

Les apports dissous d'origine continentale vers l'embouchure du fleuve Sénégal

Alioune Kane, Professeur, Département de Géographie, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Cheikh Anta Diop Dakar. BP 5005 Dakar Fann. Sénégal.

Cette étude sur les apports dissous d'origine continentale qui transitent vers l'estuaire du Sénégal s'appuie sur les travaux d'ORANGE (1990) et les résultats du projet EQUASEN (GAC et ORANGE ; 1993) dans le haut bassin, sur notre suivi des eaux dans le delta (KANE, 1985 ; 1993) et essaie de fournir une sorte "de profil en long chimique " allant des sources à l'embouchure.

Notre étude a essentiellement porté sur les éléments majeurs qui représentent près de 99 % de la matière minérale en solution. Aux prises d'échantillons sur le terrain ont été parallèlement associées des mesures du pH, de la conductivité et de la température in situ.

Les objectifs de l'étude hydrochimique sont d'une part la caractérisation des eaux du fleuve Sénégal à la station de Diama-amont, qui contrôle toutes les entrées vers le bas estuaire, d'autre part la détermination des processus d'acquisition de la minéralisation, et enfin la quantification de la charge dissoute.

CARACTERISATION DES EAUX DU FLEUVE SENEGAL DANS SON DELTA

Le contrôle de la minéralisation des eaux du fleuve Sénégal à Diama a débuté en 1988. Les échantillons suivants ont été réalisés : 1988 : 2 (30 janvier 1988 et 26 décembre 1988), 1989 : 24 (d'août à octobre) , 1990 : 32 (d'août à décembre), 1991 : 69 (de janvier à décembre), 1992 : 54 (d'avril à septembre).

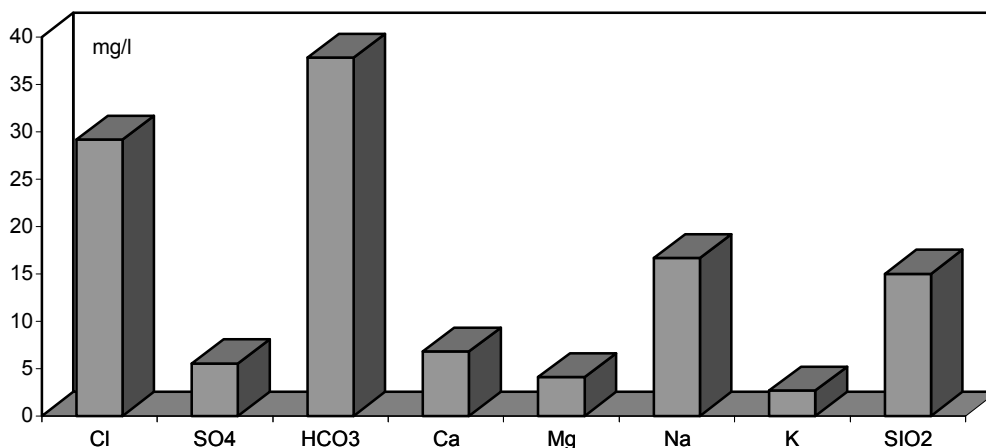


Figure 1. Composition chimique moyenne des eaux du delta du fleuve Sénégal à Diama de 1989 à 1992.

Parmi les cations, le sodium est nettement plus abondant que le calcium et le potassium, en ce qui concerne les anions, le bicarbonate est l'élément le plus abondant.

Tableau 1. Moyenne (mg/l), écart-type et coefficient de variation des éléments majeurs, de la silice, du pH et de la conductivité à la station de Diama-amont de 1989 à 1992.

VARIABLE	MOYENNE	ECART-TYPE	CV
Cl ⁻	29,16	30,23	103,7
SO ₄ ²⁻	5,54	4,93	88,86
HCO ₃ ⁻	37,8	11,88	31,42
Ca ²⁺	6,78	2,96	43,6
Mg ²⁺	4,08	2,49	60,9
Na ⁺	16,63	17,07	102,6
K ⁺	2,67	0,74	27,65
SiO ₂	15	5,93	39,5
pH	7,42	0,4	5,35
CE	0,17	0,13	80,4

Le paramètre le plus stable dans le temps est le potassium dont le coefficient de variation est inférieur à 30 % (soit 27,65 % plus exactement) suivi par la silice et le calcium.

EVOLUTION DE QUELQUES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

VARIATION SAISONNIERE DU pH

La valeur moyenne du pH est de 7,42 avec un coefficient de variation de 5,35 % qui montre qu'il n'y a pas une grande dispersion de ce paramètre. L'acide carbonique dissous se trouve essentiellement sous la forme de bicarbonates (HCO₃⁻), les résultats des analyses chimiques montrent des teneurs en carbonates nulles. Par ailleurs GOURCY (1994) citant MICHARD (1989) rappelle que pour des pH inférieurs à 9,75, la forme de silice qui domine dans l'eau est H₄SiO₄. Dans l'ensemble, les eaux du Sénégal sont neutres à légèrement basiques. En fait le pH varie très peu, l'écart le plus fort entre la valeur maximale et la valeur minimale pendant les 4 années de mesure est de 2,86 en 1989/90, en moyenne cet écart est de 2 unités pH.

VARIATION SAISONNIERE DE LA CONDUCTIVITE

L'arrivée des eaux de la crue annuelle détermine comme déjà souligné par KANE (1985) une décroissance très rapide de la conductivité qui par exemple : en 1991 de 0,54 mS/cm à 0,05 mS/cm, en 1992 de 0,32 mS/cm à 0,12 mS/cm puis à 0,06 mS/cm. Après le passage de la crue, les valeurs de la conductivité sont relativement faibles, l'évolution est en dents de scie, la conductivité augmente mais sa croissance est lente. Ces valeurs sont cependant assez fortes comparativement à celles observées à l'amont du fleuve (en général, elles sont supérieures à 0,06 mS/cm).

