un chenal fluvial est considéré comme étant en régime stable quand le chenal a ajusté sa forme aux effets combinés du débit, des conditions sédimentaires et d'inclinaison de la surface des eaux de la rivière (T. BLENCH, 1969; E.J. HICKIN, 1983).

Le régime du transport des sédiments fait partie du régime hydrologique et, pour chaque rivière, il y a une relation spécifique entre le transport des sédiments et le débit. Le régime des sédiments est déterminé par les conditions d'érosion et d'écoulement dans le bassin et dans les chenaux de drainage. Les caractères des précipitations contrôlent l'intensité de l'érosion. L'érosion est aussi hautement influencée par la couverture végétale. Des études en parcelles dans l'ouest africain ont montré une érosion mille fois plus importante sur un sol nu que sur un sol couvert de végétation (E. ROOSE, 1977). La valeur de la pente a également beaucoup d'importance pour le transport du matériel détaché par le ruissellement.

La distribution saisonnière de l'écoulement et du transport des sédiments dans une rivière est le mieux décrite par les valeurs moyennes mensuelles. Les valeurs moyennes peuvent toutefois être trompeuses sous des climats qui ont une grande variabilité annuelle et mensuelle. La longueur de la période de mesure est déterminante pour obtenir des valeurs moyennes correctes. Si la durée considérée est suffisamment longue, elle estompera les événements importants mais exceptionnels qui caractérisent aussi le type de régime.

Généraliser les caractéristiques des régimes hydrologiques et de transport des sédiments dans différents climats est difficile à réaliser car, sous un même climat, les conditions climatiques et d'environnement varient beaucoup. Cela explique que les données varient d'une rivière à l'autre et justifie pourquoi il est extrêmement malaisé d'obtenir une relation générale pour un climat déterminé.

## II. REVUE DES CARACTERISTIQUES DES REGIMES DES RIVIERES POUR DIFFERENTS CLIMATS

### A. Les régimes hydrologiques de Pardé attribués aux différents climats

#### 1. La classification climatique

La classification des climats de Köppen est utilisée dans la présente étude (W. KÖPPEN, 1936). Une carte revue des régions climatiques suivant la classification de Köppen a été préparée au département de météorologie de l'Université d'Uppsala, (H. ALEXANDERSSON, 1982).



Les types simples de régimes peuvent être trouvés dans différents groupes climatiques. Le régime pluvial tropical existe dans les climats "Af", "Aw" et "Cwa"; le régime pluvial océanique, dans les climats "Cfa", "Cfb" et "Cs"; le régime nival, dans les climats D; le régime glaciaire dans les climats ET et EF. Les régimes aride et semi-aride ne sont pas considérés dans le travail de Pardé.

Le paramètre utilisé par Pardé pour caractériser les régimes hydrologiques est le quotient entre les débits moyens mensuels et le débit annuel moyen, quotient calculé pour tous les mois de l'année. Ce quotient donne de très grandes variations d'une année à l'autre dans les rivières ayant un faible écoulement annuel moyen. Pour comparer les climats en ce qui concerne l'ordre de grandeur des variations annuelles d'écoulement, nous n'avons pas utilisé l'index de Pardé, mais avons considéré les valeurs moyennes mensuelles du débit et de la charge de sédiments. Les groupes climatiques ont toutefois été réalisés selon les types de régimes simples définis par Pardé.

## B. Les rivières choisies pour représenter les climats

### 1. La base de données

La base de données consiste dans la moyenne mensuelle de débit et de charge en sédiments de 1058 stations de mesures dont 967 ont recueilli des données couvrant au moins quatre ans; 565 couvrent au moins 10 ans, et 95 couvrent 20 ans ou plus. La durée des observations a une grande importance pour la représentativité des résultats. Ceux-ci peuvent inclure des charges très élevées de sédiments produites par de rares tempêtes exceptionnelles, des cyclones tropicaux ou des phénomènes comme des éruptions volcaniques ou des glissements de terrain (R.H. MEADE and R.S. PARKER, 1985). Il nous a toutefois fallu accepter des durées d'enregistrement de 4 ans seulement pour disposer d'une base de données suffisamment étendue; nous restons cependant consciente qu'une période plus longue aurait été souhaitable.

La fiabilité des données varie suivant les méthodes de mesure, et aussi suivant le traitement et l'analyse de celles-ci. Il y a 3 types de sources d'erreur potentielles: 1) des déficiences dans l'équipement de prélèvement, dans la technique de prélèvement et dans les techniques de mesure et de calcul du débit, 2) des déficiences dans les techniques d'analyse de laboratoire, 3) des problèmes relatifs à la fréquence des prélèvements, à l'estimation des données manquantes et à la longueur des périodes d'observation. En outre, les sédimentations dans les bassins des rivières et, par exemple, dans les barrages n'ont pas été considérées dans les résultats présentés ici.

Nous soulignerons seulement une source potentielle d'erreur, liée à l'estimation des données manquantes. Des régressions unissant débit et charge sont normalement utilisées pour obtenir des estimations lorsque les prélèvements ne sont pas très nombreux. Des régressions logarithmiques ont été le plus souvent employées. Cette technique peut introduire des sous-estimations substantielles spécialement dans des petites rivières (M. B. JANSSON, 1985a, 1985b; R. I. FERGUSON, 1986). Des régressions utilisant un grand nombre de données transformées en logarithme peuvent conduire à sous-estimer de 2 à 3 fois la charge réelle en sédiments (M.B. JANSSON, 1985a). Les régressions peuvent être considérablement améliorées si les concentrations moyennes de sédiments pour des classes spécifiques de débits sont calculées avant la transformation logarithmique des moyennes et l'ajustement des régressions. (M.B. JANSSON, 1985a).

### 2. Les critères de sélection

Les rivières classées pour représenter les différents climats sur les figures 2 à 4 sont principalement celles dont les bassins s'étendent dans une seule zone climatique. Les rares exceptions à cette règle sont indiquées sur la figure 2 en mentionnant le climat additionnel.

Des rivières ayant des bassins de l'ordre de 1.000 à 10.000 km<sup>2</sup> ont été considérées comme les plus appropriées pour représenter les climats. 91% des 169 rivières des figures 2 à 4 ont des bassins de 900 à 16.000 km<sup>2</sup>. Le nombre de rivières considérées dans chaque pays a été déterminé en tenant compte du nombre de rivières qui y coulent; autrement dit, un plus grand nombre de rivières a été retenu dans une région où de nombreuses rivières existent pour un climat spécifique que dans un pays ou peu de rivières s'écoulent sous ce climat. Les rivières qui ont été finalement choisies pour représenter les principaux types de régimes de ce climat sont celles dont les caractéristiques sont moyennes et non extrêmes.

## C. Description des régimes hydrologiques et de transport de sédiments pour les différents climats

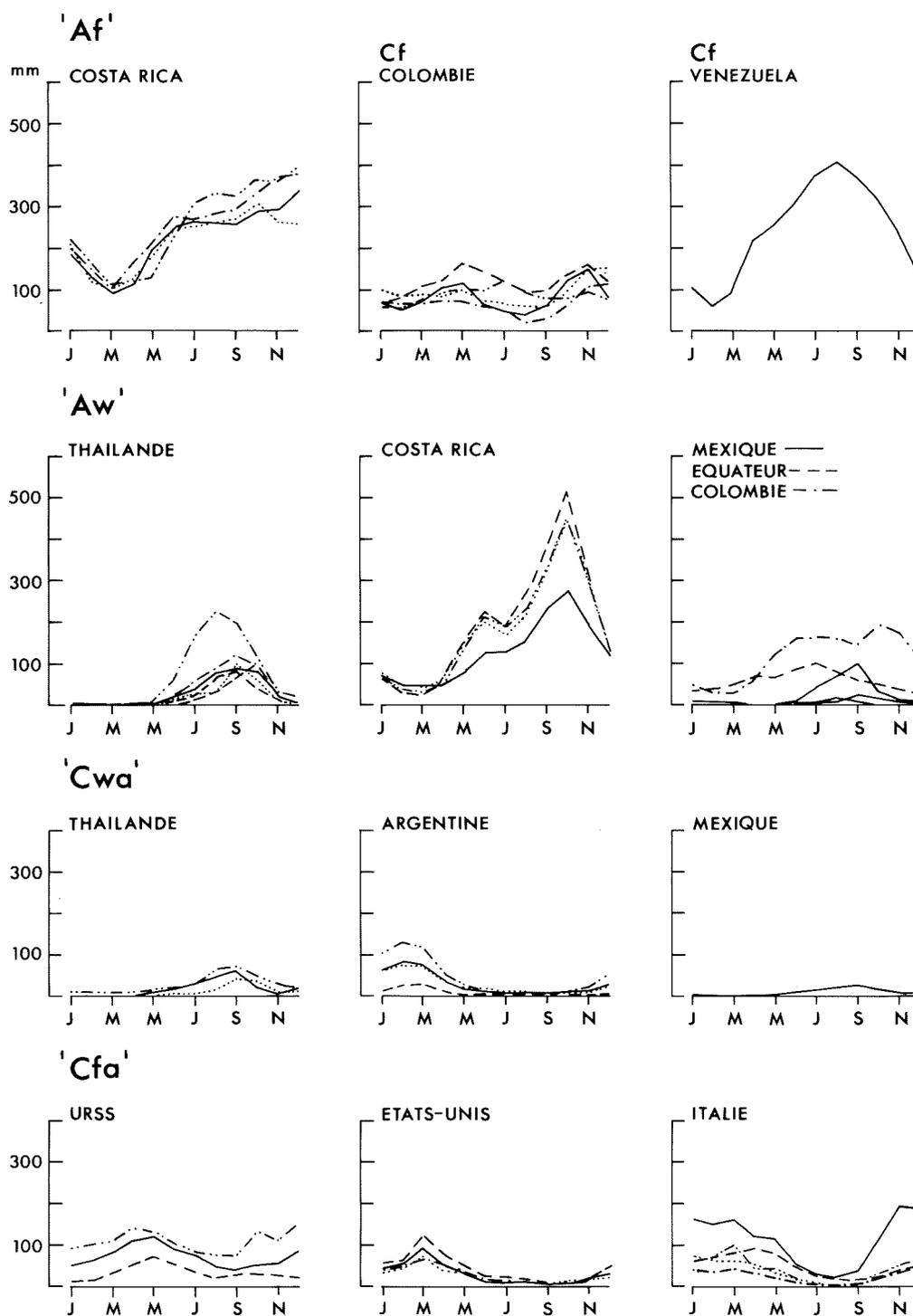
### I. Le régime pluvial tropical

Suivant Pardé, le régime pluvial tropical est caractérisé par des basses eaux à la fin de la saison sèche, en mars, avril ou mai, et par des hautes eaux à la fin de l'été dans l'hémisphère nord et, au cours des mois correspondants, dans l'hémisphère sud.

