

Beaucoup d'autres coins du Sahel malien ont été visités au moins 1x pour faire des observations et prendre des échantillons pour analyse.

3.2 LA METEOROLOGIE DU SAHEL ET DU TERRAIN D'ETUDE

3.2.1 Introduction

Le début de cette partie du livre (partie 3.2.2) sert à informer le lecteur sur l'état général du climat au Sahel. Les données présentées sont des moyennes à long terme comme celles publiées par Cochemé et Franquin (1967). La pluviosité est le facteur météorologique le plus important parce que c'est le seul facteur qui varie de façon significative du nord au sud dans la région. Comme résultat, la durée de la croissance varie aussi du nord au sud et il y a une relation nette entre la pluviosité et la productivité (voir partie 6.3). Par contre les facteurs qui déterminent l'évapotranspiration potentielle sont beaucoup moins variables dans la région que cette pluviosité.

Parce que l'essentiel de la recherche détaillée du projet P.P.S. était exécuté à Niono (partie 3.1) beaucoup d'informations météorologiques étaient prises à cet endroit. Ces informations figurent dans un dossier météorologique dont les chercheurs spécialisés peuvent disposer. Un résumé de ces valeurs, surtout de celles qui seront utilisées dans la suite de ce rapport, est donné (partie 3.2.3).

La fin de cette partie (partie 3.2.4) est consacrée à la variabilité de la pluviosité d'une année à l'autre. Les variations des autres facteurs ne sont pas telles qu'elles influencent la production primaire. Donc elles ne sont pas traitées ici. La pluviosité par contre a une influence primordiale sur la production comme sera prouvé dans ce rapport. Comme exemple la pluviosité à Niono des années 1976-1979 est interprétée. A cet effet nous essayons d'abord de trouver un appui à la statistique. Nous illustrons que cette analyse ne conduit pas à une compréhension assez détaillée de la production primaire, et que sur la base d'une analyse statistique il n'est même pas possible de classer une année comme déficitaire, normale ou excédentaire. Des éléments de la pluviosité qui déterminent plus directement la croissance sont discutés dans la partie 4.4.

Il faut voir partie 6.6.7.2 pour une discussion de la possibilité d'une augmentation de l'albédo des terrains par l'exploitation et sur l'estimation de son influence sur la météorologie du Sahel.

3.2.2 Météorologie du Sahel

Pluviosité La pluviosité annuelle d'une partie de l'Afrique de l'Ouest est présentée à la fig. 3.2.1; nous localisons le Sahel entre les isohyètes de 100 et 600 mm an⁻¹. A la partie ouest (le Sénégal, le Mali) ces isohyètes se situent entre les latitudes de 14-18° N et à l'est (le Niger, le Tchad) entre 12-16° N. Le caractère dominant de cette région est que les pluies tombent en été pendant 2-4 mois et le reste de l'année est très sec (voir fig. 3.2.2). Ce cycle est causé par le changement de la localisation de la Zone de Convergence Intertropicale qui suit avec un délai de 6 semaines l'éloignement du soleil au nord. Il est clair que la quantité de pluie par mois de la saison brève est élevée dans la

38 Fig. 3.2.1. La pluviosité annuelle moyenne du Sahel de l'Afrique de l'ouest. Les frontières nationales et les fleuves sont indiqués.

