

CENTRE DE
LA GUADELOUPE

-- *** --

ETUDE DU TRANSPORT SOLIDE

DU BRAS DAVID

.. *** ..

par

Patrick Danart

Pointe-à-Pitre, mai 1990

1 Caractéristiques morphologiques

1.1 Caractéristiques physiographiques

1.2 Sédimentologie

REPRENDRE LE TABLEAU 4 DE DUGAS pour utilisation dans l'estimation du charriage

2 Caractéristiques hydrologiques

2.1 Régime pluviométrique

2.2 Régime hydrologique

2.2.1 Données de base

Les débits instantanés ont été déterminés par traduction des hauteurs d'eau relevées aux limnigraphes de type OTT X des deux stations suivantes :

Nom	Période d'observation	Nombre d'années complètes	Superficie du bassin versant (km ²)	altitude (m)	débit moyen annuel (m ³ /s)
Duclos	03/1973-08/1987	13	37.5	110	3.49
Cote 130	04/1982-	8	33.2	130	3.30

La station de la cote 130, située en rive droite juste en amont du seuil, est en service actuellement. Le barème d'étalonnage hauteur à l'échelle - débit, déterminé par jaugeages, est le suivant :

Hauteur (cm)	10	20	50	100	150	200	250	300
Débit (m ³ /s)	0.65	2.46	13.9	50	120	220	350	540

Le rapport 0.89 des superficies des deux bassins versants du Bras David à la cote 130 par rapport à celui de Duclos comparé au rapport 0.95 de leurs modules interannuels, indique que l'essentiel des apports en période de crue se fait en amont de la cote 130. Les valeurs de Duclos, bien que légèrement supérieures, seront utilisées de 1974 à 1982 sans correction pour la reconstitution du transport en suspension, cette approximation allant dans le sens de la sécurité.

2.2.2 Débits moyens mensuels

Le module interannuel d'écoulement à la station de la cote 130, établi sur la période de fonctionnement d'avril 1982 à décembre 1990, a été estimé à 3.20 m³/s, pour une distribution mensuelle donnée ci-dessous :

Débits moyens mensuels en m³/s à la cote 130

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2.95	2.05	1.99	2.00	3.10	3.00	3.20	3.68	4.79	4.14	5.32	3.29
0.92	0.64	0.62	0.63	0.97	0.94	1.00	1.15	1.5	1.3	1.66	1.03

première ligne : débits moyens mensuels calculés

deuxième ligne : rapport du débit moyen mensuel au module interannuel

La distribution mensuelle des débits naturels à Duclos sur la période 1951-1980, avant que ne soit mis en service le prélèvement d'eau en amont de la station, a pu être déterminée à partir des données recueillies et par reconstitution à partir des stations de Prise d'Eau et de la Traversée sur la Grande Rivière à Goyaves.

Les régressions utilisées sont : $Q_{\text{Duclos}} = 0.71 Q_{\text{Prise}} - 0.01$ de janvier 1951 à mars 1973, en août 1973, en septembre et octobre 1979, et $Q_{\text{Duclos}} = 2.48 Q_{\text{Traversée}} + 0.15$ en août 1979. Le module interannuel est de $3.40 \text{ m}^3/\text{s}$.

Débits moyens mensuels en m^3/s
et coefficients d'hydraulicité à Duclos entre 1951 et 1980

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2.91	2.35	2.04	2.30	3.36	3.66	3.99	4.28	3.99	4.13	4.23	3.66
0.86	0.69	0.60	0.68	0.99	1.08	1.17	1.26	1.17	1.21	1.24	1.08

première ligne : débits moyens mensuels calculés

deuxième ligne : rapport du débit moyen mensuel au module interannuel (coefficient d'hydraulicité)

2.2.3 Répartition interannuelle des crues

Les débits instantanés maximaux annuels relevés à Duclos jusqu'en 1982, puis à la cote 130, sont donnés dans le tableau suivant :

Débits de pointe maximaux annuels en m^3/s

Année	Débit m^3/s	Année	Débit m^3/s	Année	Débit m^3/s
		02/01/1980	158	24/11/1987	329
31/08/1974	400	07/09/1981	354	16/08/1988	186
20/05/1975	250	19/11/1982	460	17/09/1989	343
05/10/1976	280	01/01/1983	199	11/10/1990	361
21/09/1977	185	08/11/1984	347		
27/09/1978	296	27/09/1985	259		
29/08/1979	392	16/11/1986	547		

Après ajustement des principales lois hydrologiques à cet échantillon, la loi de Pearson III a été retenue et fournit les valeurs ci-dessous des périodes de retour des maximums annuels :

Ajustement des débits de pointe maximaux annuels

Période de retour en années	2	5	10	20	50	100
Débit en m^3/s	299	396	457	512	580	630

Le maximum enregistré de $547 \text{ m}^3/\text{s}$ le 16 novembre 1986 correspond à un maximum annuel de période de retour de l'ordre de 30 ans, et la crue maximale, pendant laquelle le transport solide a été observé, le 11 octobre 1990, à une période de retour de 3 ans.

2.2.4 Répartition saisonnière des crues

Les crues supérieures à $50 \text{ m}^3/\text{s}$ observées à Duclos de janvier 1974 à décembre 1982 et à cote 130 de janvier 1983 à décembre 1990, se répartissent selon l'année comme suit :

Répartition des crues supérieures à $50 \text{ m}^3/\text{s}$

Classe en m ³ /s	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total	moy.
50-74	7	2	3	7	8	9	7	13	9	12	12	7	96	5.6
75-99	5	3	1	3	9	2	5	5	9	11	7	8	68	4.0
100-149	1	1 (105)			3	4	1	5	6	8	11	9	49	2.9
150-199	3 (199)		2 (185)	1	4	3	2	5	1	6	10	1	38	2.2
200-299				1 (236)	3	2	1 (263)	1	4	2	4		18	1.1
300-399					1 (328)	1 (342)		1	2 (354)	1 (361)	3	2 (358)	11	0.6
400-								1 (400)			2 (547)		3	0.2
Total	16	6	6	12	28	21	16	31	31	40	49	27	283	16.7
moyenne	0.9	0.4	0.4	0.7	1.7	1.2	0.9	1.8	1.8	2.4	2.8	1.6	16.7	

Les chiffres entre parenthèses représentent le débit maximum observé pour le mois considéré (en m³/s)

2.2.5 Distribution des débits instantanés

Les débits aux stations de Duclos de mars 1973 à décembre 1982 et de la cote 130 de janvier 1983 à décembre 1990, complétés par ceux relevés à Duclos le 16 novembre 1986, permettent d'établir les classes ci-dessous :

Répartition des durées d'écoulement et des volumes par classes de débits

Classe de débit (m ³ /s)	temps (mn)	% du temps total	Volume écoulé (million de m ³)	% du volume total
0-5	8 205 374	88.27	1040.6	53.16
5-10	661 558	7.12	268.0	13.69
10-15	178 982	1.93	128.2	6.55
15-20	92 603	1.00	92.2	4.70
20-30	77 473	0.83	128.7	6.57
30-50	43 672	0.47	94.2	4.81
50-100	25 866	0.28	102.9	5.26
100-200	8 311	0.09	65.8	3.36
200-300	1 793	0.02	25.0	1.28
300-400	454	0.00	9.1	0.47
400-550	108	0.00	2.9	0.15
Total	9 296 196		1957	
Total débits > 50 m ³ /s	36 532	3.93	206	10.5
Total débits > 200 m ³ /s	2 355	0.02	37	1.89

3 Estimation du transport en suspension

3.1 Description du site de prélèvement

[dessin du site]

Les prélèvements de matière en suspension ont été effectués à la cote 130. Seule la rive gauche est accessible en période de crue. Le lit est limité en rive droite par une falaise, en rive gauche par une berge de pente moyenne. La rivière est barrée par un seuil de prise en béton, utilisé pour prélever un débit de l'ordre de 3 millions de m³/an. La canalisation est accessible par un regard situé en rive gauche.

L'ORSTOM dispose sur le site de différents appareils de mesure : un limnigraphe de type OTT X en rive droite depuis avril 1982, une plateforme hydrologique PH 18 permettant la télétransmission des hauteurs d'eau observées, un pluviographe de type OEDIPE, et un dispositif de jaugeage par téléphérique permettant l'étalonnage des hautes eaux.

3.2 Méthodes de prélèvement

Les prélèvements ont été effectués de deux manières :

- au saumon pour la crue du 25 octobre 1990, par pompage à partir de la rive gauche selon différents profils verticaux, en surface et en profondeur. Chaque prise d'échantillon est précédée par un rinçage du tuyau, et deux prélèvements sur une même verticale sont séparés par un laps de temps d'environ 3 minutes. Les verticales sont situées à 10, 15 et 20 m de la rive gauche, les points de prélèvement situés au 1/3 et aux 2/3 de la hauteur.

- au moyen d'un seau en rive gauche pour toutes les autres crues, sauf pour celle du 11 octobre 1990, les prélèvements ayant été effectués de 9h33 à 12h03 dans le regard de la prise d'eau, le passage de nombreux troncs et branchages rendant impossible le prélèvement direct en rivière ou par pompage. Le contenu des seaux est ensuite homogénéisé avant versement dans les bidons de stockage, ceci afin d'éviter la décantation des grosses particules.

3.3 Hétérogénéité spatiale des mesures

Des comparaisons selon l'emplacement et la profondeur du prélèvement ont été effectuées dans le cas de faibles débits.

