

DONNÉES SUR LES TRANSPORTS DU NIGER MOYEN ENTRE KANDADJI ET NIAMEY

R. GALLAIRE

RÉSUMÉ

Initié en 1976 par un projet de barrage à proximité de la frontière malienne, le contrôle des transports du fleuve Niger s'est poursuivi, durant près de dix ans, sur le site projeté (Kandadji), puis à Niamey.

Le transport en suspension, faible toute l'année, connaît deux maxima :

- .Celui de l'hivernage, lié aux apports des affluents sahéliens, possède les concentrations les plus fortes ; mais s'appliquant à des débits encore modestes elles n'induisent pas de masses importantes.
- .Celui de la crue dite "malienne" survient, dans le cadre actuel de sécheresse, en Octobre-Novembre. Les concentrations sont plus modestes mais elles concernent des débits beaucoup plus importants, d'où des masses transportées nettement supérieures à celles de l'hivernage.

En décrue une légère reconcentration, de janvier à Mars, apparaît liée au rôle de l'Harmattan, qui renforce le pouvoir évaporant de l'air, remet en suspension, par agitation, des sédiments de fond et de berges, et apporte des aérosols.

En phase finale de l'étiage, la part du transport dissous qui, sur ces eaux faiblement concentrées n'est jamais négligeable, devient prépondérante.

Les courbes granulométriques montrent que le volume des "fines", inférieures à dix microns, est une constante tout au long du cycle hydrologique, et ne représente que de 10 à 15 pour cent du volume global de la suspension

INTRODUCTION

Contexte de l'étude:

Le projet de barrage sur le site de Kandadji motiva une étude dont le volet hydrologique fut confié à l'ORSTOM par la SOFRELEC en accord avec le Ministère des Mines et de l'Hydraulique du Niger. Cette étude, qui s'effectua sur cinq ans de 1976 à 1981, avait entre autre but d'évaluer, comme à l'occasion de tout projet de retenue, l'importance du transport solide en suspension responsable de la diminution du potentiel de l'ouvrage.

Postérieurement à l'étude contractuelle, les mesures seront poursuivies dans le cadre de la formation de stagiaires, jusqu'en 1983 à Kandadji, de 1984 à 1986 à Niamey.

Situation et conditions naturelles:

A 30 km de la frontière malienne, Kandadji se situe sur la branche amont issue de la "cuvette lacustre" à environ 400 km en aval de cette dernière (Fig.1 et 2)

Depuis cette vaste zone amphibie, encore appelée "Delta intérieur", le fleuve Niger ne reçoit qu'un seul affluent digne de ce nom, le Gorouol, dont le bassin de 45000 km², en partie endoréique, chevauche trois pays : Mali, Burkina Faso et Niger, et qui conflue en rive droite à quelques kilomètres seulement à l'amont de Kandadji.

Les cinq premières années de contrôle des suspensions s'effectueront donc sur le Niger à Kandadji et le Gorouol à Dolbel.

Le site de Niamey, à 180 km en aval de Kandadji, intègre deux nouveaux affluents en rive droite, le Dargol et la Sirba dont les bassins, respectivement 7200 et 39000 km², sont installés sur les mêmes formations du Liptako voltaïque, où l'endoréisme est encore présent du fait de pentes faibles, mais où les dépôts éoliens sont moins importants.

La position plus méridionale assure d'autre part une meilleure pluviosité, et le régime sahélien des précipitations est progressivement teinté d'influence tropicale.

L'endoréisme moins marqué et les précipitations plus abondantes expliquent l'importance croissante des apports au fleuve Niger, comme le montre le tableau 1 qui présente les caractéristiques hydrologiques des affluents calculées sur la décennie 1976-1986.

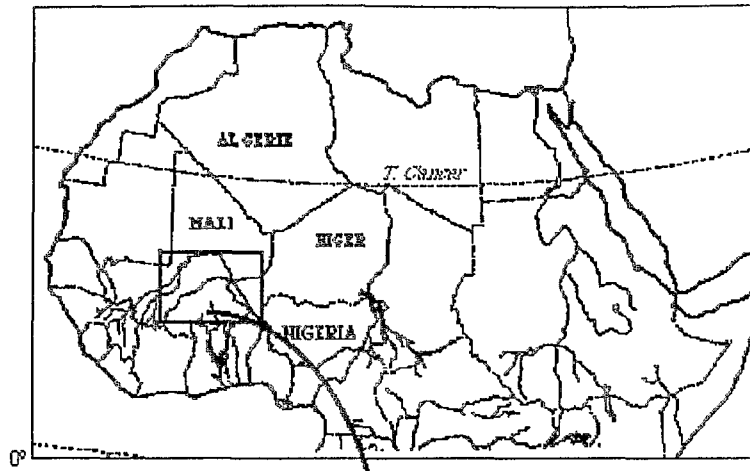


Figure 1 :
Localisation de l'étude.

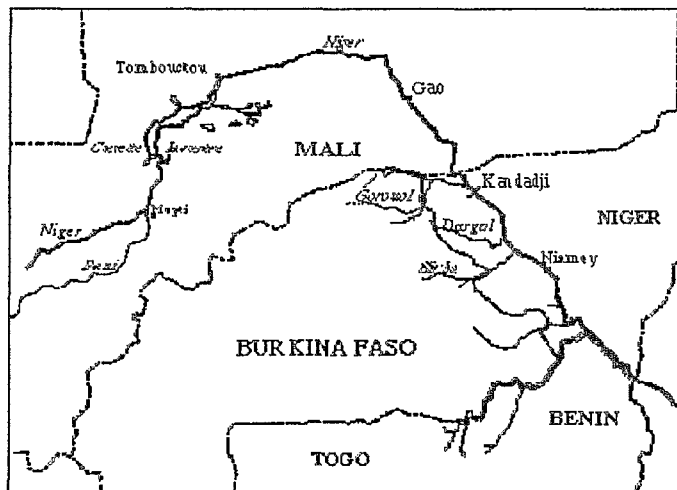


Figure 2 :
Domaine d'étude

Tableau 1 :
Caractéristiques des bassins affluents du Niger

Affluents du N au S	Superficie Bassin km ²	Pluviométrie annuelle mm	Module m ³ s ⁻¹	Débit spécifique l s ⁻¹ km ²
GOROUOL	45000	250-300	9	0,2
DARGOL	7200	350-400	6,6	1,1
SIRBA	39000	>500	18	2,2

Le régime hydrologique du fleuve est fortement influencé par son passage dans le "Delta intérieur".

La crue est laminée : près de 50 % du débit entrant ne se retrouve pas à la sortie, essentiellement en raison de pertes par évaporation dans les champs d'inondation qui peuvent représenter plusieurs dizaines de milliers de km² en hautes eaux.

La crue est régularisée à sa sortie de la cuvette ; le Niger présente un hydrogramme de forme simple. Les différents régimes de la pré-cuvette se confondent, les débits évoluent donc de façon progressive, sauf en hivernage où les apports brutaux des affluents peuvent venir perturber la régularité de la montée de la crue.

Cette régularité facilitera grandement le contrôle des débits tant liquides que solides.

I. LES MESURES, PRINCIPE ET METHODES:

1) La pratique courante de la mesure des suspensions sur les grands fleuves s'est apparentée jusqu'ici à celle de la mesure des débits.

Elle utilise une technique lourde qui consiste à prélever dans la section mouillée autant d'échantillons d'eau qu'il est pratiqué de mesures de vitesses.

