

# ANALYSE DES SÉQUENCES SÈCHES AU NIGER DE 1950 A 1991

M. FODÉ, O. M. ADAMOU

(Faculté des Sciences, dépt de Physique, université Abdou Moumouni - NIAMEY, NIGER)

## RÉSUMÉ

Dans cette étude nous essayons d'ajuster les distributions empiriques (observées) des séquences sèches à l'aide de modèles de la chaîne de MARKOV. Nous utilisons à cet effet les données de pluviométrie journalière de certaines stations du Niger pour les deux périodes 1950-1970 et 1971-1991. Il est apparu que la chaîne de MARKOV de 2<sup>e</sup> ordre donne un meilleur ajustement de la distribution des probabilités empiriques d'occurrence des séquences sèches ; cet ajustement est d'autant meilleur que les fréquences des précipitations sont élevées et que la longueur de la série des données est limitée au dernier jour pluvieux de la saison. Nous avons aussi déduit que la saison des pluies s'installe effectivement au Niger en juillet ; que le FIT amorce sa descente vers l'équateur en septembre et que les stations d'Agadez et de N'guigmi appartiennent à une même zone climatique (sahélo-saharienne).

## I - INTRODUCTION

Les aspects typiques de la variabilité interannuelle des précipitations au Sahel sont leur persistance et leur amplitude. La dernière sécheresse au Sahel qui persiste encore a commencé vers les années 1966-1968 et le déficit pluviométrique a atteint environ 50 % (NICHOLSON, 1983). L'importance de cette variabilité interannuelle des précipitations est marquée par une descente de 100 à 150 km vers le sud des isohyètes correspondant à la période 1945-1969 par rapport aux isohyètes de la période 1969-1990 (SHIVAKUMAR, *et al.*, 1993). On constate ainsi que des zones sont devenues plus arides que par le passé hypothéquant ainsi leur avenir agricole et accentuant les processus de désertisation (FODÉ et ADAMOU, 1993). La prévision de certains événements météorologiques n'est pas chose facile. Néanmoins, par l'utilisation d'outils statistiques, il est possible de mettre en évidence certaines caractéristiques. La chaîne de MARKOV est l'un de ces outils statistiques qui permet de calculer la probabilité d'occurrence d'un événement à un instant donné sachant qu'il s'est produit l'instant avant. La détermination de ces probabilités d'occurrence nous amène à considérer les précipitations comme des processus stochastiques survenant de manière aléatoire. SHIVAKUMAR *et al.* (1993) ont fait une étude statistique des périodes de sécheresse de plus de 7, 10, 15 et 30 jours suivant le premier jour de chaque décade pour différentes stations du Niger. Une étude statistique des périodes de sécheresse de plus de 15 et 30 jours suivant le premier jour des décades d'octobre n'a pas une importance significative pour la grande majorité des stations du Niger. L'analyse statistique des séquences sèches et pluvieuses prenant en compte des données d'années entières ne nous semble pas réaliste

pour un pays sahélien où le régime des précipitations est nettement séparé en saisons sèche et humide. Notre objectif ici est d'étudier les séquences de sécheresses pour certaines stations du Niger en déterminant la probabilité qu'une séquence sèche dure n jours pendant la saison des pluies que nous avons limitée du 1<sup>er</sup> mai au 31 octobre. L'étude que nous proposons ici, vise à donner des informations supplémentaires aux planificateurs principalement dans le domaine agricole. Nous présentons tout d'abord dans le paragraphe 2 les caractéristiques de la circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest pendant la saison des pluies puis dans le paragraphe 3 nous présentons le modèle statistique utilisé et enfin les résultats et discussions dans le paragraphe 4.

## II - QUELQUES TRAITs CARACTÉRISTIQUES DE LA CIRCULATION GÉNÉRALE EN AFRIQUE DE L'OUEST

La météorologie dans les régions sahéliennes en particulier et dans les régions ouest-africaines en général est marquée, d'après ce qui ressort des études climatologiques, par la structure de l'équateur météorologique schématisant la zone de discontinuité entre des flux d'air provenant des hémisphères nord et sud. Sa trace au sol est connue en Afrique sous le nom de front intertropical (FIT).

De l'hémisphère nord souffle en direction de l'équateur d'une part l'alizé du nord-ouest frais et humide, ayant pour origine l'anticyclone des Açores, d'autre part l'alizé du nord-est (ou harmattan) sec et chaud provenant des régions sahariennes et ayant pour origine l'anticyclone de Libye. Alors que l'alizé du nord-ouest intéresse surtout le Sénégal et la Mauritanie, l'alizé du nord-est intéresse plus particulièrement les pays continentaux du Sahel.

De l'hémisphère sud souffle, comme aspiré par la dépression thermique continentale, l'alizé transéquatorial dévié. C'est un flux du sud-ouest, humide et plus frais appelé flux de mousson. Ce flux est lié à l'anticyclone de Sainte-Hélène migrant vers l'équateur.

La structure moyenne verticale du champ de vent en août est caractérisée par :

- un flux de mousson (air humide et chaud d'origine océanique et équatoriale dont l'épaisseur dépasse rarement 2 000 mètres dans les régions sahéliennes ;
- un premier tube de vent fort (Jet d'Est Africain : JEA) ayant son maximum vers le niveau de pression 600 hpa ;
- un deuxième tube de vent fort situé au niveau supérieur (Jet d'Est Tropical : JET) ; (200 hpa) : c'est un élément de la circulation générale dont la source géographique est la mousson indienne (CADET et GUILLOT, 1991).

La structure de l'équateur météorologique dans les basses couches continentales (structure FIT) est, selon LEROUX (1986), « stérilisante en raison du cisaillement et des contrastes de caractères entre la mousson des basses couches et l'alizé supérieur ; ainsi dans la majorité des cas il peut ne pas pleuvoir. Des précipitations sont toutefois déversées par des perturbations mobiles ». Les pays du Sahel connaissent, de ce fait, un régime pluviométrique très variable.

### III - PRÉSENTATION DU MODÈLE STATISTIQUE ET LES DONNÉES DE L'ANALYSE

Vers les années 1950, de nombreux chercheurs se sont penchés sur l'étude statistique des distributions de probabilité de séquences de jours secs et de jours pluvieux de durée quelconque. Dans ces travaux, des modèles de distributions géométriques et logarithmiques sont utilisés pour la description des fréquences d'occurrence des séquences de jours secs et pluvieux (WILLIAMS, 1952 ; LONGLEY, 1953 ; GABRIEL et NEUMANN, 1957 ; GABRIEL, 1959). Dans toutes ces études les séquences sont considérées comme des événements indépendants. CASKEY (1963), WEISS (1964), HOPKINS et ROBILLARD (1964) et FEYERHERM et BARK (1965) ont montré la possibilité d'utiliser le modèle de calcul des probabilités par la chaîne de MARKOV du 1<sup>er</sup> ordre pour décrire les séquences sèches et pluvieuses. La chaîne de MARKOV du 1<sup>er</sup> ordre fait dépendre la probabilité qu'un jour soit sec/pluvieux de ce qui est arrivé la veille. Par contre, celle du 2<sup>e</sup> ordre fait dépendre la probabilité que survienne un jour sec/pluvieux de ce qui est arrivé la veille et l'avant-veille. La persistance de la sécheresse étant supérieure à celles des jours pluvieux, il a été montré que la chaîne de MARKOV du 2<sup>e</sup> ordre est un modèle théoriquement plus acceptable que celle du 1<sup>er</sup> ordre (GARCIA et MARTIN-VIDE, 1993).

#### 1 - Le modèle statistique

Soit donc à considérer une séquence de  $n$  jours consécutifs et soit

$$x_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

une série de  $n$  variables aléatoires prenant les valeurs  $x_i = d$  ou  $x_i = w$  où  $d$  et  $w$  sont utilisés pour désigner respectivement sec (dry) et humide (wet) en anglais. Nous posons  $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$  la probabilité que la séquence  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  se produise. Nous supposons de plus que d'une année à l'autre ces probabilités sont constantes. L'emploi de la chaîne de MARKOV revient à résoudre un problème de probabilité conditionnelle. La loi de multiplication en théorie des probabilités nous donne alors :

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = P(x_1) \cdot P(x_2/x_1) \cdot P(x_3/x_2, x_1) \cdot \dots \cdot P(x_n/x_{n-2}, x_{n-1}) \quad (1)$$

où  $P(x_1)$  est la probabilité initiale et les autres termes sont les probabilités conditionnelles. La barre (/) se lit « sachant que ».

Si la probabilité conditionnelle apparaissant dans l'équation (1) ci-dessus dépend seulement de la veille, alors :

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = P(x_1) \cdot P(x_2/x_1) \cdot P(x_3/x_2) \cdot \dots \cdot P(x_n/x_{n-1}) \quad (2)$$

Cette équation décrit une séquence connue sous le nom de chaîne de MARKOV du 1<sup>er</sup> ordre et les probabilités conditionnelles sont appelées les probabilités de transitions du fait qu'elles indiquent le passage au cours du temps d'un jour sec à un jour pluvieux (ou la persistance dans le même état) et vice-versa. La détermination de (2) revient à se donner les probabilités initiales et conditionnelles. S'il s'avère que la chaîne de MARKOV du 1<sup>er</sup> ordre est insuffisante pour décrire le processus en cours on pourrait tenter de voir si les probabilités conditionnelles dans (1) après le deuxième terme du membre de droite dépendent de ce que la veille et l'avant-veille ont été pluvieuses ou

sèches. On détermine alors la probabilité  $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$  à l'aide de la chaîne de MARKOV d'ordre 2. Ainsi comme nous l'avons annoncé ci-dessus pour la chaîne de MARKOV du 2<sup>e</sup> ordre, la probabilité d'avoir un jour sec/pluvieux ( $d/w$ ) sachant que la veille et l'avant-veille ont été pluvieuses/sèches (c'est-à-dire les séquences  $wwd/ddw$ ) est identique à l'équation (1). On déduit alors de la même façon les probabilités pour la chaîne de MARKOV du 3<sup>e</sup> ordre où les états pluvieux et secs des trois jours précédant le jour considéré sont pris en compte.

## 2 - Les données

Les données utilisées dans ce travail sont celles de la base de données CLICOM du service de la Météorologie nationale du Niger. Pour les stations considérées ici (tableau 1), nous avons utilisé les données de précipitations journalières des années 1950 à 1991. En raison de la grande période de sécheresse que connaît le Niger et qui a débuté vers les années 1966-1968 nous avons considéré séparément pour chaque station les données allant de 1950 à 1970 puis de 1971 à 1991 afin de mettre en évidence un quelconque effet (s'il existe) de cette période de grande sécheresse climatique. Malgré l'existence de nombreuses études (BENOÎT, 1977 ; SHIVAKUMAR *et al.*, 1993) sur le début et la fin de la période de pluies au Niger, nous voyons encore des paysans semer au mois d'avril. D'après les études de SHIVAKUMAR *et al.*, 1993, le début le plus précoce des précipitations au Niger est le 20 mai avec un écart-type de 17,7 jours (Gaya) et la fin des précipitations la plus tardive le 4 octobre avec un écart-type de 6,2 jours.

C'est pour cette raison que nous avons choisi les dates de début et de fin de la saison des pluies respectivement au 1<sup>er</sup> mai et au 31 octobre.

## 3 - Le traitement des données

Pour des études sur les séquences sèches et humides il est tout d'abord nécessaire de définir un seuil de hauteur de précipitations à partir duquel on peut considérer que le jour est pluvieux ou sec selon que ce seuil est dépassé ou non. Comme le besoin en

Tableau 1 - Coordonnées géographiques des stations et cumul des précipitations pour les périodes 1950-1970 et 1971-1991.

Stations	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Précipitations (mm)	
				1950-1970	1971-1991
Agadez	7° 59' E	16° 58' N	501	3 539,1	2 140,4
Gaya	3° 27' E	11° 53' N	202	17 784,8	15 701,6
Konni	5° 17' E	13° 48' N	272	12 973,6	9 300,7
Mainé	11° 59' E	13° 14' N	338	8 997,2	6 284,7
Magaria	8° 56' E	12° 59' N	360	11 440,6	10 328,6
Maradi	7° 05' E	13° 28' N	368	13 178,8	9 129,2
N'guigmi	13° 07' E	14° 15' N	286	3 345,1	3 653,6
Niamey	2° 10' E	13° 29' N	222	13 275,3	9 995,4
Tahoua	5° 15' E	14° 54' N	386	9 343,5	6 891,5
Tillabéry	1° 27' E	14° 12' N	209	10 659	7 626,3
Zinder	8° 59' E	13° 47' N	451	10 886,6	8 005,3

eau dépend du cycle végétatif de la plante d'une part et qu'au Niger le type de sol prédominant est latéritique, ferrugineux, formant une croûte imperméable et à faible capacité de réserve en eau utile aux plantes d'autre part, nous avons choisi de mener cette étude pour le seuil de minimum de 0,1 mm. Nous ne considérerons que les chaînes de MARKOV des 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> ordres.

Déterminons pour la chaîne de MARKOV de 2<sup>e</sup> ordre le nombre de séquences sèches de longueur supérieure ou égale à deux jours étant donné un état initial noté (wd) de probabilité  $P_{wd}$ . Cet état initial est défini comme étant un jour sec précédé d'un jour pluvieux. En considérant que l'état pluvieux ou sec d'un jour donné dépend seulement de ceux des deux jours précédants, la probabilité d'avoir deux jours secs encadrés par deux jours pluvieux est donnée par :

$$P(wd, d, w) = P(d/wd) \cdot P(w/dd)$$

Cette probabilité est notée :  $q_2 = P_{wdd} P_{ddw}$

De même, les probabilités d'avoir respectivement trois et quatre jours secs sont :

$$q_3 = P(d/wd) \cdot P(d/dd) \cdot P(w/dd)$$

$$= P_{wdd} P_{ddd} P_{ddw}$$

$$q_4 = P(d/wd) \cdot P(d/dd) \cdot P(d/dd) \cdot P(w/dd)$$

$$= P_{wdd} P_{ddd}^2 P_{ddw}$$

d'où en généralisant pour n jours secs on obtient :

$$q_n = P(d/wd) \cdot \underbrace{P(d/dd) \dots P(d/dd)}_{n-2} \cdot P(w/dd)$$

$$= P_{wdd} \cdot P_{ddd}^{n-2} \cdot P_{ddw}$$

$P_{wdd}$  est la probabilité d'avoir deux jours secs après un jour pluvieux,

$P_{ddd}$  la probabilité d'avoir un jour sec après deux jours secs,

$P_{ddw}$  la probabilité d'avoir un jour pluvieux après deux jours secs,

$P_{wdw}$  la probabilité d'avoir un jour sec encadré par deux jours pluvieux.

La probabilité  $P_{ddd}$  est la même que  $P_{wddd}$  puisque pour la chaîne de MARKOV d'ordre deux, l'état d'un jour donné ne dépend que de ceux des deux jours précédants, d'où les relations :

$$P_{wdd} = 1 - P_{wdw}, \quad P_{ddd} = P_{wddd} = 1 - P_{wddw}, \quad P_{ddw} = P_{wddw}$$

Ainsi pour la chaîne de MARKOV du 2<sup>e</sup> ordre, la probabilité qu'une séquence sèche dure n jours est donnée par :

$$q_n = (1 - P_{wdw})(1 - P_{wddw})^{n-2} P_{wddw} \quad (3)$$

et pour la chaîne de MARKOV du 3<sup>e</sup> ordre

$$q_n = (1 - P_{wddw})(1 - P_{wdddw})^{n-3} P_{wdddw} \quad (4)$$

avec :

$$P_{wdw} = \frac{\text{Nombre de séquences } wdw}{\text{Nombre de séquences } wd\dots} \quad (5)$$

la probabilité d'avoir un jour sec encadré de jours de pluie,

$$P_{wddw} = \frac{\text{Nombre de séquences } wddw}{\text{Nombre de séquences } wdd\dots} \quad (6)$$

la probabilité d'avoir deux jours secs encadrés de jours de pluie,

$$P_{wdddw} = \frac{\text{Nombre de séquences } wdddw}{\text{Nombre de séquences } wddd\dots} \quad (7)$$

la probabilité d'avoir trois jours secs encadrés de jours de pluie.

