

ÉTUDE DES TRANSPORTS SOLIDES EN AFRIQUE NOIRE ET A MADAGASCAR

par

Pierre TOUCHEBEUF de LUSSIGNY

Ingénieur Hydrologue à Electricité de France

Les transports solides des cours d'eau d'AFRIQUE NOIRE et de MADAGASCAR n'ont pas encore été l'objet d'études systématiques et intensives de la part du Service hydrologique de l'ORSTOM. Nous avons cependant jugé intéressant de résumer ici les données assez éparées qu'ont permis de recueillir diverses études particulières concernant soit de très petits bassins expérimentaux, soit de grands cours d'eau.

I. — MESURES SUR PETITS BASSINS VERSANTS

Les bassins versants d'une superficie de quelques hectares ou tout au plus de quelques kilomètres carrés, se prêtent facilement aux mesures de transports solides. Il suffit, en effet, d'aménager dans le lit du ruisseau qui les draine, une fosse à sédiments d'une capacité de quelques mètres cubes pour recueillir à chaque crue la totalité du charriage de fond. Une faible part du transport en suspension s'y décante également. Celle qui échappe à la fosse à sédiments peut être mesurée facilement en prélevant à intervalles réguliers, immédiatement en aval, des échantillons d'eau dont on détermine en laboratoire la concentration en matières solides.

Cette méthode a été appliquée sur trois petits bassins, celui du MAYO-KERENG au CAMEROUN, de la MAGGIA au NIGER et du BANIAN à MADAGASCAR.

a) MAYO-KERENG B (Cameroun)

Une campagne de mesures a été effectuée, de juillet à octobre 1956, sur ce bassin versant dont les principales caractéristiques peuvent être résumées comme suit :

Superficie : 6,6 ha.

Situation : NORD-CAMEROUN, région de FIGUIL.

Pluviométrie : 900 mm/an, répartis de mai à octobre avec maximum en août.

Nature du sol : sablo-argileux, recouvert partiellement de gravillons de quartzites.

Végétation : savane boisée assez claire.

Pente moyenne : 2,3 %.

Les résultats obtenus au cours des différentes averses observées sont condensés dans le tableau suivant :

Hauteur pluie moyenne mm	Volume ruisselé m ³	Débit de crue maximal m ³ /s	Poids de sable déposé kg	Poids de matières en suspension kg	Transport solide total kg
5,5	55	0,15	0	60	60
39	1 130	0,62	2 420	1 200	3 620
42	1 315	0,64	2 830	1 100	3 930
18	220	0,175	535	185	720
68,5	1 750	1,74	6 050	2 250	8 300
17	420	0,44	1 390	170	1 560
28,5	470	0,44	2 460	300	2 760
16,5	105	0,215	330	170	500
26,5	45	0,045	0	15	15
10,5	80	0,095	65	85	150
10,5	65	0,095	40	40	80
79	2 840	1,68	3 780	950	4 730
8,5	15	0,02	0	5	5
49	1 230	1,66	1 740	700	2 440
31,5	255	0,415	440	200	640
10,5	175	0,355	175	190	380
12	55	0,06		15	
			22 255	7 635	29 890

Il n'apparaît pas de corrélation étroite entre l'importance des transports solides produits par une averse et la hauteur de cette même averse ou le volume de la crue correspondante. Une corrélation un peu moins lâche peut être établie en prenant en considération le débit maximum de chaque crue, mais on ne peut cependant que dégager certaines tendances qualitatives :

— Le volume de sable charrié augmente très vite avec le débit maximum de la crue. Le volume des transports en suspension croît également dans le même sens mais à un rythme un peu moins rapide.

— L'importance relative des deux modes de transports varie beaucoup d'une averse à l'autre. Le rapport moyen du poids de sable charrié au poids des matières en suspension est voisin de 3.

