


FLUX DE MATIERES DISSOUTES ET BILAN DE L'ALTERATION CHIMIQUE

GEODYNAMIQUE ACTUELLE DES PAYSAGES AMONT

EVOLUTION DE LA QUALITE CHIMIQUE DES EAUX DU FLEUVE SENEGAL

 Pour appréhender, à l'échelle humaine et en toute modestie, la géodynamique actuelle des paysages de la zone intertropicale africaine un suivi de la qualité chimique des pluies, des sources, des ruisseaux, des rivières et des fleuves pendant une longue période est indispensable. Bien évidemment, cela ne s'est pas fait en quatre années dans le cadre du seul projet EQUÉSEN et sur un bassin aussi vaste que celui du fleuve Sénégal.

Il n'apparaît pas inutile de rappeler ici les propos de J. C. OLIVRY dans sa préface de l'article de GAC et al. (1987) sur la " Géochimie des eaux du Fouta Djallon " : " *En programmant dès 1983, une synthèse de l'ensemble des travaux et mesures se rapportant au domaine de l'eau sur les bassins des fleuves Sénégal et Gambie, je prévoyais, en complément des études hydroclimatologiques de fond, une valorisation et une poursuite des études effectuées par l'ORSTOM dans le domaine des transports solides, de l'érosion et de la qualité des eaux* ". Cet aspect des recherches a été retenu dans le cadre du projet EQUÉSEN et a fait l'objet des travaux d'ORANGE (1990).

Ce chapitre consacré à l'altération chimique et à la qualité des eaux du fleuve Sénégal débute par un rappel de la composition chimique des eaux de pluies (déjà évoquée au chapitre III de cet ouvrage) en dressant un bilan chimique quantitatif des apports atmosphériques sur le haut bassin. La seconde partie traite de la qualité des eaux de surface en fournissant une sorte de " profil-en-long chimique " allant des sources aux fleuves en passant par les ruisseaux et les rivières. Les flux de matières dissoutes sont ensuite quantifiés et les grands types d'altération caractérisés. Cette reconnaissance géochimique se termine en précisant les flux de bicarbonates et leur rôle comme marqueurs de l'intensité de l'altération. La cinquième partie établit l'importance relative des deux mécanismes concurrentiels que sont l'érosion mécanique et l'altération chimique et leur impact sur la géodynamique actuelle des paysages. Enfin l'évolution de la qualité des eaux du fleuve Sénégal est précisée à l'exutoire amont de Bakel et tout au long de la moyenne vallée.

I BILAN DES APPORTS ATMOSPHERIQUES

A - INFLUENCE DES POUSSIERES ATMOSPHERIQUES SUR LA CHIMIE DES PLUIES

25% des retombées annuelles de poussières atmosphériques se produisent pendant la saison des pluies. Lors des averses, les lithométéores vont donc modifier la chimie des précipitations humides par le simple effet de " *self-cleaning* " en dissolvant une part non négligeable des constituants des poussières (LEWIS, 1981; STALLARD et EDMOND, 1981). En effet, si elles sont surtout siliceuses, les poussières atmosphériques ont également des teneurs importantes en bases échangeables (Ca, Mg, K, Na) et contiennent de la matière organique qui apporte phosphate et nitrate (DOMERGUE, 1980; TOBIAS & MEGIE, 1981). Ces caractéristiques suffisent à expliquer les teneurs élevées en silice, bases échangeables, phosphate, nitrate et bicarbonate des pluies d'Afrique de l'Ouest. Les poussières atmosphériques interfèrent également sur le pH des eaux de pluie en les rendant plus basiques (GORHAM, 1955; MATHIEU et MONNET, 1971; LOYE-PILOT et al., 1986; LACAUX & al., 1987).

L'influence des poussières atmosphériques sur la chimie des pluies explique également que l'évolution de la silice soit bien corrélée à la fois au bicarbonate, au potassium et au sodium, tous trois composants fortement solubles des poussières. L'absence de corrélation avec le calcium peut être due au fait que ses teneurs dans les poussières soient très variables. LEWIS (1981), fait la même remarque à propos de la qualité chimique des apports atmosphériques du Venezuela.

B - QUALITE CHIMIQUE DES APPORTS ATMOSPHERIQUES EN AFRIQUE DE L'OUEST

Si l'homogénéité du faciès chimique des différents exemples, aussi bien pour les pluies que pour les poussières, autorise à parler d'une tendance africaine de la qualité chimique des apports atmosphériques, il existe cependant un corpus analytique des eaux de pluie caractéristique de chaque zone climatique. En effet, la charge totale dissoute de ces eaux de pluie passe de 22 mg/l en milieu sahélien à 14 mg/l en milieu soudanien et 10 mg/l en milieu guinéen. La composition chimique moyenne des apports atmosphériques dissous en Afrique de l'Ouest continentale sahélo-soudano-guinéenne est donc estimée à partir de la composition chimique moyenne des eaux de pluie recueillies à Bakel, Kédougou et Korhogo pondérée par la lame d'eau moyenne précipitée à chacune des stations (respectivement 400 mm, 1100 mm et 1200 mm). ; les apports particuliers sont calculés par moyenne arithmétique à partir des compositions chimiques moyennes des poussières prélevées à Dakar et Pété, station de la moyenne vallée en rive gauche du fleuve Sénégal (Tableau I).

Tableau I

Composition chimique moyenne des apports atmosphériques en domaine sahélien (sah.), soudanien (soud.) et guinéen (guin.)

ions	Apports dissous (en mg/l)				Apports particuliers	
	sah.	soud.	guin.	MOY	oxydes	% d'ox.
Cl ⁻	2,7	1,2	0,3	1,0	Al ₂ O ₃	10,5
SO ₄ ²⁻	2,0	1,0	1,0	1,1	Fe ₂ O ₃	4,4
HCO ₃ ⁻	9,5	6,5	4,8	6,2	TiO ₂	0,8
NO ₃ ⁻	1,0	0,5	0,5	0,6	MnO ₂	0,1
PO ₄ ³⁻	0,2	0,3	0,3	0,3	P ₂ O ₅	0,15
Ca ²⁺	2,2	1,5	1,9	1,8	CaO	1,5
Mg ²⁺	0,6	0,2	0,1	0,1	MgO	1,6
K ⁺	0,9	0,6	0,2	0,5	K ₂ O	1,7
Na ⁺	1,0	0,3	0,3	0,4	Na ₂ O	0,7
NH ₄ ⁺	1,2	1,0	0,3	0,7	H ₂ O ⁺	3,95
SiO ₂	0,7	0,4	0,7	0,6	SiO ₂	74,6
Total	22,0	13,5	10,4	13,3	Total	100,0

MOY : moyenne sahélo-soudano-guinéenne.

La charge totale moyenne des apports dissous en milieu continental sahélo-soudano-guinéen d'Afrique occidentale est de 13 mg/l. En terme d'équivalent, l'ordre d'importance des cations solubles est : Ca>NH₄>K>Na>Mg ; pour les anions solubles, l'ordre est HCO₃>Cl>SO₄>NO₃>PO₄. Toutes espèces ioniques confondues, le bicarbonate est largement l'ion dominant : il représente 47 % des apports dissous. C'est une caractéristique importante des pluies africaines par rapport aux données mondiales publiées par MEYBECK (1984). LEWIS (1981) au Venezuela, travaillant également en milieu continental tropical, note aussi cette prédominance des bicarbonates, liée à la présence d'aérosols terrigènes dans l'atmosphère de ces zones tropicales. Cet auteur donne en terme d'équivalent la même répartition des anions mais trouve nettement plus

de sodium et magnésium, ce qui met ces deux éléments en tête des apports en cations solubles. En ce qui concerne les apports particulaires, la silice contribue à 75 % de la masse totale, l'alumine à 10 % et les oxydes de fer à 5 %, le reste se partage entre les oxydes de calcium, magnésium, potassium, sodium et phosphore (Fig. 1).

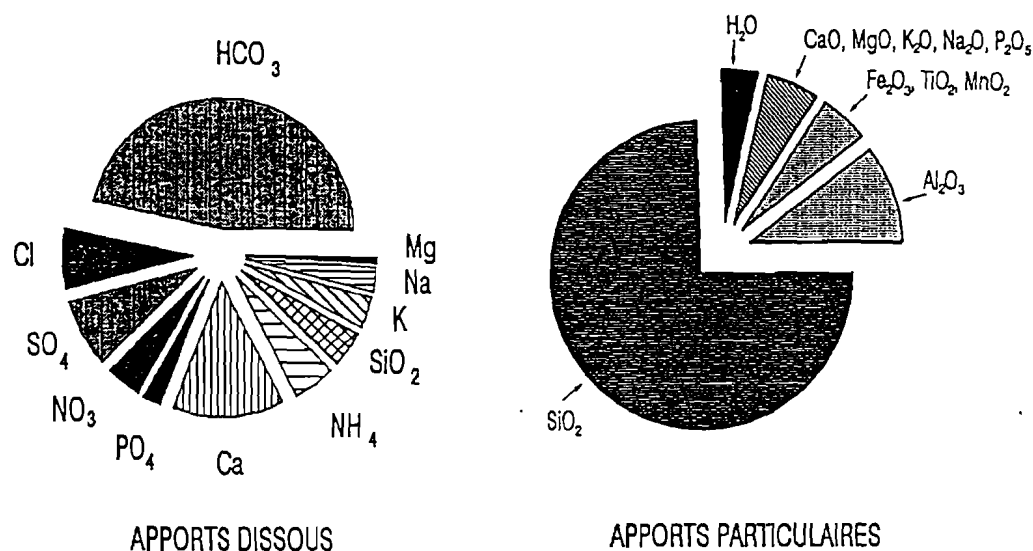


Fig. 1 - Qualité chimique des apports atmosphériques dissous et particulaires en domaine continental sahélo-soudano-guinéen d'Afrique occidentale.

C - BILAN CHIMIQUE QUANTITATIF DES APPORTS ATMOSPHERIQUES

En milieu sahélien, pour une lame d'eau précipitée de 636 mm/an, le dépôt humide spécifique représente 10 g/m²/an alors que le dépôt sec spécifique est de 200 g/m²/an. Par contre, en domaine guinéen, l'écart entre les deux types d'apports atmosphériques est nettement moins important. Pour une lame d'eau précipitée de 1380 mm/an, le dépôt humide spécifique est estimé à 14 g/m²/an et le dépôt sec spécifique à 40 g/m²/an.

Ainsi, sur l'ensemble du bassin versant du fleuve Sénégal, soit sur une superficie totale de 218.103 km² dont 15700 km² seulement se trouve en domaine guinéen, pour une lame d'eau moyenne précipitée de 685 mm/an et une épaisseur de dépôts secs de 70 µm/an, l'apport atmosphérique en matières dissoutes représente un flux de 110 kg/ha/an (2,4.10⁶ t/an) et l'apport atmosphérique en matières particulaires 1235 kg/ha/an (26,9.10⁶ t/an), soit 11 fois plus. Les poussières constituent 92% des apports atmosphériques totaux. Au Venezuela, à 5000 km des zones sources africaines, LEWIS (1981) estime l'apport des poussières atmosphériques à 139 kg/ha/an, soit 9 fois moins. Cette différence est de l'ordre de grandeur de la perte subie par les nuages de poussières lors de leur traversée de l'océan Atlantique (COUDE-GAUSSEN & ROGNON, 1983).

Sur le Fouta Djallon, se situant entièrement en domaine guinéen, les dépôts humides sont estimés à 0,8.10⁶ t/an et les dépôts secs à 2,4.10⁶ t/an ; ces derniers représentent encore 74 % des apports atmosphériques totaux.

Malgré la pluviosité plus abondante sur le Fouta Djallon que sur l'ensemble du bassin versant du Sénégal, l'apport atmosphérique en éléments dissous est d'importance équivalente sur ces deux entités géographiques (de 140 à 150 kg/ha/an). Ces chiffres sont du même ordre de grandeur que celui obtenu par LEWIS (1981) sur un bassin versant vénézuélien. D'autre part, la similitude de comportement du flux relatif des différentes espèces chimiques, entre ces deux zones

géographiques situées sur des continents différents mais dans un environnement comparable, est remarquable et souligne encore une fois l'importance des aérosols détritiques sur la chimie des dépôts humides (ORANGE et GAC, 1990a).

En terme de bilan massique des dépôts atmosphériques totaux, la répartition des espèces chimiques entre les deux formes d'apport, dissous et particulaire, dépend du domaine climatique (ORANGE et GAC, 1990a). Cependant, dans tous les cas, le chlore, le carbone inorganique, l'azote et le soufre sont apportés uniquement sous forme dissoute, alors que l'aluminium, le fer et le titane le sont sous forme particulaire. Le phosphore et le silicium se répartissent entre les deux formes d'apports, le premier choisissant principalement la forme dissoute alors que le second est presque uniquement amené sous forme particulaire. Les autres éléments (Na, Ca, K, Mg) se répartissent entre les deux types d'apports plus ou moins équitablement selon l'importance relative des deux modes de dépôts (Fig. 2).

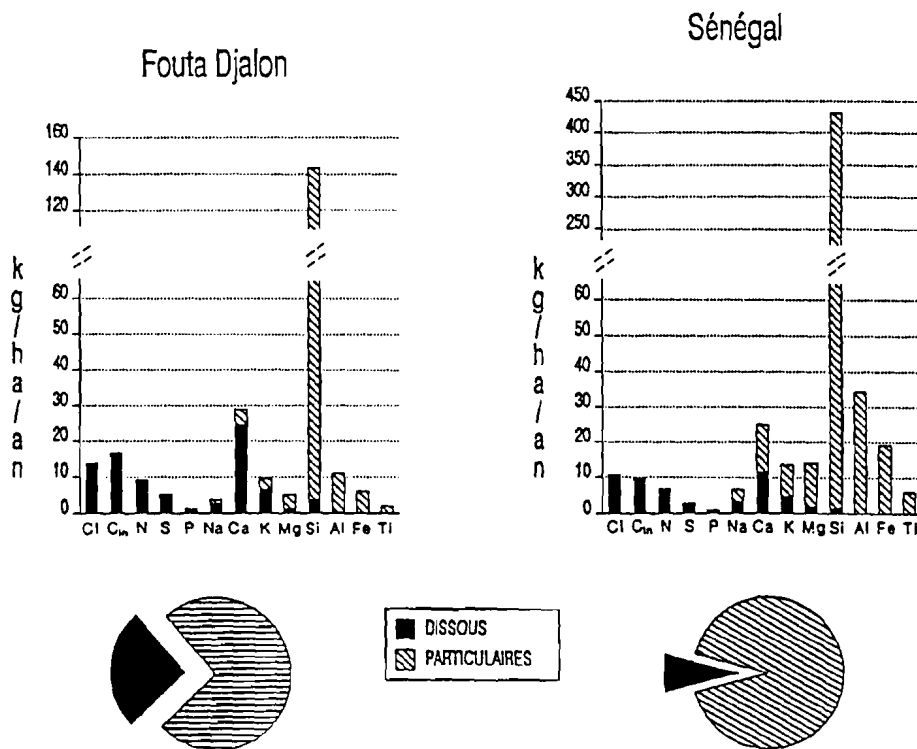


Fig. 2 - Bilan chimique des apports atmosphériques dissous et particulaires sur le bassin versant amont du Sénégal (domaine sahélien) et sur le Fouta Djallon (domaine soudano-guinéen).

On retiendra que les deux caractéristiques fondamentales des apports atmosphériques en domaine continental sahélo-soudano-guinéen sont la forte concentration en bicarbonates dans les eaux de pluies et l'importance du flux de silice déposé sur les sols de cette zone géographique. Cet apport majeur des poussières atmosphériques souvent négligé dans les bilans géochimiques, apporte un éclairage nouveau sur la dynamique d'altération de ces régions tropicales.

II RECONNAISSANCE GÉOCHIMIQUE DES EAUX DE SURFACE DU FOUTA DJALON ET FLUX DE MATIÈRES

La première reconnaissance géochimique des eaux du Fouta Djallon faite par BAMBA (1987) puis ORANGE et GAC (1990 b) est complétée ici par un plus grand nombre d'observations. Les campagnes de prélèvements ont toujours eu lieu en saison sèche.

A - LA QUALITE CHIMIQUE DES EAUX

Près de 70% de l'écoulement total annuel du Fouta Djalou se fait durant la saison des pluies, de juillet à septembre (chapitre IV). Or, la plupart des prélèvements ont été effectués avant ou après cette période. Ainsi, les moyennes présentées ci-dessous ont été calculées en pondérant chaque prélèvement par un coefficient qui tient compte de cette répartition annuelle des écoulements.

1. Des sources aux fleuves

La composition chimique des eaux de surface en allant de l'amont des bassins versants vers l'aval fournit un "profil-en-long chimique" des eaux de surface du Fouta Djalou (Tableau II). Depuis les sources jusqu'aux fleuves en passant par les ruisseaux et les rivières, la minéralisation totale passe de 31 mg/l à 52 mg/l. Cette augmentation de la charge dissoute totale s'accompagne d'une augmentation significative du pH. La teneur en chlorures est sensiblement la même dans les eaux de sources, de ruisseaux et de rivières, mais elle est largement supérieure dans les eaux des fleuves. La principale source de chlorures est l'atmosphère, il y a donc concentration des eaux fluviales par évaporation. Ce processus s'ajoute aux apports dus à l'altération chimique tout au long du cheminement des eaux vers l'aval, et confère une minéralisation totale plus élevée aux eaux fluviales : *l'amont nourrit l'aval* (PAQUET, 1970).

Ainsi, au cours de leur cheminement des sources aux rivières, les eaux de surface acquièrent une charge dissoute supplémentaire due essentiellement à l'altération chimique. Par contre, en ce qui concerne les eaux des fleuves, l'augmentation des concentrations est principalement réglée par l'évaporation, mise en évidence par la brusque augmentation des teneurs en chlorures.

Tableau II

Composition chimique moyenne des eaux de sources, de ruisseaux, de rivières et de fleuves du Fouta Djalou

Taille du bassin versant	n	anions		cations				SiO ₂ (μmol/l)	pH _i	Cond (μS/cm)	Σanion (μeq/l)	Σcation (μeq/l)	TDS (mg/l)	R _E
		Cl (μeq/l)	HCO ₃ (μeq/l)	Ca	Mg	K	Na							
Sources	28	22	229	89	92	18	52	188	6,7	25	251	251	30,8	1,4
Ruisseaux	59	19	295	129	115	18	54	171	6,9	31	314	316	35,0	1,8
Rivières	48	22	410	168	159	37	82	175	7,2	43	432	446	45,3	2,4
Fleuves	31	42	478	210	176	52	106	166	7,5	53	520	544	51,9	2,8

n : nombre d'échantillons analysés ; Cond : conductivité à 20°C ; TDS : charge totale dissoute ;

$$R_E = (6.K_2O + 6.Na_2O + 2.CaO - SiO_2) / (K_2O + Na_2O + CaO) \text{ en moles d'oxyde.}$$

2. Composition chimique des eaux par bassin versant

Pour tous les bassins versants ou sous-bassins versants, la concentration des eaux en fin de saison sèche (de janvier à juin) est supérieure à celle des eaux prélevées après la saison des pluies (d'octobre à décembre) (Tableau III). Tous les éléments majeurs suivent ce schéma à l'exception de la silice dans les bassins du Konkouré et de la Gambie.

Tableau III

Composition chimique moyenne des eaux des bassins versants constitutifs du Fouta Djallon avant la saison des pluies (B) et après la saison des pluies (A)

Bassin versant	n	anions		cations				SiO ₂ (μmol/l)	pH _t	Cond (μS/cm)	Σanion (μeq/l)	Σcation (μeq/l)	TDS (mg/l)	
		Cl	HCO ₃ (μeq/l)	Ca	Mg	K	Na							
KONKOURE	B	9	46	162	66	52	28	65	82	6,6	23	208	211	21,0
	A	5	26	117	49	35	13	50	95	6,6	15	143	147	16,9
TOMINE	B	4	23	547	199	284	33	55	160	7,2	60	570	571	53,8
	A	13	19	259	99	110	20	56	123	7,0	28	278	285	29,3
GAMBIE Dima	B	22	26	272	107	106	25	55	173	6,7	28	298	293	33,7
	A	12	15	227	109	88	10	29	193	6,9	25	242	236	30,3
Oundou	B	4	9	554	253	186	39	84	200	7,2	51	563	562	56,9
	A	8	4	359	193	108	12	46	271	7,2	38	363	359	45,1
Gambie	B	6	24	726	348	283	46	98	163	7,3	68	750	775	69,8
	A	5	16	278	130	110	14	38	203	7,2	31	294	292	35,0
FALEME	B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A	3	20	423	217	159	15	52	333	7,4	47	443	443	54,5
BAFING (amont)	B	7	25	470	126	232	37	109	195	7,2	47	495	504	50,8
	A	8	22	297	91	140	17	72	145	6,8	29	319	320	33,5
Téné	B	8	29	188	69	84	20	45	121	6,7	21	217	218	24,1
	A	10	28	151	55	73	17	41	106	6,8	18	179	186	20,2
Bafing (aval)	B	1	56	519	183	272	28	93	150	7,4	55	575	576	52,9
	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TINKISSO	B	3	28	820	202	439	59	154	276	7,6	76	848	854	83,2
	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

n : nombre d'échantillons analysés; Cond : conductivité à 20°C; TDS : charge totale dissoute;
 $R_E = (6.K_2O + 6.Na_2O + 2.CaO - SiO_2) / (K_2O + Na_2O + CaO)$ en moles d'oxyde.

Sur le flanc ouest du Fouta Djallon, les deux bassins versants côtiers guinéens ont des caractéristiques chimiques différentes. Les eaux de la Tominé sont deux fois plus minéralisées que celles du Konkouré. Les eaux de la Tominé sont bicarbonatées magnésiennes alors que celles du Konkouré sont bicarbonatées calciques.

A l'intérieur du bassin de la Gambie, la Dima et l'Oundou ont des eaux de qualité chimique différente. A l'Ouest, les eaux sont neutres (pH = 6,9) et faiblement minéralisées (30,7 mg/l) ; à l'Est, les eaux ont des pH plutôt basiques (pH = 7,2) et sont plus minéralisées (46,5 mg/l). Cette différence est imputable à la présence largement dominante du calcium et des bicarbonates dans les eaux. A l'aval de la confluence de ces deux rivières, les eaux ont déjà acquis la composition des eaux transitant au bief de Kédougou. Toutes ces eaux sont bicarbonatées calciques. Ce caractère calcique est à corrélater avec le caractère calcique des eaux de la Falémé dont les prélèvements proviennent de la même zone géographique.

En effet, la prédominance de ces ions apparaît encore plus marquée dans le bassin versant de la Falémé, où trois prélèvements seulement ont été effectués dans la partie occidentale du bassin (attenante au bassin de l'Oundou) en domaine gréseux quartzitique durant le mois de novembre, avant que les eaux soient concentrées par évaporation. Ainsi leur moyenne donne sûrement une bonne idée de la qualité chimique moyenne annuelle des eaux issues de cet ensemble lithologique dont le caractère gréseux quartzitique ne peut justifier ces fortes charges dissoutes. La seule explication possible est la dissolution des bancs carbonatés du bassin de Madina-Kouta largement représenté dans ces deux bassins versants (chapitre II).

Les eaux du Bafing sont plus minéralisées que celles de son affluent principal, la Téné, dont la charge totale dissoute est du même ordre de grandeur que celle du Konkouré. La répartition relative des différentes espèces chimiques entre ces deux affluents est sensiblement la même à l'exception des chlorures qui semblent légèrement plus concentrés dans le sous-bassin versant de la Téné. Les eaux du Bafing après la confluence sont largement plus minéralisées du fait de la présence largement dominante des dolérites dans la partie aval. Toutes ces eaux sont bicarbonatées magnésiennes.

Enfin, les trois prélèvements du bassin versant du Tinkisso ont été effectués en fin de saison sèche, en mars et juin, et leurs eaux bicarbonatées magnésiennes sont fortement concentrées.

3. La qualité chimique des eaux sortant du Fouta Djalon

Après avoir répertorié les différents types chimiques des eaux de surface du Fouta Djalon, il importe ici de donner la qualité chimique des eaux sortant de ce massif. Deux cas se présentent. Soit la qualité chimique des eaux à l'exutoire est suivie dans le temps, on calcule alors la moyenne pondérée par le débit des compositions chimiques enregistrées à cette station, c'est le cas de Kédougou pour la Gambie et de Daboia pour le Tinkisso. Soit il n'y a pas de suivi à l'exutoire, on calcule alors la moyenne des compositions chimiques des eaux de l'ensemble du bassin versant considéré en affectant à chaque sous-bassin versant un coefficient qui tient compte de sa contribution à l'écoulement total enregistré à l'exutoire. Le peu de prélèvements effectués sur l'ensemble du bassin versant de la Falémé et le caractère trop localisé de ses prélèvements ne permettent pas d'utiliser cette méthode. Il semble préférable de prendre la composition chimique de l'eau obtenue sur un échantillon prélevé en octobre sur la Falémé à Saraya, quelques kilomètres à l'aval de l'exutoire du bassin.