Les points de suspension (...) indiquent que la séquence peut comporter une succession de jours secs jusqu'à la fin de la saison des pluies que nous avons fixée ici au 31 octobre. Ce qui nous a amené à tenir compte des séquences sèches même après le dernier jour de pluie de la saison. Le nombre de séquences d'au moins un jour sec précédé d'un jour pluvieux est la somme de toutes les séquences  $wdw, wddw, wdd\dots$

Nombre de séquences  $wd\dots = \Sigma$  (des séquences de type  $wdw, wddw, \dots wdd\dots d$ )

Le nombre de séquences d'au moins deux jours secs précédés d'un jour pluvieux est donné par :

Nombre de séquences  $wdd\dots =$  Nombre de séquences  $wd\dots -$  Nombre de séquences  $wdw$

Pour le calcul des probabilités empiriques nous nous sommes limités aux séquences sèches encadrées par des jours pluvieux. Ce qui fait que, contrairement au calcul des probabilités dans le cas de la chaîne de MARKOV, nous ne prenons pas en compte ici les séquences  $wd\dots$ . Ces probabilités sont définies par :

$$q_n = \frac{\text{Nombre de séquences de } n \text{ jours secs}}{\sum_{m=1}^{30} \text{Nombre de séquences } wd\dots dw \text{ } m \text{ fois}} \quad (8)$$

## IV - RÉSULTATS

Avant de présenter les résultats expérimentaux, il faut tout d'abord regarder comment varient les probabilités des séquences sèches calculées à partir des chaînes de MARKOV selon que nous prenons en compte ou pas les séquences sèches du type  $wdd\dots$ . En effet, comme nous avons eu à le dire dans l'introduction, les pays du Sahel dont le Niger sont caractérisés par une saison des pluies et une saison sèche bien distinctes l'une de l'autre, sans limites parfaitement définies. Aussi la détermination de la fin de la saison des pluies ne peut être qu'arbitraire. Le nombre de séquences sèches du type  $wdd\dots$  est donc variable et sa prise en compte ou non affecte de façon notable le calcul des probabilités  $P_{wd\dots w}$  et par conséquent les probabilités  $q_n$  estimées à partir des chaînes de MARKOV ; mais est sans effet sur les probabilités empiriques définies par l'équation (8).

### 1 - Distribution des probabilités d'occurrences des séquences sèches pour le seuil de 0,1 mm

#### a) Ajustement par les modèles de la chaîne de MARKOV

Nous présentons sur les figures (fig. 1a, b, c, d) les distributions de probabilités (observées) empiriques pour le seuil 0,1 mm et celles données par les chaînes de MARKOV d'ordres 2 et 3 respectivement pour les périodes 1950-1970 et 1971-1991. Nous pouvons remarquer que pour des séquences sèches de plus de 13 jours toutes les courbes des probabilités empiriques et des chaînes de MARKOV indiquent de très faibles valeurs de probabilités approximativement les mêmes. Les chaînes de MARKOV des 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> ordre sous-estiment les probabilités empiriques d'occurrence des séquences sèches de longueur inférieure à 4, 5 ou 6 jours selon les stations et surestiment celles

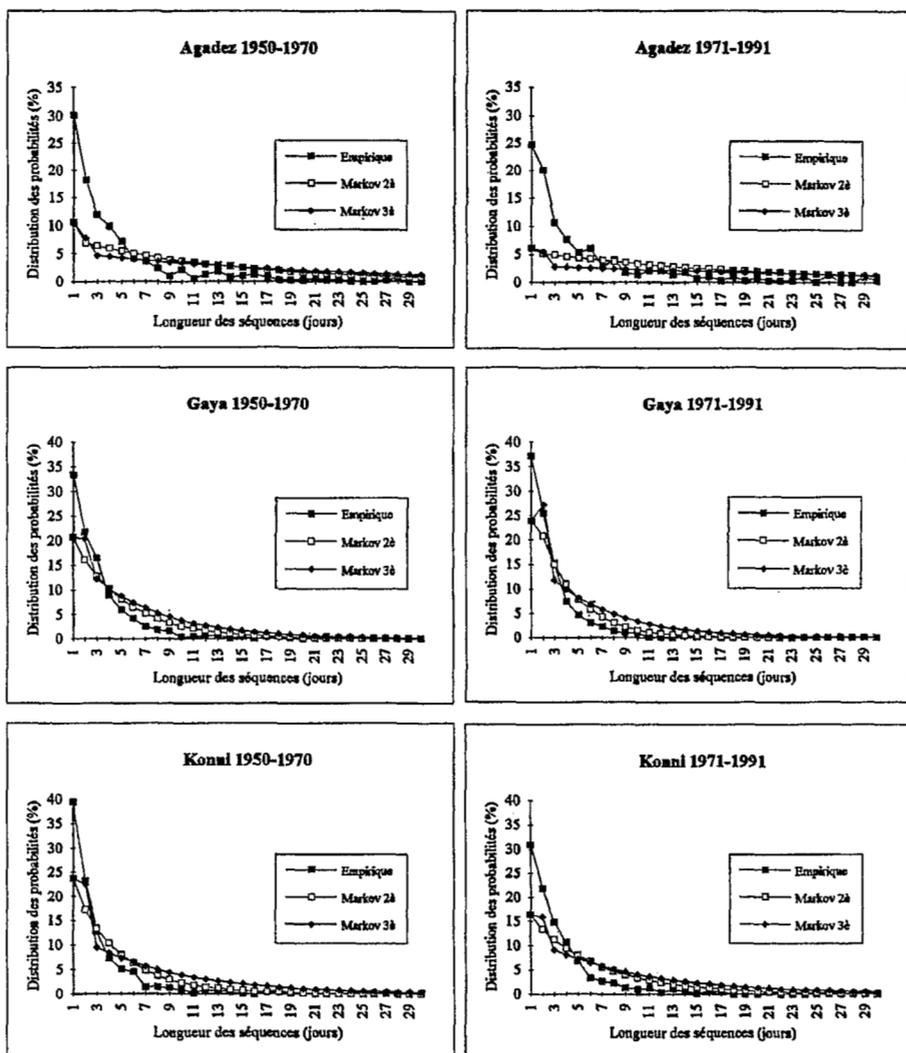


Figure 1a : Distributions des probabilités empiriques et celles données par le modèle de MARKOV pour le seuil 0,1 mm en prenant en compte les séquences sèches après la dernière pluie.

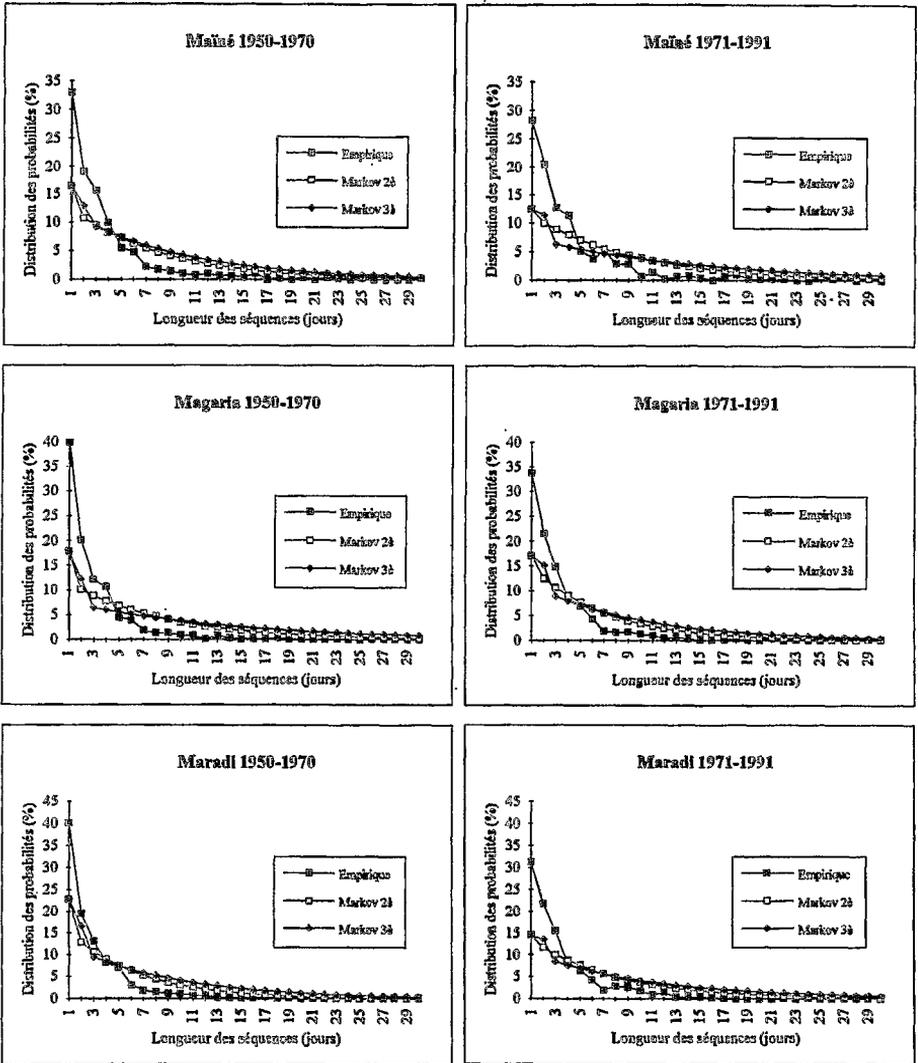


Figure 1b : Distributions des probabilités empiriques et celles données par le modèle de MARKOV pour le seuil 0,1 mm en prenant en compte les séquences sèches après la dernière pluie.

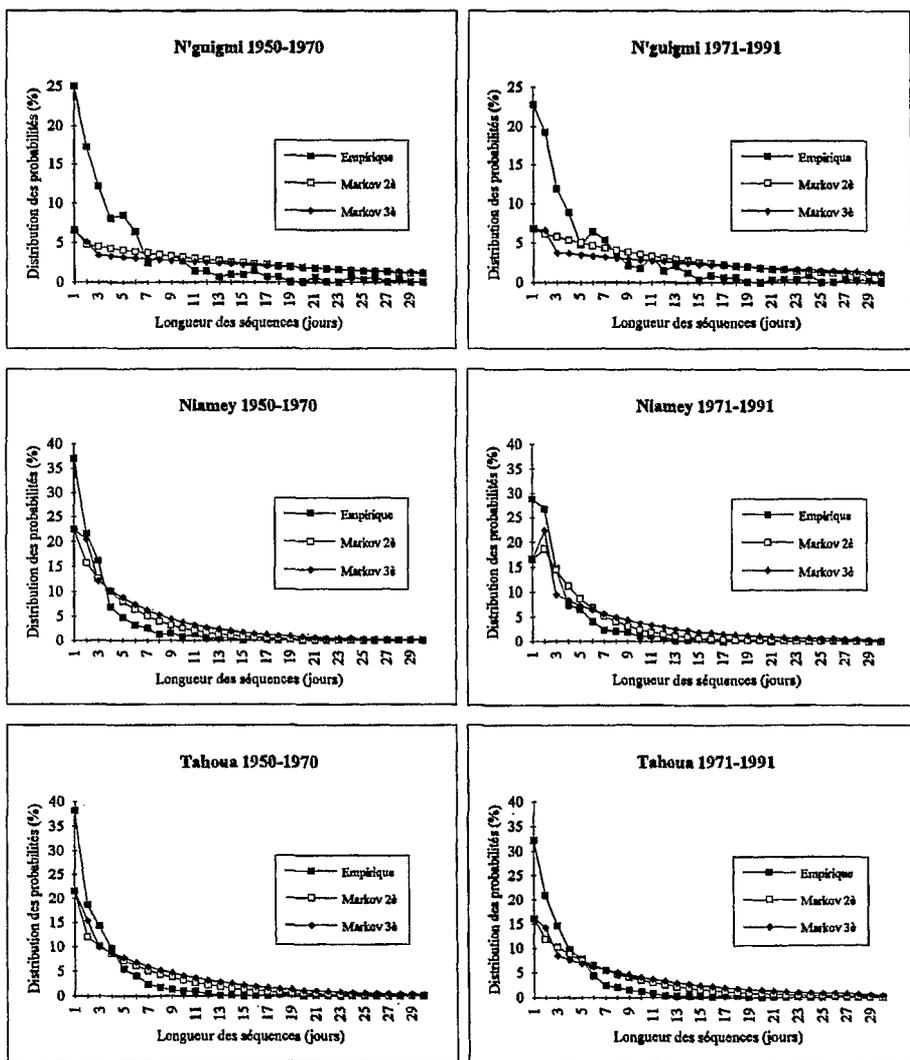


Figure 1c : Distributions des probabilités empiriques et celles données par le modèle de MARKOV pour le seuil 0,1 mm en prenant en compte les séquences sèches après la dernière pluie.

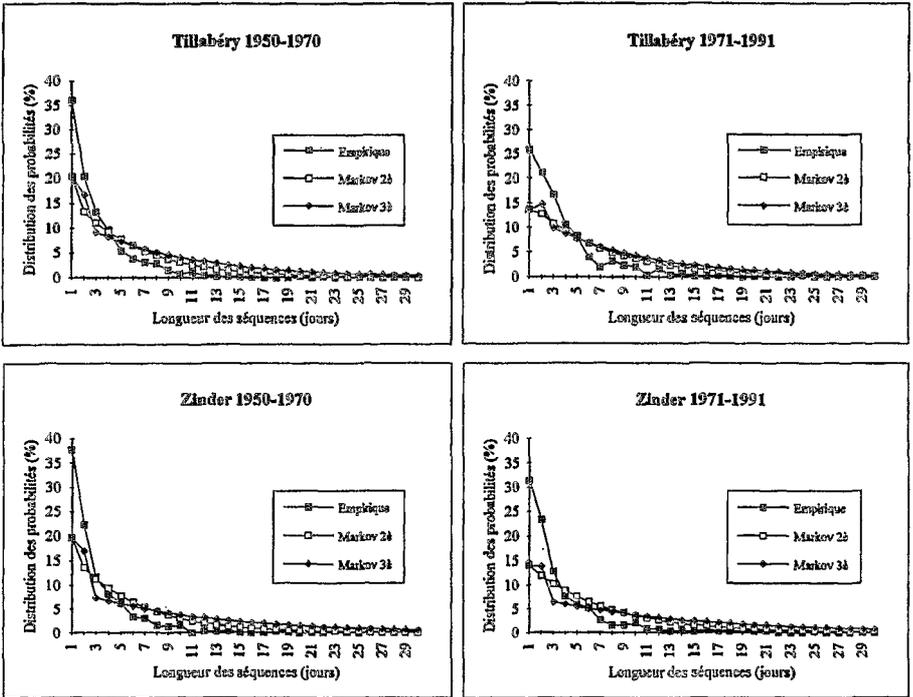


Figure 1d : Distributions des probabilités empiriques et celles données par le modèle de MARKOV pour le seuil 0,1 mm en prenant en compte les séquences sèches après la dernière pluie.

de toutes les séquences sèches de longueur supérieure à 6 jours. L'ajustement étant meilleur pour le 2<sup>e</sup> ordre. Cependant, il est à noter que ces surestimations ne sont réellement pas appréciables pour les séquences de plus de 13 jours secs pour l'ensemble des stations, les probabilités étant très faibles (< 5 %). Nous pouvons également observer que pour toutes les stations les distributions empiriques des séquences sèches décroissent rapidement pour des séquences inférieures ou égales à 7 jours. Ceci est valable aussi bien pour la période de 1950-1970 que pour la période 1971-1991. Ces résultats sont également consignés dans les tableaux 2a et 2b. On peut noter à partir de ces tableaux que 90 % et plus des séquences sèches ont une longueur inférieure ou égale à 7 jours sauf pour les stations d'Agadez, de Maïné et de N'guigmi pour lesquelles ce taux est compris entre 80 et 90 %.

