

Un climat tranché

Pour décrire de manière plus approfondie les facteurs climatiques des cinq sites expérimentaux, nous avons sélectionné soit les données climatologiques directement observées sur le site comme celles de la station de Bidi dans la province du Yatenga, soit les données de la station climatologique la plus proche.

Les stations climatologiques de Ziguinchor en Casamance et Nioro du Rip dans le Siné-Saloum sont situées très près des sites expérimentaux. Celles de Banfora dans la Comoé, Ouahigouya dans le Yatenga et Sikasso au sud du Mali en sont plus éloignées.

En Afrique de l'Ouest, le gradient climatique est de direction Nord-Sud, les différences climatiques sont donc d'autant plus sensibles entre les stations climatologiques et les sites, que l'on se déplace sur des grandes distances vers le nord ou vers le sud pour rejoindre la station climatologique la plus proche. Ainsi, des différences climatiques sensibles peuvent être prévues entre le site de Kadiolo et la station climatologique de Sikasso localisée 80 km au nord de Kadiolo, entre le site de Bidi et la station climatologique de Ouahigouya localisée 40 km au sud-est de Bidi.

L'altitude, autre facteur important de différenciation climatique, ne joue aucun rôle dans le climat entre les stations de référence et les régions où sont implantés les 5 sites expérimentaux. Les sites choisis se situent en effet dans des zones de très faible relief.

Tableau V : Localisation géographique des stations climatologiques

Projet	Station climatologique	Latitude Nord en °	longitude Ouest en °	Altitude en m	Direction et distance du site en km
YATENGA	BIDI OUAHIGOUYA	13°55'	02°30'	305	sur le site S-E 40
		13°35'	02°26'	329	
SINE-SALOUM	NIORO du RIP KAOLACK	13°44'	15°47'	18	W 20
		14°08'	16°04'	6	W 100
CASAMANCE	ZIGUINCHOR	12°33'	16°16'	26	S-W 15
MALI-SUD	SIKASSO	11°19'	05°41'	377	N 80
COMOE	BANFORA GAOUA	10°37'	04°46'	270	E 40
		10°20'	03°11'	333	E 220

LES TEMPERATURES

Les fluctuations des températures maximales et minimales moyennes mensuelles sont consignées sur le tableau VI.

Du nord vers le sud, l'écart entre les températures maximales et minimales se réduit, les températures maximales diminuent en saison chaude et les températures minimales augmentent légèrement en saison sèche et fraîche. L'écart maximal entre les températures moyennes les plus fortes et les plus faibles est de 28°C à Bidi, 24°C à Kaolack, 22°C à Sikasso et Ziguinchor.

Les températures maximales annuelles sont supérieures à 40° C dans le Yatenga et le Siné-Saloum, de l'ordre de 37 à 38°C dans les autres régions. Les maxima sont observés pendant le mois d'avril sur l'ensemble des stations à l'exception de Bidi où il sont décalés vers le mois de mai. Les températures minimales sont situées au mois de janvier, de l'ordre de 13.5°C à Bidi et 16°C aux autres stations. Du mois de juillet au mois d'octobre, elles sont toutes remarquablement homogènes et oscillent entre 21 et 24°C. Deux maxima sont observés sur les moyennes mensuelles et les températures maximales; le premier en avril, le second en octobre ou novembre. Le maximum d'avril présente une plus forte amplitude que le second.

L'influence océanique se traduit à Kaolack et à Ziguinchor par une atténuation des maxima et une nette diminution des minima en saison chaude: 19 à 20°C en avril à Ziguinchor et Kaolack, 25.4 et 25.5°C à Sikasso et Bidi.

Tableau VI : Températures mensuelles moyennes, maximales et minimales en degrés C aux stations climatiques de référence

	Type	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
YATENGA	Tx	30.9	34.4	37.7	41.0	41.2	38.1	34.5	33.2	34.5	37.5	36.2	31.8
BIDI	Tm	22.1	25.6	29.3	33.2	34.2	32.4	29.0	28.0	28.8	29.8	27.0	23.6
1987-90	Tn	13.4	16.7	20.9	25.5	27.2	26.7	23.5	22.8	23.1	22.1	17.8	15.3
SINE-SALOUM	Tx	34.0	37.0	39.0	40.0	39.0	37.0	34.0	33.0	33.0	35.0	36.0	34.0
NIORO DU RIP	Tm	25.0	27.0	29.0	31.0	30.0	30.0	29.0	29.0	28.0	29.0	28.0	25.0
1951-85	Tn	16.0	17.0	19.0	20.0	21.0	24.0	24.0	24.0	23.0	23.0	20.0	17.0
CASAMANCE	Tx	33.4	35.9	37.2	37.4	35.9	33.9	31.8	31.2	31.9	33.4	33.8	32.7
ZIGUINCHOR	Tm	24.8	26.4	27.9	28.5	28.6	28.8	27.6	27.3	27.5	28.2	26.9	24.7
1970-90	Tn	16.0	16.8	19.5	19.5	21.2	23.5	23.4	23.3	23.1	23.0	20.1	16.8
MALI SUD	Tx	33.1	35.6	36.8	38.1	36.8	32.2	30.4	29.1	30.8	33.1	34.6	32.4
SIKASSO	Tm	24.8	27.7	30.3	31.5	30.4	27.2	25.6	24.8	25.5	27.0	27.1	24.8
1987-89	Tn	16.0	19.5	23.2	25.4	25.2	22.5	21.6	21.7	22.0	22.0	19.6	17.4
COMOE	Tx	33.9	36.1	36.8	36.4	34.1	31.5	29.9	29.5	30.4	33.0	34.4	33.5
BANFORA	Tm	26.8	29.2	30.7	30.0	28.8	26.9	25.8	25.4	25.8	27.7	27.1	26.7
1970-1990	Tn	18.0	20.6	22.8	24.0	23.5	22.2	21.6	21.5	21.1	21.0	18.5	17.7