Crue du 13 avril 1989 - Mesures effectuées au seau

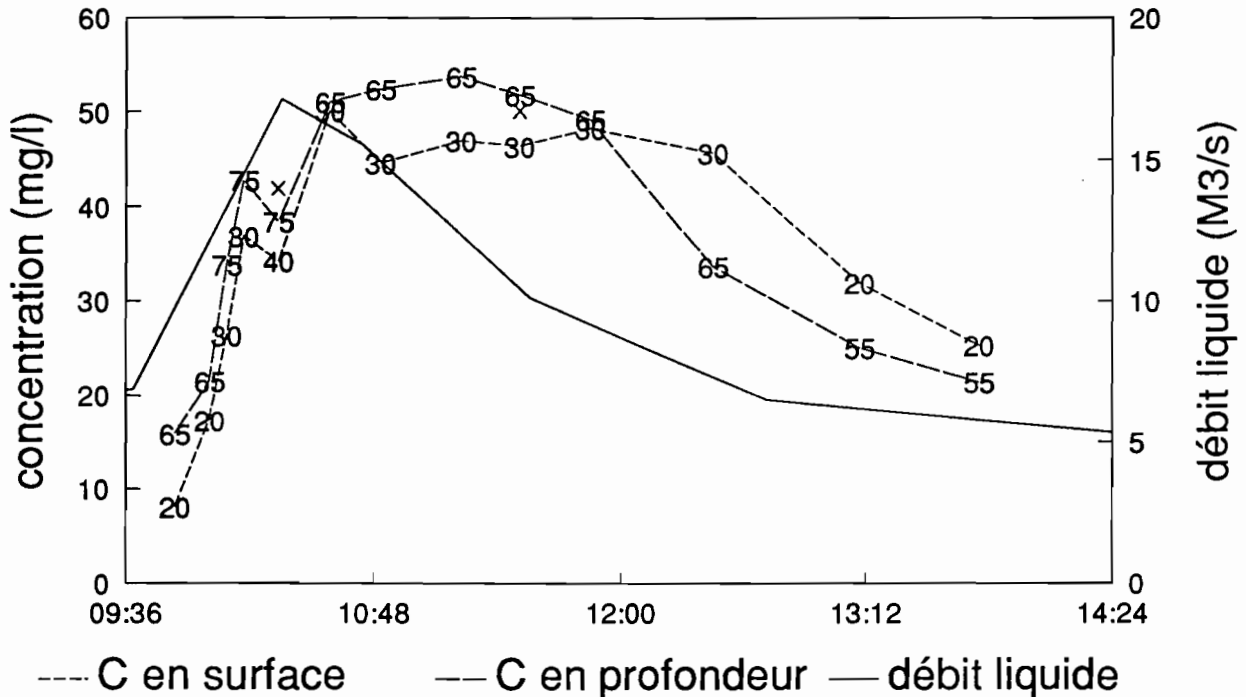
Emplacement	Hauteur	Débit (m ³ /s)	Concentration mg/l
Rive droite	surface	5.4	5.4
	mi-profondeur		5.6
	fond		12.5
Centre	surface	6.0	6.3
	mi-profondeur		6.4
	fond		5.7
Rive gauche	surface	7.0	7.0
	mi-profondeur		7.0
	fond		9.4
Trou d'homme		7.2	5.9

Crue du 25 octobre 1990 Mesures effectuées au saumon, en montée et descente de crue

Emplacement	Hauteur	Débit m ³ /s	Concentration mg/l
Rive gauche	surface	9.73	8.15
	fond		15.9
Centre	surface	12.11	17.3
	fond		21.5
Rive Droite	surface	13.3	26.3
	fond		33.8
Centre	surface	14.49	36.9
	fond		42.8
Rive gauche	surface	16.86	34.2
	fond		38.4
	mesure au seau		41.9
Centre	surface	16.17	50.1
	fond		51.1
Rive droite	surface	14.94	44.6
	fond		52.4
Centre	surface	12.35	47
	fond		53.8
Rive gauche	surface	10.44	46.4
	fond		51.8
	mesure au seau		50.1
Centre	surface	10.10	48.3
	fond		49.2
Rive droite	surface	9.18	45.7
	fond		33.7
Centre	surface	6.20	31.9
	fond		25
Rive gauche	surface	5.79	25.3
	fond		21.4

crue du 25/10/90

mesures de concentrations effectuées au saumon



les chiffres sur les courbes indiquent les profondeurs de prélèvement par rapps
 les croix représentent deux prélèvements effectués au seau en rive gauche

3.3.1 Influence du lieu de prélèvement

Au vu des deux tableaux précédents, aucune dispersion sensible des concentrations mesurées n'a été mise en évidence, selon que l'on effectue les prélèvements en rive gauche, au centre ou en rive droite. Il est probable que le caractère torrentiel de la rivière, surtout lors des fortes crues, assure par l'effet de la turbulence une homogénéisation transversale des concentrations dans le courant principal. Des variations ponctuelles peuvent exister sous la forme de "bouffées" passagères de matière en suspension. Cependant les prélèvements effectués de 5 à 15 mn d'intervalle n'ont pas mis en évidence de tels phénomènes pouvant entraîner des écarts importants entre les quantités mesurées. Les prélèvements en rive gauche, seule accessible lors des crues, seront donc considérés comme représentatifs de l'ensemble de la section.

La taille des sédiments transportés est fonction de la vitesse du courant. Les échantillons ont donc été prélevés en rive gauche aussi près que possible du courant principal, à une vingtaine de mètres à l'amont du seuil, hors de l'influence d'un ruisseau moins chargé en matière en suspension arrivant 40 m en amont.

3.3.2 Influence de la profondeur de prélèvement

3.3.2.1 Considérations théoriques

Une particule en suspension dans un fluide est soumise à plusieurs actions :

- la pesanteur, amenant la sédimentation
- la vitesse horizontale du fluide, assurant le transport
- la turbulence du fluide, assurant le mélange

L'échelle des processus turbulents va des gros tourbillons très énergétiques de dimension pouvant atteindre le mètre, notamment à l'aval des rochers, jusqu'aux tourbillons microscopiques inférieurs à 100 μm (échelle de Kolmogorov). Une particule suffisamment petite verra les effets gravitaires négligeables par rapport aux effets turbulents et se mélangera bien dans le fluide, inversement une particule plus grosse, bien que soumise aux tourbillons les plus importants, aura tendance à sédimenter sous l'influence de la gravité.

Une particule ne sera pas soumise aux effets gravitaires si son temps de réponse à une sollicitation turbulente est inférieur à l'échelle de temps d'autocorrélation du fluide. On montre que dans l'eau ceci correspond à des diamètres de l'ordre de 100 μm [1]. En dessous de cette valeur, les concentrations pourront être considérées en moyenne comme homogènes verticalement.

En revanche, pour les tailles supérieures à cette limite, les concentrations mesurées dépendront de la profondeur de prélèvement.

3.3.2.2 Interprétation des mesures

Deux échantillons prélevés au seau en subsurface lors de la crue du 11 octobre 1990, le premier en montée de la première crue ($Q_{\text{max}} = 332 \text{ m}^3/\text{s}$), le second en montée de seconde crue ($Q_{\text{max}} = 182 \text{ m}^3/\text{s}$), ont donné les résultats suivants :

Crue du 11 octobre 1990 Analyses granulométriques

Diamètre des particules	1 ^{ère} crue (mg/l)	2 ^{ème} crue (mg/l)
> 10 mm	0.0	0.0
> 5 mm	0.0	0.0
> 2 mm	1.85	9.72
> 1 mm	1.85	-
> 0.5 mm	2.72	5.84
> 0.2 mm	3.13	6.29
> 0.08 mm	19.94	28.48
> 0.05 mm	23.07	15.96
20 μm < < 50 μm	20.0	50.0
2 μm < < 20 μm	405.0	15.0
< 2 μm	135.0	75.0
Concentration totale :	612.6	206.3

Les fractions inférieures à 80 μm correspondent dans ces mesures respectivement à 95% et 76% de la masse totale mesurée. Le premier pourcentage est probablement surestimé, le prélèvement ayant été effectué dans le trou d'homme et une décantation partielle ayant pu se produire dans la canalisation. Comme il a été vu précédemment, les concentrations correspondant à ces fractions peuvent être étendues à l'ensemble de la verticale.

En revanche, une sous-estimation systématique intervient sur les plus grosses particules. Les profils verticaux de concentration adoptés, basés sur l'équation de diffusion turbulente de Schmidt-Rouse [1,5] sont généralement de type puissance ou logarithmique, la différence entre les concentrations en surface et en profondeur étant d'autant plus importante que la masse du sédiment est élevée. Cependant aucune étude spécifique d'un milieu de type torrentiel n'a pu être trouvée dans la littérature.

La taille des sédiments transportés est directement liée à la vitesse du cours d'eau. On peut raisonnablement envisager que les fractions les plus grosses seront faiblement représentées lors des faibles crues. Les concentrations relevées lors de la crue du 25 octobre 1990 indiquent ainsi une différence de l'ordre de 10 à 20 % entre les concentrations en surface et en profondeur, avec une inversion systématique du profil en fin de crue, sans qu'une explication puisse être apportée à ce phénomène. Les mesures effectuées au seau pour comparaison sont de l'ordre de la valeur maximale observée. Aucune correction ne sera donc apportée sur les valeurs mesurées.

En revanche, pour la crue du 11 octobre 1990, les vitesses moyennes de l'ordre de 4.5 m/s sont suffisantes pour assurer le transport par suspension des grosses particules. Les fractions supérieures à 200 µm représentent de l'ordre de 10% de la masse du 2^{ème} échantillon. Des mesures effectuées dans le Missouri River [2] montrent que le rapport surface/fond des concentrations pour les sables peut être de l'ordre de 10. Considérons donc le profil vertical schématique suivant :

- 3/4 supérieurs : concentration mesurée en surface
- 1/4 inférieur : (concentration mesurée en surface)*10

La concentration moyenne sur la verticale pour les fractions considérées devient alors le triple de la valeur de surface. En considérant la fraction supérieure à 200 µm, cela revient à majorer la concentration totale mesurée de 20 %. Cette correction sera adoptée pour l'ensemble des données de la crue du 11 octobre 1990.

3.4 Caractéristiques des crues observées

Cinq crues ont fait l'objet de prélèvements de matière en suspension lors de leur déroulement. Leurs caractéristiques, ainsi que les résultats obtenus, sont donnés ci-dessous.