Nous remarquons de plus que l'approximation des probabilités empiriques par des chaînes de MARKOV d'ordres 2 et 3 est beaucoup moins bonne pour les séquences de longueurs inférieures ou égales à 7 jours essentiellement pour les stations d'Agadez et de N'guigmi (qui sont des stations appartenant à des zones climatiques sahélo-

Tableau 2a - Valeurs absolues (va) et probabilités (%) observées et calculées au moyen des chaînes de MARKOV des 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> ordres pour les séquences sèches de longueur 1,2, ..., 10 jours pour le seuil 0,1 mm.

n jours secs	1950-1970						1971-1991					
	Observées		MARKOV 2 <sup>e</sup>		MARKOV 3 <sup>e</sup>		Observées		MARKOV 2 <sup>e</sup>		MARKOV 3 <sup>e</sup>	
	va	%	va	%	va	%	va	%	va	%	va	%
Agadez												
1	119	30,13	42	10,63	42	10,63	74	24,75	18,2	6,09	18,2	6,09
2	72	18,23	27,4	6,93	30,6	7,75	60	20,07	15,6	5,21	16,6	5,55
3	47	11,9	25,2	6,39	18,4	4,67	32	10,7	14,7	4,92	8,4	2,79
4	39	9,87	23,3	5,89	17,5	4,43	23	7,69	13,9	4,65	8,1	2,71
5	28	7,09	21,5	5,44	16,6	4,21	16	5,35	13,1	4,39	7,9	2,63
6	16	4,05	19,8	5,02	15,8	3,99	18	6,02	12,4	4,15	7,6	2,55
7	14	3,54	18,3	4,63	15	3,79	8	2,68	11,7	3,92	7,4	2,48
8	9	2,28	16,9	4,27	14,2	3,6	12	4,01	11,1	3,7	7,2	2,40
9	4	1,01	15,6	3,94	13,5	3,42	5	1,67	10,4	3,49	7	2,33
10	8	2,03	14,3	3,63	12,8	3,25	4	1,34	9,9	3,3	6,8	2,26
Gaya												
1	234	33,38	144,7	20,63	144,7	20,63	271	37,23	174	23,9	174	23,90
2	152	21,68	113,1	16,13	142,4	20,32	185	25,41	151,2	20,77	198,6	27,29
3	115	16,41	90,1	12,85	85,9	12,25	111	15,25	109,9	15,1	86,7	11,90
4	62	8,84	71,8	10,24	72,7	10,37	55	7,55	79,9	10,98	72,5	9,96
5	42	5,99	57,2	8,16	61,5	8,77	34	4,67	58,1	7,98	60,6	8,33
6	29	4,14	45,6	6,5	52	7,42	22	3,02	42,3	5,81	50,7	6,96
7	17	2,43	36,3	5,18	44	6,28	17	2,34	30,7	4,22	42,4	5,82
8	13	1,85	28,9	4,13	37,3	5,32	10	1,37	22,3	3,07	35,4	4,87
9	11	1,57	23,1	3,29	31,5	4,5	7	0,96	16,2	2,23	29,6	4,07
10	2	0,29	18,4	2,62	26,7	3,81	7	0,96	11,8	1,62	24,8	3,41
Konni												
1	273	39,34	164,6	23,72	164,6	23,72	190	30,94	100,1	16,3	100,1	16,30
2	161	23,2	118,9	17,13	155,8	22,45	134	21,82	81,8	13,32	97,7	15,91
3	88	12,68	92,2	13,28	66,1	9,52	91	14,82	68,8	11,2	55,8	9,09
4	50	7,2	71,5	10,3	57,9	8,35	66	10,75	57,8	9,42	49,8	8,11
5	35	5,04	55,4	7,99	50,8	7,32	42	6,84	48,6	7,92	44,4	7,23
6	31	4,47	43	6,19	44,6	6,43	20	3,26	40,9	6,66	39,6	6,45
7	9	1,3	33,3	4,8	39,1	5,64	16	2,61	34,4	5,6	35,3	5,75
8	10	1,44	25,8	3,72	34,3	4,95	14	2,28	28,9	4,71	31,5	5,13
9	8	1,15	20	2,89	30,1	4,34	7	1,14	24,3	3,96	28,1	4,58
10	5	0,72	15,5	2,24	26,4	3,81	6	0,98	20,4	3,33	25,1	4,08
Mainé												
1	180	33,03	90	16,51	90	16,51	143	28,21	62,7	12,36	62,7	12,36
2	104	19,08	58,7	10,77	70,3	12,9	104	20,51	50,8	10,02	57,9	11,43
3	85	15,6	51,1	9,38	50,1	9,19	64	12,62	45	8,87	31,6	6,23
4	54	9,91	44,5	8,17	44,8	8,22	57	11,24	39,8	7,86	29,4	5,79
5	30	5,5	38,8	7,12	40,1	7,35	26	5,13	35,3	6,96	27,3	5,38
6	26	4,77	33,8	6,2	35,8	6,57	19	3,75	31,3	6,16	25,4	5,01
7	12	2,2	29,4	5,4	32,1	5,88	26	5,13	27,7	5,46	23,6	4,65
8	9	1,65	25,6	4,7	28,7	5,26	14	2,76	24,5	4,84	21,9	4,33
9	8	1,47	22,3	4,1	25,6	4,71	14	2,76	21,7	4,28	20,4	4,02
10	5	0,92	19,4	3,57	22,9	4,21	3	0,59	19,2	3,79	19	3,74
Magaria												
1	222	39,86	98,8	17,73	98,8	17,73	209	33,71	106	17,09	106	17,09
2	112	20,11	55,9	10,04	68	12,2	133	21,45	77,6	12,52	93,6	15,10
3	67	12,03	49,1	8,81	35,7	6,41	92	14,84	65,9	10,63	55	8,87
4	59	10,59	43,1	7,74	33,1	5,94	52	8,39	55,9	9,02	49,2	7,94
5	25	4,49	37,8	6,79	30,7	5,51	43	6,94	47,5	7,66	44,1	7,11
6	22	3,95	33,2	5,96	28,4	5,1	27	4,35	40,3	6,5	39,5	6,37
7	10	1,8	29,2	5,24	26,4	4,73	12	1,94	34,2	5,52	35,4	5,70
8	7	1,26	25,6	4,6	24,4	4,39	10	1,61	29,1	4,69	31,7	5,11
9	7	1,26	22,5	4,04	22,7	4,07	11	1,77	24,7	3,98	28,4	4,57
10	5	0,9	19,7	3,54	21	3,77	8	1,29	21	3,38	25,4	4,10

Tableau 2b - Valeurs absolues (va) et probabilités (%) observées et calculées au moyen des chaînes de MARKOV des 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> ordres pour les séquences sèches de longueur 1,2, ..., 10 jours pour le seuil 0,1 mm.

n jours secs	1950-1970						1971-1991					
	Observées va %		MARKOV 2 <sup>e</sup> va %		MARKOV 3 <sup>e</sup> va %		Observées va %		MARKOV 2 <sup>e</sup> va %		MARKOV 3 <sup>e</sup> va %	
Maradi												
1	263	40,09	149	22,71	149	22,71	182	31,11	84,9	14,51	84,9	14,51
2	127	19,36	83,8	12,78	108,5	16,54	128	21,88	67,8	11,59	79,3	13,56
3	86	13,11	70	10,67	61,3	9,35	91	15,56	58,6	10,02	48,7	8,33
4	53	8,08	58,4	8,9	54,4	8,3	47	8,03	50,7	8,66	44	7,53
5	46	7,01	48,7	7,43	48,3	7,37	37	6,32	43,8	7,49	39,8	6,8
6	20	3,05	40,7	6,2	42,9	6,54	25	4,27	37,9	6,47	36	6,15
7	12	1,83	34	5,18	38,1	5,81	11	1,88	32,7	5,59	32,5	5,56
8	9	1,37	28,3	4,32	33,9	5,16	16	2,74	28,3	4,84	29,4	5,02
9	8	1,22	23,7	3,61	30,1	4,58	15	2,56	24,5	4,18	26,5	4,54
10	7	1,07	19,7	3,01	26,7	4,07	10	1,71	21,1	3,61	24	4,1
N'guigmi												
1	74	25	19,5	6,57	19,5	6,57	77	22,85	23,1	6,85	23,1	6,85
2	51	17,23	14,1	4,76	15,1	5,09	65	19,29	20,8	6,17	22,3	6,62
3	36	12,16	13,4	4,52	10,1	3,41	40	11,87	19,4	5,76	12,8	3,8
4	24	8,11	12,7	4,29	9,7	3,29	30	8,9	18,1	5,38	12,3	3,65
5	25	8,45	12	4,07	9,4	3,17	16	4,75	16,9	5,02	11,8	3,5
6	19	6,42	11,4	3,86	9,1	3,06	22	6,53	15,8	4,69	11,3	3,36
7	7	2,36	10,8	3,66	8,7	2,95	18	5,34	14,8	4,38	10,9	3,22
8	10	3,38	10,3	3,48	8,4	2,84	12	3,56	13,8	4,09	10,4	3,09
9	10	3,38	9,8	3,3	8,1	2,74	7	2,08	12,9	3,82	10	2,96
10	8	2,7	9,3	3,13	7,8	2,64	6	1,78	12	3,56	9,6	2,84
Niamey												
1	246	36,99	149,3	22,45	149,3	22,45	182	28,89	104,2	16,55	104,2	16,55
2	144	21,65	105,2	15,82	135,6	20,4	168	26,67	117,8	18,69	141,1	22,4
3	108	16,24	83,7	12,59	81	12,18	93	14,76	91,4	14,51	60,6	9,62
4	46	6,92	66,7	10,02	68,6	10,31	47	7,46	70,9	11,26	53,1	8,43
5	32	4,81	53,1	7,98	58,1	8,74	42	6,67	55	8,74	46,5	7,38
6	21	3,16	42,2	6,35	49,2	7,4	26	4,13	42,7	6,78	40,8	6,47
7	17	2,56	33,6	5,06	41,7	6,27	15	2,38	33,1	5,26	35,7	5,67
8	8	1,2	26,8	4,02	35,3	5,31	13	2,06	25,7	4,08	31,3	4,96
9	10	1,5	21,3	3,2	29,9	4,5	12	1,9	20	3,17	27,4	4,35
10	5	0,75	17	2,55	25,3	3,81	6	0,95	15,5	2,46	24	3,81
Tahoua												
1	253	38,16	142,3	21,46	142,3	21,46	199	32,2	99,7	16,14	99,7	16,14
2	124	18,7	80,5	12,14	102,5	15,46	129	20,87	73,9	11,95	88,1	14,25
3	95	14,33	68,1	10,27	66,4	10,01	90	14,56	63,3	10,25	52,7	8,53
4	65	9,8	57,5	8,68	58,5	8,83	60	9,71	54,3	8,79	47,5	7,68
5	36	5,43	48,6	7,34	51,6	7,78	48	7,77	46,6	7,54	42,7	6,92
6	27	4,07	41,1	6,2	45,5	6,86	27	4,37	39,9	6,46	38,5	6,23
7	16	2,41	34,8	5,24	40,1	6,05	15	2,43	34,2	5,54	34,7	5,61
8	11	1,66	29,4	4,43	35,3	5,33	12	1,94	29,4	4,75	31,2	5,05
9	8	1,21	24,8	3,75	31,2	4,7	9	1,46	25,2	4,07	28,1	4,55
10	7	1,06	21	3,17	27,5	4,14	7	1,13	21,6	3,49	25,3	4,1
Tillabéry												
1	226	36,16	127,6	20,42	127,6	20,42	147	25,79	77,3	13,56	77,3	13,56
2	127	20,32	83,8	13,4	105,3	16,84	120	21,05	72,4	12,7	83,7	14,69
3	83	13,28	69,7	11,15	57,2	9,15	95	16,67	61,7	10,83	56,5	9,92
4	60	9,6	57,9	9,27	50,9	8,15	60	10,53	52,7	9,24	50	8,77
5	34	5,44	48,2	7,71	45,3	7,25	46	8,07	44,9	7,88	44,2	7,75
6	24	3,84	40,1	6,41	40,3	6,45	22	3,86	38,3	6,73	39	6,85
7	19	3,04	33,3	5,33	35,9	5,74	11	1,93	32,7	5,74	34,5	6,05
8	17	2,72	27,7	4,43	31,9	5,11	18	3,16	27,9	4,89	30,5	5,35
9	9	1,44	23	3,69	28,4	4,55	13	2,28	23,8	4,18	26,9	4,73
10	5	0,8	19,2	3,06	25,3	4,05	11	1,93	20,3	3,56	23,8	4,18
Zinder												
1	231	37,68	120,5	19,66	120,5	19,66	172	31,39	77	14,05	77	14,05
2	137	22,35	83,6	13,64	104,1	16,98	128	23,36	65,2	11,91	75,9	13,85
3	72	11,75	69,4	11,32	45,4	7,41	70	12,77	56,2	10,26	35,8	6,53
4	50	8,16	57,6	9,4	41,4	6,75	42	7,66	48,4	8,84	33,1	6,03
5	38	6,2	47,8	7,81	37,7	6,14	33	6,02	41,7	7,61	30,6	5,57
6	21	3,43	39,7	6,48	34,3	5,6	29	5,29	35,9	6,56	28,2	5,15
7	19	3,1	33	5,38	31,2	5,1	15	2,74	31	5,65	26,1	4,76
8	9	1,47	27,4	4,47	28,5	4,64	9	1,64	26,7	4,87	24,1	4,4
9	8	1,31	22,7	3,71	25,9	4,23	9	1,64	23	4,19	22,3	4,07
10	10	1,63	18,9	3,08	23,6	3,85	11	2,01	19,8	3,61	20,6	3,76

sahariennes recevant donc des précipitations beaucoup moins fréquentes et en faibles quantités). Si nous regardons les courbes correspondant aux autres stations, et principalement pendant la période 1950-1970 qui est relativement plus humide que la période 1971-1991, nous remarquons que l'ajustement est meilleur.

Comme nous l'avons fait remarquer ci-dessus, les probabilités des séquences sèches peuvent être déterminées à l'aide des chaînes de MARKOV sans tenir compte des séquences du type wd... après la dernière pluie de la période de 6 mois. Sur les figures (figures 2a, b, c, d) nous présentons pour le seuil 0,1 mm les distributions des probabilités empiriques ainsi que les ajustements pour ce cas. Nous voyons que les ajustements sont bien meilleurs pour toutes les stations sans exception. Il apparaît néanmoins pour ces courbes une augmentation assez significative des probabilités estimées à l'aide des chaînes de MARKOV quand on passe de 1 à 2 jours secs. Il faut cependant noter que comme le disait GARCIA *et al.* (1993) « une sécheresse d'un jour ne peut pas être considérée même au prix d'un abus de langage, comme une séquence sèche ». Ainsi dans les deux cas si nous nous limitons aux séquences sèches de longueurs supérieures à un jour, nous pouvons dire que les modèles de chaînes de MARKOV d'ordres 2 et 3 peuvent être utilisés pour décrire la distribution des séquences sèches au Niger pendant la période de la mousson. Cet ajustement est meilleur si on ne prend pas en compte les séquences sèches après la dernière pluie de la période considérée.