Tx : température maximale moyenne mensuelle

Tm : température moyenne mensuelle

Tn : température minimale moyenne mensuelle

LES VENTS

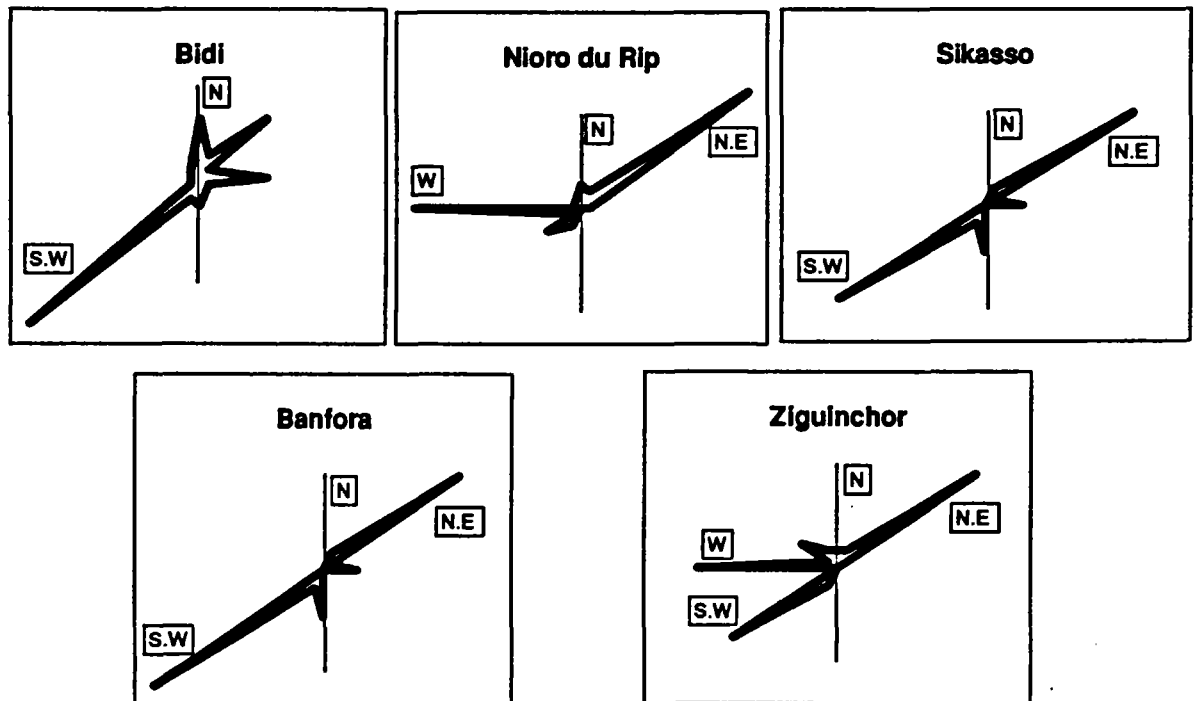
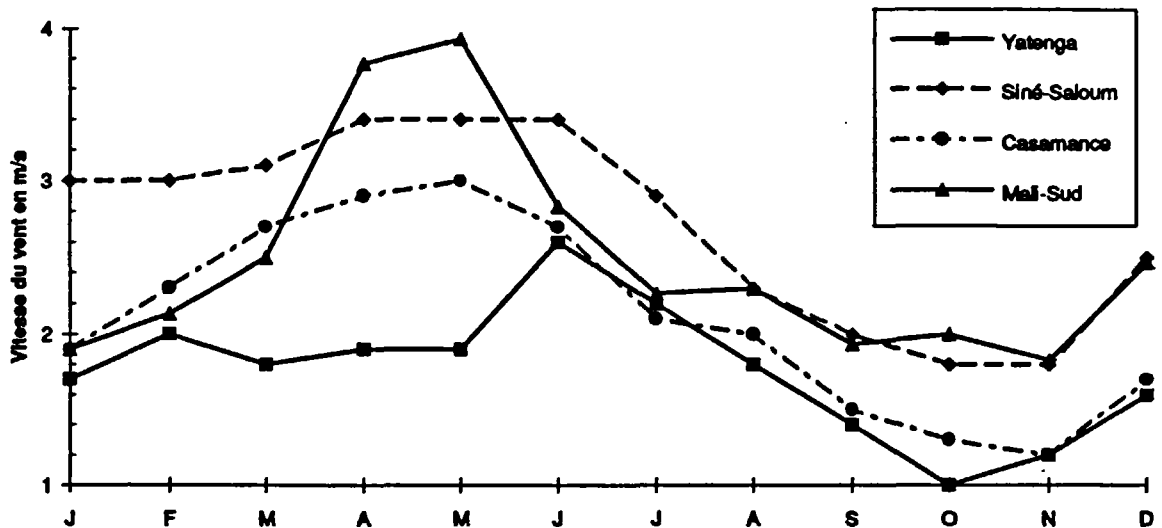
En relation directe avec la circulation générale des masses d'air dans la zone intertropicale, les vents viennent du nord-est en saison sèche dès le mois de novembre sur tous les sites, jusqu'au mois d'avril dans le Yatenga et le Siné-Saloum, jusqu'en mars dans la Comoé et la région de Sikasso et jusqu'en février en Casamance.