— Toutes choses égales par ailleurs, les transports solides sont plus importants au début qu'à la fin de la saison des pluies. Cet effet est surtout sensible pour les transports en suspension. Il est dû à l'influence de la végétation herbacée qui protège beaucoup plus efficacement le sol en septembre et octobre qu'en juillet.

— La concentration en matières suspendues est également plus élevée pendant la montée d'une crue que pendant sa décroissance. La valeur moyenne des concentrations observées est de 450 g/m³, les valeurs extrêmes étant de 2 800 et 30 g/m³.

— Le diamètre médian des grains de sable charriés est de 0,9 mm. Le premier et le dernier quartiles de la courbe granulométrique correspondent respectivement à des diamètres de 0,45 et 2,1 mm.

— L'analyse granulométrique des matières en suspension montre une nette prédominance d'éléments argileux d'un diamètre inférieur à 0,002 mm.

— Les transports solides totaux du MAYO-KERENG B en année moyenne sont évalués à 42 t, ce qui, pour un bassin de 6,6 ha, correspond à une « dégradation spécifique » de 640 t/an/km².

b) La MAGGIA (Niger).

De brèves mesures de débits solides ont été effectuées en août et septembre 1958 sur ce petit bassin versant, que l'on peut rapidement caractériser comme suit :

Superficie : 5,5 ha.

Situation : République du NIGER, région de BIRNI-N'KONNI.

Pluviométrie : 520 mm/an, répartis de la mi-juin à début octobre.

Nature du sol : plateau latéritique et vallée à sol argileux parsemé de cailloutis latéritique.

Végétation : savane, légèrement boisée sur plateau.

Seules ont été mesurées les quantités de sable recueillies après chaque averse dans la fosse à sédiment. Ces quantités étaient comprises entre 75 et 450 kg pour des précipitations variant de 4 à 40 mm et des pointes de crues de 10 à 800 l/s.

Ces données ont permis d'évaluer grossièrement à 400 t/an/km^2 la dégradation spécifique du bassin ; elle reste d'un ordre de grandeur très comparable à celle du MAYO-KERENG, compte tenu du fait que les transports en suspension, apparemment peu élevés, n'ont pas été mesurés.

c) Le BANIAN (Madagascar).

Des mesures intermittentes ont été commencées pendant la dernière saison des pluies et doivent être reprises d'une façon plus suivie l'année prochaine. Notons les principales caractéristiques de ce bassin :

Superficie : 2,5 km².

Situation : bassin du MANGOKY, région de VONDROVE.

Pluviométrie : 700 mm/an, répartis de novembre à mars.

Nature du sol : sables « roux » sur calcaires.

Végétation : savane boisée claire.

Pente : 8 %.

Les quantités de sable recueillies après chaque averse varient de 4 300 à 8 000 kg, pour des pointes de crues de 250 à 1 000 l/s. Les transports solides annuels, sans tenir compte des matières en suspension, peuvent être évalués grossièrement à 30 t, ce qui correspond à une dégradation spécifique de l'ordre de 12 t/an/km^2 , valeur beaucoup plus faible que celle des deux cas précédents. Il faut probablement en voir la raison dans la perméabilité plus élevée du bassin du BANIAN qui réduit l'importance du ruissellement superficiel. Les éléments constitutifs du terrain, qui sont d'ailleurs plus grossiers, sont donc moins facilement entraînés. On notera également que la superficie du bassin du BANIAN est environ quarante fois plus grande que celle du KERENG et de la MAGGIA. Les résultats ne sont donc pas directement comparables.

d) Données diverses.

Nous possédons quelques résultats de mesures dispersées que nous citerons pour donner une idée des variations possibles de la concentration en matières suspendues, sur des bassins de quelques kilomètres carrés ou de plusieurs centaines de kilomètres carrés.

MAYO-KALLIAO (Nord-Cameroun).

Superficie : 200 km² environ.

Concentration pour une pointe de crue : 2 300 g/m³.