VARIATION SAISONNIERE DE LA CHARGE TOTALE DISSOUTE

En principe, la charge totale en solution évolue parallèlement à la conductivité : pendant la période des hautes eaux, la charge en solution dans les eaux du Sénégal à Diama-amont se stabilise entre 70 et 90 mg/l, mais des valeurs extrêmes de près de 150 mg/l sont enregistrées (septembre 1989, août 90, octobre 1992). Des teneurs élevées en substances dissoutes (TDS) sont mesurées au début de la crue annuelle, cela s'expliquerait par le fait que la propagation de la crue s'accompagne d'un régime de turbulence intense qui conduit au lessivage des surfaces inondées. Il en résulte une dilution d'éléments soit dans le haut bassin, soit lors du parcours de la vallée. Les teneurs en substances dissoutes baissent pendant le reste de la saison des hautes eaux et les concentrations varient dans un intervalle compris entre 50 mg/l et 100 mg/l.

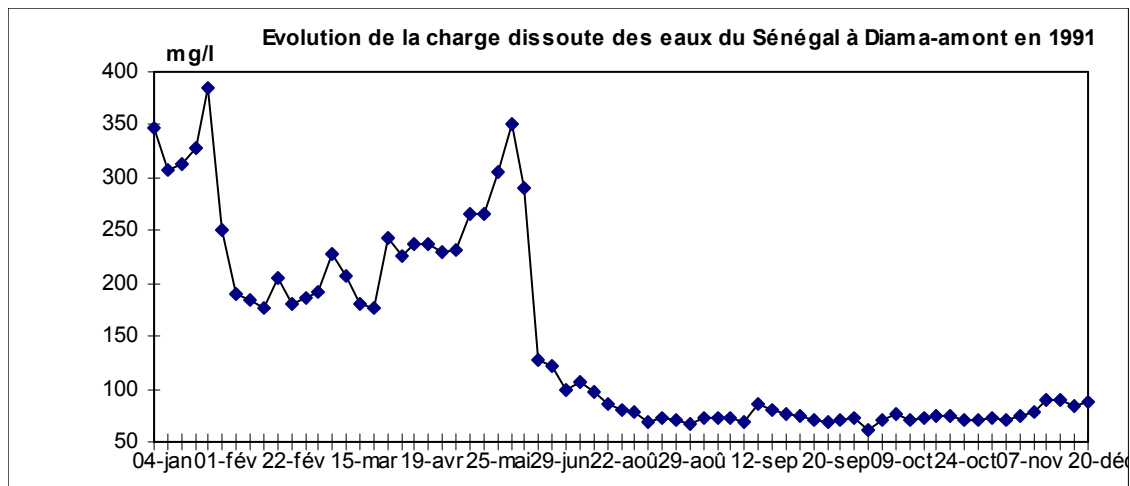


Figure 2. Evolution de la minéralisation des eaux du Sénégal à Diama-amont

Dans ce schéma d'évolution, dès le mois de décembre, avec l'amorce de la fermeture des vannes du barrage, il y a un phénomène de concentration, la charge totale en solution dans les eaux du Sénégal augmente régulièrement : des valeurs exceptionnelles de plus de 400 mg/l sont enregistrées en février 1991, mais en général les variations sont comprises entre 150 mg/l et 250 mg/l.

En cette période de l'année, en aval du barrage, les eaux marines ont dilué les eaux douces continentales, et on atteint très rapidement les concentrations de l'eau de mer, pouvant subir des variations sous les effets des lâchers sporadiques opérés à partir de Diama.

RELATION CONDUCTIVITE/SALINITE

A l'instar de GOURCY (1994), on peut dire "dans les eaux des fleuves, la conductivité est directement liée à la concentration en cations ou en anions et permet une estimation rapide et simple sur le terrain de la minéralisation moyenne", la relation entre les ions dissous (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-}) à été établie pour l'ensemble des mesures sur le fleuve Sénégal à la station de Diama-amont de 1989 à 1992.

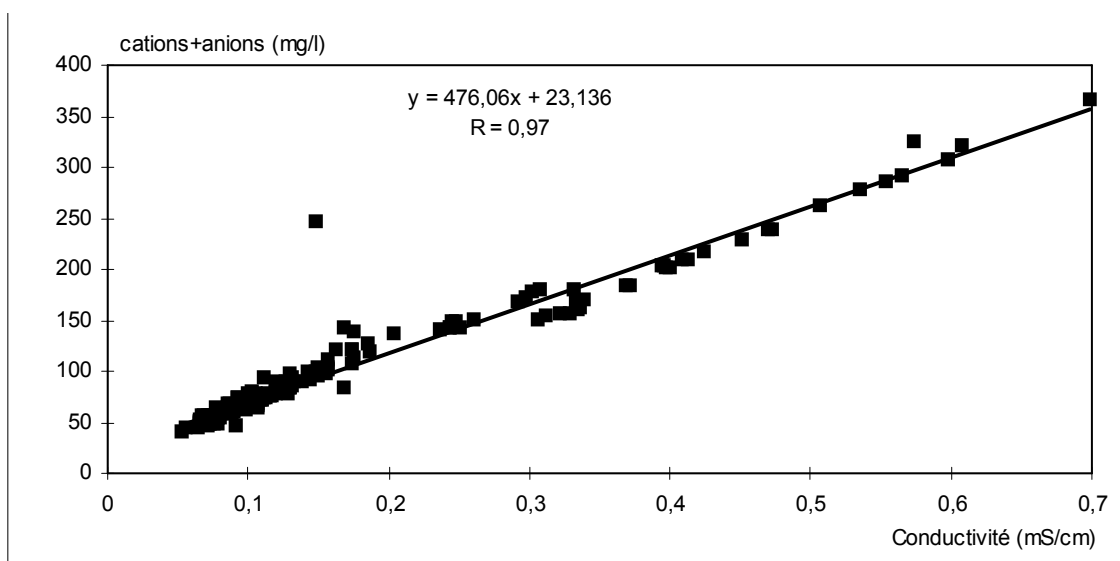


Figure 3. Relation conductivité/concentrations des éléments dissous

Les 177 analyses chimiques donnent une relation linéaire bien ajustée avec un coefficient de corrélation élevé ($R = 0,97$) qui explique la coévolution de la charge totale dissoute des eaux en fonction de la conductivité sur toute la gamme d'étude.

Les eaux faiblement minéralisées (charge inférieure à 150 mg/l) correspondant aux eaux de la crue fortement diluées et aux conductivités faibles, alors que les eaux fortement minéralisées correspondent aux valeurs fortes de conductivité de la période de concentration. La droite de régression représentée a une équation suivante :

$$y = 476,06x \text{ charge} + 23,136$$

La conductivité étant exprimée en millisiemens et la charge ionique en mg/l.