Avec l'arrivée du Front Inter-Tropical, les vents viennent du sud-ouest ou du sud à Bidi, Sikasso et Banfora, plutôt de l'ouest ou sud-ouest à Kaolack et Ziguinchor à proximité de la côte atlantique.

Les fluctuations des vitesses moyennes du vent sont reportées sur la figure 5. La tendance générale est à la croissance régulière des vitesses moyennes du vent entre les mois de novembre et d'avril, puis à leur décroissance régulière du mois de juin au mois d'octobre. La station de Bidi fait un peu exception avec une stagnation des vitesses moyennes entre 1.8 et 2 mètres par seconde du mois de février au mois de mai. Les valeurs maximales mensuelles sont les plus fortes à Sikasso et Kaolack (3.9 et 3.4 m/s).

A Bidi et dans toute la zone soudano-sahélienne, les premières pluies en début d'hivernage sont précédées de vents violents chargés de poussières qui soufflent d'est en ouest pendant de courtes durées (0.5 à 1 heure), mais à des vitesses supérieures à 20 m/s.

Figure 5 : Vitesses et directions des vents



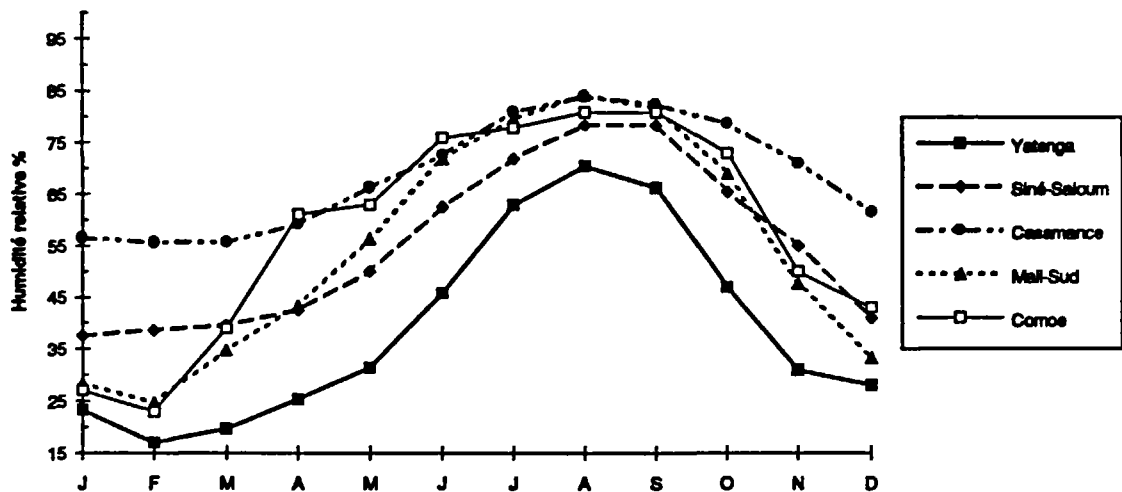
L'HUMIDITE RELATIVE

Les fluctuations des humidités relatives moyennes mensuelles sont reportées sur la figure 6. Les courbes d'humidité présentent toutes un maximum au mois d'août et un minimum en février. Les moyennes mensuelles maximales sont supérieures à 81% à Ziguinchor, Gaoua et Sikasso, proches de 79% à Kaolack et de 71% à Bidi.

Les moyennes mensuelles minimales sont égales à 55.6% à Ziguinchor, 37.5% à Kaolack, 24.7% à Sikasso, 23% à Gaoua et 17% à Bidi. L'influence océanique est donc particulièrement sensible sur les valeurs les plus faibles de l'humidité relative du mois de novembre au mois d'avril.

La période pendant laquelle l'humidité relative est supérieure à 50% dure 5 mois à Bidi, 7 mois à Kaolack et Sikasso, 8 mois à Gaoua et 12 mois à Ziguinchor. A l'exception de Ziguinchor, cette période correspond sensiblement à la durée de la saison des pluies.

