



Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération

FLEUVE SENÉGAL

PLAN DIRECTEUR DE LA HAUTE VALLEE

HYDROLOGIE - CLIMATOLOGIE

RAPPORT N°2

J.P. LAMAGÁT

J. ALBERGEL

DAKAR, Janv. 1990

LES FACTEURS CLIMATIQUES DU HAUT BASSIN DU FLEUVE SENEGAL

1. GENERALITES

Le bassin du SENEGAL supérieur, situé entre les régions tropicales et les confins du SAHARA, présente une grande diversité climatique. Son climat s'explique par les déplacements du front intertropical boréal (FIT) qui sépare l'air tropical (HARMATTAN) et l'air équatorial (Mousson). L'air continental caractérisé par une faible humidité est véhiculé par des vents de secteur N-E. L'air équatorial très humide, est véhiculé par des vents faibles de secteur S-W.

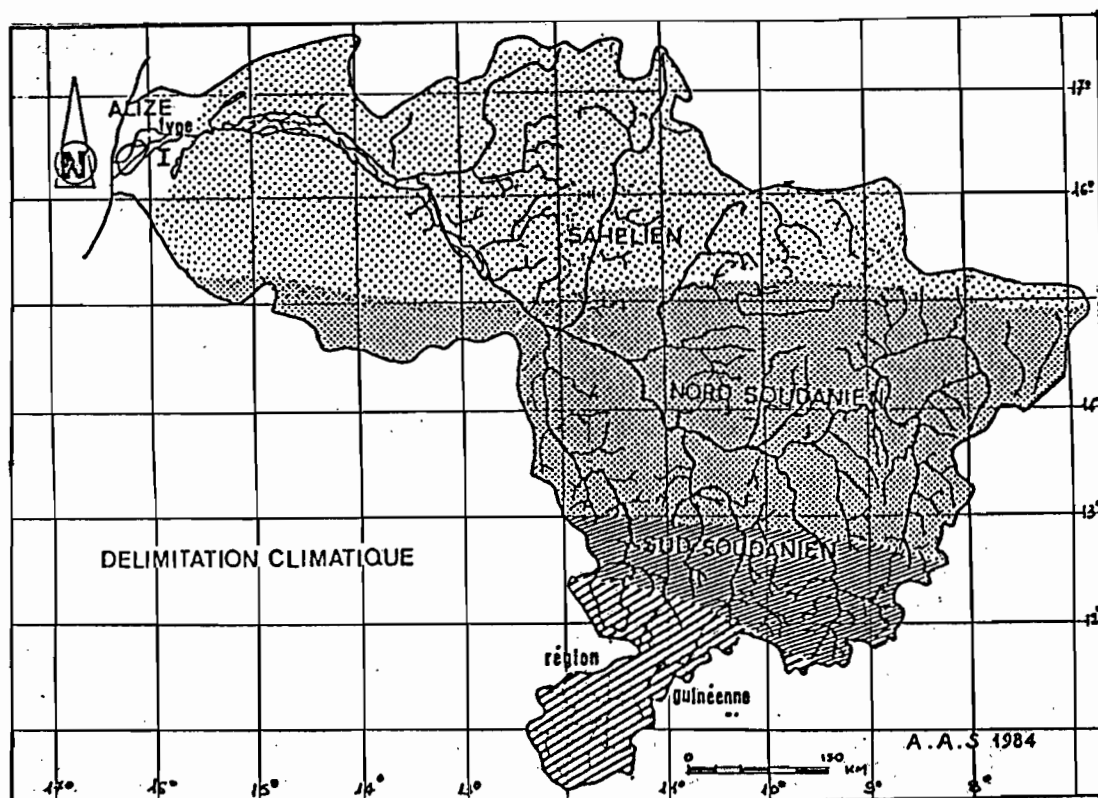
Pendant les quatre premiers mois de l'année, le FIT reste en dessous de la latitude 12° N, l'Harmattan souffle de façon permanente et la sécheresse règne sur tout le bassin.

Au début du mois de MAI, le FIT progresse vers le nord et la mousson pénètre sur le bassin. Sa progression sur un sol chauffé par l'harmattan aboutit à la formation de tornades. La surface du bassin, intéressé par les précipitations croît au fur et à mesure que le FIT atteint des latitudes plus élevées. Au mois d'août, le FIT atteint sa position la plus septentrionale vers la latitude 22°, la mousson domine partout et il pleut sur l'ensemble du bassin. Puis le mouvement du FIT s'inverse et la mousson reflue vers le sud. Les pluies sont encore abondantes en septembre car le régime de la mousson prolonge la saison des pluies tropicales. Il cesse de pleuvoir vers la mi-octobre. En novembre, l'alizé apporte un peu de fraîcheur, mais l'harmattan redevient prédominant dès décembre.

Les climatologues distinguent quatre zones climatiques dans le bassin du SENEGAL à partir de critères aérologiques, chorologiques et physionomiques intégrés (fig. 1.1): le climat sahélien entre les isohyètes 200 et 500 mm, le climat nord soudanien entre les isohyètes 500 et 800 mm, le climat sud soudanien entre les isohyètes 800 et 1300 mm et le climat guinéen au sud de l'isohyète 1300mm.

Les hydrologues regroupent la zone sahélienne et la zone nord soudanienne sous la même appellation de domaine sahélien. Dans cette étude nous distinguerons le domaine sahélien au nord de l'isohyète 800, le domaine soudanien entre les isohyètes 800 et 1300 mm et le domaine guinéen au sud de l'isohyète 1300mm.

Fig: 1 Les climats du bassin versant du fleuve SENEGAL



2. REGIME DES VENTS

Le régime des vents découle de la circulation générale de l'atmosphère dans la zone intertropicale caractérisée par la présence de deux courants : un de secteur N-E (Harmattan), l'autre de secteur S-W (Mousson).

Les vitesses et directions au sol du vent sont mesurées à six stations climatologiques : KAYES, KENIEBA, KITA, NIORO, LABE et SIGUIRI. Nous présenterons ici l'analyse des vents réalisée par ROCHETTE sur les stations de KAYES, KENIEBA et LABE. La régularité du régime des vents permet de limiter l'étude à ces trois stations représentant chacun des grands climats présentés sur la carte 1.1.

2.1. Vitesse des vents

Les vitesses sont mesurées 3 fois par jour (6 h 00, 12 h 00, 18 h 00). Le tableau 2.1.1 donne, pour les 3 stations considérées, les fréquences observées pour diverses classes de vitesse et les vitesses moyennes du vent. On remarque la fréquence très faible des vents supérieurs à 15 m/s.

Tableau 2.1.1 Vitesse des vents

Stations	<1m/s	2<v<4	5<v<6	7<v<14	>14
KAYES	27.8	61.8	8.6	2.35	.05
KENIEBA	54.2	44.0	1.1	0.7	0
LABE	38.3	43.5	14.1	4.07	0.03

2.2 Direction des vents

Les cartes 2.2.1 et 2.2.2 montrent les roses des vents moyennes relatives à la saison sèche et à la saison des pluies pour les trois climats du haut bassin. Sur les 8 directions de la rose des vents est portée une longueur proportionnelle à la fréquence provenant de cette direction, indiquée en pourcentage au nombre total d'observations. La différence entre 100 et la somme des pourcentages suivant toutes les directions donne la fréquence des calmes.

On remarque deux tendances dans le régime des vents:

- une nette influence saharienne en saison sèche surtout à KAYES et à LABE
- une influence guinéenne en saison des pluies.

On note une dispersion des vents assez forte en saison sèche à KENIEBA et en saison des pluies à LABE.

Tableau 2.2.1 Direction des vents

Stations	Saison sèche		Saison des pluies	
	Vent dominant	Intervalle	Vent dominant	Intervalle
KAYES	E	NE-SE	W	SW-NW
KENIEBA	NE	SE-NW	W	SW-NW
LABE	E	NE-SE	SW	SE-NW

Des données sur les vents en altitude observés par ballon sondage existent pour la station de KAYES. Leur exploitation dépassant le cadre de cette étude le lecteur intéressé peut se référer à l'étude du climat de LEROUX (1980) pour information.

Fig 2.2.1 Roses des vents en saison sèche

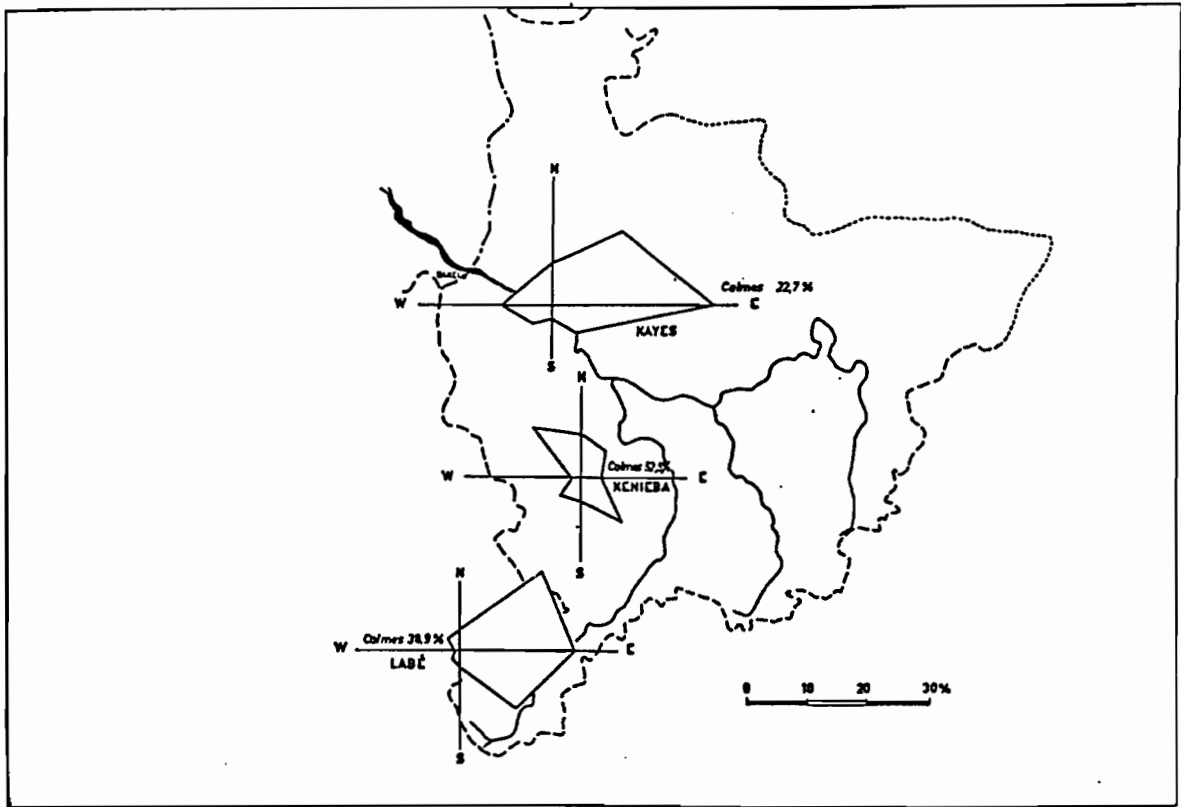
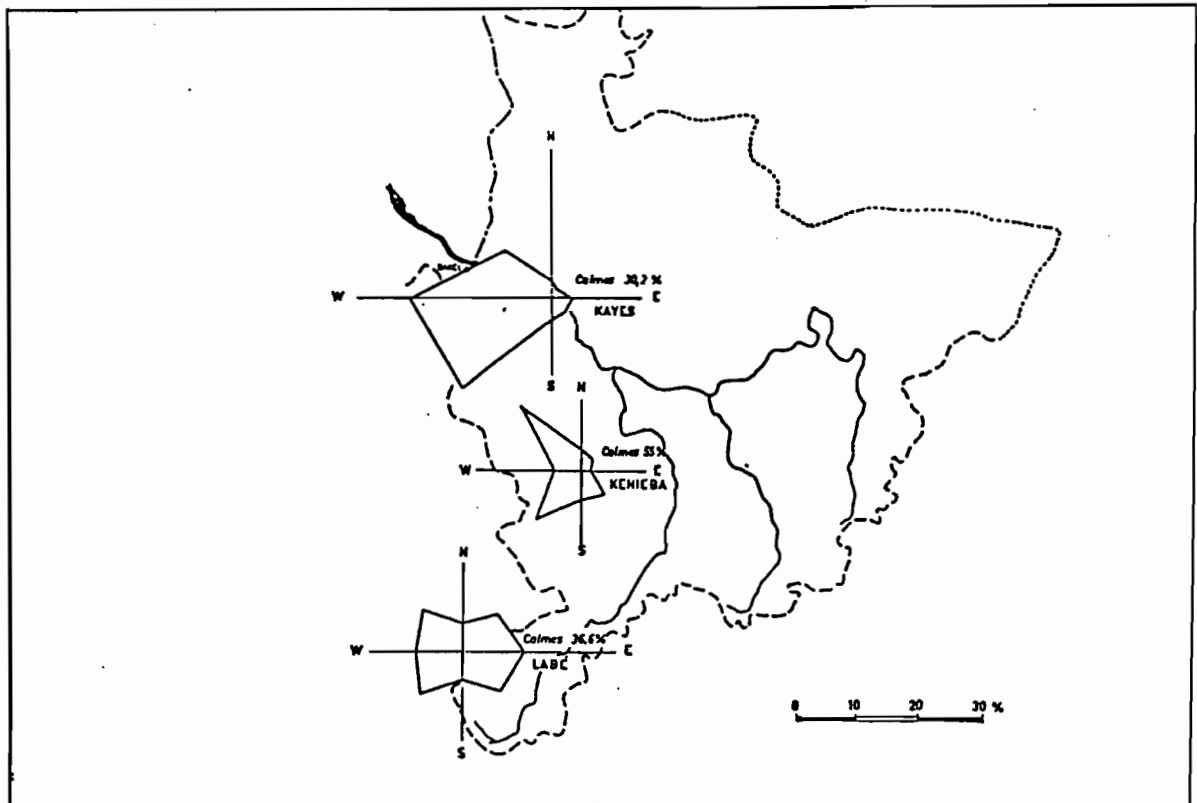


Fig. 2.2.2 Roses des vents en saison humide



3. LES FACTEURS THERMIQUES ET L'EVAPORATION

3.1 Les températures et l'évaporation PICHE

Le tableau 3.1 donne les valeurs des facteurs thermiques mesurés en station climatologique.