Les eaux drainant l'Est du Fouta Djalon sont deux fois plus minéralisées que celles drainant l'Ouest de ce massif (Tableau IV). Des six fleuves qui drainent le Fouta Djalon, le Konkouré est de loin celui qui a les eaux les moins concentrées, leur minéralisation est proche de celle des eaux de pluie. Cette très faible charge dissoute est bien sûre à mettre en relation directe avec le substratum entièrement gréseux de ce bassin versant. Pour la Tominé, la présence de 14 % de dolérite explique une plus forte concentration de ses eaux, qui restent cependant encore relativement peu concentrées. A l'opposé, sur le rebord oriental du Fouta Djalon, les bassins versants de la Falémé, du Bafing et du Tinkisso sont drainés par des eaux beaucoup plus minéralisées et du même ordre de grandeur. Enfin, les eaux de la Gambie ont une minéralisation totale intermédiaire.

Cette séparation du Fouta Djalon en deux régions est le résultat de la concomitance de deux facteurs indépendants : la lithologie et la pluviosité. Les bassins versants à substratum gréseux, formant la partie ouest, livrent les eaux les moins concentrées ; dans les autres bassins versants, la présence de dolérite, de granite pour le Bafing et le Tinkisso, de schistes pour la Falémé peut expliquer une charge ionique plus importante dans les eaux de surface. De plus, l'isohyète 1500 mm suit de près la ligne de crête séparant les deux bassins versants côtiers guinéens des autres bassins versants constitutifs du Fouta Djalon : la pluviométrie augmente vers la côte et diminue au contraire vers l'Est (chapitre III). Ainsi, il y a un phénomène de dilution par les eaux de pluie sur les deux bassins versants côtiers guinéens qui se superpose à l'influence de la lithologie. Par contre, il y a concentration par évaporation sur les autres bassins versants, à l'exception

sûrement du bassin de la Gambie où l'isohyète 1300 mm se trouve déjà à l'extrémité nord du bassin (chapitre III).

Tableau IV

Composition chimique moyenne des eaux sortant du Fouta Djalon

Bassin versant	anions		cations				SiO ₂ (μmol/l)	pH _t	Cond (μS/cm)	Σanion (μeq/l)	Σcation (μeq/l)	TDS (mg/l)	R _E
	Cl	HCO ₃	Ca	Mg	K	Na							
KONKOURE	31	127	53	39	16	53	92	6,6	17	158	161	17,8	2,8
TOMINE	20	324	122	149	23	56	131	7,0	34	344	350	34,8	2,3
GAMBIE	23	351	180	121	26	57	185	7,3	35	374	384	40,7	1,9
FALEME	30	400	180	130	30	90	248	7,4	51	430	430	48,8	1,9
BAFING	56	519	183	272	28	93	150	7,4	55	575	576	52,9	2,6
TINKISSO	11	459	115	222	23	126	225	7,6	44	470	486	50,8	2,6
Eaux du FOUTA	32	310	118	136	22	70	140	7,0	34	342	346	35,0	2,4

Cond : conductivité à 20°C ; TDS : charge totale dissoute ; $R_E = (6.K_2O + 6.Na_2O + 2.CaO - SiO_2) / (K_2O + Na_2O + CaO)$ en moles d'oxyde.

Cependant, ces phénomènes de dilution ou de concentration ne changent en rien les rapports des différents éléments chimiques entre eux. Les eaux de la Falémé et de la Gambie sont bicarbonatées calciques alors que pour les autres bassins versants les eaux sont bicarbonatées magnésiennes à l'exception du Konkouré où les eaux sont, du fait de leur très faible minéralisation, bicarbonatées calciques. Rappelons que ce caractère bicarbonaté calcique des eaux de la Falémé et de la Gambie est attribuable à la présence de séquences argilo-carbonatées dans l'ensemble gréso-quartzitique du bassin de Madina-Kouta (chapitre II).

4. Caractéristiques moyennes des eaux de surface du Fouta Djalon

La caractéristique essentielle des eaux qui drainent le massif du Fouta Djalon est leur très faible minéralisation qui, en moyenne annuelle, reste inférieure à 50 mg/l. Le regroupement de tous les prélèvements donne pour les eaux du Fouta Djalon une charge totale dissoute moyenne de 35 mg/l. Ce résultat n'est pas sans liaison avec la nature essentiellement gréseuse du substratum et l'importance des niveaux cuirassés "stériles".

En résumé, les hauteurs du Fouta Djalon livrent actuellement aux provinces de l'aval, des eaux proches de la neutralité et faiblement minéralisées, dans lesquelles prédominent les bicarbonates, le calcium et le magnésium. Les eaux du Konkouré et de la Tominé sont calco-magnésiennes, celles de la Gambie et de la Falémé sont calciques alors que celles du Bafing et du Tinkisso sont plutôt magnésiennes.

B - LES FLUX DE MATIERES SORTANT DU FOUTA DJALON

1. Les flux de matières en solution

Près de 770 000 t/an de matières en solution sont exportées hors du Fouta Djalon. 30% de ce flux total annuel transite par le Bafing ; la Tominé et le Konkouré exportent chacun 20% du total, et la Gambie, la Falémé et le Tinkisso se répartissent en parts égales les 30 % restant

(Tableau V). Le tonnage représente un flux spécifique dissous moyen de 13 t/km²/an sur l'ensemble du Fouta Djalou. Le flux spécifique est plus faible sur les bassins versants de la Falémé (7 t/km²/an) et de la Gambie (10 t/km²/an) alors qu'il est maximal sur la Tominé (17 t/km²/an). Le facteur déterminant semble donc être l'intensité de la lame d'eau précipitée, et donc du domaine climatique considéré, ce qui est une caractéristique des bassins versants à substratum cristallin (DARMENDRAIL, 1984).

Tableau V

Flux dissous (T_D) et particulaires (T_S) dans les bassins versants qui drainent le Fouta Djalou et flux spécifiques correspondants (F_{TDS} et F_{MES})

Bassin versant	TDS (mg/l)	T_D (t/an)	F_{TDS} (t/km ² /an)	MES (mg/l)	T_S (t/an)	F_{MES} (t/km ² /an)
KONKOURS	17,8	140 900	14,2	10	(79 200)	—
TOMINE	34,8	164 600	17,5	16	(75 200)	—
GAMBIE	40,7	77 000	10,3	32	60 000	8
FALEME	48,8	69 300	6,9	60	(80 800)	—
BAFING	52,9	240 200	15,3	28	(125 600)	—
TINKISSO	50,8	80 100	12,5	32	51 200	8
Eaux du FOUTA	35,0	772 100	13,1	21	(472 000)	(8)

() : valeurs estimées en prenant 8 t/km²/an comme flux particulaire spécifique.

2. Les flux de matières en suspension

Sur la base d'un flux spécifique moyen annuel de 8 t/km²/an sur l'ensemble du Fouta Djalou pour la période étudiée de 1979 à 1986, on obtient un flux total des MES sortant du Fouta Djalou de 470 000 t/an, ce qui représente une concentration moyenne de 21 mg/l (Tableau V). Cette hypothèse d'uniformité de réponse à l'érosion mécanique de l'ensemble du Fouta Djalou est en accord avec les résultats d'une étude antérieure effectuée par la *Société Energo-Projet* (GUPTA, 1987). Après avoir effectué des mesures journalières de concentration des MES de juillet à septembre sur le Bafing à Balabory, le rapport conclut à une concentration moyenne annuelle de 26 mg/l, ce qui est très proche des 28 mg/l trouvés par nos calculs (Tableau V). D'autre part, cette dilution des teneurs en MES dans les eaux (conséquence de l'hypothèse de calcul) correspond aux observations de terrains et aux données plus complètes sur les exportations en éléments dissous. Les deux extrêmes sont représentées par les eaux très claires du Konkouré (10 mg/l) et par les eaux les plus chargées de la Falémé (60 mg/l).

3. Importance relative des transports dissous et particulaires

En année moyenne, le flux total de matières exportées hors du Fouta Djalou est de 1,2 millions de tonnes par an, dont 62% sous forme dissoute. Ce chiffre représente un flux spécifique total de 21 t/km²/an ; 29 % de ce flux total transite par le Bafing, 19 % et 18 % respectivement par la Tominé et le Konkouré, 12 % par la Falémé, et 11 % chacun pour la Gambie et le Tinkisso (Fig. 3).

Les contributions respectives des transports minéraux dissous et des transports particulaires sont comparées pour les principaux éléments exportés (Fig. 4). Le carbone inorganique, le chlore, le sodium, le calcium et le magnésium sont principalement exportés sous forme dissoute. L'aluminium et le fer sont essentiellement entraînés sous forme particulaire. Plus de la moitié du silicium (57 %) et seulement 15 % du potassium sont exportés sous forme

particulière. Les faibles contributions de ces deux éléments au transport particulaire soulignent la faiblesse des exportations de MES hors de ce paysage soudano-guinéen.

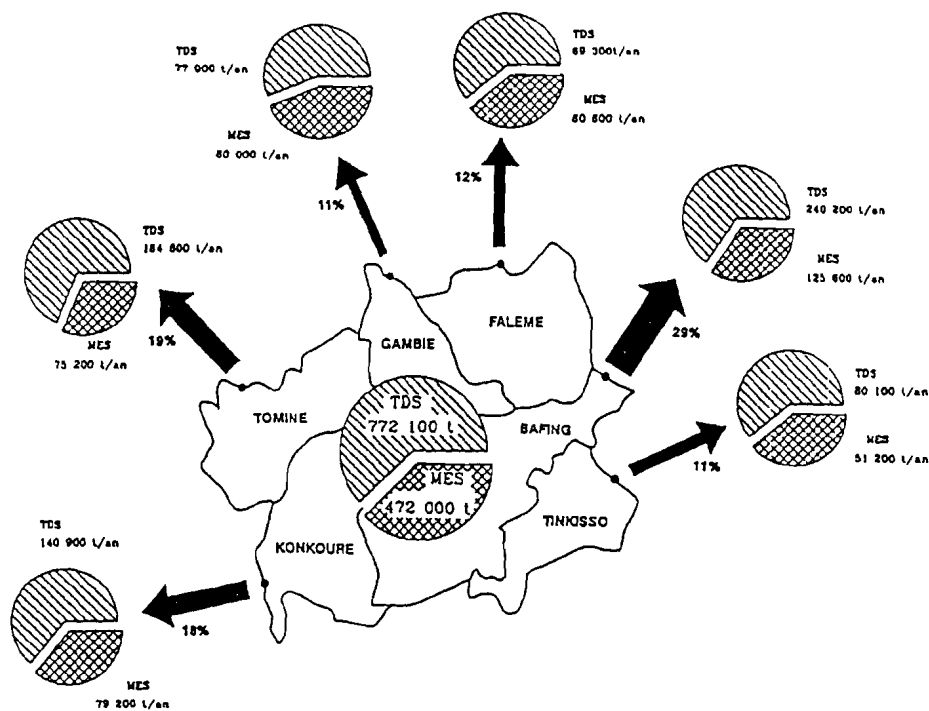


Fig. 3 - Répartition des exportations de matières dissoutes et particulaires hors du Fouta Djallon.

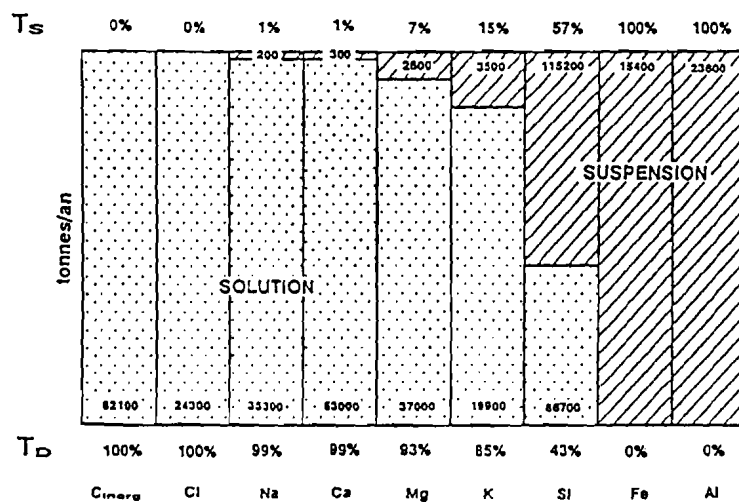


Fig. 4 - Importance relative des exportations de matières dissoutes et particulaires hors du Fouta Djallon.

Toutes formes de transport confondues, l'ordre d'importance des tonnages d'éléments exportés est le suivant : Si > Cinorg. > Ca > Mg > Na > Cl > Al > K > Fe.

Le flux de carbone organique particulaire est calculé à partir du taux de COP mesuré dans les MES de Kédougou, soit 5,1 % . On obtient alors une exportation annuelle de COP de 24000 t/an, soit un flux spécifique de 0,4 t/km²/an de carbone.

Enfin, la comparaison avec d'autres bassins africains montre que les flux spécifiques dissous et particuliers du Fouta Djalon (respectivement 13 t/km²/an et 8 t/km²/an) sont du même ordre de grandeur que ceux de l'Ouham, dont l'environnement géologique et climatique est semblable (respectivement 13 t/km²/an et 10 t/km²/an) (GAC et PINTA, 1973). Par contre, ces chiffres sont largement inférieurs à la moyenne africaine (respectivement 24 t/km²/an et 17 t/km²/an) (GARRELS et MACKENZIE, 1971).

C - LES GRANDS TYPES D'ALTERATION

1. Les diagrammes d'équilibres et les modèles thermodynamiques

Le type d'altération peut être précisé par une approche thermodynamique qui repose, essentiellement, sur l'hypothèse selon laquelle les eaux qui transitent dans les profils de sols sont en équilibre avec les minéraux qui s'y trouvent. Dans le cas des eaux de sources, de ruisseaux, de rivières et de fleuves, les témoignages de ces équilibres passés entre les solutions et les minéraux silicatés se sont "dissipés" mais on admet en première approximation qu'elles en sont encore le reflet pas trop lointain. En effet, les eaux météoriques modifient rapidement leur composition pour acquérir le faciès du milieu qu'elles traversent ; cet équilibre établi, la composition chimique se modifie plus lentement lors de son passage dans un milieu différent : les réactions qui réajustent l'équilibre se font plus lentement (TARDY et al., 1973; LENOIR, 1978; GAC, 1980). Le modèle thermodynamique utilisé est celui décrit par FRITZ (1975). Les différents diagrammes d'équilibre sont bâtis à partir des constantes d'équilibre (à 25°C et 1 atm) et des réactions d'hydrolyses utilisées par GAC (1980).

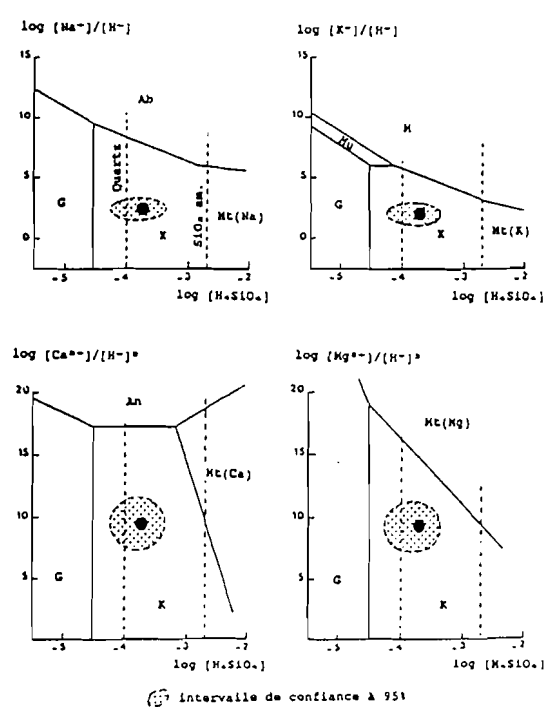


Fig. 5 - Position moyenne des eaux du Fouta Djalon dans les diagrammes de stabilité des minéraux silicatés (Ab : albite; An : anorthite; G : gibbsite; K : kaolinite; M : microcline; Mt(Na/K/Ca/Mg) : montmorillonite; Mu : muscovite).

Les eaux moyennes du Fouta Djallon se situent dans le domaine de stabilité de la kaolinite (Fig.5). Elles sont sursaturées par rapport au quartz et sous-saturées par rapport à la silice amorphe. Ce caractère est mis en évidence par le tracé du cercle de confiance établi à l'aide du test de Student pour un intervalle de confiance de 95 %.

2. Utilisation d'un rapport géochimique

Le type d'altération peut également être précisé par l'utilisation de rapports géochimiques (PEDRO, 1964, 1966, 1979; TARDY, 1969; GAC, 1980; DARMENDRAIL, 1984). Les différents types d'altération régnant sur les bassins versants, qui drainent le Fouta Djallon, ont été déterminés par la méthode TARDY (1969, 1971). Elle consiste à évaluer le rapport moléculaire $RE = SiO_2 / Al_2O_3$ de l'ensemble des minéraux secondaires présents dans les sols (ou résidu d'altération) à partir de la quantité de cations basiques et de silice contenus dans les eaux de lessivage. La valeur du rapport RE permet de préciser le type d'altération dominant. Lorsqu'il est nul, l'aluminium et le fer sont les seuls éléments fixés sous forme d'hydroxydes insolubles : c'est le domaine de l'allitisation (la gibbsite et les différents hydrates d'alumine persistent seuls dans les profils, témoignant du lessivage complet de la silice et des cations basiques dans des proportions relatives identiques à celles des roches-mères). La monosiallisation correspond à un rapport RE égal à 2 : le lessivage des bases est total alors que seule une partie de la silice se retrouve dans la phase soluble, l'aluminium et la silice résiduels s'organisent dans les profils en néoformant des phyllosilicates de type 1/1 comme la kaolinite, mais une telle valeur n'exclut pas la présence d'argiles du type 2/1 et de gibbsite. Lorsque le rapport est nettement supérieur à 2 (domaine de la bisiallisation), les bases et la silice ne sont que partiellement lessivées ; la quantité de silice qui demeure dans les profils est plus importante que n'en nécessite la formation de la kaolinite, conduisant ainsi à la naissance de minéraux argileux 2/1 du type smectite ou vermiculite.

Cette méthode ne fournit que des indications sur la tendance à l'évolution des sols d'altération. En effet, il ne s'agit que d'une simple reconstitution de l'évolution géochimique des sols à partir de collectes d'eaux de surface supposées être le reflet fidèle des eaux de nappe. D'autre part, le rapport RE choisi a été établi pour des substratums de type granito-gneissique ; de ce fait, on néglige le rôle joué par le magnésium plus facilement mobilisable dans les roches basiques.

Pour l'ensemble du Fouta Djallon, la valeur du rapport RE (2,4) indique une tendance générale à la monosiallisation : la kaolinite est le minéral dominant dans les sols. L'influence de la différence entre roches basiques et roches acides sur ce type d'altération est faible ; la kaolinite reste toujours l'argile de néoformation prédominante. GAC (1980) faisait d'ailleurs la même remarque sur l'ensemble des paysages amont du bassin du lac Tchad. Cependant, l'évolution est différente selon les sous-bassins régionaux (Tableau IV). Les eaux de la Falémé et de la Gambie avec un RE légèrement inférieur à 2 témoignent d'une altération à caractère monosiallitique dominant et allitique ménagé. En revanche, pour le Bafing, le Tinkisso et les deux bassins côtiers, les eaux indiquent une monosiallisation avancée avec une tendance à la bisiallisation, ce qui se traduit dans les sols par une prédominance de la kaolinite accompagnée localement de montmorillonite.

La distinction entre sources, ruisseaux-rivières et fleuves (Tableau II) définit un gradient amont-aval de la nature chimique des solutions et met en évidence une évolution du type d'altération entre les points hauts et les points bas du paysage. La valeur du rapport RE croît avec la longueur du cheminement des eaux de surface dans le bassin : sources (1,4), ruisseaux (1,8), rivières (2,4) et fleuves (2,8). Les sols des hauteurs sont à dominante gibbsitique et bauxitique alors que la dynamique de la silice et des cations traduit l'apparition de la kaolinite le long des pentes et l'association kaolinite-montmorillonite dans les bas fonds. On retrouve le schéma classique des successions systématiques des différents types de sols entre l'amont et l'aval des paysages : gibbsite, kaolinite et montmorillonite (TARDY, 1969; PAQUET, 1970; BOCQUIER, 1973; BOULET, 1974; LEVEQUE, 1979; GAC, 1980). Bien sûr, dans le détail, conformément aux

observations de KALOGA (1983) en Haute-Volta. des tendances régionales plus complexes apparaissent (ORANGE et GAC, 1990 b).

Deux enseignements majeurs ressortent de cette reconnaissance géochimique des eaux drainant les versants du Fouta Djallon. Premièrement, les hauteurs du Fouta Djallon évacuent actuellement vers les régions aval, des eaux proches de la neutralité et faiblement minéralisées (moyenne de 35 mg/l) où prédominent les bicarbonates, le calcium et le magnésium. Deuxièmement, la dynamique d'altération dominante dans les sols est de type monosiallitique avec une prédominance très marquée de la kaolinite. Cependant, dans le détail, les eaux drainant le Nord du Fouta Djallon sont fortement bicarbonatées calciques et pauvres en chlorures ; ailleurs, les eaux sont bicarbonatées magnésiennes. D'autre part, la dynamique de la silice et des cations contenus dans les eaux met en évidence une régionalisation des types d'altération.

Le Nord du Fouta Djallon (bassins de la Gambie et de la Falémé) semblent être à caractère bauxitique marqué alors que les bassins côtiers à l'Ouest sont dominés par la bisiallisation et que, à l'Est, sur les bassins du Sénégal et du Tinkisso règne la monosiallisation. Enfin, la distinction entre sources, ruisseaux et fleuves confirme la succession classique des différents types d'altération entre les points hauts et les points bas du paysage : alitisation avec individualisation de gibbsite et formation éventuelle de bauxite sur les hauts reliefs, bisiallisation avec néoformation d'argiles gonflantes dans les bas-fonds et monosiallisation entre ces deux pôles le long des pentes.

III GEODYNAMIQUE ACTUELLE DES PAYSAGES. BILAN DE L'ALTERATION CHIMIQUE ET DE L'EROSION MECANIQUE. APPROFONDISSEMENT DES SOLS

A - L'EROSION ACTUELLE DANS LE FOUTA DJALON

L'érosion mécanique et l'altération chimique s'associent pour évacuer les éléments hors du profil pédologique. Certains éléments sont exportés en solution, d'autres sont temporairement retenus, complètement ou partiellement, dans les minéraux secondaires néoformés ou dans les minéraux résiduels. Au fur et à mesure que l'altération chimique progresse en profondeur, les minéraux résiduels ou secondaires s'accumulent. Ceci correspond à l'approfondissement des profils et s'oppose ainsi à l'ablation mécanique qui tend, en surface, à réduire l'épaisseur des sols. L'importance de ces deux mécanismes concurrentiels est ici déterminée pour l'ensemble du Fouta Djallon.

1. L'impact des poussières atmosphériques

Une partie seulement des transports dissous a pour origine l'altération chimique des roches et des sols. Une part importante de la charge dissoute est liée aux apports atmosphériques, aux pollutions et au CO₂ atmosphérique utilisé lors des processus d'altération et de dissolution des roches (FRITZ, 1975; BOURRIE, 1978; MEYBECK, 1984). D'autre part, l'importance des aérosols détritiques dans cette zone géographique (chapitre III) influence également l'exportation de MES. Mais leur contribution y est difficilement quantifiable. Pour toutes les espèces chimiques, le flux particulaire sortant du Fouta Djallon est inférieur à l'apport atmosphérique particulaire (Fig. 6). Le calcium et le sodium sont les éléments les moins exportés, on retrouve à la sortie seulement 2 % à 3 % de leur masse totale initiale. Par contre, le fer est l'élément le plus restitué (50 %) ; entre ces deux extrêmes, les éléments s'arrangent dans l'ordre croissant suivant : Mg < Si < K < Al.

Le fer est un élément difficilement assimilable par les êtres vivants, contrairement au calcium. On peut donc supposer qu'une grande partie des poussières atmosphériques est reprise par le vent (plus de 50%, correspondant aux 50% manquants du fer) et qu'une autre partie est assimilée par la végétation, et la faune, ou dissous par les eaux, préférentiellement selon les

éléments chimiques. Leur impact sur le bilan d'érosion mécanique à l'échelle du paysage semble donc négligeable.

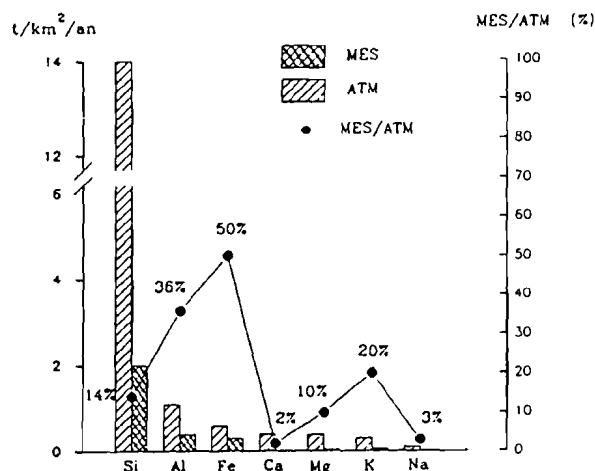


Fig. 6 - Importance relative des apports atmosphériques particuliers sur le Fouta Djallon et des flux de matières en suspension exportés par les fleuves et rivières qui drainent ce massif.

En fait, l'impact le plus important des apports atmosphériques détritiques est le fait des eaux de pluie, dont ils modifient fortement la composition chimique.