#### ***b) Variations des distributions empiriques des séquences sèches pour les périodes 1950-1970 et 1971-1991***

Dans ce paragraphe nous nous proposons de voir comment les distributions des probabilités empiriques ont varié quand nous sommes passés de la période 1950-1970 à la période 1971-1991 qui est relativement plus sèche que la précédente. Nous montrons à partir de certaines de ces stations quelques caractéristiques de cette évolution. Le nombre des séquences sèches de longueur inférieure à 7 jours a diminué durant la période 1971-1991 pour toutes les stations (figures 3a, b, c, d). Pour les stations de Gaya et de Magaria, respectivement pour les séquences de 1 et 2 jours et 2, 3 et 5 jours nous remarquons essentiellement une augmentation du nombre de ces séquences.

Afin de mieux comprendre les caractéristiques saisonnières des variations des séquences sèches nous présentons sur les figures (fig. 4a, b, c, d, e et f) les distributions mensuelles des séquences sèches pour chaque station de 1950 à 1991. Nous pouvons constater que :

- les séquences sèches de 7 jours pratiquement absentes durant le mois d'août de la période 1950-1970 sont des caractéristiques observables au cours de ce mois de la période 1971-1991 (Tahoua, Gaya, Maradi, Konni, Maïné, Niamey, Tillabéry), alors qu'elles sont en diminution pour le mois de juillet pour certaines de ces stations (Gaya, Magaria, Tillabéry et Zinder) ;
- durant la période de 1950-1991, aucune séquence sèche de 7 jours n'est observée au cours du mois de juin à la station d'Agadez ;
- au cours du mois de juin, l'absence quasi totale des séquences sèches de 1, 3 et 5 jours à la station de N'guigmi de 1950 à 1970 suivie de leur apparition durant la période de 1971-1991 suggère une précocité de la saison des pluies pendant cette dernière période.

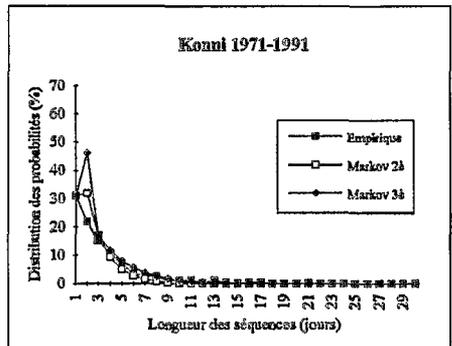
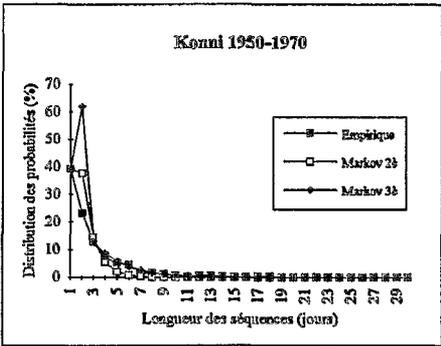
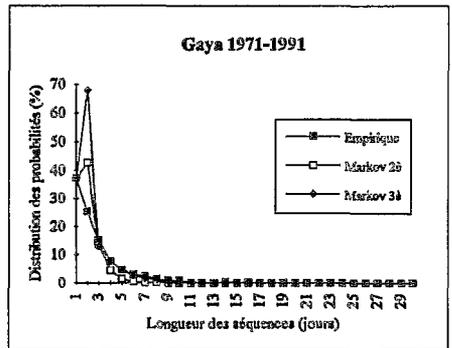
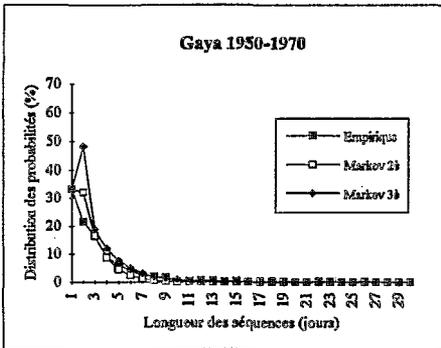
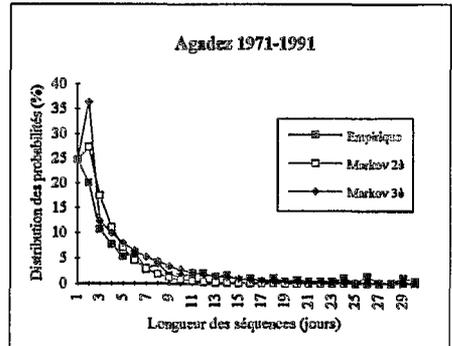
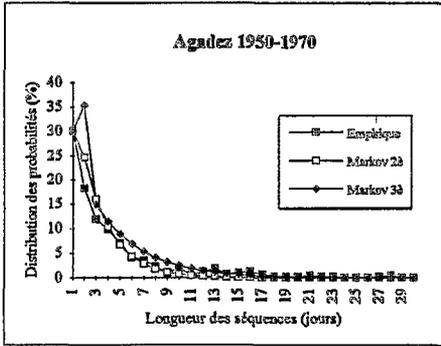


Figure 2a : Distributions des probabilités empiriques et celles données par le modèle de MARKOV pour le seuil 0,1 mm sans prendre en compte les séquences sèches après la dernière pluie.

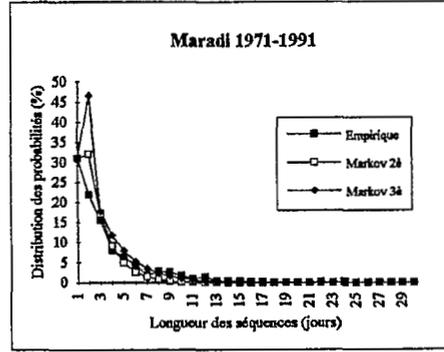
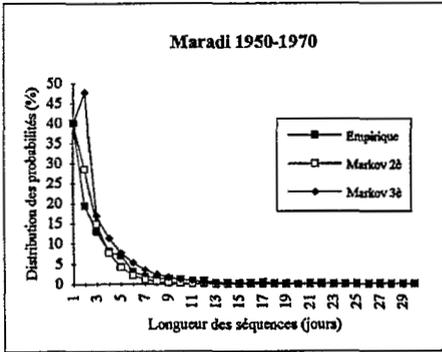
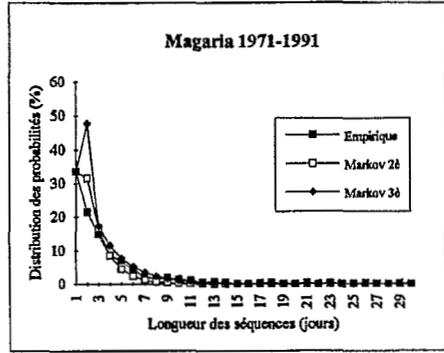
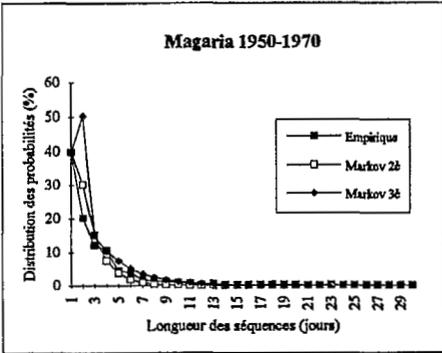
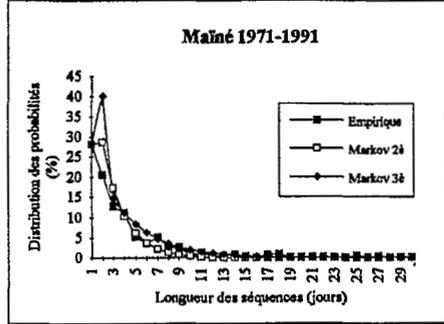
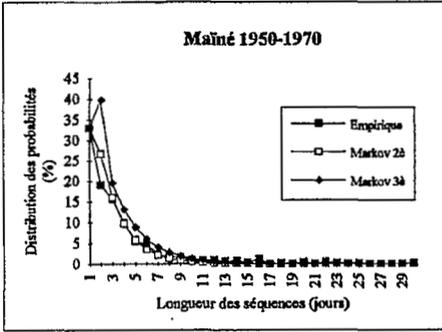


Figure 2b : Distributions des probabilités empiriques et celles données par le modèle de MARKOV pour le seuil 0,1 mm sans prendre en compte les séquences sèches après la dernière pluie.

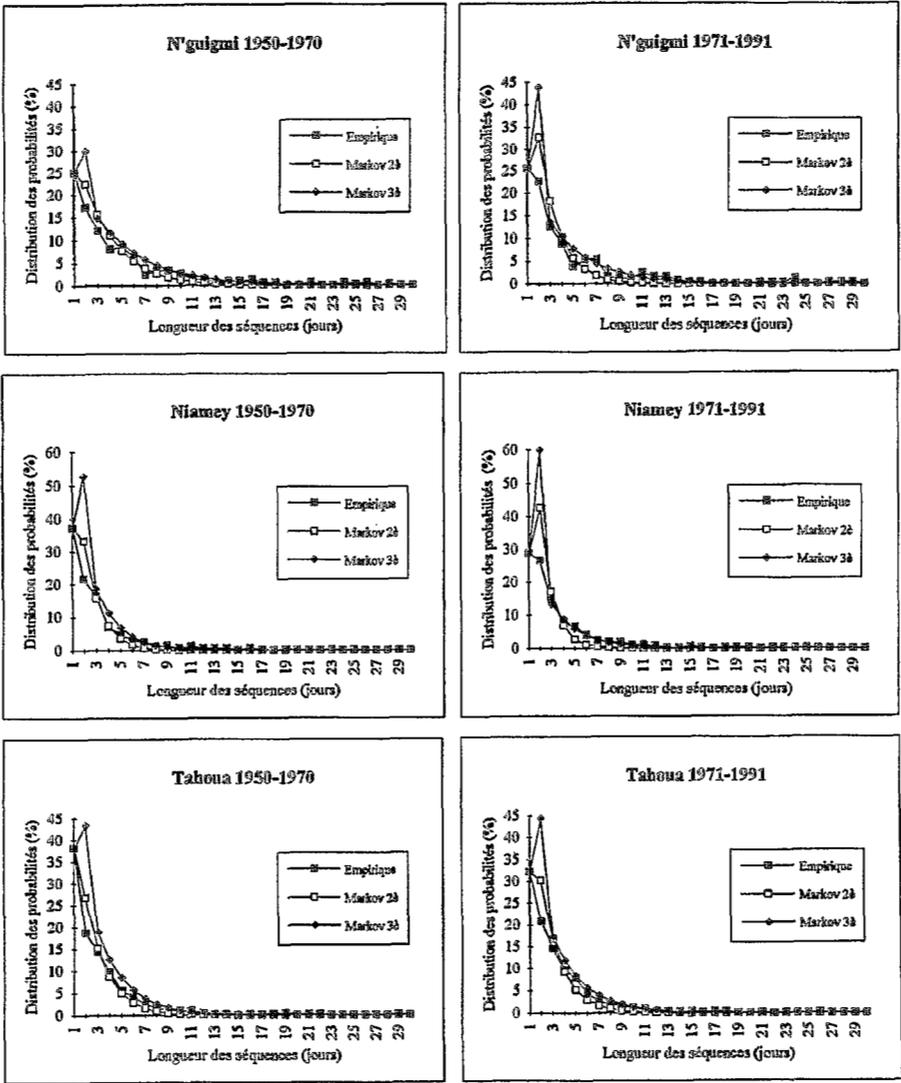


Figure 2c - Distributions des probabilités empiriques et celles données par le modèle de MARKOV pour le seuil 0,1 mm sans prendre en compte les séquences sèches après la dernière pluie.

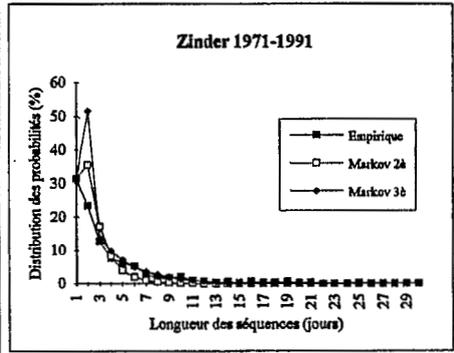
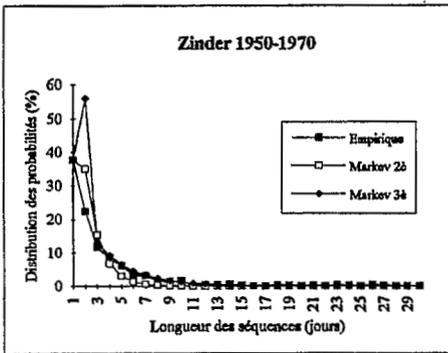
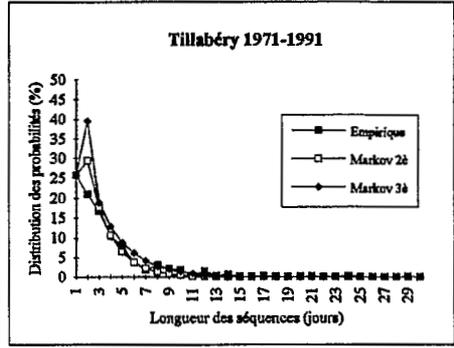
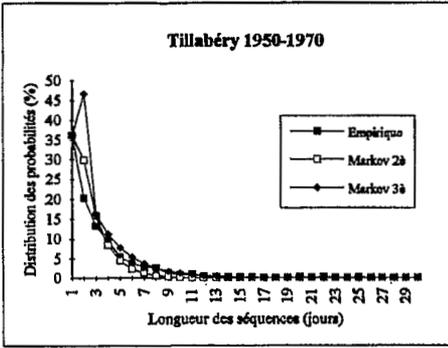


Figure 2d - Distributions des probabilités empiriques et celles données par le modèle de MARKOV pour le seuil 0,1 mm sans prendre en compte les séquences sèches après la dernière pluie.

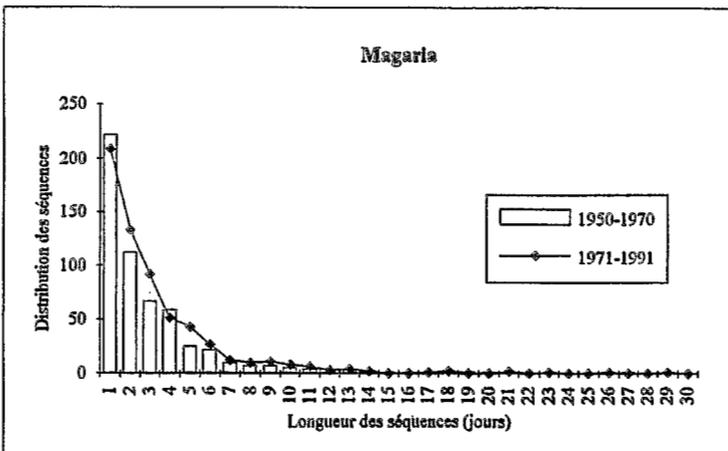
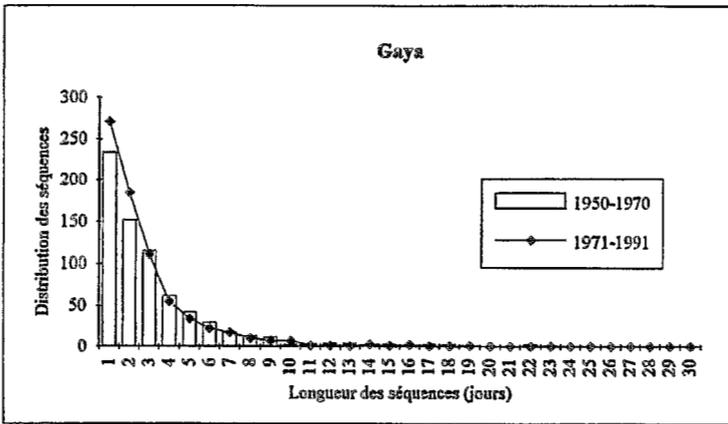
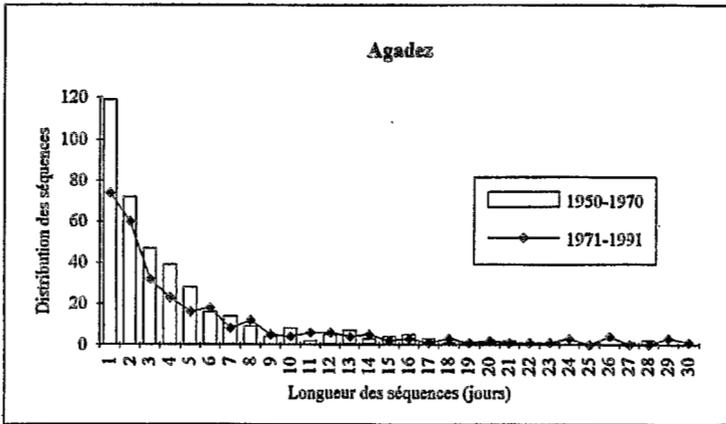


Figure 3a : Variations des distributions observées des séquences sèches en fonction de leurs longueurs pour le seuil 0,1 mm.