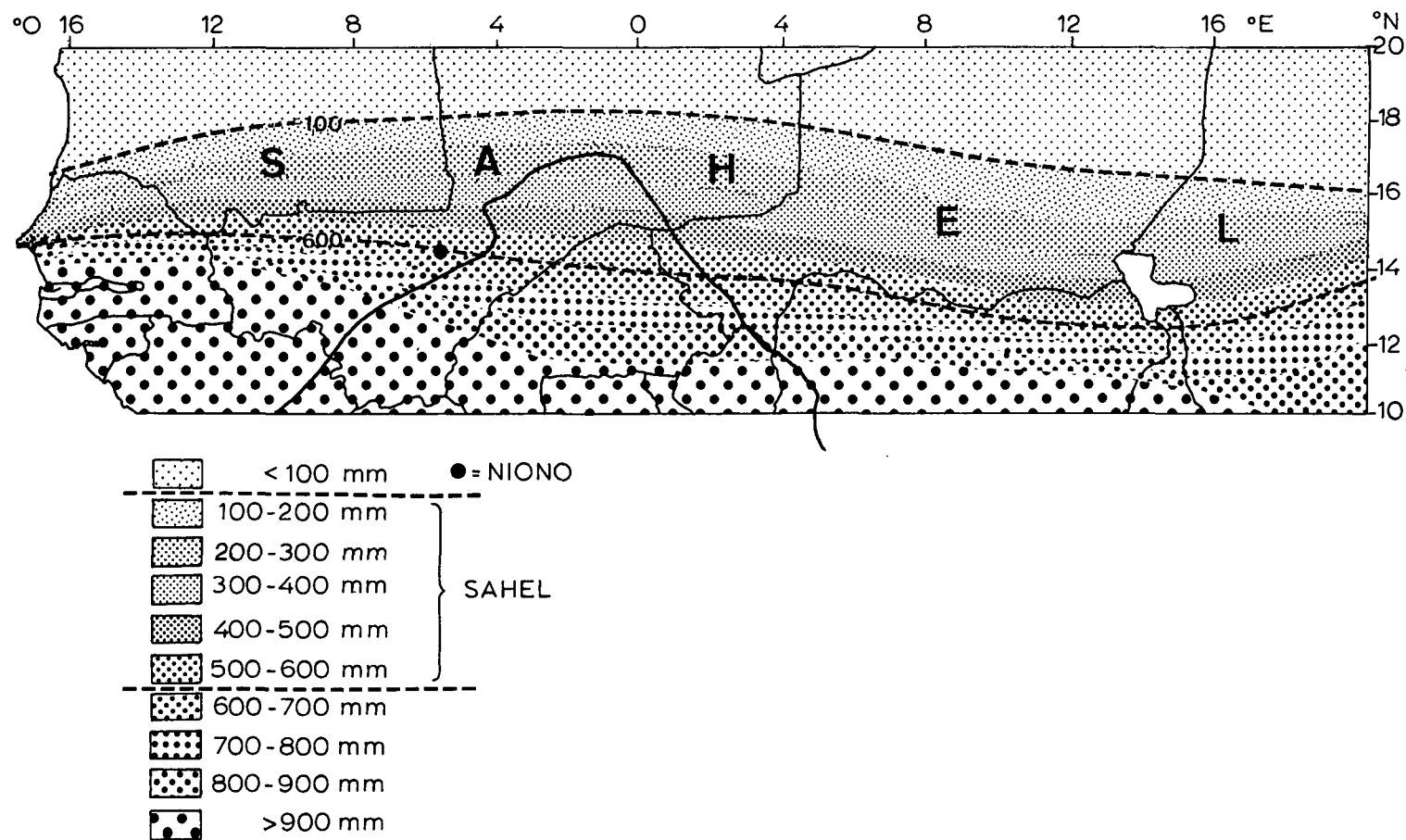


Fig. 3.2.1. The mean annual rainfall of the West African Sahel. The national borders and the rivers are indicated.

Fig. 3.2.2. La répartition de la pluviosité par décade dans les parties nord et sud du Sahel (selon Davy et al., 1976).

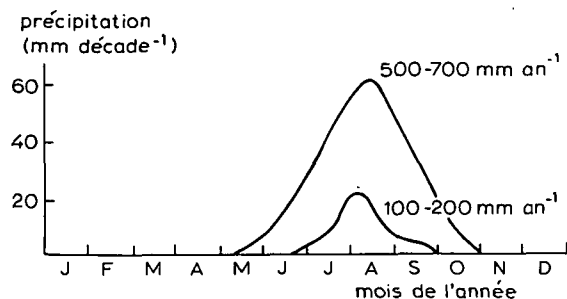


Fig. 3.2.2. The distribution of the rainfall by decade for the north and south Sahel (according to Davy et al., 1976).

partie sud du Sahel. Sans entrer dans trop de détails, nous pouvons dire déjà, que, vu cette pluviosité considérable et étant donné l'expérience agronomique acquise ailleurs, les potentialités de ces quelques mois humides sont grandes contrairement à ce que l'on pense (pourvu que certaines conditions nécessaires soient remplies à savoir des facteurs agronomiques et économiques).

Evapotranspiration Les variations de la température de l'air, la pression de vapeur d'eau et le rapport insolation/durée totale du jour (Cochemé et Franquin, 1967) sont présentés au tableau 3.2.1. La vitesse du vent est à considérer comme constante et égale à $1,5 \text{ m s}^{-1}$. Des valeurs pour les radiations en dehors de l'atmosphère dépendant du la-titude et de la période de l'année peuvent être trouvées dans des tableaux standards. Ces

Tableau 3.2.1. Quelques données climatologiques du Sahel (selon Cochemé et Franquin, 1967).

	Nord 17° N, P1 = 200 mm	Milieu 15° N, P1 = 450 mm	Sud 13° N, P1 = 700 mm
Température (°C)			
Moyenne annuelle	29,0	28,0	27,5
Moyenne avril-octobre	31,5	30,0	29,0
Moyenne août	31,0	27,0	26,0
Moyenne novembre-mars	24,0	25,0	26,0
Pression vapeur d'eau (mbar)			
Moyenne annuelle	12,5	15,0	18,5
Moyenne avril-octobre	17,5	20,0	23,5
Moyenne août	24,0	25,5	26,5
Moyenne novembre-mars	7,5	10,0	12,5
Rapport insolation/durée totale du jour (%)			
Moyenne annuelle	72	72	67
Moyenne avril-octobre	75	70	60
Moyenne août	70	58	50
Moyenne novembre-mars	>80	>80	>80

Table 3.2.1. Some climatological data of the Sahel (according to Cochemé and Franquin, 1967).

Fig. 3.2.3. Evapotranspiration potentielle dans les parties nord et sud du Sahel selon Penman (dans Cochemé et Franquin, 1967). La saison principale de croissance est indiquée (.....).

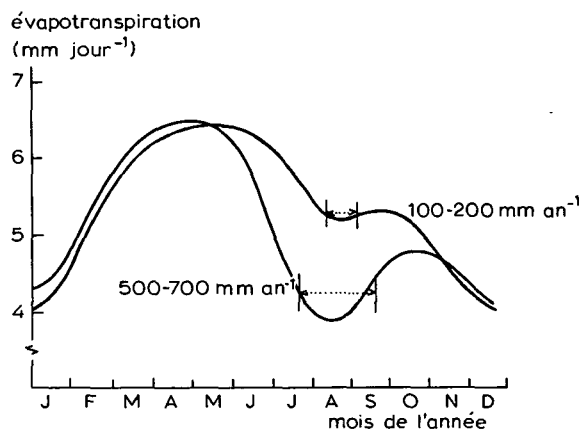


Fig. 3.2.3. Potential evapotranspiration according to Penman (in Cochemé and Franquin, 1967) in the north and south Sahel. The main growing season is indicated (.....).

éléments permettent de calculer l'évapotranspiration potentielle (ETP) selon Penman (dans Cochemé et Franquin, 1967) comme indiqué dans la fig. 3.2.3. Dans la partie sud du Sahel l'ETP est de $4,2 \text{ mm jour}^{-1}$ pendant la période de croissance et dans la partie nord du Sahel elle est de $5,2 \text{ mm jour}^{-1}$.

3.2.3 Météorologie du ranch de Niono

Dans la fig. 3.2.4 la pluviosité mesurée au ranch sur nos champs d'expérimentation est présentée par les moyennes décadaires. Les chiffres pour le ranch sont des moyennes de 6 points d'observations. La pluviosité annuelle de ces points ne varie pas beaucoup mais la distribution dans l'année peut être différente, voir fig. 3.2.5.

Nous avons constaté une différence importante entre la pluviosité à la Station Météorologique à Niono (au milieu d'une zone d'irrigation) et au ranch, 10 km à l'est de la zone d'irrigation, voir tableau 3.2.2. La différence entre Niono et le ranch est plus grande qu'attendue. En effet, les chiffres indiquent avec une incertitude de moins de 2% que le ranch est plus sec que Niono. Mais il y a trop peu d'observations au ranch pour bien quantifier cette différence, et nous utilisons les chiffres de Niono pour le ranch s'il n'y a pas d'observations directes.