2. Bilan des apports atmosphériques dissous et des flux dissous exportés

Le bilan massique des apports atmosphériques dissous et des flux dissous exportés, effectué à partir de la composition chimique des eaux de pluie en milieu guinéen et de la composition chimique moyenne des eaux sortant du Fouta Djallon, permet d'appréhender le bilan "entrée-sortie" sur l'ensemble du Fouta Djallon. Ce bilan est équilibré pour le chlore, ce qui confirme l'origine essentiellement atmosphérique de cet élément. Pour les autres éléments, il est positif à l'exception du bilan du calcium qui est fortement excédentaire (Tableau VI).

Tableau VI

Bilan massique des apports atmosphériques dissous et des flux dissous exportés hors du Fouta Djallon (en 10^3 t/an)

Éléments chimiques	ENTREES E	SORTIES S	BILAN $\delta = E - S$	δ_s (t/km ² /an)	$\ \delta/S \ $ (%)
Cl	24,4	24,3	0	0	0
HCO ₃	391,1	417,2	-26,1	-0,44	6
Ca	154,8	53,0	+101,8	+1,73	-
Mg	8,1	37,0	-28,9	-0,49	78
K	16,3	19,9	-3,6	-0,06	18
Na	24,4	35,3	-10,9	-0,20	31
SiO ₂	57,0	185,4	-128,4	-2,18	69

δ_s : bilan spécifique

Un bilan "entrée-sortie" négatif (<0) correspond à un apport provenant de l'altération chimique de la roche. Ainsi, il apparaît que le calcium est le seul élément stocké (seul bilan positif) à l'échelle du paysage. On peut supposer ici qu'une partie du calcium précipite sous forme de calcite dans le sol, hypothèse déjà envisagée par TARDY (1969) puis LELONG et ROOSE (1986) dans le Nord de la Côte d'Ivoire en milieu guinéen dans des conditions bioclimatiques comparables. La silice constitue 75 % des flux dissous exportés provenant de l'altération. Cependant, le magnésium est l'élément ayant le taux d'apport par l'altération le plus important : 78 % du magnésium exporté hors du paysage viendrait de l'altération (Tableau VI). Enfin, l'altération chimique actuelle sur l'ensemble du Fouta Djallon apporte surtout aux eaux de surface de la silice et du magnésium.

Bien que les eaux de la Gambie et de la Falémé semblent influencées par la dissolution de bancs carbonatés à l'intérieur d'une matrice générale gréseuse, l'altération chimique qui affecte le Fouta Djallon, est assimilée en première approximation à une hydrolyse simple des minéraux qui composent les roches cristallines. Cette hypothèse permet de ne considérer que la somme des cations et de la silice pour le bilan du soutirage chimique (GAC, 1980; MEYBECK, 1984). Pour la période 1979-1986, l'altération chimique sur l'ensemble du Fouta Djallon est de 2,9 t/km²/an, ce qui est du même ordre de grandeur que les valeurs mesurées directement sur des toposéquences en milieu guinéen par LELONG et ROOSE (1986). Par contre, elle est largement inférieure au résultat donné par GAC et PINTA (1973) en Centrafrique sur l'Ouham (7,5 t/km²/an) du fait, à notre avis, de la non prise en compte des apports atmosphériques, les auteurs n'ayant retranché que les ions bicarbonates au flux total exporté par la rivière.

3. Erosion des sols et vitesse d'approfondissement des profils

Sur l'ensemble du Fouta Djallon, le principal produit de l'altération est la kaolinite. L'importance relative des deux mécanismes concurrentiels d'érosions des sols et d'approfondissement des profils peut être appréciée par le calcul du bilan d'altération de la kaolinite selon la méthode décrite par GAC et PINTA (1973).

L'érosion mécanique spécifique a été fixée à 8 t/km²/an. En admettant une densité moyenne de 2,0 pour les sols, les processus actuels d'érosion sur l'ensemble du Fouta Djallon se traduiraient par une ablation mécanique des sols de 4 mm/1000 ans en moyenne. On sait par ailleurs que 36 % des MES sont formés de kaolinite, ce qui représente une exportation hors du paysage de 170000 t de kaolinite (soit 2,9 t/km²/an). Il s'agit maintenant de déterminer dans quelle mesure l'altération chimique est susceptible de compenser chaque année la perte en kaolinite résultant de l'ablation mécanique.

A partir de la composition chimique moyenne des roches du Fouta Djallon (chapitre II) et en prenant une densité moyenne de 2,65, on établit que 1 m³ de roche contient 1500 kg de quartz, 530 kg de silice combinée et 240 kg d'Al₂O₃. Il faut évacuer 250 kg de silice pour que tout l'alumine soit associée à la silice restante pour former de la kaolinite, dont le poids est alors de 600 kg.

Le taux moyen de dissolution du quartz généralement admis est de 15 % (LELONG, 1967; TARDY, 1969; GAC et PINTA, 1973; GAC, 1980; PROBST, 1983; NKOUNKOU et PROBST, 1987). Dans le Fouta Djallon, la silice totale évacuée par m³ de roche s'élève alors à 475 kg, dont 225 kg proviennent de la dissolution du quartz. Le soutirage chimique en silice qui correspond à la kaolinisation de la roche représente donc 53% du tonnage annuel de silice en solution, soit 68000 t (Tableau VI). Il lui correspond une progression de l'altération d'une épaisseur de 4,6.10⁻⁶ m/an et la formation de 2,8 t/km²/an de kaolinite. Le bilan de la kaolinite s'équilibre donc, puisque l'érosion mécanique enlève 2,9 t/km²/an de kaolinite. Cependant, la tendance apparaît légèrement favorable à l'approfondissement des sols (Fig. 7).

Il s'agit là de résultats obtenus à partir de valeurs moyennes. Il est bien évident que localement les sols sont susceptibles de s'approfondir ou de se tronquer. En effet, ces chiffres ne sont que des indicateurs de tendance. Le déséquilibre enregistré ici ne semble pas significatif à

l'échelle du paysage et nous rejoindrons les conclusions de LELONG et ROOSE (1986) faites sur le Nord de la Côte d'Ivoire dans un climax comparable. Dans les conditions actuelles, le Fouta Djalon est en *équilibre géochimique*.

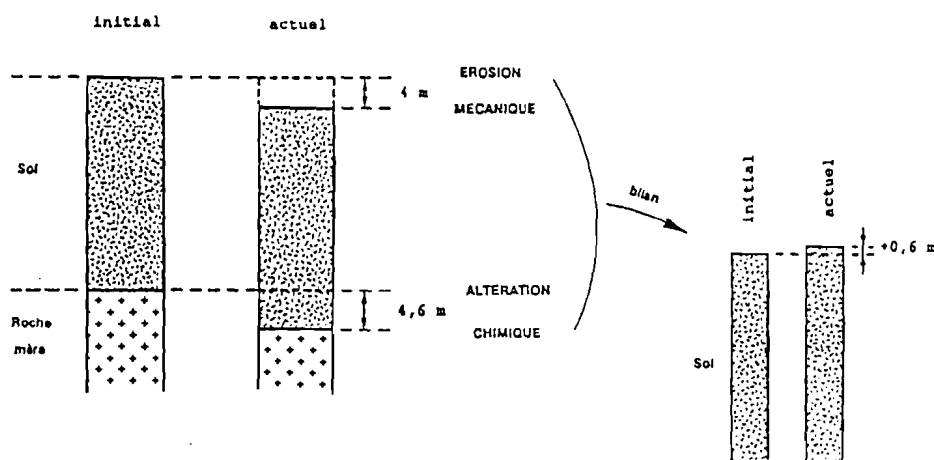


Fig. 7 - Bilan actuel de l'altération chimique et de l'érosion mécanique sur l'ensemble du Fouta Djalon (tous les millions d'années).

B - CONTRIBUTIONS RESPECTIVES DES DIFFERENTES FORMATIONS LITHOLOGIQUES A LA DYNAMIQUE ACTUELLE DU FOUTA DJALON

La composition chimique des eaux du Fouta Djalon résulte en fait du mélange d'eaux drainant cinq formations lithologiques principales. Les apports en solution de chaque formation lithologique peuvent être calculés à partir des compositions chimiques moyennes des eaux drainant chaque type de roche et des débits spécifiques des régions correspondantes (NKOUNKOU et PROBST, 1987; ETCHANCHU, 1988).

Sur l'ensemble du Fouta Djalon, il existe une relation linéaire hautement significative entre la lame d'eau écoulée et la lame d'eau précipitée (Fig.8). Ainsi, les débits spécifiques moyens pour chaque formation lithologique sont déterminés en admettant que les débits suivent la même répartition que les précipitations (SUTCLIFFE et PIPER, 1986) : 56 % des eaux de surface sortant annuellement du Fouta Djalon drainent les formations gréseuses, 18 % les dolérites, 17 % les granites, 7 % les grès quartzitiques à bancs carbonatés et seulement 2 % les schistes (Tableau VII, Fig. 8).

Tableau VII

Contributions respectives des différentes formations lithologiques à l'écoulement de surface du Fouta Djalon

Form. lithologiques	S (km ²)	% S	% V	Q (m ³ /s)	Q _s (l/s/km ²)
Granites	14000	24	17	115	8,2
Grès	20100	34	56	394	19,6
Schistes	2300	4	2	11	5,0
Grès quartz.	8200	14	7	52	6,3
Dolérites	14400	24	18	127	8,8

S : superficie ; V : volume d'eau ; Q : débit ; Q_s : débit spécifique

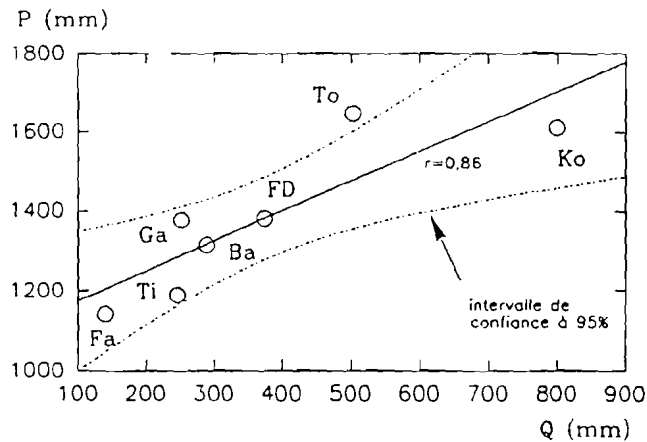


Fig. 7 - Relation entre la lame d'eau écoulee (Q en mm) et la lame d'eau précipitée (P en mm) sur l'ensemble du Fouta Djallon

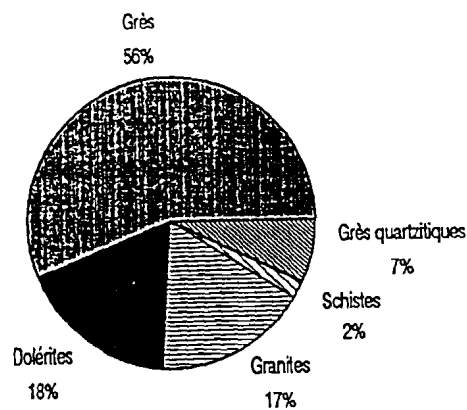


Fig. 8 - Apports des différentes formations lithologiques à l'écoulement de surface du Fouta Djallon.

La composition chimique moyenne des eaux drainant chaque type de roche est plus délicate à déterminer. Il s'agit de trouver des prélèvements sur des bassins homogènes situés suffisamment à l'amont pour ne pas être influencés par des dissolutions provenant d'autres formations lithologiques : 45 analyses ont été sélectionnées. La composition chimique pour chaque formation lithologique a été calculée par le procédé utilisé pour établir les moyennes par bassin versant.

Bien sûr, ces moyennes doivent être corrigées des apports atmosphériques. En effet, il est apparu dans le paragraphe précédent que la composition chimique des apports atmosphériques dissous était d'une importance capitale pour pouvoir estimer l'altération à partir de ces eaux de surface extrêmement diluées. Or les différents prélèvements choisis n'ont pas été influencés de la même façon par les apports atmosphériques dissous du fait de leur provenances diverses. Certains sont issus du centre du Fouta Djallon en milieu guinéen, d'autres du Nord du massif en milieu soudanien. Ainsi, une composition moyenne des eaux de pluie est calculée à partir de la composition chimique des pluies de ces deux zones climatiques afin que tout le chlore contenu dans les eaux de surface soit entièrement attribué aux apports atmosphériques. Cette correction est applicable à tous les ensembles lithologiques à l'exception des schistes où un résidu de chlore subsiste dans les

eaux issues de cet ensemble (Tableau VIII), ce résidu représente 0,08% des flux dissous provenant uniquement de l'altération, ce qui est négligeable. D'autre part, seuls les granites et les grès montrent un bilan négatif pour le calcium.

Tableau VIII

Compositions chimiques moyennes (mg/l) des eaux d'altération drainant les principaux types de roches du Fouta Djallon (après corrections des apports atmosphériques)

Lithologie	n	Cl	HCO ₃	Ca	Mg	K	Na	SiO ₂
Granites	15	0	6,7	0	0,8	0,2	1,3	7,1
Grès	13	0	1,9	0	0,5	0,1	0,2	5,4
Schistes	1	0,5	13,7	1,3	0,7	0,8	4,8	7,3
Grès quartz.	3	0	22,6	3,6	1,8	0,3	1,0	19,8
Dolérites	13	0	13,9	0,9	1,8	0,4	0,9	10,2

n : nombre d'échantillons.

Le calcul du bilan de l'altération par ensemble lithologique donne un bilan légèrement supérieur à celui déterminé globalement sur l'ensemble du Fouta Djallon (Tableau IX). La part respective de chaque élément dans le bilan de l'altération est sensiblement la même à l'exception du magnésium et du calcium. Le magnésium ne représente plus que 9 % du flux dissous provenant de l'altération (au lieu de 17 %) et, au contraire, le calcium représente 5 % de ce flux alors qu'il est stocké à l'échelle du paysage.

Tableau IX

Comparaison des deux méthodes de calcul des flux dissous provenant de l'altération

Méthodes	Ca	Mg	K	Na	SiO ₂	Σ(dissous)	E _C (t/km ² /an)
Lithologie en 10 ³ t	9,7	19,5	4,4	13,0	168,2	215	3,6
en %	5	9	2	6	78	28	
Globale en 10 ³ t	<0	28,9	3,6	10,9	128,4	171	2,9
en %	-	17	2	6	75	22	

Finalement, 20% à 30% des flux dissous exportés hors du Fouta Djallon proviennent de l'altération de son substratum rocheux et de sa couverture pédologique. Les grès représentent 36% de ce flux, ensuite viennent par ordre décroissant les dolérites, les grès quartzitiques, les

granites et. enfin, loin derrière du fait de leur faible superficie, les schistes (Tableau X et Fig. 9).

Tableau X

Altération des principaux types de roches du Fouta Djalou exprimée en % de l'altération totale

Form. lithologiques	Ca	Mg	K	Na	SiO ₂	Σ(dissous)	E _C (t/km ² /an)
Granites	0	16	18	35	15	16	2,4
Grès	0	32	25	19	40	36	3,8
Schistes	5	1	6	5	2	2	1,9
Grès quartz.	60	15	11	13	19	20	5,3
Dolérites	35	36	40	28	24	26	4,0

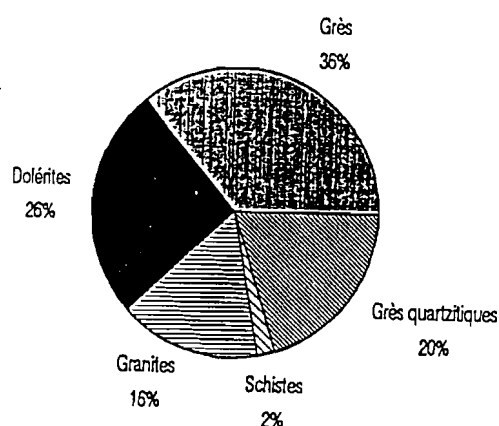


Fig. 9 - Origine de la charge dissoute due à l'altération chimique dans les eaux drainant le Fouta Djalou.

L'importance relative de l'ablation des sols et de l'approfondissement des profils est appréciée par classe lithologique en utilisant la méthode de calcul précédemment décrite. Les grès, les grès quartzitiques et, dans une moindre mesure, les dolérites sont les formations lithologiques du Fouta Djalou formant actuellement des sols, les granites semblent en semi-équilibre géochimique avec cependant une légère tendance vers l'ablation des sols alors que les schistes sont complètement dénudés (Tableau XI et Fig. 10).

Tableau XI

Importance relative de l'ablation et de l'approfondissement des sols par classe lithologique sur l'ensemble du Fouta Djalou

Formations lithologiques	SiO ₂ dissoute exportée tonnes/an	Approfond. μm/an (1)	Kaolinite formée t/km ² /an	Ablation μm/an (2)	BILAN μm/an (1)-(2)
Granites	25 700	3,0	3,2	4	-1
Grès	66 600	12,8	2,4	4	+9
Schistes	2 600	1,1	1,1	4	-3
Grès quartz.	32 200	11,2	0,1	4	+7
Dolérites	41 100	5,7	5,7	4	+2

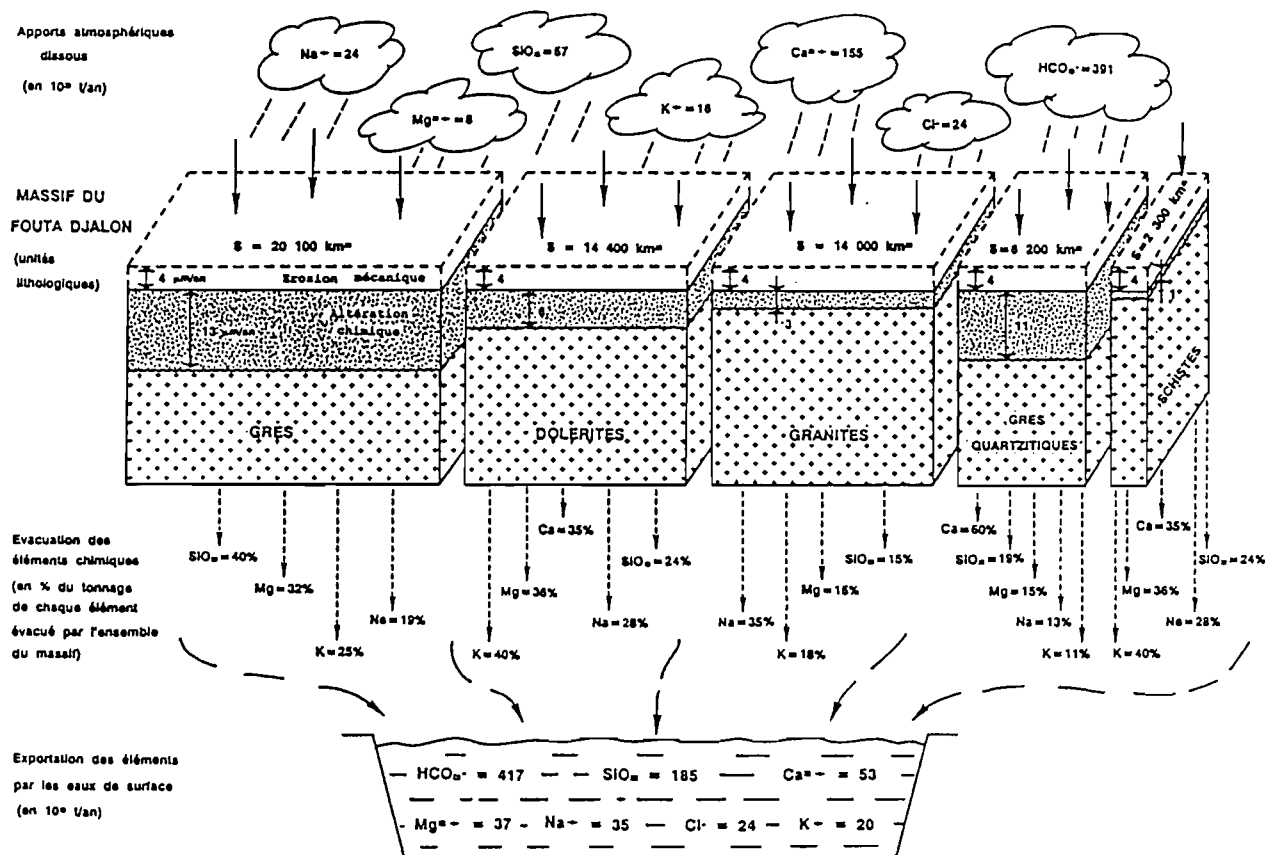


Fig. 10 - Bilan géochimique du Fouta Djallon (ORANGE, 1990)

Les eaux du Fouta Djallon, faiblement minéralisées (35 mg/l), sont bicarbonatées calcocalciques et siliceuses. Les bicarbonates assurent à eux seuls l'équilibre anions-cations et la silice constitue 33% de la charge dissoute. La dynamique globale actuelle d'altération est de type monosiallitique. Cependant, des tendances régionales apparaissent en fonction de la lithologie et des situations topographiques. La caractéristique essentielle des flux de matières est la faible importance du transport particulaire (21 mg/l). Toutes formes d'exportation confondues, le flux relatif pondéral des éléments majeurs est le suivant : Si>Cinorg.>Ca>Mg>Na>Cl>Al>K>Fe. Les cations basiques sont presque entièrement évacués en solution, la silice se partage équitablement entre les deux formes de transport, et l'aluminium et le fer accompagnent exclusivement la phase en suspension. La fraction dissoute représente 62% des exportations, la fraction minérale particulaire 36% et le carbone organique particulaire 2%.

L'influence des apports atmosphériques particuliers sur la qualité chimique des eaux de pluie fait que les apports atmosphériques dissous sont loin d'être négligeables dans le calcul du bilan de l'altération de ces paysages, où l'érosion mécanique et l'altération chimique sont très faibles. L'apport majeur de poussières atmosphériques, souvent négligé dans les bilans géochimiques, apporte ici un éclairage nouveau sur la dynamique d'altération de ces régions tropicales.

Ainsi, après correction des apports atmosphériques, l'altération chimique et l'érosion mécanique sont estimés respectivement à 3 t/km²/an et 8 t/km²/an. Sur les 772000 t/an exportées en solution par les eaux de surface du Fouta Djallon, de 20% à 30% seulement proviennent de l'altération du substratum rocheux et de sa couverture pédologique. Ces chiffres soulignent la faiblesse de l'altération chimique sévissant actuellement dans ces paysages guinéens souvent cuirassés. Du fait de leur drainage beaucoup plus élevé, les grès tendres de la partie ouest du Fouta Djallon contribuent le plus à l'exportation des éléments dissous, leur profil d'altération s'enfonce de 13 mm/1000 ans.

Globalement, le Fouta Djallon est en régime stationnaire, ou encore en *équilibre géochimique* : l'approfondissement des profils d'altération est légèrement supérieur à l'ablation des sols, respectivement 4,6 mm/1000 ans et 4 mm/1000 ans. Enfin, le calcium semble stocké dans le paysage, apparemment au niveau des grès et granites.

IV QUALITE CHIMIQUE DES EAUX DU FLEUVE SENEGAL A L'EXUTOIRE AMONT DE BAKEL. COMPARAISON AVEC LA FALEME, LA GAMBIE ET LE NIGER

A - COMPOSITION CHIMIQUE MOYENNE DES EAUX DES FLEUVES

1. Les eaux du Sénégal à Bakel

La moyenne arithmétique des 229 analyses effectuées permet de classer les eaux du fleuve Sénégal à Bakel dans la catégorie des eaux bicarbonatées magnésiennes et calciques. Les bicarbonates et la somme Mg-Ca représentent respectivement 88 % de la somme des anions Σ^- et 73 % de la somme des cations Σ^+ , soit à tous les trois 72 % de la charge pondérale totale dissoute. La silice dissoute est également bien représentée, elle constitue 14 % de la charge pondérale totale dissoute. Les variations de composition peuvent être importantes (Tableau XII). La minéralisation totale fluctue dans un rapport de 4, entre 29 mg/l et 133 mg/l ; le sulfate a le coefficient de variation le plus important (160 %), ensuite dans l'ordre décroissant on trouve le chlorure (80 %), le potassium (64 %), le magnésium (57 %), le sodium (56 %), le bicarbonate (47 %), le calcium (42 %) et la silice (33 %). La forte variabilité des teneurs en sulfates et chlorures est caractéristique d'un apport exclusivement atmosphérique.

2. Les eaux de la Falémé à Kidira

La moyenne arithmétique des 122 analyses effectuées montre que les eaux de la Falémé à Kidira sont bicarbonatées sodiques (Tableau XII). Le sodium est l'élément le plus fluctuant devant les bicarbonates et les chlorures, leurs concentrations variant d'un facteur 300 à 800. Ceci est dû au fait que certains prélèvements ont été effectués en saison sèche alors que l'écoulement était nul. Or à cet endroit, toute la ville utilise les eaux du fleuve pour les besoins domestiques ; les fortes concentrations enregistrées dénotent en effet une pollution anthropique importante. Ces prélèvements ne sont pas pris en compte par la suite. La minéralisation totale fluctue donc dans des proportions importantes, de 32 mg/l à 800 mg/l. Cette borne supérieure n'a aucune signification pour les raisons évoquées ci-dessus. La borne inférieure est supérieure à celle enregistrée à Bakel sur le Sénégal (29 mg/l).