- Tx = Moyenne mensuelle des températures maximales journalières
- Tn = Moyenne mensuelle des températures minimales journalières
- Tm = Température moyenne mensuelle calculée par le rapport $(Tx+Tn)/2$
- Am = écart diurne moyen mensuel donné par la différence Tx-Tn
- Evp = évaporation Piche, moyenne mensuelle des valeurs journalières

La comparaison de moyennes mensuelles de ces paramètres calculés sur des périodes plus ou moins longues ne montre pas la nécessité de leur réactualisation. Nous reprenons ici les valeurs calculées par le Dr A.A. SOW (étude de 1980) après les avoir comparées à celles données dans la monographie de ROCHETTE (étude de 1964) et celles données dans le rapport SENEGAL CONSULT (étude de 1970)

Tableau 3.1 Les facteurs thermiques

Stations	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN
KIFFA 1970-1982													
Tx °C	31	33	36	40	42	42	39	37	38	39	35	31	37
Tm °C	22	25	28	32	34	36	33	31	32	31	27	23	29
Tn °C	14	16	20	23	27	29	27	25	26	24	19	16	22
Am °C	17	17	15	17	15	13	12	11	12	15	16	15	15
KAYES 1941-1970													
Tx °C	34	37	40	42	42	38	33	32	33	36	37	33	36
Tm °C	25	28	31	34	35	32	29	28	28	29	29	25	29
Tn °C	17	20	22	25	28	26	24	23	29	23	20	17	22
Am °C	17	17	18	17	14	12	10	9	10	13	16	17	14
Evp mm*	272	291	373	386	392	257	118	73	69	126	201	240	233
NIORO SAHEL 1941 1970													
Tx °C	33	36	39	41	42	40	35	32	34	37	37	32	36
Tm °C	23	26	29	32	34	33	29	27	28	30	27	23	28
Tn °C	14	16	19	23	27	26	23	23	23	22	18	14	20
Am °C	20	20	20	18	16	14	11	9	11	15	19	19	16
Evp mm*	281	317	402	406	423	317	163	96	109	183	253	256	267
KITA 1955-1970													
Tx °C	34	37	38	40	38	34	31	30	31	33	35	33	34
Tm °C	26	29	31	33	32	29	26	27	26	27	27	26	28
Tn °C	19	22	24	26	26	23	22	21	21	21	19	18	22
Am °C	15	15	15	15	13	11	9	8	10	12	16	15	13
Evp mm*	269	287	344	304	233	140	74	48	49	75	177	242	187

Tableau 3.1 Les facteurs thermiques(suite)

Stations	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN
KENIEBA 1943-1964													
Tx °C	35	37	40	41	40	35	32	30	32	33	35	34	35
Tm °C	25	27	30	32	32	28	27	25	26	27	26	24	27
Tn °C	18	17	18	17	14	11	9	8	10	11	17	18	14
Am °C	18	17	18	17	14	11	9	8	10	11	17	18	14
Evp mm	241	263	292	273	281	116	66	49	51	71	118	180	162
LABE 1941-1970													
Tx °C	30	31	33	32	31	28	26	25	26	27	28	28	29
Tm °C	21	23	25	25	24	23	22	21	22	22	22	21	23
Tn °C	13	15	16	18	18	18	18	18	17	17	15	14	16
Am °C	17	16	17	14	13	10	8	7	9	10	13	14	12
Evp mm**	259	276	295	241	153	82	55	48	51	82	126	188	155

* période de calcul 1961-1970
 ** Période de calcul 1950-1957

La figure 3.1 montre que les variations mensuelles des températures maximales, minimales et moyennes sont à peu près similaires. Les maxima principaux sont enregistrés en saison sèche. Les maxima secondaires interviennent également en saison sèche (octobre en général). Les minima principaux sont observés en janvier-février, les minima secondaires interviennent toujours en saison humide et au mois d'août.

Cette évolution des températures ne suit donc pas l'évolution cosmique qui consacre un seul maximum d'été et un seul minimum d'hiver. Les températures commencent à baisser dès le début de la saison pluvieuse. Elles augmentent à nouveau après la saison humide et donnent des maxima secondaires en octobre - novembre. Les minima principaux interviennent avec l'hiver Boréal en janvier - février.

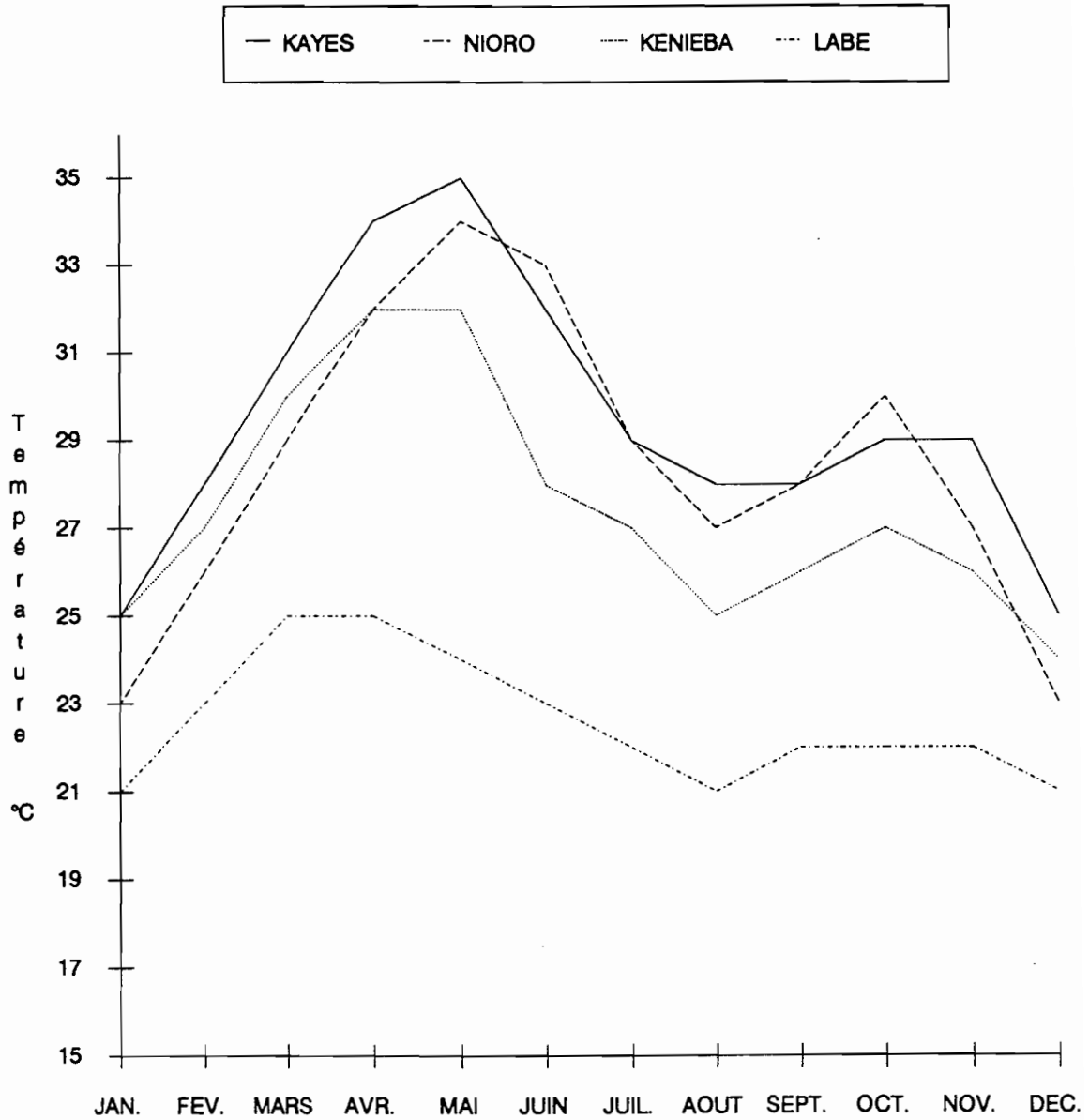
L'accroissement de la température de l'air du Sud vers le Nord du bassin s'explique par les variations de la saison pluvieuse en fonction de la latitude et par la diminution des altitudes.

L'évolution saisonnière des évaporations PICHE est similaire à celles des températures. Les plus fortes valeurs de l'évaporation PICHE correspondent aux mois de période sèche où les températures sont élevées. Les valeurs les plus faibles interviennent en période humide durant laquelle les températures baissent.

Les données de l'évaporation mesurée à l'appareil PICHE sont considérées en hydrologie comme des indications qualitatives sur l'intensité de l'évaporation potentielle.

Les données concernant l'évaporation sur bac sont très peu nombreuses et récentes (programme Agro-météorologique de l'AGRHYMET)

Fig. 3.1 Variations de la température moyenne mensuelle



3.2 L'humidité de l'air

L'analyse des données d'humidités relatives a été réalisée par ROCHETTE, (1974)

L'humidité relative de l'air présente un maximum à 6 h 00 et passe par un minimum à 12 h 00. Les humidités relatives moyennes relevées aux stations de KAYES, KENIEBA et LABE sont portées dans le tableau 3.2

Ux = moyenne des maxima journaliers

Un = moyenne des minima journaliers

M = humidité relative moyenne calculée par la formule :

$$M = (U_{08Hh} + U_{13h} + U_{18h} + U_X + U_N)/5$$

Tableau 3.2 Humidité relative moyenne en%

Stations	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN
KAYES 12 ans													
Ux	40	34	30	33	50	79	92	96	97	92	71	49	64
Un	13	10	8	10	17	37	56	64	59	43	22	16	30
M	24	20	17	20	32	57	73	79	78	67	44	30	45
KENIEBA 12 ANS													
Ux	58	51	48	54	72	92	98	99	99	98	94	78	78
Un	17	16	15	18	31	51	64	68	63	56	36	24	38
M	34	30	28	34	50	69	81	84	82	78	64	47	57
LABE 7 ans													
Ux	76	73	79	87	95	98	98	98	98	98	96	87	90
Un	21	20	20	27	42	58	65	68	64	59	43	30	43
M	43	42	45	54	68	79	83	85	84	80	69	54	66

Les moyennes annuelles les plus fortes s'observent en climat guinéen où elles dépassent 60%. Dans le centre et le nord du bassin elles descendent légèrement au dessous de 50%.

Le graphique 3.2 représente les variations mensuelles de l'humidité relative sous les 3 latitudes considérées.

Les valeurs mensuelles de l'humidité relative moyenne oscillent entre un minimum en saison sèche et un maximum en saison des pluies, en août.

Les maxima mensuels atteignent leurs plus fortes valeurs pendant la saison des pluies où ils dépassent partout 95%. Cependant, en climat GUINEEN (LABE) on relève un maximum de 98% pendant 5 mois consécutifs, tandis qu'à KAYES les valeurs maximales oscillent entre 79 et 97% de juin à octobre.