Pendant les 4 années d'observations nous avons enregistré toutes les pluies avec leurs intensités. La répartition de la pluviosité en pluies individuelles était comme montrée par le tableau 3.2.3. L'intensité des pluies est élevée. En 1977, 35% de la pluie est tombée avec une intensité supérieure à 50 mm h^{-1} , voir fig. 3.2.6. En 1978 ce pourcentage est de 20%. Sur la base de l'intensité des pluies, l'énergie cinétique des pluies $>10 \text{ mm}$ est environ $27 \text{ J m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ($J = \text{joule}$), calculée selon la méthode Wischmeier et Smith (1958). Kowal et Kassam (1976) ont trouvé pour Samaru (dans la partie nord du

Fig. 3.2.4. Pluviosité par décade des années 1976-1979 du ranch à Niono. Les chiffres sont des moyennes par décade.

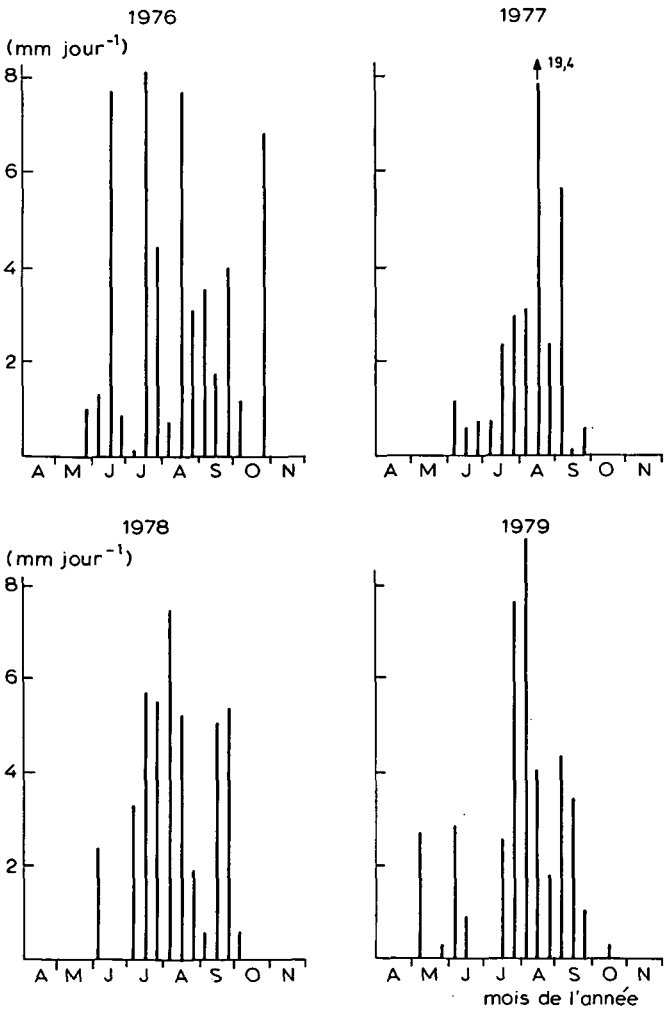


Fig. 3.2.4. Rainfall by decade for the years 1976-1979 at the ranch near Niono. The figures are the means per decade.

Fig. 3.2.5. Pluviosité par décade de 1978, sur nos champs d'expérimentation sur le sable (—) et l'argile (-----) à Niono (Mali).

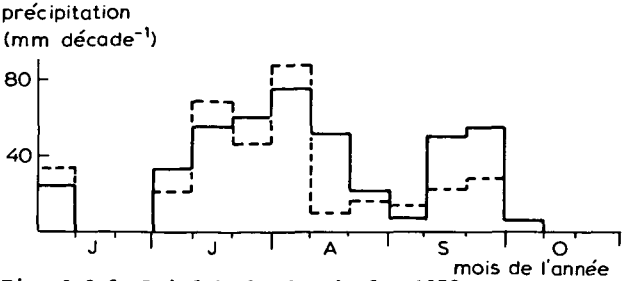


Fig. 3.2.5. Rainfall by decade for 1978, on our experimental fields on sand (—) and clay (-----) at Niono, Mali.

Tableau 3.2.2. Pluviosité annuelle (mm)
à Niono et au ranch distants de 10 km.

	Niono	Ranch
1976	631	587
1977	505	380
1978	623	453
1979	550	376

Table 3.2.2. Annual rainfall (mm) at
Niono and at the ranch 10 km away.

Tableau 3.2.3. Pourcentage de la pluviosité annuelle au
ranch divisée en classes de pluies de grandeurs diffé-
rentes.

	0-5 mm	5-10 mm	10-20 mm	0-30 mm	>30 mm
1976	5	12	20	21	41
1977	8	13	27	12	40
1978	10	25	25	20	20
1979	6	20	26	19	30
Moyenne	7	18	25	18	33

Table 3.2.3. Percentage of the annual rainfall at the
ranch divided into classes of showers of different
magnitude.

Nigeria) une valeur de $36 \text{ J m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ pour les années sèches 1973 et 1974. Dans une région en Inde avec un climat semblable à celui du Sahel on trouve $22 \text{ J m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$. Dans les zones tempérées cette énergie est beaucoup plus petite.

Beaucoup d'autres données utilisées dans ce livre sont collectionnées par la Météorologie Nationale du Mali sur sa station à Niono et présentées à la fig. 3.2.7 comme moyennes décennales de la température maximale et minimale du jour, de l'humidité de l'air, de la vitesse du vent et de la radiation d'ondes courtes ($0,4-2 \mu\text{m}$). La fig. 4.2.4a présente les moyennes de ces observations.

Un facteur qui joue aussi un rôle dans le budget énergétique (voir partie 2.2) et qui provoque donc la transpiration, mais qui est mal connu et qu'on ne trouve pas dans la littérature, c'est la radiation des ondes longues ($4-100 \mu\text{m}$) (R.O.L.) émises par le ciel et les nuages. La R.O.L. émise par la végétation et le sol, peut être calculée par la formule de Stefan-Boltzmann, σT^4 , dans laquelle σ est $5,668 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ et T la température thermodynamique de la végétation ou du sol. Quand par exemple la température de la végétation est 30°C , la radiation des ondes longues émises par la végétation a une valeur de 478 W m^{-2} .