Figure 6 : Humidité relative en %



LA PLUVIOMETRIE

LA PLUVIOMETRIE ANNUELLE ET SES FLUCTUATIONS

Pour étudier les fluctuations pluviométriques annuelles, nous avons choisi d'effectuer une étude statistique sur deux périodes distinctes : 1922-1969 et 1970-1990.

Depuis une vingtaine d'années, l'Afrique de l'Ouest connaît en effet une longue période sèche sans équivalent dans la chronique des précipitations observées et il nous a paru intéressant de caractériser cette période en la comparant à celle qui la précède (COUREL, 1984, CARBONNEL & HUBERT, 1985, SIRCOULON, 1985 & 1986).

Les résultats de l'étude statistique sont consignés dans le tableau VII où sont reportées les pluviométries annuelles médianes, décennales sèches et décennales humides sur les deux périodes de référence pour les cinq stations climatologiques représentatives du climat des cinq sites expérimentaux.

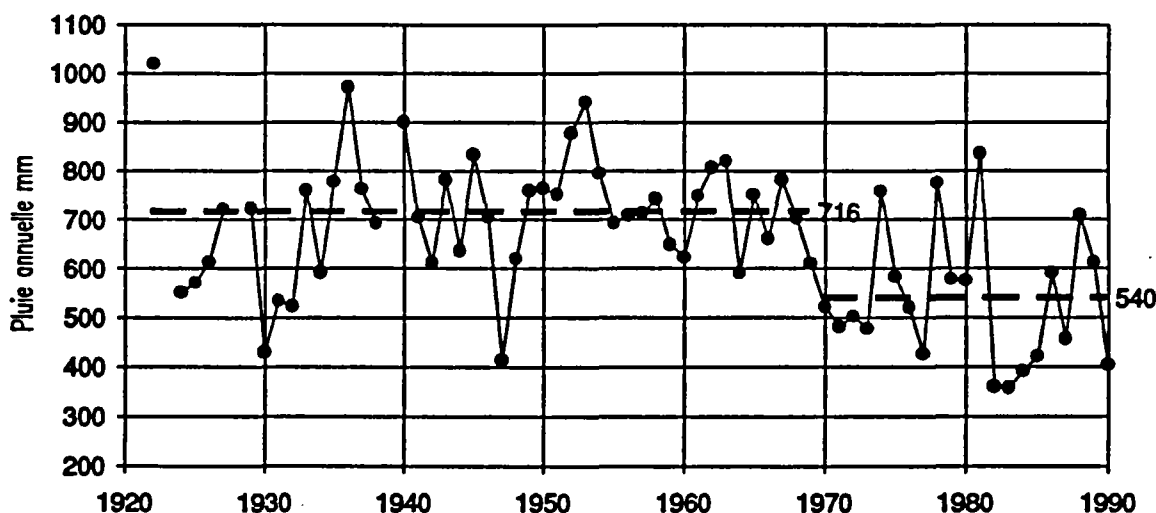
Tableau VII : Pluviométries annuelles en mm aux stations climatiques de référence

STATION	décennale sèche		médiane		décennale humide	
Période	70-90	22-69	70-90	22-69	70-90	22-69
OUAHIGOUYA	375	564	540	716	725	869
NIORO du RIP	469	660	635	900	878	1127
BANFORA	756	961	982	1197	1166	1501
SIKASSO	857	1069	1067	1288	1326	1623
ZIGUINCHOR	859	1194	1173	1564	1425	1933

Ce tableau montre que la pluviométrie annuelle médiane sur la période 1970-1990 correspond à la pluviométrie décennale sèche de la période 1922-1969. L'écart entre les valeurs médianes est considérable. Il augmente avec le total pluviométrique annuel: de 176 mm à Ouahigouya, il passe à 220 mm à Banfora et Sikasso et 390 mm à Ziguinchor.

Cet écart se maintient entre les valeurs décennales sèches des deux périodes et s'accroît entre les pluviométries annuelles décennales humides. La figure 7 montre la différence entre la moyenne calculée sur les périodes 1922-1969 et 1970-1990 au poste de Ouahigouya.

Figure 7 : Pluviométrie annuelle et moyennes calculées sur les périodes 1922-1969 et 1970-1990 au poste de Ouahigouya.



Les effets de la sécheresse actuelle ne se font donc pas sentir uniquement dans la zone sahélienne, mais dans toute l'Afrique de l'Ouest où les paysans doivent s'adapter aux nouvelles conditions climatiques en introduisant de nouvelles variétés de plantes cultivées ou en modifiant leurs techniques culturales. Dans le Yatenga, la sécheresse se traduit par la précarité de la culture sèche traditionnelle du mil dont le cycle végétatif dure 90 jours et qui ne peut se développer sous une pluviométrie annuelle inférieure à 350 millimètres. En Casamance, la sécheresse se traduit par la sur-salure des terres des bas-fonds soumis aux influences de la marée, à leur abandon par les agriculteurs et à la destruction des mangroves, forêts naturelles qui bordent les bas-fonds.