On voit d'après ces variations de l'humidité relative, que l'abaissement de la température nocturne en saison des pluies est suffisant pour provoquer l'apparition de la rosée sur l'ensemble du bassin.

Les minima mensuels atteignent leurs plus faibles valeurs en Février ou Mars (20% à LABE et moins de 10% à KAYES).

3.3 L'insolation

Les variations de la durée de l'insolation, exprimées en heure, aux trois stations de références figurent sur le graphique 3.3 et sont rassemblées sur le tableau 3.3. Les valeurs correspondantes proviennent de ROCHETTE (1974)

Fig. 3.2 Variations des humidités

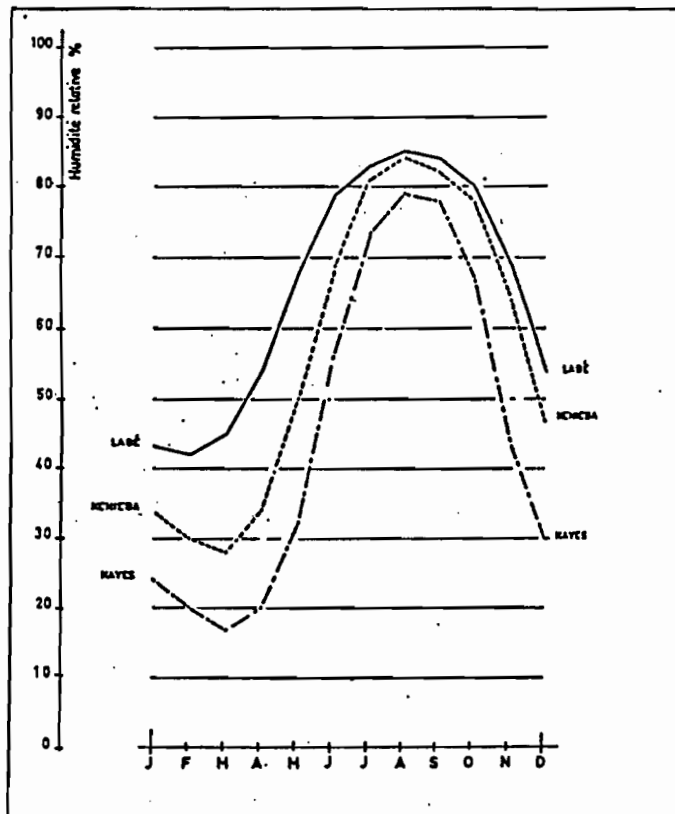


Fig 3.3 Durée de l'insolation

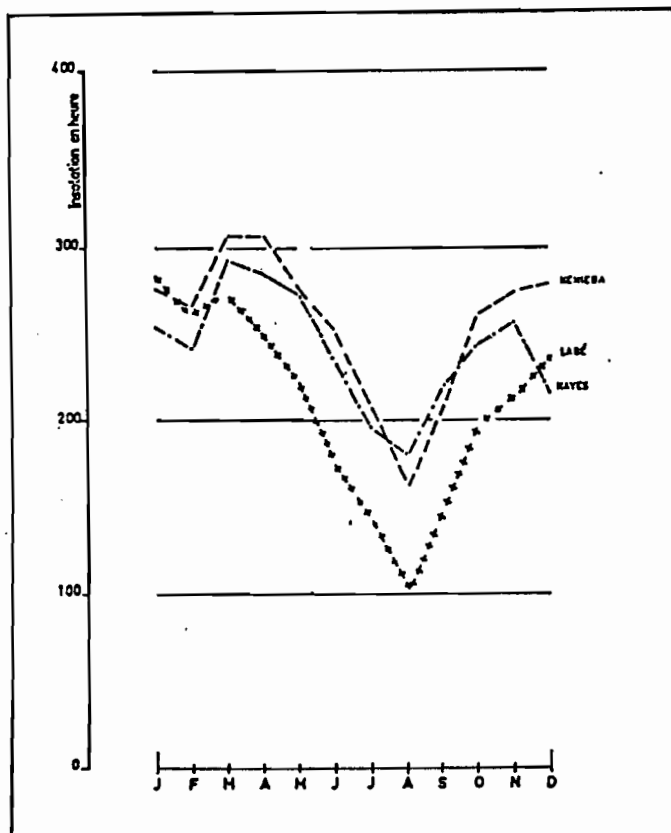


Tableau 3.3 Durée de l'insolation

Stations	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN
KAYES	254	241	293	286	273	232	195	180	218	244	256	216	2888
KENIEBA	276	267	307	307	277	250	204	162	207	261	274	279	3071
LABE	284	262	273	249	221	173	142	102	148	198	213	236	2501

L'insolation est maximale en mars-avril à KAYES et à KENIEBA et en janvier à LABE. Aux deux premières stations on observe un maximum secondaire en novembre-décembre.

L'insolation est minimale en août aux trois stations. L'insolation totale annuelle augmente du Sud au Nord du bassin, l'écart entre LABE et KAYES atteignant 387 heures.

3.4 L'évapotranspiration potentielle (ETP)

Le Dr A.A. SOW (1984) a calculé l'évapotranspiration potentielle aux différentes stations climatologiques du bassin par la formule de TURC (ETPt) et par la formule de PENMAN (ETPp) lorsque l'ensemble des paramètres utiles étaient mesurés (tableau 3.4)

Tableau 3.4 Evapotranspiration potentielle en mm

Stations	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN
KAYES													
ETPt	169	184	251	246	202	140	128	123	129	137	138	134	1981
ETPp	153	151	200	216	257	268	246	222	211	211	168	165	2408
KITA													
ETPt	179	203	217	242	180	144	129	115	117	138	138	168	1970
ETPp	169	177	224	237	255	248	233	213	202	212	175	162	2507
KENIEBA													
ETPt	161	181	222	212	163	143	122	110	119	134	130	131	1828
ETPp	160	160	212	229	242	216	191	187	190	198	171	152	2308
LABE													
ETPt	141	148	160	142	128	108	97	82	98	112	109	111	1436

L'évolution comparée de l'ETP calculée suivant les deux formules montre que les valeurs les plus élevées sont enregistrées en période sèche. Durant cette période, l'écart entre les deux valeurs moyennes de l'ETP est très faible mais toujours en faveur des valeurs PENMAN. Dès le début de la période humide, l'écart devient considérable et les valeurs obtenues avec la formule de TURC semblent sous-estimées par rapport à celle de PENMAN. Pendant cette période, l'ensemble des éléments climatiques entraînant une forte évapotranspiration, connaissent une diminution : température, écart diurne, vitesse du vent, insolation. Seule l'humidité relative atteint des valeurs maximales.

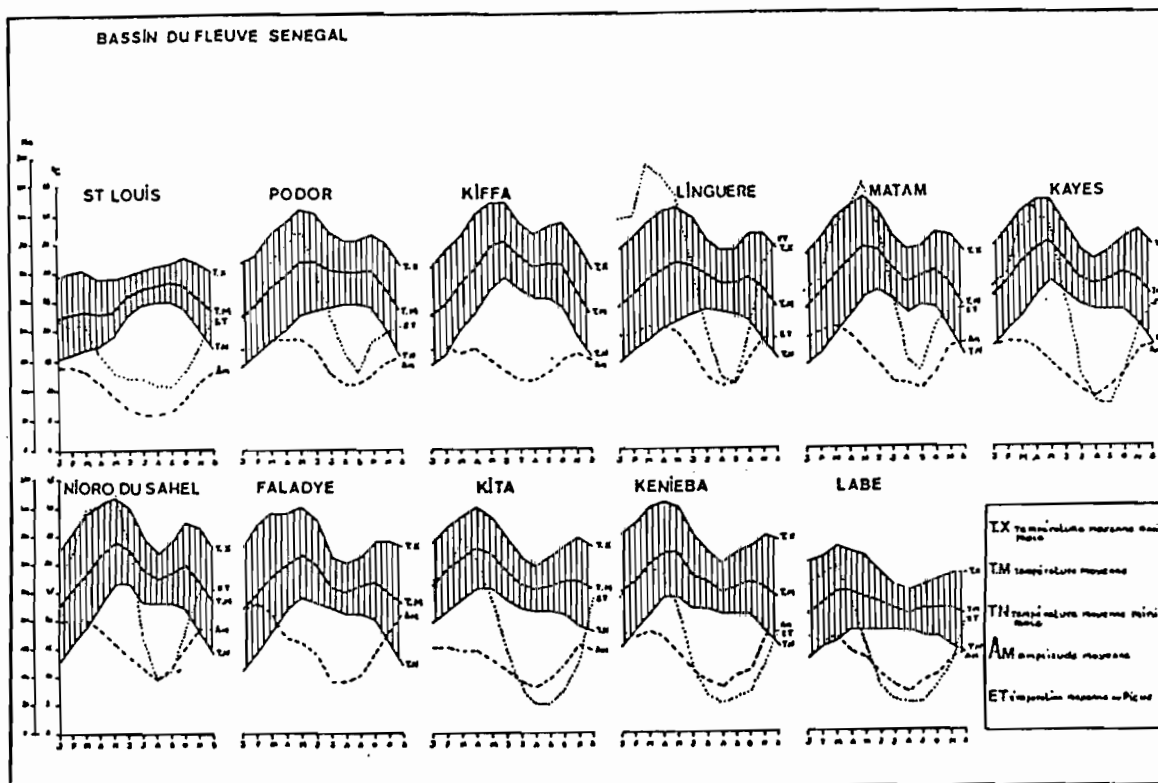
La formule empirique de TURC ne tient pas compte de l'humidité relative dès qu'elle est supérieure à 50%. La formule de PENMAN repose sur une évaluation rigoureuse du bilan énergétique de la surface évaporante. Elle associe l'albédo de la surface évaporante, environ 0,25 pour les étendues de savane

ou de steppe (comme c'est le cas du bassin du SENEGAL). Ce terme (1-0.25 dans le cas du bassin du SENEGAL) permet de corriger les valeurs données par les abaques de la radiation directe.

La figure 3.4 superpose les diagrammes de pluie moyenne mensuelle à ceux de l'humidité relative et de l'évapotranspiration potentielle. On remarque:

- L'ETP augmente du sud vers le nord du bassin
- La demande évaporative est satisfaite globalement de juillet à septembre au nord du bassin (KAYES) et de mai à octobre dans le sud (LABE).

Fig 3.4 Evaporation et facteurs thermiques déterminants de l'écoulement



4. ETUDE PLUVIOMETRIQUE

La carte des postes pluviométriques a été donnée dans le premier rapport ainsi que leurs coordonnées géographiques. Il ne nous a pas été possible de réunir et informatiser l'ensemble des données. Nous fournissons sur disque les données de pluie journalière pour les postes récapitulés dans le tableau 4.1.