La R.O.L. émise par le ciel et les nuages a son origine dans la vapeur d'eau du ciel et le CO_2 dont les concentrations varient d'une façon inconnue avec la hauteur et la température dans le ciel. Cette radiation ne pouvait pas être mesurée directement à Niono mais un examen était fait à Niamey (v.d. Sanden et Goudriaan, comm. pers.) pour vérifier laquelle des différentes formules pour calculer cette R.O.L. sera la meilleure dans les conditions sahéliennes. La recherche a démontré que la formule de Brunt est la meilleure

Fig. 3.2.6. Pourcentage de la pluviosité annuelle qui dépassait une certaine intensité à Niono. — 1977, --- 1978, 1979.

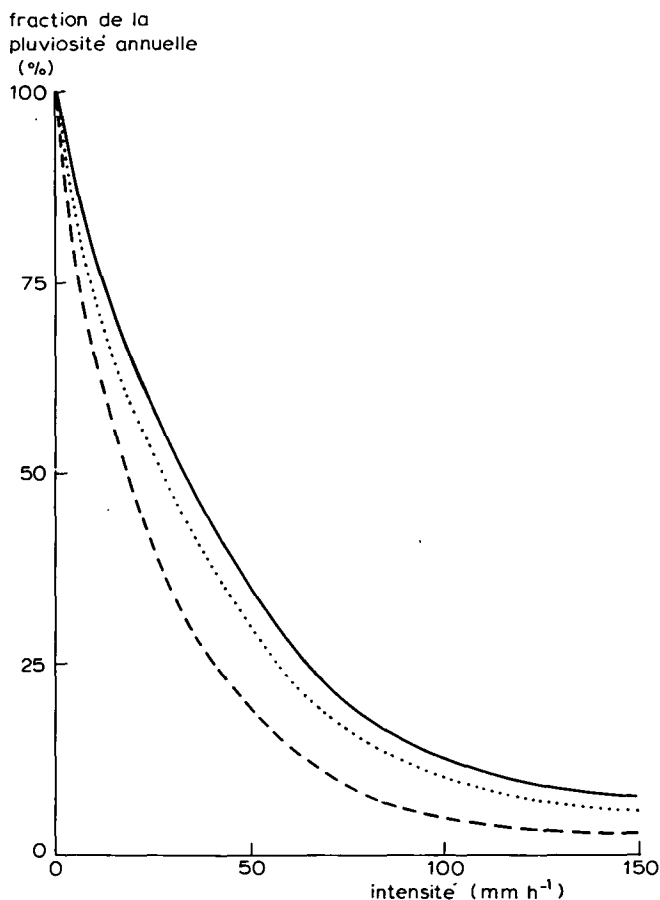


Fig. 3.2.6. Percentage of the annual rainfall that exceeded a certain intensity at Niono. — 1977, --- 1978, 1979.

pour exprimer approximativement la radiation des ondes longues en fonction de la température et l'humidité de l'air mesurées sous abri. Cette formule a la forme:

$$R.O.L. = (a + b \sqrt{e}) \sigma T^4 \quad (\text{formule 3.2.1})$$

où

a = une constante empirique 0,62

b = une autre constante empirique $0,035 \text{ mbar}^{-\frac{1}{2}}$

e = pression de la vapeur d'eau (mbar) mesurée sous abri (2 m de hauteur)

T = température thermodynamique de l'air (K) mesurée sous abri (2 m de hauteur)

σ = la constante de Stefan-Boltzmann $5,668 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

Quand par exemple la température est 30°C et la pression de vapeur 30 mbar (70% humidité relative), B , la R.O.L. reçue par le sol et la végétation a la valeur de 388 W m^{-2} . La ra-

Fig. 3.2.7. A: température journalière maximale et minimale.
 B: l'humidité relative de l'air.
 C: vitesse du vent.
 D: radiation.
 Les chiffres sont des moyennes par décade.
 + 1976, . 1977, × 1978, □ 1979.