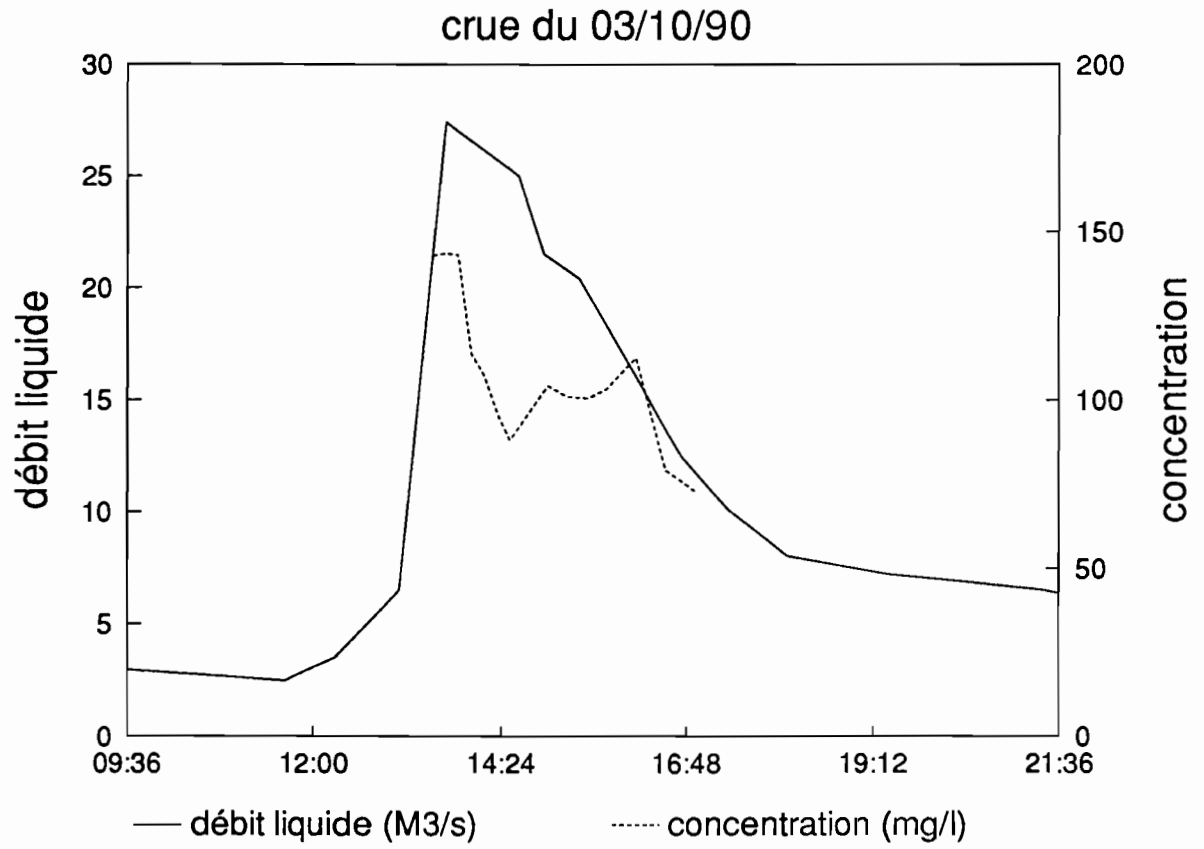
3.4.1 Crue du 19 avril 1989

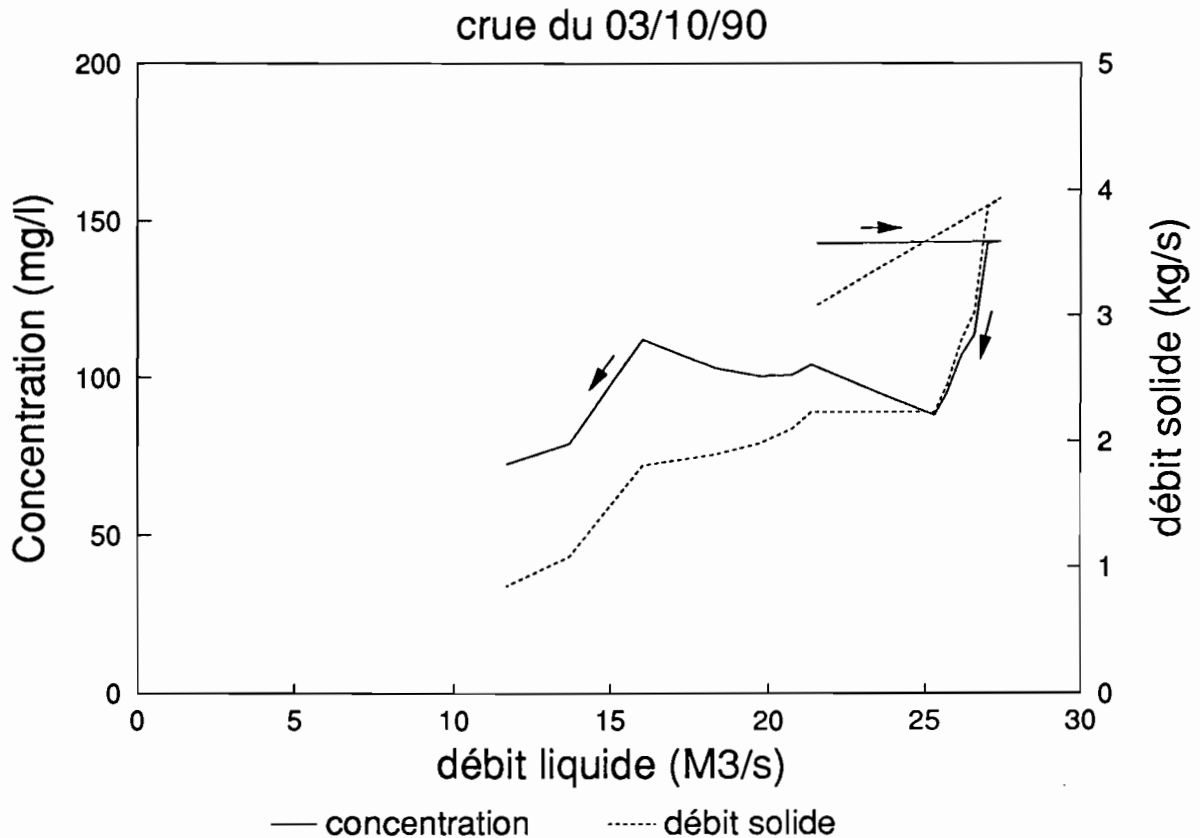
Débit maximum de crue :	m ³ /s
Temps de base :	h mn
Temps de montée :	h mn
Débit initial :	m ³ /s
Débit final :	m ³ /s
Volume écoulé :	million de m ³
Vitesse moyenne maximale :	m/s
Nombre de pointes de crue :	
Heures des maxima de crue :	
Débits m ³ /s :	
Gradient max. de montée de crue m ³ /s/mn :	

3.4.2 Crue du 3 octobre 1990

Débit maximum de crue :	27.4 m ³ /s
Temps de base :	06 h 27 mn
Temps de montée :	02 h 03 mn
Débit initial :	2.46 m ³ /s
Débit final :	8.03 m ³ /s
Volume écoulé :	0.337 million de m ³
Vitesse moyenne maximale :	1.5 m/s
Nombre de pointes de crue :	1
Heures des maxima de crue :	13h40
Débits m ³ /s :	27.4
Gradient max. de montée de crue m ³ /s/mn :	0.58

Les échantillons ont été prélevés en fin de montée de crue et en descente. La concentration maximale relevée est de 143.5 mg/l.



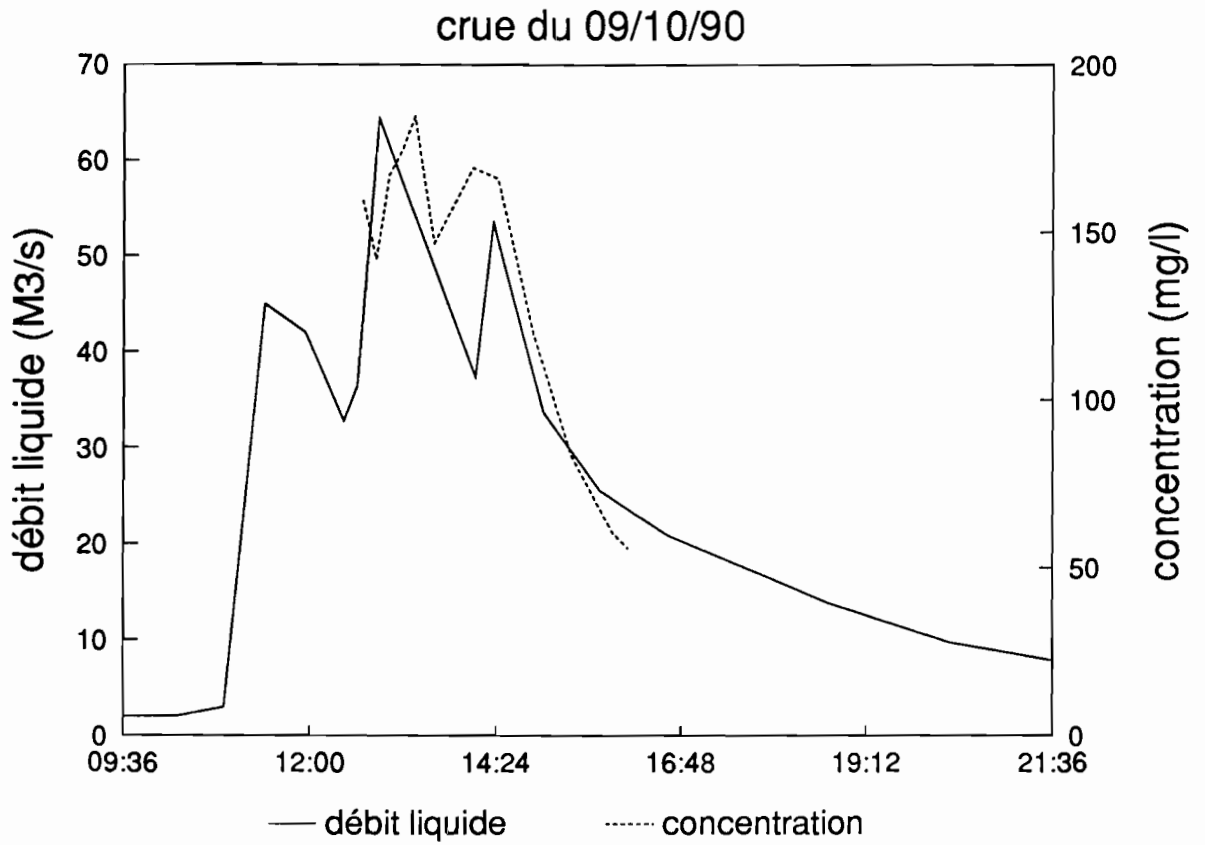


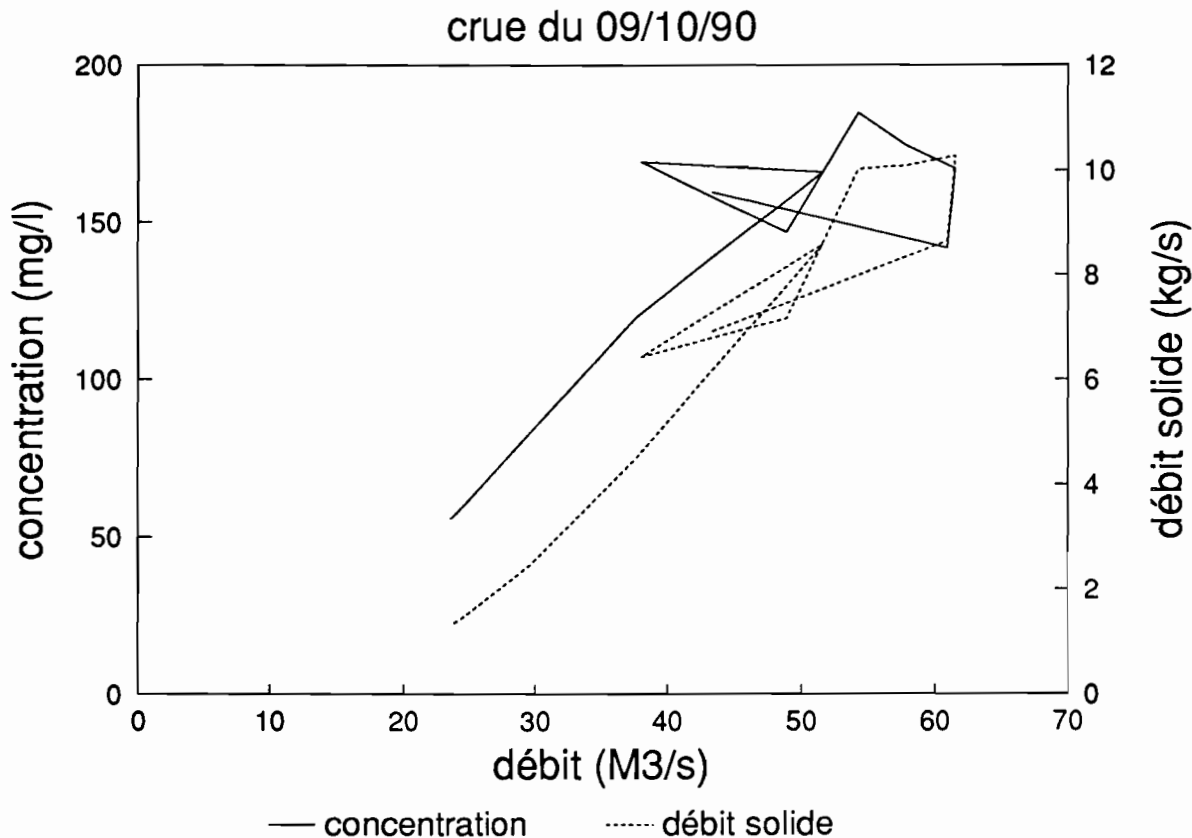
3.4.3 Crue du 9 octobre 1990

Débit maximum de crue :	64.4 m ³ /s
Temps de base :	12 h 13 mn
Temps de montée :	02 h 36 mn
Débit initial :	2.01 m ³ /s
Débit final :	6.51 m ³ /s
Volume écoulé :	1.054 million de m ³
Vitesse moyenne maximale :	2.2 m/s
Nombre de pointes de crue :	1
Heures des maxima de crue :	12h51
Débit maximal m ³ /s :	64.4
Gradient max. de montée de crue m ³ /s/mn :	1.74