LES PLUVIOMETRIES MAXIMALES

Les pluviométries journalières maximales

Dans le cadre de l'étude des crues exceptionnelles pour la protection des aménagements hydro-agricoles et routiers, une analyse statistique des pluies journalières maximales annuelles a été réalisée aux stations de référence et des intensités pluviométriques maximales en 5, 15, 30 et 60 minutes.

Pour les stations de Ouahigouya et Banfora, les résultats de l'étude statistique des intensités pluviométriques sont extraits des travaux de Y. BRUNET-MORET(1963).

La comparaison des pluies journalières maximales observées sur les période 1922-1969 et 1970-1990 ne permet pas de conclure à une diminution des valeurs maximales de fréquence rare. Si la période sèche actuelle se traduit par une diminution très nette du nombre de pluies journalières (J. ALBERGEL, 1986), les valeurs maximales aux périodes de retour égales et supérieures à 10 ans n'en semblent pas affectées (Tableau VIII).

La tendance générale est à la croissance des valeurs maximales journalières avec la hauteur pluviométrique annuelle mais cette tendance n'est pas régulière, les valeurs observées à Nioro du Rip et à Ziguinchor étant plus fortes que les autres et les valeurs observées à Sikasso étant plus faibles.

Tableau VIII : Pluviométries journalières maximales en mm aux stations climatiques de référence

STATION	Période de retour en années					
	2	5	10	20	50	100
OUAHIGOUYA	59	83	100	117	139	155
NIORO du RIP	84	102	116	130	149	164
BANFORA	93	101	114	128	145	159
SIKASSO	81	104	122	139	160	176
ZIGUINCHOR	115	140	160	177	203	222

Intensités pluviométriques maximales

En ce qui concerne les intensités pluviométriques maximales, les valeurs sont assez proches d'une station à l'autre, à l'exception de Nioro du Rip où les intensités de pluies sont nettement plus fortes qu'ailleurs et de Sikasso où elles sont nettement plus faibles (Tableau IX).

Tableau IX : Intensités pluviométriques maximales en 5, 15, 30 et 60 mn en mm/h

STATION	périodes de retour en années	Intensités en mm/h			
		5mn	15mn	30mn	60mn
OUAHIGOUYA	2	178	103	72	48
	5	204	116	83	58
	10	224	124	91	65
NIORO du RIP	2	200	104	84	59
	5	223	124	101	72
	10	243	139	112	82
SIKASSO	2	150	95	68	49
	5	180	109	77	54
	10	198	114	82	58
BANFORA	2	165	96	67	49
	5	192	110	78	55
	10	214	120	86	61
ZIGUINCHOR	2	184	102	72	52
	5	205	115	82	59
	10	223	128	90	64

LA PLUVIOMETRIE ET L'ÉVAPO-TRANSPIRATION

Pluviométrie et évapo-transpiration mensuelles

Nous avons consigné sur le tableau X les pluviométries moyennes mensuelles calculées sur la dernière période sèche 1970-1990, les évaporations mensuelles et les évapo-transpirations potentielles mensuelles exprimées en millimètres. Les évapo-transpirations potentielles ont été calculées selon la formule de Penman avec un albédo correspondant à un couvert végétal dense ($a=0.25$). A la station de Bidi, les pluies mensuelles correspondent à la période 1985-1990, 1985 étant l'année du début des observations à cette station.

La saison des pluies commence en juin dans le Yatenga, le Siné-saloum et la Casamance, en avril dans la Comoé et dans la région de Sikasso. Elle est terminée en octobre dans le Yatenga, en novembre sur les autres sites. Le mois d'août est le mois le plus pluvieux: il concentre à lui seul 25% de la pluviométrie de Sikasso et jusqu'à 37% de la pluviométrie annuelle à Nioro du Rip, 39% à Bidi. A Ziguinchor, Nioro du Rip et Bidi, les mois de juillet, août et septembre totalisent environ 85% de la pluviométrie annuelle.

Sur l'ensemble des 5 sites expérimentaux, le climat est donc bien caractérisé par une saison des pluies dont la durée décroît du sud vers le nord: elle est de 7 mois à Sikasso et Banfora, 5 mois à Ziguinchor et Nioro du Rip, 4 mois à Bidi. La valeur de la pluviométrie annuelle décroît elle aussi de manière très nette du sud vers le nord avec un gradient pluviométrique de 1 à 2 mm par kilomètre. L'influence océanique se traduit par une remontée des isohyètes interannuelles en latitude quand on se déplace d'est en ouest. Ziguinchor, situé 2° plus haut en latitude que Banfora, reçoit en moyenne 160 à 360 mm de pluies supplémentaires par an.