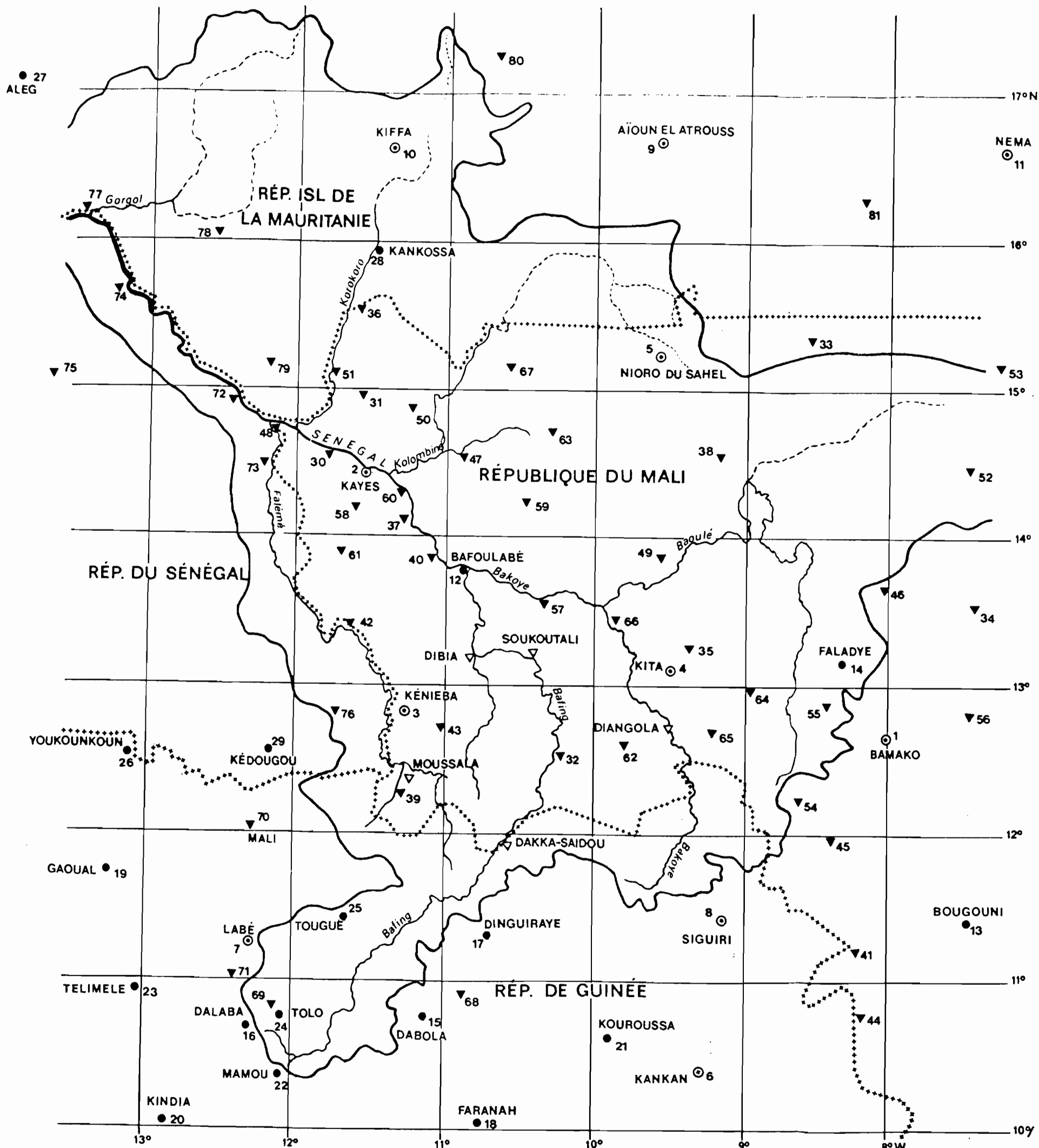
La qualité des données pluviométriques est très variable d'une station à l'autre. La première étape préalable pour l'étude des lames précipitées est donc l'homogénéisation des données sur une période commune à toutes les stations observées. LAMAGAT, ALBERGEL et al (1989) montrent sur le bassin voisin de la GAMBIE que la période 1951 à 1980 pouvait servir de référence. Pour l'ensemble des stations observées depuis le début du siècle, les paramètres statistiques calculés sur l'ensemble de la chronique sont très proches de ceux calculés sur la période 1951-1980.

Tableau 4.1 Liste des stations données sous forme de pluies journalières

STATIONS	Lat. N	Long W	Année	N° d'identification
Domaine sahélien				
KIFFA	+16°38	-11°28	1922	1300003700
MATAM	+15°39	-13°15	1918	1380013000
NIORO	+15°14	-09°36	1919	1270035800
KIDIRA	+14°28	-12°13	1918	1380016300
KAYES	+14°28	-11°26	1895	1270020800
Domaine soudannien				
BAFOULABE	+13°48	-10°50	1931	1270001900
FALADYE	+13°08	-08°21	1931	1270012400
KENIEBA	+12°51	-11°14	1942	1270021700
KITA	+13°04	-09°28	1931	1270022900
Domaine guinéen				
LABE	+11°20	-12°19	1923	170052
PITA	+11°04	-12°26	1926	170055

Les données sont en ASCII, le format des fichiers est donné en annexe 1.

La fig. 4.1 donne l'emplacement de toutes les stations.



- ⊙ SYNOPTIC STATION
STATION SYNOPTIQUE
- CLIMATOLOGIE STATION
POSTE CLIMATOLOGIQUE
- ▼ PLUVIOMETRIC STATION
POSTE PLUVIOMETRIQUE
- ▽ RAIN GAUGE INSTALLED IN 1968/69
PLUVIOMETRE INSTALLE EN 1968/69
- BASIN LIMIT
LIMITE DU BASSIN
- ***** BORDER
FRONTIERE

Stations Synoptiques

BAMAKO	(M)	1
KAYES	(M)	2
KENIEBA	(M)	3
KITA	(M)	4
NIORO	(M)	5
KANKAN	(G)	6
LABE	(G)	7
SIGUIRI	(G)	8
AÏOUN	(RIM)	9
KIFFA	(RIM)	10
NEMA	(RIM)	11

Stations climatologiques

BAFOULABE	(M)	12
BOUCUONI	(M)	13
FALADYE	(M)	14
DABOLA	(G)	15
DALABA	(G)	16
DINGUIRAYE	(G)	17
FARANAH	(G)	18
GAOUAN	(G)	19
KINDIA	(G)	20
KOUROUSSA	(G)	21
MAMOU	(G)	22
TELIMELE	(G)	23
TOLO	(G)	24
TOUGUE	(G)	25
YOUKOUNKOUN	(G)	26
ALEG	(RIM)	27
KANKOSSA	(RIM)	28
KEDOUGOU	(S)	29

Postes pluviométriques

AMBIDEDI	(M)	30
AOUROU	(M)	31
BAFING-MAKANA	(M)	32
BALLE	(M)	33
BANAMABANA	(M)	34
BATIMAKANA	(M)	35
BILIKOUATE	(M)	36
DIAMOU	(M)	37

DIEMA	(M)	38
FALEA	(M)	39
GALOUGO	(M)	40
GOJALALA	(M)	41
GOURBASSI	(M)	42
GUENEGORE	(M)	43
KALANA	(M)	44
KANGABA	(M)	45
KOLOKANI	(M)	46
KONAKARI	(M)	47
KOTERA	(M)	48
KOUROUNINKOTO	(M)	49
KOUSSANE	(M)	50
LEYA	(M)	51
MOURDIAH	(M)	52
NARA	(M)	53
NARENA	(M)	54
NEGALA	(M)	55
NIENEBALE	(M)	56
OUALIA	(M)	57
OULOUMA	(M)	58
OUSOUBIDIAGNA	(M)	59
SABOUCIRE	(M)	60
SADIOLA	(M)	61
SAGABARI	(M)	62
SANDARE	(M)	63
SEBEKORO	(M)	64
SIRAKORO	(M)	65
TOUKOTO	(M)	66
YELIMANE	(M)	67
BISSIKRIMA	(G)	68
DITINN	(G)	69
MALI	(G)	70
PITA	(G)	71
BAKEL	(S)	72
KIDIRA	(S)	73
MATAM	(S)	74
NAMARI	(S)	75
SARAYA	(S)	76
KAEDI	(RIM)	77
MBOUT	(RIM)	78
SELIBABY	(RIM)	79
TAMCHAKETT	(RIM)	80
TIMBEDRA	(RIM)	81

Le tableau 4.2 donne la liste des stations homogénéisées par le Dr. A.A. SOW (1984) sur la période 1951-1980. Sur ce tableau figurent également :

- les coordonnées géographiques de ces stations
- l'altitude
- la moyenne 1931- 1960
- la moyenne 1951- 1980

Tableau 4.2 Liste des stations homogénéisées,
moyennes 1931-1960 et 1951-1980
Par Dr A.A. SOW (1984)

STATIONS	Lat. N	Long W	Alt.	31-60	51-80
Domaine sahélien					
NIORO DU SAHEL	15°14	09°39	235	631	564
SELIBABY	15°14	12°10	60		415
NARA	15°10	07°17	263	514	440
YELIMANE	15°07	10°34	97		571
AOUROU	14°58	11°35	65		536
BAKEL	14°54	12°28	25	712	499
KOUSSANE	14°53	11°44	96		590
SANDARE	14°53	10°18	281		704
AMBIDEDI	14°35	11°47	30		669
KONIAKARI	14°34	10°54	81		719
DIEMA	14°33	09°11	252		610
MOURDIAH	14°28	07°28	314	591	504
KIDIRA	14°28	12°13	35	790	675
KAYES	14°26	11°26	46	821	695
OUSSOU-BIDIAGNA	14°15	10°28	259		789
DIAMOU	14°06	11°16	60		757
KOUROU-					
Domaine soudanien					
NINKOTO	13°52	09°35	267		840
GALOUGO	13°50	11°04	91		852
BAFOULABE	13°48	10°50	104	942	847
TOUKOTO	13°27	09°53	177		858
GOURBASSI	13°24	11°28	79		916
FALADYE	13°08	08°21	337	1019	975
KITA	13°04	09°27	328	1151	1033
NEGALA	12°52	07°30	290		996
KENIEBA	12°48	11°21	136		1292
SARAYA	12°47	11°47	186		1065
GUENEGORO	12°44	11°01	240		1303
SIRAKORO	12°41	09°40	369	1113	1084
KEDOUGOU	12°33	12°13	122	1267	1285
FALEA	12°16	11°17	455	1407	1422
KANGABA	11°56	08°25	370		1140

Tableau 4.2 Liste des stations homogénéisées,
moyennes 1931-1960 et 1951-1980
Par Dr A.A. SOW (1984) (Suite)

STATIONS	Lat. N	Long W	Alt.	31-60	51-80
Climat Guinéen					
TOUGUE	11°26	11°40	868	1065	1451
LABE	11°19	12°18	1025	1662	1660
PITA	11°04	12°24	965	1860	1642
DABOLA	10°45	11°07	438	1678	1544
MAMOU	10°22	12°05	783		1939
DALABA	10°43	12°15	1202		2149

La station de MAMOU, la plus méridionale (10°22 N), a une moyenne pluviométrique de 1942 mm pour 60 années d'observation. Pour la même période d'observation, la station de KIFFA, la plus septentrionale (16°38N) n'enregistre que 328 mm soit 17% du total pluviométrique de MAMOU. La carte 4.2 montre les isohyètes interannuelles calculées sur la période 1951-1980 pour l'ensemble du bassin du Fleuve SENEGAL.

4.1 La répartition intermensuelle des précipitations

La carte 4.1.1 extraite de l'ouvrage de A.A.SOW (1984) montre la répartition des précipitations aux principales stations du bassin. Le seul caractère commun à tous les postes pluviométriques du bassin est le maximum pluviométrique qui est partout situé au mois d'AOUT. Ce mois concentre 38% des précipitations annuelles du domaine sahélien, 31% dans le domaine nord soudanien et plus que 22% de la pluie annuelle de la région guinéenne.

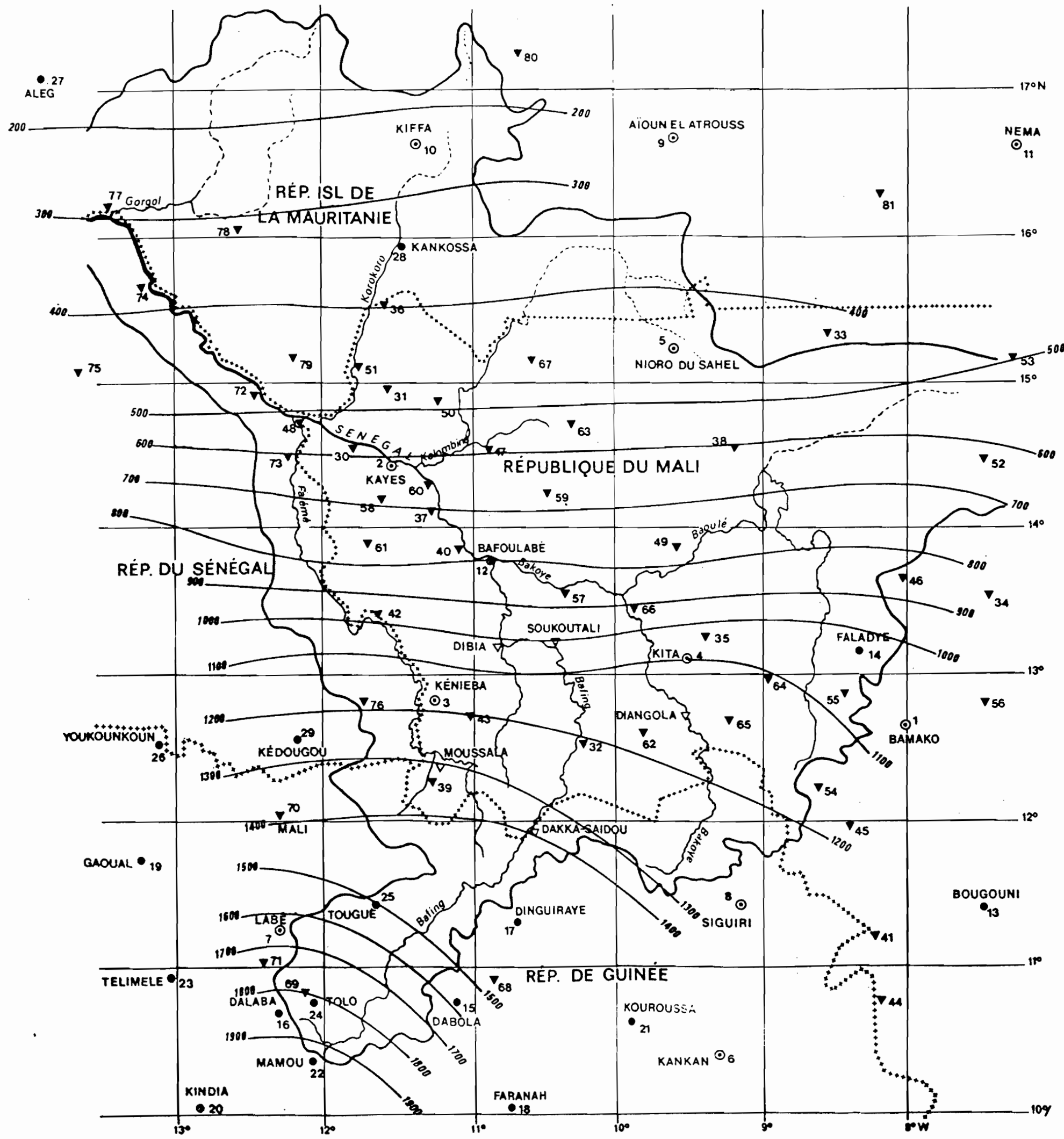
Le mois d'Août reste partout le mois du maximum pluviométrique. La pluie mensuelle se répartit mieux lorsque la saison humide est plus longue et plus importante.