MAYO BOULORÉ (Nord-Cameroun).

Superficie : 3,75 km².

Concentrations en crue variant de : 930 g/m³ à 280 g/m³.

Transports annuels en suspension :

1954 : 21 t soit 5,6 t/an/km²

1955 : 11,5 t soit 3,1 t/an/km²

TERO (Dahomey).

Superficie : 32 km².

Concentrations en crue variant de : 3 400 g/m³ à 600 g/m³.

Transports annuels en suspension :

1956 : 15 000 t soit 470 t/an/km²

1957 : 27 000 t soit 850 t/an/km²

(Erosion élevée due à une mise en culture intensive).

Nous citerons enfin quelques chiffres relatifs à des bassins de beaucoup plus grande dimension situés en régions désertiques :

TELOUA à RAZELMAMA OULMI (Massif de l'AÏR, Niger).

Superficie : 1 170 km².

Concentrations en crue variant de : 1 700 g/m³ à 750 g/m³.

Concentration en faible crue : 200 g/m³.

Transports annuels en suspension évalués à : 30 000 t soit : 25 t/an/km².

OROUÉ (Massif de l'ENNEDI, Tchad).

Superficie : 580 km².

Concentration en fin de crue : 10 000 à 20 000 g/m³ (sable et limon).

II. — MESURES RELATIVES A DES GRANDS COURS D'EAU

Sur les grands cours d'eau, la mesure du charriage de fond devient très délicate. Il existe certains appareils prévus pour ce genre de mesures, dont l'un des plus perfectionnés est le « B.T.M.A. » mis au point par le laboratoire d'hydraulique de DELFT (Pays-Bas) ; mais les résultats qu'ils fournissent sont assez incertains et difficiles à interpréter.

Le charriage de fond sur un fleuve à lit mobile est, en effet, un phénomène essentiellement discontinu, comme l'ont montré de nombreuses études hydrographiques et divers essais utilisant des traceurs radio-actifs. Le charriage de fond à un instant donné ne peut être défini que pour une section bien déterminée ; il ne prend un sens pour tout le bief avoisinant que si l'on considère sa valeur moyenne sur plusieurs cycles annuels.

Diverses formules de charriage (Meyer-Peter, Einstein, etc.) ont été établies à partir de la théorie de la turbulence et d'expériences de laboratoire. Il faut éviter d'utiliser aveuglément ces formules qui ne sont valables que sous certaines conditions restrictives, rarement réalisées dans la nature, même de façon approchée (écoulement permanent et uniforme, granulométrie homogène).

Dans l'état actuel de nos connaissances, on est donc réduit à évaluer le charriage de fond par des approximations assez grossières. Heureusement, son importance relative dans le transport solide total des grands cours d'eau est généralement assez faible et ne semble pas dépasser 20 à 30 % dans la plupart des cas.

Les transports en suspension sont plus faciles à mesurer. Pour des évaluations sommaires, on peut simplement prélever des échantillons d'eau en surface, avec un récipient quelconque. Pour des mesures plus précises, on utilise une « turbidisonde » ou une simple pompe à main munie d'un tuyau flexible lesté, qui permet d'effectuer des prélèvements en profondeur. Ces prélèvements sont généralement bien représentatifs de la teneur en argile et en limons mais non de la teneur en sable qui est très sous-estimée. Celle-ci est déterminée avec plus d'exactitude au moyen d'un appareil du type « bouteille de Delft » qui comporte une chambre de décantation où se déposent les sables d'un diamètre supérieur à 0,1 mm.

Nous allons résumer brièvement les résultats des mesures obtenues sur la BÉNOUÉ (Cameroun), le LOGONE (Tchad) et le MANGOKY (Madagascar).

a) La BÉNOUÉ (Cameroun, Nigéria).