3. Les eaux de la Gambie à Kédougou

Les différentes analyses effectuées montrent peu de variation de la qualité chimique des eaux de la Gambie à Kédougou, ceci est probablement dû au fait qu'il n'y a qu'un seul prélèvement effectué en saison sèche. La moyenne arithmétique classe ces eaux dans la catégorie des eaux bicarbonatées calciques (Tableau XII). Les bicarbonates représentent 95 % de la somme des anions et le calcium 47 % de la somme des cations. On note l'absence de sulfate et la relative importance

de la silice dissoute qui représente 28 % de la charge pondérale totale dissoute. La minéralisation totale fluctue entre 32 mg/l et 51 mg/l, la borne inférieure est encore du même ordre de grandeur que celle des deux autres fleuves étudiés. Les ions bicarbonates sont, en toutes saisons, les formes anioniques dominantes en contribuant pour près de 50 % à la minéralisation totale des solutions. La faible variabilité des teneurs en chlorures indique que les eaux du bassin sont très peu affectées par l'influence océanique. Les concentrations en silice varient très peu autour d'une teneur moyenne de 10,8 mg/l. Le potassium est le cation le moins abondant (GAC et al., 1987a; ORANGE et GAC, 1990b).

Tableau XII

Moyenne arithmétique des analyses chimiques effectuées sur les eaux du Sénégal à Bakel, de la Faiémé à Kidira, de la Gambie à Kédougou, du Tinkisso à Dabola, du Milo à Kankan et du Niger à Siguiri

Variables de qualité	SENEGAL n=229		FALEME n=122		GAMBIE n=85		TINKISSO n=21		MILO n=22		NIGER n=21		
	Moy.	STD _M	Moy.	STD _M	Moy.	STD _M	Moy.	STD _M	Moy.	STD _M	Moy.	STD _M	
(1) Cl ⁻	64	3	316	87	17	1	14	2	25	2	22	2	
	SO ₄ ²⁻	17	2	27	5	0	0	0	0	0	6	2	
	HCO ₃ ⁻	576	18	1015	105	332	5	462	17	300	14	294	13
	Σ ⁻	657	—	1358	—	349	—	476	—	325	—	322	—
(1) Ca ²⁺	238	7	399	22	167	3	115	2	103	6	96	4	
	Mg ²⁺	241	9	394	40	109	2	225	11	76	3	107	4
	K ⁺	61	3	108	15	24	1	25	1	35	3	36	3
	Na ⁺	120	4	477	109	53	1	126	5	117	5	98	6
	Σ ⁺	660	—	1378	—	353	—	491	—	331	—	337	—
(2) SiO ₂	8,6	0,2	8,7	0,3	10,8	0,1	13,6	0,4	13,8	0,4	11,1	0,6	
	TDS	59,7	1,6	111,1	12,6	38,5	0,4	51,2	1,6	30,1	1,5	37,0	1,6
EC (μS)	64	2	132	16	35	0	44	1	32	1	33	1	
pH _{labo}	7,4	0	7,6	0	7,3	0	7,6	0	7,3	0	7,2	0	

(1) en μeq/l; (2) en mg/l; STD_M : déviation standard sur la moyenne ; EC : conductivité en μS/cm à 20°C

4. Les eaux du Tinkisso à Dabola, du Milo à Kankan et du Niger à Siguiri

Les eaux du Tinkisso à Dabola sont bicarbonatées magnésiennes alors que celles du Milo à Kankan et du Niger à Siguiri sont bicarbonatées calco-sodiques (Tableau XII). Ces trois cours d'eau ont été échantillonnés aux mêmes dates, entre juin et novembre 1987 : leur charge dissoute totale fluctue dans les mêmes proportions, de 30 à 60 mg/l. La teneur en silice dissoute y est plus importante que les eaux des trois fleuves précédents.

B - ANALYSE FACTORIELLE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

Le traitement statistique des analyses chimiques (données multivariées) par analyse factorielle permet de visualiser les principales associations entre les espèces chimiques (variables de qualité) des eaux et, ainsi, d'appréhender les principaux facteurs qui contrôlent la chimie des eaux (DOMERGUE, 1980; SABATON, 1983; KATTAN, 1989).

1. Les eaux du Sénégal à Bakel

La figure 11 présente les différents paramètres géochimiques testés sur les trois principaux plans factoriels : F1-F2, F2-F3 et F1-F3. Les trois premiers facteurs expliquent 80 % de la variance totale. Le facteur F1 représente 51 % de la variance totale ; il met en évidence l'influence primordiale du débit sur les concentrations en éléments dissous. Il matérialise la dilution des eaux de nappe, par les eaux de surface lors des périodes de crue. Plusieurs groupes d'éléments s'individualisent. Bicarbonates, magnésium, calcium, sodium (et donc la charge totale dissoute TDS et la conductivité EC) sont les plus influencés par le débit ; ces quatre espèces chimiques sont celles qui mesurent le mieux l'altération des roches du bassin versant par les eaux d'infiltration, bien que le sodium semble légèrement lié aux chlorures et sulfates, tous deux provenant de l'atmosphère. A l'opposé, les teneurs en matières en suspension (MES) ne sont pas influencées par le débit ; le potassium, situé entre ces deux pôles, a donc des origines diverses.

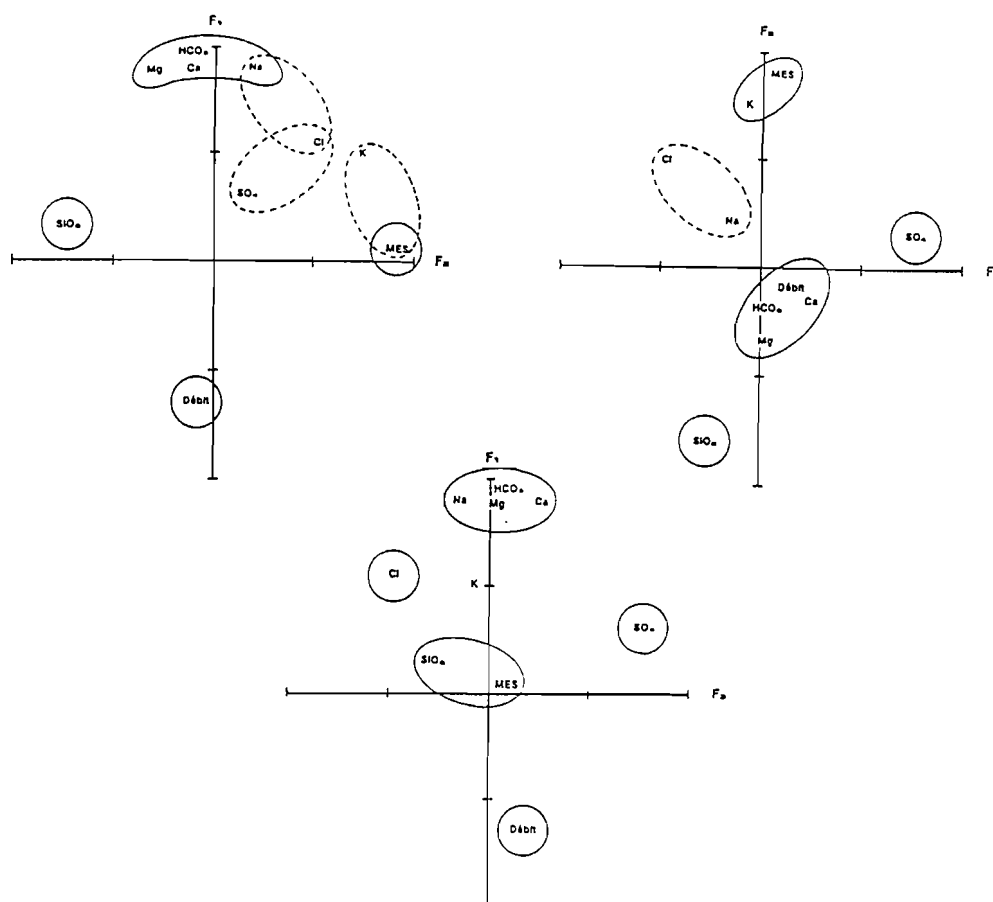


Fig 11 - Analyse en composantes principales des eaux du Sénégal à Bakel de 1979 à 1988 (n=229).

Enfin, la silice est également indépendante du débit mais corrélée négativement aux MES. Le facteur F2 représente 20 % de la variance totale. Il matérialise l'opposition très nette SiO₂-MES et l'association MES-K ; ce facteur souligne la faible importance du débit sur ces trois éléments. Le facteur F3 ne représente que 9 % de la variance totale ; il montre le comportement isolé des sulfates et l'opposition SO₄-Cl. Finalement, ce facteur met en évidence les différentes provenances des éléments chimiques des eaux : sulfates provenant exclusivement de pollutions domestiques ponctuelles, chlorures provenant en partie d'apports atmosphériques et les autres variables de qualité testées provenant de l'érosion et de l'altération du substratum rocheux.

La séparation de l'année hydrologique en trois périodes : *montée des eaux* (juillet-août), *descente des eaux* (septembre-novembre) et *basses-eaux* en saison sèche (décembre-juin) permet de moduler les comportements des différentes espèces chimiques et des MES selon le débit du fleuve puisqu'il est apparu comme le facteur déterminant des concentrations dans les eaux. Le débit contribue à 83 % de la variance totale en début de crue, à 68 % en fin de crue et à 80% en période de *basses-eaux*. Les chlorures et sulfates ne sont associés qu'en début de crue, le reste de l'année les sulfates ont un comportement indépendant du débit. Bicarbonates, magnésium et calcium évoluent toujours ensemble en sens inverse du débit, le sodium y est associé en début de crue alors qu'il est associé aux chlorures en fin de crue. La silice est toujours opposée aux MES, surtout en début de crue. Enfin, les MES sont indépendantes du débit en début de crue puis ces deux facteurs sont parfaitement liés en fin de crue et *basses-eaux*.

Finalement, cette étude permet de mettre en évidence l'origine des éléments chimiques transportés par les eaux de surface et de schématiser leur comportement. Les sulfates proviennent de pollutions domestiques ponctuelles ; les chlorures sont d'origine atmosphérique ; et le cortège HCO₃-Mg-Ca-Na, les MES, le K et la SiO₂ proviennent de l'érosion et de l'altération du bassin. Dans ce dernier ensemble, on note que :

- le cortège HCO₃-Mg-Ca-Na est dilué par le débit ;
- les MES sont indépendantes du débit en début de crue, puis diluées par celui-ci ;
- le K a un comportement intermédiaire entre celui des MES et celui des autres espèces dissoutes du cortège HCO₃-Mg-Ca-Na ;
- la silice dissoute, indépendante du débit, semble inversement liée aux MES, ce qui peut justifier une origine biogéochimique.

2. Les eaux de la Falémé à Kidira

Les trois premiers facteurs expliquent 82 % de la variance totale selon la répartition suivante : 62 % pour F1, 12 % pour F2 et 8 % pour F3. Comme pour les eaux du Sénégal à Bakel, quatre pôles se distinguent : le débit, les MES, la silice et l'ensemble des autres espèces dissoutes à l'exception des sulfates qui ont encore un comportement distinct dû à leur apport par des pollutions domestiques. Cependant, l'effet de dilution par le débit est nettement moins prononcé et il influence surtout l'ensemble des espèces dissoutes. Le facteur F2 représente encore l'opposition SiO₂-MES, il met également en évidence l'association due aux apports atmosphériques Na-Cl-SO₄. Enfin, le facteur F3 confirme le comportement distinct vis-à-vis du débit, des MES et de la silice par rapport aux autres espèces dissoutes (y compris le potassium). La distinction entre les différentes périodes hydrologiques ne met pas en évidence de comportements différents.

3. Les eaux de la Gambie à Kédougou

Les trois premiers facteurs n'expliquent que 75 % de la variance totale, ceci est dû à la faible contribution du débit dans l'évolution des concentrations des différentes variables de qualité des eaux : le premier facteur ne représente que 39 % de la variance totale. Le facteur F2 (20 % de la variance totale) correspond encore à l'opposition SiO₂-MES alors que le facteur F3 met en évidence une opposition silice-chlorures. Dans ces eaux de la Gambie, le potassium est toujours associé aux chlorures, les MES aux débits et il faut noter le comportement singulier du sodium qui semble lié à la silice. Il apparaît donc ici un comportement différent des variables de qualité de ces

eaux du domaine soudano-guinéen par rapport à celui des variables de qualité des eaux du domaine sahélien. Les variations sont moins nettes, le système évolue plus lentement d'où des oppositions plus floues dans le comportement des différentes variables de qualité et d'où l'association remarquable des MES avec le débit. La séparation de la crue en deux périodes : *montée des eaux* et *descente des eaux* montre que l'association Cl-Na-K est plus forte en début de crue et met également en évidence l'importance en début de crue de la silice dissoute sur la charge totale. Durant cette période, l'association HCO₃-Ca-Mg est moins forte.

C - ETUDE DES CORRELATIONS INTER-ELEMENTS DES EAUX DU NIGER

Sur le Niger à Siguiri, le débit a une forte influence négative sur les teneurs des différentes espèces dissoutes et, dans une moindre mesure, sur les MES. Sur l'ensemble du bassin amont du Niger, la silice est bien corrélée au sodium. Les chlorures ne montrent aucune corrélation significative.

D - UTILISATION DU DIAGRAMME DE PIPER

Les moyennes arithmétiques sont reportées sur un diagramme de Piper afin de voir dans quelle domaine géochimique se situent ces eaux (Fig. 12). Les eaux des six cours d'eau étudiés sont en équilibre entre les trois pôles, calcique, magnésien et sodi-potassique. La Gambie serait plutôt à tendance calcique, le Tinkisso à tendance magnésienne et le Milo à tendance sodi-potassique.

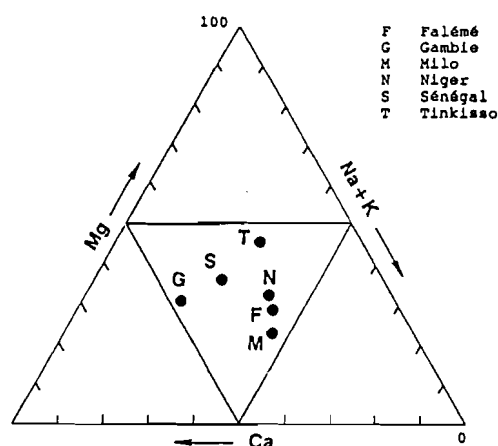


Fig. 12 - Diagramme de Piper sur les eaux du Sénégal, de la Falémé, de la Gambie, du Tinkisso, du Milo et du Niger

E - EVOLUTION DES CONCENTRATIONS AU COURS DE LA CRUE ET ORIGINE DES ELEMENTS DISSOUS

1. Variations des concentrations au cours de l'année

Les neuf années de suivi de la chimie des eaux du fleuve Sénégal montrent que l'évolution journalière des concentrations en éléments dissous est progressive au cours de l'année, à l'exception des sulfates et des chlorures qui proviennent de pollutions domestiques et atmosphériques. La figure 13 représente l'évolution journalière des différentes espèces dissoutes. Les bicarbonates, le magnésium, le calcium, le sodium et la charge dissoute totale TDS ont des comportements analogues : il y a augmentation régulière des concentrations jusqu'à l'arrivée de l'onde de crue qui a pour effet de diluer les eaux. Le potassium est un élément ayant une

concentration relativement constante et les quelques variations enregistrées sont corrélées à celles de la silice. Pour ces deux espèces chimiques, l'arrivée de l'onde de crue se traduit par une augmentation de la concentration puis celle-ci chute à son minimum au milieu de la période des *hautes-eaux*. Enfin, les évolutions en dents-de-scie des chlorures et sulfates confirment leur apport uniquement par voie atmosphérique ou domestique. Ainsi, les fluctuations saisonnières des concentrations sont dues principalement aux variations des débits et dans une moindre mesure aux processus biogéochimiques internes au cours d'eau, qui suivent des cycles saisonniers superposables aux cycles hydrologiques.

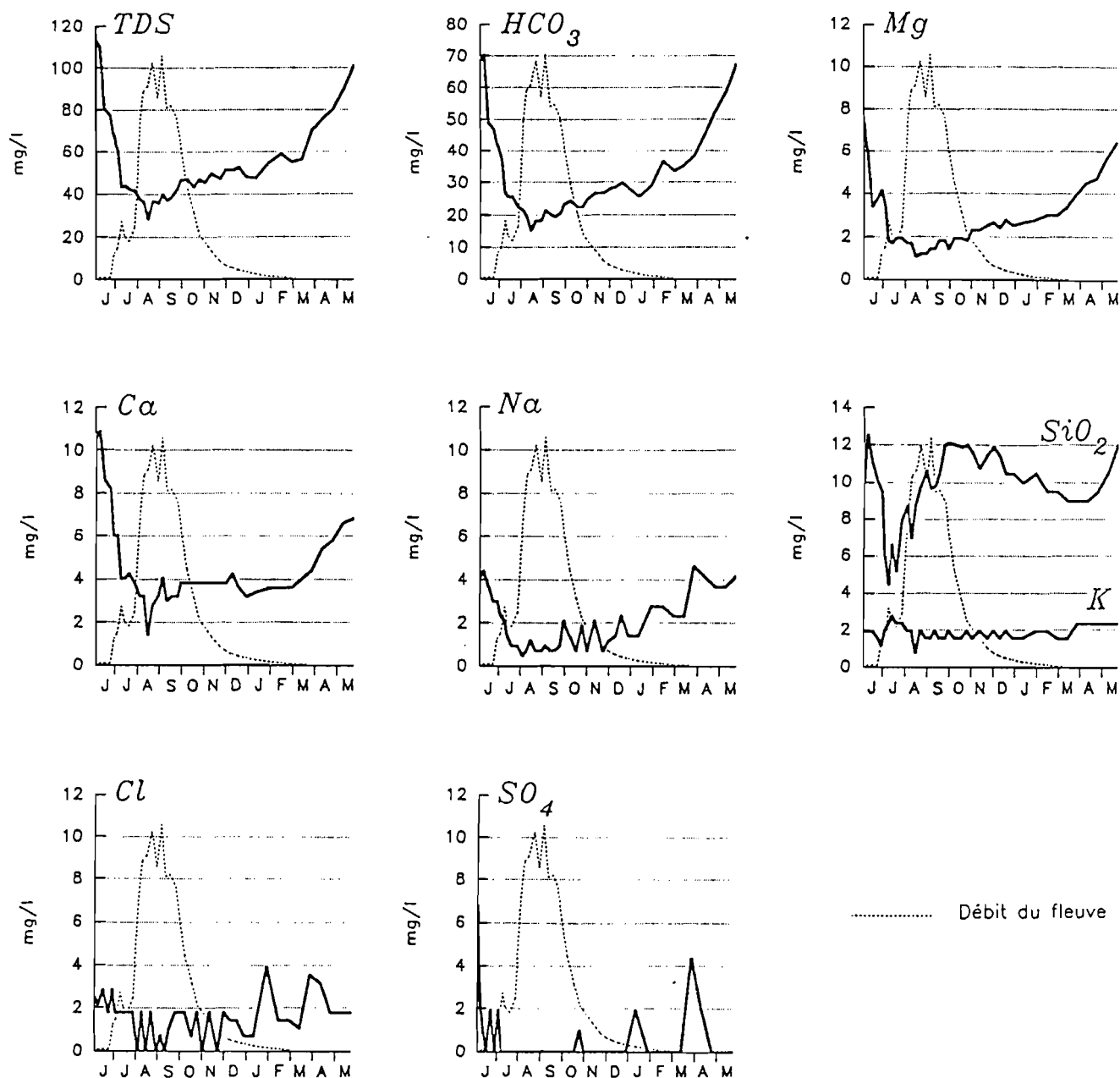


Fig. 13 - Variation annuelle des concentrations journalières des espèces dissoutes du fleuve Sénégal à Bakel

La faible variabilité des concentrations pour la plupart des espèces chimiques autorise à calculer les flux de matières par une méthode stochastique, à la seule condition de faire des prélèvements hebdomadaires en début de crue, un prélèvement mensuel étant suffisant pour les autres mois de l'année.

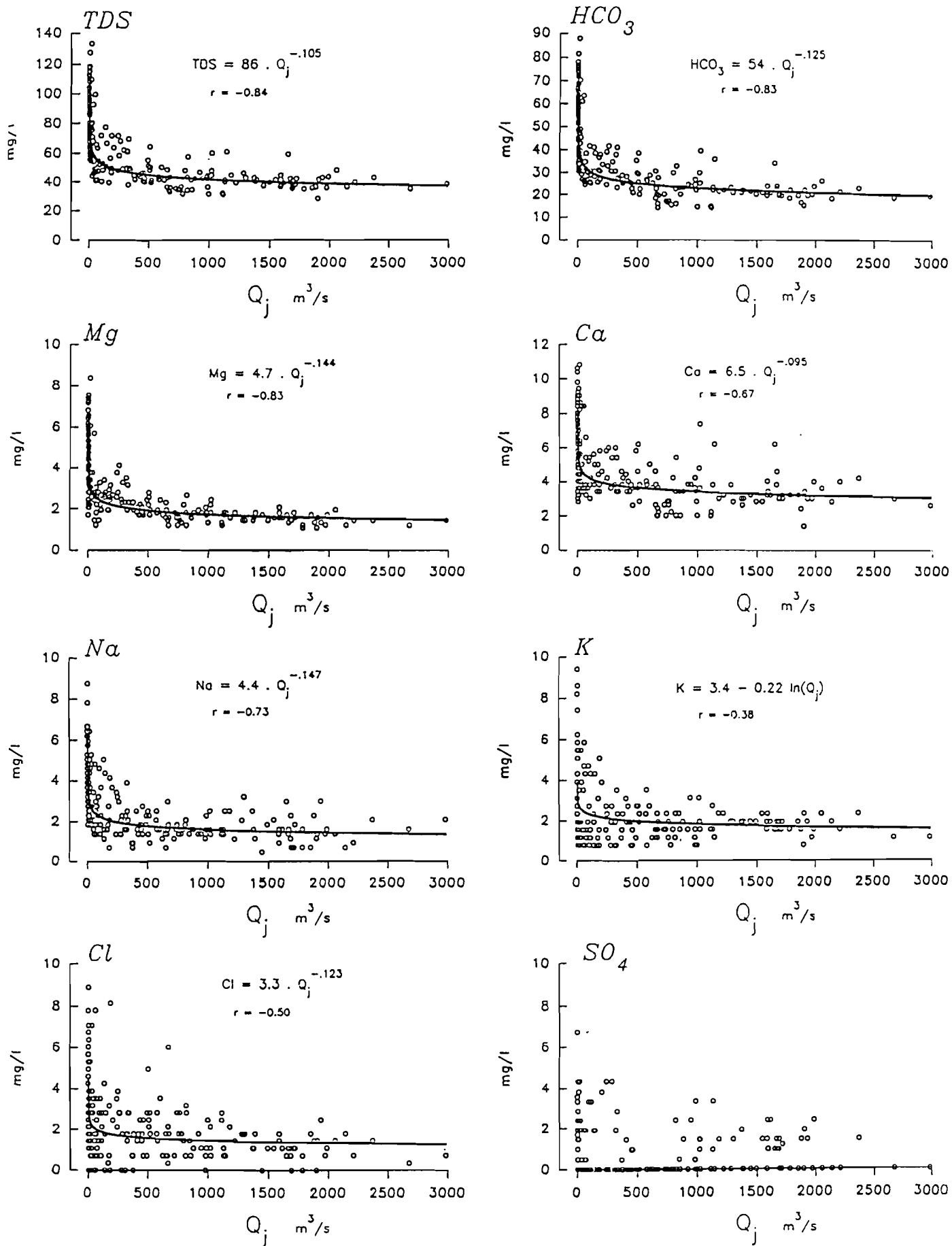


Fig. 14 - Relations débit-concentration des différentes espèces chimiques dissoutes des eaux du fleuve Sénégal à Bakel.

2. Les relations débit-concentration des éléments dissous

A l'exception des sulfates, du potassium et de la silice, la meilleure corrélation existe entre le log de la concentration et le log du débit, ce qui signifie que la concentration est toujours une fonction puissance du débit (Tableau XIII).

Tableau XIII

Relations débit-concentration des variables de qualité des eaux du Sénégal à Bakel

Variabes	Relations	r	p	n
TDS	$C = 86,38 \cdot Q^{-0,105}$	-0,84	0,01 %	221
HCO ₃	$C = 54,11 \cdot Q^{-0,125}$	-0,83	0,01 %	221
Mg	$C = 4,68 \cdot Q^{-0,144}$	-0,83	0,01 %	221
Na	$C = 4,43 \cdot Q^{-0,147}$	-0,73	0,01 %	221
Ca	$C = 6,53 \cdot Q^{-0,095}$	-0,67	0,01 %	221
Cl	$C = 3,35 \cdot Q^{-0,123}$	-0,50	0,01 %	221
MES	$C = 27,8 \cdot Q^{0,276}$	0,46	0,01 %	221
K	$C = 3,36 - 0,22 \text{ Log} Q$	-0,38	0,01 %	221
SO ₄	$C = 2,73 - 0,14 \text{ Log} Q$	-0,36	0,1 %	80
SiO ₂	-	0,24	0,04 %	221

C en mg/l ; Q en m³/s ; r : coefficient de corrélation ; p : niveau de signification ; n : nombre d'observations

Pour la charge totale dissoute, les bicarbonates, le magnésium, le sodium, et dans une moindre mesure pour le calcium et les chlorures, la dispersion des points observés autour de la relation calculée est faible (Fig. 14) ; cette estimation est alors hautement significative. En ce qui concerne le calcium, les quelques points largement au-dessus de la courbe résultent de pollutions : l'analogie avec les pollutions en sulfates laisse penser à des apports en gypse provenant de l'activité humaine du bâtiment. Ces cinq espèces chimiques et la charge totale dissoute sont diluées par le débit.