Ces échantillons (10 litres dans notre cas) sont décantés puis filtrés à 10 μ (la filtration à 10 μ répondait au souci de l'aménageur d'estimer la vitesse de colmatage de l'ouvrage projeté), et étuvés à 105 ° avant d'être pesés au centième de gramme. La masse obtenue, qui contient encore de la matière organique, est rapprochée du volume d'eau prélevé pour définir la concentration en mg l⁻¹.

A partir de ces valeurs ponctuelles de concentration diverses méthodes de traitement permettent d'obtenir le débit solide et la masse transportée.

2) Le calcul du débit solide :

Trois méthodes ont été testées durant les dix années d'étude :

a) La méthode la plus rigoureuse est celle utilisée à l'ORSTOM par J-F Nouvelot, dès les années soixante, qui consiste à affecter à chaque valeur de concentration la vitesse correspondante. Le produit concentration - vitesse est ensuite traité, suivant la technique de la double intégration graphique des débits liquides, pour arriver au débit solide.

$$Q_s = \int_0^l \int_0^p q_s \cdot dl \cdot dp$$

Avec: Q_s : Débit solide

q_s : Le débit solide par unité de section mouillée (g.m⁻².s⁻¹)

l : La largeur du cours d'eau

p : La profondeur du cours d'eau.

b) La méthode de pondération fait intervenir la notion de concentration moyenne dans la section,

$$Q_s = Ql \cdot C$$

que l'on obtient aussi par une double intégration graphique, sur la largeur et la profondeur, des valeurs ponctuelles de concentration.

Cette méthode a pour inconvénient de considérer que la concentration est indépendante des autres facteurs de l'écoulement, en particulier de la vitesse, ce qui n'est jamais vraiment le cas, même sur des fleuves réguliers comme le Niger.

c) La méthode de la moyenne arithmétique considère que la concentration moyenne dans la section est la moyenne arithmétique de toutes les concentrations relevées.

Tous les points de prélèvement ont le même poids dans la section :

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \cdot \frac{1}{n}$$

Où C est la concentration moyenne,
 C_i la concentration ponctuelle,
 n le nombre de points de mesure.

$$\sum_{i=1}^n C_i$$

Le débit solide devient alors : $Q_s = \frac{1}{n} \cdot Ql$

Cette méthode semble une approche encore plus simplifiée du phénomène.

3) Résultats obtenus et fréquence des prélèvements;

Les premières mesures, et ultérieurement celles réalisées dans le cadre de la formation, furent menées dans l'espoir de vérifier l'homogénéité du transport dans la section qu'il n'était pas incohérent d'espérer sur un fleuve comme le Niger, aux pentes faibles, à la section régulière et aux profondeurs limitées (Rayon hydraulique proche de la profondeur moyenne).

a) Les résultats obtenus lors de ces contrôles (tableaux ci-dessous) ont montrés qu'outre l'excellente cohérence des résultats donnés par les méthodes Nouvelot et arithmétique, il existait une étroite corrélation entre ces derniers (en particulier ceux de la méthode Nouvelot) et les résultats des prélèvements ponctuels.

Contrôle du 8 janvier 1985

METHODE	NOUVELOT Qs1	PONDERATION Qs2	ARITHMETIQUE Qs3
Débit solide (Kg s ⁻¹)	40,72	36,30	40,03
Variation Relative (%)	$(Qs3 - Qs1) / Qs3$ ϕ(3,1) = 1,69	$(Qs1 - Qs2) / Qs1$ ϕ(1,2) = 10,85	$(Qs3 - Qs2) / Qs3$ ϕ(3,2) = 9,32

L'échantillon témoin prélevé ponctuellement donnant les résultats suivants :

Concentration: 0,073 g l⁻¹, débit solide : 40,15 kg s⁻¹.

Contrôle du 7 Février 1985

METHODE	NOUVELOT Qs1	PONDERATION Qs2	ARITHMETIQUE Qs3
Débit solide (Kg s ⁻¹)	14,98	12,75	15,6
Variation Relative (%)	$(Qs3 - Qs1) / Qs3$ ϕ(3,1) = 4	$(Qs1 - Qs2) / Qs1$ ϕ(1,2) = 14,9	$(Qs3 - Qs2) / Qs3$ ϕ(3,2) = 18

L'échantillon témoin donna les résultats suivants :

Concentration : 0,066 g l⁻¹, débit solide : 14,98 kg s⁻¹.

Sur l'ensemble des jaugeages complets réalisés tant à Kandadji qu'à Niamey l'écart entre le résultat des mesures complètes et ponctuelles a toujours été compris entre 0 et 3%. Ces démonstrations de l'homogénéité du transport dans la section ont justifié l'utilisation du prélèvement ponctuel comme technique simple de contrôle de la suspension sur le Niger.

b) Périodicité des prélèvements:

Durant le temps de l'étude pour l'ouvrage, les prélèvements furent réalisés, sur le fleuve comme sur le Gorouol, tous les trois jours, le lecteur d'échelles ayant néanmoins pour consigne d'augmenter la fréquence de l'échantillonnage en cas de rapide variation limnimétrique (crue du Gorouol).

Par la suite à Niamey les prises n'eurent lieu que tous les cinq jours en crue, tous les dix jours en décrue, sans que la qualité du suivi n'en paraisse altérée.

Au total 1300 échantillons seront prélevés aux trois stations observées (Dolbel, Kandadji et Niamey) et une douzaine de mesures complètes réalisées.

II. LES CONCENTRATIONS:

1) Evolution des concentrations particulières à Kandadji;

Quelque soit l'hydraulicité de l'année considérée, les concentrations ponctuelles apparaissent faibles;

— Maximales en début d'hivernage où elles correspondent aux eaux de lessivage des premières crues des affluents, elles ne dépassent que rarement 500 mg l⁻¹ (on note 830 mg/l en Juillet 1979, et surtout 1,6 g l⁻¹ en Juin 1977).

Ces maxima qui surviennent sur le fleuve avant l'arrivée des hautes eaux en provenance de Guinée et du Mali sont à rapprocher des valeurs enregistrées sur le Gorouol à la même époque où les concentrations atteignent fréquemment plusieurs grammes par litre :

3,7 g l⁻¹ le 14/6/76, 5,4 g l⁻¹ le 3/6/77, 5,9 g l⁻¹ le 8/6/78 et 4,6 g l⁻¹ le 22/6/82 et où la concentration moyenne de la saison des pluies atteint 750 mg l⁻¹ (Tab.3).

Il est vraisemblable que les affluents intermédiaires Dargol et Sirba, issus des mêmes types de formations, dont les bassins sont mieux arrosés et moins marqués par l'endoréisme, produisent des concentrations au moins égales à ces dernières.

_ Minimales en décembre-janvier, en début de décrue, les valeurs ponctuelles descendent en dessous de 30 mg l⁻¹. La moyenne des concentrations de Décembre de la période 76-83 n'est que de 32 mg l⁻¹.

_ Entre Janvier et Mars, alors que le fleuve est dans sa phase la plus active de décrue, et que l'on est en mesure d'attendre une perte de compétence, les concentrations augmentent à nouveau. Les valeurs mensuelles interannuelles, bien que pondérant les phénomènes, illustrent malgré tout ce qui précède (Tableau 2, fig. 3).