VARIATION SAISONNIERE DE LA TEMPERATURE

La température de l'eau du fleuve intervient sur les conditions de précipitation-dissolution des minéraux et joue alors sur l'équilibre des réactions qui ont lieu dans le milieu aquatique. Les températures maximales (fig a et b) sont enregistrées pendant la saison des hautes eaux (d'août en octobre) en 1990 et 1991, les mesures révèlent des valeurs assez élevées, comprises entre 29 °C et 32 °C. C'est aussi à cette époque de l'année que les températures de l'air ambiant sont les plus élevées (+ de 30 °C). A partir de novembre, les températures décroissent très rapidement, les eaux du fleuve sont froides, elles oscillent autour de 20 °C, ceci est la conséquence du refroidissement de l'atmosphère ambiant. En saison sèche, les températures en surface sont légèrement plus élevées en surface qu'en profondeur; ceci est certainement lié à une faible pénétration du rayonnement dans la colonne d'eau. Ces variations de la température, nettement perceptibles (des écarts de 5 à 10 °C sont mesurés) ont une incidence certaine sur le comportement géochimique des éléments en solution.

IDENTIFICATION DES FACIES CHIMIQUES : UTILISATION DU DIAGRAMME DE PIPER

Les échantillons recueillis à la station de Diama-amont de 1989 à 1992 sont reportés sur un diagramme de PIPER afin de déterminer les faciès hydrochimiques des eaux du delta du Sénégal.

Les figures n°4 montrent la composition des eaux prélevées à Diama, d'une manière générale, les familles d'eaux obtenues sont généralement les mêmes, néanmoins quelques évolutions sont observées d'un diagramme à l'autre.

Au cours de la saison des hautes eaux, les eaux de la crue annuelle sont homogènes. Elles sont bicarbonatées, sodiques et potassiques, puis elles évoluent progressivement en période de basses eaux vers des eaux chlorurées, sodiques et potassiques, car elles s'enrichissent au fur et à mesure en chlorures et en sodium.

Les eaux fortement bicarbonatées deviennent mixtes, puis évoluent vers le pôle chloruré, se rapprochent ainsi du faciès chloruré sodique (eau de mer). L'enrichissement en chlorures des anions est remarquable ; alors que le pôle cationique mixte s'enrichit en sodium et en potassium pour évoluer vers les concentrations de l'eau de mer de cet élément. Le gain de NaCl peut s'expliquer par : le soubassement géologique marin et la proximité de la mer, l'apport en sels par les eaux de lessivage des casiers rizicoles, et tout au début du fonctionnement des barrages il n'est pas exclu qu'il ait pu y avoir des infiltrations relativement faibles d'eau de mer dans le lac de retenue de Diama.

Les eaux à Diama subissent une évolution par rapport à celles de Bakel classées dans la catégorie des eaux bicarbonatées, magnésiennes et calciques, établies par ORANGE et GAC (1993) sur 229 échantillons. Ainsi dans la haute vallée, "les bicarbonates et la somme Mg-Ca représentent 88 % de la somme totale des anions Σ^- et 73 % de la somme des cations Σ^+ , soit à tous les trois 72 % de la charge pondérale dissoute". Plus en amont de Diama, à la station de Ronkh, FAYE (1996) remarque une importante variation dans le temps des faciès hydrochimiques ; il trouve des eaux bicarbonatées, calciques et magnésiennes en fin de saison des hautes eaux (novembre-décembre) qui passent à des eaux chlorurées, sulfatées, calciques et magnésiennes en période de basses eaux (avril-mai).

Les faciès chimiques des eaux du Sénégal à Diama se classent en deux grandes familles géochimiques (elles sont bicarbonatées, sodiques et potassiques, puis elles évoluent à des eaux chlorurées, sodiques et potassiques), cette différenciation semble obéir à une évolution temporelle et à un déterminisme géographique local particulier au delta du Sénégal (l'influence marine est déterminante). La comparaison des faciès chimiques d'une année à l'autre montre une remarquable stabilité de la composition chimique des eaux à la station de Diama-amont.