Tableau 4.1.1
Importance cumulée en % des mois de saison des pluies

Station	Août	2 mois les plus pluvieux	3 mois	4 mois	5 mois	6 mois	7 mois	8 mois
NIORO	37	63	83	93	97	100		
KAYES	33	56	78	91	97	100		
FALADYE	31	55	75	88	94	100		
KITA	31	53	74	88	95	100		
KENIEBA	31	54	74	87	95	99	100	
KEDOUGOU	26	51	71	85	95	99	100	
LABE	22	42	61	76	86	95	99	100
DABOLA	22	41	59	73	84	93	98	100
MAMOU	22	41	57	69	81	90	95	98

La variabilité interannuelle de la précipitation à une station est classiquement exprimée par le coefficient de variation de la série chronologique $cv = s/P$, s étant l'écart type et P la pluie moyenne annuelle. Le graphique 4.1.2 montre les variations de ce coefficient en fonction de la latitude.

Fig 4.2 Carte des Isohyètes inter annuelles 1951-1980



- ⊙ SYNOPTIC STATION
STATION SYNOPTIQUE
- CLIMATOLOGIE STATION
POSTE CLIMATOLOGIQUE
- ▼ PLUVIOMETRIC STATION
POSTE PLUVIOMETRIQUE
- ▽ RAIN GAUGE INSTALLED IN 1968/69
PLUVIOMETRE INSTALLE EN 1968/69
- BASIN LIMIT
LIMITE DU BASSIN
- ***** BORDER
FRONTIERE
- 700 — ISOHYETES ANNUELLES

Stations Synoptiques

BAMAKO	(M)	1
KAYES	(M)	2
KENIEBA	(M)	3
KITA	(M)	4
NIORO	(M)	5
KANKAN	(G)	6
LABE	(G)	7
SIGUIRI	(G)	8
AIOUN	(RIM)	9
KIFFA	(RIM)	10
NEMA	(RIM)	11

Stations climatologiques

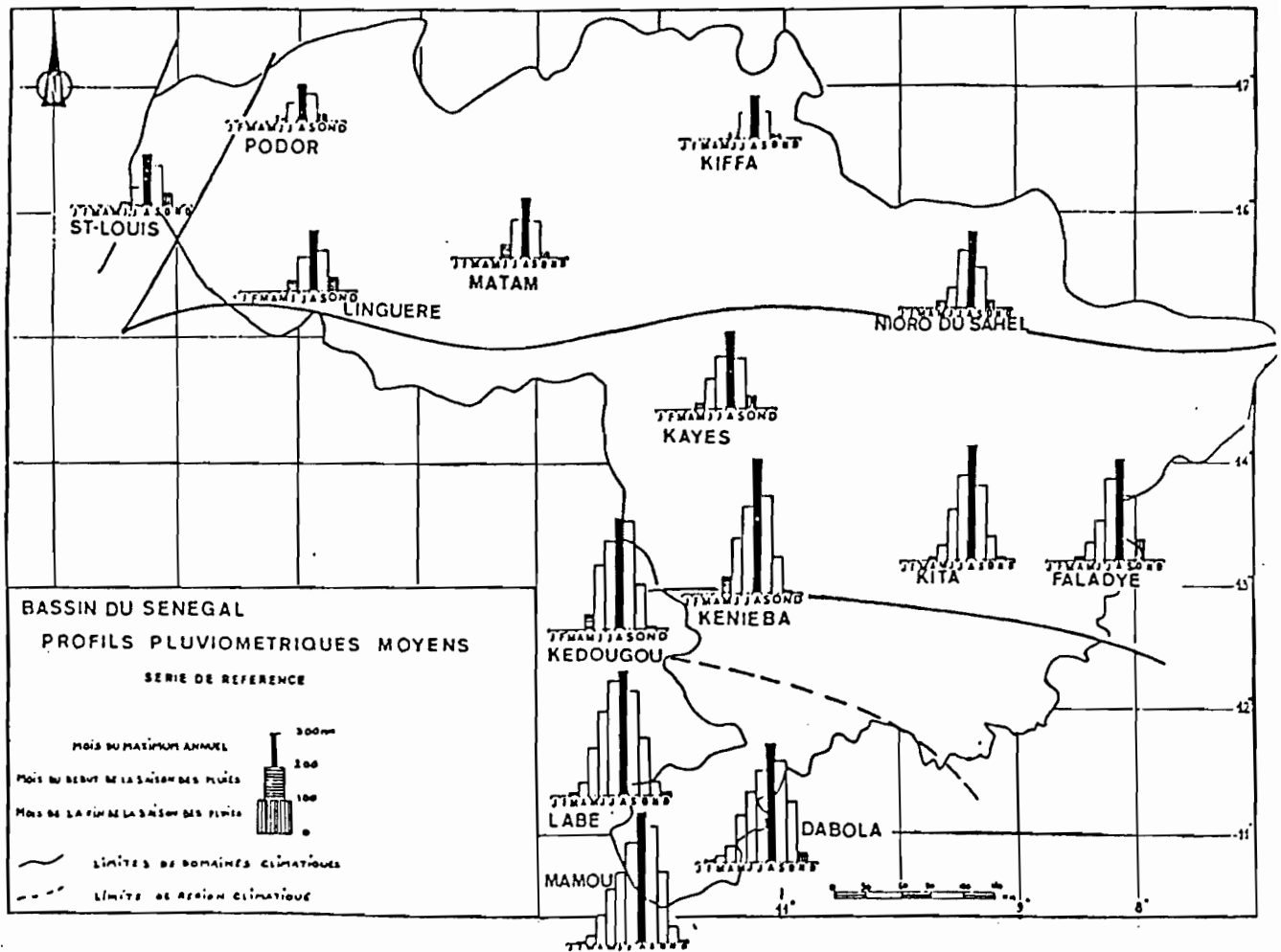
BAFOULABE	(M)	12
BOUCUONI	(M)	13
FALADYE	(M)	14
DABOLA	(G)	15
DALABA	(G)	16
DINGUIRAYE	(G)	17
FARANAH	(G)	18
GAOLAN	(G)	19
KINDIA	(G)	20
KOUROUSSA	(G)	21
MAMOU	(G)	22
TELIMELE	(G)	23
TOLO	(G)	24
TOUGUE	(G)	25
YOUKOUNKOUN	(G)	26
ALEG	(RIM)	27
KANKOSSA	(RIM)	28
KEDOUGOU	(S)	29

Postes pluviométriques

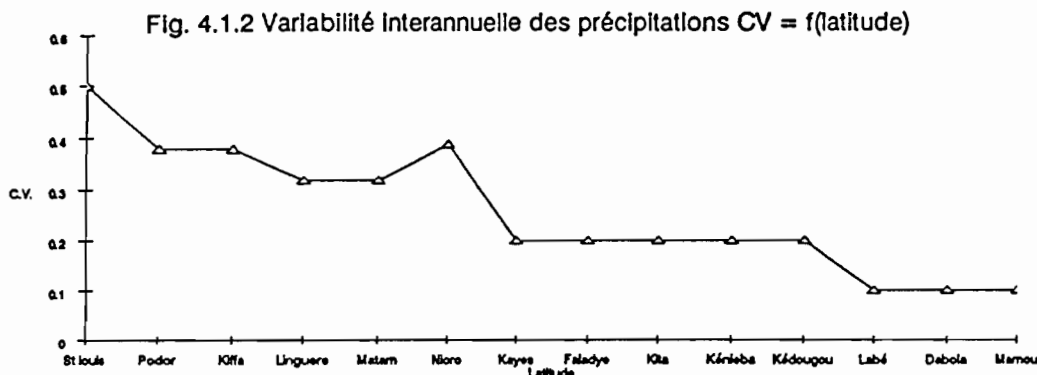
AMBIDEDI	(M)	30
AOUROU	(M)	31
BAFING-MAKANA	(M)	32
BALLE	(M)	33
BANAMABA	(M)	34
BATIMAKANA	(M)	35
BILIKOUATE	(M)	36
DIAMOU	(M)	37

DIEMA	(M)	38
FALEA	(M)	39
GALOUGO	(M)	40
GOUALALA	(M)	41
GOURBASSI	(M)	42
GUENEGORE	(M)	43
KALANA	(M)	44
KANGABA	(M)	45
KOLOKANI	(M)	46
KONAKARI	(M)	47
KOTERA	(M)	48
KOUROUNINKOTO	(M)	49
KOUSSANE	(M)	50
LEYA	(M)	51
MOURDIAH	(M)	52
NARA	(M)	53
NARENA	(M)	54
NEGALA	(M)	55
NIENEBALE	(M)	56
OUALIA	(M)	57
OULOUMA	(M)	58
OUSOUBIDIAGNA	(M)	59
SABOUCIRE	(M)	60
SADHOLA	(M)	61
SAGABARI	(M)	62
SANDARE	(M)	63
SEBEKORO	(M)	64
SIRAKORO	(M)	65
TOUKOTO	(M)	66
YELIMANE	(M)	67
BISSIKRIMA	(G)	68
DITINN	(G)	69
MALI	(G)	70
PITA	(G)	71
BAKEL	(S)	72
KIDIRA	(S)	73
MATAM	(S)	74
NAMARI	(S)	75
SARAYA	(S)	76
KAEDI	(RIM)	77
MBOUT	(RIM)	78
SELIBABY	(RIM)	79
TAMCHAKETT	(RIM)	80
TIMBEDRA	(RIM)	81

Fig. 4.1.1 Répartition des pluies mensuelles



La variation interannuelle ne dépasse pas 0,1 dans la région guinéenne. Elle reste faible encore dans le domaine soudanien Sud et Nord (0,2), mais augmente dans le domaine sahélien. Ce sont donc les postes dont les modules annuels sont les plus faibles qui connaissent la plus grande variabilité.



4.2 Répartition spatiale des précipitations moyennes annuelles. Estimation de la lame précipitée moyenne par sous bassin.

La carte des Isohyètes (4.1) sur la période 1951-1980 montre que le bassin supérieur du SENEGAL est limité au sud par l'isohyète 1900 mm et au nord par l'isohyète 200 mm. L'isohyète 300 mm, limite de la culture pluviale, suit la latitude 16° Nord.

La pluie moyenne annuelle diminue du sud du bassin vers le Nord. Les valeurs moyennes annuelles traduisent fidèlement la succession des régions et des domaines climatiques.

La pluie moyenne par sous bassin a été estimée à partir de la carte des Isohyètes et en utilisant la méthode du coefficient d'homogénéisation par zone climatique (DUBREUIL, 1971). Le tableau 4.2.1 donne une estimation de lame d'eau précipitée moyenne annuelle par sous bassin (periode 1951-1980).

Tableau 4.2.1
Lames d'eau précipitées moyenne (mm)
par sous bassin (SOW, 1984)

Bassins	climat guinéen	climat sud soudanien	climat nord soudanien	climat sahélien	moyenne
FALEME	1135	1129	804		1023
BAFING	1466	1220	1059		1248
BAKOYE		1225	1154		1190
BAOULE		1107	770	464	780
KARAKORO			742	332	537
KOLIMBINE			922	545	734
HAUT BASSIN DU SENEGAL	1227	1055	642	348	818

Sur le haut bassin du SENEGAL , qui englobe l'ensemble des climats tropicaux (guinéen, soudanien, sahélien), la pluie moyenne est de 818 mm. Cette valeur est voisine des pluies moyennes du climat Nord Soudanien.