Tableau X : Pluviométries, évaporations et évapo-transpirations mensuelles en mm aux stations climatiques de référence

	Type	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
YATENGA	P	0.0	0.0	0.0	7.0	5.6	38.7	136.4	177.9	77.6	16.7	0.0	0.0	459.9
BIDI	E	279	322	425	459	449	369	291	226	228	282	285	273	3888
1985-90	ETP	146	165	201	213	241	225	196	186	174	176	153	143	2221
SINE-SALOUM	P	0.0	0.5	0.0	0.0	3.2	52.1	139.1	233.0	155.6	49.5	0.5	0.5	634.0
NIORO DU RIP	E	260	241	335	309	301	288	245	202	210	236	201	220	3048
1970-90	ETP	183	186	254	258	248	198	180	158	144	161	150	155	2275
CASAMANCE	P	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	89.0	295.0	379.0	288.0	78.0	6.0	2.0	1143.0
ZIGUINCHOR	E	233	246	285	279	272	226	194	174	177	195	198	208	2687
1970-90	ETP	123	135	182	183	179	145	123	110	115	128	125	111	1659
MALI SUD	P	0.0	7.0	13.0	40.0	92.0	134.0	219.0	273.0	200.0	75.0	13.0	2.0	1068.0
SIKASSO	E	189	-	-	-	221	162	121	108	73	96	109	146	-
1970-90	ETP	158	174	208	189	198	165	149	127	117	121	126	143	1875
COMOE	P	2.0	8.6	15.7	60.0	98.0	115.7	168.4	265.0	170.5	56.0	18.0	4.3	982.2
BANFORA														

P : pluie moyenne mensuelle en mm

E : évaporation mensuelle mesurée au bac colorado en mm

ETP : évapo-transpiration potentielle mensuelle calculée avec la formule de PENMAN en mm avec albédo = 0.25 pour couvert végétal

L'ETP calculée par la formule de Penman avec un albédo de 0.25 correspond à l'évaporation d'un couvert végétal dense bien alimenté en eau. Sur l'ensemble des 5 stations climatologiques, l'ETP mensuelle est maximale de mars à mai, supérieure à 200 mm à Bidi et Nioro du Rip, supérieure à 170 mm à Sikasso et Ziguinchor. A l'exception de Bidi, elle est minimale sur l'ensemble des autres stations d'août à octobre, inférieure à 160 mm à Nioro du Rip, inférieure à 125 mm à Sikasso et Ziguinchor. A Nioro du Rip et Ziguinchor les faibles valeurs de l'ETP se prolongent jusqu'en janvier. A Bidi, dans le Yatenga, les valeurs les plus faibles, inférieures à 160 mm, sont observées de novembre à janvier.

En première approximation, on peut considérer que les cultures se développent sans irrigation quand la pluviométrie mensuelle est supérieure à la moitié de l'ETP et qu'elles souffrent de déficit hydrique à la fin de leur cycle végétatif quand la pluviométrie mensuelle est inférieure à l'ETP. En appliquant ce principe sommaire, on constate que la période favorable aux cultures s'étend de juillet à septembre (90 jours) dans le Yatenga et le Siné-Saloum, de mai à septembre (150 jours) à Sikasso et Banfora, de juin à septembre (120 jours) à Ziguinchor.

Pluviométrie et évapo-transpiration décadaire

En l'absence d'irrigation, le régime des pluies apparaît comme l'élément déterminant qui conditionne la production agricole. La durée de l'alimentation hydrique des cultures en fin de saison des pluies dépend de la réserve en eau du sol sur une épaisseur correspondant à la profondeur d'enracinement. Compte tenu de son faible enracinement, 30 à 50 cm de profondeur, le riz est une plante très sensible aux aléas pluviométriques. Or l'utilisation des moyennes pluviométriques gomme complètement le caractère aléatoire des chutes de pluie.

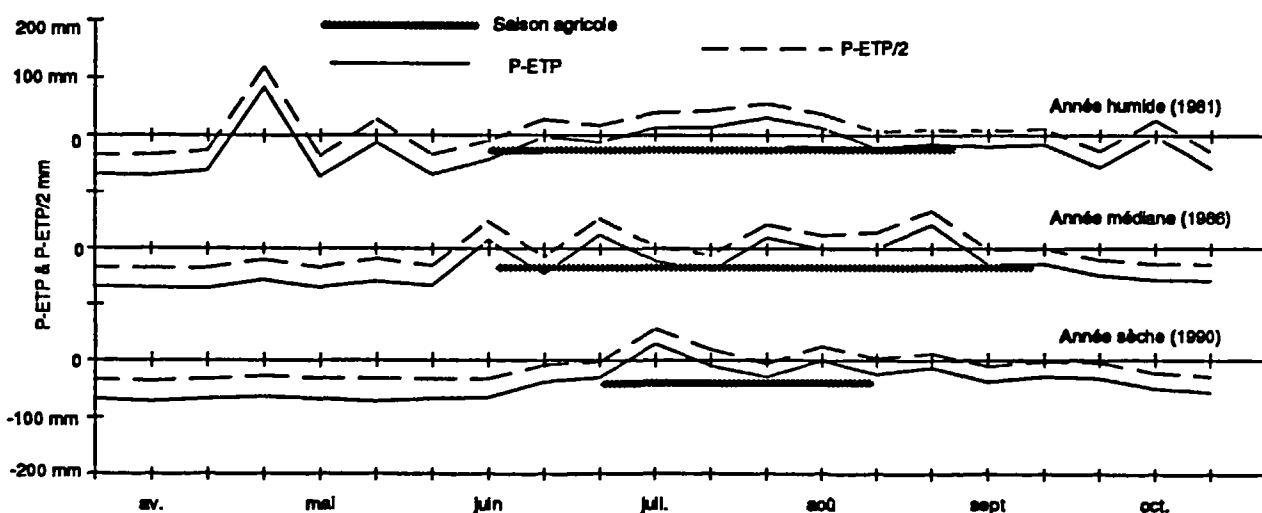
Afin d'apprécier l'effet du caractère aléatoire des précipitations sur les cultures, nous avons choisi le riz pluvial comme culture test et nous avons sélectionné sur la période sèche 1970-1990 trois années correspondant, pour chaque station climatologique de référence, à une pluviométrie annuelle décennale sèche, une pluviométrie annuelle médiane et une pluviométrie annuelle décennale humide.

