

Abdou Ali^{1,2}
Thierry Lebel³
Abou Amani⁴

¹ Institut de recherche pour le développement (IRD)/Centre régional AGRHYMET
BP 5040
Niamey
Niger

² Laboratoire de météorologie dynamique
École Polytechnique
Route de Saclay
91128 Palaiseau cedex
France

<a.ali@agrhyet.ne>

³ Institut de recherche pour le développement (IRD)

Avenue de Maradi
BP 11416
Niamey
Niger

<thierry.lebel@hmg.inpg.fr>

⁴ UNESCO - Accra Office

PO BOX CT 4949
Nortei Ababio Street 32
Airport Residential Area
Accra
Ghana

<a.amani@unesco.org>

Signification et usage de l'indice pluviométrique au Sahel

Résumé

Pour diagnostiquer si une année est pluvieuse ou sèche au Sahel, l'indice de pluie standardisé (IPS) est couramment utilisé. Cependant, compte tenu de la forte variabilité spatiale de la pluie dans cette région, plusieurs points d'ordre méthodologique méritent d'être clarifiés pour prétendre pouvoir caractériser de manière pertinente la saison des pluies à travers cet indice. Dans cette optique, la présente contribution fournit des éléments de réponse aux trois questions majeures suivantes : i) les réseaux pluviométriques opérationnels des pays sahéliens, compte tenu de la faiblesse de leur densité, permettent-ils de détecter de façon significative les fluctuations de la pluie interannuelle ? La réponse est *oui* ; ii) est-il pertinent d'utiliser l'IPS calculé globalement sur tout le Sahel pour caractériser la saison des pluies, sachant que, dans son ensemble, le Sahel ne peut pas être considéré comme une région homogène en termes de variabilité interannuelle de la pluie ? La réponse est *non* ; iii) trois sous-régions sont identifiées (Sahel Est, Ouest et Centre), et il apparaît que, en particulier depuis 1990, la corrélation entre les IPS du Sahel Est et Sahel Ouest est très faible, montrant ainsi que la valeur globale de l'indice n'a, en elle-même, qu'une signification limitée. Tenant compte de ce résultat, comment utiliser une valeur globale de l'IPS de manière pertinente ? On propose ici une réponse probabiliste : en étudiant la variabilité des IPS locaux calculés sur des mailles de $0,5 \times 0,5$ degré, un modèle qui permet de quantifier la proportion des zones humides ou sèches en fonction de la valeur globale de l'indice est proposé. Un résultat dérivé de cette étude méthodologique a une portée climatologique : en étudiant le comportement des IPS des trois régions, il est montré que la période récente (1990-2006) est caractérisée par une variabilité spatiale et une variabilité interannuelle plus fortes que celles des deux périodes précédentes, 1950-1969, globalement humide, et 1970-1989, globalement sèche.

Mots clés : indice de pluie, modélisation probabiliste, Sahel, sécheresse, variabilité spatiale.

Abstract

Signification and use of the rainfall index in the Sahel

The Standardized Precipitation Index (SPI) is commonly used to determine whether the Sahelian region can be considered as wet or dry for a given year. There are however several methodological points worth examining to assess the pertinence of using such a global index for characterising the rainy season in a region where the spatial variability of rainfall is large. Three such major points are addressed in this study: i) do the operational networks make it possible to compute interannual rainfall anomalies with reasonable accuracy? The answer is yes. ii) The Sahel cannot be considered as a homogeneous region in terms of interannual rainfall variability. As a consequence, is it pertinent to use a unique SPI for the whole Sahel? The answer is no: three sub-regions (West, Central, East) are identified and it is shown that, especially since 1990, the West and East SPI are not strongly correlated, meaning that computing a global SPI for the whole Sahel does not make sense every year. iii) Given this result, what usage can be made of the SPI? By studying the spatial

variability of the SPI computed at the local scale of a 0.5°x 0.5° grid mesh, a probabilistic model is proposed making it possible to compute the expected proportion of the Sahel where the SPI is below or above any threshold for a given value of the regional index.

Key words: drought, probabilistic approach, rainfall index, Sahel, spatial variability.

La forte variabilité interannuelle qui caractérise la pluie au Sahel et la grande dépendance de l'économie des pays de la sous-région à cette variabilité ont généré de nombreuses recherches sur la caractérisation de la saison des pluies dans cette partie du monde.

Pour déterminer le caractère humide ou sec de la saison, l'indice pluviométrique standardisé (IPS) est généralement utilisé. Cet indice, appelé *Standardized Precipitation Index* dans la littérature anglo-saxonne, est une moyenne des cumuls pluviométriques saisonniers centrés et réduits calculés en chaque station disponible pour une saison donnée. Il a vocation à indiquer à lui seul si la saison peut être qualifiée d'excédentaire (IPS > 0) ou de déficitaire (IPS < 0). La simplicité du calcul et de l'interprétation proposée fait de l'IPS un indice très populaire. Cette simplicité est obtenue au détriment de la prise en compte de plusieurs facteurs pourtant essentiels à une caractérisation pertinente de la saison des pluies. Parmi ces facteurs, les plus importants sont : la variabilité spatiale de la pluie, la méthode de calcul et le réseau de mesure utilisés, la période de référence considérée, la taille et la situation géographique de la zone d'étude. Bien que l'influence potentielle de ces divers facteurs ait fait l'objet de quelques travaux [1-3], on retrouve dans la littérature peu d'analyses approfondies et systématiques quantifiant leur influence sur le calcul de l'IPS et son interprétation. Les ambiguïtés qui en résultent ont ainsi été la cause de deux séries de polémique récentes. D'une part, Ozer *et al.* [4] remettaient en cause les conclusions de L'Hôte *et al.* [5] sur la continuité de la sécheresse au Sahel, arguant du manque de robustesse de leur analyse. D'autre part, Dai *et al.* [6] déniaient toute valeur à l'étude de Chappell et Agnew [7] qui prétendait que la dérive pluviométrique constatée pour ces 30 dernières années au Sahel n'était qu'un artefact provenant des données utilisées. Le propos de cet article est donc de contribuer à clarifier l'utilité et la signification de l'indice pluviométrique standardisé et les précautions à prendre pour son interprétation. Cinq questions fondamentales sont à considérer pour évaluer la signification et la robustesse de l'ISP :

- La méthode de calcul de l'indice a-t-elle une forte influence sur le résultat ?
- Les anomalies interannuelles de la pluie calculées à partir des réseaux opérationnels des pays du Sahel sont-elles significatives eu égard à la faiblesse de la densité de ces réseaux ?
- Une valeur globale de l'indice calculée sur toute la région a-t-elle un sens, compte tenu, par exemple, du comportement climatologique de plus en plus contrasté entre la partie Est et Ouest de la région ?
- Comment interpréter de manière objective une valeur moyenne de l'indice, du fait de la forte variabilité spatiale de la pluie au Sahel ?
- De la même manière, comment interpréter un indice qui ne prend pas en compte la répartition des pluies au cours de la saison, alors que cette répartition est parfois aussi importante que le cumul total lui-même pour évaluer l'impact sur les cultures ? Cette dernière question dépasse le propos de cet article et ne sera pas traitée ici.