Diagramme triangulaire de PIPER
Station de Diama-amont en 1991

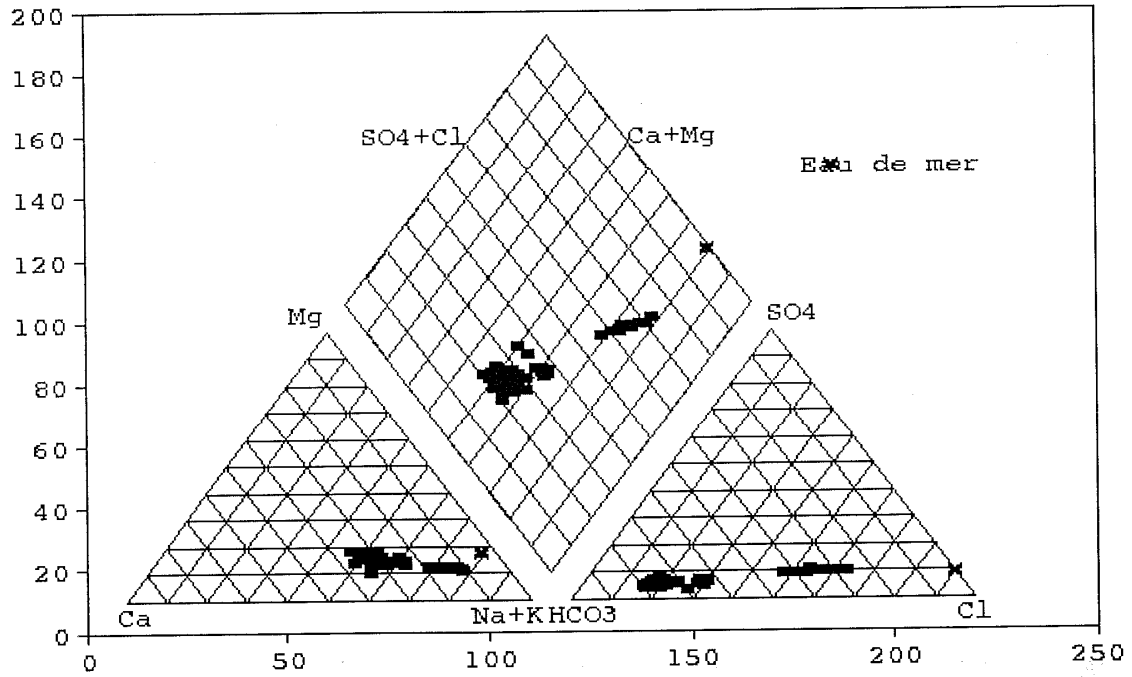


Diagramme triangulaire de PIPER
Station de Diama-amont en 1992

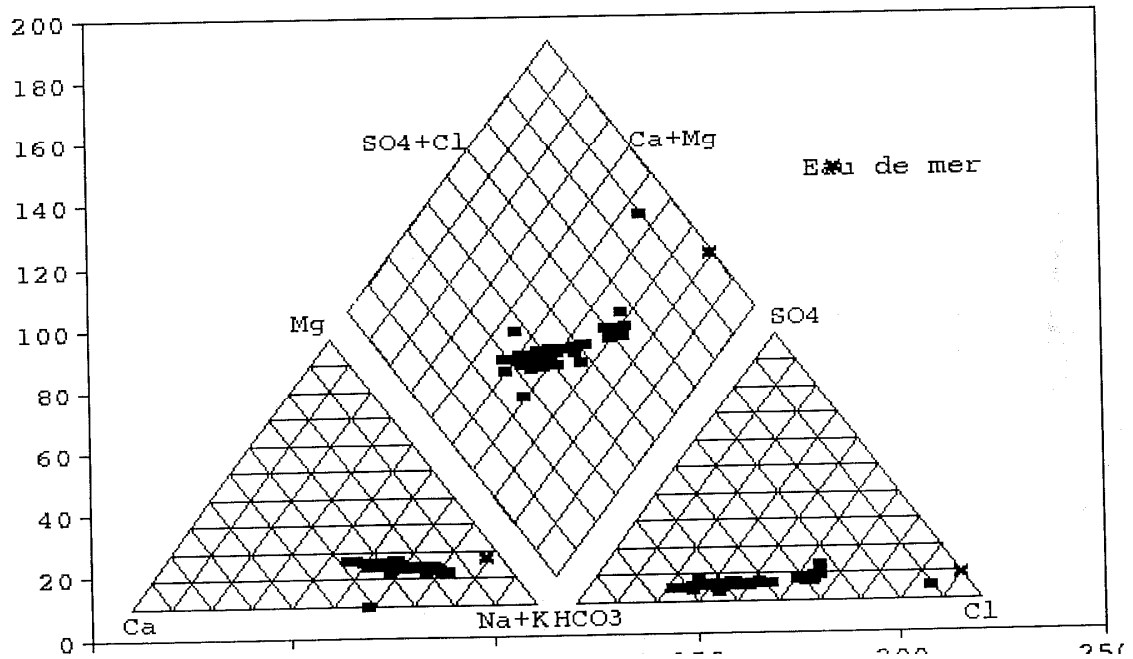


Figure 4. Diagrammes triangulaires de PIPER sur les eaux du Sénégal à Diama-amont

VARIATION SAISONNIERE DES CONCENTRATIONS

Les quatre années de suivi de la chimie des eaux du fleuve Sénégal à la station de Diama-amont montrent que l'évolution des concentrations en éléments dissous est progressive au cours de l'année. D'une manière générale, il y a une augmentation régulière des concentrations pendant la période de stockage des eaux, jusqu'à l'arrivée de l'onde de crue annuelle qui a pour effet de les diluer.

Les anions

Les bicarbonates proviennent principalement de la dissolution des roches carbonatées et une faible proportion provient de l'altération des silicates (BONTEMPS et al. , 1989 in EL FAID, 1996). Les teneurs en bicarbonates (HCO_3^-) : pendant la période des crues, les eaux du fleuve Sénégal transitent à la station de Diama avec des teneurs en bicarbonates comprises entre 57,34 mg/l et 14,03 mg/l. Cependant des valeurs exceptionnelles sont enregistrées : au cours de la saison des hautes eaux, 6,10 mg/l le 03/09/92, et 97,60 mg/l le 04/01/91, assez proche des concentrations de cet élément dans l'eau de mer (140 ppm selon GOLDBERG, 1957), situation habituelle en régime naturel vers le mois d'avril pendant la période d'avant barrage (KANE, 1985).

Les sulfates (SO_4^{2-}) : les concentrations en sulfates sont les plus faibles dans les eaux de crue du Sénégal par rapport aux autres ions à l'exception du potassium, les plus forts taux varient entre 8,16 mg/l et 26,40 mg/l. En saison sèche, une forte croissance des sulfates est notée, des valeurs comprises entre 14 mg/l et 27 mg/l sont mesurées en 1991 et 1992. Dans le delta et la basse vallée, l'ion sulfate est plus élevé, surtout au niveau des stations à proximité du littoral. Cet élément provient des teneurs en sulfates des eaux de pluies du haut bassin, du lessivage des poussières atmosphériques. Il est certainement d'origine marine, il résulte alors des inondations par les marées océaniques et du soubassement géologique salé sur le littoral.

Les chlorures évoluent parallèlement aux bicarbonates, mais les variations des concentrations présentent des allures en dents de scie. Il faut dire que dès l'arrivée des eaux de la nouvelle crue (d'août à novembre-décembre), les teneurs en chlore diminuent pour atteindre au cœur de la saison des valeurs avoisinant 5 mg/l, des taux élevés sont enregistrés en saison sèche (une valeur forte de 159,75 mg/l est atteinte le 01/02/1991). Les chlorures ont une double origine, ils proviennent de l'eau de pluie, mais essentiellement de l'intrusion marine.

L'évolution saisonnière de la charge anionique permet de mieux saisir la configuration de l'année : ainsi l'arrivée des premiers flots de la crue annuelle se traduit par une chute brutale de la somme des anions, en 1991 et 1992 des concentrations minimales entre 26,77 mg/l et 32,74 mg/l sont enregistrées. En saison sèche avec le stockage de l'eau, les concentrations s'accroissent régulièrement, les teneurs varient entre 120 mg/l et 240,44 mg/l, des pointes exceptionnelles sont remarquées au cours des mois de janvier et février 1991.