Dans notre base de données, les rivières des groupes climatiques "Af", "Aw" et "Cwa" ont de hautes eaux en août, septembre ou octobre et en février dans l'hémisphère

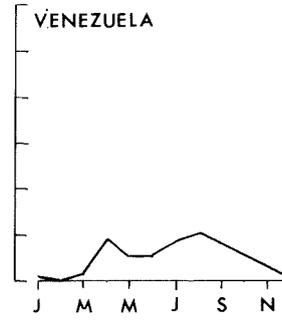
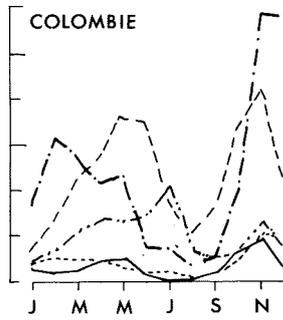
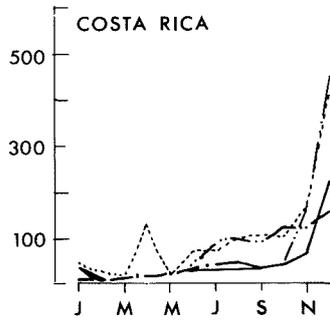
**TABLEAU 1.** Raisons justifiant le rassemblement des climats en quelques groupes climatiques homogènes. Les types de régimes simples s'y rapportant suivant la classification de Pardé sont indiqués.

Climats	Groupe climatique	Raisons justifiant le rassemblement	Classification simple de Pardé
Af, Cf	"Af"	Cf se trouve dans les montagnes tropicales. Les conditions de précipitations sont semblables à celles de Af.	Régime pluvial tropical
Aw, Am, Cw hors Argentine	"Aw"	Cw existe dans des montagnes tropicales (Cw d'Argentine exclus).	Régime pluvial tropical
Cwa, Cw en Argentine.	"Cwa"	Cw en Argentine a les mêmes conditions de pluies que Cwa.	Régime pluvial tropical
Cfa	"Cfa"	Peu de valeurs basses (Cfb au contraire a de nombreuses valeurs basses).	Régime pluvial océanique
Cfb, Cfc	"Cfb"	Cfc est semblable à Cfb.	Régime pluvial océanique
Csa, Csb, Cs	"Cs"	Comme la pluie et l'érosion se produisent en hiver, la température du mois le plus chaud n'a pas de signification et Csa est équivalent à Csb.	Régime méditerranéen
Dsb, Ds	"Ds"	Dsb et Ds existent dans les régions montagneuses de climat Csa ou Csb, mais ont plus d'écoulement de fonte de neige que Csa et Csb.	Régime nival
Df	"Df"	Les montagnes en Cfa ou Cfb sous les climats Df ont plus d'érosion de fonte des neiges que Cfa et Cfb.	Régime nival
Dfa, Dfb, Dfc Dfd	"Dfa-d"	Tous ces climats ont un écoulement de fonte de neige au printemps quand la couverture végétale est éparse. L'influence de la température est semblable en ce qui concerne l'érosion due à la fonte des neiges.	Régime nival
Dwc, Dwd	"Dwc"	Les conditions de fonte des neiges et des précipitations sont identiques. Dwa et Dwb ont des conditions de précipitations et de fonte de neige différentes de Dwc et Dwd.	Régime nival
ET, ET de montagne	"ET"	Climats semblables.	Régime glaciaire
BSh, BSk	"BS"	Conditions de précipitations semblables; pas beaucoup de valeurs de transport de sédiments en BSh. De nombreux minimums et maximums en BSk.	Régimes aride et semi-aride
BWh, BWk	"BW"	Conditions semblables de précipitations et de charge en sédiments	Régimes aride et semi-aride

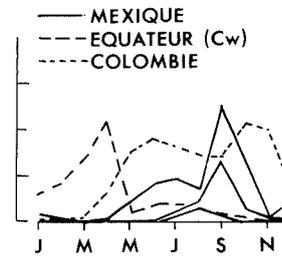
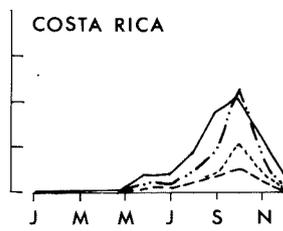
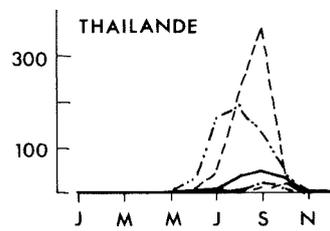


Figures 2. Régimes hydrologiques, sur la page de gauche, et régime de transport des sédiments en suspension, sur la page de droite, pour les groupes climatiques A, Cw et Cf (voir tableau 1 et figure 1). Les groupes climatiques sont mis entre apostrophes; les simples climats sont écrits sans apostrophes. Les rivières sont présentées par pays. Chaque courbe représente une rivière. Une même rivière porte le même symbole des deux côtés.

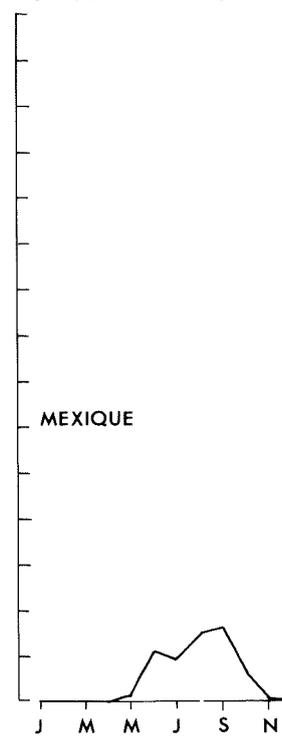
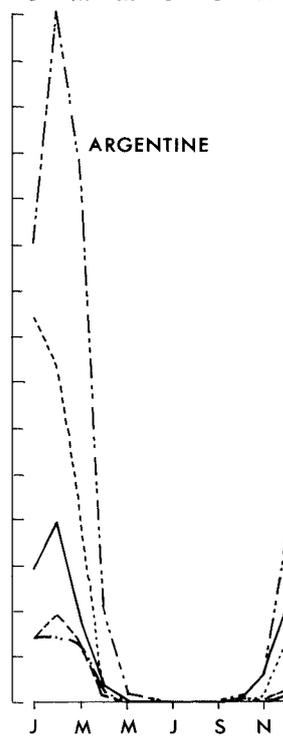
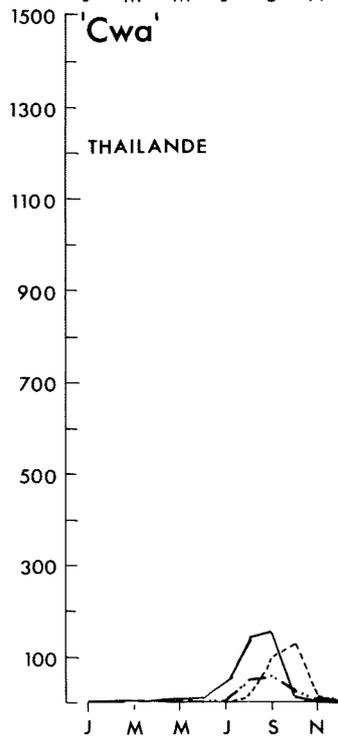
'Af'  
t · km<sup>-2</sup>



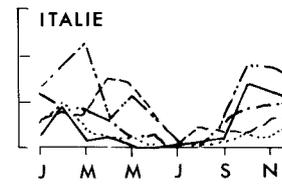
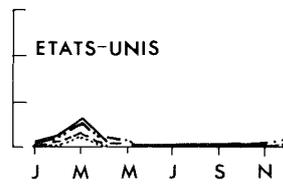
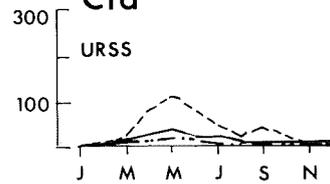
'Aw'



'Cwa'



'Cfa'