Quelques mesures de concentration en argiles et limons ont été effectuées, à l'aide d'une turbidisonde Neyrpic, sur la BÉNOUÉ et le FARO, affluent à tendance torrentielle :

Station	Date	Concentration g/m ³			Débit liquide m ³ /s	Superficie B.V. km ²
		Médiane	Maximale	Minimale		
BÉNOUÉ à GAROUA...	20- 9-1955	95	200	20	2 200	64 000
FARO à KOSSEL ...	10- 7-1955	215	490	160	470	27 000
FARO à KOSSEL ...	11-10-1955	150	220	35	2 120	27 000
BÉNOUÉ à OURO-BOKI	26-10-1955	165	245	40	1 960	104 000

Les transports annuels d'argiles et limons ont été évalués comme suit :

BÉNOUÉ à GAROUA : $1,2 \times 10^6$ t/an soit : 19 t/an/km².

FARO à KOSSEL : $2,4 \times 10^6$ t/an soit : 90 t/an/km².

BÉNOUÉ à OURO-BOKI : $3,6 \times 10^6$ t/an soit : 35 t/an/km².

En outre, on a utilisé des bouteilles de Delft (types DF 1 et DF 2) pour mesurer les débits de sable en suspension, entre 10 cm du fond et la surface. Les résultats de ces mesures sont donnés ci-dessous :

Stations	Date	Débit de sable en suspension m ³ /jour	Débit liquide m ³ /s	Vitesse moy. m/s	Pente cm/km
BÉNOUÉ à KINADA (amont confluent FARO) bassin de 68 000 km ²	9- 8-1956	800	930	1,05	11
	13- 9-1956	2 200	1 530	1,15	13,5
	4-10-1956	1 850	1 170	1,10	12
	26-10-1956	15	390	0,60	5
FARO à KOSSEL (amont confluent) bassin de 27 000 km ²	7- 8-1956	700	420	0,70	50 env.
	14- 9-1956	7 800	1 380	1,00	—
	3-10-1956	1 550	830	0,90	—
	7-10-1956	9 250	1 590	1,1	—
BÉNOUÉ à OU- RO-BOKI (aval confluent) bassin de 104 000 km ²	14- 8-1956	1 800	1 400	0,85	27 env.
	17- 9-1956	13 300	4 250	1,35	—
	2-10-1956	2 750	2 645	1,15	—
	25-10-1956	125	990	0,55	—

Les transports annuels de sable, y compris le charriage de fond, ont pu être grossièrement évalués :

BÉNOUÉ à KINADA : 200 000 m³/an soit 3 t/an/km².

FARO à KOSSEL : 400 000 m³/an soit 15 t/an/km².

BÉNOUÉ à OURO-BOKI : 600 000 m³/an soit 6 t/an/km².

Les grains de sable transportés sous forme de suspension ont un diamètre moyen de 0,1 à 0,3 mm. Ils dépassent rarement 0,4 mm, même pendant la période des plus hautes eaux où les vitesses d'écoulement maximales approchent 2 m/s. Par contre, les éléments qui sont entraînés par le charriage de fond, ont un diamètre de 0,6 à 0,9 mm en moyenne et peuvent atteindre assez fréquemment plusieurs millimètres.

b) Le LOGONE (Tchad).

La concentration en matériaux suspendus du LOGONE à LAÏ (Bassin de 60 300 km²) a fait l'objet d'une série de mesures pendant la saison de hautes eaux de 1955, année de forte hydraulicité.