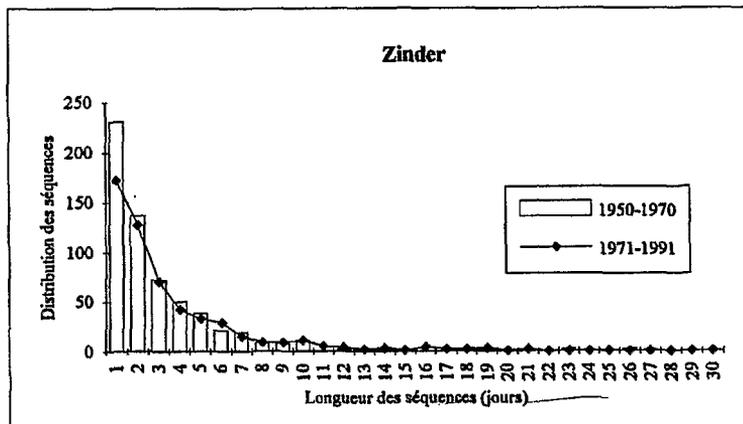
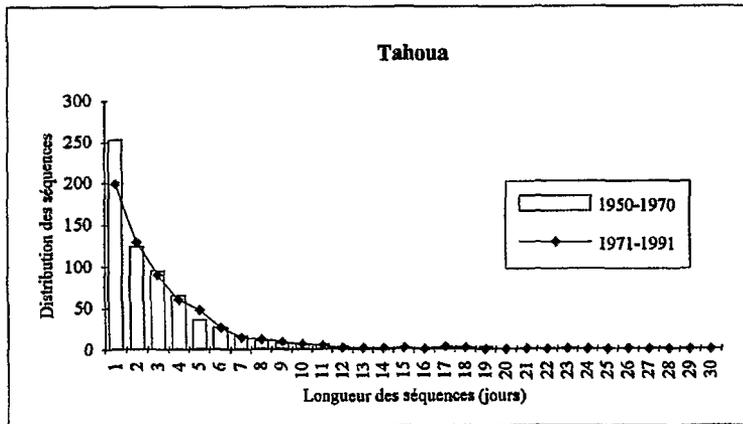
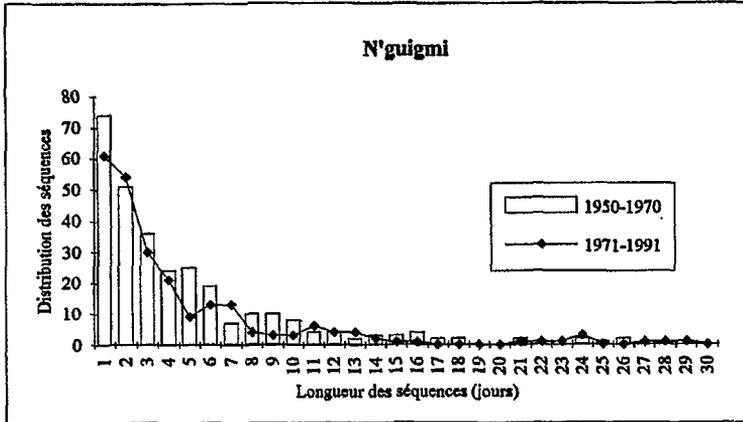


Figure 3b : Variations des distributions observées des séquences sèches en fonction de leurs longueurs pour le seuil 0,1 mm.

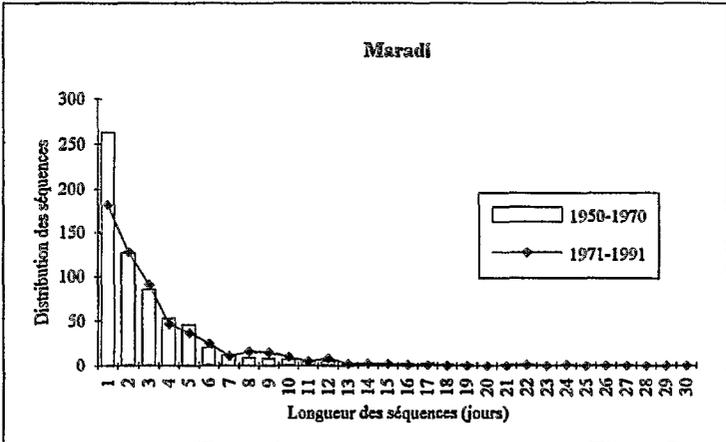
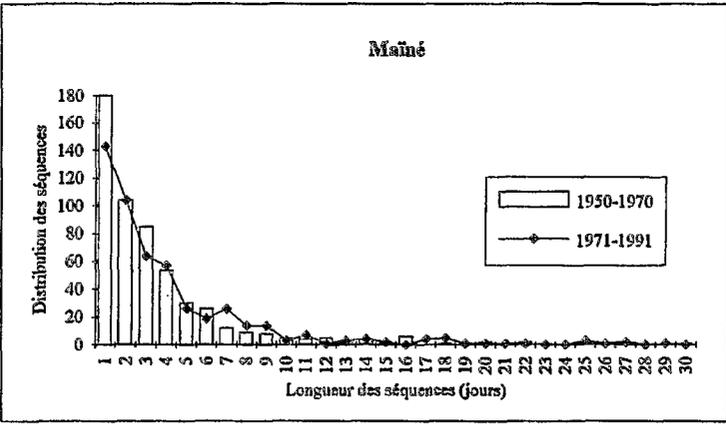
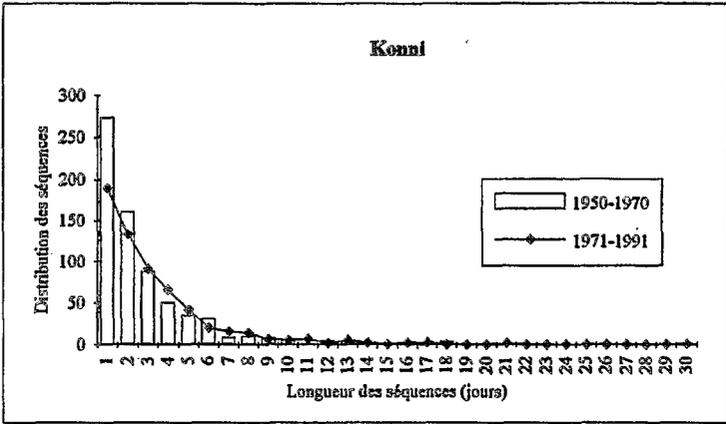


Figure 3c : Variations des distributions observées des séquences sèches en fonction de leurs longueurs pour le seuil 0,1 mm.

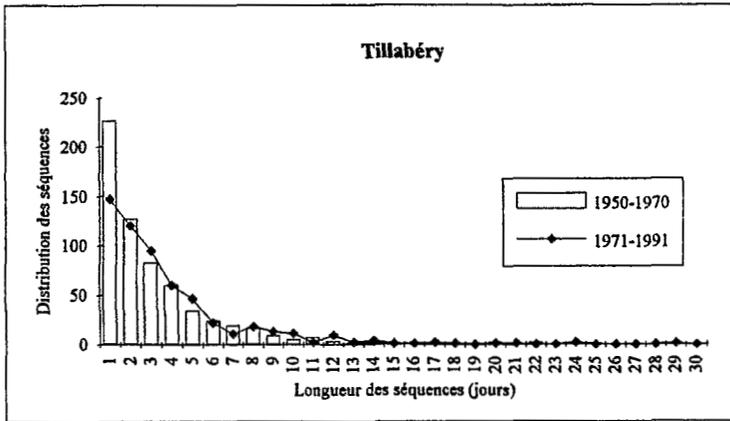
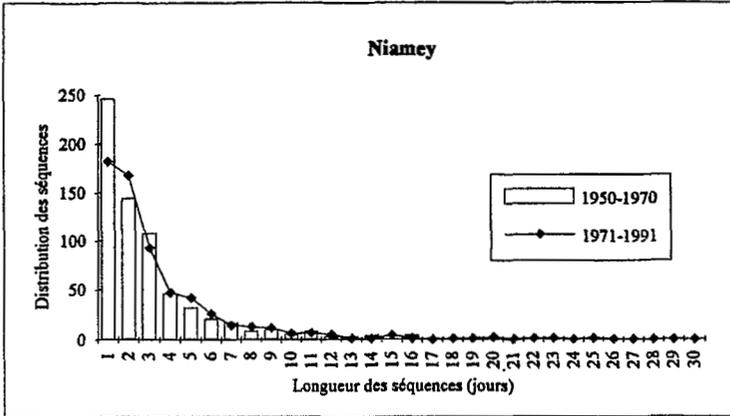


Figure 3d : Variations des distributions observées des séquences sèches en fonction de leurs longueurs pour le seuil 0,1 mm.

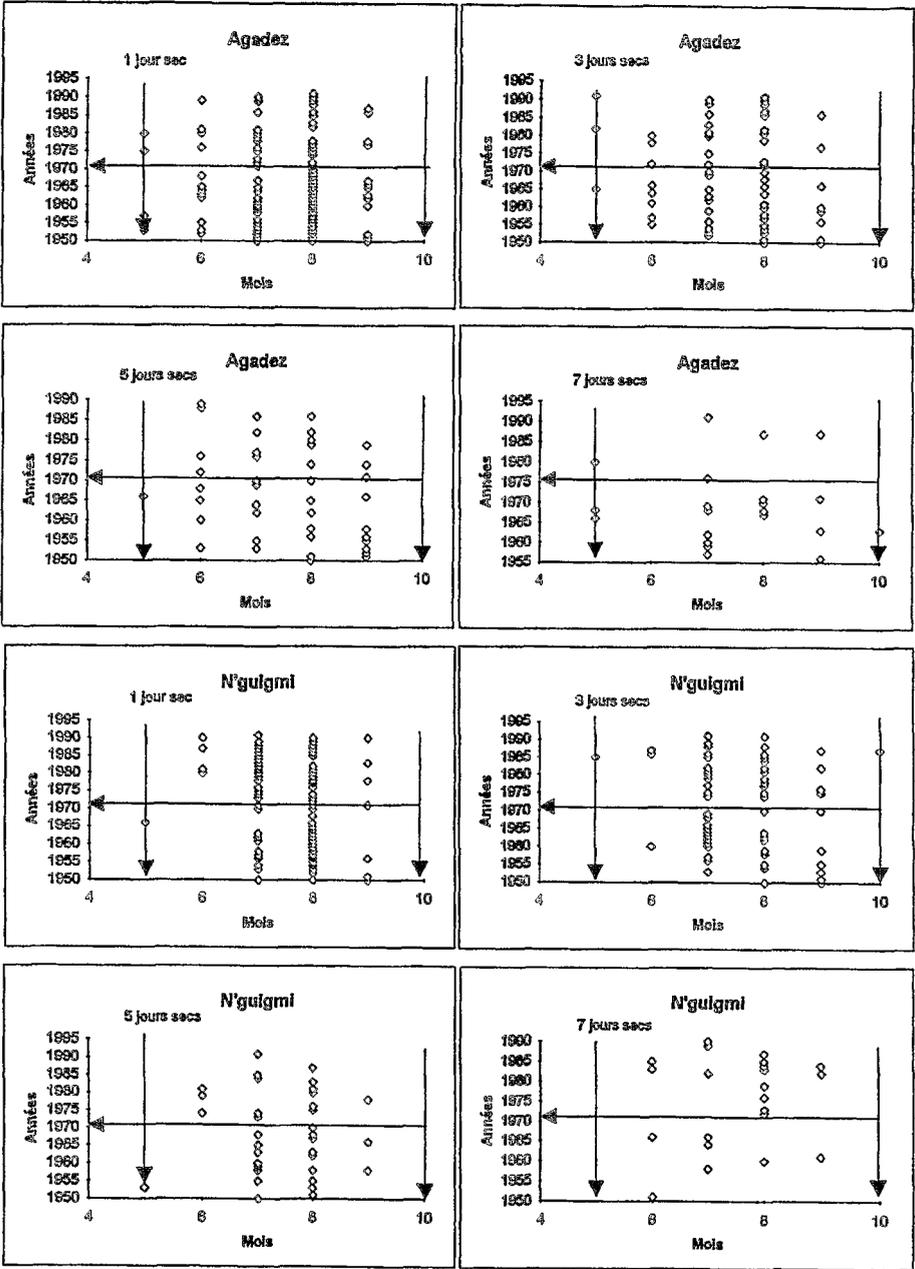


Figure 4a : Distributions des séquences sèches de longueur 1, 3, 5 et 7 jours pour le seuil 0,1 mm.

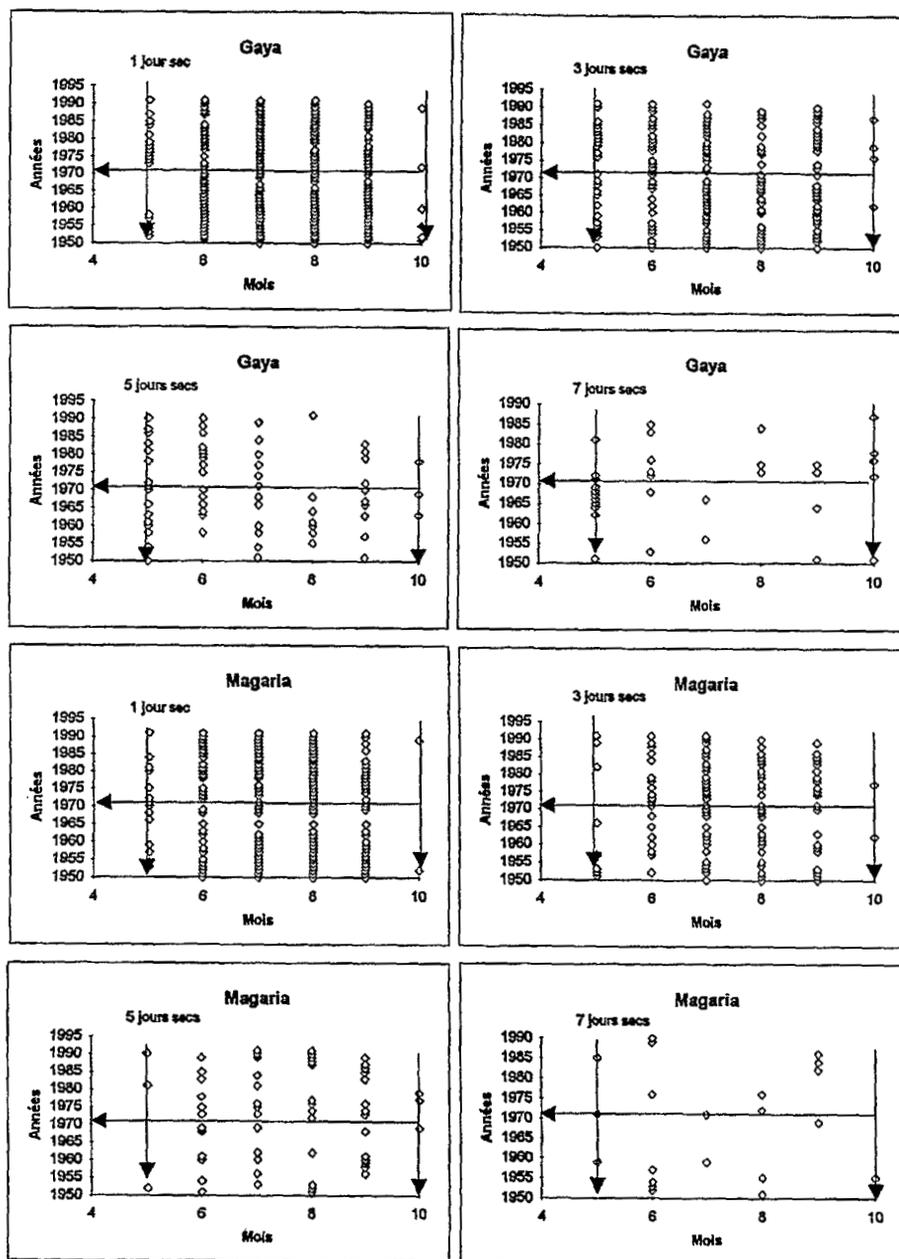


Figure 4b : Distributions des séquences sèches de longueur 1, 3, 5 et 7 jours pour le seuil 0,1 mm.