Nous avons ensuite comparé les pluies décadaires aux valeurs de l'ETP en considérant que la levée des jeunes plants de riz était possible dès que la pluviométrie décadaire dépassait la moitié de l'évapo-transpiration potentielle sans sécheresse ultérieure de plus d'une décade. En fin de cycle cultural, nous avons considéré que les besoins hydriques du riz pluvial étaient satisfaits dans la décade qui suivait la dernière décade au cours de laquelle la pluviométrie dépassait la valeur de l'ETP, ce qui revient à allonger de 10 jours le cycle cultural après l'arrêt des fortes pluies (SERPANTIE, 1992).

Projet Yatenga

Les résultats de ces comparaisons montrent qu'à Ouahigouya, la période favorable à la riziculture pluviale n'est que de 50 jours en 1990 (année décennale sèche), de 95 jours en 1986 (année médiane) et de 85 jours en 1981 (année décennale humide). La durée du cycle végétatif du riz pluvial au Yatenga étant de 90 jours, cette comparaison montre que pour une année décennale humide de la période 1970-1990, le succès de cette culture n'est pas absolument garanti et dépend encore de la répartition temporelle des précipitations (Figure 8).

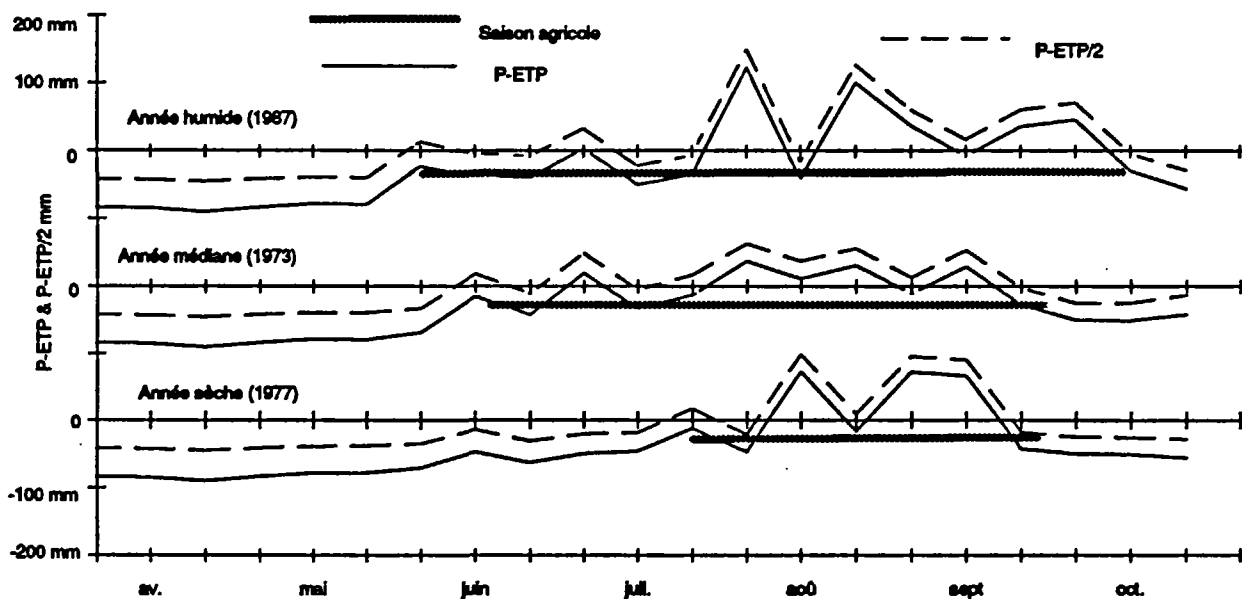
Figure 8 : Définition de la saison agricole dans le Yatenga pour un riz pluvial



Projet Siné-Saloum

A Nioro du Rip, la période favorable à la riziculture pluviale a été de 70 jours en 1977 (année décennale sèche), de 110 jours en 1973 (année médiane) et de 160 jours en 1987 (année décennale humide). Dans le Siné-Saloum, pour des cycles végétatifs de 90 jours, la satisfaction naturelle des besoins hydriques du riz est assurée en moyenne 4 années sur cinq (Figure 9).