La concentration en potassium est une fonction log du débit, ce qui correspond à une dilution moins rapide que les éléments précédents. Le nuage de points diffus pour les débits inférieurs à 1000 m³/s (Fig. 15) fait que le coefficient de corrélation est faible mais son niveau de signification est encore de 0,01% (tableau 59). La décomposition de l'année en trois périodes permet d'améliorer nettement ce modèle; la corrélation entre valeurs prédites et valeurs observées passe de 0,38 à 0,62 (Fig. 15). Il y a dilution en période de *hautes-eaux* puis à partir de septembre, alors que le débit diminue, la concentration diminue également jusqu'en février, au cœur de la saison sèche. Entre mars et le début de la crue en juin, il y a concentration des eaux par évaporation.

En ce qui concerne les sulfates, leur apport par pollution anthropique et la faible sensibilité de la méthode analytique utilisée font que cette espèce chimique ne peut donner une bonne information sur l'érosion et l'altération régnant dans le paysage étudié. Leur étude ne montre donc ici que peu d'intérêt.

Finalement, toutes les espèces chimiques dissoutes se comportent en première approximation comme si la contribution des eaux de ruissellement aux apports dissous était négligeable.

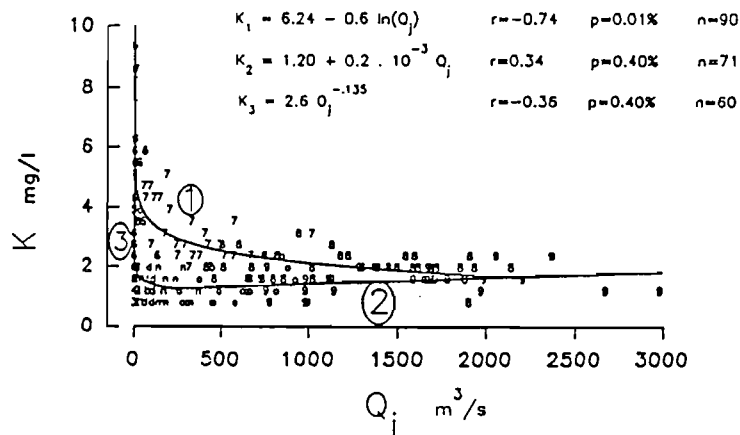


Fig. 15 - Estimation des teneurs en potassium des eaux du fleuve Sénégal à Bakel en fonction du débit journalier.

3. Le cas particulier de la silice dissoute

L'évolution particulière de la concentration en silice dissoute a déjà été soulignée ; aucune relation satisfaisante n'existe entre cette espèce chimique et le débit. Cette particularité du comportement de la silice dissoute est bien connue et beaucoup d'études y ont été consacrées aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire mais les résultats sont assez contradictoires et les opinions très divergentes (MONNET, 1972; SHOLKOVITZ, 1976; ASTON, 1983; WOLLAST et MACKENZIE, 1983; GAC et KANE, 1986b). La silice dissoute provient en majeure partie de l'altération des silicates (MACKENZIE et GARRELS, 1966; ERHART, 1973; MEYBECK, 1984) et sa chute de concentration juste avant l'arrivée de l'onde de crue est souvent attribuée à une prolifération de diatomées. Cependant, une étude menée à 300 km en aval de Bakel en 1988 n'a pas montré de variations significatives du plancton au cours de l'année hydrologique en fonction de la silice dissoute (CECCHI, 1989) : en toute saison, on observe un peuplement complexe formé surtout de cyanophycées filamenteuses (*Anabaena sp.*), de diatomées pennées (*Synedra sp.* et *Navicula sp.*) et centriques (*Melosia sp.*). Enfin, l'augmentation de la concentration en silice dissoute au cours de la période des hautes-eaux peut correspondre aux apports dissous de surface dûs au développement important de la végétation (BARTOLI et SOUCHIER, 1978).

La corrélation multiple expliquant le mieux les variations de silice dissoute est obtenue par l'association MES-1/Q ($r=0,64$; $n=177$). La silice dissoute est donc une fonction linéaire des MES et une fonction inverse du débit :

$$\text{SiO}_2 \text{ (mg/l)} = 9,497 - 0,005 \cdot \text{MES (mg/l)} + 0,357 \cdot 1/Q \text{ (m}^3/\text{s)}$$

V FLUCTUATIONS HYDROCLIMATIQUES. FLUX DE BICARBONATES ET CONSOMMATION DE CO₂ ATMOSPHERIQUE : UN INDICATEUR GEOCHIMIQUE DE L'ALTERATION

L'objectif ici est de déterminer les relations existant entre le débit du fleuve Sénégal à Bakel, la température de ses eaux, la température de l'air et la pluie, à différents pas de temps : journalier, mensuel, saisonnier et annuel. Dans un second temps, ces résultats sont reliés à l'exportation en bicarbonates hors du bassin versant, et donc à sa consommation en CO₂, il est alors établi un modèle prévisionnel de la dynamique actuelle du Fouta Djallon en cas de changement climatique prolongé.

Cette démarche fait suite aux études initiées par GARRELS et MACKENZIE (1971), qui ont débouché notamment sur le modèle BLAG (BERNER et al., 1983), et dont les travaux de géochimie globale de TARDY (1986) puis PROBST (1990) rendent compte. A l'échelle globale, PROBST et TARDY (1987, 1989) ont montré que le débit des fleuves peut servir d'indicateur hydroclimatique, que celui-ci est lié à la température de l'air, elle-même en relation directe avec la concentration de CO₂ dans l'atmosphère (modèle BLAG). Ainsi il apparaît bien que la Terre est un système fermé où tout interfère. Tout ce travail a été fait à l'échelle planétaire. Nous proposons ici une nouvelle approche, que l'on peut intituler *Hydroclimatologie et Géochimie Globale des Continents* (HGGC), cherchant à souligner par zone climatique les comportements géochimiques et leur relations avec les indicateurs hydroclimatiques.

A - LES QUATRE MODES CLIMATIQUES AU SENS DE TARDY (1986)

Les climats qui règnent à la surface de la Terre sont très contrastés et changent énormément d'un site à l'autre. La latitude, l'altitude, la distance à la mer en sont les facteurs déterminants. Un climat est défini à partir de ses caractéristiques moyennes, observées sur de nombreuses années. Mais, ces caractéristiques fluctuent d'une année à l'autre, en combinant des composantes cycliques et des composantes accidentelles. Aux cycles climatiques se surimposent les crises climatiques. On imagine volontiers pouvoir définir un climat moyen à l'échelle du globe terrestre. On imagine également que ce climat puisse fluctuer sous l'effet de pulsations qui concernent la Terre entière. Il est cependant certain que chacune des régions, chacun des bassins du globe réagit pour son propre compte avec plus ou moins d'inertie, provoquant des déphasages plus ou moins importants les uns par rapport aux autres (KRISHNAMURTI et al., 1986; KAYSER et al., 1990). De cette façon, chaque bassin module à sa guise composantes cycliques et composantes accidentelles, si bien que la réponse paraît souvent individuelle, chaotique et inexplicable.

Cependant, l'analyse des paléoclimats récents et anciens, comme celle des climats actuels, fait apparaître quatre modes climatiques majeurs, qui, aujourd'hui, s'interpénètrent dans l'espace et, qui, hier, se sont succédés dans le temps. Ces modes sont définis à partir de la température et de l'humidité de l'air, ce dernier paramètre difficilement quantifiable est appréhendé à partir du facteur pluie ou du facteur débit. Il s'agit des modes humides-chauds et secs-froids, qui sont les plus fréquents, et humides-froids et secs-chauds, qui sont exceptionnels (PROBST et TARDY, 1989). L'alternance de ces quatre modes climatiques est le résultat du jeu de position de six séries de courants convectifs d'air qui, des pôles à l'équateur, en passant par les tropiques, animent l'atmosphère au-dessus des continents et des océans.

L'examen des fluctuations climatiques des temps passés montre que, à long terme, quand le climat d'une région du globe ou le climat de la Terre entière évoluait de l'un de ces quatre pôles vers un autre, la transition ne se produisait pas de manière uniforme mais dévoilait de nombreuses récurrences. Ainsi, par exemple, lorsque le climat global change du mode sec-froid vers le mode humide-chaud, la transition montre des allées et venues qui peuvent être, selon les régions et selon les époques, tantôt humides-froids, tantôt secs-chauds. Ces allées et venues sont dominés par un certain nombre de facteurs géodynamiques : position relative des océans et des continents, niveau moyen des mers, surface des continents, distribution des altitudes, taux de subduction et d'expansion océanique. Et de ces facteurs géodynamiques dépendent les flux d'altération, d'érosion, de transport et de sédimentation ainsi que la composition de l'océan et de l'atmosphère.

Les pulsations climatiques et les fluctuations du cycle de l'eau apparaissent donc comme dépendantes des caprices de la tectonique globale. Lier ces fluctuations géodynamiques appréciées par l'intermédiaire des paramètres hydroclimatiques aux pulsations qui affectent l'altération, l'érosion et le transport des éléments dissous et particulaires est une démarche globale qui aboutit à un schéma de dynamique à l'échelle du paysage, des continents puis de la Terre entière.

B - DESCRIPTION CLIMATIQUE DES 8 ANNEES ETUDIEES (1979-1986)

Dans ces régions tropicales où la pluviosité est le facteur principal qui règle l'écoulement de surface, il est justifié de parler d'année humide lorsque celle-ci a un débit annuel élevé et d'année sèche dans le cas contraire. Les quatre paramètres hydroclimatiques n'ont pas la même signification physique. Le débit est une mesure qui intègre toute la surface du bassin versant, alors qu'au contraire les paramètres de températures et pluie sont des données ponctuelles qui expriment l'état climatique à l'exutoire. Ceci est d'autant plus vrai pour le facteur pluie qui est particulièrement irrégulier dans ces régions, la température étant une donnée plus homogène. Ces raisons expliquent que la caractérisation climatique de chacune des années étudiées ait été recherchée à travers l'évolution des paramètres débit et température.

1. Les données utilisées

Toutes les données concernent le fleuve Sénégal à Bakel de 1979 à 1986 au cours des dernières crues naturelles. Les données hydroclimatiques utilisées sont le débit du fleuve (Q en m³/s), la température de l'eau (TE en °C), la température de l'air (TA en °C) et la pluviosité (P en mm). La température de l'eau du fleuve est une donnée capitale : elle traduit la " *respiration épidermique du bassin*" dans la mesure où l'échelle de lecture se fait au 1/10e de degré. Les valeurs de débit moyen journalier, Q, utilisées sont celles données par les Services Hydrologiques nationaux et par le département hydrologique de l'ORSTOM à Dakar. Les températures sont mesurées au thermomètre à mercure le matin à 8 h et le soir à 18 h. La température moyenne journalière est la moyenne de ces deux lectures. La pluie est relevée le matin à 8 h et le soir à 18 h. On appelle Pn(j) la lecture du matin du jour j pour pluie nocturne, et Pd(j) la lecture du soir du jour j pour pluie diurne. La pluie journalière Pj est obtenue en sommant les deux pluies :

$$P_j = P_d(j) + P_n(j+1)$$

2. Description hydroclimatique année par année

Rappelons que les huit années étudiées (de 1979 à 1986) appartiennent à la période de sécheresse ayant débuté en 1970 et dont la phase paroxysmale a eu lieu en 1983 et 1984. A l'échelle du siècle, toutes ces années sont donc sèches. Aussi, les qualificatifs humides/secs et chauds/froids utilisés sont donnés par rapport à la moyenne interannuelle des huit années étudiées. L'année la plus humide est 1981 (Q=426 m³/s) et la plus sèche est 1984 (218 m³/s) ; l'année la plus chaude est 1983 (31,4°C) et la plus froide est 1982 (29,1°C) (Tableau XIV). La figure 16 représente les écarts annuels à la moyenne du débit et de la température de l'air. Les années 1983 et 1984 sont des années sèches-chaudes alors que les années 1980 et 1981 sont humides-froides. Les années 1979 et 1982 sont sèches-froides alors que les années 1985 et 1986 sont humides-chaudes.

Tableau XIV

Moyennes annuelles des paramètres hydroclimatiques (Q, P, TE, TA) du bassin du Sénégal à Bakel (moyenne sur l'année civile)

X _i	1979		1980		1981		1982		1983		1984		1985		1986		Moy. X _m
	X _i	δ %	X _i	δ %	X _i	δ %	X _i	δ %	X _i	δ %	X _i	δ %	X _i	δ %	X _i	δ %	
Q (m ³ /s)	309	-4	389	+21	426	+33	307	-4	221	-31	218	-32	356	+11	341	+6	321
P (mm)	409	-9	411	-8	533	+19	574	+28	402	-10	251	-44	533	+19	469	+5	448
T _A (°C)	30,2	-0	30,0	-1	29,8	-2	29,1	-4	31,4	+4	31,1	+3	30,7	+1	30,5	+1	30,3
T _E (°C)	28,7	+6	28,3	+4	27,1	-0	26,4	-3	26,9	-1	27,8	+2	26,1	-4	26,7	-2	27,2

δ % : écart à la moyenne en %

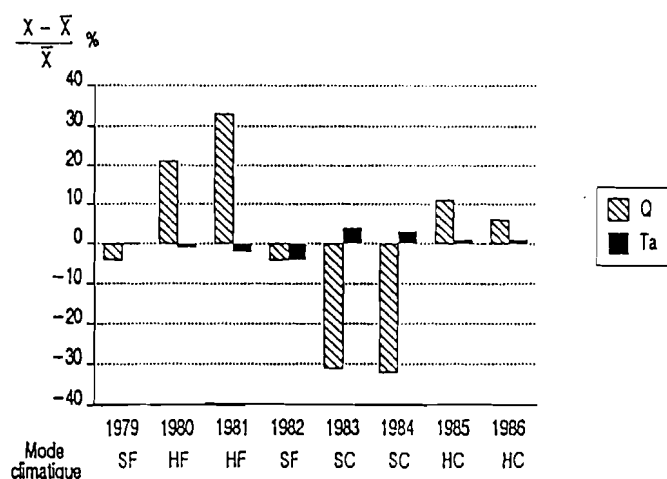


Fig. 16 : Ecarts annuels à la moyenne ($\bar{\theta}$ en %) du débit et de la température de l'air.

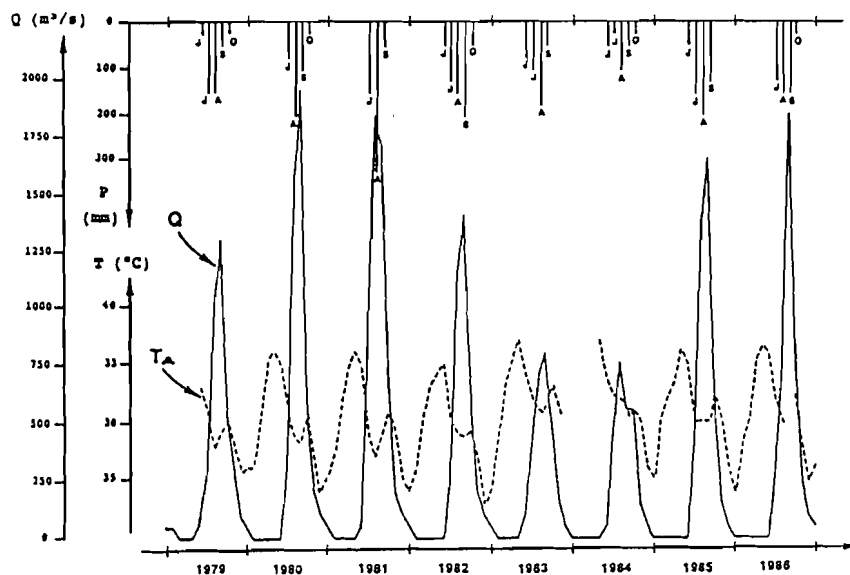


Fig. 17 : Evolution de trois paramètres hydroclimatiques (P, Q, T_A) du bassin versant du Sénégal de 1979 à 1986.

a) Année 1979 : année moyenne (plutôt sèche-froide)

L'écoulement est inférieur à 100 m³/s de janvier à juin. L'hydrogramme annuel montre deux pointes de crue. La première a lieu début août après un écoulement quasi-nul en avril-mai et très faible en juin-juillet. La seconde est centrée sur la première quinzaine de septembre, la pointe de crue étant atteinte le 2/9/79 avec 1792 m³/s. La montée des eaux est rapide et par à-coups alors que la descente est plus lente et régulière. La température de l'eau est stable autour de 30°C de juin à octobre puis décroît en même temps que la température de l'air : le minimum est atteint en décembre. La courbe d'évolution de la température de l'air est bimodale : le maximum

maximorum a lieu en fin de saison sèche (mai-juin-juillet) et le maximum minimorum en fin de saison des pluies (septembre-octobre). Le minimum minimorum a lieu en décembre.

b) Année 1980 : année humide-froide

L'écoulement est inférieur à 100 m³/s de janvier à juin et en décembre ; l'étiage dure trois mois, de mars à mai. L'hydrogramme annuel montre trois pointes de crue successives, la dernière étant la plus importante : 3141 m³/s le 10/9/80. La température de l'eau et la température de l'air ont des évolutions analogues à l'année précédente. L'écart en fin de saison sèche entre ces deux paramètres est plus important.

c) Année 1981 : année humide-froide

L'écoulement est inférieur à 100 m³/s de janvier à juin et en décembre ; l'étiage dure trois mois, de mars à mai. L'hydrogramme annuel montre trois pointes de crue mal individualisées, la première étant la plus importante : 2578 m³/s le 10/8/81. Cette année-là, la température de l'eau mime l'évolution de la température de l'air avec des amplitudes moins fortes.

d) Année 1982 : année sèche-froide

L'écoulement est inférieur à 100 m³/s de janvier à juin et en décembre ; l'étiage dure quatre mois, de mars à juin. L'hydrogramme annuel montre une seule pointe de crue (2183 m³/s) atteinte le 31/8/82. L'évolution de la température de l'eau est à nouveau monomodale avec une période stable d'avril à octobre à 30°C. La température de l'air est moins élevée et le caractère bimodal de sa courbe d'évolution annuelle est moins marqué.

e) Année 1983 : année sèche-chaude

L'écoulement est inférieur à 100 m³/s de janvier à mai et en décembre ; l'étiage dure trois mois, de mars à mai. Une première crue est enregistrées exceptionnellement en juin : elle est due à un événement pluvieux important localisé près de Bakel (64,4 mm le 16/6/83). Après cette montée atypique des eaux, le fleuve retrouve son niveau d'étiage fin juin. La crue proprement dite commence début juillet, l'hydrogramme a une forme aplatie. Le mois de juillet est normal mais les pointes de crue d'août et de septembre sont écrêtées. le maximum de crue (1153 m³/s) est atteint le 22/8/83. La température de l'eau atteint son palier plus tardivement que l'année précédente. Les températures de l'air sont élevées.

f) Année 1984 : année sèche-chaude

L'écoulement est inférieur à 100 m³/s de janvier à juin et en décembre ; suite au déficit hydrique de l'année précédente, l'étiage dure cinq mois, de février à juin. A l'exception de la crue tardive enregistrée en octobre et sensiblement égale à la pointe de crue annuelle atteinte le 24/8/84 à 882 m³/s, il n'y a pas de pics qui s'individualisent. Cet hydrogramme est encore plus plat que celui de l'année précédente. Les températures n'ont été mesurées qu'à partir de mai. La température de l'eau avait déjà atteint son palier de 30°C et la température de l'air semble encore avoir une évolution bimodale.

g) Année 1985 : année moyenne (plutôt humide-chaude)

Suite à la faiblesse de la crue des deux années précédentes, la période d'étiage s'étale de janvier à juin et malgré une pointe de crue relativement importante le niveau d'étiage est déjà atteint fin décembre. Le corps de l'hydrogramme est unimodal. La montée des eaux est une suite d'impulsions croissantes jusqu'au 10/9/85 à 2370 m³/s. La température de l'eau n'atteint son palier que vers juin-juillet. Le caractère bimodal de la courbe annuelle d'évolution de la température de l'air est bien marqué.

h) Année 1986 : année moyenne (plutôt humide-chaude)

Comme l'année précédente, la période d'étiage est très longue (de janvier à juin). La période des hautes eaux est réduite dans le temps. En effet, après une première impulsion en juillet, le débit se stabilise autour de 500 m³/s jusqu'à la mi-août. La montée des eaux est alors très rapide. La pointe de crue est atteinte le 8/9/86 à 2732 m³/s. La décrue est plus lente, elle est momentanément interrompue fin septembre par une crue secondaire. La température de l'eau a un comportement classique : palier à 30°C dès avril jusqu'à fin octobre. La température de l'air est pratiquement toujours supérieure à la température de l'eau.

C - ANALYSE DES RELATIONS DEBIT-TEMPERATURE

Il s'agit ici de mettre en évidence, à partir des huit années étudiées en continu sur le bassin versant du Sénégal, le meilleur découpage de l'année hydroclimatique qui permette de caractériser une année suivant les quatre principaux modes climatiques de TARDY (1986).

1. Analyse des moyennes annuelles

a) Généralités

Les deux années aux débits moyens annuels les plus faibles (1983 et 1984) correspondent aux deux années à la pluviosité la plus basse (Fig.18). L'évolution interannuelle de la température de l'air et de la température de l'eau est plus stable. L'année 1982 présente un minimum pour ces deux paramètres, c'est aussi l'année la plus pluvieuse. L'année 1983 est la plus chaude vis-à-vis de TA alors que c'est 1984 vis-à-vis de TE.

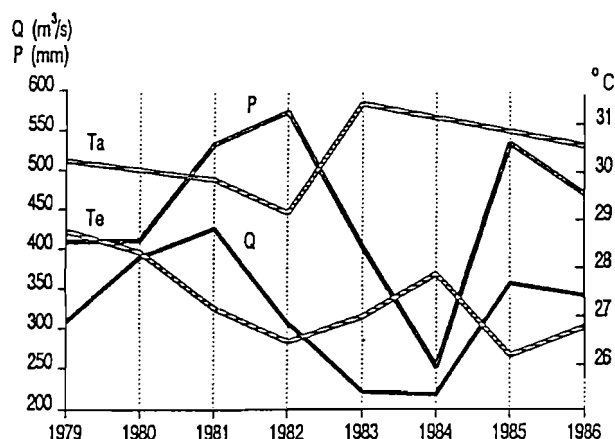


Fig. 18 - Evolution interannuelle des paramètres hydroclimatiques du bassin versant du Sénégal de 1979 à 1986.

L'étude des corrélations effectuées sur les moyennes annuelles (Tableau XV) confirme que l'évolution du facteur pluie suit celle du débit (PALUTIKOF et al., 1981) : le coefficient de corrélation est de +0,63, significatif à 10%. Par contre, cette évolution du facteur pluie est inverse à celles de la température de l'air ($r=-0,64$; $p=9\%$) et de la température de l'eau ($r=-0,62$; $p=10\%$). Ces deux facteurs ne sont pas du tout corrélés entre eux. Enfin, le débit est également bien corrélé à la température de l'air mais ils évoluent en sens contraire ($r=-0,60$; $p=12\%$).

Tableau XV

Coefficients de corrélation de Pearson sur les moyennes annuelles des facteurs hydroclimatiques

n = 8	Q	T _E	T _A
P	0,63	-0,62	-0,64
T _A	-0,60	(-0,01)	
T _E	(-0,04)		

() : seuil de signification supérieur à 10%

b) Relation débit-température

La distribution des huit années étudiées en fonction des quatre modes climatiques peut être représentée en portant les moyennes annuelles dans un graphe débit-température partagé en quatre par les moyennes interannuelles respectives de ces deux paramètres (Fig.19). Les années 1983 et 1984 définissent effectivement un pôle sec-chaud, et les années 1980 et 1981 un pôle humide-froid. Par contre, les années 1979, 1985 et 1986 sont proches des droites moyennes, on peut parier alors d'années moyennes ; avec l'année 1982 qui est froide moyennement sèche, ces quatre années correspondent à la tendance normale définie par TARDY (1986) à l'échelle globale. Dans ce qui suit, elles sont regroupées dans un seul ensemble, à l'intérieur duquel la tendance d'évolution entre TA et Q est inverse de la tendance notée sur la population entière : le coefficient de corrélation linéaire y est positif ($r=0,81$; $p=19\%$).

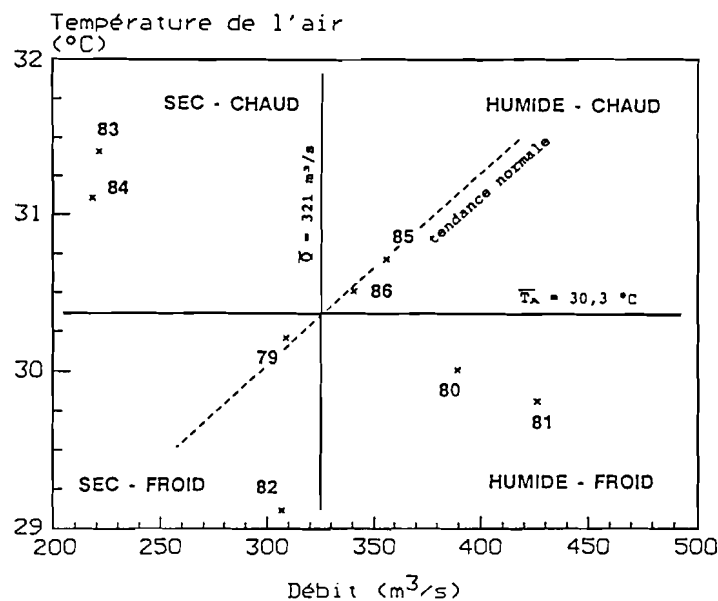


Fig. 19 - Répartition des années étudiées selon les quatre modes climatiques au sens de TARDY.