L'analyse des prélèvements effectués à l'aide d'une pompe a conduit aux résultats suivants :

Date	Concentration g/m ³			Débit liquide m ³ /s
	Moyenne	Maximale	Minimale	
28- 7-1955	275	470	185	710
3- 8-1955	260	—	—	815
8- 8-1955	200	—	—	955
11- 8-1955	235	325	135	1 110
13- 8-1955	180	—	—	1 245
18- 8-1955	175	—	—	1 385
23- 8-1955	100	—	—	1 440
28- 8-1955	125	—	—	1 460
29- 8-1955	155	—	—	1 485
9- 9-1955	130	175	100	1 830
14- 9-1955	195	295	105	2 015
21-10-1955	65	70	55	2 600
26-10-1955	80	—	—	2 100
28-10-1955	85	165	60	1 870
31-10-1955	160	—	—	1 730
5-11-1955	180	—	—	1 810
10-11-1955	130	—	—	1 040

On constate que la concentration moyenne qui est assez élevée (275 g/m³) en juillet, c'est-à-dire au début de la crue annuelle, tend ensuite à décroître pendant toute la période de hautes eaux. On note cependant quelques recrudescences de la turbidité et notamment une au début de novembre due à une pointe de crue tardive.

Le transport annuel de matières en suspension du LOGONE à LAÏ (module annuel de 545 m³/s) est évalué à :

2 600 000 t, soit 43 t/an/km²

La répartition granulométrique moyenne est approximativement la suivante :

Argiles	60 à 70 %
Limons	30 à 20 %
Sables fins	8 %
Sables grossiers	2 %

c) Le CHARI (Tchad).

Quelques mesures de concentration ont été effectuées sur le CHARI en 1955. Les résultats de ces mesures sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Station	Date	Concentration moyenne (g/m ³)	Débit liquide (m ³ /s)
GUELENGDENG	6-10-1954	25	3 350
FORT-LAMY	24-10-1954	14	4 250
GOULFEÏ	8- 9-1954	85	2 250
GOULFEÏ	15-11-1954	31	—
DOUGUIA	23-11-1954	17	—

On remarque que les concentrations mesurées sur le CHARI sont nettement plus faibles que celles de son affluent, le LOGONE.

On peut estimer que le CHARI à GOULFEÏ (module de 1 050 m³/s) transporte annuellement en suspension : 2 000 000 t environ,
soit 3,3 t/an/km²

d) Le MANGOKY (Madagascar).

L'utilisation d'une turbidisonde de janvier à avril 1956 a permis d'étudier les transports solides du MANGOKY à la station du BANIAN, pendant la période des hautes eaux. Nous résumons ci-dessous les résultats des mesures :

Date	Concentration moyenne g/m ³	Débit liquide m ³ /s	Vitesse moyenne m/s	Date	Concentration moyenne g/m ³	Débit liquide m ³ /s	Vitesse moyenne m/s
8-1-56	2 100	2 745	1,67	21-2-56	55	530	1,01
3-2-56	1 520	1 195	1,28	22-2-56	70	470	0,93
4-2-56	545	990	1,21	23-2-56	95	445	1,06
5-2-56	595	905	1,17	24-2-56	65	415	0,91
6-2-56	155	775	1,09	25-2-56	60	395	0,89
8-2-56	125	595	1,03	26-2-56	65	355	0,85
10-2-56	490	660	1,07	28-2-56	55	340	0,83
20-2-56	(40)	570	1,03	29-2-56	485	400	0,90
1-3-56	145	480	0,94	19-3-56	110	300	0,82
2-3-56	280	505	1,00	25-3-56	1 325	1 090	1,28
8-3-56	920	1 620	1,60	27-3-56	1 020	1 420	1,45
13-3-56	290	565	1,05	28-3-56	395	1 130	1,36
15-3-56	440	440	0,91	29-3-56	420	650	1,07
17-3-56	105	335	0,88	16-4-56	630	235	0,77
				28-4-56	520	215	0,74

Nota : Les concentrations ont été mesurées en surface seulement du 20 au 28 février et sont probablement de ce fait nettement sous-estimées.

Bien qu'aucune corrélation nette ne puisse être établie, on remarque que la concentration tend à augmenter rapidement avec le débit et atteint des valeurs très supérieures à celles relevées sur la BÉNOUÉ et le LOGONE. Encore faut-il noter qu'aucun prélèvement n'a été effectué en très grandes crues, pendant lesquelles la turbidité s'approche peut-être de 10 000 g/m³.

