

Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Niger

Maud Balme
Sylvie Galle
Thierry Lebel

Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement (LTHE)
Institut de recherche pour le développement (IRD),
1023, rue de la Piscine,
BP 53,
38041 Grenoble cedex 9,
France
<maudbalme@yahoo.fr>
<Thierry.lebel@hmg.inpg.fr>
<Sylvie.Galle@ird.fr>

Résumé

Le démarrage de la saison des pluies au Sahel, qui est d'une importance critique pour la culture du mil, est étudié à partir d'un réseau dense de 30 pluviographes installés depuis 12 ans, couvrant une zone de 16 000 km² dans la région de Niamey (Niger, 13,5° N). Trois critères sont utilisés pour définir le démarrage de la saison des pluies, l'un est spatial (« climatique »), les deux autres sont ponctuels (« hydrologique » et « agronomique »). Le démarrage climatique est lié à l'observation du premier système convectif de mésoéchelle organisé. Le critère hydrologique prend en compte la première pluie générant du ruissellement. Le critère agronomique s'assure que le démarrage n'est pas suivi d'épisodes secs de plus de 7 jours. Le démarrage dit « agronomique » est le plus tardif et coïncide avec la date du « saut » de mousson, ayant lieu la troisième décennie de juin. La saison des pluies « hydrologique » peut débuter plusieurs semaines avant cette date ; néanmoins 90 % du cumul annuel tombe au cours de la saison agronomique, c'est-à-dire entre la troisième décennie de juin incluse et fin septembre. Le démarrage « climatique » se situe entre les deux. Ces dates moyennes cachent une grande variabilité spatiale. Sur la zone étudiée, le démarrage agronomique ou hydrologique peut varier de plus de 3 semaines pour une année donnée selon la station considérée. Sur les 12 ans d'observation, les dates moyennes de démarrage sont aussi très variables, alors que les dates de fin sont plus resserrées. On montre également qu'il n'y a pas de corrélation significative entre le cumul saisonnier et la longueur de la saison des pluies. L'intérêt de ces résultats pour les cultures de mil est discuté en conclusion.

Mots clés : Pluviométrie, Hydrologie, Climatologie, Mousson, Agriculture, Sahel.

Abstract

Analysis of the variability of the onset of the rainy season in the Sahel at hydrological and agronomical scales, based on EPSAT-Niger data

The onset of the rainy season in the Sahel is studied on a densely instrumented area (1990-2001), allowing an analysis of the spatial variability as well as of the interannual variability to be carried out. The area concerned is located in the region of Niamey (Niger) and covers about 16,000 km². Three criteria are used to define the onset of the monsoon: one is spatial ("climatological") while the other two others are local ("hydrological" and "agronomical"). The climatological date is linked to the observation of the first organized mesoscale convective system. The hydrological

criterion takes into account the first rainfall generating runoff, even if it is a local event. The agronomical criterion requires that no dry spell of more than 7 days should follow the onset. This study compares the onset dates derived from those three criteria over 12 consecutive years. On average, the "hydrological" onset occurs 6 weeks before the "agronomical" onset. The first organised convective system occurs in between. The agronomical onset takes place on average at a date close to the date of the monsoon jump (third decade of June). This is consistent with the fact that meteorological conditions at the monsoon onset lead to shorter dry spells. However, these average results conceal a great spatial variability in our study area. For both local criteria, in a given year, and depending on the station concerned, more than 3 weeks can elapse between the earliest and the latest onset. Similarly, there is an important interannual variability of the onset, whereas the end of the rainy season is much less variable. A correlation analysis between the date of the onset, the length of the season and the total seasonal rainfall shows that the total rainfall is poorly correlated to either the date of the onset or the length of the season. It follows that seasonal forecast techniques based solely on the date of the onset have little predictability potential. The implications of these results for millet crops are discussed as a conclusion.

Key words: Rainfall, Hydrology, Climatology, Monsoon, Agriculture, Sahel.

Au Sahel, la sécurité alimentaire d'une majorité de la population dépend de la culture de céréales vivrières comme le mil ou le sorgho [1]. L'accroissement démographique des 50 dernières années a entraîné une augmentation de la proportion des surfaces cultivées (champs, jachères, pâtures), menaçant l'espace exploitable de saturation. Cette proportion est passée de 30 % en 1950 à 80 % en 1992 dans la région de Niamey [2] et de 28 % en 1961 à 46 % en 1996 sur toute la bande sahélienne [3], selon l'estimation du modèle SALU (*Sahelian Land Use Model*). Une des priorités des institutions de recherche en Afrique de l'Ouest est d'assurer un certain degré de stabilité des rendements des récoltes aux agriculteurs [4]. Cette situation s'inscrit dans un environnement et un climat difficiles – sols peu fertiles, précipitations faibles et irrégulières, soumises à une grande variabilité spatio-temporelle. Pour mieux gérer la ressource pluviométrique, il s'avère nécessaire de comprendre les différents mécanismes de la mousson ouest-africaine, et notamment le démarrage de la saison des pluies, événement clé pour les agriculteurs pour le choix d'une date de semis.