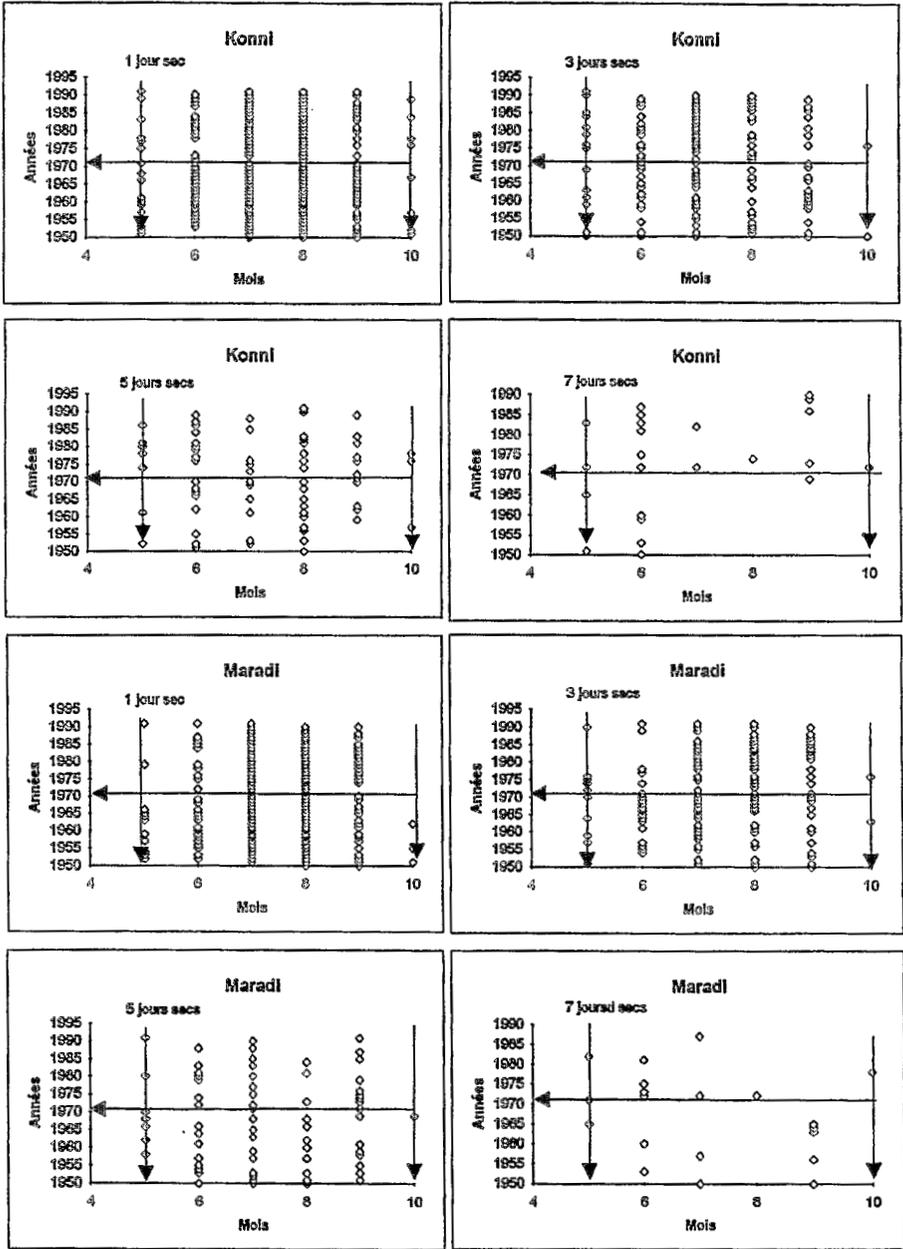


Figure 4c : Distributions des séquences sèches de longueur 1, 3, 5 et 7 jours pour le seuil 0,1 mm.

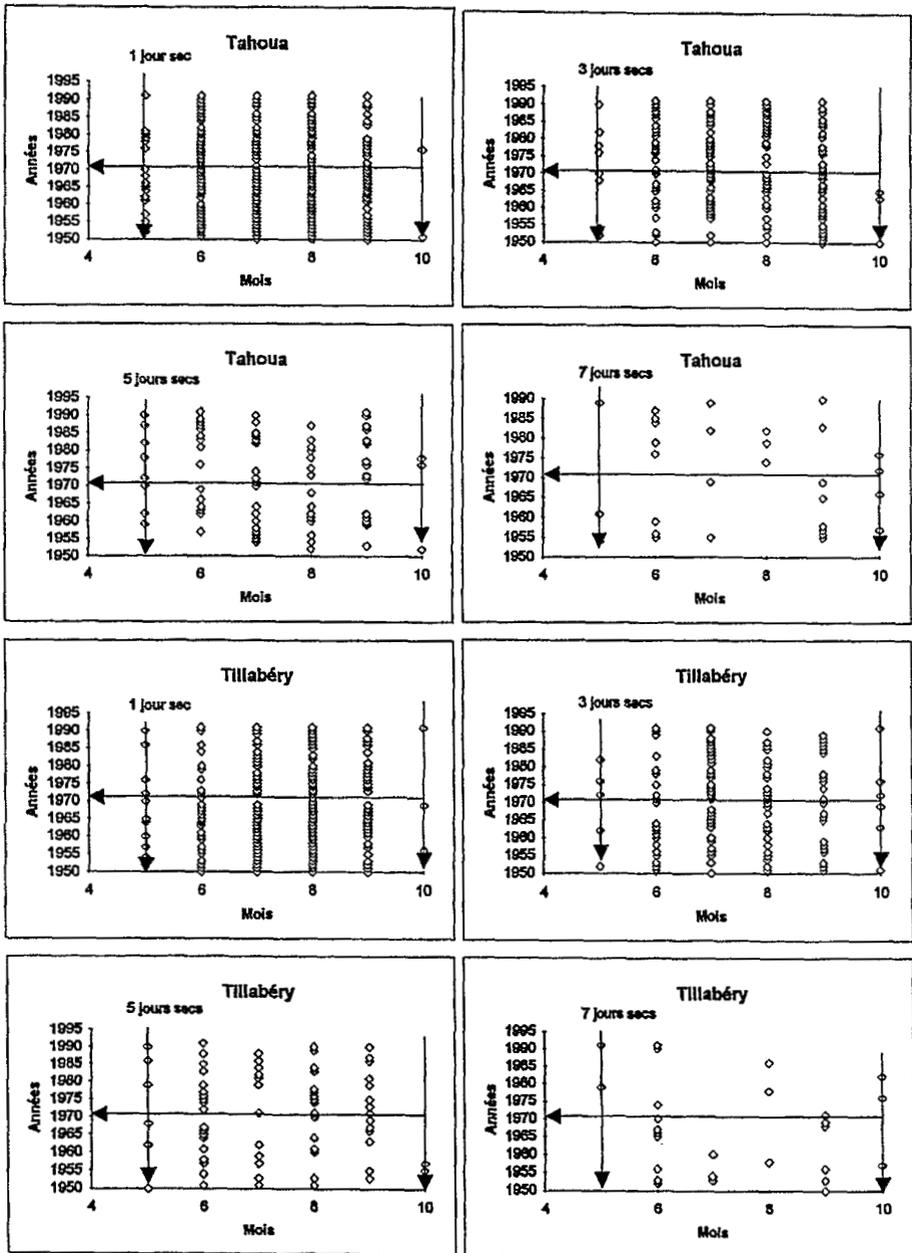


Figure 4d : Distributions des séquences sèches de longueur 1, 3, 5 et 7 jours pour le seuil 0,1 mm.

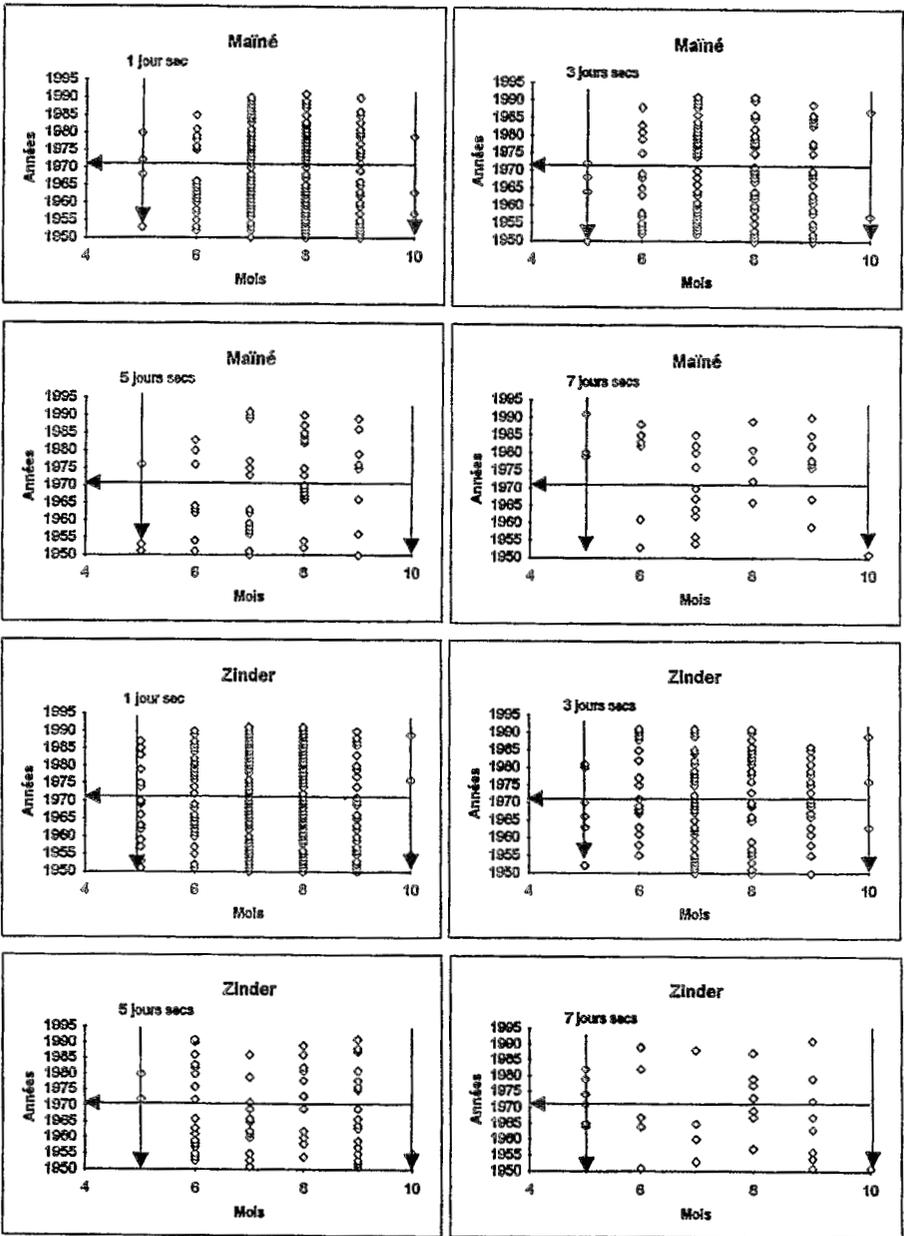


Figure 4e : Distributions des séquences sèches de longueur 1, 3, 5 et 7 jours pour le seuil 0,1 mm.

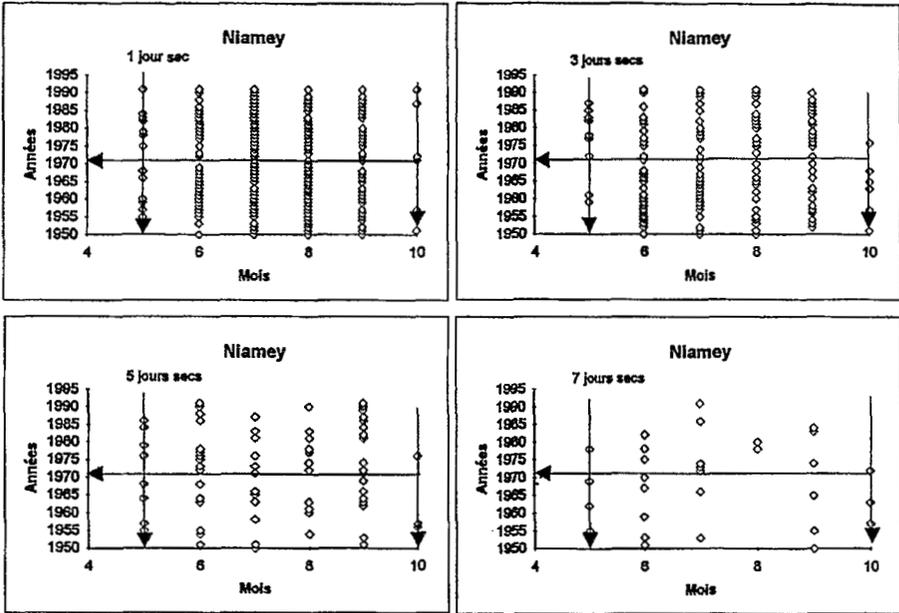


Figure 4f : Distributions des séquences sèches de longueur 1, 3, 5 et 7 jours pour le seuil 0,1 mm.

L'augmentation du nombre de séquences sèches peut s'interpréter comme une augmentation du nombre de jours de pluie sans pour autant que cela implique une augmentation de la hauteur totale des précipitations. Les tableaux 3a et 3b donnent les distributions mensuelles en pourcentage des nombres des différents types de séquences sèches. Pour toutes les stations, excepté celles de Zinder, Maradi et Tahoua (pour la séquence sèche de 7 jours), on note que le pourcentage du nombre de séquences sèches est maximum en août, sinon les mois qui précèdent pour la période 1950-1970, tendance qui est encore plus marquée pour la période 1971-1991.

Ce maximum est situé, pour les séquences de 1 et 3 jours secs et pour la période 1971-1991, en juillet pour les stations de Gaya et Konni qui sont les plus au sud, en août pour la station d'Agadez qui est la plus au nord. Pour toutes les autres stations, il se situe soit en juillet (séquences de 3 jours secs) soit en août (séquences de 1 jour sec) pour cette même période.