La crue se présente comme une crue complexe, comportant 2 pointes secondaires, correspondant à des débits de 45 et 53.6 m³/s. De ce fait, la courbe concentration = f(débit) présente un caractère assez complexe. Les échantillons ont été prélevés à partir de la fin de montée de la crue principale, avec un maximum recueilli de 184.6 mg/l.

Normal.





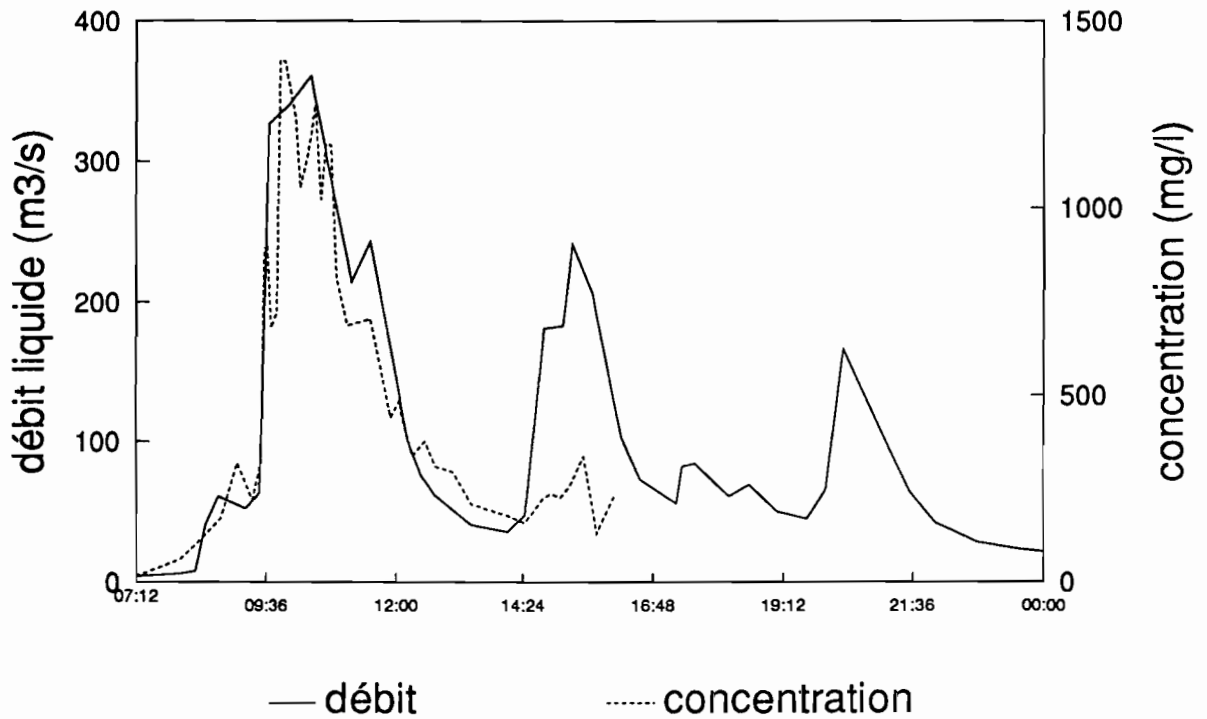
3.4.4 Crue du 11 octobre 1990

Débit maximum de crue :	361 m ³ /s		
Temps de base :	1 j 03 h 18 mn		
Temps de montée :	03 h 33 mn		
Débit initial :	3.49		
Débit final :	8.03 m ³ /s		
Volume écoulé :	6.612 million de m ³		
Vitesse moyenne maximale :	4.5 m/s		
Nombre de pointes de crue :	1	2	3
Heures des maxima de crue :	13h40	15h18	20h19
Débits m ³ /s :	361	241	166
Gradient max. de montée de crue m ³ /s/mn :	22.0	6.33	5.02

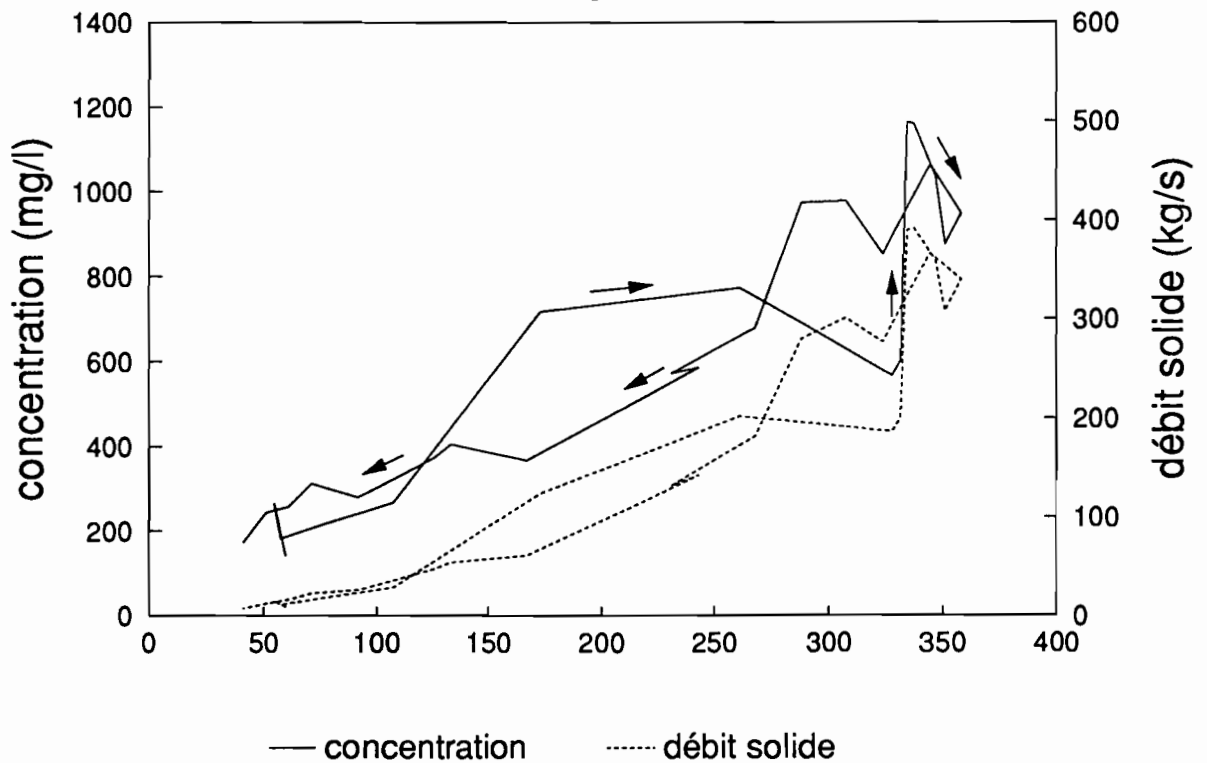
Cette crue constitue le maximum annuel pour 1990. Elle correspond à une pluie journalière enregistrée de 196 mm à Quiok et de 187 mm à Providence. Après un premier maximum secondaire de 60.8 m³/s, 3 crues principales ont lieu, à 361, 241 et 166 m³/s. Les échantillons de matière en suspension ont été prélevés depuis la descente du maximum secondaire, soit au début de la montée de la 1^{ère} crue, jusqu'en descente de la deuxième crue principale. Le maximum de concentration mesuré est de 1164 mg/l, soit de 5 à 10 fois les concentrations mesurées par ailleurs.

Outre un gradient de montée très important, la première crue s'est caractérisée par le passage soudain de grandes quantités de branches, de troncs et d'arbres, de diamètres pouvant atteindre le mètre. Ce phénomène est probablement la conséquence du grand nombre d'arbres abattus subsistant sur les berges depuis le cyclone Hugo en septembre 1989. Il est possible de l'estimer d'après le volume de troncs d'arbres bloqués par le pont situé sur la Grande Rivière à Goyaves, peu après le confluent, à plusieurs dizaines de mètres cube.