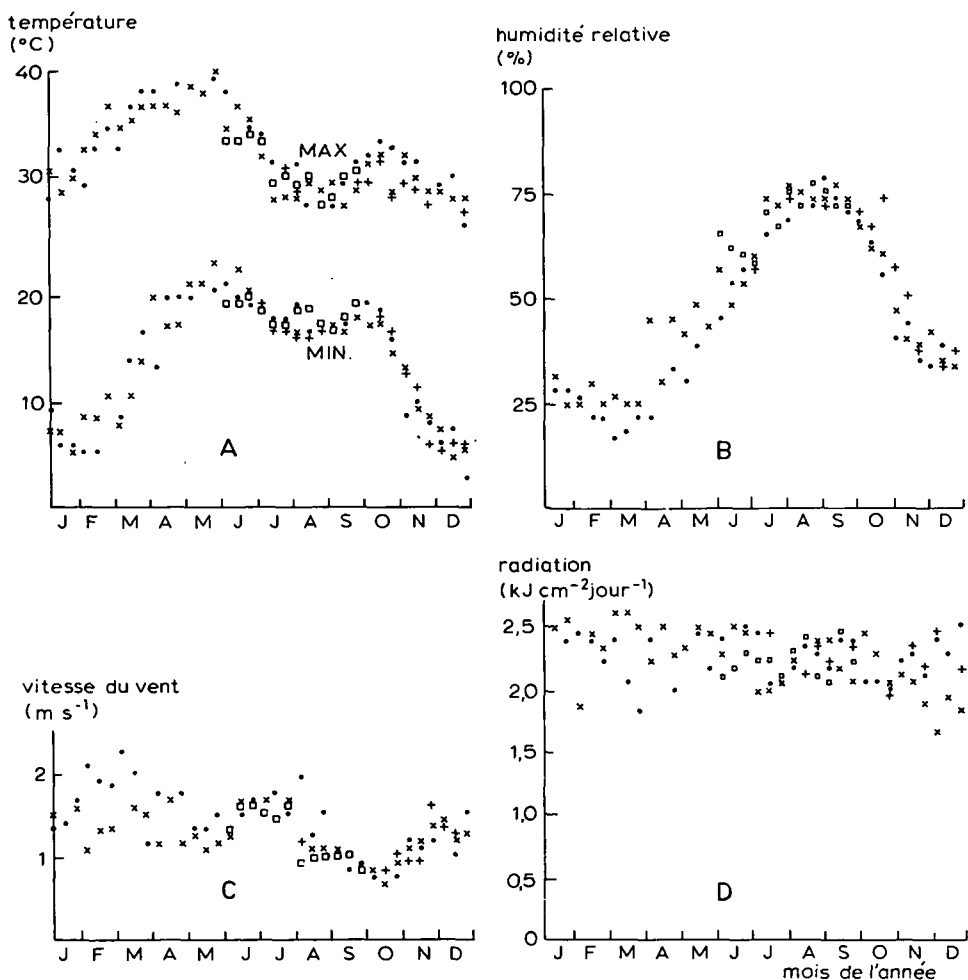


Fig. 3.2.7. A: daily maximum and minimum temperatures.
 B: relative humidity of the air.
 C: wind speed.
 D: radiation.
 The figures are the means per decade.
 + 1976, . 1977, × 1978, □ 1979.

diation émise par le sol et la végétation est 478 W m^{-2} , donc la R.O.L. nette est 90 W m^{-2} . Cette formule est valable pour un ciel clair. Quand il y a de nuages, la valeur de la R.O.L. émise par le ciel doit être diminuée de près de 0,1 de sa valeur selon le degré de couverture du ciel.

3.2.4 Variabilité de la pluviosité

En dehors de la variation de la pluviosité liée aux différences de latitude il y a une variation d'une année à l'autre à un même endroit. A cause de cette variation inter-annuelle la production primaire n'est pas constante mais varie aussi d'une année à l'autre. C'est pourquoi un des buts de nos recherches était d'illustrer de quelle manière des variations interannuelles de la pluviosité influencent la quantité, la qualité et le dynamisme de la végétation. Voir aussi la partie 6.3.

Variabilité annuelle Comme exemple la variation interannuelle de la pluviosité à Niono (1950-1978) est présentée à la fig. 3.2.8. La distribution est presque normale; la moyenne ($\bar{P}_1$) est 581 mm, avec un écart type (δ) de 160 mm, et l'espérance mathématique (μ = probabilité 50% = p50%) est 580 mm. Les valeurs p10% = 785 mm et p90% = 375 mm.

Qu'appelle-t-on une année sèche ou une année humide? Il y a 2 approches de cette question. La première, purement statistique dit qu'une année est sèche si elle a une chance statistique de paraître par exemple 1x chaque 10 ans (la probabilité que la pluviosité est supérieure est donc 90%). Par analogie la pluviosité avec une probabilité de 10% est la pluviosité d'une année humide qui a aussi une chance statistique de paraître 1x chaque 10 ans. La deuxième manière de définir une année sèche ou humide est une manière plus subjective basée sur une quantité de pluie absolue. Une année est sèche si la végétation est influencée de façon significative par un déficit de la pluie en comparaison avec une année normale (p50%). En termes de pluviosité on dit souvent que la végétation n'est pas affectée si $0,8 \mu < P_1 < 1,2 \mu$, où P_1 est la pluviosité réelle de l'année et μ est l'espérance mathématique. Une classification des 4 années pendant lesquelles les recherches du projet P.P.S. étaient exécutées est présentée au tableau 3.2.4.

Suivant le tableau 3.2.4 seulement une année était sèche selon le critère statistique mais 3 années sur 4 la pluviosité était inférieure à la moyenne selon le deuxième critère, donc 3 années sur 4 étaient considérées comme sèches.

Une analyse d'autres stations au Mali (fig. 3.2.9) que la distribution mathématique de la pluviosité annuelle pour des moyennes plus basses que Niono n'est plus 'normale'; par exemple la moyenne de 200 mm an⁻¹ à une espérance mathématique de 185 mm an⁻¹. En général, l'écart type de la pluviosité annuelle reste dans le même ordre si la pluviosité moyenne annuelle change beaucoup. Ce qui veut dire que l'incertitude en comparaison avec l'espérance mathématique est plus grande dans la partie nord du Sahel que dans la partie sud. Au Sahel la variabilité annuelle est plus grande qu'aux zones tempérées (par exemple les Pays Bas $\mu = 740$, $\delta = 110$, p10% = 600, p90% = 880 mm an⁻¹). Pourtant, cela n'explique que partiellement la grande variation en biomasse: la pluviosité annuelle n'est pas une donnée assez détaillée pour expliquer ces variations en biomasse.

Variabilité mensuelle Un traitement de la pluviosité mensuelle est déjà plus détaillée que la pluviosité annuelle traitée ci-dessus. La pluviosité du ranch de Niono est résumée pour les mois de juin-octobre au tableau 3.2.5. Dans ce tableau sont indiquées aussi les espérances mathématiques des années 1950-1978 et les limites selon lesquelles les mois sont à classer sec, normal ou humide suivant les 2 systèmes de classification discutés

Fig. 3.2.8. Analyse de la probabilité de la pluviosité à Niono, 1950-1978. $\bar{P}l = 581$, $\mu = 580$, $\delta = 160$ (mm an⁻¹).