Si les valeurs absolues de cette nouvelle tendance restent modestement inférieures à 80 mg l⁻¹, elles n'en constituent pas moins une anomalie dont la cause semble pouvoir être liée à divers facteurs climatiques :

Tableau 2 :
Concentrations moyennes mensuelles du Niger à Kandadji (en g m⁻³)

Année	Jun	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avri	Mai
76/77		272	139	168	108	70	37	30	45	68	71	68
77/78	207	269	244	120	97	56	38	46	57	41	68	71
78/79	141	295	145	137	100	52	30	27	52	93	76	83
79/80	106	330	161	97	75	43	27	20	40	59	52	86
80/81	108	513	405	161	104	35	28	35	21	41	30	46
81/82	96	384	293	148	73	38	24	29	41	24	28	33
82/83	396	295	217	142	92	31	42	77	66	91	84	77
MOY.	151	337	229	139	93	46	32	38	46	60	58	66

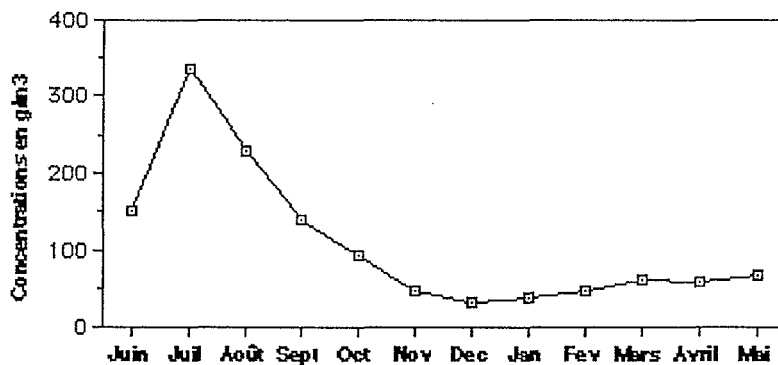


Figure n° 3

Concentrations moyennes mensuelles à Kandadji (1976 - 1983) en g m⁻³

a) L'action de l'évaporation;

A partir de février on assiste à un relèvement des températures diurnes, comme le montre le graphique ci-après qui présente les températures maximales moyennes mensuelles de la période d'étude.

Mais c'est surtout l'action de l'Harmattan qui, durant cette période, explique le fort pouvoir évaporant de l'air.

Les valeurs relevées à la station météorologique de Kandadji doivent assez bien refléter les conditions existant sur la cuvette, bien que son étendue puisse générer un micro climat atténuant l'effet de continentalité et d'aridité.

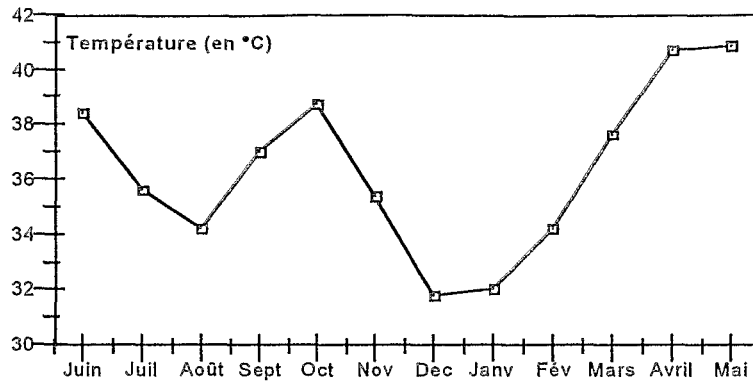


Figure n° 4

Moyenne mensuelle des températures maximales à Kandadji (1976 - 1983).

La figure 5 présente pour la période les variations mensuelles d'humidité relative calculées à 18 h à partir des températures sèches et humides, et d'évaporation Bac (Bac ORSTOM enterré de 1 m² et de 0,5 m³ de volume en eau).

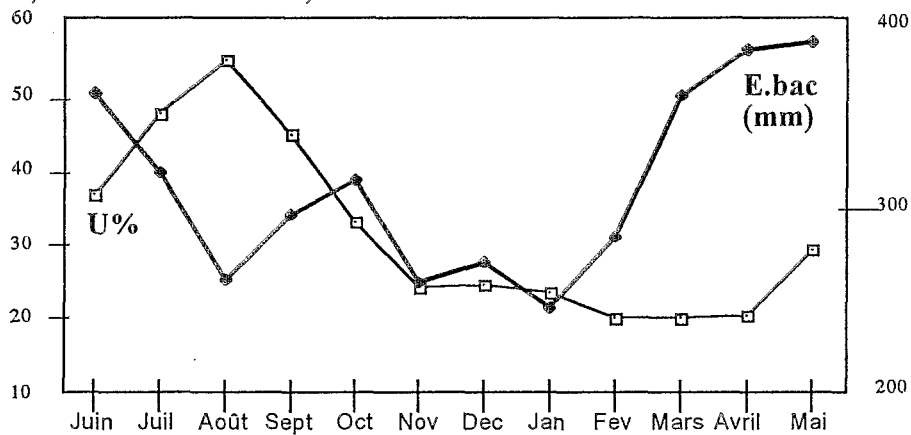


Figure 5

Moyenne mensuelle de l'humidité relative U et de l'évaporation bac à Kandadji (1976 - 1983).

b) L'apport des aérosols:

Durant cette même période de février à mars, l'harmattan, qui souffle du NE, apporte une grande quantité de poussières des déserts du Ténéré (Tafassasset et Tamesna), du Tanezrouft (célèbre pour son fech-fech) et du bassin des Iullemeden, sur le fleuve et surtout sur la cuvette lacustre.

Cet Harmattan "chargé de poussières désertiques" (M. Mainguet, G.Goude-Gaussen et P. Rognon) souffle à contre courant, soulevant des vagues dont la hauteur est surtout fonction de la distance d'action, 50 cm sur le fleuve, jusqu'à 1 m sur les hauts fonds de la cuvette lacustre (communication personnelle D. Chaizière) et dont l'agitation remet en suspension des éléments préalablement sédimentés sur le fond et les berges. Les embruns arrachés à la crête des vagues sont, avec ces dernières, autant d'écrans et de pièges pour les lithométéores des basses couches; en particulier lorsqu'ils sont hygroscopiques comme les argiles.

Ces particules dont la taille, pour pouvoir rester en suspension, est inférieure à 50 μ (à Niamey 80 % des aérosols ont moins de 20 μ et leur concentration est de l'ordre de 10⁷ mg par m³ d'air) peuvent donc contribuer de façon sensible à l'augmentation de concentration constatée dans les eaux du fleuve.

Durant les périodes d'Harmattan les vitesses de déplacement des masses d'air au sol sont de l'ordre de 15 à 20 nœuds (J.F. Griffiths). Sur la base d'une vitesse de 18 nœuds et d'un front d'eau sur le Delta Intérieur de 150 Km de large, l'apport journalier serait de 1,2.10¹² mg.

Si en janvier on considère que le débit moyen du fleuve, au cours de cette période de sécheresse, est de l'ordre de $1500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, l'apport des aérosols serait modestement de $9,26 \text{ mg l}^{-1}$.

Par contre en mars, le même apport éolien, sur seulement $425 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, serait de $32,7 \text{ mg l}^{-1}$, et expliquerait donc, en grande partie, à lui seul, la reconcentration.

La découverte de la finesse de ces éléments amena à s'interroger à nouveau sur la valeur de la filtration à 10μ opérée tout au long de l'étude.