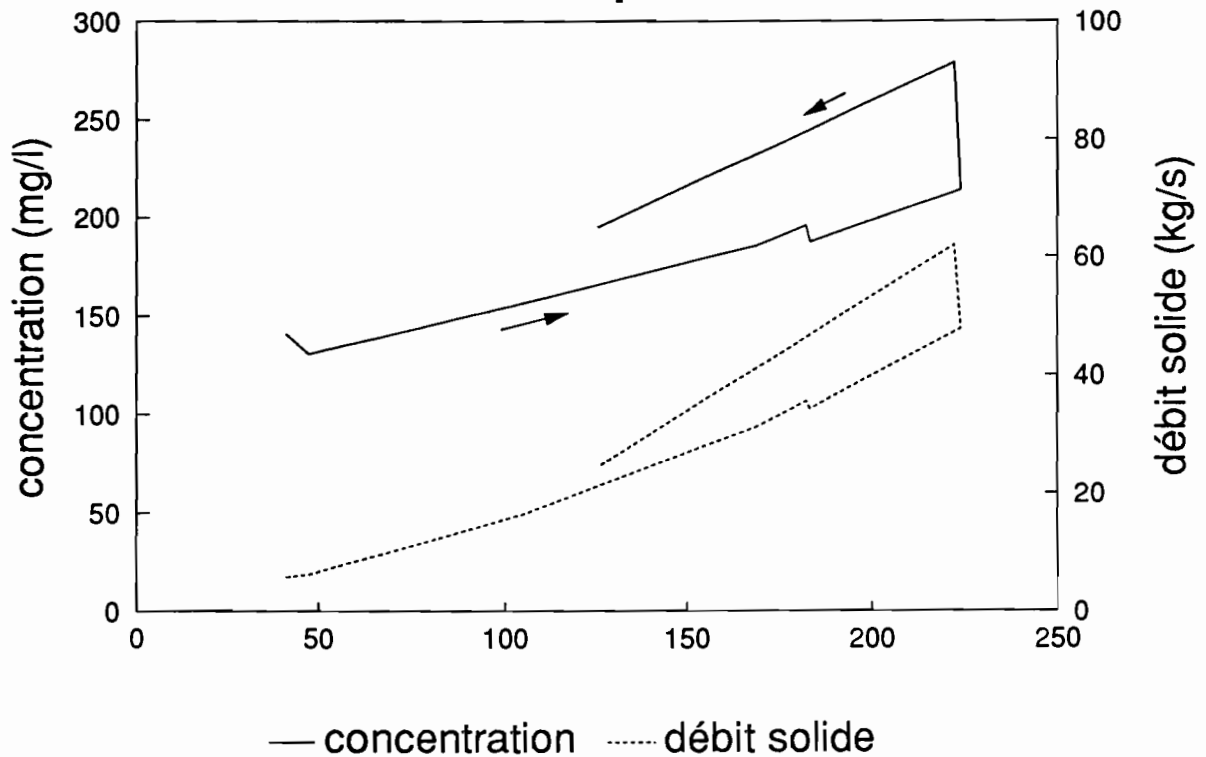
crue du 11/10/90



11/10/90 : 1ère pointe de crue



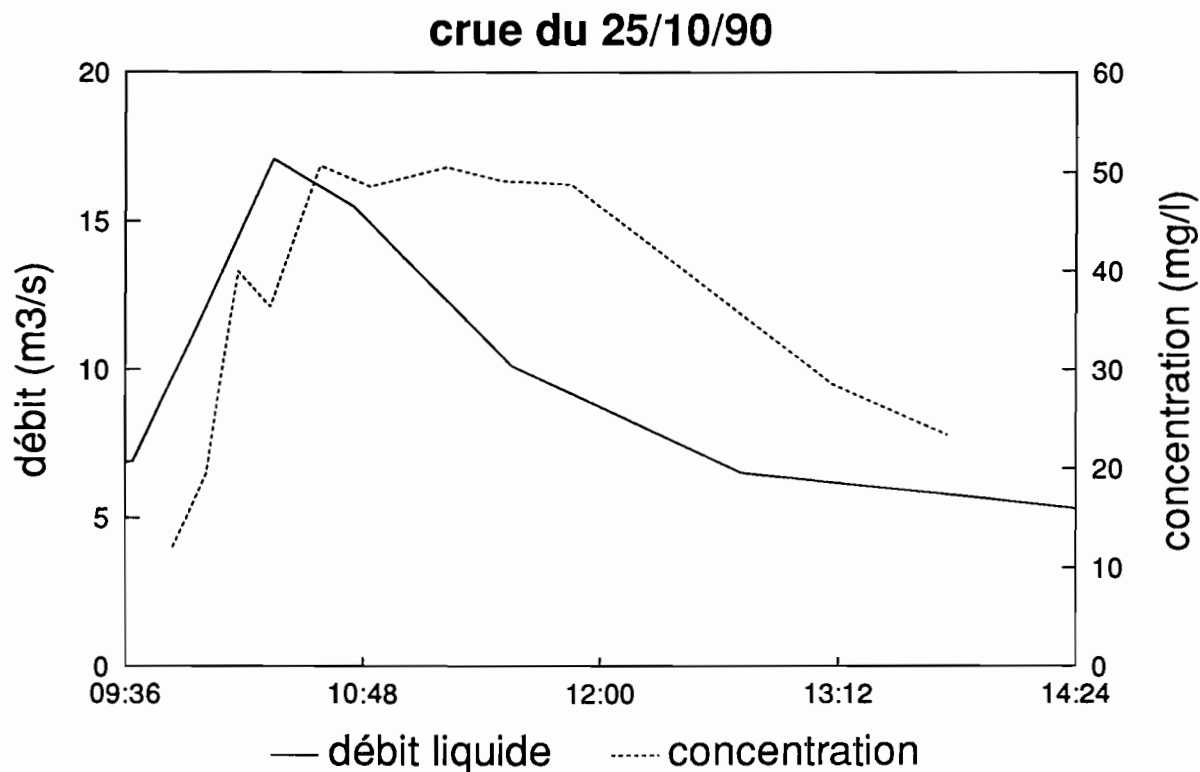
11/10/90 : 2ème pointe de crue



3.4.5 Crue du 25 octobre 1990

Débit maximum de crue :	17.1 m ³ /s
Temps de base :	04 h 37 mn
Temps de montée :	02 h 15 mn
Débit initial :	2.01 m ³ /s
Débit final :	6.51 m ³ /s
Volume écoulé :	0.153 million de m ³
Vitesse moyenne maximale :	1.3 m/s
Nombre de pointes de crue :	1
Heures des maxima de crue :	10h21
Débits m ³ /s :	17.1
Gradient max. de montée de crue m ³ /s/mn :	

Les échantillons ont été prélevés en montée et descente de crue, au saumon, selon différentes verticales et à différentes profondeurs. La concentration maximale mesurée est de 53.8 mg/l.



3.4.6 Crue du 13 décembre 1990

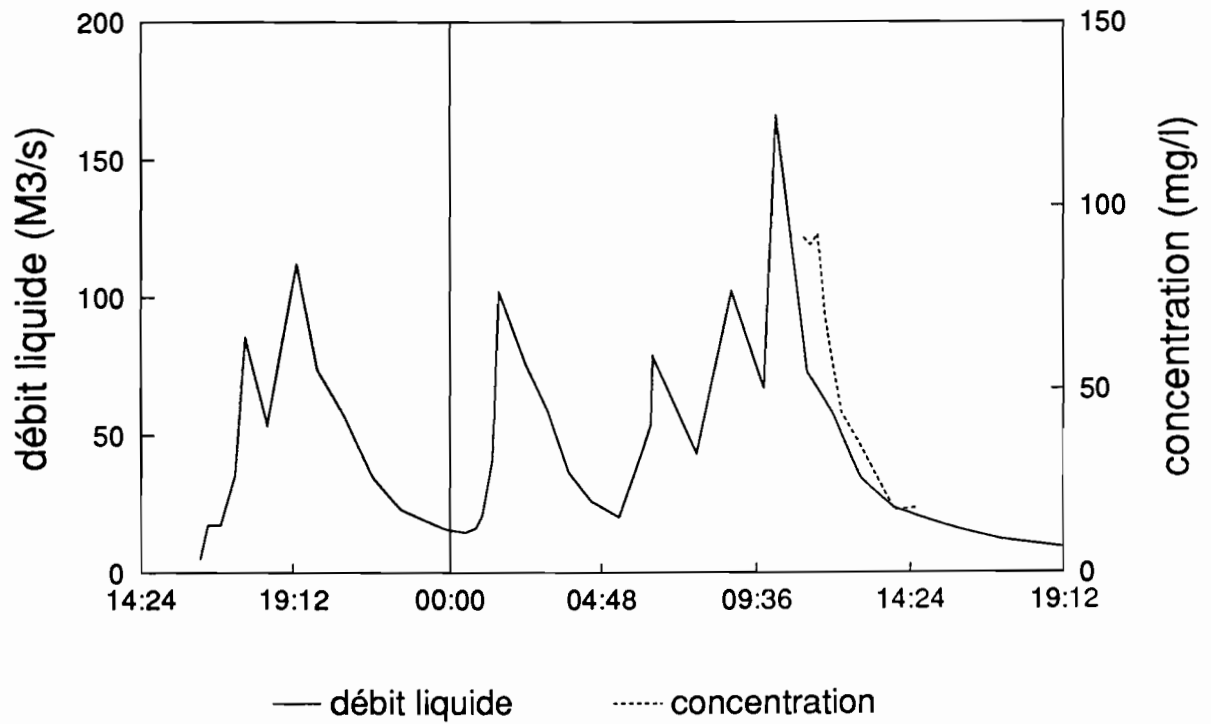
Données pour la pointe de crue mesurée :

Débit maximum de crue :	166 m ³ /s
Temps de base :	13h27 mn
Temps de montée :	04h08 mn
Débit initial :	19.8 m ³ /s
Débit final :	8.42 m ³ /s
Volume écoulé :	2.238 million de m ³
Vitesse moyenne maximale :	3.25 m/s
Nombre de pointes de crue :	1
Heures des maxima de crue :	10h12
Débits m ³ /s :	166
Gradient max. de montée de crue m ³ /s/mn :	

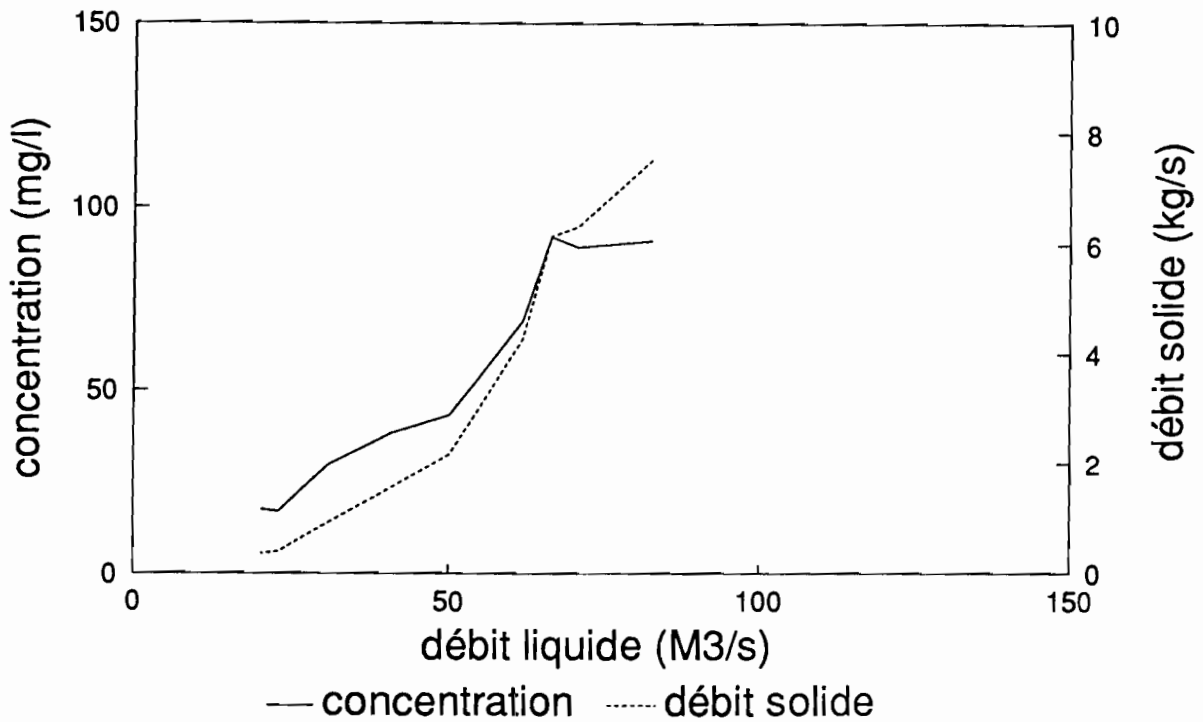
La crue présente 2 maxima secondaires de débits respectifs de 78.4 et 102 m³/s. Elle intervient après celle du 12/12/90 à 19h19 (112 m³/s), et du 13/12/90, à 01h34 (102 m³/s). Elle pourra donc être considérée comme une deuxième crue.