Calcul de l'indice et données utilisées

Calcul de l'indice pluviométrique standardisé

Traditionnellement, l'indice est calculé de la manière suivante :

$$(i_R)^* = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \frac{P_j^i - \bar{P}_j}{\sigma_j} \quad 1(a)$$

où P_j^i est la pluie de l'année i à la station j , \bar{P}_j la pluie moyenne interannuelle de la station j , σ_j l'écart-type de la série des cumuls saisonniers à la station j , et N_i le nombre de stations de l'année i . Cette méthode ne fait aucun cas des disparités d'échantillonnage spatial résultant de la distribution irrégulière des stations. Afin de minimiser l'effet de ces disparités, on propose ici une nouvelle manière de calculer l'indice :

$$(i_R)^* = \frac{P_R^i - \bar{P}_R}{\sigma_R} \quad 1(b)$$

où $(i_R)^*$ est l'indice pluviométrique régional d'une année i , P_R^i la pluie moyenne régionale de l'année i , \bar{P}_R la moyenne interannuelle de la pluie régionale, σ_R l'écart-type de la pluie régionale \bar{P}_R . Dans cette approche, la pluie régionale est calculée par *krigeage* selon la méthode présentée dans Ali *et al.* [8]. Le *krigeage* est un estimateur linéaire sans biais qui prend en compte la distribution spatiale irrégulière des stations dans son calcul de pondération ; de ce fait, les effets résultant de cette distribution irrégulière sont fortement atténués dans le calcul de $(i_R)^*$ qui servira donc d'indice de référence dans notre étude.

Données utilisées

Pour des raisons pratiques d'accès aux données, l'espace sahélien sera assimilé ici à l'espace géographique couvert par les 9 pays du CILSS (comité inter-états de lutte contre la sécheresse au Sahel). Les services météorologiques de ces pays fournissent leurs données au centre régional AGRHYMET (agronomie-hydrologie-météorologie) et ce sont ces données qui seront utilisées ici. La couverture des réseaux pluviométriques étant très faible dans le Nord du Sahel (*figure 1*), l'étude se limitera plus précisément à la zone comprise entre les longitudes 17,5°E et 22,5°O et entre les latitudes 10°N et 17,5°N. Le réseau total, dénommé CILSS, compte en moyenne 600 stations par an. Le sous-réseau formé des stations synoptiques, dénommé SYNOP, compte 80 stations en moyenne. Une description plus complète de la base de données du centre AGRHYMET peut être trouvée dans Ali *et al.* [8]. Les données utilisées dans ce travail couvrent la période de référence 1950-2006. Des données antérieures à 1950 existent mais le nombre de stations de cette période est parfois très faible (moins de 30 stations sur toute la zone pour certaines années) et, pour des raisons de robustesse et d'homogénéité, nous avons préféré limiter cette étude à la période postérieure à 1950.

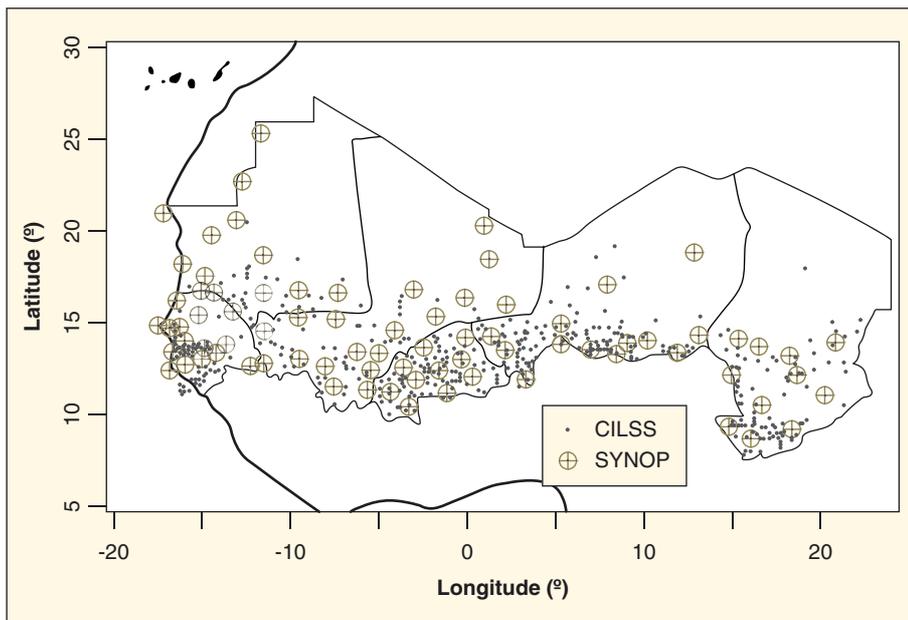


Figure 1. Stations pluviométriques du réseau CILSS et SYNOP.
Le réseau CILSS comprend en moyenne 600 stations, et le SYNOP 80 stations.

Sensibilité de l'indice à la densité du réseau

Les trois questions traitées ici sont les suivantes :

- Est-ce que les anomalies de la pluie interannuelle au Sahel, calculées à partir des réseaux nationaux, sont significatives ?
- Est-ce que l'indice calculé à partir du réseau synoptique est significativement différent de celui calculé à partir du réseau total, compte tenu que la communauté scientifique internationale n'a souvent accès qu'au réseau synoptique ?
- Quelle est, de façon générale, la sensibilité de l'indice à la densité du réseau ?