Afin de répondre à cette interrogation, une série de prélèvements fut réalisée sur le fleuve entre Novembre 1992 et Avril 1993 (M. Estève, J.D. Taupin) ; la validité de cette expérience étant justifiée par la grande régularité de l'hydrogramme et la cohérence interannuelle des concentrations durant cette période (Tab. 2)

Ce dernier échantillonnage consista à effectuer une prise décadaire d'un litre dont l'unique traitement par étuvage préserva l'intégralité de l'information sur le transport, contrairement à l'opération mixte filtration-étuvage menée jusqu'ici.

Un double objectif était en fait fixé à cette expérience :

- La définition de l'erreur relative existant sur les résultats de la décennie étudiée,
- la recherche du rôle des aérosols dans la reconcentration des eaux de milieu de décrue.

La granulométrie fine au granulomètre laser dans la gamme $0-800 \mu$ permet de montrer (Fig.6) :

- que la partie fine ($< 10 \mu$) de la suspension ne représentait en moyenne que 10 à 15 % du volume du transport.
- que certains échantillons produisaient, à la fois, un second pic différentiel dans la gamme $200 - 400 \mu$ et une courbe cumulative redressée suggérant l'existence d'une fraction bien calibrée pouvant être d'origine éolienne.

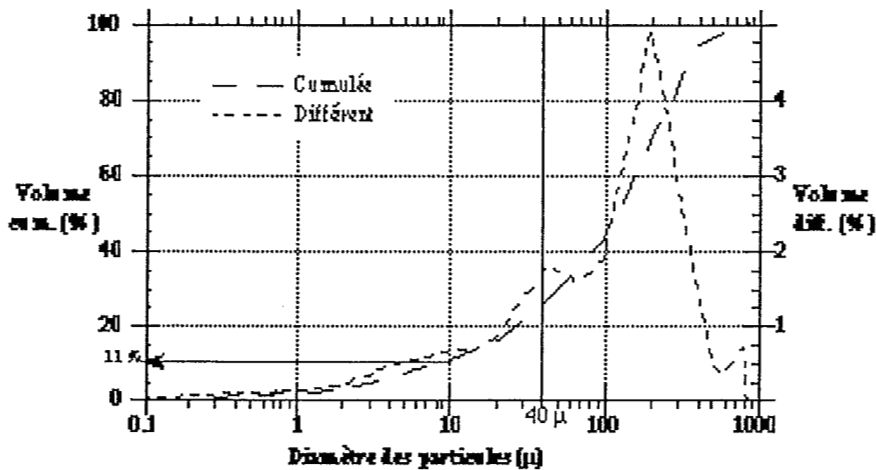


Figure n° 6
Granulométrie du 21/01/93

L'analyse au MEB-EDS d'une sélection d'échantillons montra que le matériau, très homogène, était essentiellement constitué de plaquettes d'argiles de 10 à 100 microns, sur lesquelles se trouvaient sertis, plus particulièrement en phase éolienne, de petits grains de quartz de 0,2 à 1 microns.

Les observations météorologiques à Niamey étant le plus souvent représentatives des types de temps régnant sur la "région du fleuve" (bonne corrélation avec les données de Tillabéry, à 110 km en amont) il est vraisemblable que cette représentativité puisse s'étendre à la *Cuvette*, tout au moins en ce qui concerne les périodes de vents de sable.

Suivant les vitesses de propagation du flux liquide (J.P. Lamagat, B. Billon), la correspondance des lignes 3 et 4 du tableau ci-dessous serait décalée de 5 à 8 semaines.

Date	23-11	2-12	11-12	21-12	1-01	11-01	21-01	1-02	26-02	8-03	22-03	3-04	14-04
Concentrat (mg/l)	65	80	75 (1320)	90	65	60 (726)	102	6	(233)	(177)	121	59	85
Chasse sable	non	oui	non	oui	non	oui	oui	non	non	oui	oui	non	oui
Granulo. 100-400 µ	no	non	no	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Silice RX				oui			oui				oui		

(entre parenthèses: Débits en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

2) Evolution des concentrations particulières à Niamey :

La comparaison des concentrations moyennes mensuelles calculées pour Kandadji (tab.2) et Niamey (tab.3), illustrée par la figure 7 ci-dessous, montre que les valeurs de la capitale (bien que leurs moyennes soient encore insuffisamment représentatives du fait de leur calcul sur deux ou trois ans) sont toujours globalement plus élevées que celles de Kandadji.

Tableau 3

Concentrations moyennes mensuelles (en $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) du Niger à Niamey

Année	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avri	Mai
1984									79	48	88	165
84/85	329	442	338	241	500	150	100	74	77	106	71	133
85/86	133	383	402	373	227	176	116	109	106	72	75	77
1986	91	440	504	454								
MOY.	184	422	415	356	364	163	108	91,5	87,3	75,3	78,0	125

Dans le détail, les disparités du tracé trouvent une explication principalement dans la présence des affluents intermédiaires, Dargol et surtout Sirba, dont les écoulements viennent rejoindre ceux du fleuve plus de six mois par an (Tab.4).

Tableau 4

Concentrations moyennes mensuelles du Gorouol à Dolbel (en $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

Année	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	MOY	Mod
1976				1270	709	659	453	1060	310*	830	6,6
1977				1470	735	458	380	242		657	9,6
1978	770*	700*	540*	1410	590	300	910	1220		886	11,5
1979			1120	1260	1310	660	350	290	380*	774	7,6
1980					723	509	318*			516	8,6
1981				960*	960	680	600	400*		720	6,8
1982			1371	1221	1052	578	316	411*		716	12,1
MOY.			1010*	1265*	868	549	475*	604*	345*	752 #	9

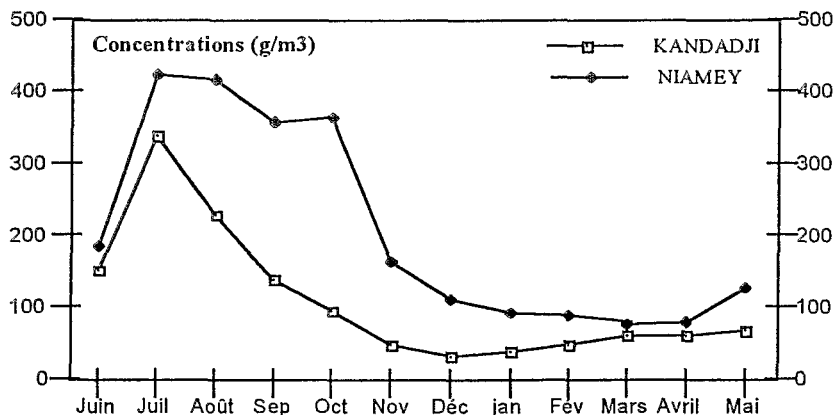
*: Ecoulements non permanents #: de juin à octobre Mod: Module en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 

Figure n° 7 :

Concentrations moyennes mensuelles à Kandadji (76-83) et Niamey (84-86)

Alors qu'à Kandadji la courbe de décrue des concentrations est régulière, dès le mois d'Août, à peine perturbée en octobre par le retour du FIT et l'approche des hautes eaux guinéennes, à Niamey le maximum (qui comme à Kandadji est dû à l'arrivée des eaux des affluents) s'étale sur deux mois en raison des apports relativement plus importants des émissaires intermédiaires Dargol et Sirba.

La décrue qui suit apparait nettement plus perturbée en octobre qu'à Kandadji pour les mêmes raisons, mais aussi parce que la valeur moyenne de Niamey, qui n'est établie pour cette période que sur deux ans, intègre l'averse exceptionnelle de 200 mm survenu dans la région de Tillabéry le 30 septembre 1984 après un hivernage particulièrement déficitaire.