Bien que le climat sahélien soit caractérisé par une saison des pluies unique et bien marquée, il n'existe pas de critère universellement accepté pour en définir le démarrage et la fin. Les définitions utilisées dépendent de l'observateur. Pour le météorologue par exemple, le démarrage de la saison des pluies est associé à la mise en place de la convection organisée, qui se traduit par l'apparition d'événements pluvieux présentant une certaine extension spatiale. L'hydrologue, quant à lui, s'intéresse aux premières pluies sus-

ceptibles de générer du ruissellement, même si ce n'est que localement, tandis que l'agronome impose que la première pluie significative ne soit pas suivie d'épisodes secs trop longs, fatals pour les cultures. La comparaison de ces trois points de vue – qui vaut aussi bien pour le démarrage que pour la fin de la saison des pluies – fait apparaître une opposition entre des critères localisés (dans le temps ou dans l'espace) et des critères mettant l'accent sur la durée ou l'extension spatiale. Pour pouvoir comparer ces différentes approches, il est donc important de disposer de données de bonne qualité, denses spatia-

lement pour étudier les variations locales de la date de démarrage, et de bonne résolution temporelle pour bien appréhender la notion d'événement pluvieux associé aux systèmes convectifs.

Il existe sur le Sahel un jeu de données unique qui satisfait à ces critères ; il s'agit de l'observatoire EPSAT-Niger, constitué de 30 stations pluviographiques réparties sur une zone de 16 000 km² et ayant fonctionné 12 années, procurant ainsi un échantillon pertinent pour étudier la variabilité aux échelles fines, dans l'espace et dans le temps, du démarrage et de la fin de la saison des pluies, ainsi que leur

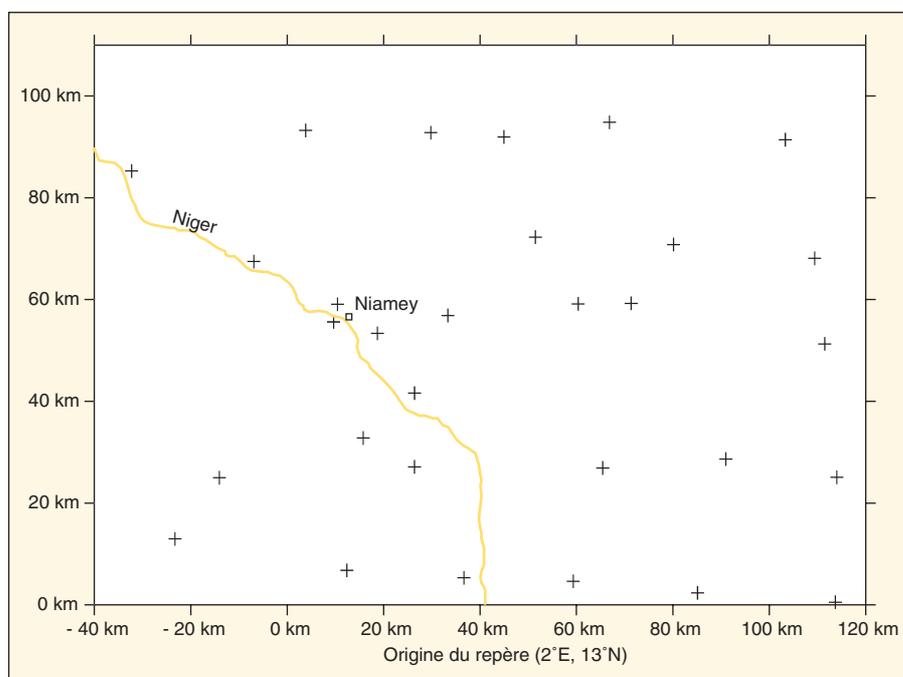


Figure 1. Observatoire EPSAT-Niger (réseau de 30 pluviographes installés depuis 1990).

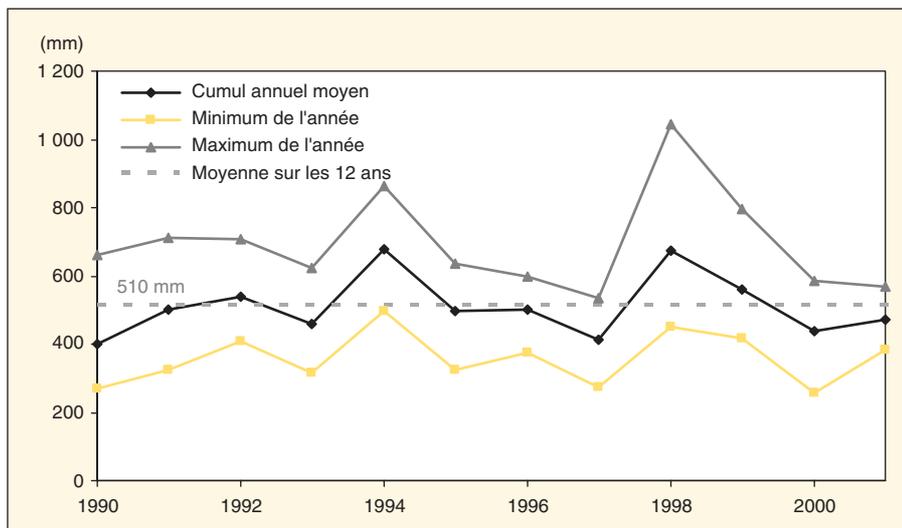


Figure 2. Cumuls pluviométriques annuels moyens sur 30 stations et extrêmes saisonniers enregistrés de 1990 à 2001.

corrélation avec le cumul pluviométrique annuel.