Signification des anomalies de la pluie annuelle

Il s'agit ici de comparer l'incertitude associée à l'estimation de la pluie moyenne spatiale régionale P_R^i à partir du réseau CILSS à l'anomalie pluviométrique de l'année i . L'anomalie d'une année i est l'écart entre la pluie P_R^i de l'année et la pluie moyenne interannuelle (\bar{P}_R) calculée sur la période de référence considérée qui, dans la présente étude, va de 1950 à 2006. Pour effectuer cette comparaison, il convient de calculer de manière objective l'incertitude associée à l'estimation de la pluie moyenne spatiale à l'échelle de la région d'étude. Il n'existe guère, dans la littérature, de travail traitant du calcul d'erreur associée à la pluie moyenne sur le

valeurs naturelles en mm - l'écart-type de *krigeage* fournit alors directement l'incertitude recherchée - ; les valeurs normées (l'IPS étant alors l'anomalie, et l'incertitude l'écart-type de *krigeage* normé par l'écart-type de P_R^i). On remarque que la plupart des anomalies positives de la période 1950-1968 et des anomalies négatives de la période 1971-1990 sont supérieures à l'écart-type de *krigeage*. Ces anomalies peuvent donc être considérées comme significatives et les tendances sèches et humides de ces deux grandes périodes ne sont pas un artefact résultant des incertitudes associées à l'estimation de la pluie annuelle régionale. Pour autant, il est intéressant de noter que pour 14 années sur 57, l'anomalie de l'indice est inférieure à l'écart-type d'estimation, ce qui signifie que pour ces années, la caractérisation humide/sèche est incertaine. La *figure 2* montre que l'écart-type d'estimation de la pluie moyenne régionale varie de 45 mm pour le début de la période étudiée à 42 mm pour la période en cours, ce qui reflète l'amélioration de la couverture du réseau pluviométrique (avec une valeur moyenne sur la période de 43 mm). On peut donc considérer en première approximation que les valeurs significatives des anomalies se situent à l'extérieur de l'intervalle [- 43 mm ; 43 mm], ce qui correspond à l'intervalle IPS [- 0,5 ; 0,5]. Par la suite, on considérera donc qu'un IPS inférieur à - 0,5 (resp. supérieur à 0,5)¹ peut

¹ resp : respectivement.

Sahel. L'utilisation du *krigeage* des résidus [8] pour calculer P_R^i va permettre une évaluation objective de l'erreur moyenne d'estimation, qui est assimilable à l'incertitude d'estimation. En effet, le *krigeage* fournit un écart type associé à la valeur estimée qui représente la dispersion de la vraie valeur, mais inconnue, de la pluie régionale autour de la valeur estimée. Les résultats de la comparaison sont montrés en *figure 2* en utilisant deux métriques : les

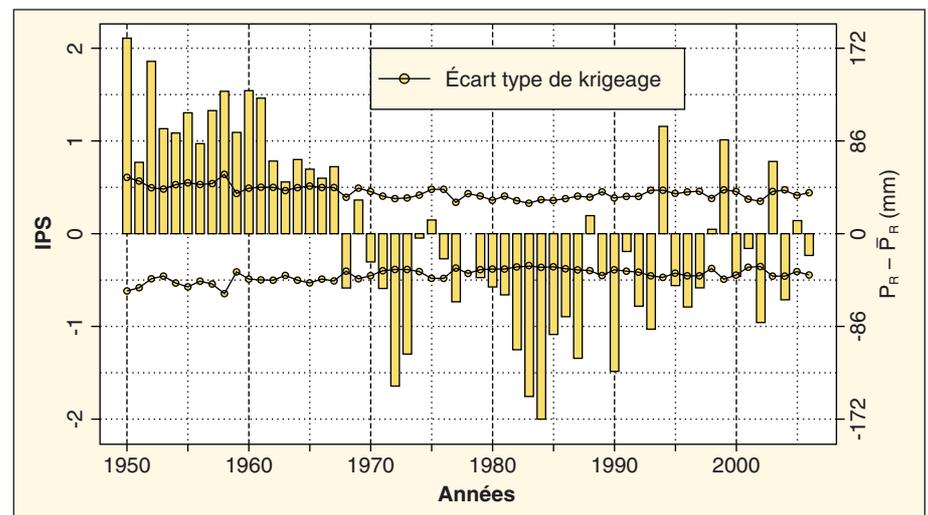


Figure 2. Comparaison entre l'indice pluviométrique standardisé (IPS) et l'écart-type de *krigeage* calculé à partir du réseau CILSS et normé par l'écart-type de la pluie annuelle régionale (σ_R) sur l'axe des ordonnées à gauche.

La correspondance de cette comparaison entre l'écart-type de *krigeage* (en mm) et l'écart brut (en mm) de la pluie annuelle régionale P_R à la moyenne 1950-2006 (\bar{P}_R) est donnée par l'axe des ordonnées à droite. L'écart-type de *krigeage* fournit l'incertitude de l'IPS quand il est normé, et non normé, il fournit celle de $P_R - \bar{P}_R$.

être considéré comme significatif des années sèches (resp. humides) ; la notion de significativité renvoie ici à celle d'incertitude d'estimation et non pas à un quelconque seuil de probabilité d'apparition des années sèches ou humides.

Évaluation de l'indice calculé à partir du réseau SYNOP

Pour savoir si le réseau SYNOP permet de calculer assez correctement l'IPS, nous comparons dans ce paragraphe l'indice calculé à partir du réseau SYNOP à celui calculé à partir du réseau total. La figure 3 montre la co-fluctuation entre les deux indices. Leur similitude est bonne. Le coefficient de détermination R^2 est de 0,98. Ce résultat s'explique par la robustesse de la méthode de calcul de l'IPS utilisée dans ce travail. Cette robustesse découle de celle du calcul de la pluie moyenne régionale par la méthode de *krigeage*. Si l'IPS est calculé par la méthode traditionnelle (équation 1a), le coefficient de détermination R^2 avec l'indice de référence est de 0,95. Globalement, la variabilité interannuelle est donc bien captée par un IPS calculé à partir du réseau SYNOP même en cas d'utilisation de l'équation 1a.

Quantification de la sensibilité en fonction du nombre de stations

Nous allons examiner de manière plus générale la sensibilité de l'IPS à la densité du réseau. L'indice $(I_R)^*$ calculé à partir du réseau total est toujours l'indice de référence. Nous effectuons ensuite des tirages aléatoires dans le réseau complet pour simuler des sous-réseaux de N stations, N

variant de 10 à 270 par pas de 10. Pour un nombre donné de stations, 50 tirages aléatoires sont effectués, produisant ainsi à chaque fois 50 réseaux différents de N stations. Les corrélations de la figure 4 entre les indices calculés à partir des sous-réseaux obtenus par ces tirages et l'indice de référence représentent, pour un nombre de stations donné N , la moyenne des corrélations issues des 50 tirages. Le pourcentage de variabilité de l'indice de référence expliqué par les indices calculés à partir des sous-réseaux varie de 97 à 78 % (R^2). La variance expliquée par des

réseaux équivalents au réseau synoptique complet (80 stations) est en moyenne de 94 % avec un maximum de 98 % et un minimum de 93 %. Pour des réseaux de 20 stations, qui est à peu près le nombre de stations utilisées par L'Hôte *et al.* [5], environ 87 % de la variance est expliquée, ce qui tend à accorder une certaine crédibilité à leurs conclusions, du moins en ce qui concerne le Sahel pris globalement.