Cette averse provoqua localement d'importants ruissellements et une intense érosion, malgré l'activité végétative encore partiellement efficace à cette période de l'année. La figure 8 illustre cet événement et souligne l'importance de la suspension qui dépasse un gramme par litre sur le fleuve, durant une dizaine de jours, et ce malgré des débits naturels sur le Niger de l'ordre de huit à neuf cents $m^3.s^{-1}$.

Le schéma d'évolution de l'année 1985 est vraisemblablement représentatif d'une année moyenne dans le contexte de sécheresse actuel (Fig.9)

Les concentrations qui sont maximales fin Août ne dépassent guère $500 mg.l^{-1}$ et correspondent aux apports des affluents consécutifs à la redescente du FIT sur le Sahel.

La forte diminution ou l'arrêt des écoulements qui suit en Septembre-octobre sur les émissaires voltaïques entraîne à la fois sur le fleuve une pose dans la montée des eaux et un effondrement des concentrations. L'arrivée des hautes eaux maliennes en Novembre ralentit seulement cette dernière tendance sans parvenir à l'inverser.

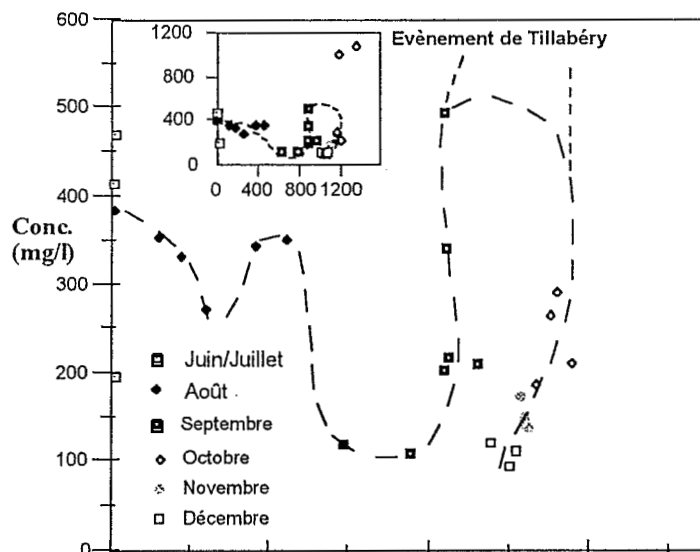


Figure n° 8

Relation concentration débit à Niamey en 1984

Il apparait donc qu'à Niamey les concentrations sensiblement plus élevées qu'à Kandadji, une bonne partie de l'année (excepté en fin de saison sèche et en début d'hivernage), soient le fait des affluents rive droite et en particulier de la Sirba qui possède, et de loin, de par la superficie de son bassin et sa position plus méridionale, les meilleures potentialités.

Lors de la première phase de décrue naturelle du fleuve de janvier à mars nous avons vu précédemment qu'à Kandadji la valeur des concentrations, en liaison avec l'action de l'harmattan, augmentait à nouveau durant cette période.

Cette observation n'est pas réalisée sur la figure 7 pour Niamey, bien que l'on puisse noter entre janvier et février un pallier dans la décroissance des valeurs. Il est probable que cette absence de similitude soit encore liée à la faible représentativité des moyennes de Niamey; mais au fait

aussi qu'à partir de 1986 les lâchures des barrages maliens ont soutenu épisodiquement la décrue du fleuve modifiant donc le schéma naturel:

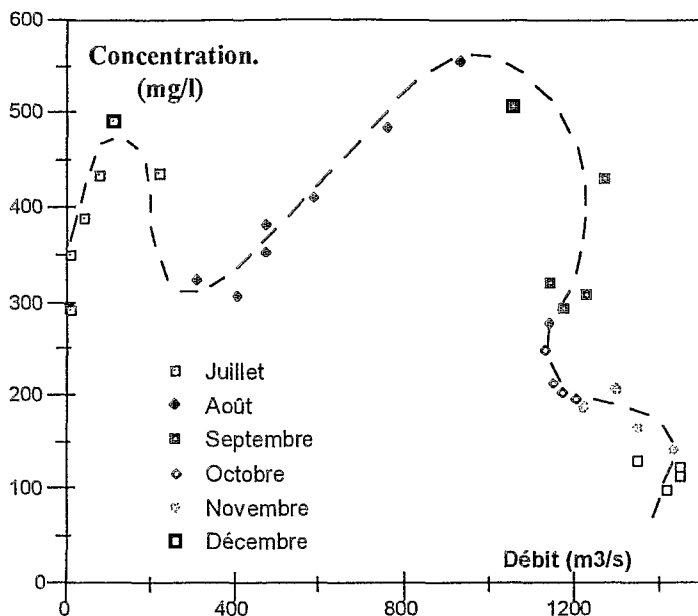


Figure n° 9

Relation concentration débits à Niamey en 1985

Le début de l'année 1985 présente encore à Niamey (tab.3) une augmentation des concentrations conforme au schéma de Kandadji ; en 1986 elles décroissent jusqu'en mars et augmentent à nouveau jusqu'à fin Mai sous l'effet des soutiens maliens, et avant l'arrivée des premières eaux voltaïques de Juin.

Les résultats des prélèvements effectués entre la pointe de crue 1992 et l'étiage 1993 montrent cependant que l'influence éolienne peut aussi apparaître à Niamey (Fig. 10).

Car si la forte augmentation des concentrations, conjuguée au ralentissement de la décroissance des débits fin mars, peut être partiellement imputée à une lâchure de la retenue prés-cuvette de Markala, il n'en est rien pour le phénomène de fin Janvier qui intervient au moment d'une accélération de la décrue naturelle du fleuve.

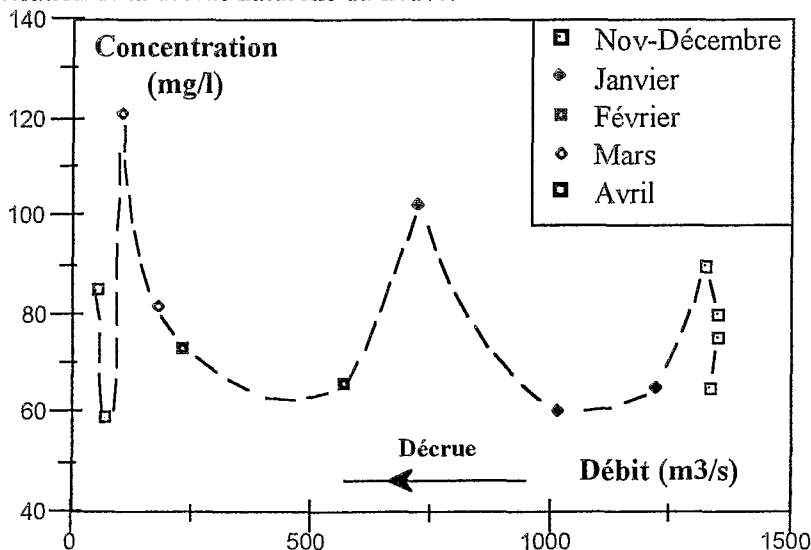


Figure n° 10

Relation concentration débit à Niamey en 1992/93

3) Concentrations de substances dissoutes:

On admet habituellement que dans le transport des régions sahéliennes la fraction dissoute est négligeable par rapport à la fraction particulaire. Dans la littérature un rapport moyen de 90 % en faveur de la suspension est généralement avancé.