Observatoire EPSAT-Niger

Dans le but de mieux comprendre les systèmes précipitants sahéliens à des échelles d'espace et de temps réduites, un observatoire couvrant une zone comprise entre 1°40 et 3°00 Est en longitude et 13°00 et 14°00 Nord en latitude (figure 1) a été équipé depuis 1990 d'un réseau de 30 pluviographes [5]. La pluviométrie annuelle moyenne de 1990 à 2001 sur la zone d'étude est de 510 mm (figure 2), mais les minima et maxima annuels indiqués illustrent une grande variabilité spatiale des cumuls saisonniers, entre des stations parfois proches d'une vingtaine de kilomètres. Les données acquises sur l'observatoire ont ainsi permis, par la finesse de leurs pas de temps et d'espace (une station tous les 25 km enregistrant les pluies au pas de temps de 5 minutes), de mieux caractériser la variabilité spatio-temporelle des pluies sahéliennes. Lors d'une première étude de synthèse, D'Amato [6] a comparé plusieurs critères permettant de définir objectivement des événements pluvieux sur la zone d'étude considérée. L'événement pluvieux est caractérisé par un seuil minimal de quantité d'eau tombée de 1 mm, une durée minimale de non-pluie de 30 minutes permettant de considérer l'événement antérieur comme indépendant du suivant, et une proportion minimale de stations du réseau touchées de 30 %. Des études récentes [7] fondées sur une archive de 9 ans de données Météosat ont montré que les événements pluvieux

ainsi définis à partir de l'observatoire EPSAT-Niger constituaient une population proche de celle des systèmes convectifs organisés, caractéristiques du régime pluviométrique sahélien, et produisaient 90 % de la pluie totale sur la région. L'apparition de ces événements pluvieux marque le démarrage « climatique » de la saison des pluies, en ce sens que la convection organisée est caractéristique de la région.

Deux représentations de la pluie sont donc utilisées parallèlement : un point de vue ponctuel s'appuyant sur les mesures enregistrées en une station quelconque du réseau considérée isolément ; et une vision spatiale reposant sur la notion d'événement pluvieux sur la zone.

Définition du démarrage et de la fin de la saison des pluies

On trouve dans la littérature plusieurs critères de définition du démarrage de la saison des pluies reposant sur des données pluviométriques ou des variables édaphiques. Ces critères de type « agricole » définissent le démarrage soit à partir d'un seuil de pluie tombée en quelques jours consécutifs [4, 8], soit à partir d'un seuil d'évapotranspiration potentielle, soit à partir d'une combinaison des deux types de variables. Les deux critères fondés sur un seuil de pluie tombée sont très similaires ; on utilisera ici le critère de Sivakumar [4] comme critère « agricole ».

Dans cet article, on confronte deux critères ponctuels (critère « hydrologique » et critère « agricole ») et un troisième critère spatial (critère « climatique »),

chacun faisant appel à une représentation différente de la pluie :

- le critère « climatique » prend comme dates de démarrage et de fin de la saison des pluies les dates des premier et dernier événements pluvieux EPSAT-Niger indiquant l'apparition puis la disparition d'une convection organisée ;
- le critère « hydrologique » fait commencer la saison en chaque station à la première pluie enregistrée supérieure ou égale à un seuil (0,5 mm, 2,5 mm ou 5 mm), et l'arrête à la dernière pluie supérieure ou égale au seuil. La gamme de seuils explorés correspond au minimum enregistré par les pluviographes (0,5 mm) et à un seuil de 5 mm susceptible de générer un écoulement dans cette région [9] ;
- le critère « agricole » [4] donne, pour chaque station, comme date de démarrage de la saison après le 1^{er} mai, au moins 20 mm de pluie sur 3 jours, sans épisode sec excédant 7 jours dans les 30 jours qui suivent (pour éviter les faux départs) et, comme date de fin de saison après le 1^{er} septembre, 20 jours consécutifs sans pluie.

Les critères hydrologique et agricole sont définis pour chaque station séparément alors que le critère climatique s'applique globalement à toute la zone d'étude. Pour une année donnée, on a donc plusieurs dates de démarrage agricole et hydrologique possibles sur la zone d'étude mais une seule date climatique.

Résultats

Comparaison des dates déterminées par les différents critères

Les premiers résultats – moyenne sur 12 ans et 30 stations (tableau 1) – montrent que les dates de démarrage de la saison des pluies s'étalent sur 2 mois (du 30 avril au 21 juin) suivant les critères utilisés alors que les dates de fin de la saison sont moins dispersées (du 27 septembre au 4 octobre), ce qui est remarquablement resserré, eu égard aux critères utilisés. Concernant le critère hydrologique, l'augmentation du seuil (passage de 0,5 mm à 2,5 mm, ou de 2,5 mm à 5 mm) décale la date moyenne de démarrage d'une semaine (30 avril, 7 mai, 15 mai). Le critère climatique, qui marque le début d'événements pluvieux importants par leur amplitude et leur extension spatiale, fait débiter la saison en moyenne le 3 mai. Un commentaire s'impose sur la similitude des dates hydrologique et climatique. La date hydrologique est calculée ici sur la base d'une moyenne des dates individuelles calculées en chaque sta-

Tableau 1. Dates moyennes de démarrage et de fin de la saison des pluies (sur 12 ans et 30 stations), longueur moyenne de la saison.