Un indice global sur tout le Sahel a-t-il un sens ?

Des études récentes ([9] par exemple) montrent qu'au Sahel la dernière décennie est caractérisée par un maintien des conditions sèches dans la partie Ouest et un retour à des conditions plus pluvieuses dans la partie Est. On va donc considérer ici trois zones, délimitées de manière à obtenir un maximum de contraste entre les zones (c'est-à-dire en minimisant la corrélation entre les séries d'IPS calculés sur les zones moyennes). La limite entre le Sahel Ouest et le Sahel central se situe à la longitude 11°O, tandis que la limite entre le Sahel Est et le Sahel central se situe à la longitude 15°E.

Les indices calculés sur les différentes parties du Sahel montrent une fréquence plus importante d'opposition du signe des indices entre le Sahel Est et Ouest pour la dernière décennie (figure 5). Cette tendance à un comportement de plus en plus différent entre le Sahel Est et le Sahel Ouest n'est pas due au réseau de stations car, comme on l'a vu plus haut, le réseau

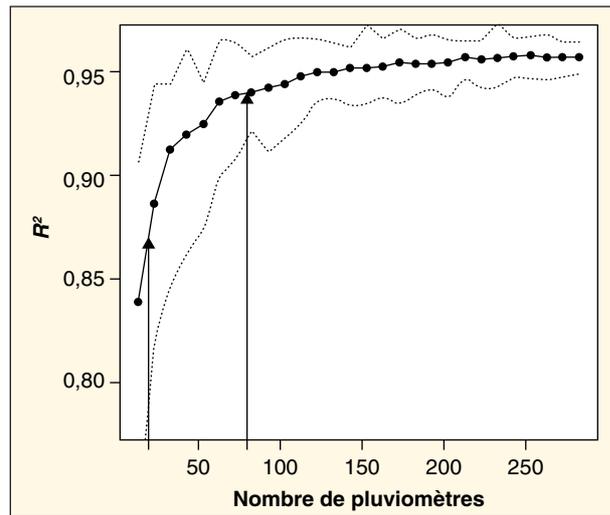


Figure 4. Corrélation entre l'indice de référence obtenu en utilisant toutes les stations (600 en moyenne) et les indices calculés à partir des sous-réseaux obtenus, du réseau total, par tirage aléatoire de N stations.

Pour chaque nombre de N stations, on effectue 50 tirages de ces stations. La valeur du coefficient de détermination R^2 correspondant à N est la moyenne issue des 50 tirages. Les pointillés indiquent l'enveloppe des valeurs maximum et minimum de R^2 . Les deux flèches indiquent les R^2 pour 20 et 80 stations.

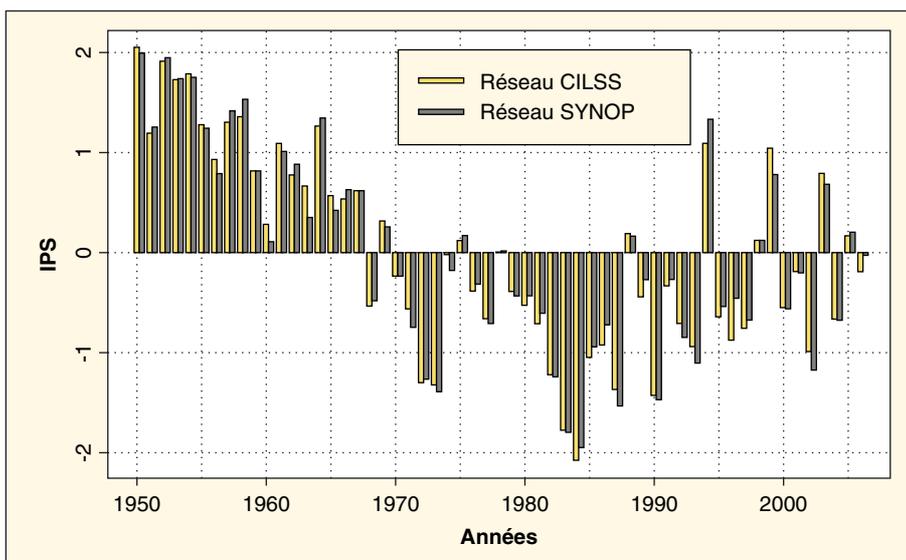


Figure 3. Comparaison des indices de pluie calculés à partir du réseau CILSS et SYNOP par l'équation régionalisée 1b.