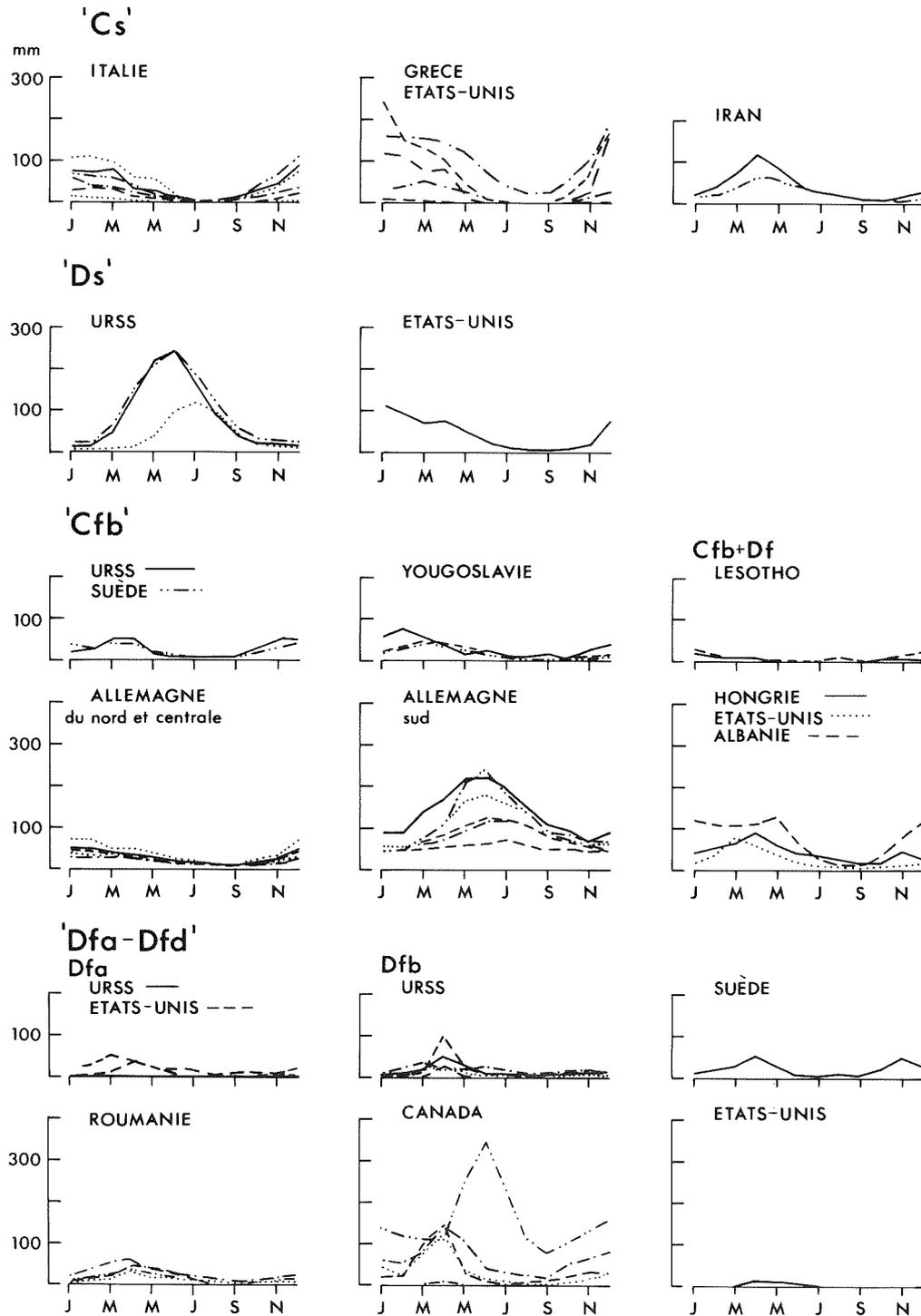
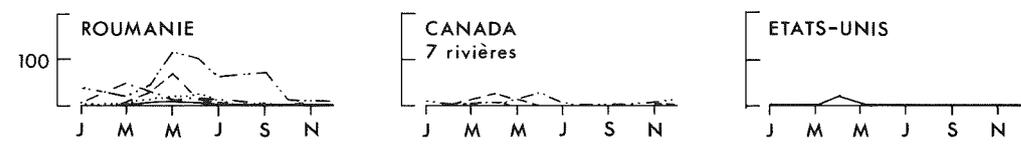
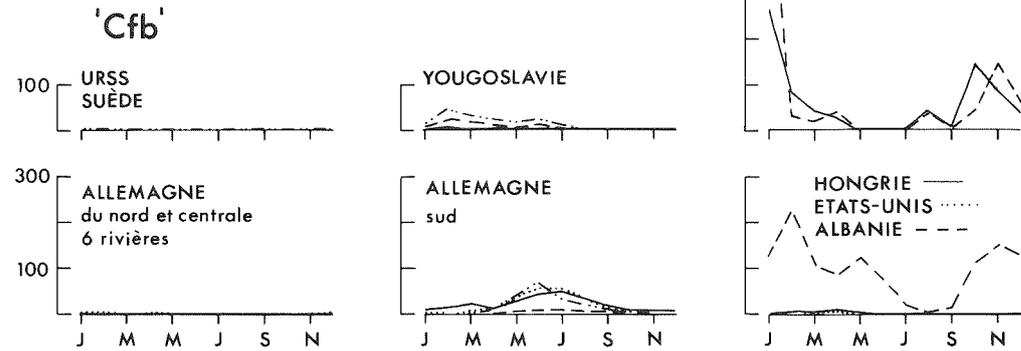
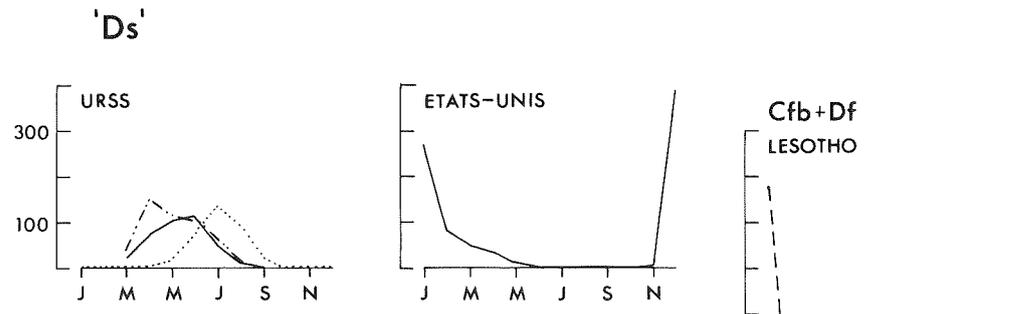
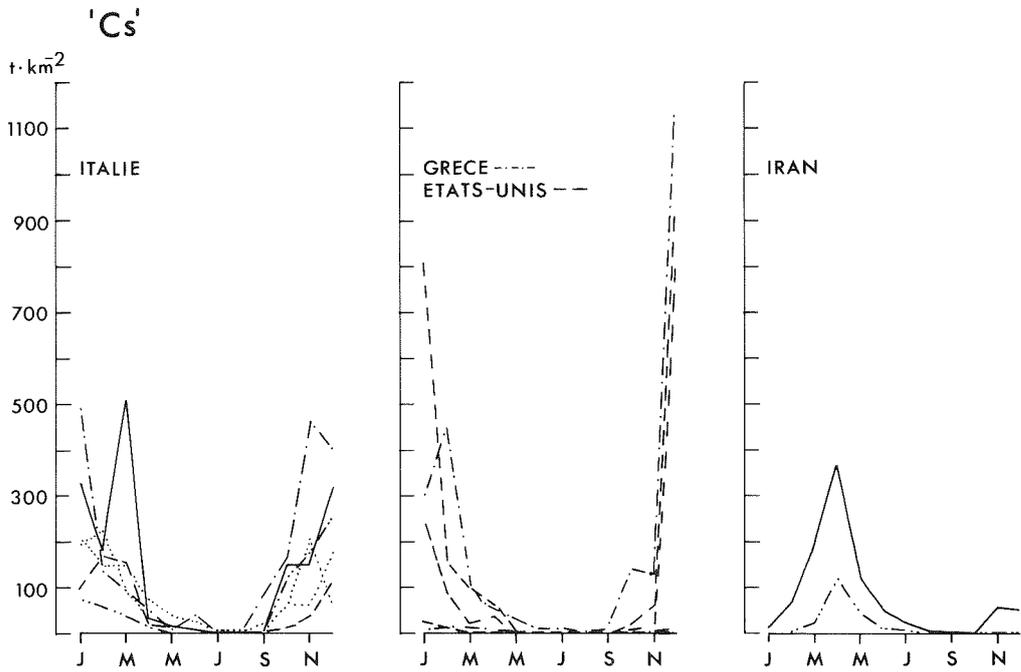
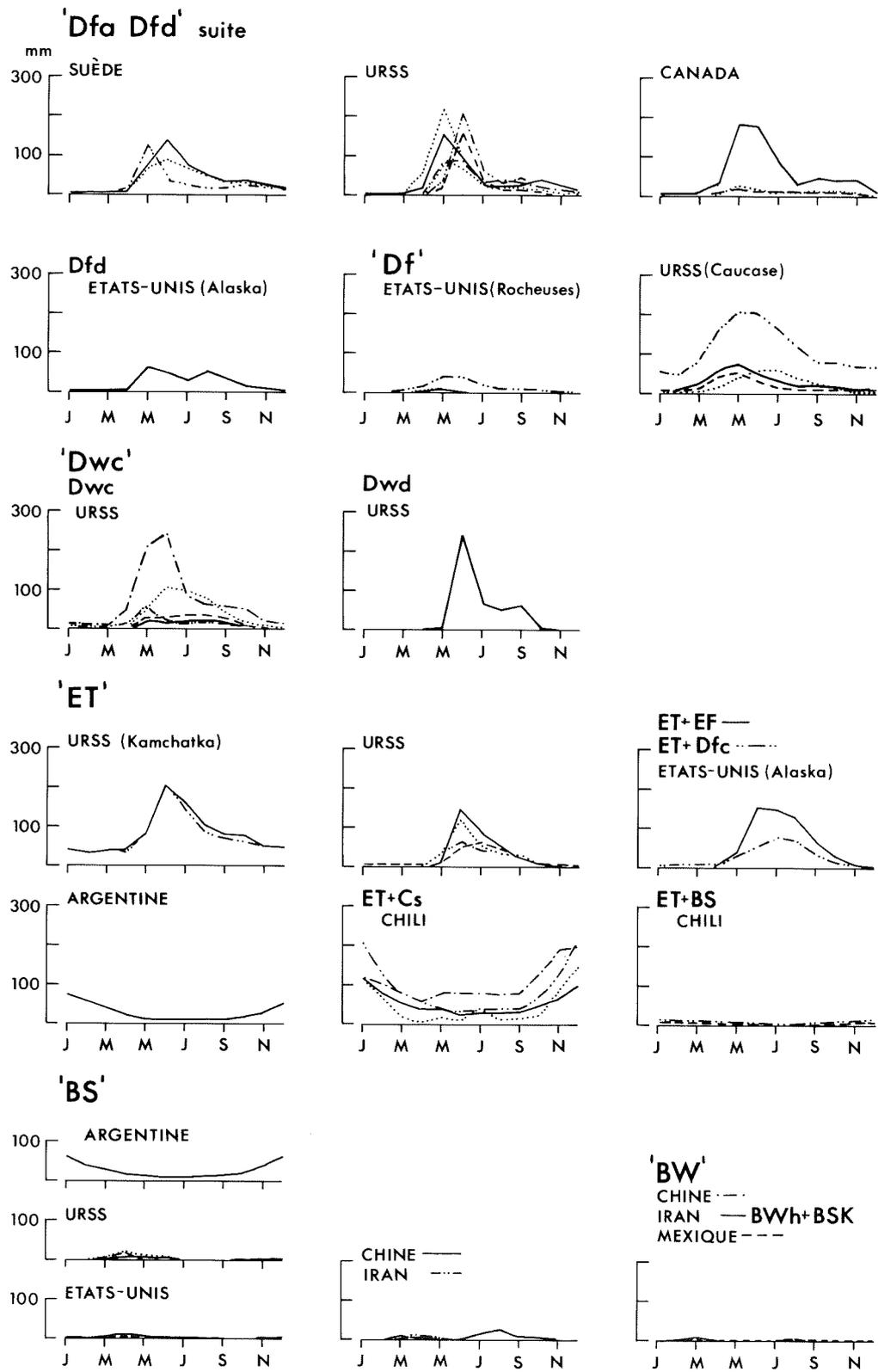