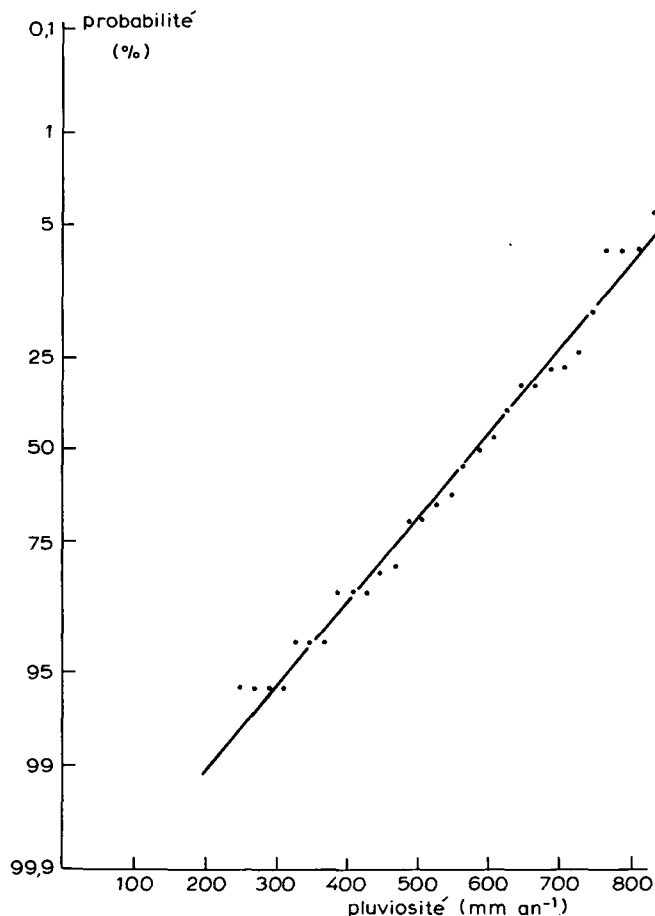


Fig. 3.2.8. Analysis of the probability of rainfall at Niono, 1950-1978. $\bar{P}l = 581$, $\mu = 580$, $\delta = 160$ (mm yr⁻¹).

Tableau 3.2.4. Classification des années 1976-1979 selon 2 systèmes en années sèches, normales ou humides.

	Classification statistique			Classification absolue		
	sèche $P_l < p_{90\%}$ $P_l < 375$ mm	normale P_l < 785 mm > 375 mm	humide $P_l > p_{10\%}$ $P_l > 785$ mm	sèche $P_l < 0,8 \mu$ $P_l < 465$ mm	normale P_l < 697 mm > 465 mm	humide $P_l > 1,2 \mu$ $P_l > 697$ mm
1976 ($P_l = 587$ mm)		x			x	
1977 ($P_l = 380$ mm)		x		x		
1978 ($P_l = 453$ mm)		x		x		
1979 ($P_l = 376$ mm)	x			x		

Table 3.2.4. Classification of the years 1976-1979 into dry, normal or wet years, according to 2 systems.

Fig. 3.2.9. Probabilité de la pluviiosité au Mali en fonction de la pluviiosité moyenne (Pl entre 200 et 800 mm an⁻¹).

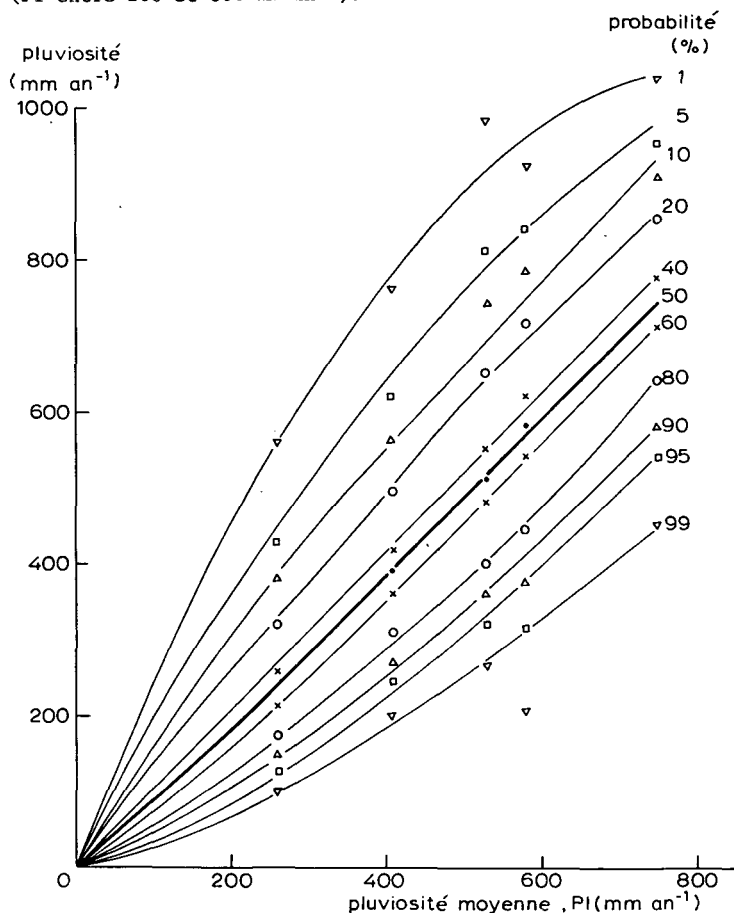


Fig. 3.2.9. Probability of rainfall in Mali as a function of the mean rainfall (Pl between 200 and 800 mm yr⁻¹).

déjà ci-dessus.

Nous reconnaissons 3 mois qui sont d'une importance capitale pour la croissance des plantes pour les raisons suivantes:

- juillet: la pluviiosité de juillet détermine le début de la grande croissance; quand les pluies sont précoces le nombre de jours de croissance peut être élevé et la production peut donc être élevée. Quand juillet est sec ce nombre est réduit et la période de croissance est restreinte.
- août: si août est humide un stock d'eau peut se faire dans le sol. Les plantes peuvent utiliser ce stock pour croître en septembre même si la pluviiosité de septembre est déficitaire. La réalisation d'un stock d'eau dans le sol dépend fortement du ruissellement.
- septembre: la pluviiosité de septembre peut influencer le moment de la maturation de la végétation.

Tableau 3.2.5. Pluviosité mensuelle et la productivité moyenne du ranch de Niono, 1976-1979. L'espérance mathématique, μ , et les valeurs p90% et p10% sont pour Niono et pour les années 1950-1978.

	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Total juillet- septembre	Pourcentage de l'espérance mathématique	Production moyenne (kg ha ⁻¹)
1976	101,5	137,0	135,9	99,0	89,9	371,9	86	2.500
1977	35,3	67,4	193,9	65,7	0	327,0	76	2.300
1978	30,0	146,3	134,3	90,9	9,7	371,5	86	2.000
1979	47,8	88,7	125,1	79,8	6,0	293,6	68	1.400
μ	62	151	185	96	8	432,0	100	
p10%	105	228	294	190	54			
p90%	19	74	76	43	0			
1,2 μ	74	181	222	115	10			
0,8 μ	50	121	148	77	6			

Table 3.2.5. Monthly rainfall and mean productivity at Niono ranch, 1976-1979. The mathematical expectation μ , and the values p90% and p10% are for Niono and for the years 1950-1978.