L'apparition des séquences sèches de 7 jours au cours du mois d'août est un facteur de risque pour les plantes ayant atteint un stade de leur cycle végétatif ne pouvant supporter des séquences de 7 jours secs et plus principalement dans les zones latéritiques à faible réserve en eau. Cette situation est aggravée par la tendance à la prédominance des longues séquences sèches.

Tableau 3a - Distributions mensuelles des séquences sèches de longueur 1, 2, ..., 7 jours pour le seuil 0,1 mm.

	1950-1970							1971-1991						
	Longueur des séquences sèches (jours)							Longueur des séquences sèches (jours)						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
<b>Agadez</b>														
Mai	2,5	1,4	2,1	0	3,6	0	14,3	2,7	5	6,3	13	0	5,6	12,5
Juin	10,1	13,9	12,8	10,3	14,3	12,5	0	10,8	8,3	9,4	4,3	25	16,7	0
Juillet	25,2	23,6	31,9	33,3	25	37,5	42,9	35,1	35	31,3	39,1	25	16,7	25
Août	48,7	48,6	38,3	46,2	28,6	25	21,4	44,6	46,7	40,6	43,5	31,3	55,6	37,5
Septembre	13,4	12,5	14,9	10,3	28,6	25	14,3	6,8	5	12,5	0	18,8	5,6	25
Octobre	0	0	0	0	0	0	7,1	0	0	0	0	0	0	0
Total	119	72	47	39	28	16	14	74	60	32	23	16	18	8
<b>Gaya</b>														
Mai	5,1	6,6	10,5	16,4	17,1	14,3	56,3	7	7,6	16,5	12,7	30,3	34,8	17,6
Juin	15,4	21,1	16,7	14,8	19,5	39,3	12,5	15,9	20	22	25,5	27,3	30,4	29,4
Juillet	22,6	26,3	24,6	26,2	17,1	21,4	12,5	30	25,4	25,7	12,7	21,2	8,7	0
Août	27,8	24,3	25,4	21,3	24,4	7,1	0	25,9	23,2	12,8	20	3	8,7	17,6
Septembre	27,4	20,4	21,9	16,4	14,6	10,7	12,5	20	21,6	19,3	25,5	15,2	13	11,8
Octobre	1,7	1,3	0,9	4,9	7,3	7,1	6,3	1,1	2,2	3,7	3,6	3	4,3	23,5
Total	234	152	114	61	41	28	16	270	185	109	55	33	23	17
<b>Konni</b>														
Mai	6,6	3,7	11,4	12	8,6	19,4	22,2	4,2	4,5	11	7,6	11,9	20	12,5
Juin	15	21,1	20,5	20	28,6	25,8	66,7	14,7	21,8	18,7	25,8	26,2	40	37,5
Juillet	27,1	30,4	22,7	26	17,1	16,1	0	33,2	26,3	33	28,8	11,9	15	12,5
Août	30,8	21,7	20,5	14	31,4	12,9	0	29,5	33,1	22	22,7	21,4	20	6,3
Septembre	19	20,5	23,9	24	11,4	16,1	11,1	16,3	12,8	13,2	15,2	23,8	5	25
Octobre	1,5	2,5	1,1	4	2,9	9,7	0	2,1	1,5	2,2	0	4,8	0	6,3
Total	273	161	88	50	35	31	9	190	133	91	66	42	20	16
<b>Mainé</b>														
Mai	2,8	2,9	3,6	3,7	3,4	0	0	2,1	4,8	1,6	0	3,8	5,3	15,4
Juin	13,9	9,6	17,9	24,1	20,7	26,9	16,7	5,6	14,4	9,4	17,5	11,5	10,5	15,4
Juillet	29,4	26	27,4	27,8	31	23,1	50	29,4	25	43,8	31,6	26,9	52,6	15,4
Août	33,9	35,6	27,4	24,1	27,6	11,5	8,3	48,3	31,7	28,1	28,1	38,5	10,5	23,1
Septembre	17,2	22,1	21,4	14,8	17,2	26,9	16,7	13,3	23,1	15,6	21,1	19,2	21,1	30,8
Octobre	2,8	3,8	2,4	5,6	0	11,5	8,3	1,4	1	1,6	1,8	0	0	0
Total s.q.	180	104	84	54	29	26	12	143	104	64	57	26	19	26
<b>Magaria</b>														
Mai	4,5	5,4	9	6,8	4	9,1	10	4,3	6	2,2	5,8	4,7	18,5	23,1
Juin	14	14,3	13,4	15,3	28	22,7	40	15,3	18	17,6	15,4	20,9	40,7	23,1
Juillet	31,5	34,8	29,9	27,1	20	22,7	10	28,2	26,3	34,1	40,4	18,6	14,8	7,7
Août	32,9	24,1	29,9	30,5	20	9,1	20	33,5	32,3	19,8	19,2	27,9	18,5	23,1
Septembre	16,7	19,6	16,4	16,9	24	31,8	10	18,2	16,5	25,3	17,3	23,3	7,4	23,1
Octobre	0,5	1,8	1,5	3,4	4	4,5	10	0,5	0,8	1,1	1,9	4,7	0	0
Total	222	112	67	59	25	22	10	209	133	91	52	43	27	13
<b>Maradi</b>														
Mai	5,3	3,9	7	7,5	11,1	10	8,3	2,7	4,7	5,5	4,3	5,4	28	18,2
Juin	12,9	15	18,6	30,2	22,2	35	16,7	12,6	15,6	12,1	25,5	29,7	24	45,5
Juillet	25,1	26	36	22,6	26,7	15	16,7	31,9	30,5	34,1	27,7	29,7	8	18,2
Août	36,5	28,3	18,6	17	17,8	20	0	39,6	35,2	26,4	29,8	8,1	20	9,1
Septembre	19	25,2	18,6	15,1	20	15	58,3	13,2	14,1	19,8	12,8	27	20	0
Octobre	1,1	1,6	1,2	7,5	2,2	5	0	0	0	2,2	0	0	0	9,1
Total	263	127	86	53	45	20	12	182	128	91	47	37	25	11

Tableau 3b - Distributions mensuelles des séquences sèches de longueur 1, 2, ..., 7 jours pour le seuil 0,1 mm.

	1950-1970							1971-1991						
	Longueur des séquences sèches (jours)							Longueur des séquences sèches (jours)						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
N'guigmi														
Mai	1,4	0	0	4,2	4	5,3	0	0	1,5	5	0	0	0	0
Juin	0	2	2,8	0	0	0	28,6	5,2	3,1	5	10	18,8	9,1	16,7
Juillet	35,1	25,5	38,9	45,8	40	36,8	42,9	32,5	35,4	42,5	33,3	37,5	36,4	16,7
Août	59,5	64,7	36,1	37,5	48	26,3	14,3	53,2	46,2	35	33,3	37,5	36,4	55,6
Septembre	4,1	7,8	22,2	12,5	8	31,6	14,3	9,1	13,8	10	23,3	6,3	18,2	11,1
Octobre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,5	0	0	0	0
Total	74	51	36	24	25	19	7	77	65	40	30	16	22	18
Niamey														
Mai	5,7	6,9	2,8	20	9,7	19	23,5	4,4	5,4	10,8	14,9	9,5	8	6,7
Juin	16,7	18,8	27,8	22,2	19,4	19	29,4	14,3	16,1	21,5	12,8	26,2	28	20
Juillet	22,4	25	27,8	33,3	19,4	14,3	11,8	23,6	31	24,7	29,8	14,3	20	33,3
Août	34,7	29,9	18,5	11,1	12,9	23,8	0	35,7	25,6	22,6	17	19	12	13,3
Septembre	19,2	17,4	16,7	11,1	32,3	19	23,5	19,2	20,8	19,4	19,1	28,6	28	20
Octobre	1,2	2,1	6,5	2,2	6,5	4,8	11,8	2,7	1,2	1,1	6,4	2,4	4	6,7
Total	245	144	108	45	31	21	17	182	168	93	47	42	25	15
Tahoua														
Mai	8,7	4,9	4,2	7,7	8,3	18,5	6,7	4,5	6,2	6,7	1,7	12,5	14,8	6,7
Juin	15,4	17,1	17,9	23,1	19,4	18,5	26,7	17,1	14,7	22,2	30	20,8	25,9	33,3
Juillet	31,6	30,1	25,3	24,6	25	22,2	13,3	23,1	33,3	27,8	21,7	20,8	22,2	13,3
Août	29,2	26	23,2	15,4	27,8	11,1	0	35,2	28,7	23,3	26,7	18,8	11,1	20
Septembre	14,6	17,1	26,3	24,6	16,7	29,6	40	18,6	16,3	20	20	22,9	18,5	13,3
Octobre	0,4	4,9	3,2	4,6	2,8	0	13,3	1,5	0,8	0	0	4,2	7,4	13,3
Total	253	123	95	65	36	27	15	199	129	90	60	48	27	15
Tillabéry														
Mai	3,5	3,9	2,4	11,7	11,8	16,7	0	3,4	4,2	3,2	11,7	6,5	14,3	18,2
Juin	12,8	18,1	21,7	26,7	29,4	16,7	42,1	11,6	16,7	13,7	18,3	26,1	23,8	36,4
Juillet	29,6	31,5	31,3	20	14,7	25	15,8	25,2	37,5	37,9	16,7	19,6	14,3	0
Août	38,5	29,1	21,7	18,3	17,6	20,8	5,3	40,1	25,8	20	25	30,4	19	18,2
Septembre	14,6	16,5	19,3	20	20,6	8,3	31,6	19	15,8	20	25	17,4	9,5	9,1
Octobre	0,9	0,8	3,6	3,3	5,9	12,5	5,3	0,7	0	5,3	3,3	0	19	18,2
Total	226	127	83	60	34	24	19	147	120	95	60	46	21	11
Zinder														
Mai	6,1	2,9	5,6	4	0	4,8	15,8	4,1	3,1	2,9	7,1	3,1	13,8	26,7
Juin	15,2	19,7	12,7	16	28,9	28,6	15,8	14,5	17,2	17,1	19	34,4	17,2	13,3
Juillet	31,7	21,2	38	28	26,3	14,3	15,8	33,7	32,8	31,4	33,3	12,5	31	6,7
Août	30,4	38	21,1	20	13,2	19	15,8	35,5	36,7	20	31	21,9	24,1	33,3
Septembre	16,1	17,5	21,1	26	28,9	28,6	31,6	11	9,4	24,3	9,5	28,1	10,3	20
Octobre	0,4	0,7	1,4	6	2,6	4,8	5,3	1,2	0,8	4,3	0	0	3,4	0
Total	230	137	71	50	38	21	19	172	128	70	42	32	29	15

### *c) Variations du nombre de séquences sèches et hauteurs de précipitations*

Nous avons vu dans le paragraphe précédant que l'augmentation du nombre des séquences sèches peut s'interpréter comme une augmentation du nombre des séquences pluvieuses ; ceci n'étant pas toujours lié à une quelconque augmentation des hauteurs de précipitations. Aussi certaines stations (Gaya, Konni, Mainé, Maradi, Niamey, Tahoua, Tillabéry) sont également caractérisées par l'apparition des séquences sèches de sept jours pendant le mois d'août de la période 1971-1991, alors que de telles séquences n'étaient pratiquement pas observables au cours de la période 1950-1970. Il nous a paru alors important de voir quel serait l'apport au cumul des précipitations mensuelles des pluies tombées la veille du début d'une séquence sèche d'un type donné. Le nombre de jours ainsi spécifiés (constituant donc les bornes inférieures des séquences) correspond exactement au nombre de séquences sèches du type considéré. Nous avons ainsi déterminé la contribution à la précipitation mensuelle des précipitations liées à chaque type de séquences sèches (tableaux 4a et 4b) ; ce qui nous permettra ensuite de voir si les variations du nombre de séquences sèches peuvent refléter tout au moins une caractéristique du régime climatique. Ainsi nous remarquons que, par rapport à l'apparition des séquences sèches de sept jours au mois d'août, la contribution des précipitations concernées est inférieure à 1 % de la pluviométrie mensuelle pour les stations de Konni, Maradi, Niamey, Tillabéry excepté pour les stations de Mainé (4,71 %) et Gaya (1,18 %). Compte tenu des hauteurs de pluies enregistrées pour ce mois nous en déduisons que ces contributions sont négligeables.

Les précipitations intéressant les séquences sèches de un à sept jours observées au niveau de la station d'Agadez au cours du mois de juin contribuent pour 73,21 % au cumul du mois pour la période de 1950-1970. Cette contribution est tombée à 37,25 % pour la seconde période ; cependant on pourrait bien penser que la contribution des précipitations des mêmes types tombées le mois de juillet et atteignant 62,78 % des précipitations totales du mois (732,9 mm) cumulées sur la période ont permis de constituer une réserve suffisante des besoins en eau des plantes. Ce qui nous laisse supposer que les occurrences des précipitations alors observables pourraient entretenir la levée des pâturages dans cette zone.

L'absence quasi totale des séquences sèches de longueurs inférieures ou égales à sept jours en juin à la station de N'guigmi durant la période 1950-1970 suivie de leur apparition au cours de la période 1971-1991 nous a amenés à conclure à une diminution des longues séquences sèches et à une précocité apparente de la saison des pluies et avec elle, beaucoup plus de précipitations. Nous remarquons que le cumul des précipitations liées à ces séquences, qui ne représentait que 14,78 % de la précipitation mensuelle au cours de la première période, est de 43,03 % au cours de la deuxième période.

Tableau 4a - Distributions mensuelles des contributions  
des différents types de séquences sèches pour le seuil 0,1 mm.