Figure 3. Régimes hydrologiques, sur la page de gauche, et régime de transport des sédiments en suspension, sur la page de droite, pour les groupes climatiques Cs, Ds, Cfb, Dfa, Dfd (voir tableau 1 et figure 1). Les rivières sont présentées par pays. La même rivière porte le même symbole des deux côtés.





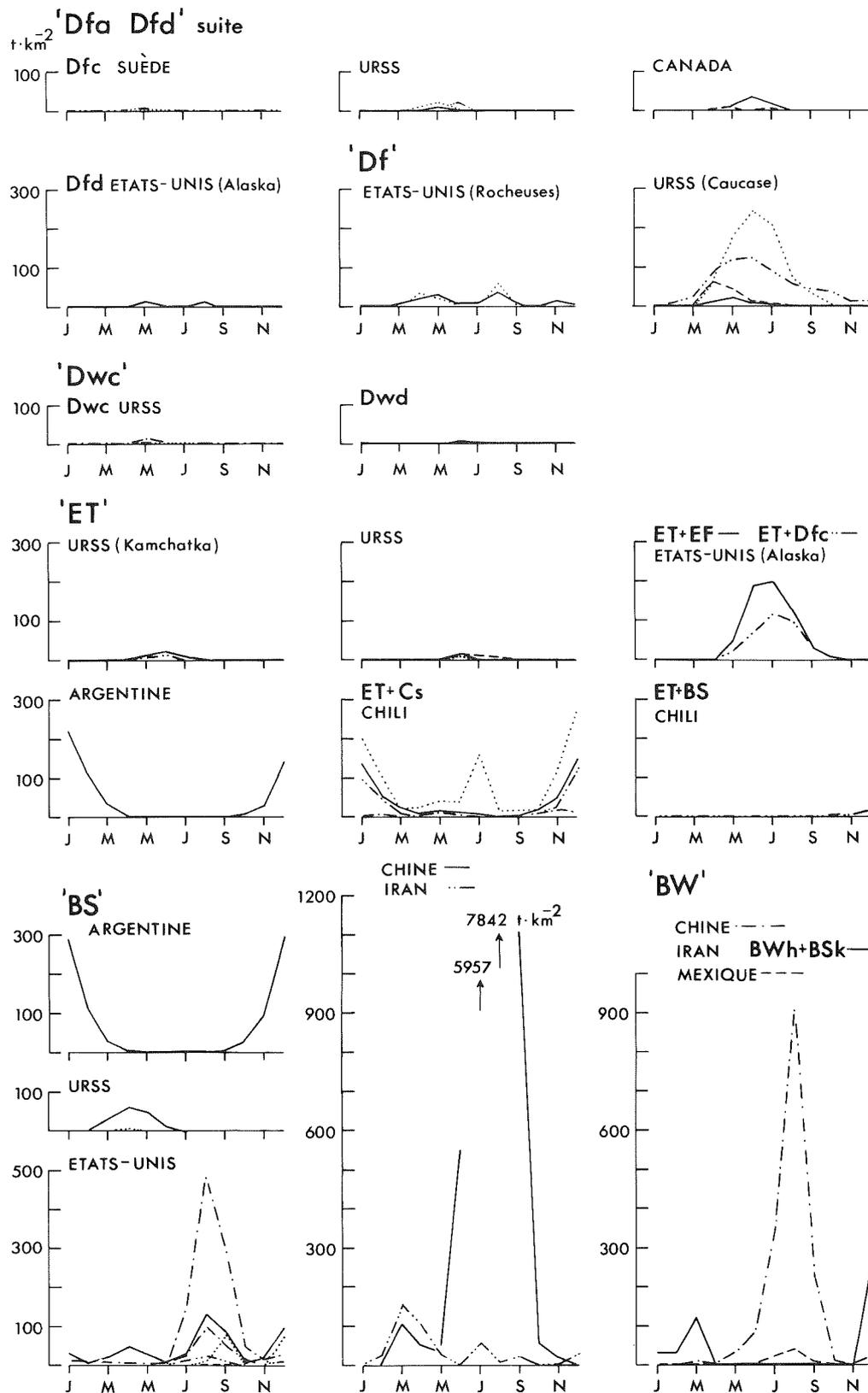


Figure 4. Régimes hydrologiques, sur la page de gauche, et régime de transport des sédiments en suspension, sur la page de droite, pour les groupes climatiques Dfa, Dfd, Dwc, E et B (voir tableau 1 et figure 1). Les rivières sont présentées par pays. La même rivière porte le même symbole des deux côtés.

sud (fig. 2). Les rivières costaricaines "Af" ont une période de hautes eaux de juin à décembre. Les exceptions à ce modèle simple sont les rivières de Colombie qui ont des régimes complexes et une rivière de l'Equateur qui présente un maximum en juillet. Les rivières des climats "Cwa" ont de faibles écoulements par rapport aux rivières des climats "Af" et "Aw".

Les variations de transport des sédiments suivent généralement les variations hydrologiques sauf dans quelques cas où interviennent sans doute des activités agricoles (fig. 2). Le transport des sédiments est élevé par rapport à l'écoulement en Colombie et en Argentine et, comparativement, il en est de même au Mexique. La majorité des rivières de Thaïlande transportent peu de sédiments.

## II. Le régime pluvial océanique

Suivant Pardé, le régime pluvial océanique est caractérisé par des hautes eaux pendant la saison froide (février, mars) et par des basses eaux pendant la saison chaude (août, septembre).

Les rivières sous les climats "Cfa", "Cs", et "Cfb", ont des basses eaux en juillet-septembre, excepté pour des rivières du sud de l'Allemagne descendant des Alpes (fig. 2 et 3). Les régimes des rivières du Lesotho peuvent être comparés à ceux de l'Allemagne méridionale ou devraient être classés parmi ceux des rivières du climat "Cwa" recevant les pluies au cours des mois d'été de décembre à février. Les climats "Cfa" et "Cfb" ont des précipitations toute l'année; le faible niveau des eaux en été est dû à l'importance de l'évapotranspiration. Dans les climats "Cs", les précipitations se produisent en hiver.

Les régimes de transport des sédiments dans le climat "Cfa" sont souvent caractérisés par un faible transport de sédiments, mais des valeurs plus élevées sont observées dans des rivières italiennes du climat "Cfa" (fig. 2). Les rivières du climat "Cs" transportent habituellement de grandes quantités de sédiments (fig. 3). Les régimes des rivières "Cfb", sont d'habitude caractérisés par un faible transport de sédiments, excepté pour les rivières d'Albanie et du Lesotho.

Les régimes de transport des sédiments des rivières dans le climat "Ds" des USA paraissent beaucoup plus semblables à ceux du climat "Cs" sous un régime océanique pluvial, tandis que les rivières de l'Asie Centrale d'URSS paraissent avoir un régime nival.