La pluviosité en dehors de ces 3 mois est peu intéressante pour la production des pâturages. Néanmoins elle peut provoquer une germination précoce et ainsi influencer la composition floristique (partie 4.3.3). Les pluies tardives en octobre par exemple, peuvent aussi provoquer une pourriture désastreuse de la végétation (partie 5.2.5).

Une analyse de la pluviosité mensuelle de 25 années à Niono montre une distribution normale pour les mois de juin, de juillet et d'août et une distribution log-normale (= la différence entre une année humide (p10%) et une année normale (p50%) est plus grande que la différence entre une année sèche (p90%) et une année normale (p50%)) pour septembre et octobre. En général la variation du mois le plus humide est la plus petite, voir fig.

Fig. 3.2.10. Pluviosité mensuelle des mois de juin-octobre pour 2 niveaux de probabilité, exprimée en pourcentage de la pluviosité mensuelle normale. Les • représentent des observations faites à Niono (580 mm an⁻¹); — 200 mm an⁻¹, le Niger; --- 600 mm an⁻¹, le Niger.

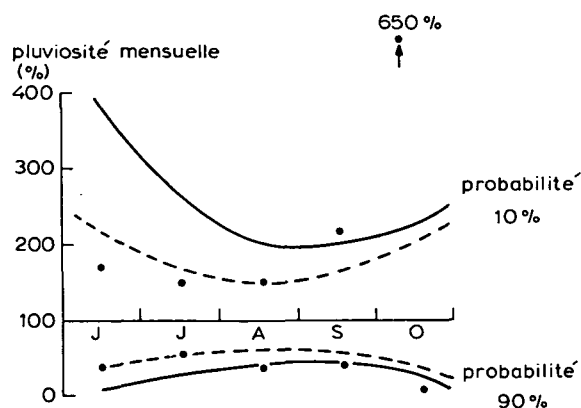


Fig. 3.2.10. Monthly rainfall for the months June-October for 2 levels of probability, expressed in percentage of the normal monthly rainfall. The • represent the observations done at Niono (580 mm yr⁻¹); — 200 mm yr⁻¹, Niger; --- 600 mm yr⁻¹, Niger.

Tableau 3.2.6. Classification des mois juillet-septembre des années 1976-1979 selon 2 systèmes de classification en mois secs (S), normaux (N) ou humides (H).

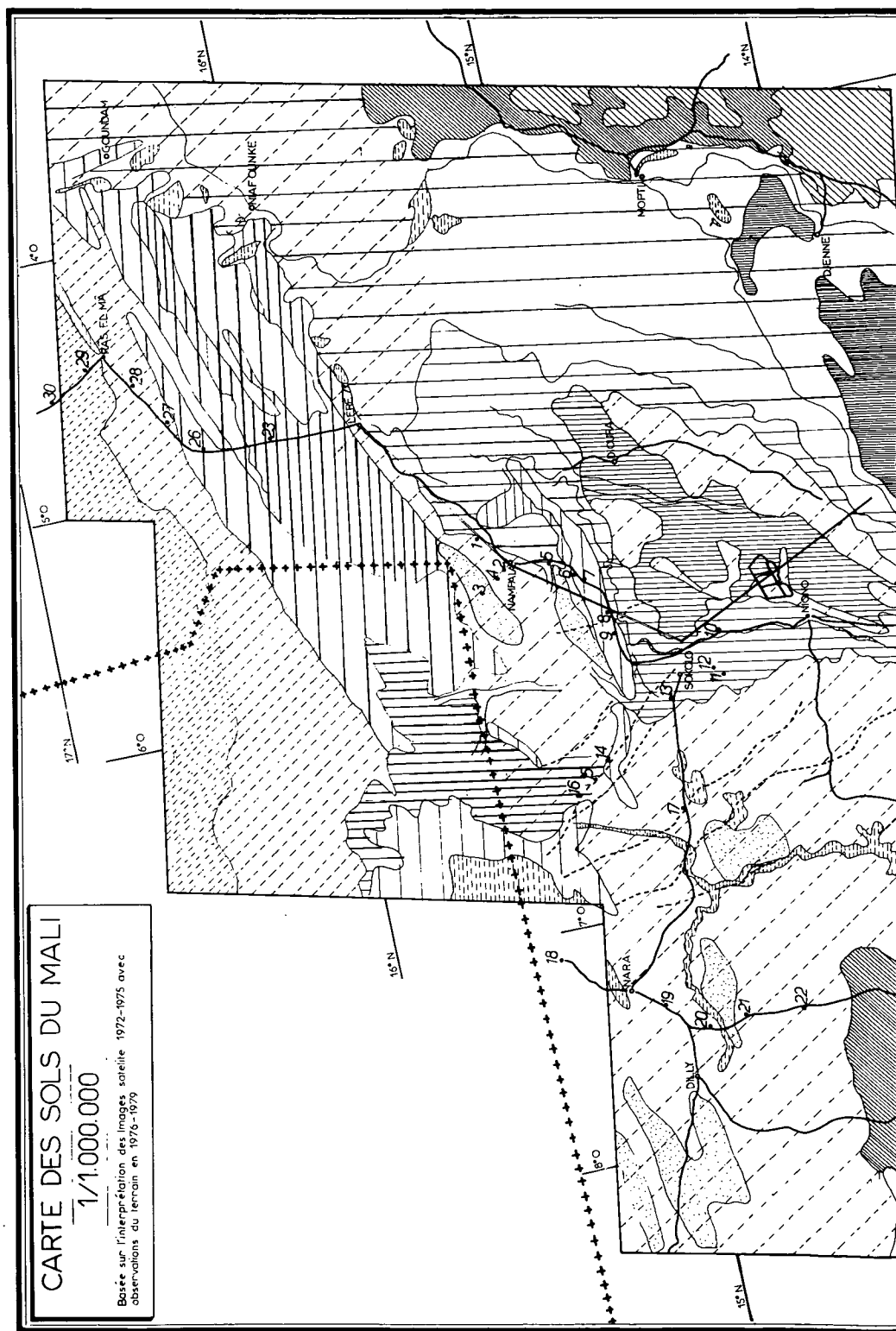
	Classification statistique			Classification absolue		
	juillet	août	septembre	juillet	août	septembre
1976	N	N	N	N	S	N
1977	S	N	N	S	N	S
1978	N	N	N	N	S	N
1979	N	N	N	S	S	N

Table 3.2.6. Classification of the months July-September of the years 1976-1979 into dry (S), normal (N) or wet (H) months, according to 2 systems of classification.