2. Analyses à d'autres échelles de temps

On recherche à l'échelle journalière, mensuelle puis saisonnière les caractéristiques des comportements hydroclimatiques des trois groupes individualisés précédemment.

a) Analyse des données journalières

L'analyse est effectuée sur les données journalières de janvier 1979 à décembre 1986. soit 2922 jours d'observation possibles. Les variables Qj, TA(j), TE(j) et Pj ont respectivement 0, 341, 365 et 151 observations manquantes.

Corrélation journalière interannuelle

A l'échelle journalière, les facteurs les mieux corrélés (Tableau XVI) sont TE et TA ($r=0.65$; $p=0,01\%$). Dans une moindre mesure, Q et TE puis Q et P sont également corrélés positivement. Enfin, Q et TA sont faiblement corrélés négativement. Cette étude met en évidence la disparité d'évolution à l'échelle journalière des différents paramètres hydroclimatiques entre eux (à l'exception des températures).

Tableau XVI

Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs journalières des facteurs hydroclimatiques

2500 < n < 3000 p = 0,01 %	Q	TE	TA
P	0,26	0,13	-0,04
TA	-0,15	0,65	
TE	0,34		

Corrélations journalières par année

L'établissement des tables de corrélation des observations journalières par année (Tableau XVII) montre une homogénéité de comportement des quatre paramètres hydroclimatiques étudiés d'une année sur l'autre. Le facteur pluie est toujours mieux corrélé avec le débit, à l'exception de 1979, et le débit est toujours mieux corrélé avec TE, à l'exception de 1981. Les facteurs de température sont toujours bien corrélés entre eux. Enfin, le couple (Q, TA) a le comportement le plus désordonné d'une année sur l'autre. Cette variabilité montre que ces deux paramètres pourront le mieux caractériser le comportement hydroclimatique d'une année donnée.

L'étude des corrélations par mode climatique confirme ces remarques. En effet, à l'intérieur de l'homogénéité du comportement journalier, on différencie deux pôles : un pôle humide-froid où les débits sont bien corrélés positivement avec le facteur pluie et négativement avec la température de l'air, et un pôle sec-chaud où le débit est alors bien corrélé avec la température de l'eau (Tableau XVIII). Enfin, quel que soit le cas, la température de l'air est toujours corrélée négativement avec le débit : lorsque le débit journalier augmente, la température de l'air journalière diminue.

Corrélations journalières par saison

L'évolution saisonnière des différents paramètres hydroclimatiques (chapitre III) et la séparation classique de l'année hydroclimatique en deux saisons, humide et sèche, a amené à rechercher s'il existe des comportements différents selon ces saisons hydrologiques. La séparation de l'année en deux saisons est basée sur le calcul du CMD (coefficient mensuel de débit) défini comme étant le rapport entre le débit moyen mensuel et le débit moyen annuel. En saison humide, ce rapport est supérieur à 1.

Toutes années confondues, on observe une différence de comportement des paramètres hydroclimatiques en fonction de la saison hydrologique considérée (Tableau XIX). Les températures sont mieux corrélées entre elles en saison sèche. Les débits sont mieux corrélés aux températures

de l'air en saison humide et les corrélations restent toujours négatives. Mais, ces comportements sont identiques pour les études annuelles et les études par classe d'années H-F, moyennes, S-C. L'étude journalière par saison ne permet donc pas de caractériser les différents modes climatiques.

Tableau XVII

Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs journalières des facteurs hydroclimatiques par année

$p=0,01\%$ pour $r=0,20$ et $p=10\%$ pour $r=0,08$: () : seuil de signification supérieur à 10%

Année 1979 (S-F)				Année 1980 (H-F)			
n=214	Q	T _E	T _A	n=366	Q	T _E	T _A
P	(0,09)	0,15	(-0,01)	P	0,31	0,14	(-0,04)
T _A	-0,18	0,59		T _A	-0,16	0,57	
T _E	0,43			T _E	0,33		

Année 1981 (H-F)				Année 1982 (S-F)			
n=365	Q	T _E	T _A	n=365	Q	T _E	T _A
P	0,33	(0,05)	-0,10	P	0,29	0,17	(-0,01)
T _A	-0,23	0,77		T _A	(-0,08)	0,74	
T _E	(0,05)			T _E	0,35		

Année 1983 (S-C)				Année 1984 (S-C)			
n=333	Q	T _E	T _A	n=245	Q	T _E	T _A
P	0,20	0,11	(-0,02)	P	0,19	0,12	(0,03)
T _A	(-0,09)	0,66		T _A	(-0,08)	0,80	
T _E	0,57			T _E	0,36		

Année 1985 (H-C)				Année 1986 (H-C)			
n=365	Q	T _E	T _A	n=335	Q	T _E	T _A
P	0,30	0,21	(-0,05)	P	0,26	0,15	(-0,01)
T _A	-0,14	0,62		T _A	(-0,00)	0,85	
T _E	0,51			T _E	0,36		

Tableau XVIII

Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs journalières des facteurs hydroclimatiques par mode climatique

() : seuil de signification supérieur à 10%

Année humide-froide 1980, 1981				1979, 82, 85, 86				Année sèche-chaude 1983, 1984			
n=731	Q	T _E	T _A	n=1272	Q	T _E	T _A	n=561	Q	T _E	T _A
P	0,32	0,08	-0,07	P	0,25	0,17	(-0,03)	P	0,19	0,11	(-0,0)
T _A	-0,19	0,66		T _A	-0,10	0,66		T _A	-0,09	0,69	
T _E	0,18			T _E	0,42			T _E	0,50		

p = 0,01 % pour r = 0,10 p = 0,01 % pour r = 0,10 p = 0,01 % pour r = 0,15

Tableau XIX

Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs journalières des facteurs hydroclimatiques par saison hydrologique

saison sèche				saison humide			
n=1697	Q	T _E	T _A	n=860	Q	T _E	T _A
P	0,13	0,09	0,03	P	0,14	-0,06	-0,16
T _A	-0,22	0,78		T _A	-0,46	0,31	
T _E	0,13			T _E	-0,28		

p = 0,01 % pour r = 0,10 p = 0,01 % pour r = 0,10

b) Analyse des données mensuelles

L'analyse des corrélations à l'échelle mensuelle (Tableau XX) donnent les mêmes informations que l'analyse effectuée à l'échelle journalière (Tableau XVI). Les corrélations sont bien sûr nettement meilleures mais moins significatives du fait du plus petit nombre d'observations.

La séparation entre saison sèche et saison humide montre une différence de comportement du couple Q-TE ; d'évolution opposée en saison humide, ces deux paramètres sont indépendants en saison sèche. Pour les autres paramètres, les tendances restent les mêmes entre les deux saisons. Enfin, les regroupements en années H-F, moyennes et S-C montrent que les différents paramètres hydroclimatiques évoluent similairement dans les trois groupes à l'exception du couple (Q, T_A) dont la tendance devient légèrement positive lors des années S-C (Tableau XXI).

Tableau XX

Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs mensuelles des facteurs hydroclimatiques

() : seuil de signification supérieur à 10%

n = 96	Q	T _E	T _A
P	0,74	0,35	(-0,04)
T _A	(-0,15)	0,72	
T _E	0,32		

p = 0,01 % pour r = 0,40

saison sèche				saison humide			
n=67	Q	T _E	T _A	n=29	Q	T _E	T _A
P	0,45	0,33	(0,18)	P	0,48	-0,33	-0,58
T _A	-0,29	0,84		T _A	-0,70	0,36	
T _E	(0,06)			T _E	-0,44		

p = 0,01 % pour r = 0,45

p=0,01 % pour r=0,65

Tableau XXI

Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs mensuelles des facteurs hydroclimatiques par mode climatique

() : seuil de signification supérieur à 10%

Année humide-froide
1980, 1981

n=24	Q	T _E	T _A
P	0,75	(0,18)	(-0,17)
T _A	(-0,23)	0,69	
T _E	(0,21)		

p = 0,01 % pour r = 0,70

1979, 82, 85, 86

n=48	Q	T _E	T _A
P	0,75	0,43	(-0,0)
T _A	(-0,12)	0,74	
T _E	0,35		

p = 0,01 % pour r = 0,60

Année sèche-chaude

1983, 1984

n=24	Q	T _E	T _A
P	0,64	0,45	(0,17)
T _A	(0,06)	0,78	
T _E	0,51		

p = 0,01 % pour r = 0,70

c) Analyse des données saisonnières

A l'échelle de la saison, TE et TA sont mal corrélées. Par contre, Q et TA sont bien corrélés surtout en séparant la saison sèche de la saison humide ; leur évolution est toujours opposée (Tableau XXII).

Tableau XXII

Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs saisonnières des facteurs hydroclimatiques

() : seuil de signification supérieur à 10%

n = 16	Q	T _E	T _A
P	0,89	0,67	(-0,41)
T _A	(-0,41)	(-0,11)	
T _E	0,76		

p = 0,01 % pour r = 0,80

saison sèche

n=8	Q	T _E	T _A
P	(0,55)	(-0,15)	(-0,50)
T _A	(-0,58)	(-0,20)	
T _E	(0,50)		

saison humide

n=8	Q	T _E	T _A
P	(0,48)	(-0,51)	(-0,59)
T _A	-0,76	(0,25)	
T _E	(-0,35)		

p = 10 % pour r = 0,60 et p = 0,01 % pour r = 0,85

Le regroupement par années H-F, moyennes et S-C à l'échelle saisonnière montre un changement de comportement de la température de l'air par rapport au débit (Tableau XXIII). En années H-F, Q et T_A sont fortement corrélés négativement alors qu'en année S-C, ils sont fortement corrélés positivement. En années moyennes, la corrélation bien qu'étant nettement moins importante, reste négative. Enfin, notons que les années 1983 et 1984 (années du mode S-) sont les seules années où la température de l'air de la saison humide est supérieure à la température de l'air de la saison sèche (Fig.20), ce qui explique la corrélation positive entre Q et T_A pour ce mode climatique uniquement.

Tableau XXIII

Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs saisonnières des facteurs hydroclimatiques par mode climatique

() : seuil de signification supérieur à 10%

Année humide-froide
1980, 1981

n=4	Q	T _E	T _A
P	(0,86)	(0,51)	-0,95
T _A	-0,95	(-0,62)	
T _E	(0,82)		

p = 10 % pour r = 0,90

1979, 82, 85, 86

n=8	Q	T _E	T _A
P	0,93	0,80	(-0,40)
T _A	(-0,28)	(-0,32)	
T _E	0,82		

p = 10 % pour r = 0,60

Année sèche-chaude

1983, 1984

n=4	Q	T _E	T _A
P	(0,89)	(0,87)	0,90
T _A	0,94	(0,78)	
T _E	0,93		

p = 10 % pour r = 0,90



Fig. 20 - Evolution interannuelle de la température de l'air (TA) de la saison sèche et de la saison humide.

L'étude des corrélations croisées entre saison sèche et saison humide (Tableau XXIV) permet de déterminer les scénarios suivants. Une saison sèche chaude induit une saison humide chaude et, dans une moindre mesure, une saison humide à déficit hydrique important induit un déficit hydrique lors de la saison sèche suivante.

Tableau XXIV

Coefficients de corrélation de Pearson sur les valeurs saisonnières des facteurs hydroclimatiques de saison humide avec ceux de saison sèche

n = 8		saison humide			
		Q	T _E	T _A	P
saison sèche	Q	(0,58)	(0,19)	-0,63	(-0,05)
	T _E	(0,13)	(0,36)	(-0,29)	(-0,41)
	T _A	(-0,48)	(0,35)	0,79	(-0,25)
	P	(0,19)	(0,04)	(-0,11)	(-0,31)

p = 0,01% pour r = 0,85 et p = 10% pour r = 0,60 ; () : seuil de signification supérieur à 10 %

A l'échelle journalière, les deux paramètres climatiques Q et TA sont toujours corrélés négativement quel que soit le mode climatique considéré. Par contre, à l'échelle mensuelle et, surtout, à l'échelle saisonnière, ces deux paramètres ont un comportement relatif différent selon le mode climatique considéré : en années H-F, ils évoluent en opposition alors qu'en années S-C ils évoluent dans le même sens. Ceci montre que l'année hydroclimatique ne doit plus être décrite simplement en terme de débit (ou pluie) mais en terme de débit et température. La prise en considération de ces deux paramètres conduit à diviser l'année hydroclimatique en trois périodes hydroclimatiques (et non plus en deux saisons hydrologiques).

3. Découpage de l'année hydroclimatique en trois périodes

Le tracé sur un même graphique de l'évolution annuelle du débit et de la température de l'air met en évidence trois périodes de l'année pendant lesquelles les comportements relatifs de ces deux paramètres sont différents (Fig.21). Durant la première période (P1), de janvier à mai, la température de l'air augmente alors que le débit diminue, c'est la fin de la saison sèche. Ensuite, ces deux facteurs hydroclimatiques ont encore une évolution contraire ; en début de crue, la température de l'air diminue alors que le débit augmente puis, après la pointe de crue, les tendances s'inversent. Cette deuxième période (P2) couvre toute la saison des pluies de juin à octobre. Enfin, la troisième période (P3) marque le début de la saison sèche de novembre à décembre : la température de l'air et le débit diminuent ensemble. C'est la seule période de l'année où ces deux paramètres sont corrélés positivement (Tableau XXV). Ainsi la normalité ou non de l'année à l'échelle journalière dépendra de l'importance relative de la période P3 par rapport aux périodes P1 et P2. Dans ces régions tropicales à deux saisons annuelles contrastées, la normalité de l'année à l'échelle journalière est impossible puisque la période P3 est largement moins étendue que les deux autres.

Tableau XXV

Coefficients de corrélation de Pearson (r) sur les valeurs journalières (n observations) des facteurs hydroclimatiques (Q et T_A) selon les trois périodes hydroclimatiques de l'année (p =seuil de signification en %)

(Q, T_A)	P ₁	P ₂	P ₃
r	-0,69	-0,61	0,63
n	951	1086	576
p	0,01	0,01	0,01

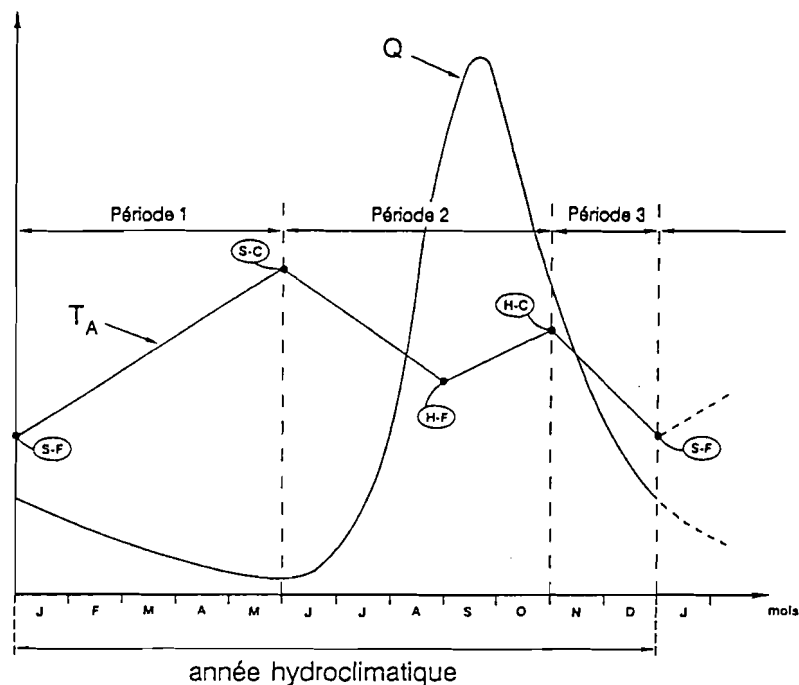


Fig. 21 - Schéma de découpage de l'année hydroclimatique en trois périodes.

D - UN INDICATEUR GEOCHIMIQUE DE L'ALTERATION : LE FLUX DE BICARBONATES, LA CONSOMMATION DE CO₂ ATMOSPHERIQUE

Les bicarbonates présents dans les eaux sont des marqueurs de l'intensité de l'altération (GARRELS et MACKENZIE, 1971). Ainsi, pouvoir déterminer la quantité de bicarbonates évacuée par le paysage selon les modalités climatiques, c'est appréhender la relation qui existe entre l'évolution climatique de la zone tropicale africaine et l'intensité de l'altération qui y règne. L'aboutissement logique est l'élaboration d'un modèle prévisionnel de dynamique régionale actuelle en cas de changements climatiques prolongés.

— Il a été montré (Tableau XIII) qu'à l'échelle journalière la concentration des eaux en bicarbonates (HCO₃ en mg/l) s'exprime en fonction du débit (Q en m³/s) de la manière suivante :

$$\text{HCO}_3 = 54,1 \cdot Q^{-0,125} \quad (r=-0,83)$$

A la suite de l'étude des différents paramètres hydroclimatiques, nous recherchons maintenant l'influence de la température sur la concentration en bicarbonates dans les eaux du fleuve Sénégal en fonction des modes climatiques définis par ORANGE (1990).

1. Recherche des différents comportements géochimiques

Toutes années confondues et quel que soit le mode climatique, la concentration journalière en bicarbonates est la mieux corrélée avec le débit et la température de l'air (Tableau XXVI). L'évolution des teneurs en bicarbonates en fonction de ces deux paramètres suit un schéma classique : les concentrations sont diluées par le débit du fleuve, mais elles augmentent quand la température de l'air augmente.

Quel que soit le mode climatique cette relation reste vraie. Seules les influences respectives de ces deux paramètres hydroclimatiques changent. La température de l'air semble avoir autant d'influence que le débit uniquement lors des années H-F (Tableau XVII).

Tableau XXVI

Coefficients de corrélation de Pearson entre les valeurs journalières des concentrations en bicarbonates et les paramètres hydroclimatiques (p. seuil de signification en %)

n = 226	Q	T _A	T _E	P
HCO ₃	-0,59	0,49	0,11	-0,16
p	0,01	0,01	10	2

En effet, pour ce mode climatique H-F, on peut distinguer deux courbes sensiblement parallèles matérialisant l'évolution des concentrations en bicarbonates dans deux classes de températures successives (Fig. 22). Le calcul du flux de bicarbonates exportés hors du paysage peut alors être tenté à partir d'une relation liant leur concentration dans les eaux à Q et T_A. Par contre, pour les autres modes climatiques, l'influence de la température de l'air n'est pas suffisante pour permettre l'utilisation d'une telle relation. On gardera alors la relation de dilution classique des bicarbonates par le débit du fleuve.

Tableau XXVII

Coefficients de corrélation de Pearson entre les valeurs journalières des concentrations en bicarbonates et les paramètres hydroclimatiques selon les modes climatiques et seuils de signification (p en %)

Modes	n		Q	T _A
H-F	90	HCO ₃	-0,69	0,68
		p	0,01	0,01
N	89	HCO ₃	-0,60	0,53
		p	0,01	0,01
S-C	47	HCO ₃	-0,73	0,41
		p	0,01	0,4

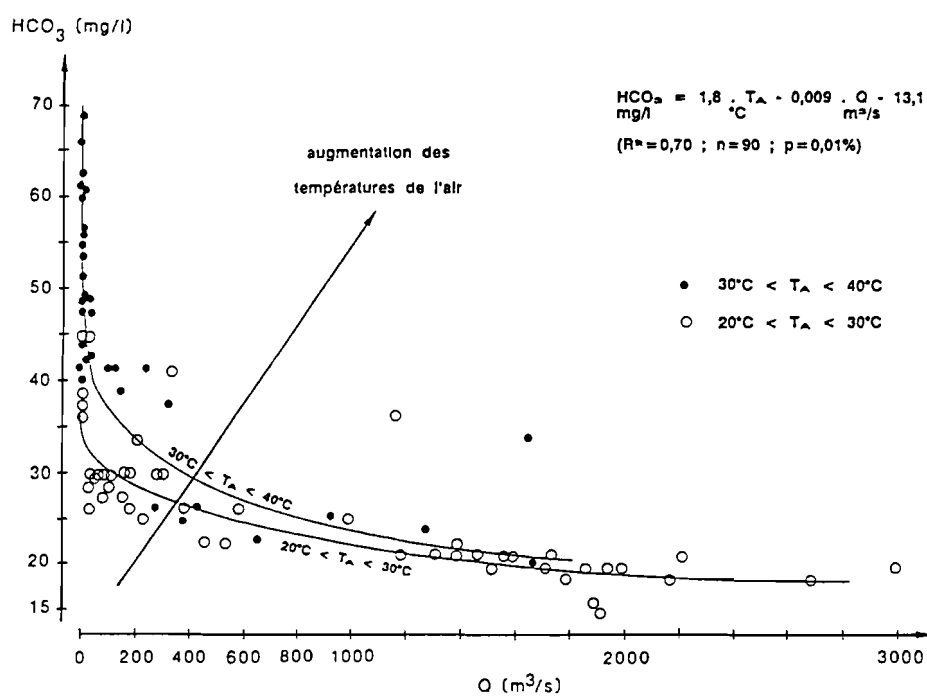


Fig. 22 - Evolution des concentrations en bicarbonates des eaux du fleuve Sénégal à Bakel en fonction du débit et par classe de température, lors des années H-F.

2. Exportations de bicarbonates selon les modes climatiques

Pour les années du mode H-F, l'équation exprimant HCO₃ (en mg/l) en fonction de Q (en m³/s) et TA (en °C) est testée :

$$\text{mode H-F : } HCO_3 = 1,8 \cdot TA - 0,009 \cdot Q - 13,1$$

$$(R^2=0,70 \text{ ; } n=90 \text{ ; } p=0,01\%)$$

Les résultats obtenus par cette méthode (290000 t en 1980 et 310000 t en 1981) sont du même ordre de grandeur que ceux trouvés directement par l'équation de dilution (respectivement 279000 t et 302000 t).

Ainsi quel que soit le mode climatique considéré, les flux de bicarbonates exportés par le Sénégal au bief de Bakel peuvent toujours être exprimés directement en fonction du débit du fleuve. Or sur le bassin versant du Sénégal (les grès quartzitiques à bancs carbonatés de la Falémé ne représentant que 1% de la superficie totale), ce flux de bicarbonates donne directement la consommation en gaz carbonique due à l'altération chimique. Cette *respiration géochimique* du paysage est donc en relation directe avec l'importance de l'écoulement de surface (Fig. 23).

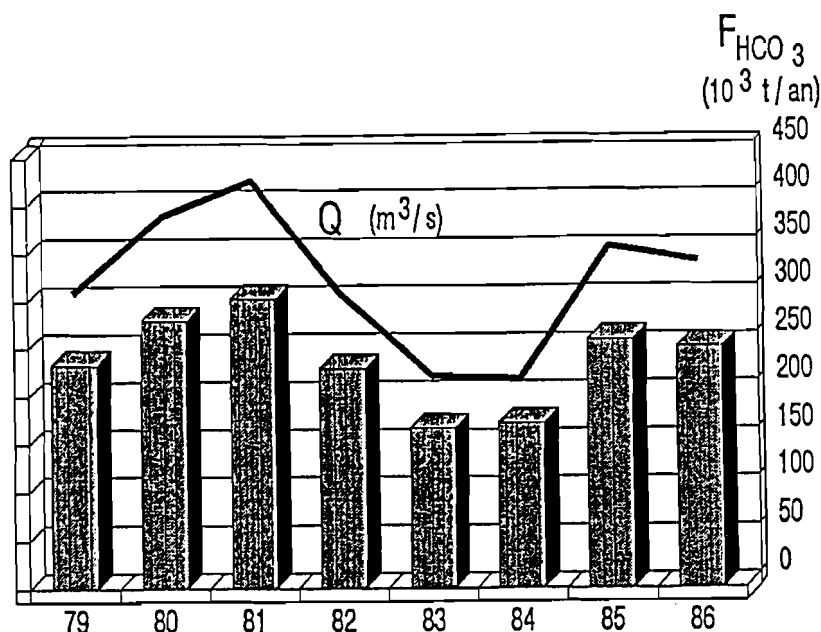


Fig. 23 -Respiration géochimique du bassin versant du Sénégal de 1979 à 1986 (flux de bicarbonates exportés en 10^3 t/an).

Dans le contexte général actuel de sécheresse, les exportations de bicarbonates sont de l'ordre de 300000 t/an en mode H-F alors que, en mode S-C, les exportations sont seulement de 170000 t/an, soit presque la moitié (Tableau XXVIII). Par rapport à une année moyenne dont l'exportation peut être estimée à 240000 t/an, le mode H-F représente un excédent de 25% alors que le mode S-C accuse un déficit de 30%. Si les quantités totales annuelles sont les plus fortes en année humide, les concentrations sont en revanche les plus fortes en année sèche (Tableau XXVIII). Ainsi, dans un paysage de savane de la zone sahélo-soudano-guinéenne, l'intensité de l'altération chimique, rapportée au volume d'eau, est relativement plus forte en période sèche, mais le bilan de l'altération est finalement plus important en période humide (GAC, 1980).