	Critère climatique	Critère hydrologique			Critère agronomique
		Seuil 0,5 mm	Seuil 2,5 mm	Seuil 5 mm	
Date moyenne démarrage	3 mai	30 avril	7 mai	15 mai	21 juin
Écart type interannuel sur 12 ans (en jours) sans 1991	14 (15)	10 (10)	10 (10)	9 (9)	11 (6)
Date moyenne fin	1 ^{er} octobre	4 octobre	29 septembre	27 septembre	4 octobre
Écart type (en jours)	10	7	7	7	7
Longueur moyenne de la saison (jours)	151 jours	157 jours	145 jours	135 jours	105 jours
Écart type (en jours)	14	15	14	13	13

tion. Cela revient indirectement, et par une arithmétique un peu différente, à définir comme critère climatique un démarrage moyen sur l'ensemble de la zone d'étude. On verra plus loin que le critère hydrologique se démarque nettement du critère climatique lorsque l'on considère les dates de démarrage, très dispersées, calculées sur chaque station isolément. Quant au critère agronomique, il est le plus tardif et repousse les premières pluies utiles à la date moyenne du 21 juin, qui coïncide avec le « saut » de mousson. Des travaux récents [10, 11] ont remis en cause la vision classique d'une pénétration progressive de la mousson sur le continent, en montrant que la migration latitudinale de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) vers le nord – qui marque l'installation de la mousson sur certaines zones du Sahel – se fait brusquement fin juin, d'une position quasi stationnaire à 5° N en mai-juin à une autre position d'équilibre à 10° N en juillet-août, d'où le terme « saut » de mousson. Le lien entre ce « saut » et le démarrage agronomique décrit par des données au sol s'explique par le fait qu'en phase de mousson établie, les conditions météorologiques (humidité de l'air, organisation de la convection) induisent une réduction de la longueur des épisodes secs.

Les dates de démarrage de la saison des pluies, suivant le critère choisi, sont liées à différents phénomènes qui s'échelonnent dans le temps - premières pluies locales générant du ruissellement (critère hydrologique), événements plus organisés (critère climatique) et finalement mousson établie (critère agronomique). Ces dates moyennes donnent une idée globale de l'installation de la saison des pluies, mais cachent en réalité une grande variabilité spatiale et temporelle.

Variabilité interannuelle

Dans cette partie on ne considère que les dates moyennes calculées chaque année en faisant la moyenne des 30 stations. On ignore donc dans un premier temps la

variabilité spatiale et on a déjà fait la remarque que, dans ces conditions, le critère hydrologique était très semblable au critère climatique. L'objectif ici est de caractériser la variabilité interannuelle en s'appuyant sur l'analyse des écarts types calculés sur les séries de valeurs annuelles. Dans le *tableau 1*, on a fait apparaître deux valeurs pour ces écarts types : l'une est calculée sur les douze années et l'autre sur onze années, en ne prenant pas en compte l'année 1991. Cette année a été particulièrement précoce et seuls 9 pluviographes étaient installés avant le 15 mai. Les écarts types des dates hydrologique et climatique sont peu affectés par cette modification d'échantillonnage avec des valeurs respectives de 10 et 14 jours. En revanche, l'écart type interannuel des dates de démarrage agronomique passe de 11 jours en incluant l'année 1991 à 6 jours en l'excluant. La petite taille de l'échantillon explique cette grande instabilité et permet difficilement de tirer des conclusions définitives sur la plus ou moins grande variabilité des dates de démar-

rage selon le critère utilisé. Il semble néanmoins que la date de démarrage agronomique soit plus stable d'une année à l'autre que les dates de démarrage hydrologique et climatique. En ce qui concerne les écarts types des dates de fin de saison des pluies, on note qu'ils sont plus faibles que ceux des dates de démarrage, confirmant que la fin de la saison des pluies est mieux définie que son démarrage et moins variable d'une année à l'autre.

Dans ce qui va suivre, on s'intéresse plus particulièrement aux critères agronomique et climatique, jugés plus pertinents en terme d'applications - le critère agronomique a un intérêt évident du point de vue de l'agriculture alors que le critère climatique renvoie à une vision météorologique du phénomène.

La représentation des dates de démarrage et de fin de saison des pluies obtenues avec les deux critères pour les années 1990 à 2001 (*figure 3*) partage la saison des pluies en deux périodes :

– la première, enveloppée par les deux critères de démarrage, est appelée « pré-

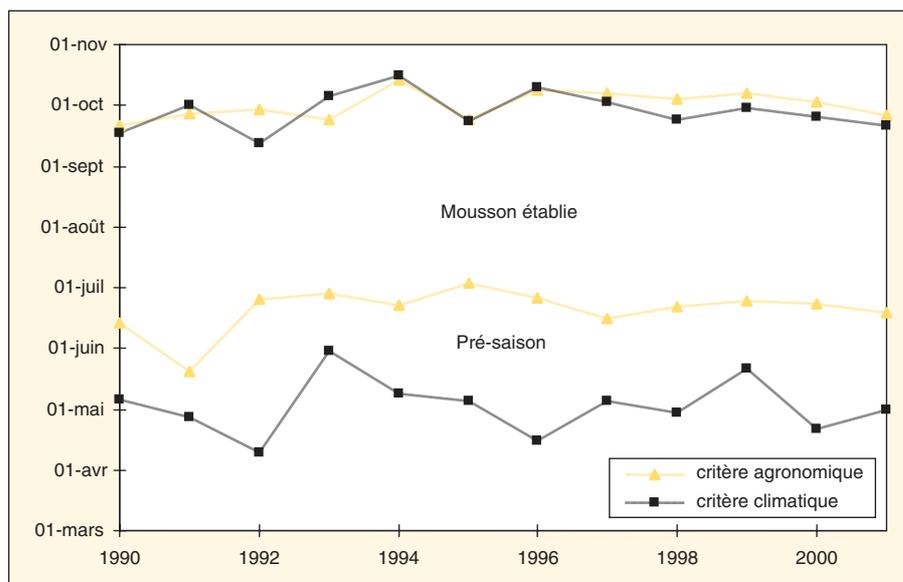


Figure 3. Dates de démarrage et de fin de la saison des pluies suivant deux critères (agronomique et climatique).