On a tenté d'évaluer grossièrement les transports annuels en suspension, qui varient beaucoup d'une année à l'autre étant donné l'irrégularité du régime. On aboutit à des valeurs étalées entre 5,5 et 19 millions de tonnes, soit, pour un bassin de 54 000 km², une dégradation spécifique de :

100 à 350 t/an/km²

La granulométrie des matériaux en suspension s'établit en moyenne comme suit :

Argiles	20 % environ
Limons	20 % —
Sables fins	60 % —
Sables grossiers.....	0 à 2 % —

III. — CONCLUSION

Les données citées dans cette note ont permis d'établir le tableau récapitulatif ci-dessous :

Bassin	Superficie km ²	Dégradation spécifique t/an/km ²			Situation
		Suspension	Charriage de fond	Total	
M. KERENG B	0,066	165	475	640	Nord-Cameroun
MAGGIA.....	0,055	—	400	—	Niger
BANIAN.....	2,5	—	12	—	Madagascar
M. BOULORÉ.	3,75	4,5	—	—	Nord-Cameroun
TERO	32	650	—	—	Dahomey
TELOUA	1 170	25	—	—	Niger (Air)
BÉNOUÉ à KINADA	64 000	21 { 19 (arg. lim.) 2 (sable)	—	22 { 19 (arg. lim.) 3 (sable)	Nord-Cameroun
FARO à KOSSEL	27 000	100 { 90 (argile) 10 (sable)	—	105 { 90 (arg. lim.) 15 (sable)	Nord-Cameroun
BÉNOUÉ à OURO-BOKI .	104 000	39 { 35 (argile) 4 (sable)	—	41 { 35 (argile) 6 (sable)	Nigéria
LOGONE à LAÏ	60 300	43	—	—	Tchad
CHARI à GOULFEI	600 000	3,3	—	—	Tchad
MANGOKY au BANIAN.....	54 000	100 à 350	—	—	Madagascar

Les valeurs obtenues pour les dégradations spécifiques sont encore en nombre très insuffisant et sont beaucoup trop disparates pour que l'on puisse en tirer des conclusions intéressantes. On remarque qu'elles s'étendent sur une gamme très large mais on discerne encore mal l'influence exacte des différents facteurs du phénomène.

On notera cependant que les dégradations spécifiques les plus élevées se rapportent à des bassins de très faibles superficies. Ainsi, la dégradation du MAYO-KERENG B, qui se trouve à l'intérieur du bassin de la BÉNOUÉ, est de 640 t/an/km², alors qu'on relève seulement 22 t/an/km² à la station de KINADA. Il ne faut pas s'en étonner. En effet, la pente moyenne tend à diminuer avec la superficie du bassin ; par ailleurs, une grande partie des apports solides des branches supérieures se déposent dans le lit alluvionnaire et les plaines d'inondation de la BÉNOUÉ et de ses gros affluents, dont le remblaiement progressif ne laisse aucun doute, à l'échelle des temps géologiques. C'est là une difficulté supplémentaire qui joue sur de nombreux bassins en voie d'évolution et qui complique singulièrement le problème des transports solides. Des études systématiques et intensives restent à entreprendre pour débrouiller ce problème dans ses grandes lignes.

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

ANNUAIRE HYDROLOGIQUE

**DES ÉTATS D'OUTRE-MER DE LA COMMUNAUTÉ
DES TERRITOIRES ET DÉPARTEMENTS FRANÇAIS
D'OUTRE-MER
DU CAMEROUN ET DU TOGO**

ANNÉE

1958

publié avec le concours de
L'ÉLECTRICITÉ DE FRANCE

et de la
SOCIÉTÉ HYDROTECHNIQUE DE FRANCE

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER
24, Rue Bayard
PARIS-VIII^e
1961