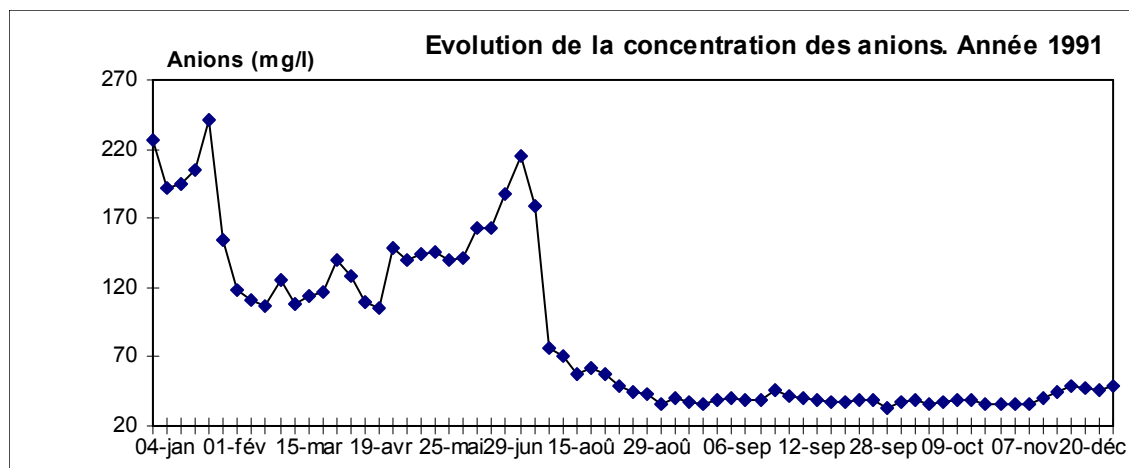


Figure 5. Evolution de la concentration des anions à Diama-amont
Les cations majeurs

KANE (1985) a déjà souligné que, le comportement des alcalins (Na, K) et des alcalino-terreux (Ca et Mg) mime celui des anions.

Au moment de l'arrivée des eaux douces d'origine continentale, la concentration de tous les cations décroît brutalement. Les teneurs sont peu variables :

- Na⁺ avec des minimum compris entre 3,68 mg/l et 5,52 mg/l et des maximum en saison sèche qui fluctuent entre 35 mg/l et 90 mg/l.

- K⁺ présente des concentrations faibles et très peu variables ; avec des minimum entre 1,56 mg/l et 1,95 mg/l et des maximum compris entre 3,5 mg/l et 5,5 mg/l. L'ion potassium est l'élément chimique le moins abondant par rapport aux autres éléments chimiques. De tous les éléments, seul le potassium a une concentration relativement stable. Il faut noter que le potassium a un comportement complexe, selon plusieurs auteurs, notamment GOURCY (1994), "il évolue avec le débit, peut être produit par la végétation, et il peut être mis rapidement en solution par lessivage des sols".

- Mg⁺⁺ se situe entre 0,24 mg/l et 1,95 mg/l pour les valeurs minimales et entre 5,96 mg/l et 13,38 mg/l pour celles maximales. Mg²⁺ varie est général tributaire des apports marins.

- enfin Ca⁺⁺ a des valeurs minimales oscillant de 3,80 mg/l à 4,60 mg/l et maximales comprises entre 8 mg/l et 22 mg/l. Les teneurs en Ca²⁺ sont assez homogènes, leur origine proviendrait des apports superficiels de la lixiviation des matières organiques, du lessivage et de l'entraînement des particules carbonatées du sol (KANE C. H. , 1995 ; *in* GAC, 1985).

Ces deux ions (Ca²⁺ et Mg²⁺) proviennent soit de la dissolution des carbonates, soit de l'altération des silicates (BONTEMPS et al., 1989 ; *in* EL FAID, 1996).

Les fluctuations saisonnières des concentrations en cations majeurs sont dues aux variations des débits (GAC et ORANGE, 1993) mais aussi selon KANE (1985) dans une moindre mesure aux processus internes du cours d'eau, ces éléments seraient donc « sollicités » dans des cycles biogéochimiques du fait de la stagnation des eaux et du confinement du milieu.

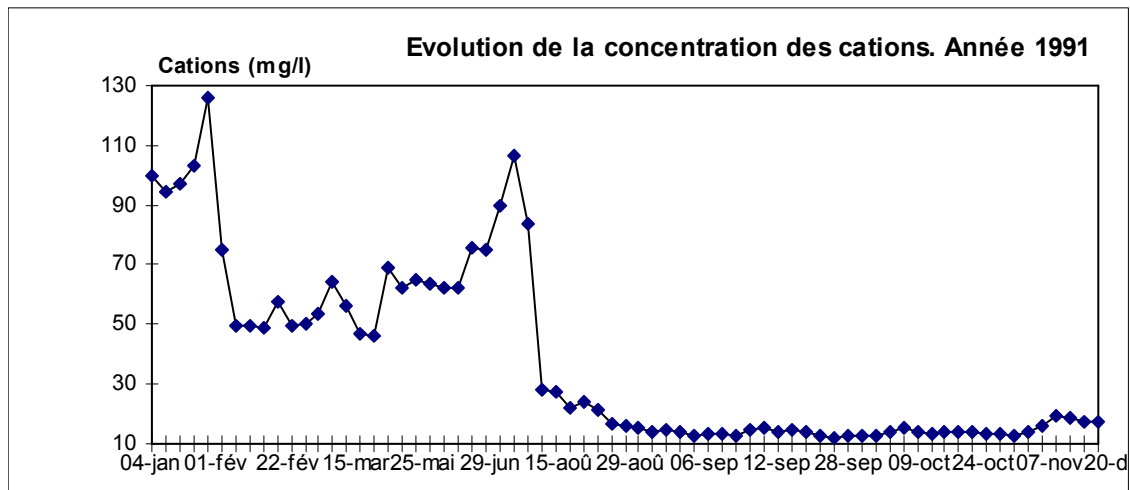


Figure 6. Evolution de la concentration des cations à Diama-amont

En général, il est admis que ce type d'évolution des teneurs en éléments dissous est une caractéristique des eaux des fleuves de la zone tropicale sèche. Les concentrations sont toujours maximales en fin de saison sèche et minimales au moment de la crue.