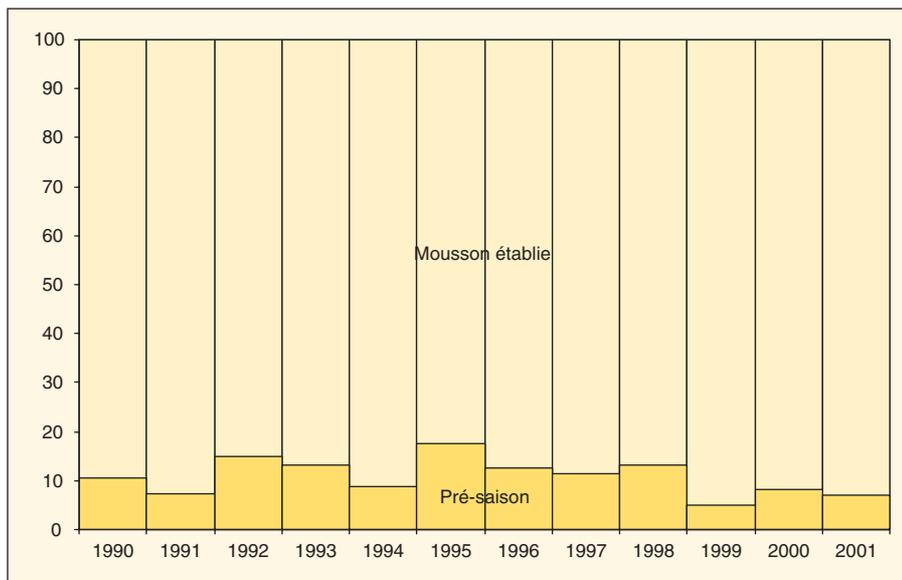


Figure 4. Apports des deux périodes (pré-saison et mousson établie) en pourcentage du cumul pluviométrique annuel.

saison » et indique le temps durant lequel les pluies sont irrégulières. Elle couvre la période allant de début avril à la deuxième décennie de juin incluse ;

– la seconde période, ou « mousson établie », s'étend entre le démarrage agronomique de la troisième décennie de juin et fin septembre qui marque la fin de la saison des pluies pour les deux critères.

Alors que la fin de la saison des pluies est chaque année très semblable pour les deux critères, l'écart sur les dates de démarrage est souvent important et très variable suivant les années : 29 jours en 1993, 78 jours en 1992. Cela indique que la longueur de la pré-saison peut varier d'un à trois mois, tandis que la longueur de la saison agronomique, qui correspond à la « mousson établie » est bien moins variable, son démarrage et sa fin étant relativement stables.

La saison des pluies agronomique est donc en moyenne de 105 jours alors que la saison des pluies climatique dure 151 jours, chiffres à comparer au cycle de croissance des mils (90 à 120 jours pour les variétés à cycle constant). De plus, malgré sa durée nettement plus courte, la saison des pluies agronomique représente 90 % du cumul pluviométrique saisonnier total (figure 4). En apparence, on pourrait donc concevoir une stratégie simple de semis lors du « saut » de mousson, minimisant ainsi les risques de sécheresse en cours de cycle et assurant une durée de pluie suffisante (la fin des pluies en fin de cycle étant préférable, une saison des pluies de 105 jours est encore bien adaptée à une variété de 120 jours). Des simulations faites avec le modèle agronomique SARRA-H

(Système d'analyse régionale des risques agroclimatiques) sur la station de Niamey (1968-1990) montrent que la prise en compte de la date de la mousson comme date de semis améliore significativement les rendements [12]. Néanmoins, les pratiques paysannes prennent en compte d'autres contraintes, telle que l'optimisation du temps de travail nécessaire à chacune des étapes agricoles réalisées manuellement (préparation du champ, fumure, semis, démarrage, sarclage) et la lutte contre l'enherbement [13]. L'apparition des premières grandes pluies favorise effectivement la pousse de mauvaises herbes ainsi qu'une libération importante d'azote, élément essentiel de la photosynthèse. En ne semant pas à ce moment-là, on court donc le risque de laisser s'installer des plantes concurrentes du mil, qui profiteront pleinement du pic d'azote.

Les calendriers de semis ne peuvent donc s'appuyer exclusivement sur des considérations climatiques et des études plus poussées à l'aide de modèles de culture sont nécessaires pour bien exploiter les résultats de l'analyse climatologique. Cependant, une première conclusion d'ordre diagnostique s'impose ici. Alors que sur notre période d'étude la longueur de la saison climatique varie entre 130 jours (1993) et 180 jours (1996), l'essentiel de cette variation est lié à celle de la longueur de la pré-saison. Dans la mesure où cette pré-saison ne représente que 10 % du cumul pluviométrique total, on conçoit aisément que ces variations de longueur ne constituent qu'un facteur explicatif secondaire du cumul saisonnier. Or c'est la longueur de la pré-saison qui conditionne la lon-

gueur totale de la saison des pluies. La corrélation entre durée de la saison des pluies et cumul pluviométrique saisonnier ne peut donc être très forte. C'est un point sur lequel nous reviendrons plus loin.