	1950-1970							1971-1991							Apport mens. (%)	Pluviométrie mens. (mm)		
	Longueur des séquences sèches (jours)							Longueur des séquences sèches (jours)										
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7				
	(3 539,1 mm)							(2 148,4 mm)										
Mai	25,5	4,93	6,09	0	0,29	0	63,2	19,57	176,3	32,7	21,3	10,8	23,2	1,21	0,36	10,5	66,35	124,8
Juin	46,5	37,6	4,12	6,21	4,84	0,66	0	73,21	228,8	48,2	5,17	5,62	1,46	36,6	2,92	0	37,25	238,9
Juillet	42,6	9,94	11,5	12,3	6,45	9,31	7,81	63,49	913,8	26,1	26,12	9,69	29,91	0,48	2,46	5,24	62,78	732,9
Août	40,5	22,9	13,3	12,7	8,6	1,77	0,22	55,19	1 774,8	41,5	23,4	8,48	7,41	7,12	9,87	2,2	58,44	934,6
Sept.	13,1	37,2	12	1,17	19,4	10,1	7,05	55,6	430,9	39,6	3,65	18,5	0	25,8	0,26	12,2	36,19	106,1
Oct.	0	0	0	0	0	0	100	2,07	14,5	0	0	0	0	0	0	0	0	3,1
	(17 784,8 mm)							(15 701,6 mm)										
Mai	16,57	10,66	19,31	15,73	19,73	7,83	10,19	61,29	1 348,9	25,02	13,88	21,23	17,91	11,4	6	4,57	58,94	1 644,1
Juin	32,55	22,35	16,48	5,95	8,18	12,65	1,84	73,94	2 603,7	21,91	33,18	22,34	7,73	7,65	3,92	3,27	62,34	2 511,4
Juillet	33,96	29,05	19,95	9,89	3,46	3,07	0,62	67,18	4 380,3	48,28	26,62	11,5	6,69	6,9	0,01	0	54,28	3 579,9
Août	41,76	23,64	19,6	5,38	9,04	0,58	0	64,95	5 187,7	53,43	29,25	10,32	4,24	0,18	1,4	1,18	34,27	4 620,1
Sept.	42,04	20,17	18,53	9	5,83	3,35	1,07	63,13	3 779,1	45,67	22,9	14,58	9,26	5,74	0,77	1,08	55,41	2 911,1
Oct.	26,46	3,15	8,71	12,66	8,71	18,75	21,57	30,78	485,1	2,96	25,7	38,1	0,28	0,7	4,72	27,54	32,64	435
	(12 973,6 mm)							(9 300,7 mm)										
Mai	30,49	1,96	26,96	20,42	4,3	8,48	7,38	58,33	733,8	15,23	13,5	39,66	12,62	5,29	9,85	3,85	67,12	731,8
Juin	28,47	28,55	13,14	5,18	1,97	14,39	8,3	77,84	1 401,9	33,55	23,12	13,74	12,15	8,09	7,99	1,35	69,25	1 398,6
Juillet	38,72	36,02	11,09	6,92	5,72	1,54	0	56,99	3 118	38,83	17,43	14,85	18,85	4,87	4,09	1,09	61,09	2 557,2
Août	55,17	16,77	12,18	3,82	9,53	2,54	0	48,66	4 857,5	30,83	36,89	12,52	8,72	8,49	2,46	0,09	59,95	3 047,1
Sept.	36,09	26,54	18,98	12,27	1,93	4,17	0,02	58,99	2 509,3	41,96	14,96	15,87	9,55	14,49	1,52	1,65	49,33	1 337,4
Oct.	48,75	5,09	0,22	8,67	2,71	34,56	0	26,14	353,1	22,16	14,87	57,8	0	4,16	0	1,02	47,38	228,6
	(8 997,2 mm)							(6 284,7 mm)										
Mai	37,67	25,99	10,96	12,47	12,91	0	0	46,28	244,4	21,43	37,85	11,83	3,52	1,28	3,09	21	51,51	182,1
Juin	30,87	7,01	24,47	18,26	3,78	11,46	4,16	68,12	772,7	8,46	33,98	29,15	12,63	3,96	1,49	10,32	47,18	513,3
Juillet	34,3	12,17	29,69	11,19	3,6	6,4	2,63	59,51	2 283,3	30,81	20,09	29,1	11,82	3,01	3,85	1,33	67,76	2 091,7
Août	40,62	23,53	18,95	8,58	5,51	0,95	1,86	47,75	4 050,5	42,65	30,67	9,02	5,66	6,6	0,69	4,71	74,84	2 543,4
Sept.	32,63	22,66	15,04	10,39	9,34	8,22	1,71	59,19	1 386,8	27,78	15,21	10,59	10,63	16,8	5,27	13,72	63,66	873,6
Oct.	26,64	30,79	1,34	13,65	0	19,88	7,7	57,57	259,5	67,06	3,53	4,71	24,71	0	0	0	10,55	80,6

Tableau 4a - Distributions mensuelles des contributions des différents types de séquences sèches pour le seuil 0,1 mm (suite).

	1950-1970								1971-1991									
	Longueur des séquences sèches (jours)							Apport mens. (%)	Pluviométrie mens. (mm)	Longueur des séquences sèches (jours)							Apport mens. (%)	Pluviométrie mens. (mm)
	1	2	3	4	5	6	7			1	2	3	4	5	6	7		
	Magaria (11 440,6 mm)								Magaria (10 328,6 mm)									
Mai	22,16	46,17	21,97	3,46	0,56	1,06	4,62	54,78	553,5	22,07	39,47	2,82	6,83	0,31	27,62	0,89	49,63	522,3
Juin	27,01	12,81	16	18,94	11,06	7,39	6,79	79,22	1 103,8	28,34	26,08	9,86	14,3	12,25	7,79	1,38	68,48	1 213,4
Juillet	47,76	28,26	12,41	6,3	3,68	0,99	0,6	72,28	3 473,7	34,93	33,06	13,28	13,48	3,66	0,41	1,17	72,97	3 277,62
Août	47,26	23,64	10,58	9,52	4,8	1,44	2,76	67,08	4 387,9	36,75	26,1	11,28	9,97	12,15	1,54	2,2	61,95	3 730,6
Sept.	37,11	21,73	14,22	7,72	4,1	15,01	0,11	66,82	1 708,1	30,6	19,61	18,97	11,78	7,23	6,18	5,62	75,05	1 429,4
Oct.	2,86	1,25	1,87	61,64	1,87	24,53	5,98	37,59	213,6	2,55	31,06	4,68	12,34	49,36	0	0	30,26	155,3
	Maradi (13 178,8 mm)								Maradi (9 129,2 mm)									
Mai	40,53	18,03	10,2	8,85	5,45	9,69	7,24	49,03	557,6	20,92	15,11	11,12	4,38	4,68	38,98	4,82	47,99	423,4
Juin	32,67	21,02	12,36	15,43	11,66	5,77	1,09	71,13	1 432,8	27,42	17,54	15,96	18,88	14,62	4,04	1,54	68,72	1 228
Juillet	46,39	22,58	16,63	6,01	7,01	0,97	0,41	60,99	3 639,2	31,22	25,68	25,47	5,85	9,15	0,49	2,13	60,79	2 841,8
Août	58,94	18,82	7,39	4,44	7,96	2,44	0	51,04	5 148,2	38,37	29,09	21,72	7,11	1,04	2,58	0,09	55,67	3 359,6
Sept.	37,46	24,87	18,12	3,62	6,46	5,13	4,35	64,85	2 147,5	26,02	19,75	14,85	9,99	20,07	9,32	0	47,37	1 202,5
Oct.	13,4	2,4	22	60,4	1,2	0,6	0	39,45	253,5	0	0	93,49	0	0	0	6,51	45,74	73,9

Tableau 4b - Distributions mensuelles des contributions  
des différents types de séquences sèches pour le seuil 0,1 mm.

	1950-1970									1971-1991								
	Longueur des séquences sèches (jours)							Apport mens. (%)	Pluviométrie mens. (mm)	Longueur des séquences sèches (jours)							Apport mens. (%)	Pluviométrie mens. (mm)
	1	2	3	4	5	6	7			1	2	3	4	5	6	7		
	N'guigmi (3 345,1 mm)									N'guigmi (3 653,6 mm)								
Mai	9,01	0	0	1,82	84,37	4,79	0	53,24	195,9	0	49,02	50,98	0	0	0	0	7,56	67,5
Juin	45,14	10,29	8	0	0	0	36,57	14,78	118,4	22,68	14,56	12,05	20,5	2,34	1,67	26,19	43,03	277,7
Juillet	21,28	26,4	13,73	14,84	12,64	7,98	3,13	60,68	1 460,4	20,62	39,43	16,68	16,1	1,54	3,98	1,65	66,99	1 046,9
Août	31,48	31,07	19,41	9,06	4,82	3,58	0,58	59	3 093,8	25,66	34,56	7,88	9,24	7,36	10,12	5,19	54,5	1 933,2
Sept.	10,01	29,16	22,68	11,23	17,78	9,14	0	29,75	466,9	23,86	30,99	8,55	18,08	6,95	11,13	0,45	36,06	311,4
Oct.	0	0	0	0	0	0	0	0	9,7	0	0	100	0	0	0	0	5,92	16,9
	Niamey (13 275,3 mm)									Niamey (9 995,4 mm)								
Mai	30,36	20,19	1,84	22,33	3,2	12,63	9,45	56,83	709,3	33,91	7,39	21,77	14,62	17,32	4,9	0,08	27,8	880,6
Juin	29,7	25,64	33,79	2,29	4,7	0,6	3,28	64,49	1 636,7	22,95	28,34	19,2	7,69	11,2	5,32	5,3	66,86	1 297,7
Juillet	29,13	33,22	17,15	11,06	5,31	1,57	2,56	47,64	3 786,4	19,5	37,35	16,17	10,41	3,31	9,65	3,62	60,74	2 798,7
Août	48,45	26,67	18,11	3,33	0,93	2,5	0	41,61	4 456	36,15	33,57	11,29	7,71	8,42	1,9	0,95	57,35	3 236,2
Sept.	53,33	24,75	10,22	2,97	5,46	1,89	1,38	50,04	2 339,9	26,3	31,85	18,2	6,13	9,58	6,6	1,34	55,06	1 581,8
Oct.	29,1	0,7	19,44	21,77	19,91	2,91	6,17	24,76	347	47,08	1,32	0,38	29,19	3,2	10,92	7,91	26,5	200,4
	Tahoua (9 343,5 mm)									Tahoua (6 891,5 mm)								
Mai	68,69	7,72	9,36	6,2	1,36	3,84	2,84	58	431,2	33,74	28,92	11,95	0,15	1,82	12,4	11,02	52,67	386
Juin	28,58	22,86	23,95	13,89	7,74	2,23	0,75	57,38	1 212,1	27,74	18,67	24,2	10,75	8,72	8,9	1,02	63,25	975,4
Juillet	42,19	25,27	13,36	10,35	6,2	2,24	0,41	64,45	2 670,9	31,54	29,33	16,94	13,02	4,75	3,97	0,45	58,28	1 878,8
Août	47,28	19,02	16,67	4,33	11,33	1,38	0	50,35	3 273,6	41,86	20,76	17,19	11,74	6,4	0,7	1,35	59,22	2 494,2
Sept.	27,91	18,17	11,76	21,96	4,19	9,76	6,25	61,78	1 528,1	28,36	23,52	18,6	11,84	13,31	3,89	0,48	68,55	1 033,9
Oct.	1,75	6,99	55,91	25,54	0	0	9,81	32,69	227,6	22,53	0,25	0	0	29,62	4,05	43,54	64,12	123,2
	Tillabéry (10 659 mm)									Tillabéry (7 626,3 mm)								
Mai	34,32	15,39	3,97	16,43	22,8	7,08	0	54,52	388,5	17,96	8,8	35,47	24,61	4,2	5,5	3,45	53,16	376
Juin	34,81	30,23	16,64	8,48	3,24	2,68	3,93	56,41	1 060,3	17,38	23,97	24,9	5,72	18,26	5,33	4,44	56,54	912,6
Juillet	39,21	27,1	13,26	11,4	3,5	5,06	0,48	54	2 757,6	24,59	37,76	20,2	8,19	8,94	0,32	0	65,39	2 088
Août	58,62	20,99	11,37	5,4	2,26	1,34	0,02	45,1	4 449,5	42,97	19,73	12,62	10,83	10,99	1,91	0,94	70,13	2 676,7
Sept.	32,31	24,66	26,07	7,59	4,98	0,21	4,19	48,3	1 708,4	24,55	13,69	23,63	17,97	17,23	2,84	0,09	33,93	1 347,9
Oct.	19,61	0	29,5	5,37	21,82	23,61	0,09	39,8	294,7	0,38	0	71,01	13,04	0	11,39	4,18	70,19	225,1

Tableau 4b - Distributions mensuelles des contributions  
des différents types de séquences sèches pour le seuil 0,1 mm (*suite*).

	1950-1970									1971-1991								
	Longueur des séquences sèches (jours)							Apport mens. (%)	Pluviométrie mens. (mm)	Longueur des séquences sèches (jours)							Apport mens. (%)	Pluviométrie mens. (mm)
	1	2	3	4	5	6	7			1	2	3	4	5	6	7		
	Zinder																	
	(10 886,6 mm)									(8 005,3 mm)								
Mai	41,11	45,31	9,15	1,72	0,31	0,23	2,17	44,93	583,6	11,04	24,01	5,55	19,4	8,9	10,97	20,13	49,62	301,3
Juin	22,21	32,96	2,9	10,6	22,46	2,59	6,29	75,95	1 099,7	37,2	19,19	9,75	20,67	8,94	3,05	1,2	56,18	682,8
Juillet	47,5	18,38	17,91	6,55	4,63	0,67	4,37	68,33	2 801,6	33,9	38,1	9,12	10,11	2,02	6,68	0,07	70,12	2 719,2
Août	36,3	39,79	7,44	5,7	5,12	4,55	1,09	55,46	4 886,7	44,69	25,26	8,3	10,57	4,65	4,15	2,39	56,09	3 181,4
Sept.	36,77	21,37	11,62	11,03	11,67	3,2	4,34	60,29	1 394,6	14,75	15,26	26,03	9,73	26,48	1,37	6,38	49,99	1 019,8
Oct.	0,65	32,26	6,45	43,23	2,58	9,35	5,48	25,75	120,4	54,19	3,52	41,85	0	0	0,44	0	22,52	100,8

## V - CONCLUSION

Les résultats ci-dessus nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- le mois de juillet présente un maximum de séquences pluvieuses espacées au plus de trois jours secs ; ce qui est important du point de vue agronomique. On peut alors considérer l'installation effective de la saison des pluies au Niger en juillet ;
- la fréquence relativement élevée des séquences sèches de sept jours au mois d'octobre à Gaya et nulle pour les stations d'Agadez et de N'guigmi indique que le FIT qui a déjà amorcé sa descente vers l'équateur en septembre (valeurs relativement faibles des pourcentages des séquences sèches de septembre comparés à ceux d'août) est situé au sud d'Agadez et de N'guigmi. Ce phénomène explique aussi la cassure des isohyètes observée à l'est du pays et qui fait ainsi apparaître les stations d'Agadez et de N'guigmi dans la même zone climatique au cours de la période 1971-1991. Ceci vient confirmer nos précédents résultats (FODÉ *et al.*, 1993) ;
- la diminution du nombre de séquences sèches de faibles longueurs (1, 2, 3 jours) au cours de la période 1971-1991 montre de façon globale une diminution de la fréquence des précipitations.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BENOÎT P., 1977 - The start of the growing season in northern Nigeria. *Agricultural Meteorology*, 18, 91-99.
- CADET D.-L. et GUILLOT B., 1991 - *EPSAT. Estimation des précipitations par satellite*. ORSTOM Lannion, octobre, 63 p.
- CASKE J.E. Jr., 1963 - A MARKOV chain model for the probability of precipitation occurrence in intervals of various lengths. *Mon. Wea. Rev.*, 91, 298-301.
- FEYERHERM A.M. et BARK L.D., 1965 - Statistical Methods for Persistent Precipitations Patterns. *J. Appl. Meteor.* 4, 320-328.
- FODÉ M. et ADAMOU O. M., 1993 - Sécheresse et désertisation au Niger (à soumettre aux annales de l'université Abdou Moumouni, Niamey, Niger).
- GABRIEL K.R. et NEWMANN J., 1957 - On a distribution of weather cycles by length. *Quart. J. R. Meteor. Soc.* 83, 375-380.
- GABRIEL K.R., 1959 - The distribution of the number of successes in a sequence of dependent trials. *Biometrika*, 46, 454, 460.
- GARCIA C.C. et MARTIN-VIDE J., 1993 - Analyse par la chaîne de MARKOV de la sécheresse dans le Sud de l'Espagne. *Sécheresse*, n° 2, vol. 4, 123-129.
- HOPKINS J.W. et ROBILLARD P., 1964 - Some statistics of daily rainfall occurrence for the Canadian prairie provinces. *J. Appl. Meteor.* 3, 600-602.
- LEROUX M., 1986 - *L'importance de la stratification aérologique de la troposphère tropicale*. 1<sup>st</sup> Workshop: « Tropical Meteorology » Erice, SICILE, 26 sept. - 4 oct. 1986.
- LONGLEY R.W., 1953 - The length of dry and wet periods. *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, 79, 520-527.

- NICHOLSON S.E., 1983 - Sub-Saharan Rainfall in the years 1976-1980. Evidence of continued drought. *Mon. Wea. Rev.*, vol. 11, 1646-1654.
- SHIVAKUMAR *et al.*, 1993 - Agroclimatologie de l'Afrique de l'Ouest : le Niger, deuxième édition, *Bulletin d'information* n° 5, Institut international de recherche sur les cultures des zones tropicales semi-arides, ICRISAT, Niamey, pp. 108.
- WEISS L.L., 1964 - Sequences of wet or dry days described by a MARKOV chain probability model. *Mon. Wea. Rev.*, 92, 169-176.
- WILLIAMS, C.B., 1952 - Sequences of wet and dry days considered in relation to the logarithmic series. *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, 78, 91-96.