Dans le système, les eaux sont d'abord celles de la crue annuelle, leur charge dissoute de base est issue des eaux de pluie et un enrichissement des épontes par la dissolution d'éléments dans le haut bassin. Au cours de la saison des basses eaux, surtout pendant les phases de remplissage et de stockage dans le lac de retenue, il y a une augmentation des teneurs en éléments dissous avec des variations spatio-temporelles marquées dans les cents derniers kilomètres avant le barrage (FAYE, 1996). La minéralisation s'accroît dans le sens de l'amont vers l'aval à la suite de l'évaporation qui entraîne la concentration des sels dissous.

L'analyse des données relatives à la qualité chimique des eaux, a permis de montrer d'importantes fluctuations temporelles des teneurs des différents ions majeurs, entre un minimum enregistré au moment de l'arrivée des eaux de la crue annuelle et un maximum de concentration en saison sèche, à une date imprévisible à cause des lâchers opérés à partir de Manantali dans le haut bassin.

La silice dissoute

A l'instar de KANE (1985), l'évolution de la silice dissoute mérite que l'on s'y attarde plus longuement. La silice dissoute provient en majeure partie de l'altération des roches silicatées et des argiles principalement, sous les climats tropicaux, les feldspaths sont les premiers lessivés, puis la kaolinite (GAC et ORANGE, 1993). Dans la situation d'après barrage, la silice connaît des variations irrégulières dans les eaux de la retenue de Diama.

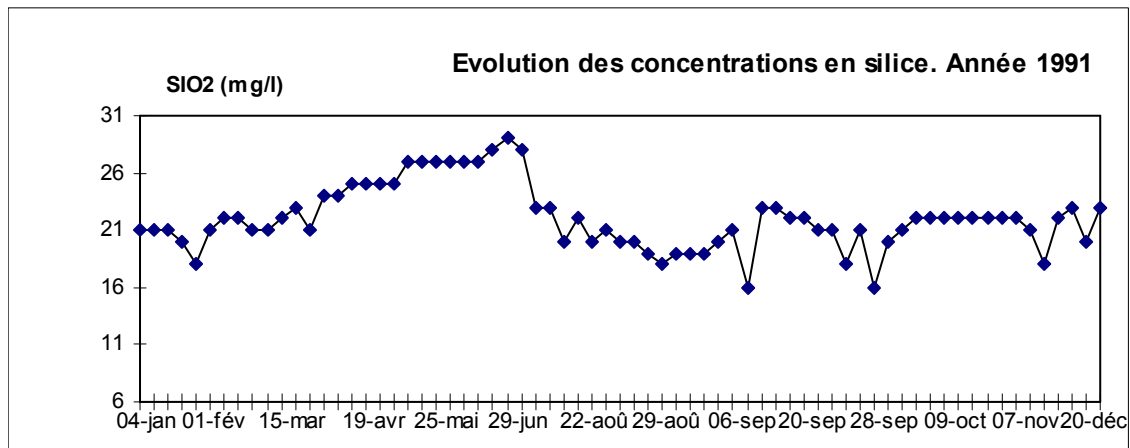


Figure 7. Evolution de la concentration en silice dissoute à Diama-amont

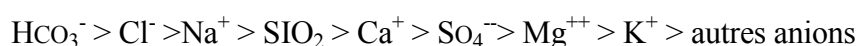
Les concentrations en silice montrent : une stabilité en saison des hautes eaux avec des taux compris entre 7,60 mg/l et 11 mg/l en 1989, 10,0 mg/l et 13 mg/l en 1990, de 18 mg/l à 29 mg/l en 1991, et enfin de 8,70 mg/l à 12 mg/l en 1992, une assez forte variabilité des teneurs d'une année à l'autre ; ainsi 1991 enregistre des valeurs de silice 2 fois à 2,5 fois supérieures aux trois autres années de mesure. Les valeurs sont cependant relativement fortes en 1991 contrairement aux autres années, les concentrations ont régulièrement augmenté entre janvier et juillet (de 18 à 28 mg/l) avant de baisser brutalement entre août et novembre ou elles ont varié entre 16 et 23 mg/l. L'évolution de la silice ne suit pas la crue ; les concentrations de SiO₂ sont durant la saison des hautes eaux et maximale pendant les basses eaux.

En 1989 les teneurs sont variables entre 7,60 mg/l et 12 mg/l, en 1990 entre 10 mg/l et 14 mg/l, en 1991 entre 16 mg/l et 29 mg/l, en 1992 entre 8,20 mg/l et 12 mg/l. La chute de la concentration juste avant l'arrivée de l'onde de crue est attribuée à une prolifération de diatomées, cependant CECCHI (1990) ne montre pas de variation significative du plancton dans ses études sur l'estuaire du Sénégal. GAC et ORANGE (EQUESEN, 1993) font référence aux travaux de BARTOLI et SOUCHIER (1978) qui mentionnent que l'augmentation de la concentration en silice dissoute au cours de la période des hautes eaux peut correspondre aux apports dissous de surface (la silice peut avoir une origine terrestre, atmosphérique, elle provient alors des nappes et des eaux de ruissellement), ou végétale avec le développement important de la flore, en effet les sols sont riches en silice amorphe recyclée par la végétation.

On peut conclure avec GAC et ORANGE (EQUESEN, 1993) sur l'origine des éléments chimiques véhiculés par les eaux de surface du fleuve Sénégal :

- les sulfates ont une origine marine où proviennent de pollutions domestiques ponctuelles,
- les chlorures sont d'origine atmosphérique mais proviennent aussi du soubassement hydrogéologique du delta,
- le cortège HCO₃⁻ - Mg - Ca - Na - les MES - le K - et le SiO₂ proviennent de l'érosion et de l'altération du bassin.

L'ordre d'importance des minéraux dissous est donc :



Du point de vue du fonctionnement général du fleuve, selon son équilibre ionique et en utilisant les rapports géochimiques et les mécanismes contrôlant la chimie des eaux, la dynamique d'altération dominante est de tendance générale à la monosiallisation. Le rapport moléculaire $RE = SiO_2 / Al_2O_3$ défini par TARDY (1969, 1979) s'établit à 2,4 pour l'ensemble du Fouta-Djalon (ORANGE, 1990) et 2,02 dans le delta du Sénégal, avec une prédominance très marquée pour la kaolinite

CARACTERISTIQUES MOYENNES DES EAUX DE SURFACE SUR LE BASSIN DU FLEUVE SENEGAL

GAC et ORANGE (EQUESEN, 1993) ont déjà expliqué que la caractéristique essentielle des eaux qui drainent le massif du Fouta-Djalon dans le haut bassin est leur très faible minéralisation, qu'en moyenne elle reste inférieure à 50 mg/l (l'ensemble de leur prélèvement donne une charge totale dissoute de 35 mg/l), ceci s'explique par « la nature essentiellement gréseuse du substratum et l'importance des niveaux cuirassés stériles ».