## III. Le régime nival

Pardé distingue deux types de régimes nivaux, à savoir celui des rivières de montagne ayant de hautes eaux en juin et celui des rivières de plaine. Les rivières ayant ce dernier type de régime présentent une crue brutale mais courte au

printemps à la suite de la fusion de la neige, ce qui se produit souvent en avril et en mai, mais peut aussi survenir en juin comme cela se produit au nord du Canada et en Sibérie. Ces rivières ont un écoulement minimum en hiver.

Les rivières coulant sous les climats "Dfa - Dfd", "Df", "Ds" et "Dwc" ont toutes des régimes nivaux. Dans le groupe climatique "Dfa - d", la fonte des neiges produit un écoulement maximum en mars-avril pour les climats "Dfa" et "Dfb", et en mai-juin pour les climats "Dfc" et "Dfd". La majorité des rivières ont une charge de sédiments extrêmement faible et cette charge suit bien le régime hydrologique. Quelques exceptions existent, notamment en Roumanie où quelques rivières de montagne ont les charges les plus importantes après le débit maximum d'avril.

Des rivières sous le climat "Df" (dans la zone subtropicale mais à forte altitude) se trouvent par exemple dans le Caucase et les Montagnes Rocheuses. L'écoulement et le transport de sédiments varient largement en importance d'une rivière à l'autre quoique ces rivières aient un maximum en avril et juin. Pour les rivières étudiées dans les Montagnes Rocheuses, le régime du transport des sédiments ne suit pas le régime hydrologique.

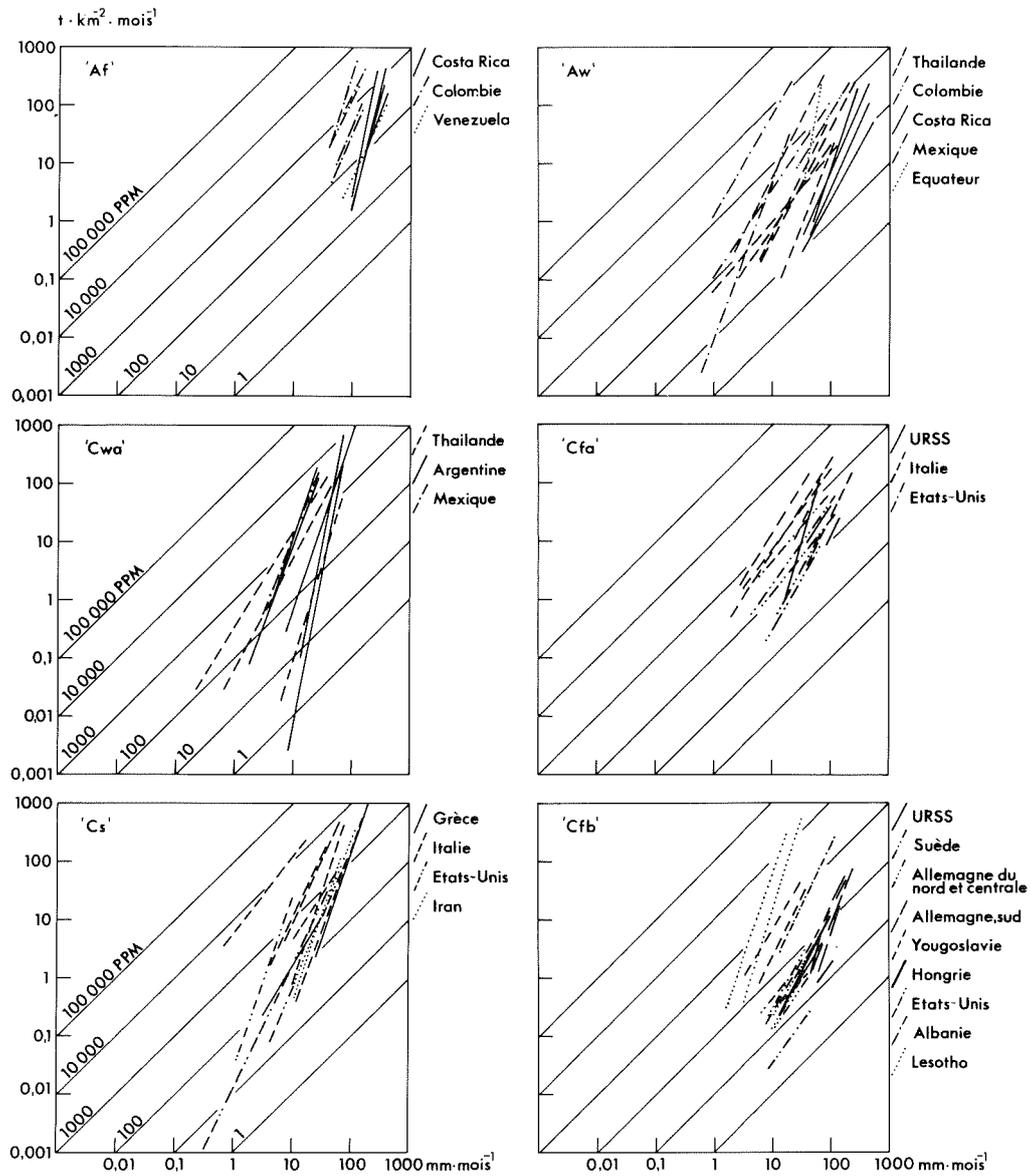
Comme les rivières sous climat "Dfc", les rivières sous climat "Dwc" ont un débit maximum en mai et juin, et transportent très peu de sédiments en suspension, même si leur débit est considérable.

## IV. Le régime glaciaire

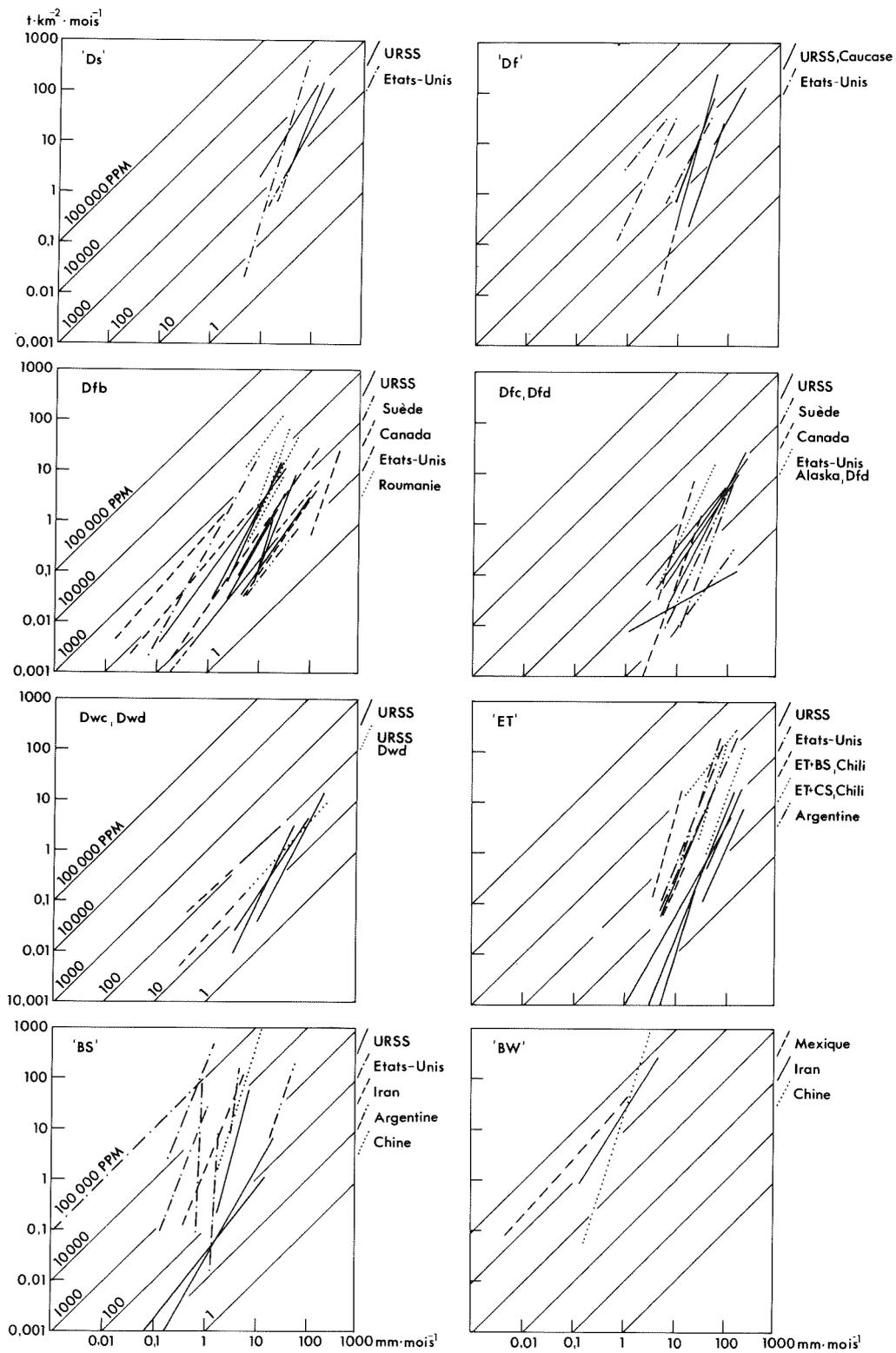
Suivant Pardé, le régime glaciaire est caractérisé par de basses eaux pendant l'hiver et de hautes eaux pendant les mois de juillet et août, quand la fusion de la glace est élevée. Les variations diurnes sont réputées être considérables.