4.3 analyse de la sécheresse 1968 -1980

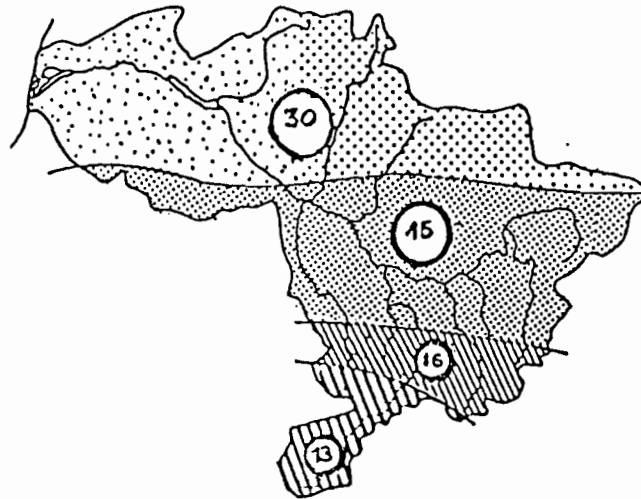
Sur le tableau 4.3.1 les écarts à la moyenne "1951 à 1980 " ont été calculés pour chaque année à quelques stations caractéristiques. Ce tableau montre un déficit pluviométrique généralisé à toutes les stations à partir de 1968. Il n'est pas du même ordre de grandeur à toutes les stations. La sécheresse est plus accusée dans le nord que dans le sud. Le graphique 4.3 tiré de l'étude de A.A. SOW montre le déficit moyen de la période 1968 - 1980 dans chaque grand domaine climatique.

Tableau 4.3.1 Ecart à la moyenne 1951 - 1980 en %

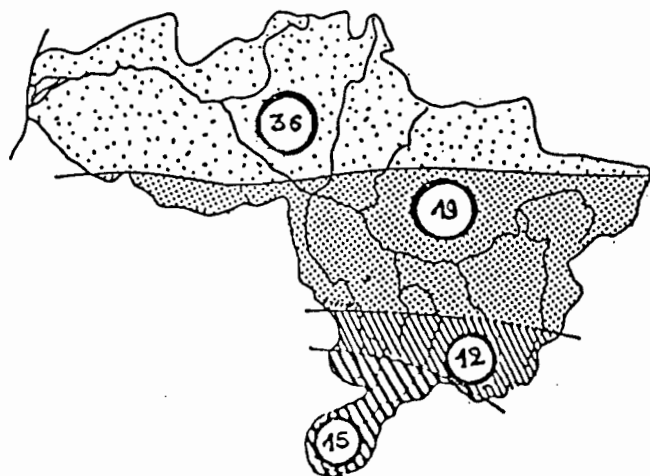
Stations	NIORO	KAYES	KITA	KENIEBA	LABE	MAMOU
1951-80	566	695	1083	1292	1660	1939
1951	+33	+24	+7	+44	+25	+5
1952	+71	+26	+46	-6	-12	-7
1953	+11	+10	+32	-5	-10	+10
1954	+49	+26	+3	+10	+8	+33
1955	0	-2	+18	+48	+17	+21
1956	+11	+16	+8	+11	+6	0
1957	+16	-1	+26	-8	+17	+16
1958	+50	-3	+28	+16	+30	+24
1959	+9	+23	+5	-14	+7	-3
1960	-1	+7	+2	-5	-11	-11
1961	-12	-5	-5	+2	+7	+13
1962	+19	-9	+20	+26	+26	+17
1963	+14	+27	-19	+2	-10	-4
1964	+27	-1	+2	+1	+17	+2
1965	+11	+11	-1	+20	-18	-3
1966	+15	+22	0	+3	-3	+20
1967	-13	-4	+10	+29	+28	+4
1968	-21	-31	-5	-27	-5	+6
1969	-4	+14	-11	+11	+7	-20
1970	-29	-20	-21	-20	-19	-16
1971	-40	-14	-24	+4	-11	-10
1972	-22	-30	-17	-35	+7	-21
1973	-36	-20	-12	-16	-10	-7
1974	-26	-3	-12	-7	-7	-9
1975	-12	-15	-11	+11	-9	-7
1976	-13	+12	+51	-23	-10	+8
1977	-47	-15	-14	-22	-20	-14
1978	-2	+6	-21	-1	-15	-2
1979	-21	-20	-22	-15	-18	-17
1980	-45	-31	-19	-35	-10	-24

Le tableau 4.3.2 rassemble les valeurs des pluviométries annuelles 1981 à 1989 pour les principales stations. Les écarts à la moyenne 1951-1980 y sont consignés. On remarque que le phénomène de sécheresse perdure jusqu'en 1986 avec les années 1983 et 1984 très déficitaires. Une augmentation sensible de la pluviométrie apparaît en 1987, 1988, 1989 bien que le total annuel reste déficitaire à de nombreuses stations. L'analyse des chroniques ne peut cependant pas dégager de tendances pour l'avenir.

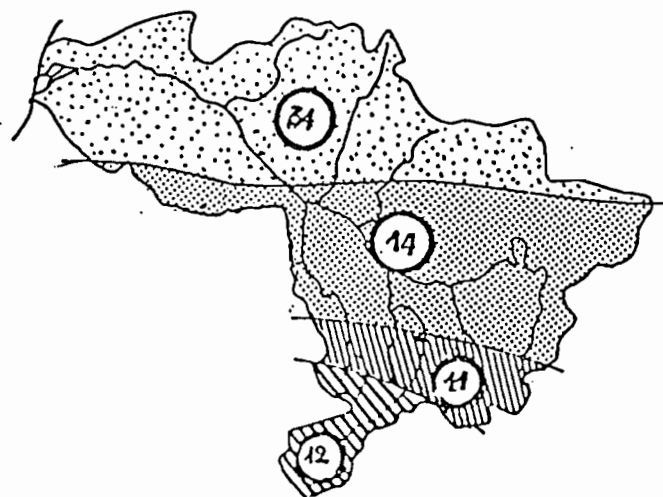
Fig. 4.3 Déficits en % de la période de sécheresse



Déficit de la période 69-83 par rapport à la série de référence



Déficit de la période 69-83 par rapport à la moyenne 31-60



Déficit de la période 69-83 par rapport à la moyenne 51-80

Tableau 4.3.2
Données pluviométriques de la dernière décennie et écarts à la moyenne 51-80

Stations	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989
NIORO	406	381	255	316	477	343	344	500	224
Ecart %	-28	-33	-55	-44	-16	-39	-39	-12	-60
KAYES	593	533	428	609	729	778	477	650	752
Ecart %	-15	-23	-38	-12	+5	+12	-31	-6	+8
BAFOULABE	712	825	661	-	814	-	-	833	-
Ecart %	-16	-3	-22	-	-4	-	-	-2	-
KOLOKANI	704	765	549	512	606	872	541	791	-
Ecart %	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KENIEBA	1151	1215	671	914	963	1032	861	1110	1123
Ecart %	-11	-6	-48	-29	-25	-20	-33	-14	-13
KITA	836	948	-	776	748	967	661	930	1010
Ecart %	-23	-12	-	-28	-31	-20	-39	-14	-7
LABE	1592	1550	1513	1228	1433	1342	1460	1332	-
Ecart %	-4	-7	-9	-26	-14	-19	-12	-20	-

4.4 Analyse statistique des pluviométries annuelles

L'étude de la répartition statistique des hauteurs annuelles de précipitation a été faite sur les stations suivantes:

-Domaine sahélien

KIFFA	+16°38	-11°28	1922	1300003700
MATAM	+15°39	-13°15	1918	1380013000
NIORO	+15°14	-09°36	1919	1270035800
KIDIRA	+14°28	-12°13	1918	1380016300
KAYES	+14°28	-11°26	1895	1270020800

-Domaine soudanien

BAFOULABE	+13°48	-10°50	1931	1270001900
FALADYE	+13°08	-08°21	1931	1270012400
KENIEBA	+12°51	-11°14	1942	1270021700
KITA	+13°04	-09°28	1931	1270022900

-Domaine guinéen

LABE	+11°20	-12°19	1923	170052
------	--------	--------	------	--------

Un ajustement automatique de 10 lois statistiques est tenté sur chaque série pluviométrique. Le meilleur ajustement a été choisi en prenant comme critère le test de BRUNET-MORET. Ce test favorise l'ajustement aux valeurs extrêmes (minimisation des surfaces comprises entre la courbe théorique et la courbe de distribution expérimentale).

Les résultats des ajustements des meilleures lois au sens du test de BRUNET-MORET sont récapitulés dans les tableaux 4.4.1 et 4.4.2

Les figures 4.4 montrent quelques exemples d'ajustements.

Tableau 4.4.1 Statistiques des pluies annuelles

Stations	moyenne mm	médiane mm	CV mm	Loi ajustée
-Domaine sahélien				
KIFFA	328.9	319.8	.396	GOODRICH
MATAM	661.6	646.9	.255	GOODRICH
NIOURO	563.8	557.4	.288	GALTON
KIDIRA	662.5	646.9	.255	GALTON
KAYES	695.4	683.1	.179	GOODRICH
-Domaine soudanien				
BAFOULABE	845.1	839.5	.168	GALTON
FALADYE	981.0	995.0	.181	GOODRICH
KENIEBA	1289.6	1267.8	.207	GALTON
KITA	1053.2	1036.8	.191	GOODRICH
-Domaine guinéen				
LABE	1663.3	1593.0	.143	GALTON

Tableau 4.4.2 Statistiques des pluies annuelles

Fréquence	Récurrences sèches				Récurrences humides			
	0.01	0.02	0.05	0.1	0.9	0.95	0.98	0.99
Période de retour (ans)	100 mm	50 mm	20 mm	10 mm	10 mm	20 mm	50 mm	100 mm
KIFFA	115	126	147	173	503	565	635	683
MATAM	155	174	209	248	637	699	770	817
NIOURO DU SAHEL	263	289	331	372	776	854	950	1019
KIDIRA	346	374	419	462	882	934	1002	1047
KAYES	436	460	501	540	851	893	939	969
BAFOULABE	563	590	634	675	1028	1089	1162	1212
FALADYE	653	676	717	762	1214	1286	1368	1422
KITA	780	787	804	828	1344	1469	1621	1731
KENIEBA	780	827	902	974	1639	1761	1909	2014
LABE	1312	1330	1361	1396	1991	2166	2409	2604