Les eaux aboutissant à l'estuaire sont plus fortement minéralisées, les valeurs annuelles de charge dissoute vont de 82,62 mg/l à 102,92 mg/l, la charge dissoute moyenne annuelle s'établit à 90,37 mg/l, valeur deux fois plus élevée que celle connue antérieurement à St-Louis en pleine période de sécheresse, correspondant à une charge dissoute moyenne annuelle de 42,35 mg/l (KANE, 1985).

Cette augmentation de la minéralisation des eaux du Sénégal dans le delta pourrait s'expliquer par :

- le transit dans la vallée, sur des formations du quaternaire essentiellement argilo-limoneuses, avec le fort sapement latéral des berges et un écoulement canalisé dans le lit fluvial,
- la réduction considérable des écoulements, avec un important soutirage opéré pour le remplissage du lac de Guiers et la vallée du Ferlo,
- la dégradation accélérée du milieu naturel : absence de couvert végétal dense dans la haute vallée, désertification accélérée dans la moyenne et basse vallée qui côtoie sur près de 300 km les confins du Sahara,
- les rejets intempestifs d'eaux de drainage fortement minéralisées dans le fleuve surtout dans le delta du Sénégal avec le développement considérable des aménagements hydro-agricoles.

Les taux d'érosion chimique ont été calculés pour la période d'étude et se sont élevés à 2,74 t/km²/an en 1989, 2,55 t/km²/an en 1991, 2,73 t/km²/an en 1992, et enfin 2,41 t/km²/an en 1992. Le taux d'érosion chimique annuel serait de 2,60 t/km²/an pour l'ensemble du bassin, valeur légèrement supérieure à celles mesurées par KANE (1985) à St-Louis soit 1,85 t/km²/an et par LO (1984) pour la Gambie (1,0 t/km²/an).

EVOLUTION SAISONNIERE DE LA CHARGE DISSOUTE

Le tableau n° donne la composition chimique moyenne des eaux du Sénégal à la station de Diama, qui contrôle toutes les entrées vers l'estuaire. Elle est établie d'abord pour la charge en solution acquise par le fleuve sur les bassins versants de l'amont et au cours de son transit dans la vallée du Sénégal mais aussi pour une année complète (1991) de mesure où les eaux stockées dans le lac de retenue subissent une certaine évolution.

Tableau 2. Composition chimique moyenne des eaux du fleuve Sénégal. Concentrations moyennes mensuelles (en mg/l).

Mois	Cl	SO ₄	HCO ₃	Somme Anions	Ca	Mg	Na	K	Somme cations	SiO ₂	Charge totale
Août	21,73	4,74	40,78	67,242	7,09	3,76	13,02	2,93	26,806	13,08	107,17
Septembre	11,70	2,68	29,87	44,250	5,33	2,34	6,87	2,30	16,787	12,82	73,16
Octobre	9,47	2,24	32,02	43,733	5,36	2,63	5,78	2,04	15,824	13,86	72,92
Novembre	19,04	3,41	38,51	60,959	7,16	3,50	10,97	2,29	23,924	14,24	98,93
Décembre	45,14	7,60	39,65	92,394	7,40	5,51	25,57	2,99	41,471	14,50	148,33
1989/1992	21,42	4,13	36,17	61,716	6,47	3,55	12,44	2,51	24,962	13,70	100,10
%	21,40	4,13	36,13		6,46	3,55	12,43	2,51		13,69	

Mois	Cl	SO ₄	HCO ₃	Somme anions	Ca	Mg	Na	K	Somme cations	SiO ₂	Charge totale
Janvier	120,70	19,08	64,66	204,44	14,50	11,31	68,43	4,49	98,72	20,75	325,00
Février	79,88	13,28	49,92	143,07	9,40	8,09	46,77	3,58	67,83	20,83	236,67
Mars	61,77	12,58	46,97	121,32	8,76	7,17	35,88	2,96	54,78	22,80	208,00
Avril	59,17	11,84	50,22	121,23	8,80	6,77	35,27	2,99	53,83	25,00	206,67
Mai	76,33	14,64	51,24	142,21	9,20	8,21	42,55	3,51	63,47	26,00	235,00
Juin	80,94	14,69	55,51	151,14	10,04	8,51	45,54	3,67	67,76	27,00	252,00
Juillet	124,25	20,88	56,73	201,86	10,80	11,07	71,30	4,88	98,04	28,50	325,00
Août	20,98	5,06	38,87	64,91	5,95	3,56	13,11	3,16	25,77	21,27	113,64
Septembre	7,01	2,16	29,51	38,68	4,29	1,95	5,07	2,24	13,55	20,06	71,25
Octobre	7,02	2,03	27,92	36,97	4,53	2,43	4,88	1,95	13,80	21,89	71,11
Novembre	11,89	2,16	31,11	45,16	5,00	2,68	7,25	2,05	16,97	21,00	82,50
Décembre	12,25	3,12	31,72	47,09	5,00	2,92	7,48	1,95	17,34	21,50	85,00
Année 91	55,18	10,13	44,53	109,84	8,02	6,22	31,96	3,12	49,32	23,05	184,32
%	29,94	5,49	24,16		4,35	3,38	17,34	1,69		12,51	

La charge dissoute moyenne est de 100 mg/l, établie sur quatre années et uniquement sur les écoulements de la saison des hautes eaux vers l'estuaire. Le schéma de l'évolution saisonnière connu par le passé est respecté, la charge dissoute moyenne annuelle est 2,5 fois supérieure à celle mesurée à St-Louis en 1981-1982, soit 42,35 mg/l (KANE, 1985).

EVOLUTION DE LA QUALITE DES EAUX DU FLEUVE SENEGAL DANS LA VALLEE ET LE DELTA (DE BAKEL A DIAMA)

Cette évolution des eaux du Sénégal est étudiée par KANE (1985 ; 1993), les résultats synthétisés sous forme de tableaux.