Si cette considération ne peut être écartée lorsque les suspensions atteignent ou dépassent un gramme par litre, il n'en est plus de même lorsqu'elles apparaissent de l'ordre du dixième de gramme; et il devient alors nécessaire de s'interroger sur la participation de la fraction dissoute au transport global. D'autant plus qu'en milieu intertropical la variation saisonnière des facteurs influençant l'hydrolyse des minéraux, et en premier lieu la température, est relativement faible, assurant donc une certaine stabilité annuelle à ce type de transport. A l'inverse les phénomènes de suspension sont très dépendants, en milieu sahélien, des conditions de pluviosité que l'on sait particulièrement aléatoires.

Grâce aux mesures qui furent réalisées à Kandadji en 1980 dans le cadre des études pour le barrage il est possible d'estimer la participation de la fraction dissoute au transport, bien que ces mesures qui restent ponctuelles soient peu nombreuses et inégalement réparties sur l'année hydrologique.

Des analyses chimiques ont été réalisées sur les eaux du fleuve à l'aval de Niamey entre 1984 et 1986 par une équipe du département de chimie de l'Université. Ses résultats, par ailleurs fort intéressants, n'ont pas été retenus, car ils sont apparus trop marqués par les phénomènes de pollution liés aux rejets de la ville; en particulier les résultats de chlorures et phosphates.

Le tableau 5 montre que le maximum de concentrations de matières dissoutes (73 mg.l^{-1}) se situe en fin de saison sèche au moment où les débits sont les plus faibles et les températures de l'eau les plus élevées. Le minimum (31 mg.l^{-1}) survient à l'inverse en octobre au moment de l'arrivée des hautes eaux maliennes (Fig. 11).

Tableau 5

Substances dissoutes (concentrations ponctuelles en mg.l^{-1}) et suspensions (concentrations moyennes mensuelles en mg.l^{-1}) du Niger à Kandadji en 1980-1981.

PRELEVEMENT	7/1	11/2	5/3	25/4	20/6	1/10	3/12	MOY.
Dissoutes	39,9	43,4	40,3	52,1	73,3	30,8	34,3	44,9
Suspensions	109	125	95,0	12,0	2,51	300	130	111
Conc. Globale	149	168	135	64,1	75,8	331	164	155
Susp/Glob.	0,73	0,74	0,70	0,19	0,03	0,91	0,79	0,71

Les transports en suspension présentent donc une évolution inverse des transports dissous:

Le rapport apparaît positif pour les suspensions qui représentent globalement 71 % du transport. Mais si cette valeur est représentative du phénomène en décrue de Janvier à Mars, elle ne l'est plus en fin de décrue où les transports en suspension représentent moins de 20 % du flux global. A l'inverse durant l'hivernage l'apport solide des affluents doit assurer à la suspension une prépondérance accrue, à l'image des 91 % d'Octobre.

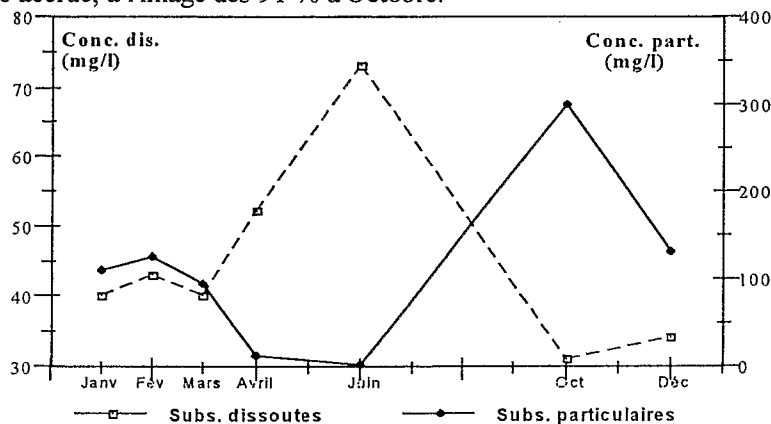


Figure n° 11

Concentration des matières dissoutes et particulaires du Niger à Kandadji en 1980-1981.

III. LES DEBITS SOLIDES ET LES MASSES TRANSPORTEES:

1) A Kandadji:

Le tableau 6 présente les valeurs mensuelles des masses ayant transitées à Kandadji durant les sept années d'étude du site.

La moyenne interannuelle est de 1635 tonnes; les années 1978 à 1982 présentent un faible écart à la moyenne, celui des années 1976 et 1977 étant d'environ 25 %.

L'étude de l'hydraulicité de ces deux années permet de voir qu'elles constituent les deux extrêmes de cette courte série :

- L'année 1976, avec un débit de pointe de $1\,935\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ et un module de $926\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, apparait statistiquement moyenne, relativement aux 52 valeurs de module possédées, mais plutôt excédentaire dans le contexte de sécheresse amorcé depuis la fin des années soixante.
- L'année 1977 avec un débit de pointe de $1405\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ et un module de seulement $565\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ apparait statistiquement déficitaire d'environ une année sur vingt par rapport à la normale, mais nettement moins par rapport aux dix dernières années.

Tableau 6

Transports solides en suspension (en milliers de tonnes) du Niger à Kandadji

Année	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	AN.
76-77	10,4	14,9	129	402	370	280	177	161	194	207	66,1	16,9	2028
77-78	20,4	47,4	136	225	273	195	152	131	65,1	19,1	10,8	4,82	1280
78-79	2,88	54,1	268	345	335	210	140	122	146	114	28,5	9,62	1775
79-80	3,84	16,6	231	280	276	191	133	109	125	76,1	15,9	6,29	1464
80-81	2,51	234	220	360	340	136	118	130	33,9	26,8	6,45	2,14	1610
81-82	1,79	30,3	262	433	276	161	115	125	80,3	17,3	5,05	2,44	1509
82-83	47,2	100	367	357	305	118	167	202	68,7	35,4	10,4	2,97	1781
MOY.	12,7	71,0	230	343	311	184	143	140	102	70,8	20,5	6,45	1635

Ces deux années d'hydraulicités opposées soulignent donc que la masse transportée dépend avant tout du volume écoulé. Le rôle du Gorouol apparait ainsi minimisé dans ce domaine au profit du rôle de la crue guinéo-malienne.

La figure 12 qui superpose hydrogramme et flux moyens mensuels à Kandadji montre :

- que le flux de matière précède suivant le schéma habituel le flux liquide,
- que la participation des écoulements du Gorouol au flux de matière ne peut être que limitée, compte tenu de l'importance à partir d'Août des débits du fleuve qui atteignent $500\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, un facteur 20 à 50 existant alors entre les écoulements de cet affluent et ceux du Niger, sans que le rapport des concentrations, pourtant très favorable au Gorouol (facteur 10 à 15), n'atteigne ces valeurs. A Kandadji le flux de matières en suspension d'Août doit donc déjà dépendre majoritairement des écoulements guinéo-maliens; à plus forte raison ceux de Septembre.

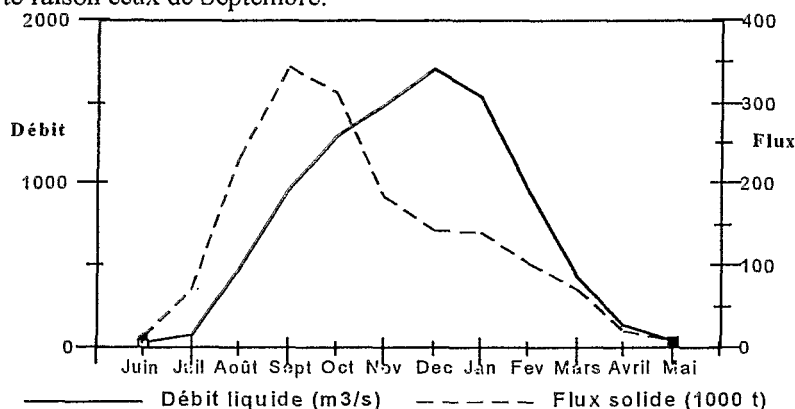


Figure n° 12

Hydrogramme et flux moyen du Niger à Kandadji.