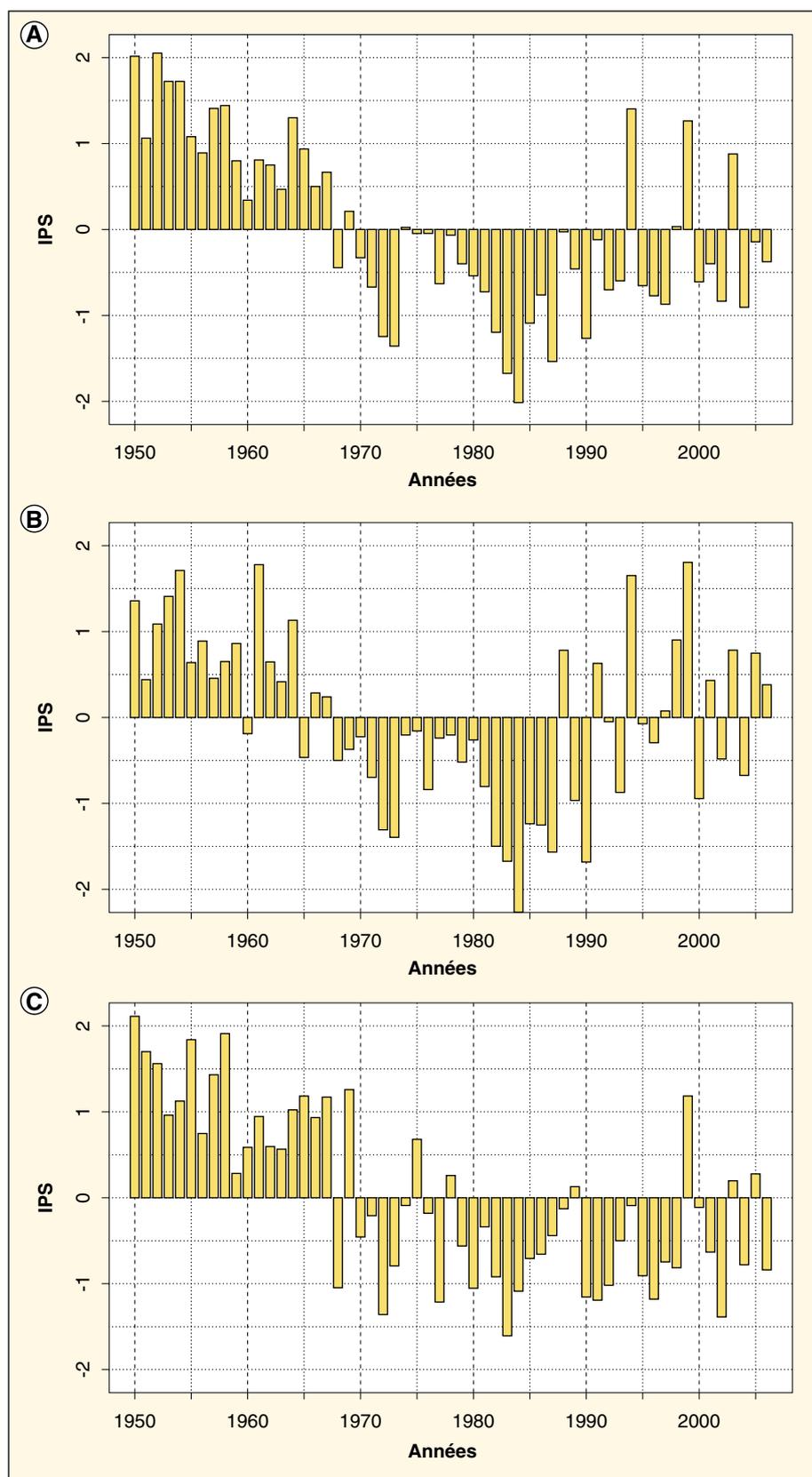


Figure 5. Indices pluviométriques sur la période 1950-2006 pour les zones Centre (A), Est (B), et Ouest (C).
La limite entre les zones Ouest et Centre se situe à 11° Ouest et la limite entre les zones Est et Centre se situe à 15° Est.

existant est assez robuste pour calculer de façon significative l'indice de pluie. Cette différence de comportement est particulièrement marquée à partir de 1993. Sur les 13 années qui vont de 1994 à 2006, le Sahel central a enregistré trois années très pluvieuses (1994, 1999, 2003), alors que le Sahel Ouest n'a enregistré qu'une année pluvieuse (1999) et deux années moyennement humides (2003 et 2005) et le Sahel Est sept années de très bonne pluviométrie. L'année 1998 a été très pluvieuse au Sahel Est mais très sèche au Sahel Ouest. De même, 2006 a été une année pluvieuse sur le Sahel Est, mais sèche sur le Sahel Ouest. Ces chiffres signifient que, sur cette période, la probabilité que les Sahel Est et Ouest se situent dans la même catégorie de pluviosité (telle que définie à partir de l'IPS) est inférieure à 25 %. Il semble qu'il serait donc plus judicieux de calculer trois indices séparés pour chacune de ces zones pour mieux appréhender la réalité pluviométrique sahélienne. Les différentes recherches qui anticipent sur la fin ou non de la sécheresse au Sahel doivent tenir compte de ces différences entre les Sahel Est et Ouest et, en ce sens, les critiques de Ozer *et al.* [4] sur le travail de L'Hôte *et al.* [5] ne sont pas dénuées de fondement (même si ce point spécifique n'était en fait pas mentionné). Il faut également noter qu'un autre mode de variabilité interannuelle semble s'instaurer durant la période 1994-2006 où les années sèches et les années humides alternent, en contraste avec la persistance des années humides de la période d'avant 1970 et de celle des années sèches de la période 1970-1993.

Variabilité spatiale de l'IPS et implications pour son usage

Pour analyser la variabilité spatiale de l'IPS, nous partons du postulat qu'il est acceptable de considérer une surface de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ (soit environ $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$) comme humide ou sèche sans s'occuper de la variabilité à l'intérieur de celle-ci (cela résulte notamment des fonctions de structure spatiale identifiées par notre équipe [8], qui montrent une forte corrélation spatiale du cumul saisonnier pour des distances inférieures à 50 km). L'analyse de la variabilité spatiale de l'IPS sur la zone d'étude se fait en conséquence ici à travers celle des IPS calculés sur chacune de ces mailles élémentaires de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$.

Variabilité spatiale de l'indice pluviométrique

La figure 6 représente la variabilité spatiale des valeurs des indices calculés sur