3.2.10. Une pareille analyse (Sivakumar et al., 1979) a démontré que le mois d'août au Niger a une distribution statistique normale, les mois de juillet et de septembre sont légèrement log-normaux et les mois de juin et d'octobre sont fortement log-normaux. En se basant sur le tableau 3.2.5, les 3 mois importants sont classés au tableau 3.2.6 comme sec, normal ou humide. Selon le premier critère tous les mois sauf juillet 1977 étaient normaux. Selon l'autre critère toutes les années ont des mois secs. D'après le tableau 3.2.6 les années 1976 (NSN) et 1978 (NSN) sont bien comparables. Les années 1977 (SNS) et 1979 (SSN) étaient sèches, 1979 plus que 1977. Au tableau 3.2.5 nous donnions aussi les biomasses moyennes pour le ranch de Niono. Malgré le fait que 1976 et 1978 semblent identiques du point de vue de la pluviosité, il y a une différence remarquable entre les productivités. Cela veut dire que la pluviosité mensuelle n'est pas non plus un facteur assez précis pour bien comprendre la production primaire.

Variabilité journalière Nous savons par expérience que la période minimale à considérer pour pouvoir comprendre (et estimer) la croissance est la décade (voir partie 4.6). Malheureusement un traitement statistique pour des périodes inférieures à un mois devient inutile ou pas traitable (Cochemé et Franquin, 1967). En plus; ce qu'on a dit sur la pluviosité décadaire et la production est vrai pour la quantité de la biomasse mais pas pour la composition floristique. La répartition, la hauteur et l'intensité des pluies individuelles au début de l'hivernage (juin-juillet) influencent fortement la germination et l'établissement des espèces diverses. Ces aspects de la pluviosité (sur le niveau de la pluviosité journalière) en combinaison avec des caractères des espèces (voir partie 4.3) expliquent le grand dynamisme de la végétation naturelle (voir partie 6.4). Dans la partie 4.4 nous traiterons en détail comment les pluies individuelles influencent les processus divers du bilan d'eau. Cela permet de voir plus clair dans le dynamisme de la végétation. Pour d'autres raisons les conclusions de la partie 4.4 sont simplifiées pour les rendre plus applicables. Ceci résulte dans l'utilisation de la pluviosité décadaire à les parties 4.6 et 5.5 et même de la pluviosité annuelle dans les parties 5.6 et 6.3.

La variabilité de la pluviosité fait qu'il est indispensable de disposer de pluviomètres près des sites d'observation si l'on veut suivre en détail la croissance des plantes.



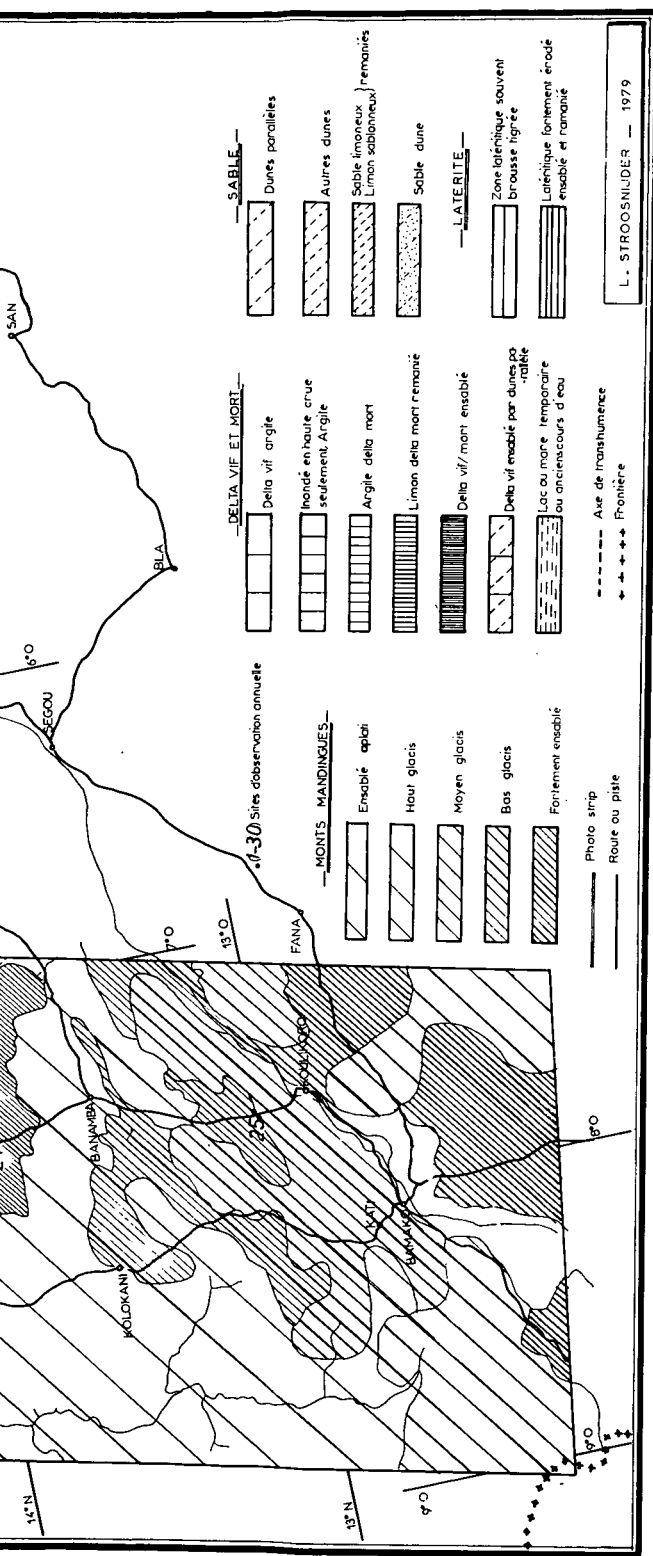


Fig. 3.3.2. Map of the soils in Central Mali.