Enfin, la consommation en CO_2 atmosphérique due à l'altération régnant sur l'ensemble du bassin versant du Sénégal s'exprime par une fonction de transfert simple dépendant uniquement du débit :

$$F_{CO_2} = 0,028 \cdot Q^{0,86}$$

$$F_{CO_2} \text{ (} 10^9 \text{ mol/an) et } Q \text{ (} m^3/s \text{)}$$

La consommation spécifique actuelle sur l'ensemble du bassin versant est de l'ordre de $13 \cdot 10^3$ mol/km²/an.

Tableau XXVIII

Moyennes annuelles des flux de bicarbonates, de leur concentration dans les eaux du fleuve Sénégal à Bakel et des flux de CO₂ consommés par altération

	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
Q (m ³ /s)	309	389	426	307	221	218	356	341
F _{HCO₃} (10 ³ t)	233	279	302	228	166	171	258	250
HCO ₃ (mg/l)	24,3	22,8	22,6	23,7	24,1	25,2	23,0	23,1
F _{CO₂}								
. 10 ⁹ moles	3,8	4,6	5,0	3,7	2,7	2,8	4,2	4,1
. 10 ⁶ mol/km ²	0,018	0,021	0,023	0,017	0,012	0,013	0,019	0,019

Cette tentative de lier les fluctuations des paramètres hydroclimatiques sur une décennie aux pulsations qui affectent la dynamique des paysages a montré que, dans ces régions tropicales à deux saisons annuelles contrastées, le facteur gouvernant la respiration géochimique est le débit. En effet, les variations de la température ne sont pas suffisamment prononcées pour avoir une importance significative sur le comportement géochimique de l'altération sévissant dans ces régions. Par conséquent, le débit, c'est à dire la quantité d'eau disponible, reste le facteur déterminant de l'érosion et de l'altération.

Les études géomorphologiques (ALBERGEL, 1986; MIETTON, 1988) ont montré que l'érosion mécanique n'était pas affectée outre mesure par le déficit hydrique de ces dernières années. Ainsi, la question est maintenant de savoir quel est le débit critique pour lequel altération chimique et érosion mécanique s'équilibrent. Il a été montré que le haut bassin était actuellement en régime stationnaire. Le débit critique pour lequel cette région ne sérode ni ne s'altère (en bilan global bien sûr) correspond au débit moyen actuel des eaux de surface drainant le Fouta Djallon. Il est de 700 m³/s, ce qui équivaut à une lame d'eau écoulée de 380 mm/an.

Par conséquent, un modèle prévisionnel de dynamique actuelle, en cas de changement climatique prolongé, peut être proposé. Pour un écoulement supérieur à 380 mm/an, le bilan global d'altération sera positif : le paysage formera des sols. En revanche, en deçà de cette valeur la formation de sols ne sera plus suffisante pour équilibrer l'ablation des sols en surface : l'érosion mécanique l'emportera sur l'altération chimique. Autrement dit, en l'absence de mouvements orogéniques, tout le paysage se nivelle et descend : dans le premiers cas les sols s'approfondissent, dans le second ils se réduisent.

Il est temps maintenant, de descendre dans la vallée et d'observer, sur un parcours de près de 500 km, l'évolution de la qualité des eaux au cours de leur migration et de leur transit vers l'aval. L'itinéraire nous conduira de Bakel à Podor (site à 300 km de l'embouchure, autrefois situé à la limite extrême de la remontée des eaux océaniques dans la basse vallée du Sénégal, voir au chapitre III de cet ouvrage).

VI EVOLUTION DE LA QUALITE DES EAUX DU FLEUVE SENEGAL DANS SA MOYENNE VALLEE (DE BAKEL A PODOR)

Cette évolution de la qualité des eaux était difficilement concevable à l'échelle journalière. Elle est illustrée dans cette dernière partie par les concentrations moyennes mensuelles et annuelles. Les sites retenus sont Bakel à l'entrée de la moyenne vallée, Saldé et Ngoui au centre de la moyenne vallée, Podor et Guédé à l'entrée de la basse vallée (Fig. 24). Les stations de Bakel,

Saldé et Podor sont sur le Sénégal; les sites de Ngoui et Guédé sur un défluent, le Doué, séparé du fleuve Sénégal par l'île Amorphil.

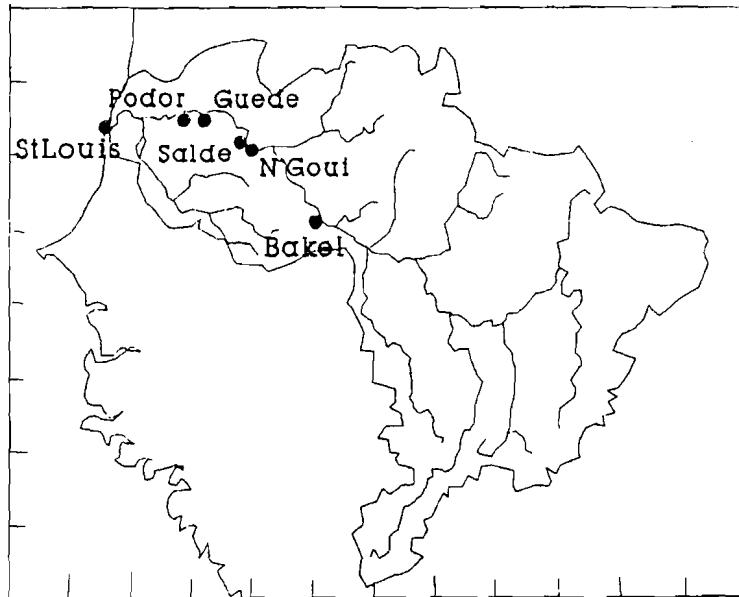


Fig. 24 - Situation des stations de prélèvements sur le Sénégal

A - EVOLUTION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE MENSUELLE DES EAUX

1. Qualité des eaux du Sénégal à Bakel

Le Tableau XXIX et la figure 25 précisent l'évolution mensuelle de la minéralisation totale et des différents éléments en solution dans les eaux du Sénégal à Bakel. Le lecteur pourra se reporter aussi à la figure 13 qui illustre les variations des concentrations au cours de la seule année 1981 en fonction des écoulements.

Tableau XXIX

Composition chimique moyenne des eaux du Sénégal à Bakel (en mg/l)

	Cl-	SO4-	HCO3-	Ca++	Mg++	K+	Na+	SiO2	Miner.
JANVIER	2,10	2,20	34,30	4,60	2,80	1,20	2,60	9,20	59,00
FEVRIER	2,10	2,30	38,20	5,00	3,10	1,20	2,90	9,20	64,00
MARS	2,70	2,50	43,90	5,60	3,70	2,10	3,50	9,30	73,30
AVRIL	3,10	2,60	49,90	6,10	4,30	2,40	4,00	9,50	81,90
MAI	3,40	2,70	54,70	6,60	4,80	2,60	4,50	10,10	89,40
JUIN	2,90	2,20	46,50	5,80	4,00	3,20	3,80	8,30	76,70
JUILLET	1,70	1,80	26,20	3,80	2,00	2,70	1,90	7,30	47,40
AOUT	1,40	1,60	22,70	3,40	1,70	2,10	1,60	8,10	42,60
SEPTEMBRE	1,40	1,60	22,10	3,30	1,70	1,50	1,50	8,50	41,60
OCTOBRE	1,50	1,70	24,20	3,60	1,90	1,30	1,70	8,80	44,70
NOVEMBRE	1,70	1,90	28,00	4,00	2,20	1,20	2,00	8,90	49,90
DECEMBRE	2,00	2,00	31,50	4,30	2,50	1,20	2,30	9,10	54,90
Moyenne	2,17	2,09	35,18	4,68	2,89	1,89	2,69	8,86	60,45

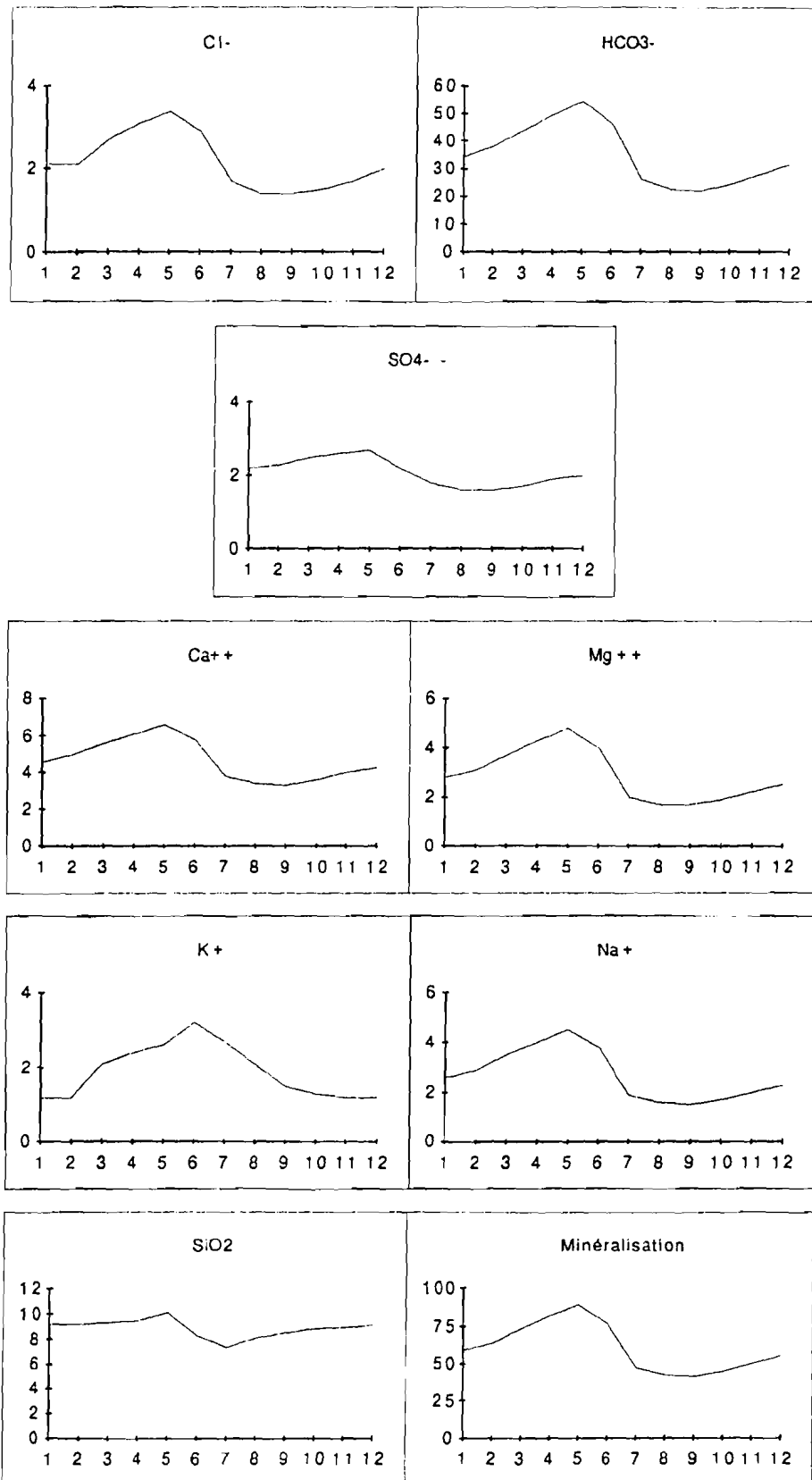


Fig. 25 - Variations mensuelles de la minéralisation et des éléments dissous dans les eaux du Sénégal à Bakel (mg/l)

La première remarque est qu'il s'agit d'eaux douces extrêmement diluées (en moyenne 60 mg/l): la minéralisation totale n'évolue que dans un rapport de 2 en cours d'année (de 41 à 87 mg/l). En réalité, les concentrations devraient être pondérées par l'importance des écoulements ce qui bien évidemment donnerait des taux de concentrations plus faibles. Cette procédure entreprise par ORANGE (1990) donne une concentration moyenne de 43 mg/l pour le Sénégal à Bakel. Notre souci étant ici de suivre l'évolution spatiale des éléments en solution dans toute la vallée, cette méthode ne pouvait pas être utilisée faute de connaître l'importance des écoulements aux autres sites.

Les concentrations moyennes mensuelles montrent que mai est le mois où les eaux sont les plus "concentrées" pour tous les éléments à l'exception du potassium, dont les teneurs sont maximales en juin en même temps que la charge solide particulaire. Les eaux les plus diluées apparaissent en septembre. Ce type d'évolution 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.

2. Qualité des eaux du Sénégal à Saldé

La concentration moyenne en solution est de 62 mg/l (Tableau XXX). Il n'y a pas de variations significatives entre Bakel et Saldé dans les teneurs de chaque élément. L'évolution dans le temps (Fig. 26) montre que les eaux les plus concentrées apparaissent en juin (sauf pour la silice dont le comportement ne semble obéir à aucune règle précise : maximum inexplicable en décembre-janvier). Notons enfin que les eaux présentent un caractère basique avec des valeurs de pH qui oscillent entre 7,3 et 7,9

Tableau XXX

Composition chimique moyenne des eaux du Sénégal à Saldé (en mg/l)

	pH	EC 25°	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	SiO ₂	Miner.
JANVIER	7,5	51,89	1,49		31,92	4,47	2,77	1,60	1,71	8,27	52,23
FEVRIER	7,5	59,50	1,46		31,49	4,98	3,18	1,61	2,07	8,24	53,03
MARS	7,6	67,86	1,52		42,87	7,23	3,54	1,62	2,37	7,60	66,75
AVRIL	7,5	81,67	2,43		48,29	6,93	4,50	2,02	3,41	6,57	74,15
MAI	7,9	106,50	1,64		57,19	9,83	5,50	2,34	3,25	5,73	85,48
JUIN	7,9	144,90	3,30		65,83	11,82	7,28	3,33	4,74	5,94	122,24
JUILLET	7,6	87,58	2,04		49,77	6,93	3,79	3,02	3,35	4,93	73,93
AOUT	7,3	41,30	1,10		22,88	3,50	1,70	1,87	1,52	5,82	38,39
SEPTEMBRE	7,4	44,89	1,42		24,94	3,69	3,90	1,65	1,74	6,31	43,55
OCTOBRE	7,5	43,55	1,19		24,95	4,02	1,90	1,49	1,76	6,90	42,21
NOVEMBRE	7,6	46,22	1,07		28,74	4,47	2,32	1,43	1,56	7,38	45,97
DECEMBRE	7,5	47,13	1,11		29,13	5,93	2,51	1,46	1,64	8,14	47,92
Moyenne	7,6	68,58	1,65		39,83	5,98	3,57	1,95	2,43	6,82	62,24

3. Qualité des eaux du Sénégal à Podor

La minéralisation moyenne des eaux du Sénégal à Podor est de 55 mg/l (Tableau XXXI). Les concentrations maximales se présentent en juillet sauf pour le chlore (en décembre) et la silice (en avril). L'évolution des teneurs en chlore (Fig. 27) est peut être à corrélérer avec l'apport des pluies et la proximité de l'océan.

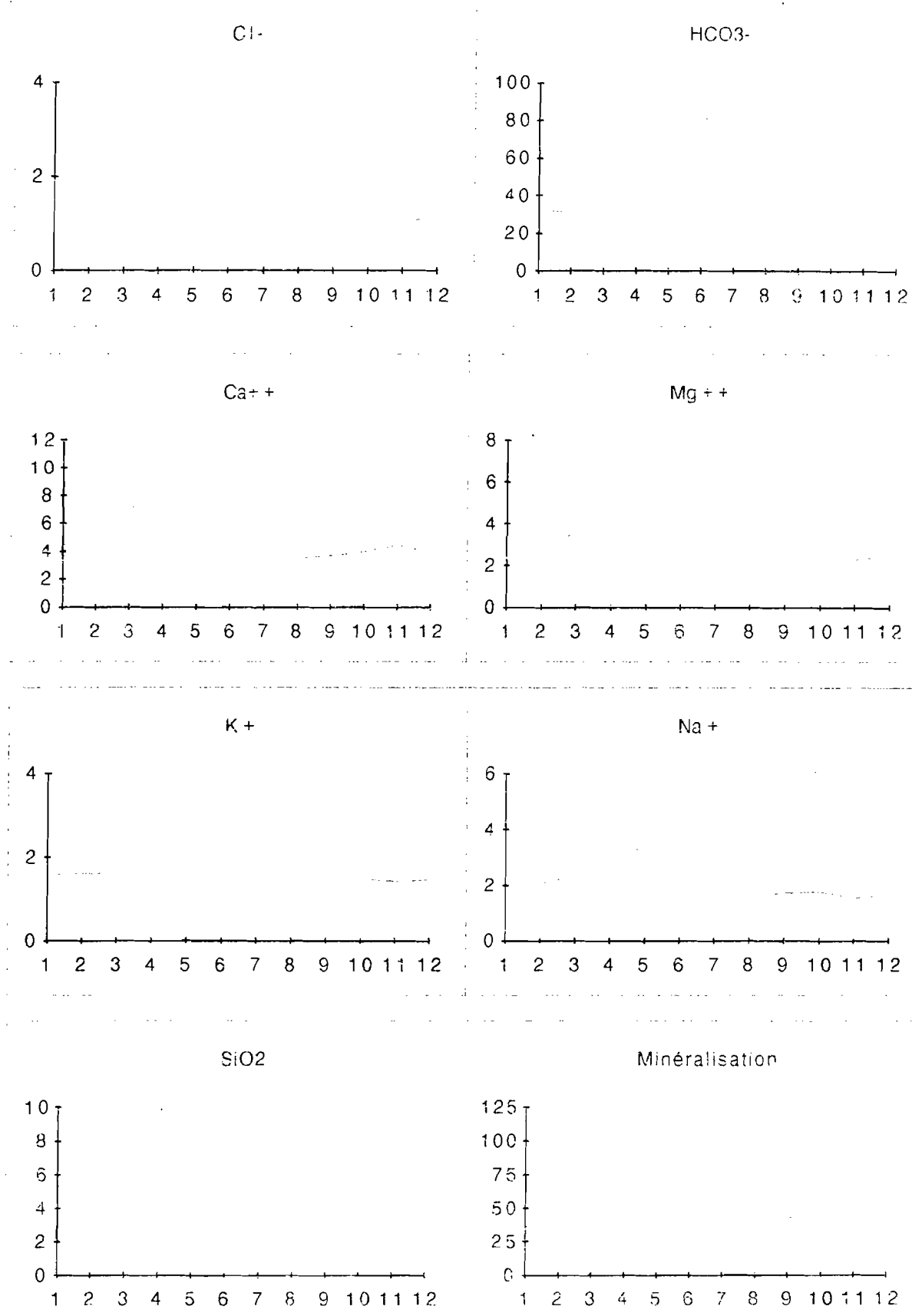


Fig. 26 - Variations mensuelles de la minéralisation et des éléments dissous dans les eaux du Sénégal à Saldé (mg/l)

Tableau XXXI

Composition chimique moyenne des eaux du Sénégal à Podor (en mg/l)

	pH	EC 25°	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	SiO ₂	Miner.
JANVIER	7,5	55,50	0,89		31,95	4,33	2,51	1,61	1,75	8,60	51,64
FEVRIER	7,5	61,63	0,98		34,01	4,80	2,80	1,46	1,73	8,65	54,43
MARS	7,3	60,35	1,20		32,12	4,35	2,73	1,44	2,09	9,18	53,11
AVRIL	7,3	68,45	2,04		38,74	6,09	2,91	1,56	2,45	9,24	63,03
MAI	7,5	78,71	3,34		40,11	6,59	3,20	1,81	3,41	7,96	66,42
JUIN	7,7	78,46	3,66		40,59	6,31	3,59	1,74	3,70	5,30	64,89
JUILLET	7,6	90,53	3,22		48,12	7,07	3,93	2,41	3,83	5,25	73,83
AOUT	7,3	45,00	1,45		23,24	3,60	1,70	1,99	1,90	5,54	39,42
SEPTEMBRE	7,3	38,50	1,24		21,58	3,33	1,46	1,66	1,64	6,03	36,94
OCTOBRE	7,4	48,86	0,96		26,67	4,63	1,91	1,67	2,07	5,96	43,87
NOVEMBRE	7,4	52,22	1,34		29,28	4,69	2,15	1,73	1,56	7,44	48,19
DECEMBRE	7,5	75,78	4,89		34,23	6,31	2,69	1,52	3,56	7,39	60,58
Moyenne	7,4	62,83	2,10		33,39	5,18	2,83	1,72	2,47	7,21	54,70

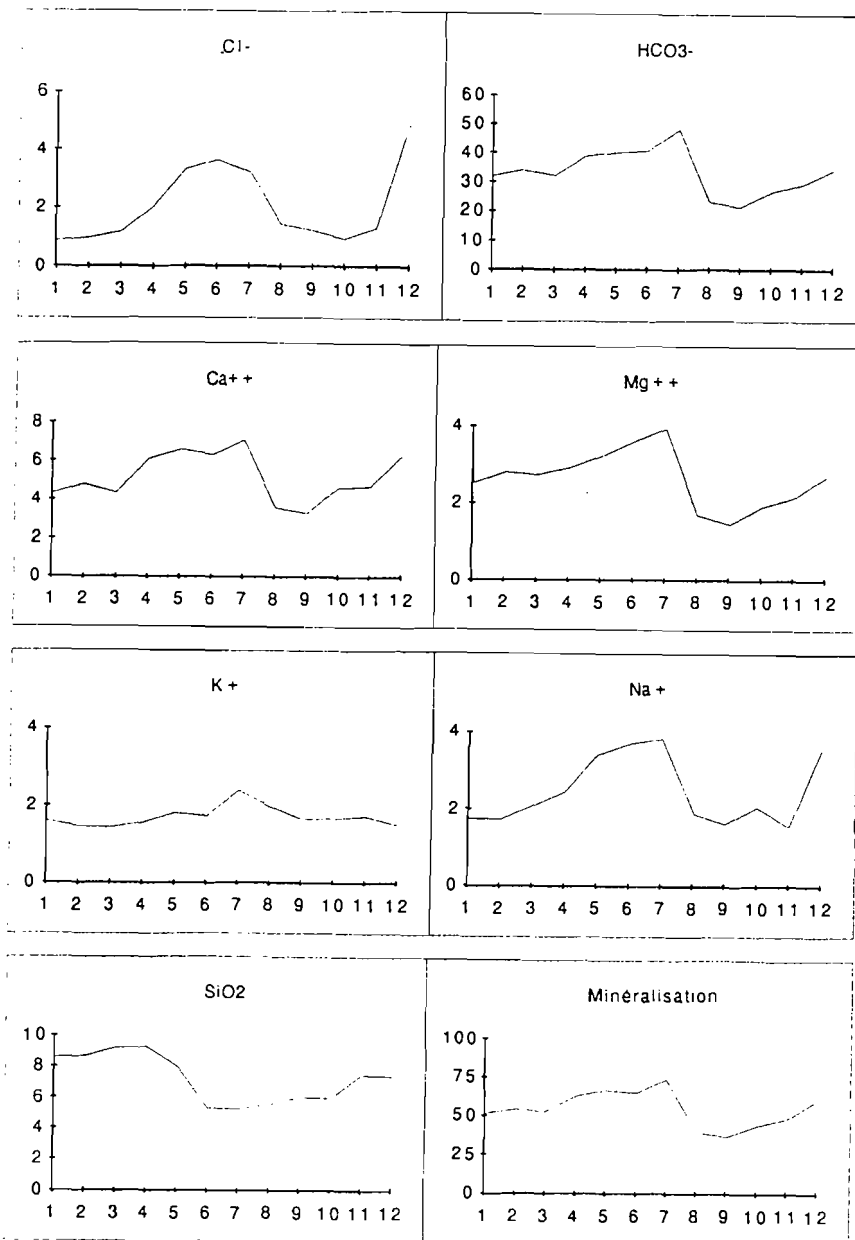


Fig. 27 - Variations mensuelles de la minéralisation et des éléments dissous dans les eaux du Sénégal à Podor (mg/l)

4. Qualité des eaux du Doué à Ngoui

La minéralisation moyenne des eaux du Doué à Ngoui est de 62 mg/l (Tableau XXXII). L'apparition des concentrations maximales pour les différents éléments dissous se produit en général en juin (chlore, bicarbonate, calcium, potassium, magnésium et sodium), en février pour la silice dissoute (Fig. 28). Les différences de teneurs avec la station proche de Saldé sur le Sénégal sont très faibles. Les eaux sont faiblement basiques, le pH oscille entre des valeurs de 7,3 et 7,8.