Fig. 4.4 Ajustements statistiques des pluviométries annuelles

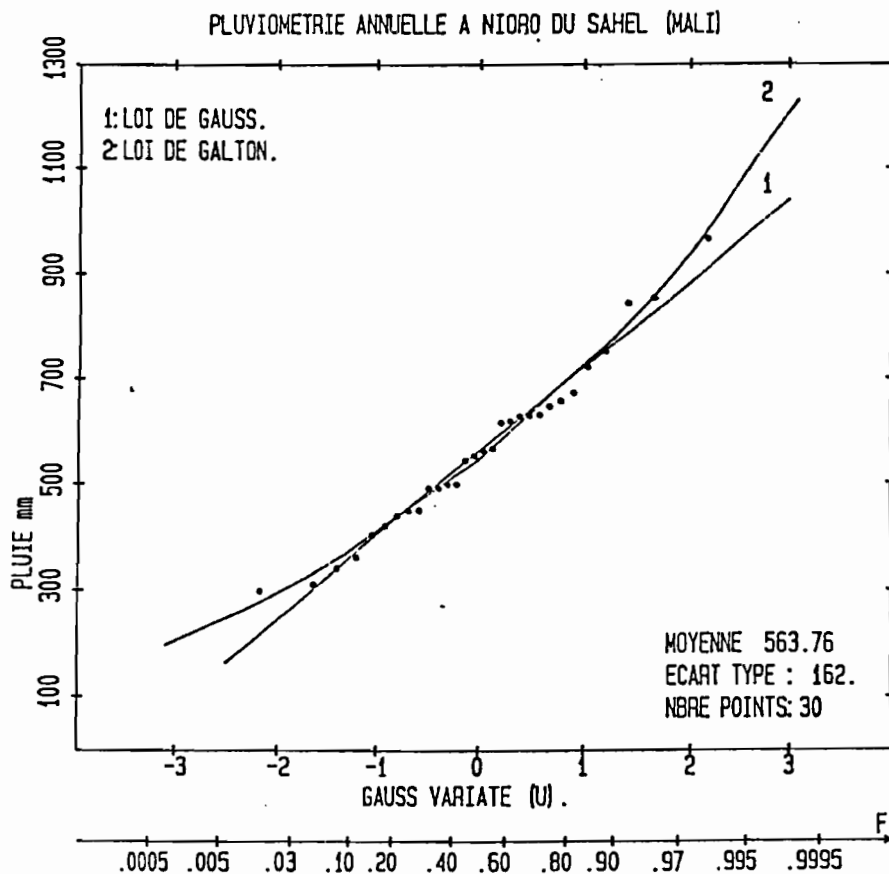
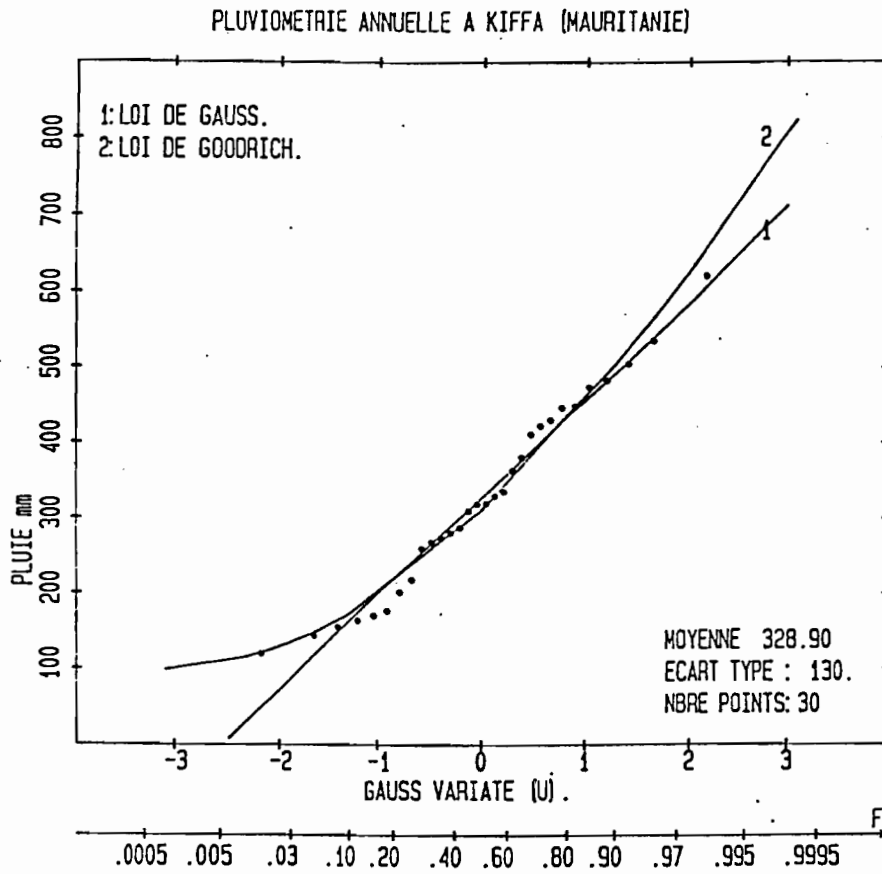


Fig. 4.4 Ajustements statistiques des pluviométries annuelles (suite)

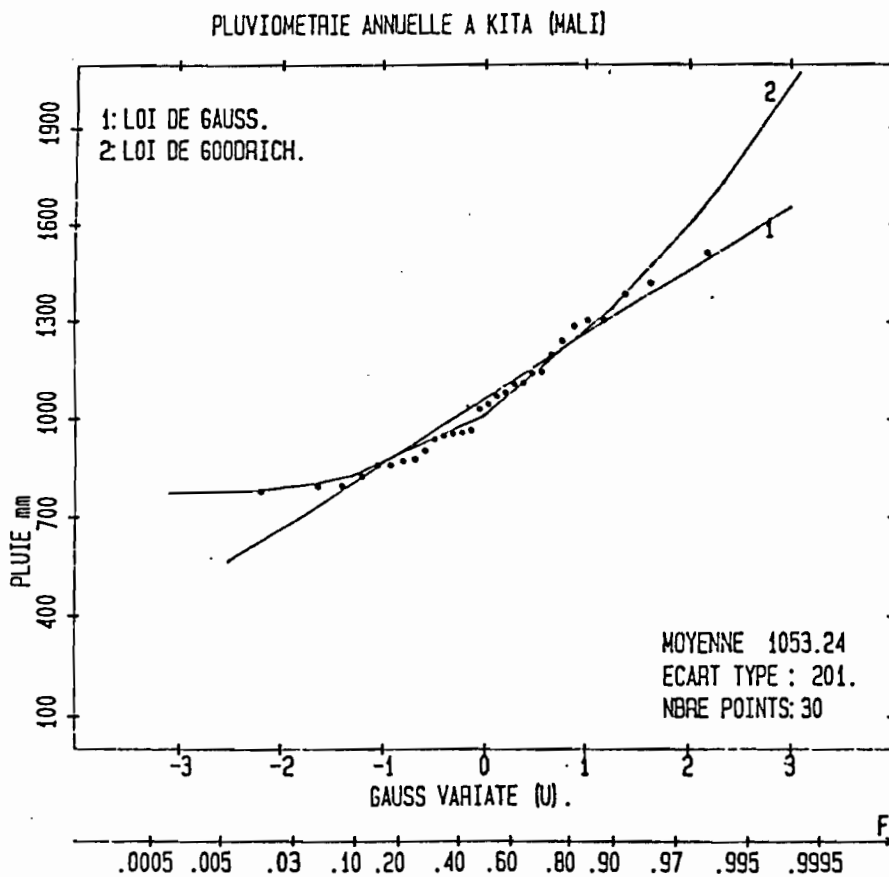
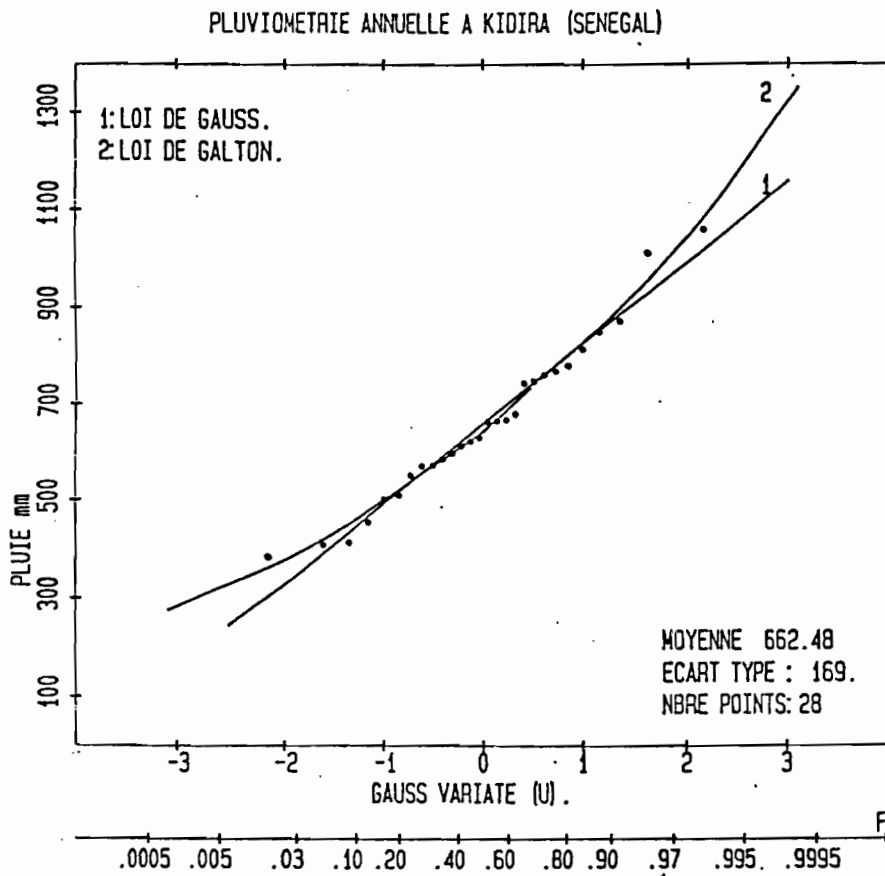
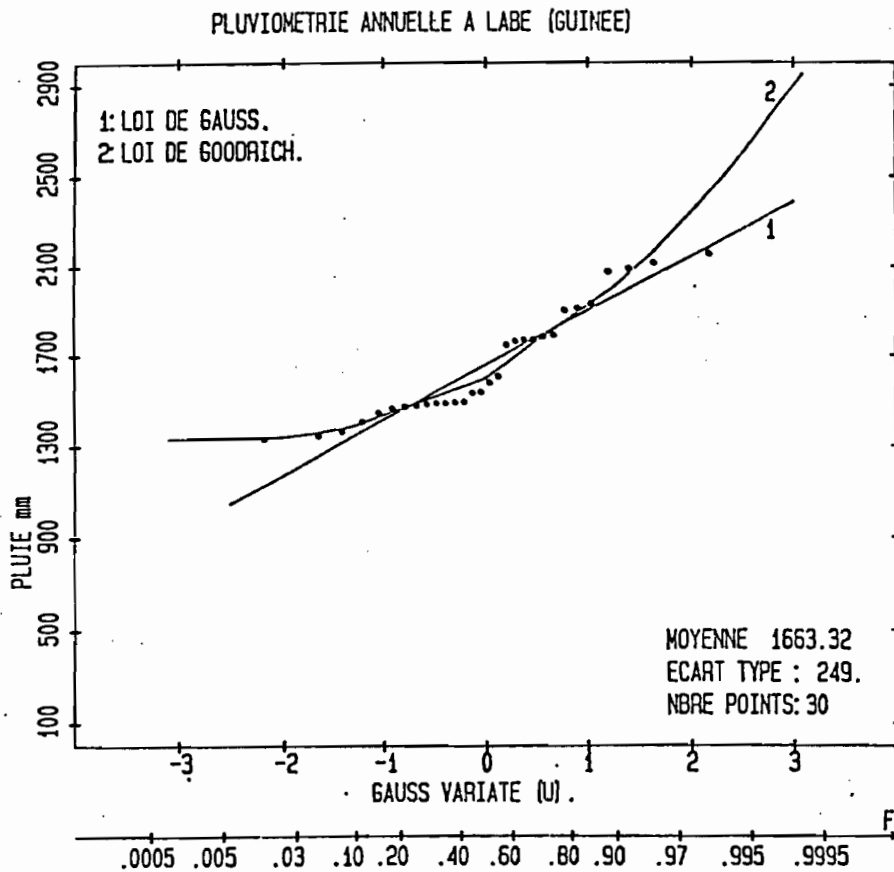
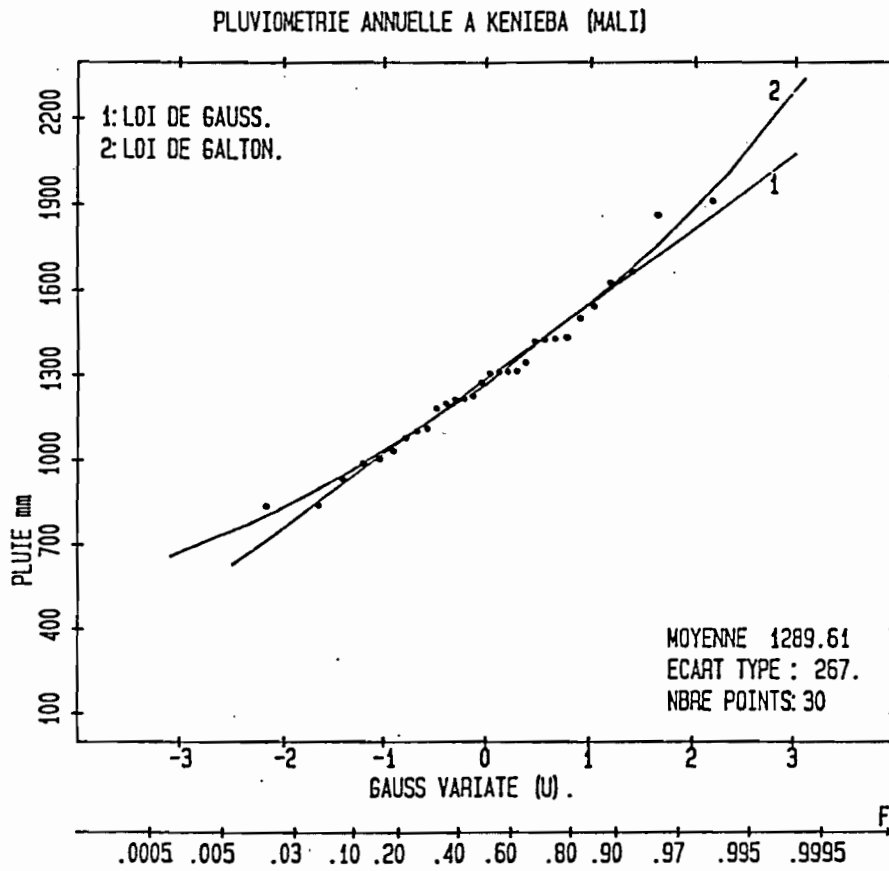


Fig. 4.4 Ajustements statistiques des pluviométries annuelles (suite)



4.5 Pluviométrie journalière

Le pas de temps journalier est la donnée de base des chroniques pluviométriques disponibles. L'averse reçue en 24 heures est le paramètre déterminant dans l'étude et le calcul des crues sur les petits bassins versants de quelques dizaines à quelques centaines de km².