2) A Niamey:

Le tableau 7 illustré par la figure 13 montre l'écart qui peut exister à Niamey entre une année reconnue faible, 1984, particulièrement si l'on fait abstraction de l'évènement exceptionnel du 30 Septembre dans la région de Tillabéry (sur la figure cette abstaction est figurée en pointillé) et une année 1985 qui peut être considérée comme moyenne dans le contexte de sécheresse des vingt dernières années.

Octobre représentant au Sahel la fin de l'hivernage, et donc une forte réduction des apports burkinabés; les transports de ce mois ne devraient pas ou peu, et malgré le passage des hautes eaux maliennes, excéder ceux de Septembre en année normale.

Tableau 7

Transports solides en suspension (en milliers de tonnes) du Niger à Niamey.

Année	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc.	Janv.	Fév	Mars	Avril	Mai	Ann.
1984									55,8	12,9	6,14	4,68	
84-85	13,9	11,5	259	519	1551	403	249	95,5	33,7	19,4	3,13	2,65	3161
85-86	0,98	70,7	552	1122	703	599	439	301	97,4	23,1	7,27	3,77	3919
1986	2,17	98,1	522	836									
MOY.	5,69	60,1	444	826	1127	501	344	198	62,3	18,5	5,51	3,70	3540

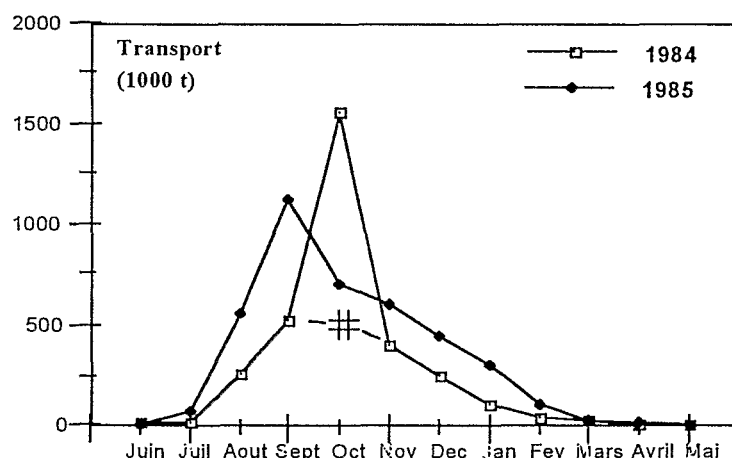


Figure n° 13

Transport particulaire à Niamey en 1984 et 1985.

Donc si l'on admet que l'évènement de Tillabéry a occasionné en 1984 une surmasse en Octobre d'environ un million de tonnes, et que l'on soustrait cette surmasse du total annuel, on constate que le transport de 1984 (2,15 millions de tonnes) n'aurait représenté qu'à peine plus de la moitié de celui de 1985 (3,9 millions de tonnes).

La moyenne des deux années hydrologiques est de 3,5 millions de tonnes, soit un peu plus de deux fois celui de Kandadji. L'apport pondéral saisonnier du Dargol et de la Sirba serait donc, contrairement à celui du Gorouol, très important, puisqu'il viendrait doubler le transport annuel du fleuve.

La période d'étude est encore trop limitée à Niamey, mais le fait que sur à peine trois années de suivi, dont seulement deux années hydrologiques complètes, on ait pu obtenir un tel différentiel sur les transports est assez significatif de leur variabilité d'une année sur l'autre. Variabilité qui apparaît plus importante qu'à Kandadji en raison d'influences sahéliennes supplémentaires.

La différence du transport entre les deux stations n'est cependant pas un phénomène homogène comme le montre la figure 14 qui compare les transports moyens mensuels aux deux stations du fleuve et à celle de Dolbel sur le Gorouol (Tab.8).

Tableau 8

Transports solides en suspension (en milliers de tonnes) du Gorouol à Dolbel.

ANNEE	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOÛT	SEPT	OCT	NOV	Année
1976				6,45	19,0	5,14	19,6	53,9	0,856*	104
1977				12,0	102	36,4	40,6	0,299		191
1978	0,06*	0,414*	2,19*	15,6	59,7	72,2	17,5	1,17*		165
1979			0,523*	10,4	25,7	46,7	41,2	2,59	0,404*	127
1980				0,073	131	63	1,39*			194
1981				3,76*	67,9	73,6	7,12	0,432*		149
1982			0,064*	16,2	51,0	139	16,3	0,080*		223
MOY.				10,1	65,2	62,3	23,7	18,9		180

*: Valeurs approchées, car écoulements non permanents

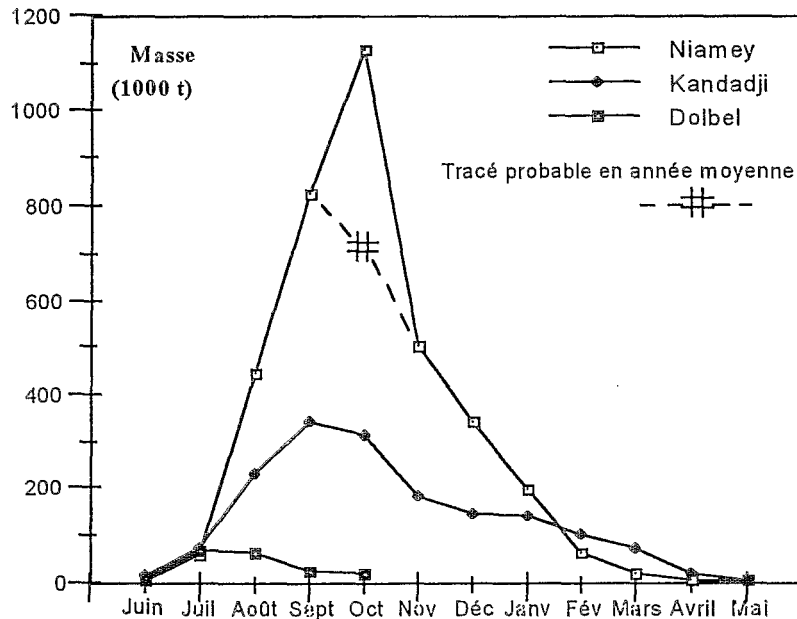


Figure n° 14

Transports solides moyens mensuels à Dolbel, Kandadji et Niamey.

Deux périodes distinctes apparaissent sur cette figure:

- La période d'influence des affluents sahéliens durant l'hivernage où le transport apparaît nettement plus élevé à Niamey qu'à Kandadji.
- La période sans influence des affluents de Janvier à Juin où les masses transportées sont légèrement supérieures à Kandadji.

Bien que cette inversion de tendance ait peu d'impact sur le différentiel annuel entre les deux stations, elle montre, qu'en absence d'alimentation intermédiaire, le fleuve, qui à cette période est en pleine décrue naturelle, perd de sa compétence et dépose une partie de sa matière en suspension dans ce bief de 180 km.