Les échantillons sont prélevés en descente du maximum principal. La concentration maximale enregistrée est de 92 mg/l.

crue du 13/12/90



crue du 13/12/90



3.5 Interprétation des résultats

Au vu des résultats indiqués ci-dessus, il apparaît que la concentration varie globalement en fonction linéaire du débit. Cependant, quelques différenciations peuvent être faites :

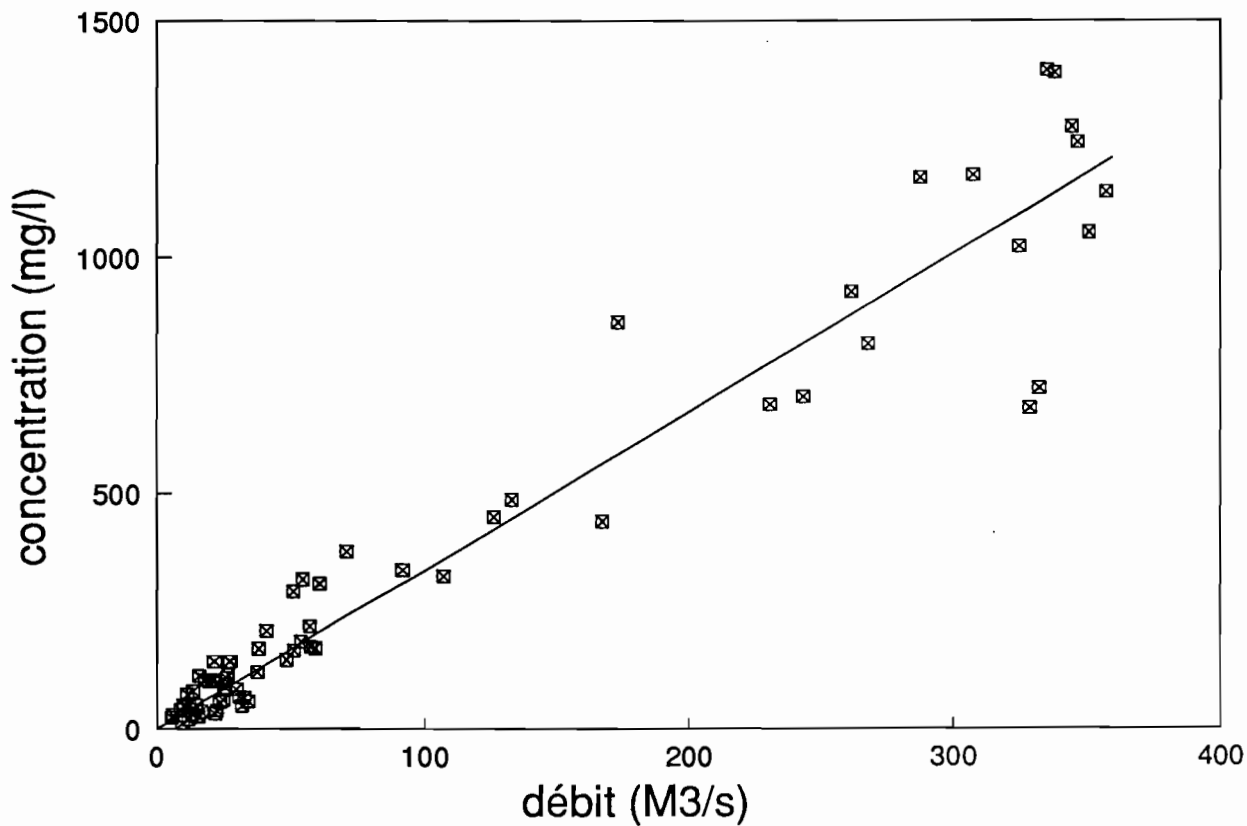
- le coefficient reliant la concentration au débit dépend fortement de l'importance des crues antérieures précédant le prélèvement. Ceci est observé lors de la 2^{ème} pointe de crue du 11 octobre 1990 et pour la descente du 13 décembre 1990, crue de 166 m³/s précédée en 16 heures de deux pointes indépendantes de respectivement 112 et 102 m³/s.
- la courbe $C=f(Q)$ laisse apparaître des phénomènes d'hystérésis traduisant une relation non univoque en montée et descente de crue.

Des régressions ont été effectuées pour chaque type de données, et fournissent des relations de type $C (mg/l) = KQ (m^3/s)$. Les valeurs de K obtenues sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

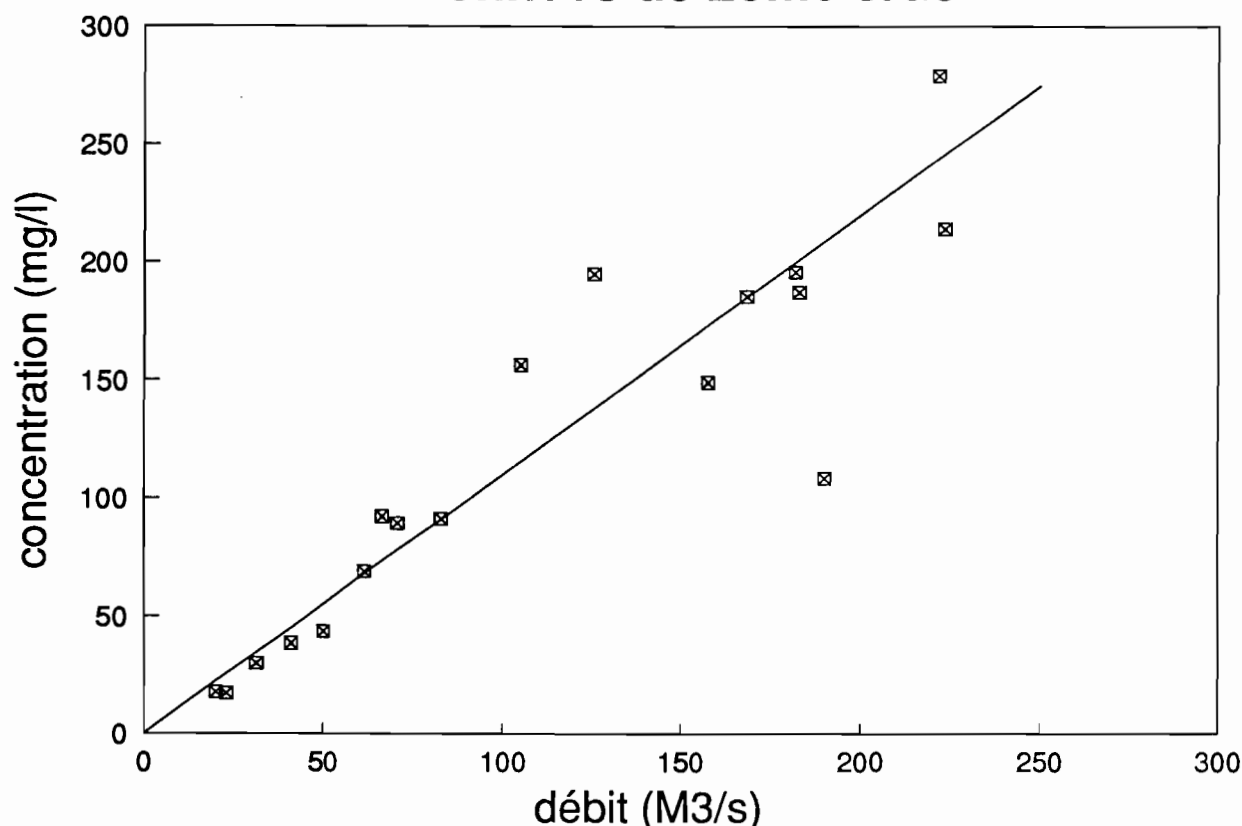
Valeurs de K issues de la régression

type de données	coefficient de proportionnalité	R ²	nombre de valeurs
1 ^{ère} crue	3.36	0.93	72
2 ^{ème} crue	1.06	0.82	18
montée de 1 ^{ère} crue	3.29	0.87	20
descente de 1 ^{ère} crue	3.46	0.96	49

Données de 1ère crue



Données de 2ème crue



Les coefficients de régression indiquent une assez bonne corrélation entre les données de concentration et les débits observés. Le nombre d'observations et la diversité des types de crues étudiées apparaissent suffisants pour représenter de façon fiable le transport en suspension sur la rivière Bras David [3].

Si la différenciation est assez nette entre les données de première et de deuxième crue, celle-ci est ~~est~~ trop faible pour être prise en compte entre les données acquises lors de la montée et de la descente. On considérera donc le coefficient K correspondant à l'ensemble des données, soit 3.4 pour les premières crues, et 1.1 pour les secondes.

3.6 Résultats de la régression

Le résultat de la reconstitution du transport solide en suspension utilisant les coefficients indiqués ci-dessus est indiqué dans le tableau suivant, sur la période 1974-1990, soit pour 17 années, et selon les différentes classes de débit liquide. Les pourcentages du temps et du volume écoulés dans chaque classe sont donnés par comparaison. Les coefficients de type deuxième crue sont appliqués de façon empirique, au cas par cas : débits de pointe supérieurs à 100 m³/s, intervalles entre deux crues importantes inférieurs à 6 à 12 heures, selon le type d'évènement considéré, etc...

Résultats de la reconstitution du transport en suspension

le qv ?

Classe en m ³ /s	Masse 1974-1990 (tonnes)	Moyenne annuelle	% masse	% temps	% volume
0-5	8 390	493	6.7	88.27	53.16 %
5-10	6 105	359	4.9	7.12	13.69 %
10-15	5 030	296	4.0	1.93	6.55 %
15-20	5 115	301	4.1	1.00	4.70 %
20-30	8 335	490	6.6	0.83	6.57 %
30-50	11 470	675	9.1	0.47	4.81 %
50-100	21 270	1 251	16.9	0.28	5.26 %
100-200	27 830	1 637	22.1	0.09	3.36 %
200-300	17 960	1 056	14.3	0.02	1.28 %
300-400	10 000	588	7.9	0.00	0.47 %
400-550	4 350	256	3.5	0.00	0.15 %
Total (tonnes)	126 000	7 400			
Total débits > 50 m ³ /s	81 400	4 790	64.7	3.93	10.5 %
Total débits > 200 m ³ /s	32 310	1 900	25.7	0.02	1.89 %

Les données utilisées n'incluent que partiellement la crue du 29 août 1979 (passage du cyclone David), le limnigraphe ayant été endommagé. Le résultat est donc à majorer d'environ 3 000 tonnes. De plus, le type de reconstitution utilisé par régression, ne peut donner le transport solide que de manière approchée. En utilisant le coefficient $K=3.4$ pour l'ensemble des données, donc en majorant le résultat, on obtient un total de 140 000 tonnes sur 17 ans, soit une moyenne de 8 200 tonnes par an.