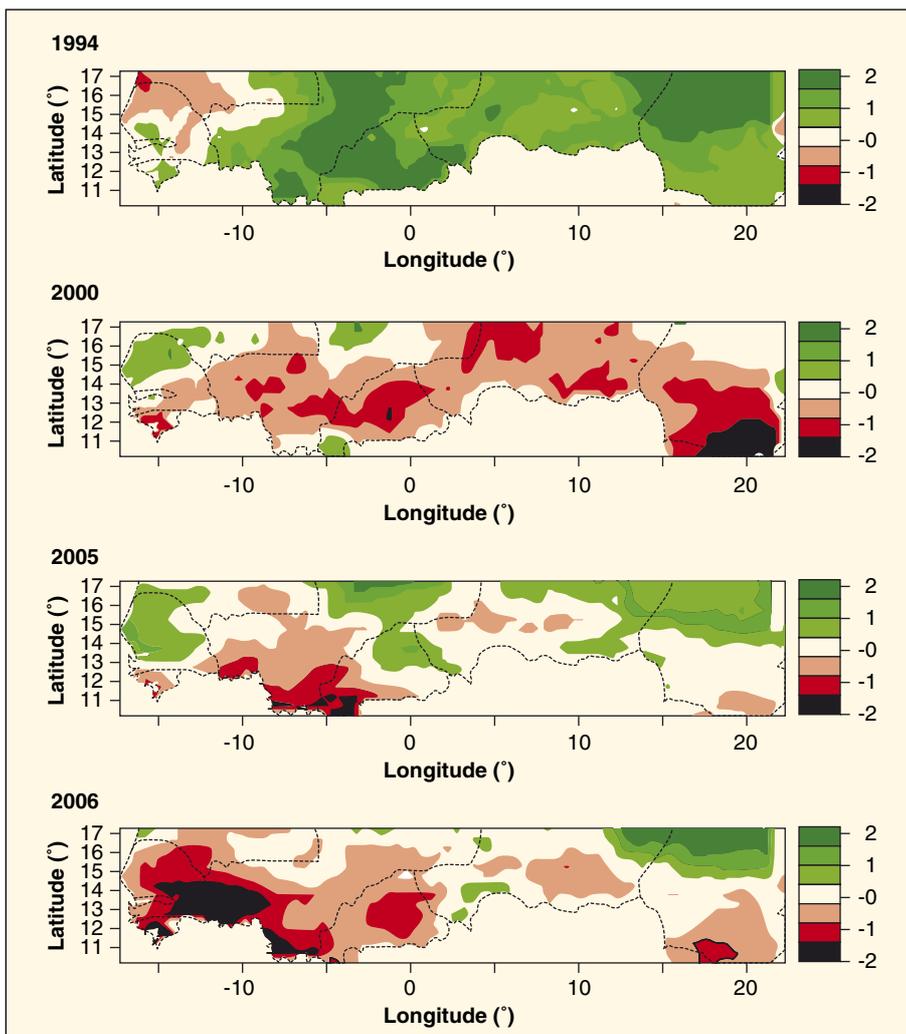


Figure 6. Répartition spatiale de l'indice pluviométrique standardisé (IPS) calculé sur des pixels de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ pour une année très humide (1994, IPS régional = 1,23), une année très sèche (2000, IPS = -0,68) et les deux années les plus récentes de pluviométrie modérément excédentaire (2005, IPS = 0,21) et modérément déficitaire (2006, IPS = -0,13) à l'échelle de l'ensemble de la région.

des mailles de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ pour deux années fortement humides (1994, IPS régional de 1,23) d'une part, et fortement sèches (2000, IPS régional de -0,68) d'autre part, et pour les deux années les plus récentes, 2005 et 2006, dont les indices régionaux sont respectivement modérément positifs (0,21) et négatifs (-0,13).

On voit que même en années extrêmes, humide ou sèche, on trouve des zones dont la pluviométrie est en opposition à la valeur régionale, soit significativement déficitaire, soit significativement excédentaire. En ce qui concerne les deux années récentes, de pluviométrie moyenne régionale proche de la moyenne, on voit que toutes deux sont caractérisées par l'existence de poches de déficit extrême (IPS local proche de -2) ou d'excédent extrême (IPS local proche de 2). Ces zones sèches et

humides sont structurées dans l'espace, ce qui ouvre des perspectives pour une prévision saisonnière probabiliste.

Après ces exemples illustrant la variabilité spatiale à l'échelle annuelle, nous allons maintenant analyser la variabilité spatiale des moyennes interannuelles de l'IPS. Pour chaque pixel, le pourcentage du nombre de fois où l'IPS est supérieur ou inférieur à certaines valeurs seuils est calculé sur plusieurs années. Ces seuils α sont : 0 ; $\pm 0,25$; $\pm 0,5$; $\pm 0,75$; ± 1 ; ± 2 .

Le nombre d'années caractérisées par un IPS négatif sur la période totale 1950-2006 quand on considère toute la zone CLSS est de 53 %. À l'échelle du pixel de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, ce pourcentage varie entre 40 et 70 %. La zone de haute fréquence d'IPS négatif se trouve dans la partie Nord et Centre du Niger et du Tchad. Sur la période humide 1950-1969, la variabilité

spatiale de l'indice a été faible et la probabilité d'avoir un IPS inférieur à zéro a varié entre 0 et 20 % sur la majeure partie de la zone d'étude (plus de 90 %). Le Sahel Ouest est la zone la plus humide avec 0 % de mailles sèches sur ces vingt années. Sur la période sèche 1970-1989, le pourcentage d'années sèches (IPS < 0) a varié de 95 % pour les zones les plus sèches à 55 % pour les moins sèches. Pour ce qui est de la période récente 1990-2006, le nombre d'années d'IPS négatif représente 65 % (11 sur 17). La variabilité spatiale de ce pourcentage est particulièrement forte pour cette dernière période : elle va de 90 à 30 %. On observe également un déplacement de la zone de très haute fréquence d'années sèches du Sahel Centre et Est vers le Sahel Ouest. Cette observation est conforme à celle faite sur les isohyètes des pluies moyennes calculées pour ces différentes périodes. Pour la décennie 1990-2006, les isohyètes moyennes sont plus au Sud dans la partie Ouest du Sahel que les isohyètes de la moyenne à long terme 1950-2006, alors que dans les parties centrales et Est, elles coïncident avec celles de 1950-2006. Ainsi, le Sahel Ouest, qui était la zone la plus humide de la période humide 1950-1969, est devenu la zone la plus sèche de la période 1990-2006.

Variabilité spatiale de la sévérité de la sécheresse

En construisant des cartes annuelles de l'IPS calculé à la résolution de $0,5^\circ$ (cartes que l'on moyenne ensuite sur la période 1970-2006), on peut visualiser comment s'est distribuée la sécheresse dans l'espace au cours de cette période globalement déficitaire. Alors que le pourcentage d'années significativement sèches (IPS régional inférieur à -0,5) a été de 45 %, ce pourcentage varie de 30 à 70 % sur la zone d'étude, avec 80 % des mailles qui présentent un pourcentage compris entre 35 et 60 %. La distribution spatiale est relativement homogène comme le montre la figure 7, les zones de fréquence d'IPS supérieure à la valeur régionale de 45 % alternant avec des zones de fréquence inférieure lorsque l'on se déplace d'est en ouest. Le pourcentage d'années sévèrement sèches (IPS inférieur à -1) présente en revanche une distribution spatiale plus fragmentée. La fréquence de telles années pour l'indice régional a été d'environ 20 % mais, à l'échelle de la maille de $0,5 \times 0,5^\circ$, cette proportion varie de 0 à 40 %. Cela signifie que malgré le caractère généralisé et globalement sévère de la sécheresse, certaines zones n'ont connu aucune année de sécheresse sévère, alors que d'autres en ont connu 15 sur cette période de 37 ans. C'est le Sahel Ouest