Ce graphique illustre aussi le doublement annuel du transport entre Kandadji et Niamey; la surface du turbidigramme apparaissant à Niamey le double de ce qu'elle est à Kandadji.

Les apports du Gorouol à Dolbel ne semblent pas devoir excéder 10 % du transport de Kandadji, bien qu'en début d'hivernage ils en représentent la quasi totalité.

CONCLUSION

Le trouble est important toute l'année sur le fleuve au Niger, et ce malgré des concentrations qui restent relativement modestes. A Kandadji elles apparaissent déjà nettement supérieures à celles de la sortie de la cuvette en raison des apports du gorouol.

L'importante variation de concentration qui intervient entre les deux stations de Kandadji et Niamey est à mettre sur le compte des affluents intermédiaires de régime typiquement sahélien, Dargol et surtout Sirba, dont l'influence peut aussi être estimée à partir des mesures effectuées sur le Gorouol pour lequel la concentration moyenne atteint 750 mg.l^{-1} .

Ces résultats (ceux du fleuve, aussi bien que de ses affluents) sont assez comparables à ceux obtenus dans la cuvette tchadienne pour le Chari et le Logone; ce dernier ayant des origines latitudinales basses qui ne sont pas sans rappeler celles du Niger à l'amont pour ce qui est du régime d'alimentation.

Le bahr Sara à Manda, comme le Chari à Sarh, présentent des concentrations moyennes interannuelles de l'ordre de 50 mg.l^{-1} . On retrouve ce type de concentration sur le Niger supérieur à Siguiri (46 mg.l^{-1} en 87), la moyenne à cette station se situant même en dessous (33 mg.l^{-1}).

Si à Kandadji on ne considère que les mois non influencés par le Gorouol; c'est à dire de Novembre à Mai; la concentration moyenne tombe de 108 mg.l^{-1} à 50 mg.l^{-1} . Sans doute la crue guinéenne vient-elle soutenir les concentrations en fin d'hivernage (Tab 2); mais son action doit rester globalement limité ne serait-ce qu'en raison du rôle régulateur que la "Cuvette Lacustre" doit imposer à la partie du transport supérieure à 40 microns.

Il est donc vraisemblable qu'à son entrée au Niger le fleuve ne présente qu'une concentration moyenne de l'ordre de 50 à 60 mg.l^{-1} . Le Gorouol étant probablement responsable, à lui seul, d'une bonne partie des 50 mg.l^{-1} supplémentaires constatés à Kandadji.

En aval l'arrivée du Dargol et de la Sirba va à nouveau assurer un doublement des concentrations qui dépassent 200 mg.l^{-1} à Niamey.

On retrouve sur le Logone à Kousséri (aval des dernières confluences sahéliennes) des concentrations moyennes comparables: 174 mg.l^{-1} en 1972 qui fut considérée comme une année sèche.

La fraction particulaire du transport présente un schéma d'évolution inverse de la fraction dissoute qui montre que le Niger moyen, outre l'effet tampon de la "Cuvette Lacustre", est sous l'influence de deux domaines climatiques:

Durant tout l'hivernage et jusqu'en Septembre/Octobre il se trouve sous une influence typiquement sahélienne, les apports particuliers apparaissant largement supérieurs aux apports dissous (vraisemblablement plus de 80 % du transport total).

Progressivement, avec la pointe de crue et la décrue qui suit, le rapport diminue tout en restant favorable à la suspension, qui représente encore 70 % du transport en Mars.

Ce maintien de l'influence sahélienne aussi longtemps après la disparition des écoulements sur les affluents (la Sirba peut apporter au fleuve une contribution significative jusqu'en Décembre ou Janvier) ne peut s'expliquer que par l'effet tampon de la Cuvette Lacustre qui transmet avec plus de deux mois de retard les dernières manifestations sahéliennes de l'avant-cuvette; et par la réalimentation de la suspension sous l'effet des aérosols.

La disparition de ces derniers en Avril-Mai et la perte de compétence du fleuve lors de la phase de tarissement assurent au domaine guinéen, d'Avril à Juin, une très nette supériorité; les substances dissoutes assurent alors plus de 80 % du transport global.

Des analyses chimiques des eaux du fleuve ont été réalisées à l'aval de Niamey entre 1984 et 1986 par une équipe du département de chimie de l'Université. Ses résultats, par ailleurs fort intéressants, n'ont pas été retenus, car ils sont apparus trop marqués par les phénomènes de pollution liés aux rejets de la ville, et venaient donc, sur des concentrations faibles, influencer les valeurs naturelles (en particulier chlorures et phosphates).

BIBLIOGRAPHIE

- BEN MOHAMED A., FRANGI J.P., FONTAN J., DRUILHET A., FOULANI P., 1991** - Analyses multiélémentaires semi-quantitatives par fluorescence X des aérosols, sols et principaux aliments du Niger. Annales de l'Université de Niamey - Tome IV pp 37-52.
- BERTRAND J., 1976** - Visibilité et brume sèche en Afrique. La Météorologie, VI^e série, n° 6, pp. 201-211.
- BILLON B., 1968** - Mise au point des mesures de débits solides en suspension (République du Tchad). Cahiers ORSTOM, série hydrologie, vol.V n° 2, pp 3-14.
- BILLON B., 1984** - Etude des basses eaux du Niger à Niamey. ORSTOM-DRE, Niamey, Décembre 1984, 3 p, 5 f.
- BILLON B., 1985** - Le niger à Niamey, décrue et étiage. Cahiers ORSTOM, série hydrologie, vol.XXI, n° 4, 1984-1985.
- BOUVIER J.C., BILLON B., 1984** - Enquête sur les crues des Koris traversant la route Tllabéry-Ayorou à la suite de la pluie du 30 Septembre 1984. ORSTOM-DRE, Niamey, 10 p, 6 fig.
- BRUNET-MORET Y., CHAPERON P., LAMAGAT J.P., MOLINIER M., 1986** - Monographie hydrologique du fleuve Niger. Editions de l'ORSTOM, Paris.
- CAMAIL M., MAHAMANE M., PUCCI B., RIGAUD J.P., 1987** - Analyses chimiques des eaux du fleuve Niger à Niamey. Hydrologie Continentale, vol.2, 1987: 87-99.
- CHOURET A., 1975** - Etude des transports solides en suspension au Tchad. campagnes 72-73, 73-74, 74-75. Bilan de sept années d'observations (1968-1974) ORSTOM N'Djamena.
- COUDE-GAUSSSEN G., ROGNON P., 1983** - Les poussières sahariennes. La Recherche, vol. 14, n° 147, pp.1050-1061.
- GALLAIRE R., 1984** - Le Niger à Kandadji, synthèse des études. ORSTOM-TP- SOFRELEC, ORSTOM Niamey.
- LAMAGAT J.P., 1984** - Modèle provisoire de propagation des crues du Niger de Koulikoro à Niamey; ORSTOM-CEE-ABN. Paris, Mars 1984.
- MAINGUET M., 1977** - Analyse quantitative de l'extrémité sahélienne du courant éolien transporteur de sable au Sahara nigérien. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 285, sér. D, n°10, pp.1029-1032.
- MOUKOLO N., BRICQUET J.P., BIYEDI J., 1990** - Bilans et variations des exportations de matières sur le Congo à Brazaville de Janvier 87 à Décembre 88. Hydrologie Continentale , vol.5, n° 1, 1990: 41-52.
- ORANGE D., 1990** - Hydroclimatologie du Fouta-djalou et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique. Thèse de l'Université Louis Pasteur, Stasbourg.