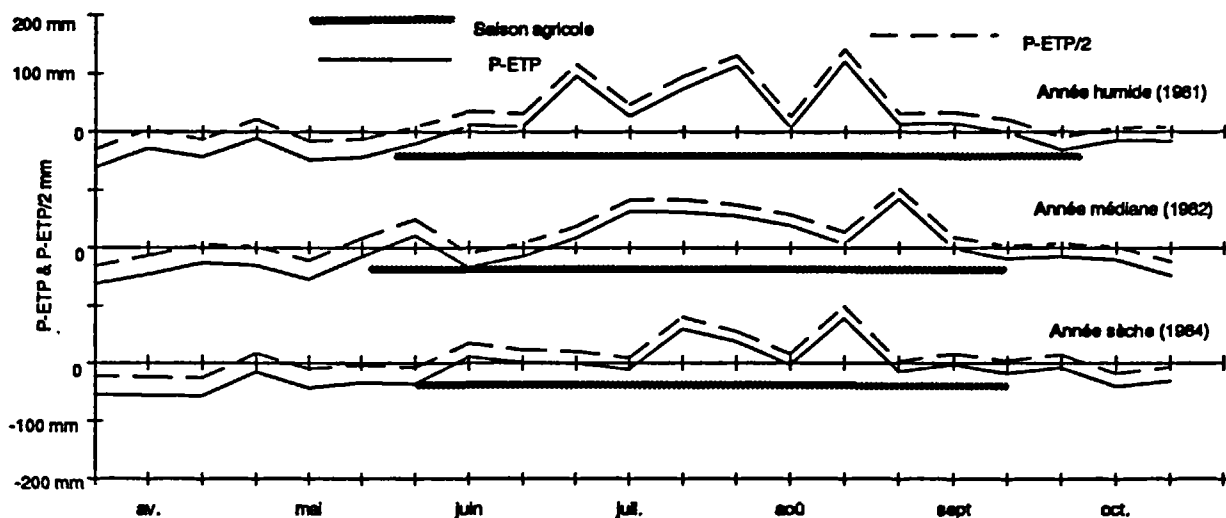
Figure 9 : Définition de la saison agricole dans le Sine-Saloum pour un riz pluvial



Projet Mali-Sud

A Sikasso, la période favorable à la riziculture pluviale est longue de 100 jours en 1984 (année décennale sèche), de 130 jours en 1982 (année médiane) et en 1981 (année décennale humide). Pour des cycles végétatifs de 120 jours, la région de Sikasso se retrouve donc à peu près dans la même situation que Nioro du Rip où les cycles végétatifs sont de 90 jours. (Figure 10).

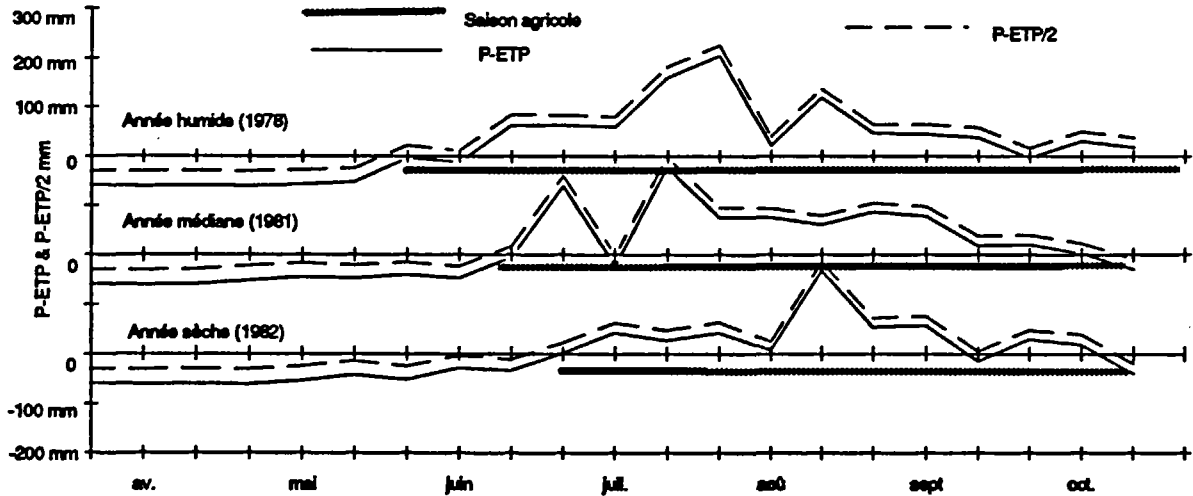
Figure 10 : Définition de la saison agricole au Mali-Sud pour un riz pluvial



Projets Comoé et Casamance

Pour les autres stations, Banfora et Ziguinchor, la période favorable aux cultures du riz pluvial est, dans tous les cas, égale ou supérieure à 120 jours pour les 3 années sélectionnées, de l'année décennale sèche à l'année décennale humide (Figure 11).

Figure 11 : Définition de la saison agricole en Casamance pour un riz pluvial



La sécheresse des vingt dernières années, en augmentant le caractère aléatoire des précipitations, accentue la précarité des cultures même dans les régions assez arrosées comme le Siné-Saloum et le sud du Mali. Cette précarité est d'autant plus prononcée que l'on s'approche de la zone sahélienne.