Les rivières des climats "ET" en URSS, Alaska et Argentine ont un faible écoulement d'hiver excepté pour deux rivières de la péninsule du Kamtchatka (fig. 4). La crue maximum de fonte se produit en juin-juillet (janvier en Argentine). Les régimes de transport de sédiments en suspension sont caractérisés par de faibles teneurs en URSS, mais des teneurs élevées en Alaska et en Argentine (fig. 4).

Des rivières au Chili ont des régimes complexes si elles combinent les caractéristiques des climats "ET", et "Cs"; elles donnent alors des hautes eaux pendant l'hiver (avril-août); si elles combinent les climats "ET" avec "BS", l'écoulement est faible et s'infiltre dans le sol. Ces deux régimes complexes sont caractérisés par les plus hautes eaux et la plus grande charge en sédiments dans les mois d'été novembre-février.



**Figure 5.** Les valeurs moyennes maximum et minimum de l'écoulement et de la charge en sédiments sont reliées par des lignes droites. Les concentrations en sédiments en suspension sont indiquées en parts par millions (ppm). Toutes les rivières indiquées sur les figures 2 à 4 sont représentées sur cette figure.



**Figure 6.** Les valeurs moyennes maximum et minimum de l'écoulement et de la charge en sédiments sont reliées par des lignes droites. Les concentrations en sédiments en suspension sont indiquées en parts par millions (ppm). Toutes les rivières indiquées sur les figures 2 à 4 sont représentées sur cette figure.

## V. Les régimes arides

La base de données contient seulement 16 rivières dont le bassin est situé tout entier dans un seul climat aride. Pour les autres, le bassin comprend souvent un domaine de montagne. Les régimes hydrologiques des climats aride et semi-aride sont caractérisés par un écoulement très faible et très irrégulier. La variabilité des débits et des transports de sédiments n'apparaît pas dans les valeurs moyennes mensuelles. Toutefois, les grandes variations que présentent les rivières d'une même région donnent des informations sur les variations qui existent non seulement d'une rivière à l'autre, mais aussi d'une année à l'autre pour une même rivière.

La saison des précipitations et de l'écoulement varie pour les différentes rivières mais dépend dans une certaine mesure de l'environnement climatique. Dans la zone tropicale, par exemple, la saison des pluies suit le soleil et arrive en été. Les régions semi-arides situées non loin des climats méditerranéens (Cs) ont des précipitations et donc des écoulements en hiver. Les rivières des climats "BS" en URSS et en Iran paraissent être alimentées avec l'eau de fonte des neiges en mars-avril. Aux Etats-Unis, les pluies d'été entraînent quelquefois une charge importante de sédiments en suspension. D'autres fois, la charge en sédiments est faible. Ces données montrent que la longueur de la période d'observation est décisive pour le calcul des charges transportées lorsque des événements extrêmes sont rares. Le transport de sédiments en Chine se produit pendant les mois de mousson (juillet-septembre) et est extrêmement élevé lorsque les rivières drainent des régions de loess très sensibles à l'érosion.

## D. Quelques remarques concernant les régimes hydrologiques et le transport des sédiments

Lorsque l'on compare des rivières qui se trouvent dans des environnements climatiques différents quoique appartenant au même groupe climatique, des variations considérables dans les régimes hydrologiques et de transport de sédiments sont observées. Non seulement les variations de précipitations et de température qui existent dans ce groupe climatique sont responsables de ces différences, mais aussi les variations de l'environnement.

Une comparaison entre des rivières de Costa Rica sous un climat "Af" et des rivières de Colombie qui, bien que dans la zone tropicale, sont sous un climat "Cf" en raison de l'altitude, montre un écoulement plus faible pour les rivières colombiennes et une tendance vers deux maximums. Les rivières colombiennes toutefois ont des charges élevées et transportent plus de sédiments que les rivières de Costa Rica parce que le débit des sédiments augmente très rapidement avec une faible augmentation du débit des eaux (fig. 2). Les activités agricoles combinées aux fortes pentes pourraient expliquer les transports élevés des sédiments en Colombie. Les plus

grands transports de sédiments qui ont été observés dans les stations de mesure d'aval des bassins des rivières Magdalena, Cauca et Saldana peuvent aussi résulter des activités agricoles plus importantes dans les parties inférieures du bassin.

La rivière Reventazon au Costa Rica montre aussi, d'une manière inattendue, de grandes augmentations dans la charge en sédiments en avril et en décembre à cause des récoltes de canne à sucre et de café. La rivière Acequia au Venezuela montre la même relation entre la charge en sédiments et le débit que les rivières du Costa Rica, mis à part le fait que le niveau d'étiage commence en décembre.

Pour les rivières appartenant au groupe climatique "Aw", les rivières du Costa Rica ont un plus grand écoulement et ordinairement une charge plus importante en sédiments que les rivières de Thaïlande et du Mexique, mais la forme en cloche de la courbe donnée sur la figure 2 est semblable.

Dans le groupe climatique "Cwa", les rivières de Thaïlande, d'Argentine et du Mexique ont une distribution similaire des débits, mais en Argentine beaucoup de rivières transportent des charges en suspension extrêmement élevées. Cette augmentation doit être le résultat de facteurs de l'environnement. Suivant R. CASANOVA et H. DALLA SALVA (1984), les vitesses d'érosion extrêmes dans le bassin de la rivière Bernejo en Argentine résultent de la déforestation et du pâturage de grands troupeaux de moutons, de chèvres et de lamas sur des terrains en forte pente. En outre, les pluies torrentielles dans les régions semi-arides sur des terrains fort inclinés provoquent des écoulements boueux qui contribuent beaucoup à fournir le matériau transporté par les rivières.

## III. ORDRE DE GRANDEUR DES CONCENTRATIONS MOYENNES DE SEDIMENTS PENDANT L'ANNEE

Les variations de débit et de charge transportée pendant l'année entraînent des variations saisonnières de concentration. En conséquence, la concentration de la charge en suspension peut être mise en relation avec le régime hydrologique. Les valeurs moyennes mensuelles maximums de charge et de débit sont représentées avec une échelle logarithmique sur les figures 5 et 6. Une ligne droite est dessinée entre les extrêmes mensuels. Les concentrations de sédiment en suspension sont aussi indiquées sur les diagrammes en parts par million (ppm), unité qui est l'équivalent à celle de mg/l. Les mêmes rivières sont considérées sur les figures 2 à 6. La moyenne maximum de charge en suspension est supérieure à 100 tonnes par km<sup>2</sup> et la concentration moyenne mensuelle maximum est plus grande que 250 ppm dans toutes les rivières choisies pour représenter les climats "Af". Il est tout à fait clair sur la figure 5 que la concentration dans les rivières colombiennes est élevée par rapport à celle des rivières du Costa Rica.

La concentration moyenne mensuelle maximum est très élevée, supérieure à 1000 ppm dans la majorité des rivières s'écoulant sous les climats "Cwa" et "Cs", dans les rivières italiennes sous le climat "Cfa" et sous le climat "Df". Les concentrations maximum moyennes varient dans de larges limites dans les climats "BS". Dans la plupart des cas, sous les climats "Dfc" et "Dwc", les concentrations moyennes maximum sont très basses et n'atteignent pas 100 ppm.

Les rivières du Lesotho dans le climat "Cfb", paraissent plus proches des rivières du climat "Cwa". Il nous paraît possible que la carte climatique attribuant au Lesotho le climat "Cfd" soit erronée.

#### IV. VARIATIONS CONJOINTES DU DÉBIT ET DE LA CHARGE EN SÉDIMENTS AU COURS DE L'ANNÉE

##### A. Diagrammes associant débit et charge en sédiments

La relation du débit et de la charge en suspension pendant l'année est illustrée par les diagrammes donnant les valeurs moyennes mensuelles de lame d'eau écoulée selon l'axe des X et les valeurs moyennes de charge en sédiments selon l'axe des Y (figures 7 et 8). Les boucles que montre cette figure, illustrent la tendance saisonnière dans la covariation débit/charge en sédiments pendant l'année. Il est possible d'observer la direction du temps dans ces courbes car les nombres indiquent les mois de l'année en commençant par le mois de janvier (= 1).

##### B. Sélection de rivières représentatives des différents climats

Les 1058 rivières de la base de données ont été réparties suivant les groupes climatiques (cf. tableau 1). Pour déterminer l'appartenance à chaque groupe climatique, les boucles montrant les relations débit/charge en sédiments ont été construites pour toutes ces rivières. Après un examen soigneux de l'allure de ces boucles, deux courbes de pays différents furent choisies pour chaque groupe climatique, courbes qui, d'après une estimation subjective, peuvent être considérées comme représentant deux variétés typiques pour le groupe climatique considéré.

##### C. Caractéristiques des boucles unissant le débit et la charge en sédiments sous les différents climats

"Af": Dans le climat "Af" du Costa Rica, les boucles unissant le débit et la charge en suspension ont une disposition anti-horlogique ouverte avec le maximum du transport de sédiments en décembre, soit à la fin de la saison des pluies, et le minimum en mars. Le bassin de drainage du Telire est couvert de végétation naturelle. Il est situé dans une réserve forestière et l'agriculture ne peut

pas être l'origine des variations annuelles de la relation unissant le débit et la charge en suspension. Une explication possible de l'allure anti-horlogique de la boucle est le niveau élevé de la nappe aquifère à la fin de la saison des pluies. Si une pluie survient à ce moment, le sol est rapidement saturé et l'écoulement en surface, de même que l'érosion, sont alors considérables.