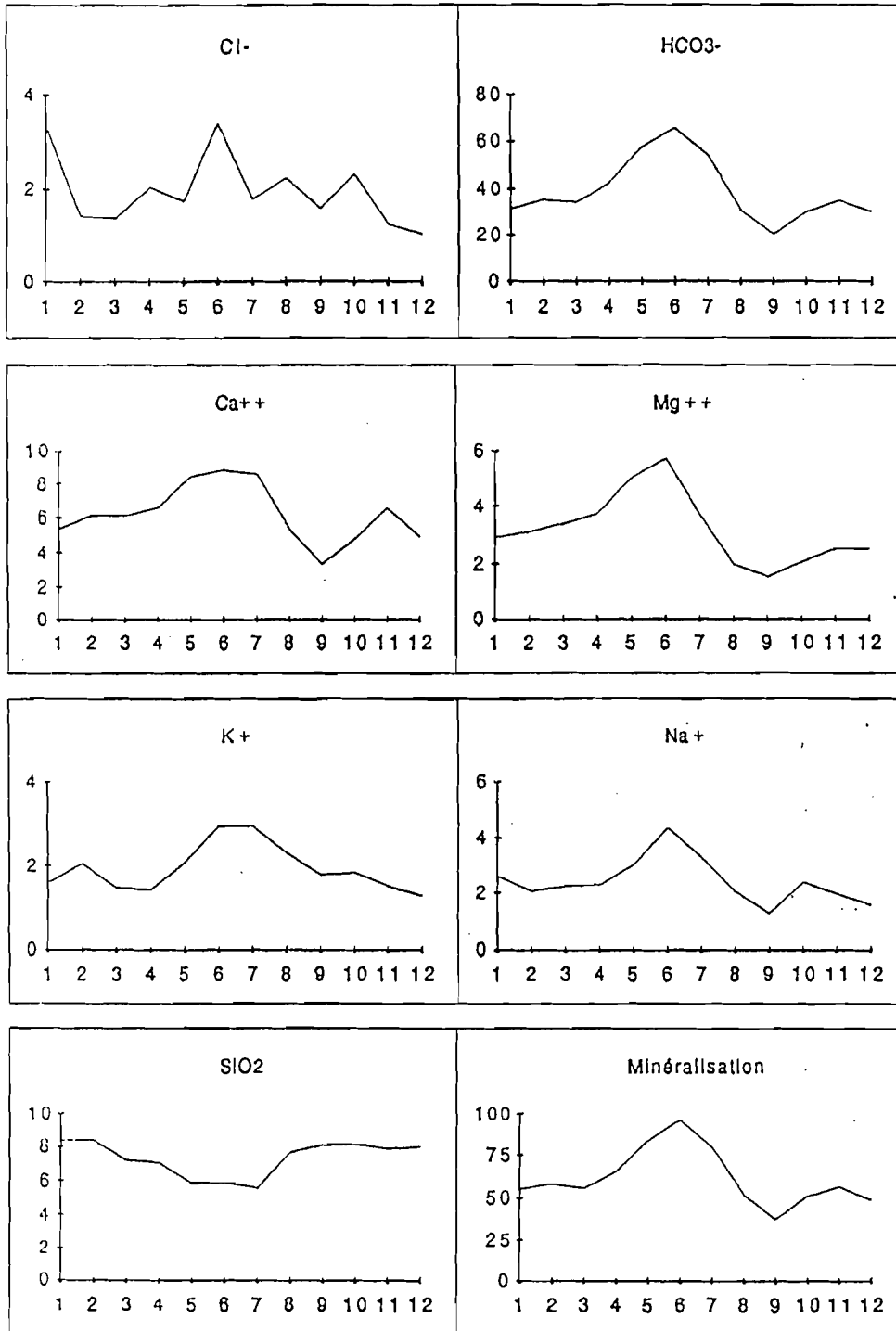


Fig. 28 - Variations mensuelles de la minéralisation et des éléments dissous dans les eaux du Doué à Ngoui (mg/l)

Tableau XXXII

Composition chimique moyenne des eaux du Doué à Ngoui (en mg/l)

	pH	EC 25°	Cl-	SO4- -	HCO3-	Ca++	Mg++	K+	Na+	SiO2	Miner.
JANVIER	7,5	60,63	3,33		31,39	5,38	2,93	1,59	2,62	8,36	55,60
FEVRIER	7,5	63,13	1,42		35,30	6,15	3,12	2,05	2,07	8,38	58,49
MARS	7,4	67,00	1,38		34,16	6,10	3,39	1,46	2,24	7,19	55,92
AVRIL	7,6	70,88	2,04		42,39	6,58	3,71	1,41	2,30	7,04	65,47
MAI	7,8	95,00	1,74		57,54	8,47	5,03	2,08	3,02	5,84	83,72
JUIN	7,7	112,67	3,39		65,54	8,84	5,74	2,95	4,37	5,92	96,75
JUILLET	7,7	96,14	1,78		54,20	8,60	3,68	2,95	3,29	5,60	80,10
AOUT	7,3	52,13	2,24		30,63	5,32	1,99	2,31	2,05	7,68	52,22
SEPTEMBRE	7,3	37,22	1,59		20,33	3,35	1,57	1,78	1,26	8,11	37,99
OCTOBRE	7,5	51,67	2,31		29,99	4,77	2,09	1,82	2,38	8,17	51,53
NOVEMBRE	7,4	57,00	1,24		34,97	6,60	2,53	1,50	1,96	7,87	56,67
DECEMBRE	7,5	48,44	1,03		30,03	4,91	2,50	1,26	1,56	7,98	49,27
Moyenne	7,5	67,66	1,96		38,87	6,26	3,19	1,93	2,43	7,35	61,98

5. Qualité chimique des eaux du Doué à Guédé

La minéralisation moyenne des eaux du Doué à Guédé est 56 mg/l (Tableau XXXIII) et légèrement inférieure à celle observée à Ngoui. Cette diminution de la charge en solution paraît difficilement explicable. Les teneurs les plus élevées sont en général observées en juin (sauf pour la silice et le potassium (Fig. 29). Le comportement du chlore est tout à fait singulier avec des teneurs particulièrement élevées de mai à juillet. Les pH indiquent encore ici des eaux faiblement basiques.

Tableau XXXIII

Composition chimique moyenne des eaux du Doué à Guédé (en mg/l)

	pH	EC 25°	Cl-	SO4- -	HCO3-	Ca++	Mg++	K+	Na+	SiO2	Miner.
JANVIER	7,4	51,2	0,43		30,07	4,32	2,59	1,17	1,54	8,98	49,10
FEVRIER	7,5	67,5	0,46		33,92	5,26	2,87	1,48	1,93	8,31	54,23
MARS	7,4	66,0	0,51		34,97	5,31	3,12	1,52	1,94	8,20	55,58
AVRIL	7,3	70,7	0,43		42,21	6,40	3,50	1,44	2,16	7,94	64,09
MAI	7,7	100,1	6,78		49,61	8,27	4,23	1,82	5,11	7,54	83,37
JUIN	7,8	116,1	9,87		52,16	8,38	4,68	2,11	6,21	6,93	90,33
JUILLET	7,6	92,8	5,05		43,69	7,25	4,05	2,31	4,33	7,12	73,79
AOUT	7,2	43,8	0,71		20,37	3,02	1,67	1,60	1,56	6,53	35,48
SEPTEMBRE	7,3	36,7	0,82		19,88	2,87	1,50	1,53	1,48	6,02	33,88
OCTOBRE	7,4	45,2	1,07		24,91	3,75	1,98	1,69	1,94	7,36	42,68
NOVEMBRE	7,4	47,9	0,58		28,67	4,22	2,14	1,52	1,71	7,09	45,94
DECEMBRE	7,4	50,2	0,50		29,48	4,28	2,41	1,33	1,48	8,33	47,81
Moyenne	7,5	65,7	2,25		34,16	5,28	2,90	1,63	2,62	7,53	56,36

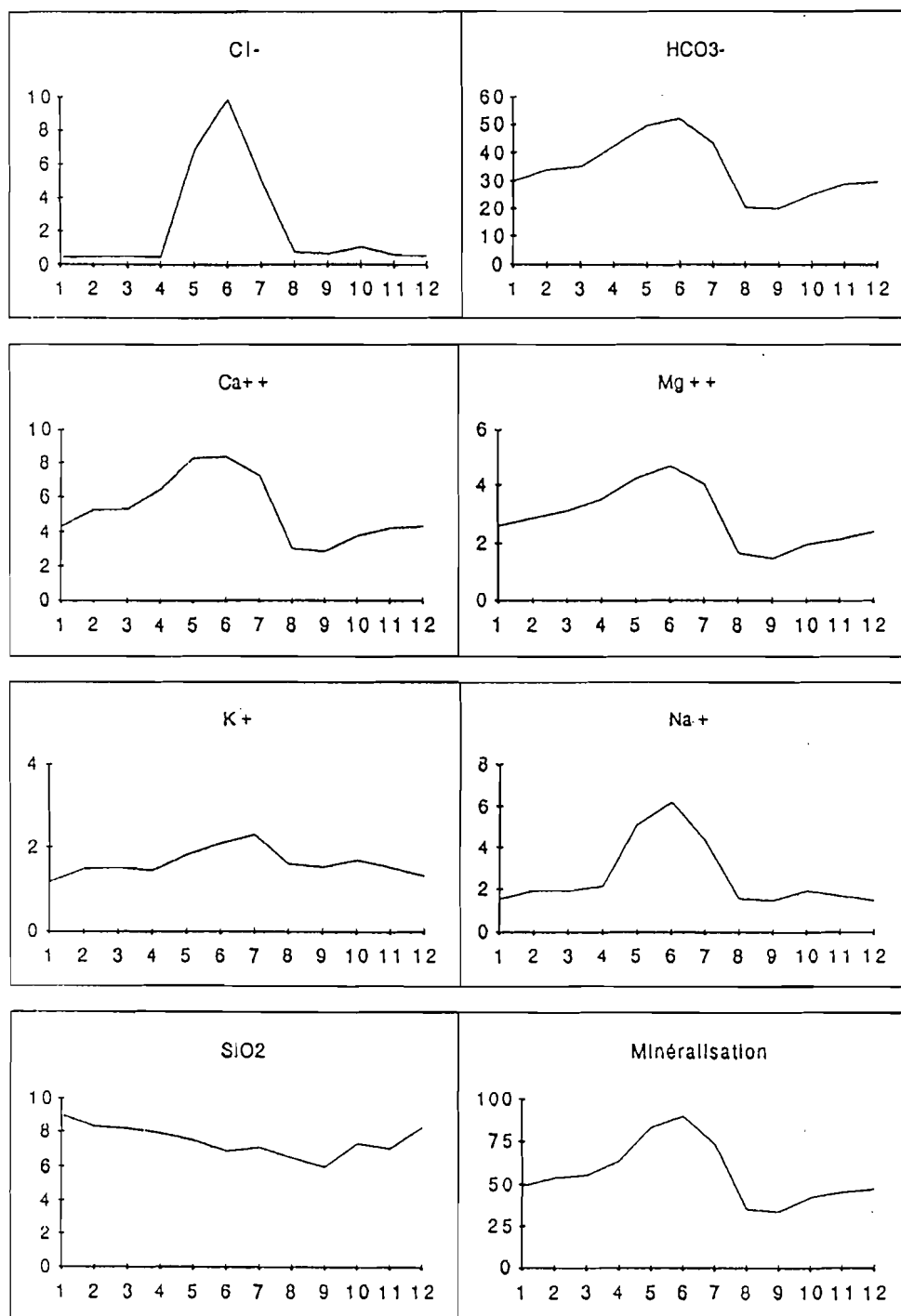


Fig. 29 - Variations mensuelles de la minéralisation et des éléments dissous dans les eaux du Doué à Guédé (mg/l)

B - EVOLUTION SPATIOTEMPORELLE DE LA MINERALISATION DES EAUX DU SENEGAL (DE BAKEL A PODOR)

Les figures 30, 31 et 32 illustrent l'évolution spatiotemporelle de la qualité chimique des eaux dans la moyenne vallée. Le Tableau XXXIV précise les compositions moyennes annuelles des eaux du Sénégal et du Doué aux cinq stations étudiées.

Tableau XXXIV

Composition chimique moyenne des eaux du Sénégal (mg/l)

	BAKEL	SALDE	PODOR	NGOUI	GUÉDÉ
pH		7,6	7,4	7,5	7,5
EC 25°		68,6	62,8	67,7	65,7
Cl	2,2	1,7	2,1	2,0	2,3
SO4	2,1				
HCO3	35,2	39,8	33,4	38,9	34,2
Ca	4,7	6,0	5,2	6,3	5,3
Mg	2,9	3,6	2,6	3,2	2,9
K	1,9	2,0	1,7	1,9	1,6
Na	2,7	2,4	2,5	2,4	2,6
SiO2	8,9	6,8	7,2	7,4	7,5
Min. gl.	60,5	62,2	54,7	62,0	56,4

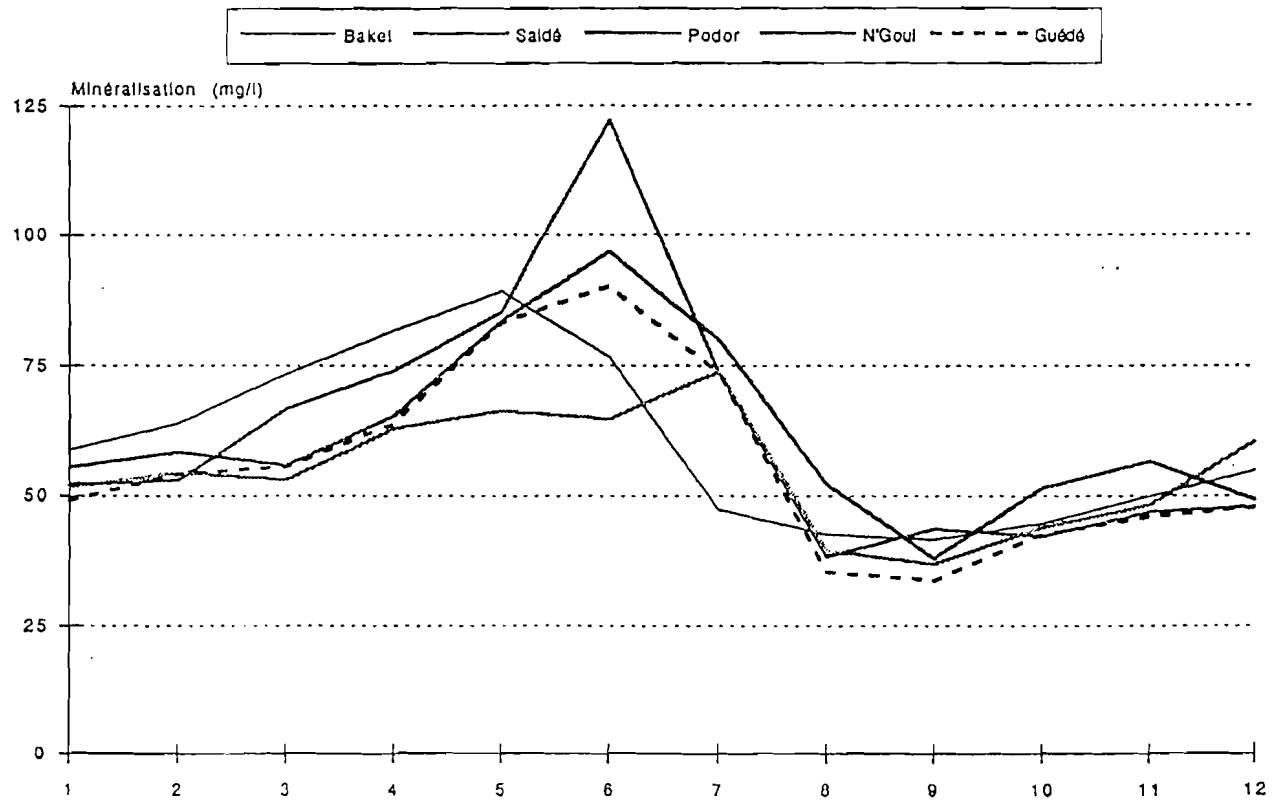


Fig. 30 - Evolution spatiotemporelle de la minéralisation des eaux du Sénégal et du Doué

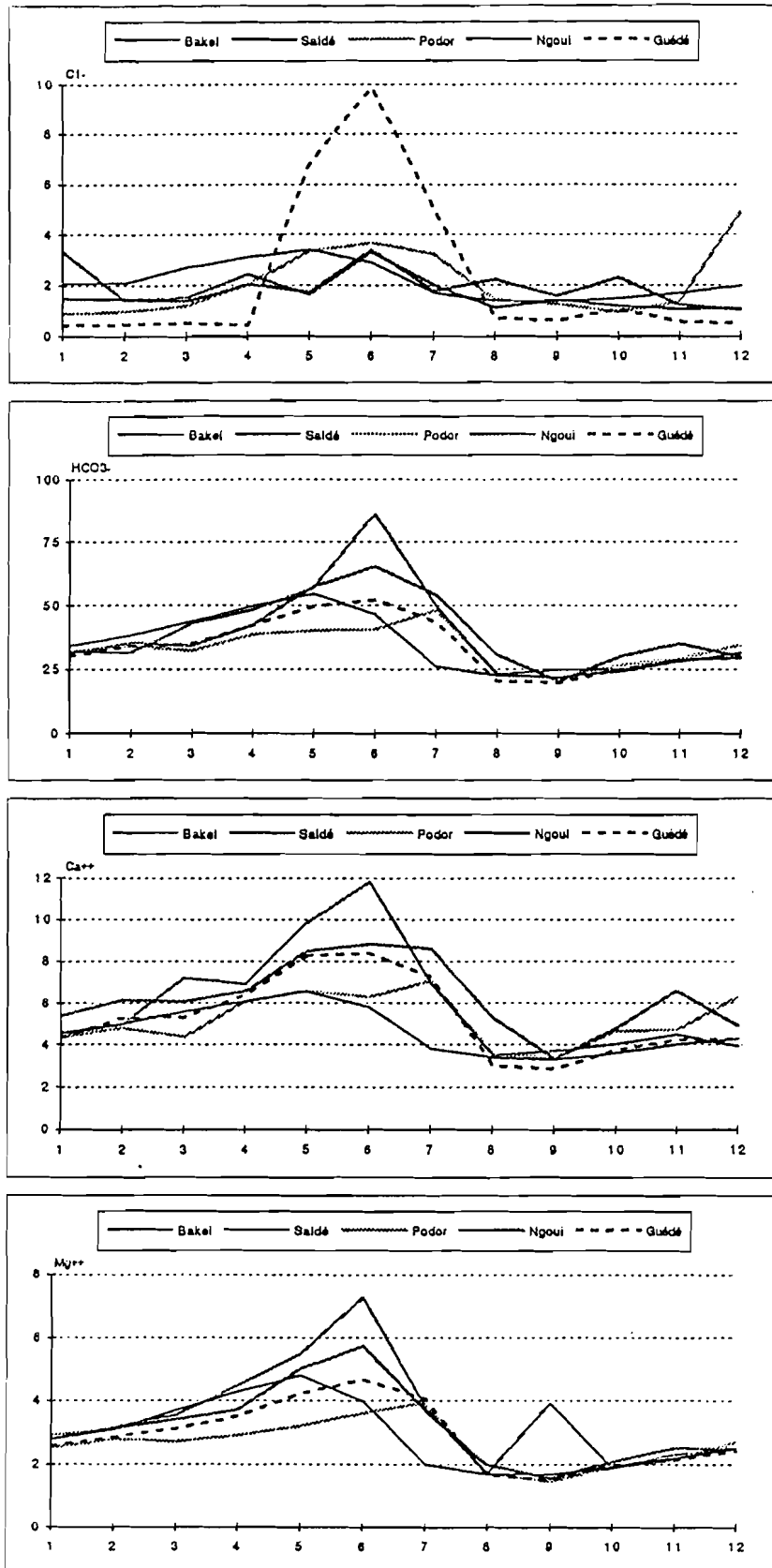


Fig. 31 - Evolution spatiotemporelle de la qualité chimique des eaux du Sénégal et du Doué (Cl, HCO₃, Ca et Mg)

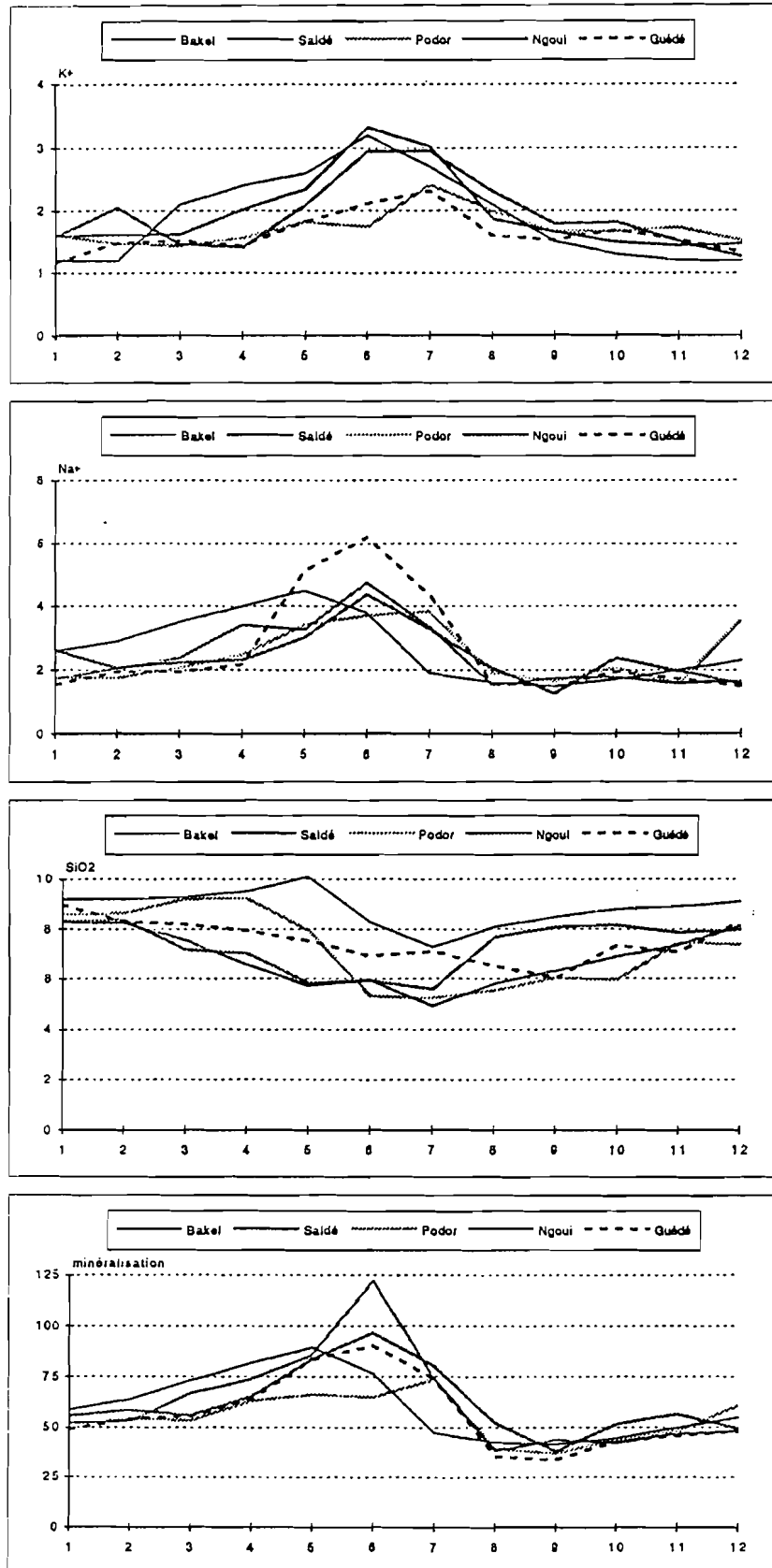


Fig. 32 - Evolution spatiotemporelle de la qualité chimique des eaux du Sénégal et du Doué (K, Na, SiO₂, minéralisation)

En conclusion de ce chapitre consacré à la qualité des eaux du Sénégal dans sa moyenne vallée on peut faire les remarques suivantes :

- il n'y a aucune évolution vraiment significative entre l'amont et l'aval. Ceci est vrai au niveau du pH, de la minéralisation totale et de chacun des éléments qui la constitue,

- le décalage dans le temps des concentrations maximales correspond semble t'il à la simple durée de la propagation de la nouvelle crue,

- les eaux du Sénégal sont extrêmement diluées (teneurs moyennes de l'ordre de 60 mg/l) et légèrement basiques (pH moyen de 7,5). Les composantes essentielles de la charge dissoute sont les bicarbonates et la silice.

Ces résultats montrent que la multiplication des programmes de recherches pour le contrôle de la qualité chimique (du moins en ce qui concerne les éléments majeurs) des eaux du Sénégal n'apportera aucune information nouvelle sur une quelconque évolution. Ce langage ne peut être tenu au niveau des éléments à l'état "traces" qui peuvent être des marqueurs de l'éventuelle dégradation de l'environnement

Cette étude sur la qualité des eaux du Sénégal se traduit donc par le constat suivant : une remarquable constance dans le temps et dans l'espace. La compréhension des mécanismes qui explicitent les liaisons entre les eaux de surface et les eaux souterraines (voir chapitre VII) ne peut qu'en être facilitée.

Jean Yves GAC et Didier ORANGE (le 27 octobre 1993)

Gac Jean-Yves, Orange Didier (1993)

Flux de matières dissoutes et bilan de l'altération chimique des eaux du fleuve Sénégal ; géodynamique actuelle des paysages amont ; évolution de la qualité chimique des eaux du fleuve Sénégal

In : Gac Jean-Yves (ed.). *EQUESEN (Environnement et Qualité des Eaux du Sénégal) : rapport de synthèse*

Dakar : ORSTOM, 69 p. multigr.