On retiendra finalement un transport solide en suspension de l'ordre de **8 000 tonnes par an** en moyenne, soit 2.4 tonne/ha/an.

→ Km^2

3.7 Importance relative des fortes crues

Le transport solide en suspension a été calculé pour l'ensemble des crues supérieures à 300 m³/s. Les résultats sont regroupés ci-dessous. Le pourcentage par rapport à la masse totale est déterminé en utilisant la valeur calculée de 126 000 tonnes. On notera également que la crue correspondant au cyclone David donne une masse de 1 800 tonnes, du début de la crue au passage du débit de pointe.

Transport solide en suspension pour les crues supérieures à 300 m³/s

Date	Débit maximum (m ³ /s)	Masse calculée (tonnes)	Volume écoulé (millions de m ³)	% de la masse totale
31/08/74	400	1 200	2.1	0.93
10/11/79	388	2 900	4.2	2.29
26/05/81	328	2 100	3.4	1.63
07/09/81	354	1 800	2.9	1.44
29/12/81	350	2 300	4.9	1.79
19/11/82	460	2 400	3.3	1.89
31/12/82	358	1 800	3.6	1.43
16/06/84	342	600	1.6	0.47
08/11/84	347	1 100	1.8	0.90
16/11/86	547	6 100	6.1	4.80
24/11/87	329	1 500	5.59	1.22
17/09/89	343	5 500	11.5	4.33
11/10/90	361	2 900	6.2	2.34
Total		32 000	57	26.8

Ces 12 évènements représentent donc plus du quart du transport solide transitant à la cote 130 de 1974 à 1990. Cependant ces crues, de volumes comparables à la capacité de rétention de la retenue, se déverseront par le trop-plein. La masse totale sédimentant dans la retenue sera donc inférieure à celle transitant à la cote 130.

Aucune relation n'a pu être déterminée entre la masse transportée et le débit de pointe, chaque crue possédant des caractéristiques propres. Les concentrations moyennes sur l'ensemble de la crue sont très dispersées (de 280 à 990 mg/l). On notera que le coefficient $K=1.1$ a été appliqué à une partie de la crue correspondant au cyclone Hugo. La valeur calculée avec uniquement le coefficient $K=3.4$ serait de 6 300 tonnes. L'importance de la masse transportée s'explique principalement par celle du volume écoulé.

3.8 Comparaisons

Une première estimation de 17 000 tonnes par an a été effectuée par la SCET en 1981 [4] sur le transport solide sur la rivière Bras-David à partir de 10 échantillons prélevés au seuil, correspondant à deux crues de débits de pointe respectifs de 35 et 130 m³/s. Les concentrations mesurées dans ces deux cas, respectivement de 1 200 et 3 500 mg/l, apparaissent largement surestimées d'après nos observations visuelles et celles indiquées dans la littérature. De plus, le mode de reconstitution utilisé, les débits utilisés étant les débits journaliers, ne restitue pas l'importance des phénomènes transitoires. Dès lors, la valeur calculée nous paraît peu fiable et en tout état de cause surestimée.

La valeur calculée d'un taux d'érosion de 2.4 tonne/ha/an est à comparer aux ordres de grandeurs déterminés en zone tropicale humide forestière (1 tonne par hectare et par an) et cultivée (jusqu'à plusieurs dizaines de tonnes par hectare et par an) [14]. L'érosion par ruissellement sur le bassin de Bras-David apparaît donc relativement faible. Ceci peut s'expliquer par la présence d'un important couvert végétal, interceptant l'énergie cinétique des gouttes d'eau génératrice d'érosion et par le maintien des sols en place.

*Oh!
Pente...*

4 Estimation du transport par charriage

Le transport par charriage obéit à des mécanismes différents de celui en suspension. La masse des éléments les oblige à un déplacement par roulement sur le fond ou par saltation. La taille des éléments charriés ainsi que le seuil de mise en mouvement dépendent à la fois des débits et des caractéristiques morphologiques de la rivière : pente, rayon hydraulique, granulométrie et rugosité du lit, existence ou non d'une crue ayant préalablement déstabilisé le fond, ... Le charriage constitue donc un phénomène complexe et très difficile à quantifier [5]. Deux approches ont été utilisées, l'une expérimentale, par observation du charriage sur une période donnée, l'autre théorique, après recherche dans la littérature d'approches applicables à une rivière à forte pente du type Bras-David.

4.1 Estimation expérimentale

4.1.1 Evolution du lit

Six profils transversaux et un profil longitudinal ont été effectués à différentes reprises entre avril 1989 et octobre 1990 afin d'observer l'évolution du lit de la rivière, entre le confluent du Bras-David et de la rivière Corossol et le seuil hydrologique de la Cote 130. Aucune évolution notable n'a pu être constatée. Les chenaux principaux d'écoulement ne se sont pas déplacés, et aucun creusement ou engraissement du lit n'a pu être observé, malgré deux crues importantes à plus de 300 m³/s. La rivière pourra donc sur cette portion être considérée comme morphologiquement stable à l'échelle de temps de l'étude. La valeur du charriage calculée en amont pourra donc être considérée comme identique à l'aval.

En revanche, un creusement de l'ordre de 10 à 20 cm a pu être observé sur la rivière Corossol, juste en amont du confluent, après la crue de retour 3 ans du 11 octobre 1990 (profil Tb). Il lui correspond un balayage généralisé des galets de quelques centimètres de diamètre, dont un très grand nombre a été retrouvé en aval au niveau du confluent avec le Bras-David, modifiant à la fois la granulométrie et le profil de ce tronçon. Un mouvement de plus de 20 m d'un bloc de diamètre supérieur à un mètre a également été observé.

Ceci indique que le lit de la rivière Corossol n'est pas en équilibre. Les équations régissant le transport solide n'y sont donc pas applicables, et les estimations expérimentales, sujettes aux fluctuations importantes du charriage (phases d'engraissement et de dégraissement), y sont difficiles et peu fiables sur la période d'observation d'une année. Vu le faible nombre de cailloux retrouvés après la crue du 11 octobre 1990 et la difficulté d'exploiter les résultats des crues précédentes, il ne sera pas fourni d'évaluation expérimentale.

4.1.2 Estimation du charriage

Deux systèmes de nasses à sédiments, dont l'un utilisé en milieu fluvial, ont été testés sur la rivière Bras David : la première, constituée d'un cadre métallique rectangulaire retenant un filet en tissu de 3 m de long, posé sur le fond et retenu par une chaîne, semble plus adaptée aux mesures de charriage de sables fins. La seconde nasse était constituée d'un tube en tôle de 50 cm de diamètre de 2 m de longueur, maintenu dans le sens du courant par un châssis fixé par un gabion enfoui d'un volume de l'ordre de 1.5 m³, dont la génératrice inférieure était située à 30 cm du fond du lit, et fermé à l'aval par une grille. Cette seconde nasse a été emportée par la crue du 09 novembre 1990 (64.4 m³/s). Seuls quelques herbes et des branchages avaient été recueillis, pour des débits inférieurs à 50 m³/s. L'utilisation de nasses en milieu de type torrentiel paraît donc difficile à mettre en oeuvre. Les estimations expérimentales ne se baseront donc que sur le marquage des cailloux.

Le site choisi se situe sur le profil T6, situé à l'aval du confluent des rivières de Bras-David et de Corossol, ceci afin de profiter des 200 m de ligne presque droite jusqu'au seuil. Un nombre important de cailloux de tailles allant de quelques centimètres au mètre a été peint. Les distances parcourues lors des crues ont été mesurées à différentes reprises, permettant d'obtenir un suivi sur plus d'une année. Ensuite soit les cailloux étaient replacés sur leur profil d'origine, dans des conditions proches de la réalité, soit un nouvel échantillon était peint, après la crue du 11 octobre 1990.

Il n'a pas été possible de différencier individuellement le charriage correspondant à chaque crue. En effet, malgré l'utilisation de couleurs voyantes, le repérage des cailloux ne pouvait se faire qu'avec une eau suffisamment claire et un débit suffisamment faible. Toutefois, aucun charriage n'a pu être observé pour des crues inférieures à 50 m³/s.

Le diamètre maximum des éléments charriés sur le profil T6 a été de 60 cm lors de la crue du 11 octobre 1990, pour une distance parcourue de 22 m. De faibles mouvements ont été observés pour les blocs de tailles supérieures, ceux-ci ayant basculé sous l'action du courant ou après affouillement de leur base.

Le charriage solide a été estimé d'après les distances parcourues par chaque classe granulométrique (C.f. tableau n°4 de F.Dugas). Les résultats obtenus pour chaque période d'observation sont indiqués dans le tableau suivant, ainsi que les crues correspondantes de débits de pointe supérieurs à 50 m³/s.

Valeurs expérimentales de charriage

Période d'observation	Crues observées > 50 m ³ /s	Charrriage (m ³)
Aout 1989	75	6
Oct 1989 - 21/08/90	58.2 63.2 87.1	5
21/08/90 - 29/09/90	100	9
29/09/90 - 13/10/90	64.4 361	340
05/11/90 - 11/01/91	113 112 102 166	28
11/01/91 - 04/03/91	64	1

On constate donc qu'aux crues de débits de pointe inférieurs à 100 m³/s correspondent un charriage très faible. Le seuil de mise en mouvement des matériaux marqués du lit semble se situer vers 60 m³/s.

Ces données ont été utilisées pour reconstituer le charriage, en considérant, pour des débits supérieurs à 100 m³/s, le volume solide déplacé comme une fonction linéaire du débit de pointe de la crue : $V_{sol(m^3)} = 1.27Q_{liq(m^3/s)} - 118$. Cette reconstitution ne peut donner que des ordres de grandeur, le volume charrié dépendant en fait du temps écoulé aux forts débits. Le volume de 340 m³ pour la crue du 11 octobre 1990 correspond en fait à 3 crues distinctes de 361, 241 et 166 m³/s. De plus, la relation volume charrié - débit de pointe à proximité du seuil de mise en mouvement est plus probablement de type exponentiel que linéaire. L'estimation fournie constitue donc une majoration du volume réel.

Sur la période 1974 - 1990, on obtient ainsi un volume charrié de l'ordre de 15 000 m³, pour un volume annuel de l'ordre de 900 m³, 95 % du charriage correspondant à des crues supérieures à 100 m³/s.