Les rivières du climat colombien "Cf" ont des écoulements plus faibles qu'au Costa Rica et présentent d'habitude des boucles horlogiques avec 2 pics. Toutes les rivières colombiennes ont des débits maximums en octobre-décembre et des étiages en août-septembre. La majorité des rivières ont un second pic en mai et un minimum en janvier-février. Quelques rivières n'ont pas ce second maximum mais un pic de sédiments en février-avril, ce qui pourrait indiquer des activités agricoles.

"Aw" et "Cwa": Des rivières dans les climats "Aw" ont des boucles étroites et principalement horlogiques, c'est-à-dire qu'elles montrent peu de variations en concentration au moment de l'élévation et de la chute des débits. La rivière Paute en Equateur a une relation débit/charge en sédiments qui consiste en deux courbes présentant des concentrations tout à fait différentes. Les rivières dans les climats "Cwa" ont aussi principalement des courbes horlogiques, plutôt étroites mais il existe des exemples de types plus ouverts, spécialement en Argentine. Quand l'écoulement est faible, la boucle donne une impression moins ouverte qu'elle ne l'est en réalité.

"Cs": Les rivières qui s'écoulent sous les climats "Cs" ont des boucles ouvertes de sens horlogique, c'est-à-dire qu'elles montrent de très grandes différences en concentration pendant les différents mois, même si le débit est le même. Il est plus facile d'expliquer une boucle horlogique qu'une boucle anti-horlogique. Après la période sèche, en été, la couverture végétale est discontinuée et les agrégats du sol sont altérés. L'écoulement de surface peut nettoyer le matériel disponible sur le sol. Le matériel qui a été déposé dans les lits des cours d'eau est remis en mouvement lorsque le débit augmente après une période sèche. Les hautes intensités de précipitations au début de la saison des pluies peuvent fournir une explication supplémentaire.

Le maximum se trouve d'habitude dans un des mois entre décembre et février. Quelques rivières en Italie montrent une diminution du débit des sédiments en décembre, avant le maximum de janvier ou de février. Les rivières de l'Iran ont un maximum plus tardif que celles d'Italie, de Grèce et des USA. Il y a trop peu de rivières sous le climat "Ds" pour tenter des généralisations.

"Cfa": Les rivières sous le climat "Cfa" présentent des boucles liant débit et charge en sédiments qui sont parfois très irrégulières, avec un second pic en novembre-décembre. Les courbes qui peuvent être soit de sens

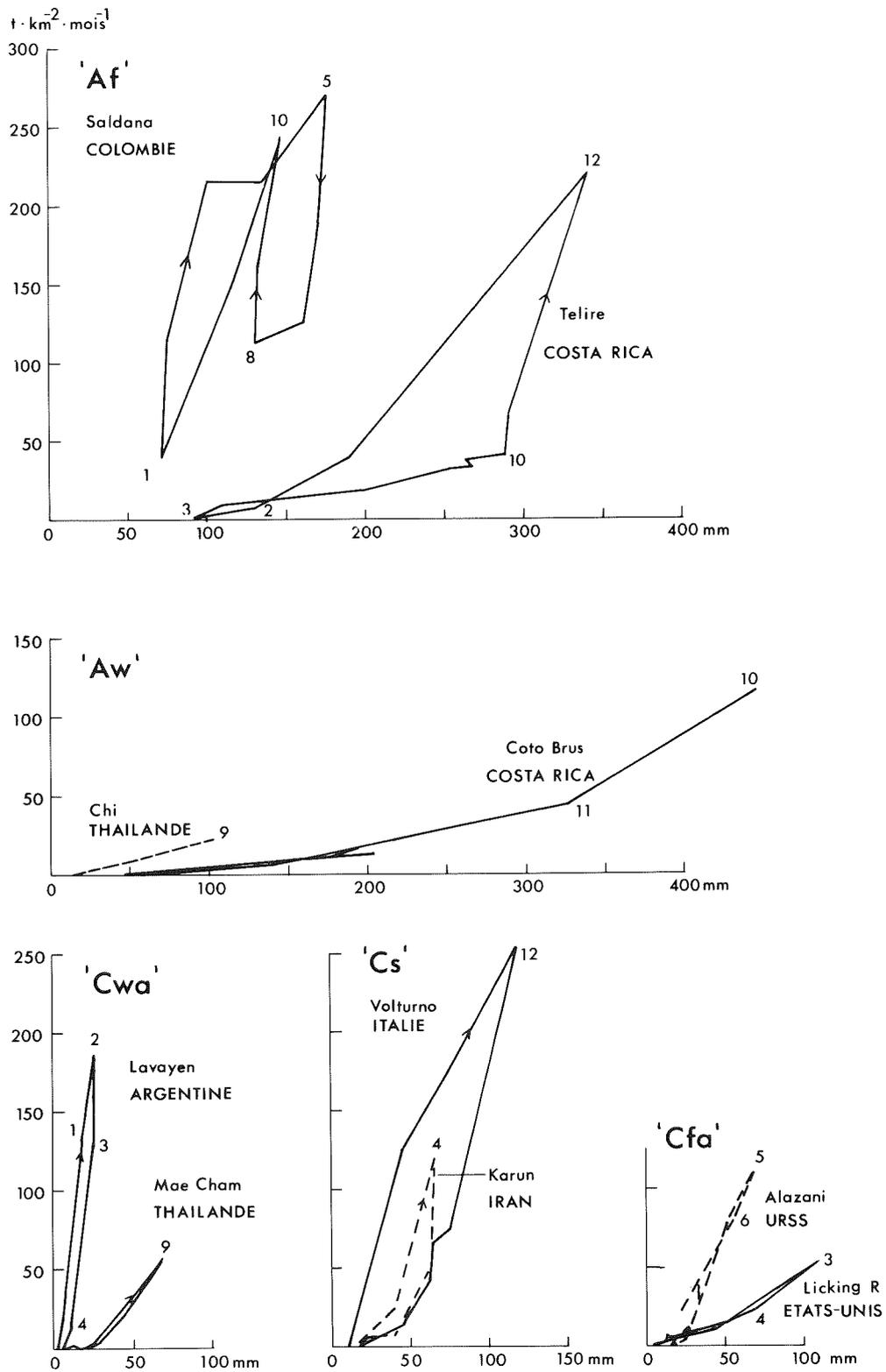
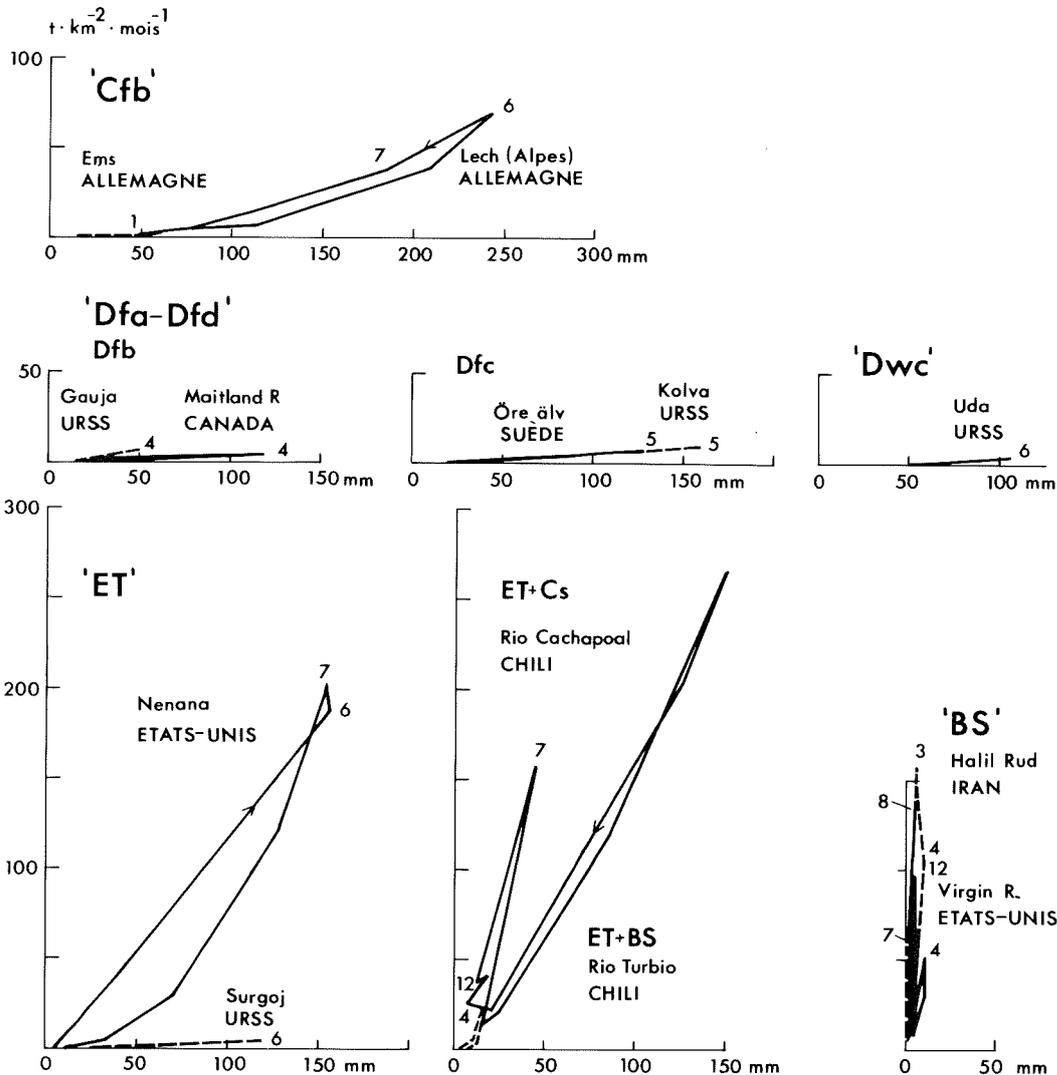


Figure 7. Courbes caractéristiques des relations débits/transport en sédiments pour différents groupes climatiques. La lame d'eau écoulee mensuelle moyenne est donnée en abscisse et les transports moyens en sédiments en ordonnée. Les numéros des mois (1= janvier) sont indiqués pour montrer la direction de variation des courbes.