Variabilité spatiale

Alors que dans la section précédente on s'est intéressé exclusivement à la variabilité interannuelle des dates moyennes de démarrage calculées sur l'ensemble de la zone d'étude, on va analyser ici comment cette date varie dans l'espace pour une année donnée. Bien entendu cette analyse ne concerne que les deux critères calculés localement, à savoir le critère agronomique et le critère hydrologique. Le réseau EPSAT-Niger fournit des informations pluviographiques pour des stations distantes les unes des autres d'une trentaine de kilomètres seulement. On peut donc tracer des cartes de date de démarrage, illustrées dans la figure 5, qui montrent à la fois la grande variabilité dans l'espace de ces dates de démarrage et une organisation totalement différente d'une année à l'autre, mal corrélée à la latitude et indépendante des conditions de végétation ou de relief. La variabilité spatiale du démarrage s'observe sur les huit figures, indépendamment du caractère sec ou humide de l'année. Ce fait est d'autant plus remarquable que l'on a choisi pour cette figure deux années humides (1998 et 1999) aux comportements très différents, une année sèche (1997), et enfin une année « moyenne » marquée par des gradients pluviométriques particulièrement forts (1992). On constate également que l'installation de la saison agronomique diffère beaucoup de celle de la saison hydrologique. Par exemple, en 1998, la saison agronomique s'installe de manière très dispersée (écart type de 23 jours) alors que la saison hydrologique démarre de façon plus homogène sur toute la zone étudiée (écart type de 9 jours). On constate l'inverse en 1999. En revanche, l'organisation du démarrage de la saison 1992 est assez similaire pour les deux critères. En général, la manière dont s'installe la saison des pluies hydrologique ne conditionne pas celle de la saison agronomique.

Intérêt agronomique des résultats

On peut s'interroger sur l'utilité des critères de détermination du démarrage de la saison des pluies dans le cadre de la prévision saisonnière. Peuvent-ils servir d'alerte précoce pour une saison déficitaire ? Peuvent-ils orienter les agriculteurs vers un choix de cultures visant à minimiser les risques ?

Répondre à la première question revient à étudier la corrélation entre la date de

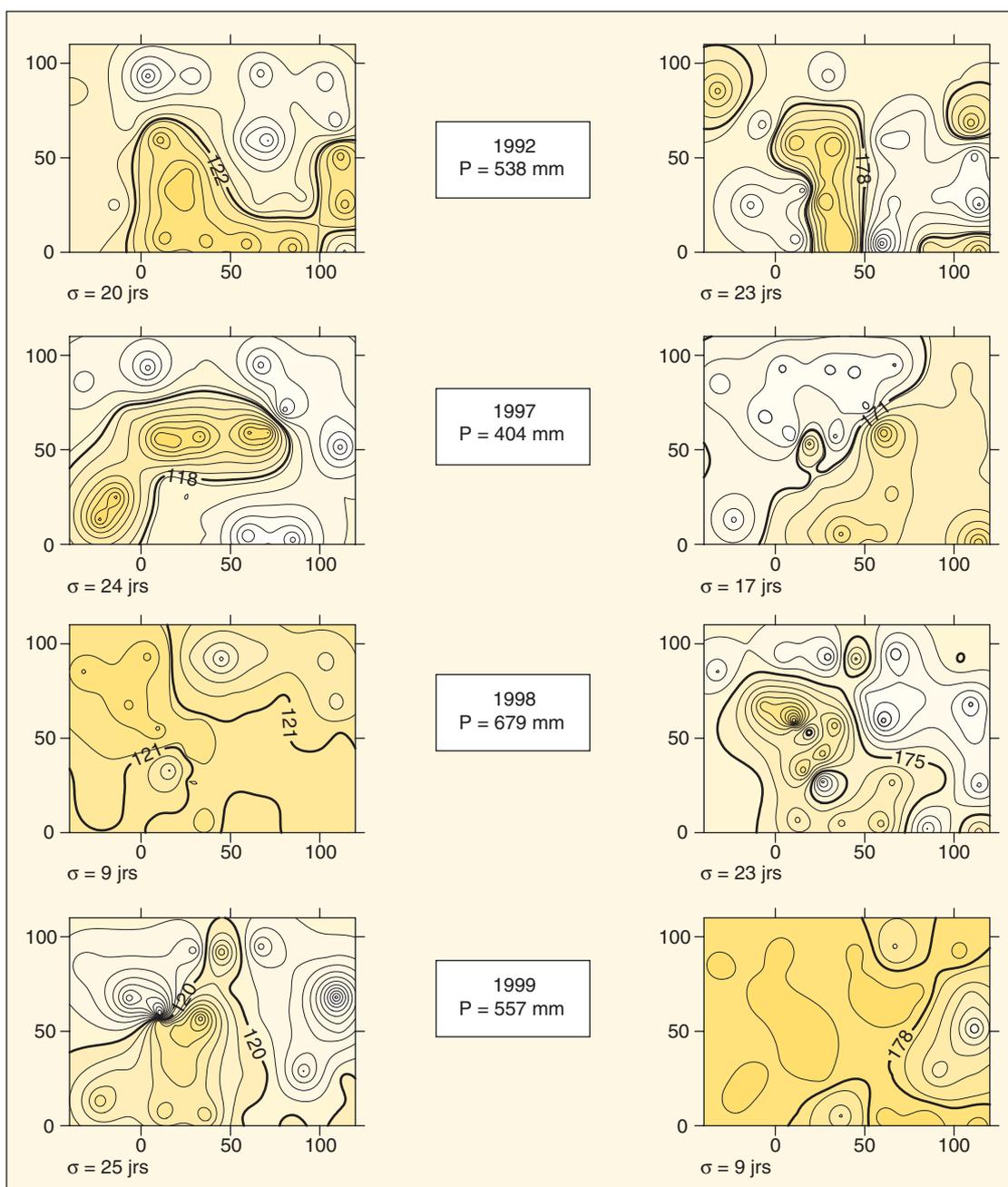


Figure 5. Dates de démarrage de la saison des pluies sur l'observatoire EPSAT-Niger pour 4 années (1992, 1997, 1998, 1999), à gauche suivant le critère hydrologique (seuil 2,5 mm), à droite suivant le critère agronomique.