4.2 Estimation théorique

4.2.1 Equations utilisées

Les considérations théoriques ci-dessous sont basées sur deux équations : celle de Manning-Strickler pour le débit liquide, et celle de Meyer-Peter Müller pour le charriage. Cette dernière relation est cependant à prendre avec précaution, aucune relation théorique n'ayant jusqu'ici réussi à s'imposer par l'exactitude des résultats obtenus. M. Bouvard [5] signale ainsi l'existence d'une vingtaine de formules donnant des résultats variant d'un rapport de 1 à 100, et surtout de forts écarts avec les mesures physiques in situ. L'essentiel des résultats publiés concerne des fleuves ou des rivières à pente douce, les rivières à forte pente du type Bras-David constituant des milieux physiques plus difficilement modélisables. Nous justifierons l'utilisation ici de la relation de Meyer-Peter Müller par l'étude effectuée sur la "Rivière des Galets" à la Réunion par la Sogreah, rivière de caractéristiques proches de celles du Bras-David, pour laquelle les calculs théoriques ont été comparés aux résultats obtenus sur modèle réduit [6,7].

Les équations utilisées seront donc les suivantes :

Débit liquide :

$$Q_L = KR_H^{5/3}J^{1/2}$$

où K : coefficient de rugosité du lit
 R_H : rayon hydraulique
 J : pente de la rivière

Débit solide par charriage :

$$Q_S = 13.7\delta(\delta-1)^{3/2}Ld_{30}^{3/2} \left[\alpha \frac{R_H J}{(\delta-1)d_{30}} - 0.047 \right]^{3/2}$$

où L : largeur de la rivière
 d_{50} : diamètre ~~moyen~~ des éléments
 δ : densité du sédiment
 α : coefficient minorateur

médian . 50%

4.2.2 Cas de la rivière Bras-David

Les équations seront appliquées à la rivière Bras-David au niveau du profil T6, ceci afin de pouvoir effectuer des comparaisons avec les estimations expérimentales.

Sur ce profil, la rivière est constituée d'une part d'un lit mineur relativement encaissé, recouvert de galets et de rochers de tailles pouvant être supérieures au mètre, d'autre part d'un lit majeur recouvert d'une végétation abondante, limité en rive droite par une falaise. On considèrera donc comme largeur de la rivière la largeur utile pour laquelle se produit le charriage, soit 35 m.

- $d_{50} = 0.25 \text{ m}$

- $K = \frac{26}{d_{50}^{1.6}} \approx 32$

- $J = 1.96 \%$. Le tronçon étudié fait donc partie des rivières à fortes pentes

- $\delta = 2.5$

- $R_H = \frac{LH}{L+2H} \approx H$

en considérant $H \ll L$

- $\alpha = \left(\frac{Q}{Q_L} \right) \left(\frac{k_s}{K} \right)^{3/2}$

où Q représente le débit liquide participant au charriage, Q_L le débit total, k_s la rugosité du lit, dunes comprises. Le fond étant plat, $k_s = K$.

4.2.3 Seuil de début de charriage

Le charriage est généralement considéré comme un mouvement à seuil, c'est-à-dire qu'il est nul en-dessous de certaines valeurs de débit [8]. Ce seuil est très difficile à évaluer et dépend de plusieurs paramètres : granulométrie du lit de la rivière, déstabilisation du lit après une crue importante (par exemple celle du 11 octobre 1990), existence de pavage (protection d'éléments de petite taille par un lit de galets assez stable),...[5,8,9]. Ce dernier phénomène n'a pas été observé.

On considère que le charriage débute lorsque la valeur τ du taux de cisaillement est supérieure à une valeur critique τ_c à partir de laquelle le cisaillement est suffisant pour compenser la gravité.

En toute rigueur, cette valeur est fonction du diamètre de la particule et de la disposition de celle-ci dans le lit de la rivière : directement en prise au courant, dissimulée derrière ou sous d'autres éléments, etc... Ces paramètres sont bien évidemment impossibles à prendre en compte. Les formules théoriques considèrent donc un seuil de début de charriage fonction de paramètres globaux de la rivière. Dans le cas de la formule de Meyer-Peter Müller, ce seuil correspond à une valeur positive de Q_s .

On obtient ainsi une valeur de débit de l'ordre de $140 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette valeur est plus élevée que le seuil observé de $60 \text{ m}^3/\text{s}$. M.Ramette [7] insiste cependant sur le fait que les formules théoriques reproduisent de façon très imprécise le transport solide pour des débits proches du débit critique. De plus, les relevés effectués après la période du 5 novembre 1990 au 11 janvier 1991, correspondant à des crues de 113, 112, 106 et $166 \text{ m}^3/\text{s}$, ne donnent qu'un faible de charriage de 28 m^3 , pour des diamètres maximaux déplacés de 25 cm. Le seuil de charriage à considérer est donc probablement supérieur à cette valeur de $140 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le lit du Bras-David comporte un très grand nombre de blocs de diamètres supérieurs au mètre. Leur présence indique que le Bras-David possède des crues suffisamment importantes pour pouvoir les charrier. Un seul mouvement a pu être observé pour ces tailles lors de l'étude expérimentale (déplacement de 20 m pour un bloc de diamètre supérieur au mètre). Les réserves émises plus haut sur la possibilité de calculer les vitesses nécessaires à leur mise en mouvement peuvent être levées en

considérant que leur taille élevée permet de les soumettre à l'action du courant. La relation d'Isbah [7] donne les vitesses nécessaires à l'entraînement de tels blocs : $V = 1.2\sqrt{2g(\delta-1)D_s}$, où D_s est le diamètre équivalent.

Pour des blocs d'un mètre, on obtient ainsi une vitesse de 6.5 m/s, ce qui étendu à toute la section donne un débit minimal de l'ordre du maximum observé, soit 547 m³/s. Il convient donc de considérer que ces événements générateurs d'un très fort charriage se produisent en fait relativement fréquemment avec une période de retour de l'ordre de quelques années.

4.2.4 Résultat de l'estimation théorique

La reconstitution a été effectuée en considérant d'une part α égal à 1, d'autre part α différent de 1. Les valeurs sont déduites de celles utilisées par la Sogreah dans l'étude de la Rivière des Galets [7], à savoir :

Valeurs de α - d'après la rivière des Galets

Q _L (m ³ /s)	140	200	250	300	350	400	450	500	550
α	1	0.954	0.94	0.93	0.92	0.91	0.90	0.89	0.88

Les valeurs de charriage obtenues dans ces deux cas, reconstituées sur les 17 années de débit et sur 1990, sont présentées dans le tableau suivant :

Volumes de matériaux charriés

	V _{total} (m ³)	V ₁₉₉₀ (m ³)	V _{moyen, annuel} (m ³)
$\alpha = 1$	185 000	13 000	11 000
α	145 000	10 000	8 600
valeurs expérimentales	15 000	≈ 400	900

Les valeurs théoriques obtenues sont manifestement très supérieures aux valeurs réelles. On constate ainsi un rapport de 1 à 20 pour 1990 entre les données théoriques et les données expérimentales. Pour $\alpha < 1$, les débits inférieurs à 300 m³/s représentent 60 % du volume total charrié. Les valeurs théoriques dépendent donc fortement du seuil de mise en mouvement. Or, Ramette indique que les équations sont très imprécises pour des valeurs de débit proches de celles provoquant le début de charriage. Pour comparaison, les débits centennaux sont pour le Bras David et la Rivière aux Galets respectivement de 650 et 2 500 m³/s. L'ensemble des débits à considérer dans l'étude du charriage est donc trop proche du seuil de mise en mouvement pour donner une estimation théorique fiable.

On retiendra donc finalement une valeur du charriage de l'ordre de 1 000 m³/an, tout en gardant à l'esprit l'imprécision assez importante de ce type d'estimation.

5 CONCLUSION

L'analyse comparée des estimations théoriques et des mesures expérimentales de transport solide et de charriage acquises en 1989 et 1990 et transposée sur la période d'observation des 17 années de débit liquide aux stations de la cote 110 puis de la cote 130 conduise aux ordres de grandeur suivants :

- transport solide : 8 000 tonnes par an
- charriage : 1 000 m³/an

Ces valeurs correspondent aux matériaux transportés par le cours d'eau au travers d'une section naturelle du Bras David localisée aux environs de la cote 130.

La sédimentation dans la retenue se traduira par le dépôt de matériaux en suspension dans la partie aval de la retenue. Le volume annuel de ces matériaux sera inférieur à 8 000 tonnes par an en raison des quantités qui seront évacuées par le déversoir à l'occasion des plus fortes crues, elles-mêmes les plus chargées.

Concernant l'apport de matériaux à la retenue par charriage, il se limitera à l'accumulation de blocs dans la partie amont de la retenue qui conduira à une modification du profil en long du lit mineur du cours d'eau immédiatement en amont de la retenue.

6 Références bibliographiques

- 1 "Revue bibliographique critique de la théorie de l'érosion éolienne", P.Danard, rapport de DEA, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1989.
- 2 "Problèmes de mesures de débit solide en suspension", Y.Cormary, Faculté des Sciences de Montpellier, Hydrométéorologie, 1971.
- 3 "Evaluation de la durée utile des observations du transport d'alluvions en suspension dans les rivières", J. Bruschin et W.trau, Symposium IAHS, AISH, publication n°122, 1977
- 4 "Pré faisabilité aménagement Cote 140, Bras David", SCET, 1987.
- 5 "Ouvrages de dérivation et transports solides", M.Bouvard, La Houille Blanche, n°3/4, 1983
- 6 "Modèle réduit physique de la Rivière des Galets (La Réunion)", J.Duvoisin, La Houille Blanche, n°3/4, 1989.
- 7 "Morphologie et Transport solide de rivières à forte pente", M.Ramette, La Houille Blanche, n°3/4, 1988.
- 8 "Essai de synthèse des connaissances en érosion et hydraulique torrentielle", M.Meunier, La Houille Blanche, n°5, 1989
- 9 "Transports Solides", Cours à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Pierre Chevalier, 1989.
- 10 "Les ressources en eau de surface de la Guadeloupe", P.Chaperon, Y.L'Hote, G.Vuillaume, collection Monographies Hydrologiques ORSTOM, Editions de l'ORSTOM, 1985
- 11 "Etude du transit sédimentaire par charriage dans le Rhône entre Beaucaire et Alès", F.Dugas, ORSTOM et C.N.R., Montpellier, 1989
- 12 "Essai de synthèse des connaissances en érosion et hydraulique torrentielle", M.Meunier, La Houille Blanche, N°5, 1989
- 13 "Etude du transport de galets par les torrents au moyen de traceurs radioactifs", F.Tola, La Houille Blanche, N°3/4, 1989
- 14 "Ecosystèmes forestiers tropicaux d'Afrique", ORSTOM-UNESCO, coll. recherches sur les ressources naturelles, XIX, 1983

Danart Patrick

Etude du transport solide du Bras David

Pointe-à-Pitre : ORSTOM, 1990, 27 p. multigr.