**Figure 8.** Courbes caractéristiques des relations débits/transport en sédiments pour différents groupes climatiques. La lame d'eau écoulée mensuelle moyenne est donnée en abscisse et les transports moyens en sédiments en ordonnée. Les numéros des mois (1= janvier) sont indiqués pour montrer la direction de variation des courbes.

horlogique, soit anti-horlogique, s'appliquent à quelques rivières d'Italie et d'URSS. Dans des petites rivières d'Italie, les variations de concentration peuvent être plutôt grandes entre les différents mois. Autrement, les boucles sont étroites. Le pic principal est de février-mars en Italie et aux USA et en avril-juin en URSS.

**"Cfb"**: Les données de 62 stations de mesure en Allemagne de l'Ouest constituent une partie importante des données se rapportant au climat "Cfb". Les boucles dans ce climat "Cfb" sont plus ou moins étroites et

quelques-unes sont irrégulières. Un grand nombre de boucles ont aussi bien un sens horlogique qu'anti-horlogique. Généralement, le plus haut débit est enregistré en hiver au cours des mois de janvier-avril. En URSS et en Suède, il y a aussi un petit pic en novembre-décembre et un minimum en janvier-février quand le sol est gelé. En Allemagne de l'Ouest méridionale, les crues se produisent tôt en été. Les rivières dans le sud de l'Allemagne s'écoulent depuis les Alpes, tout comme les tributaires du Danube; elles ont habituellement des boucles anti-horlogiques qui sont plus ouvertes. Les boucles des

rivières de Yougoslavie ont des allures complexes, se présentant comme des 8 couchés.

“Dfa” à “Dfd” et “Dwc”: La base de données des rivières du groupe climatique “Dfa-Dfd” est considérable, totalisant 245 stations, mais elle comprend trop peu de rivières s’écoulant sous le climat “Dfa”, pour pouvoir présenter une généralisation de ce climat. Dans les climats “Dfb” et “Dfc”, les boucles sont très étroites et de sens horlogique excepté dans les hautes montagnes où les boucles sont souvent anti-horlogiques et plus ouvertes. Dans les Alpes de Transylvanie, les Carpathes de Roumanie et d’URSS, la majorité des boucles sont ouvertes et de sens anti-horlogique. La même allure a été trouvée pour les rivières du Caucase mais celles-ci sont classées comme appartenant au climat “Df” parce que les régions basses ont un climat de type C. Une explication de la boucle anti-horlogique ouverte de ces montagnes pourrait être que la fonte des neiges est suivie d’une période pluvieuse entraînant une érosion considérable. MARUSZAK (1984) mentionne que la grande intensité de l’érosion mécanique des Carpathes polonaises dépend des grandes précipitations qui occasionnent des débordements d’été (DYNOWSKA, 1972). Le maximum d’été des sédiments transportés en suspension est le plus fortement marqué dans les Carpathes occidentales tandis que ce maximum est clairement déplacé vers la période de printemps dans la partie orientale où le maximum est moins prononcé. Toutes les boucles dans le groupe climatique “Dwc” sont aussi de sens horlogique excepté pour une boucle entrelacée. Dans les régions où les pluies de moussons contribuent à l’écoulement de juin-août après la fonte des neiges, la concentration en sédiments reste faible.

“ET”: Des rivières dans le nord de l’URSS et l’Asie centrale soviétique ont des boucles horlogiques étroites avec un maximum peu marqué de sédiments en juin. Le bassin de la rivière Nenana en Alaska inclut un glacier, et celui-ci donne naissance à une charge élevée en sédiments et une boucle ouverte (fig. 8). La figure 8 montre aussi des boucles qui caractérisent les régimes complexes du Chili dont le climat principal est le climat “ET”. Les pics maximums de ces régions sont observés en janvier, c’est-à-dire en été. Une relation tout à fait différente entre le débit et les sédiments est observée dans la seconde augmentation de débit qui se produit en hiver lorsque la source de l’écoulement est un climat “Cs”.

“BS”: Comme on peut le voir sur ce diagramme, un écoulement élevé n’est pas nécessaire pour transporter les charges plutôt élevées en sédiments (fig.8). Dans ce climat, la majorité de l’écoulement doit se produire en surface et non en profondeur. Dans quelques rivières, la charge et l’écoulement sont quasi nuls après chaque période de transport de sédiments, et donnent un diagramme débit/sédiment ressemblant à des doigts. Dans la majorité des cas, les hautes eaux comprennent quelques

mois de la saison des pluies et les boucles présentent un sens horlogique.

## V. REMARQUES FINALES

Comme nous l’avons vu au cours de cette revue des caractéristiques des régimes hydrologiques et des variations annuelles de la charge en sédiments, il y a des ressemblances et des différences dans ces régimes sous les différents climats et ce, aussi bien en ce qui concerne le total que la distribution saisonnière des débits et de la charge. Le régime du transport des sédiments suit d’habitude le régime du débit mais la relation entre la quantité d’eau et la quantité de sédiments varie avec le climat. La charge en sédiments est élevée dans les rivières sous climat à pluies tropicales et sous des climats “Cs”, à régime pluvial océanique. La charge en sédiments peut aussi être considérable dans les régimes aride/semi-aride, mais les variations entre les rivières sont importantes. Les rivières de régime nival ont des charges en sédiments extrêmement faibles, sauf pour les rivières coulant en montagne.

Des conclusions concernant l’allure des boucles représentant les variations des débits et de la charge en sédiments au cours de l’année ont été tirées pour les différents groupes climatiques. Ces boucles peuvent être utilisées pour indiquer les environnements sous lesquels il est intéressant de dessiner des courbes de la variation saisonnière de charge en sédiments. Dans ces climats ou environnements qui ont des boucles ouvertes, il est spécialement important de calculer des régressions différentes pour les différentes saisons. Dans d’autres environnements, il n’est pas nécessaire d’établir plusieurs régressions différentes.

## REMERCIEMENTS

L’auteur remercie très vivement le Professeur Ake SUNDBORG pour ses encouragements et ses commentaires constructifs. Sa gratitude va aussi au Dr. Frédéric FOURNIER qui lui a inspiré une partie de cette publication en lui montrant un article non publié sur les relations entre les débits mensuels des rivières et la charge en sédiments. L’aide de Anne Greta OSTERMAN a été, par ailleurs, hautement appréciée.

## REFERENCES

- ALEXANDERSSON, H., 1982. *Climates of the earth. Köppen classification.* (Carte non publiée conservée à l’Université d’Uppsala).
- BLENCH, T., 1969. *Mobile-bed fluviology. A regime theory treatment of canals and rivers for engineers and hydrologists*, 2nd ed. Edmonton, 168 p.

- CASANOVA, R. and DALLA SALVA, H., 1984. Erosion en la alta cuenca del Rio Bermejo. *Sedimentologia fluvial, agua y energia eléctrica S.E.* (report): 1-13.
- DYNOWSKA, I., 1972. Types of river regimes in Poland. 2nd report of the IGU Commission on the International Hydrological Decade. *Freiburger Geografische Hefte*, Heft 12.
- FERGUSON, R. I., 1986. River loads underestimated by rating curves. *Water Resour. Res.* 22 (1): 74-76.
- HICKIN, E. J. 1983. River channel changes: retrospect and prospect. *Spec. Publ. Int. Ass. Sediment.* 6: 61-83.
- JANSSON, M. B., 1982. Land erosion by water in different climates. *UNGI Rapp.* 57, 151 p.
- JANSSON, M. B., 1985a. Sediment rating curves of the Ijusnan at Funäsdalen. *Beiträge zur Hydrologie Sonderheft* 5 (1): 219-233.
- JANSSON, M. B., 1985b. A comparison of detransformed logarithmic regressions and power function regressions. *Geogr. Ann.* 67A (1-2): 61-70.
- JANSSON, M. B., 1988. A global survey of sediment yield. *Geogr. Ann.* 70A (1-2): 81-98.
- KÖPPEN, W., 1936. Das geografische System der Klimate. In: KÖPPEN, W. and GEIGER, R. *Handbuch der Klimatologie*. Band 1, Teil C, 1-44.
- MARUSCZAK, H., 1984. Spacial and temporal differentiation of fluvial sediment yield in the Vistula river basin. *Geographica Polonica* 50: 253-269.
- MEADE, R. H. and PARKER, R. S., 1985. Sediments in rivers of the United States. *US Geol. Surv. Water Supply Pap.* 2275: 49-60.
- PARDE, M., 1947. Fleuves et rivières. 2e éd., Armand Colin, Paris, 224 p.
- ROOSE, E., 1977. Application of the Universal Soil Loss Equation of Wischmeier and Smith in the West Africa. In: *Soil conservation and management in the humid tropics*. GREENLAND, D. J. & LAL, R. (Ed. Scient.), John Wiley, Chichester.
- STARKEL, L., 1983. The reflection of hydrologic changes in the fluvial environment of the temperate zone during the last 15,000 years. In: *Background to Paleohydrology*. GREGORY K. J. (Ed. Scient.), John Wiley & Sons Ltd, 213-233.
- UNESCO and IAHS, 1974. Gross sediment transport into the oceans. SC. 74/WS/33, Paris. 6p.