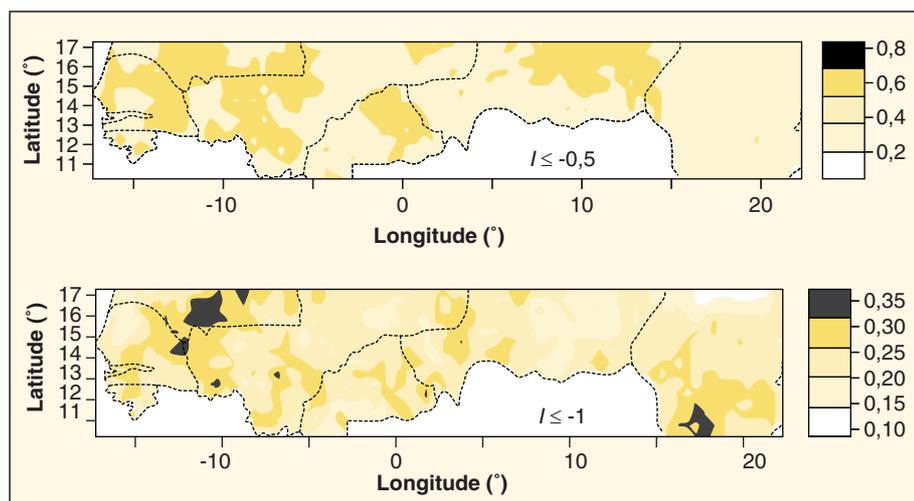


Figure 7. Répartition spatiale du pourcentage d'occurrence des sécheresses d'IPS inférieur ou égal à -0,5 et à -1 pour la période 1970-2006.

qui présente la plus grande proportion de telles années, dont beaucoup se sont produites au cours des quinze dernières années. Les grands traits de ces deux cartes de la figure 7 résultent du contraste entre les deux sous-périodes 1970-1989 et 1990-2006, tels qu'analysés dans la sous-section précédente : la première a été globalement et continuellement sèche sur toute la sous-région, alors que la seconde a été beaucoup plus hétérogène spatialement et caractérisée par l'occurrence de sécheresses localement très sévères sur l'Ouest Sahel.

Usage de l'IPS

Vue la forte variabilité spatiale de l'indice, il est clair qu'un IPS positif ou négatif calculé sur une grande zone ne signifie pas que toute la zone est humide ou sèche. Plus qu'une valeur globale sur une zone, ce qui est pertinent pour l'utilisateur, ce sont donc les distributions des valeurs d'IPS local, conditionnellement à la valeur de l'IPS régional. Les distributions empiriques ont été calculées en comptant le nombre des mailles de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ pour lesquelles les indices sont supérieurs aux différents seuils α choisis dans la sous-section consacrée à la variabilité spatiale de l'indice pluviométrique et ce, pour chaque année et donc pour 57 valeurs différentes de l'indice régional.

Les distributions ainsi obtenues permettent d'estimer, en fonction de la valeur de l'indice régional I_R , le pourcentage de superficies sèches ou humides (à un certain seuil α) et donc de mieux caractériser la sévérité de la sécheresse. La figure 8 montre les distributions ainsi obtenues pour quelques seuils α caractéristiques : $0; \pm 0,5; \pm 1; \pm 2$. Ces distributions empiriques ont été représentées à l'aide

d'un modèle non paramétrique, les essais effectués pour ajuster des modèles paramétriques classiques ayant conduit à de fortes sur-paramétrisations liées à la complexité des formes des courbes empiriques.

La forme du modèle non paramétrique est donnée par l'équation suivante :

$$F_\alpha(I_R) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K\left[\frac{(I_R - I_{Ri})/\varphi_\alpha}{\varphi_\alpha}\right] \quad (3)$$

où F_α est la proportion des mailles dont l'IPS est supérieur (resp. inférieur) à la valeur α

et $K(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp[-z^2/2]$ le noyau de

densité normale du modèle ; N est le nombre de valeurs de I_R constituant l'échantillon (soit 57), I_{Ri} les différents indices de l'échantillon et φ_α la largeur de bande du lissage [10]. La figure 8 montre que les modèles s'ajustent bien aux observations. Les deux derniers graphiques de la figure 8 sont des abaques constitués en compilant sur un même graphique les courbes calculées pour les seuils positifs d'une part, et pour les seuils négatifs d'autre part. On peut ainsi déterminer, par interpolation entre les courbes, la proportion moyenne de mailles dont l'IPS local est supérieur (resp. inférieur) à un seuil donné α . Ainsi, on voit que lorsque l'IPS régional est égal à 0, il faut s'attendre à avoir 3 % de mailles sévèrement sèches ($IPS < -1$), 22 % de mailles significativement sèches ($IPS < -0,5$) et 38 % de mailles modérément sèches ($IPS < -0,25$). Ces proportions passent respectivement à 17 %, 42 % et 65 % pour un indice régional de -0,5. Ces abaques constituent donc

un outil opérationnel pour les organismes chargés du suivi de la saison des pluies et de la prise de décision en cas de sécheresse détectée régionalement.

Discussion et conclusion

Cet article aborde de manière exhaustive plusieurs questions relatives à l'utilisation de l'indice pluviométrique standardisé (IPS), comme outil d'analyse du caractère humide ou sec de la saison des pluies à l'échelle du Sahel. La forte variabilité spatiale de la pluie au Sahel, l'inégale densité des réseaux nationaux, le comportement climatologique différent entre le Sahel Est et le Sahel Ouest sont autant de facteurs qui ont motivé une analyse approfondie de la sensibilité et de la signification d'un IPS calculé globalement à l'échelle de tout le Sahel. Cette analyse débouche sur les conclusions suivantes :

- l'IPS calculé à l'échelle régionale du Sahel est assez peu sensible à la densité du réseau dès lors que le nombre de stations disponible reste supérieur à 40 (90 % de la variance expliquée par rapport à l'indice calculé avec un réseau complet de 600 stations) ;
- ce premier point étant acquis, on s'est interrogé sur la signification à donner à un IPS calculé globalement à l'échelle de tout le Sahel. Pour répondre à cette question, on a distingué trois régions Ouest, centrale et Est, séparées par les longitudes 11°O et 15°E . L'IPS calculé sur chacune de ces trois régions montre, sur les quinze dernières années, un Sahel Est avec une fréquence plus importante d'années humides et un Sahel Ouest marqué par une fréquence plus importante d'années sèches. Sur l'ensemble de nos 57 années d'étude, le R^2 entre le Sahel Est et le Sahel Ouest est de 50 %. Si on considère uniquement les quatorze années de la période 1993-2006, cette valeur s'abaisse à 25 %. Cela remet clairement en cause la pertinence de l'utilisation d'un indice global calculé sur tout le Sahel ;
- au-delà même de cette première stratification en trois grandes régions, on a étudié la variabilité spatiale de l'indice à une échelle plus fine. Alors que, sur la période 1950-2006, 39 % des années sont significativement sèches ($IPS \leq -0,5$) lorsque l'on considère l'indice régional, ce pourcentage varie entre 25 et 75 % à l'échelle du pixel de $0,5 \times 0,5^\circ$. La période 1990-2006 montre une variabilité spatiale encore plus forte : 8 de ces 17 années (ou 47 %) ont un IPS régional inférieur à -0,5, mais ce nombre varie spatialement de deux années (12 %) à seize années (94 %). Outre cette plus forte variabilité