Tableau 3. Composition chimique moyenne des eaux du fleuve Sénégal à Diama en 1991. Concentrations moyennes mensuelles en mg/l

Mois	Cl	SO ₄	HCO ₃	Ca	Mg	Na	K	SiO ₂	Charge totale
Janvier	120,70	19,08	64,66	14,50	11,31	68,43	4,49	20,75	325,00
Février	79,88	13,28	49,92	9,40	8,09	46,77	3,58	20,83	236,67
Mars	61,77	12,58	46,97	8,76	7,17	35,88	2,96	22,80	208,00
Avril	59,17	11,84	50,22	8,80	6,77	35,27	2,99	25,00	206,67
Mai	76,33	14,64	51,24	9,20	8,21	42,55	3,51	26,00	235,00
Juin	80,94	14,69	55,51	10,04	8,51	45,54	3,67	27,00	252,00
Juillet	124,25	20,88	56,73	10,80	11,07	71,30	4,88	28,50	325,00

Août	20,98	5,06	38,87	5,95	3,56	13,11	3,16	21,27	113,64
Septembre	7,01	2,16	29,51	4,29	1,95	5,07	2,24	20,06	71,25
Octobre	7,02	2,03	27,92	4,53	2,43	4,88	1,95	21,89	71,11
Novembre	11,89	2,16	31,11	5,00	2,68	7,25	2,05	21,00	82,50
Décembre	12,25	3,12	31,72	5,00	2,92	7,48	1,95	21,50	85,00
Année 91	55,18	10,13	44,53	8,02	6,22	31,96	3,12	23,05	184,32

Le milieu complètement estuarien explique les fortes teneurs du chlore et du sodium. Les bicarbonates deviennent prépondérants, les sulfates sont présents en quantité non négligeable. Les teneurs en éléments dissous dans l'estuaire sont largement supérieures à celles mesurées dans les eaux de la vallée entre Bakel et Podor. La principale source d'enrichissement en éléments est d'abord le substratum géologique, ensuite les apports atmosphériques, la concentration des eaux fluviales par évaporation, les rejets des eaux fortement minéralisées issues de l'irrigation contribuent à l'évolution de la composition chimique moyenne des eaux du Sénégal dans l'estuaire. Ces processus s'ajoutent aux apports dus à l'altération chimique tout au long du cheminement des eaux vers l'aval. La minéralisation totale est alors plus élevée vers l'estuaire et varie dans un rapport de 1 à 3 de Bakel à Diama.

Conclusion

Les eaux du fleuve Sénégal sont très fortement diluées dans le haut bassin et dans la vallée, elles sont légèrement basiques (pH moyen de 7,5), les composantes essentielles de la charge dissoute étant les bicarbonates et la silice. Dans le delta et particulièrement dans l'estuaire, les eaux deviennent fortement chlorurées et sodiques, les teneurs moyennes sont supérieures à 100mg/l, le pH varie peu, la silice est toujours importante. Ces résultats montrent la nécessité des recherches pour le contrôle de la qualité des eaux dans la basse vallée et le delta en raison du développement de l'aménagement hydro-agricole et de la nature des milieux.

BIBLIOGRAPHIE

- CECCHI P., (1993) - Phytoplancton et conditions de milieu dans l'estuaire du fleuve Sénégal : effets du barrage de Diama. Travaux et Documents microfichés, n° 94, ORSTOM, Paris, 437 p.
- EL FAID S. (1996) - Hydrochimie de la nappe phréatique de Louga (Nord Sénégal). DEA. de Géologie Appliquée, mention : Hydrogéologie. Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques, Université CHEIKH ANTA DIOP, 73 p + 3 annexes.
- EQUESEN, 1993. — Rapport de synthèse du projet EQUESEN (Environnement et Qualité des Eaux du fleuve Sénégal). Rapport ORSTOM multigr., Dakar et rapport CEE (EQUESEN), TS 2 0198 F EDB, 6 tomes.

FAYE A. (1996) - Les critères de gestion optimum des ressources en eau dans le delta du fleuve Sénégal. Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle de Géographie, Univ. CHEIKH ANTA DIOP, Dakar, 201 p + annexes.

GAC J.Y., KANE A (1986 b) - Le fleuve Sénégal. II : Flux continentaux de matières dissoutes à l'embouchure. Sciences Géologiques, 39, 2, pp. 151-172.

GOURCY L. (1994) - Fonctionnement hydrogéochimique de la cuvette lacustre du fleuve Niger (Mali) : Bilans et suivi des flux hydriques et dissous et des flux de méthane. Doctorat en Sciences, Université Paris XI Orsay, 272 p, 8 annexes.

KANE A. (1985) - Le bassin du Sénégal à l'embouchure. Flux continentaux dissous et particuliers. Invasion marine dans la vallée du fleuve. Contribution à l'hydrologie fluviale en milieu tropical humide et à la dynamique estuarienne en domaine sahélien. Thèse doctorat 3^{ème} cycle, Univ. Nancy II, 205 p.

KANE (A.), 1997. – L'après-barrages dans la vallée du fleuve Sénégal : Modifications hydrologiques, morphologiques, géochimiques et sédimentologiques. Conséquences sur le milieu et les aménagements hydro-agricoles. Thèse de doctorat d'Etat, Univ. Dakar, 551 p.

LO H. M. (1984) - Le bassin de la Gambie en amont de Gouloumbou. Thèse 3^{ème} cycle, Géographie, univ. Nancy II, 6, 394 p.

ORANGE D. (1990) - Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux paysage latéritique. Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, 241 p.

ORANGE D., GAC J.Y. et, DIALLO M.I. (1993). - Constituent composition of harmattan dust and geochemical balance of atmospheric depositions in continental West Africa. Proceed. of the symposium H 2 of IAHS (International Association of Hydrological Sciences), 11-23 juillet 1993, Japon, 13 p.

TARDY Y. (1986) - Le cycle de l'eau ; climats, paléoclimats et géochimie globale. Ed. MASSON, Paris, 338 p.

TARDY Y., GAC J.Y. (1979) - Contrôle de la composition chimique des solutions par la précipitation des minéraux dans les sols. Ebauche d'un modèle thermodynamique pour la formation des argiles. Science du sol, n° spécial, 2-3, pp. 107-123.