Plus les teintes sont claires, plus la date de démarrage est tardive. L'isoligne en gras indique la date moyenne de démarrage de l'année considérée (numéro du jour de l'année). Les isolignes sont écartées de 5 jours. Sont indiqués aussi l'écart type spatial (σ) des dates pour chaque année et le cumul pluviométrique annuel (P).

démarrage de la saison des pluies et le cumul annuel. Sur la *figure 6*, on représente les coefficients de corrélation (R^2) reliant la date de démarrage agronomique moyenne annuelle (moyenne des 30 dates de démarrage agronomique pour chaque année) à trois cumuls différents, soit le cumul total saisonnier, le cumul enregistré lors de la présaison et le cumul agronomique (enregistré pendant la saison agronomique ou période de mousson établie). On sépare ainsi les influences en termes

d'apports pluviométriques de la présaison, d'une part, et de la période de mousson établie, d'autre part. Les coefficients de corrélation sont quasiment nuls ($R^2 = 0,04$ pour le cumul total ; $R^2 = 0,01$ pour le cumul « agronomique » ; $R^2 = 0,23$ pour le cumul de présaison) et mettent en évidence l'absence de liens significatifs entre la date de démarrage de la saison et la pluviométrie annuelle, excluant ainsi une démarche de prévision saisonnière qui serait exclusivement fondée sur la connais-

sance de la date de démarrage de la saison.

Les coefficients de corrélation précédents sont calculés à partir de dates moyennes de démarrage. De même que pour l'analyse de la variabilité spatiale, on peut réaliser une étude plus systématique et plus fine en calculant la corrélation pour chacune des stations prises isolément (soit 12 valeurs pour chaque calcul). Ce calcul concerne les deux critères ponctuels (agronomique et hydrologique). Les coefficients

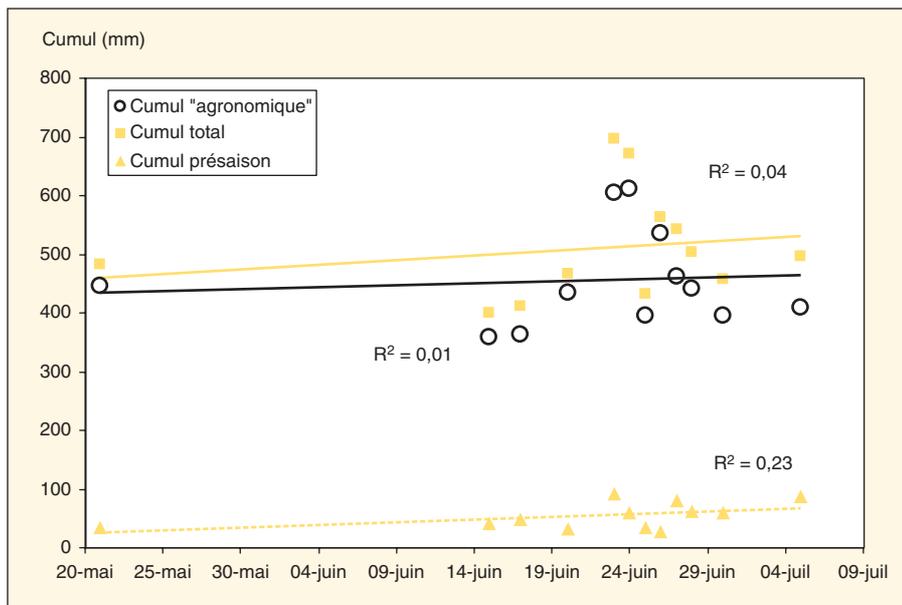


Figure 6. Date de démarrage agronomique moyenne annuelle (moyenne spatiale sur la zone EPSAT-Niger) et trois cumuls pluviométriques moyens enregistrés sur trois périodes différentes : saison entière, présaison, mousson établie (en mm).

de corrélation entre la date de démarrage et le cumul restent quasiment nuls.

En ce qui concerne l'utilisation de ces résultats pour la prévision saisonnière, il s'avère donc que le cumul annuel à venir ne peut être déduit uniquement de la date de démarrage de la saison des pluies. En revanche, on relève une forte corrélation entre la date de démarrage de la saison des pluies et la longueur de la saison, quel que soit le critère, ce qui est logique dans la mesure où la date de fin de saison est assez stable - plus la saison démarre tard, plus elle est courte ($R^2 = 0,78$; $0,81$; $0,59$, respectivement pour les critères agronomique, hydrologique et climatique). Ce résultat avait déjà été énoncé à partir de séries de données pluviométriques plus longues [4, 14] et permet d'élaborer des tactiques agricoles : si la saison démarre tard, il vaut mieux choisir des cultures ou des variétés à maturation plus rapide (mil à cycle constant de 90 jours ou moins, mil photopériodique).