L'étude fréquentielle des hauteurs de précipitations journalières a consisté après classement des averses à rechercher pour chaque station l'ajustement de la loi Gamma Incomplète de PEARSON III tronquée dont la fonction de répartition s'écrit :

$$F_1(x) = F_1(0) + \frac{1}{\Gamma(-\gamma)} \int_{-x}^0 \left(\frac{x}{s}\right)^{\gamma-1} \cdot e^{-x/s} \cdot dx$$

$F_1(x)$ est la probabilité pour que la valeur de la variable soit supérieure à x

$F_1(0)$ est la probabilité pour que la valeur de la variable ne soit pas nulle, c'est le paramètre de «troncage».

γ est le paramètre de forme

s est le paramètre d'échelle

Γ est la fonction Gamma Incomplète

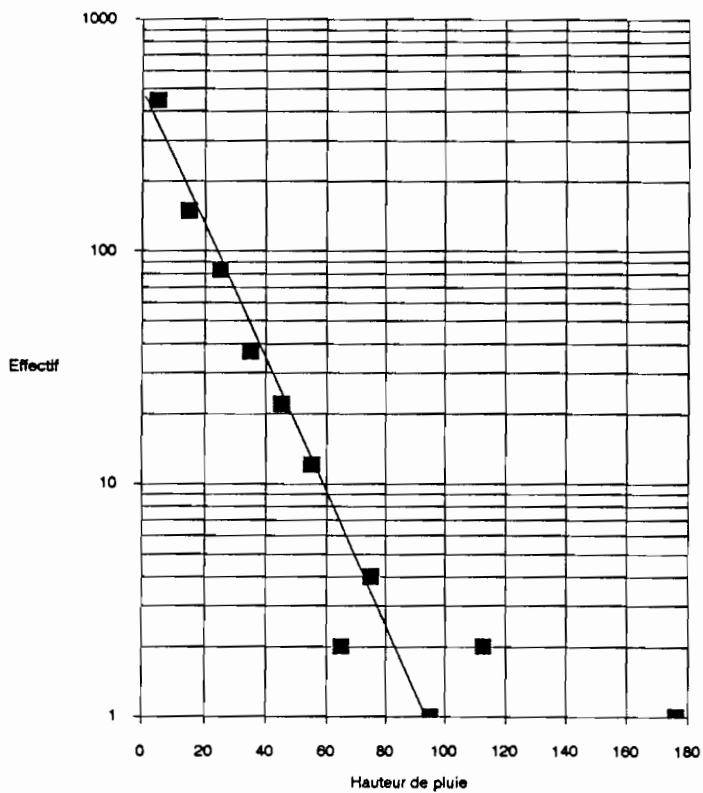
L'ensemble des précipitations journalières est pris en compte, donc $F_1(0) = M/365.25$ avec M = nombre moyen annuel de jours de pluie. Il est préférable de calculer $F_1(0)$ avec M' nombre moyen théorique de jours de pluie dans l'année par la méthode des moments. Pour s'affranchir de l'imprécision due au nombre de jours de petites pluies (évaporation dans le seau pluviométrique, oubli de l'observateur) toutes les pluies inférieures à 1 mm ont été écartées de l'échantillon.

Les résultats de l'analyse statistique des pluies en 24 heures sont consignés dans le tableau 4.5.1. Sont indiqués le nom des stations, le nombre moyen de jours de pluie par an, la valeur du paramètre de forme et les hauteurs en mm des pluies journalières dont les probabilités de récurrence sont une fois tous les deux ans, une fois tous les 10, 20, 100 ans.

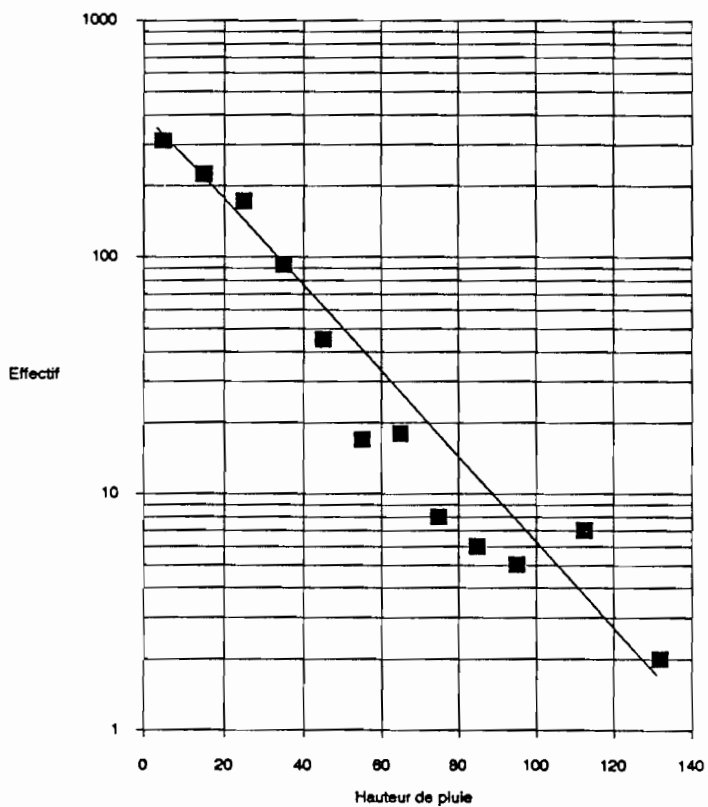
Tableau 4.5.1 Statistiques des pluies journalières
Loi de Pearson III sur le fichier 1951-1980

Stations	nb.moy. pluies/an	gamma	2 ans mm	10 ans mm	20 ans mm	100 ans mm
KIFFA	58.9	0.19	61.7	96.3	111.9	149.0
MATAM	27.7	0.84	63.5	90.2	101.7	128.5
KIDIRA	33.1	0.88	83.5	116.5	130.8	163.9
KAYES	45.4	0.95	66.9	90.9	101.0	125.4
BAFOULABE	70.1	0.47	78.7	110.8	124.9	157.8
KITA	64.6	1.06	72.5	95.7	105.7	128.9
FALADYE	71.9	0.70	77.5	105.3	117.4	145.7
KENIEBA	121.3	0.39	96.5	133.3	149.4	187.4
LABE	126.8	0.87	77.4	100.5	124.3	133.7

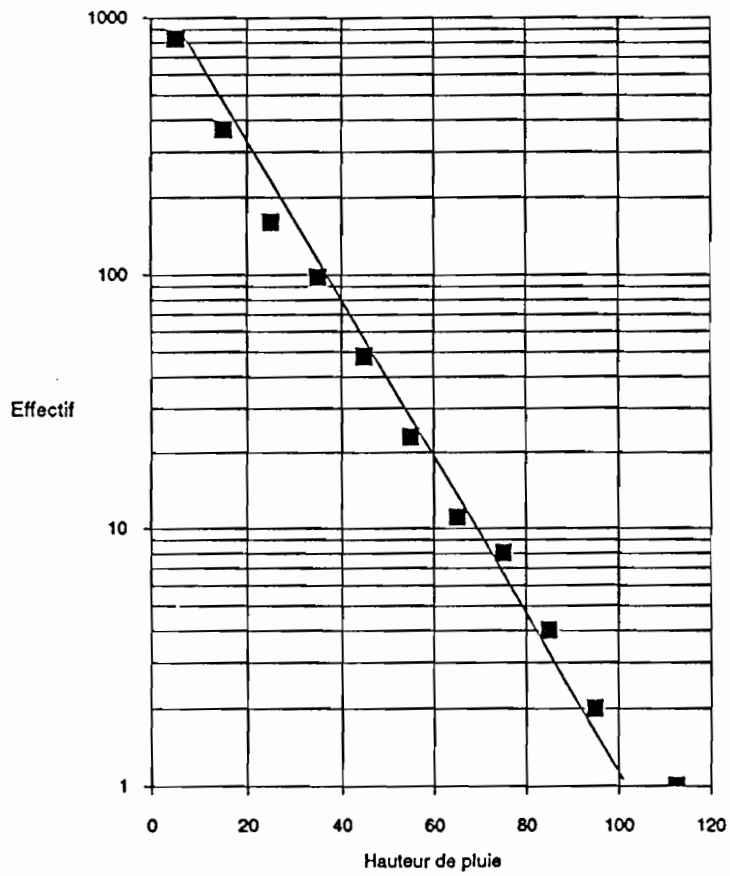
KIFFA : pluies journalières classées



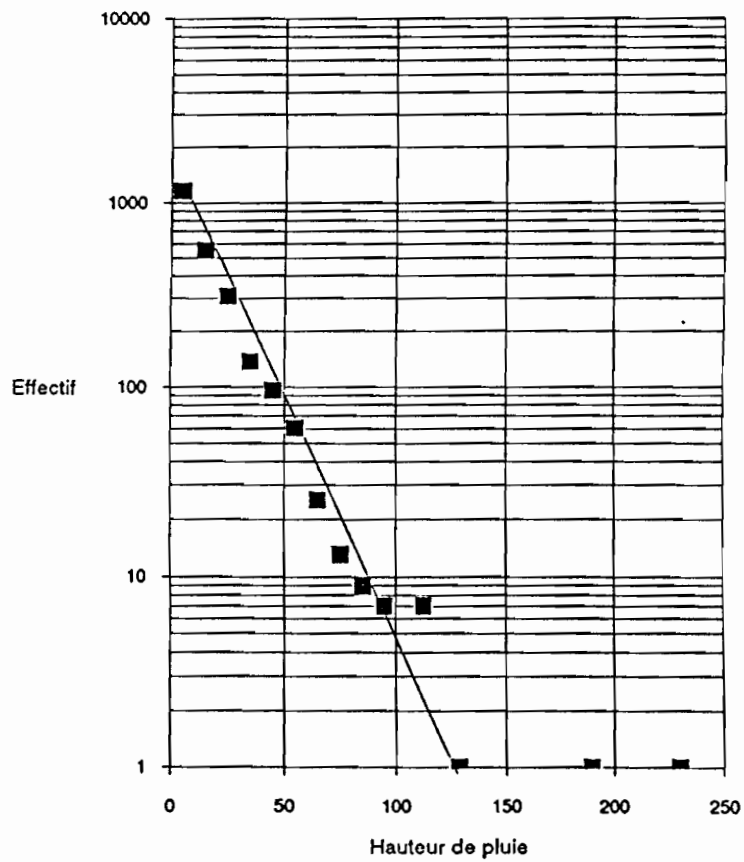
KIDIRA : pluies journalières classées



KAYES : Pluies journalières classées



KENIEBA : Pluies journalières classées



ANNEXE

Format des données pluviométriques sur disquette

1. Format pour les stations du MALI et du SENEGAL

Position début-fin	Nombre de caractères	Information
1 à 10	10	Code ORSTOM de la station
11 à 14	4	Année
15 à 16	2	Mois
17	1	-
31 couples	5 et 1	Hauteur journalière en 1/10mm Code journalier (cf description)
204 à 209	6	Hauteur mensuelle en 1/10mm
210	1	Code de mois complet(0) ou non (7 incomplet, 9 absent)
211	1	-
212	1	-
213	1	Accessibilité : 0 journalier, 6 données pentadaires, 7 données décadaires, 8 données mensuelles, 4 selon code journalier
214	1	Code de qualité : 0 RAS, 1 douteux utilisable, 5 multiples de 8 ou 10mm; 6 douteux inutilisable
215 à 216	2	Nombre de jours de pluie
217 à 218	2	Nombre de jours de pluie H < 0,5mm
219 à 220	2	Nombre de jours de pluie H < 10mm

2. Format pour les stations de GUINEE

Position	Nbre de caractères	Information
1à6	6	N° d'identification de la station
7à10	4	Année
11à12	2	Mois
13	1	N° de la quinzaine
14 à 77	16x4	Valeurs de pluies journalières 9999 indique une valeur manquante