Conclusion

Les dates de démarrage de la saison des pluies calculées ponctuellement (critères hydrologique et agronomique) sont très dispersées dans l'espace et dans le temps sur l'observatoire EPSAT-Niger. Suivant le critère choisi, la saison des pluies varie ainsi de 105 jours (critère agronomique) à 157 jours (critère hydrologique) sur la période 1990-2001. Cependant, en moyennant chaque année les dates de

démarrage agronomique sur la zone d'étude, on s'aperçoit qu'on peut définir le début d'une période assez stable où la mousson est bien établie et qui représente, en termes d'apports pluviométriques, 90 % du cumul saisonnier. Cette période débute la troisième décennie de juin - date coïncidant avec le « saut » de mousson - et s'achève fin septembre. On montre aussi que la connaissance de la date de démarrage de la saison des pluies ne renseigne en rien sur le cumul pluviométrique à venir ; en revanche, elle permet de prévoir la longueur de la saison des pluies, la fin de celle-ci étant moins variable.

En termes d'applications agronomiques, la possibilité de prévoir la longueur de la saison des pluies peut aider les agriculteurs dans le choix des variétés à semer pour minimiser les risques, par exemple en choisissant un mil à cycle plus court si la saison a démarré tardivement. Concernant le lien entre démarrage agronomique et « saut » de mousson, on pourrait imaginer une stratégie simple de semis lors du « saut » de mousson. Deux contraintes majeures apparaissent alors : la nécessité d'une prévision précoce du « saut » de mousson et « l'adaptation locale » de cette prévision, puisqu'on a établi qu'à une échelle fine la saison des pluies agronomique s'installe dans l'espace de manière chaotique, indépendamment de la position géographique, de la végétation et du caractère sec ou humide de l'année et qu'elle n'est pas conditionnée par l'installation de la saison hydro-

logique la précédant. On prévoit d'analyser plus en détail la conséquence d'un semis à la date moyenne du « saut » de mousson sur le rendement à l'aide du modèle agronomique SARRA-H [15], tout en ayant conscience que de multiples critères conditionnent celui-ci (pratiques paysannes, cycle d'azote). Avec ce même modèle, on pourra examiner l'influence de la distribution des pluies au cours de la saison, qui semble être cruciale pour le rendement, davantage que le seul cumul saisonnier.

Cette étude a été réalisée à partir des données EPSAT-Niger, seules disponibles pour étudier la variabilité aux échelles fines. Des travaux antérieurs, menés tant à partir des données des réseaux pluviométriques nationaux [11] que de données satellitaires [7], ont montré que la région de Niamey était bien représentative de la climatologie du Sahel central. On peut donc légitimement penser que les grandes tendances mises à jour sur cet observatoire sont valides pour le reste de la région. ■

Références

1. Food and Agriculture Organisation (FAO) ; International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT). *L'économie mondiale du sorgho et du mil : faits, tendances et perspectives*. Rome : FAO, 1997 : 68 p.
2. Loireau M. *Espaces, ressources, usages : spatialisation des interactions dynamiques entre les systèmes sociaux et les systèmes écologiques au Sahel nigérien*. Thèse de doctorat, université de Montpellier-III, 1998, 393 p.
3. Taylor CM, Lambin EF, Stephen N, Harding RJ, Essery RLH. The influence of land use change on climate in the Sahel. *J Clim* 2002 ; 15 : 3615-29.
4. Sivakumar MVK. Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agric For Meteorol* 1988 ; 42 : 295-305.
5. Lebel T, Taupin JD, Gréard M. Rainfall monitoring : The EPSAT-Niger setup and its use for HAPEX-Sahel. In : Lebel T, ed. *Hydrologie et Météorologie de Mésos-échelle dans HAPEX-SAHEL : dispositif de mesures au sol et premiers résultats*. Paris : Orstom éditions, 1995 : 31-68.
6. D'Amato N. *Étude climatologique et statistique des événements pluvieux en zone sahélienne, analysée à partir des données pluviographiques de l'expérience EPSAT-Niger*. Thèse de doctorat, université de Montpellier-II, 1998, 189 p. + ann.
7. Mathon V, Laurent H, Lebel T. Mesoscale convective system rainfall in the Sahel. *J Applied Meteor* 2002 ; 41 : 1081-92.
8. Stern RD, Dennett MD, Garbutt DJ. The start of the rains in West Africa. *Int J Climatol* 1981 ; 1 : 59-68.

9. Peugeot C. *Influence de l'encroûtement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un versant sahélien*. Thèse de doctorat, université de Grenoble, 1995, 305 p. + ann.
10. Sultan B, Janicot S. Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability. *Geophys Res Lett* 2000 ; 27 : 3353-6.
11. Le Barbé L, Lebel T, Tapsoba D. Rainfall variability in West Africa during the years 1950-1990. *J Clim* 2002 ; 15 : 187-202.
12. Sultan B. *Étude de la mise en place de la mousson en Afrique de l'Ouest et de la variabilité intra-saisonnière de la convection. Applications à la sensibilité des rendements agricoles*. Thèse de doctorat, université Paris-VII, 2002, 283 p.
13. Milleville P. Conduite des cultures pluviales et organisation du travail en Afrique soudano-sahélienne : des déterminants climatiques aux rapports sociaux de production. In : Biarnès A, ed. *La conduite du champ cultivé : points de vue d'agronomes*. Paris : Orstom éditions, 1998 : 165-80.
14. Diop M. À propos de la durée de la saison des pluies au Sénégal. *Sécheresse* 1996 ; 7 : 7-15.
15. Baron C, Reyniers F, Clopes A, Forest F. Applications du logiciel SARRA à l'étude de risques climatiques. *Agric Dev* 1999 ; 24 : 89-97.