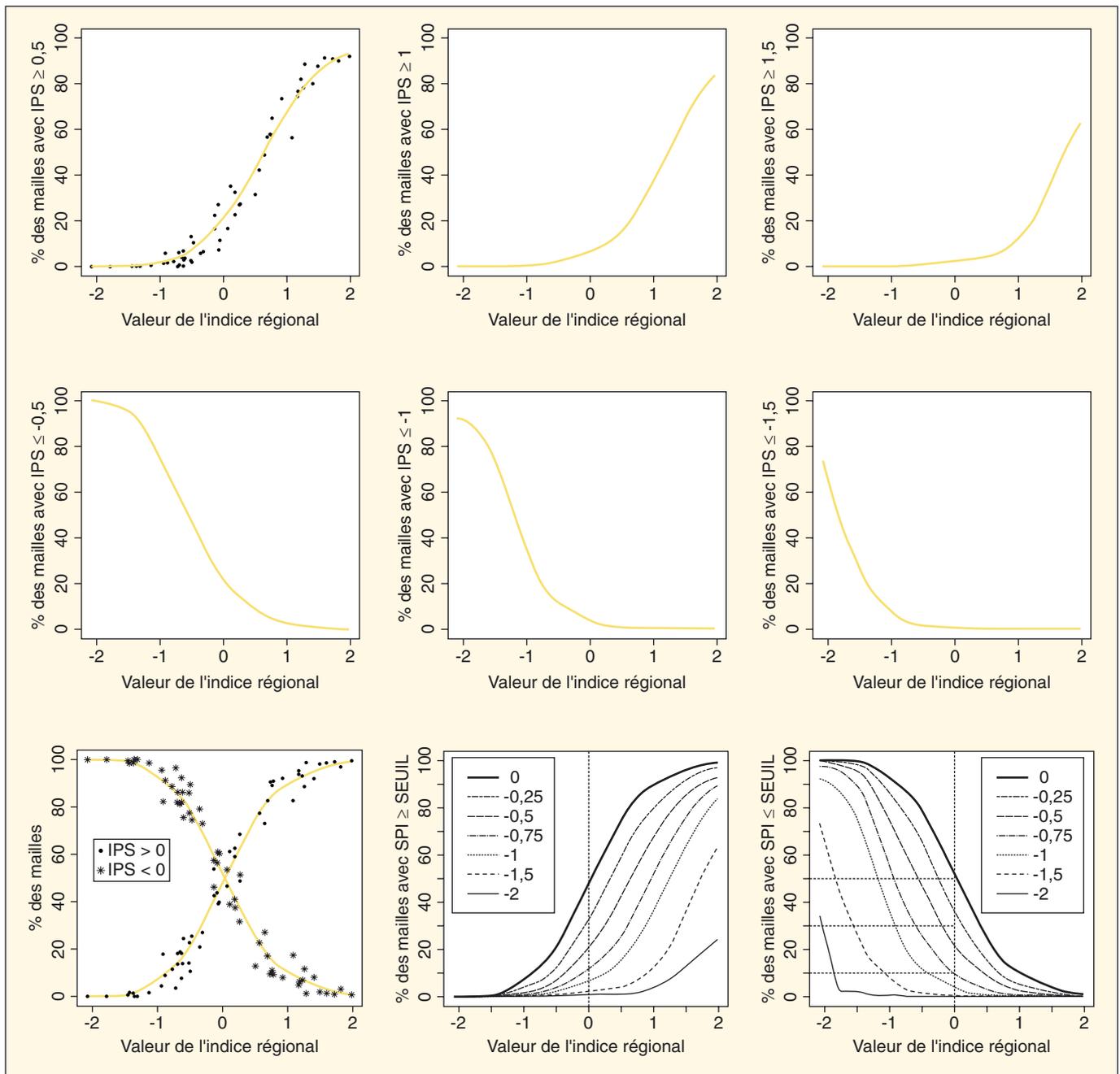


Figure 8. Pourcentage de la zone d'étude dont l'indice pluviométrique standardisé (IPS) est supérieur ou égal à un seuil donné α en fonction de l'IPS régional calculé sur l'ensemble du Sahel (la valeur du seuil α est donnée dans le titre de l'axe des ordonnées).

Un modèle non paramétrique est ajusté aux différents nuages de point. Les deux derniers graphiques sont les abaques obtenus en compilant les courbes obtenues pour les différentes valeurs positives du seuil α , d'une part, et les valeurs négatives, d'autre part. Pour une valeur donnée de l'IPS régional, on peut ainsi lire à la verticale les pourcentages de surface dont la valeur est supérieure (resp. inférieure) au seuil indiqué en cartouche.

spatiale (pour laquelle il est difficile de faire la part entre ce qui relève d'une plus forte variabilité intrinsèque et ce qui relève d'un échantillonnage temporel plus réduit), on note également une plus forte variabilité interannuelle de la période 1990-2006, en contraste avec la persistance des années humides de la période d'avant 1970 et de celle des années sèches de la période 1970-1990 ;

– la forte variabilité spatiale de l'IPS local a conduit à proposer une interprétation probabiliste de l'IPS régional. Un modèle non paramétrique ajusté aux distributions conditionnelles des IPS locaux a permis de tracer deux abaques (un pour les IPS négatifs et un pour les IPS positifs), permettant de déduire de la valeur régionale de l'indice, le pourcentage des surfaces dont l'IPS est inférieur ou supérieur à un seuil α

donné. Par exemple, sur la base d'un IPS régional égal à $-0,13$ en 2006, on peut inférer que 15 % de la superficie du Sahel a été significativement humide ($IPS \geq 0,5$) alors que 28 % de sa superficie a été significativement sèche ($IPS \leq -0,5$). Les modifications du mode de variabilité interannuelle et de l'organisation spatiale constatées au cours de la période récente doivent inciter la communauté scientifique,

d'une part à rechercher dans la circulation atmosphérique régionale et/ou générale ce qui peut expliquer de tels changements relativement soudains et, d'autre part, à faire un usage plus circonspect de l'indice pluviométrique régional pour caractériser les grandes tendances pluviométriques, que ce soit sur le Sahel ou ailleurs dans la bande intertropicale. ■

Remerciements

Ce travail a été mené à bien dans le cadre d'un séjour post-doctoral effectué par le premier auteur au centre régional AGRHYMET, sur financement du projet européen AMMA-EU (analyse multidisciplinaire de la mousson africaine). Basé sur une initiative française, AMMA a été élaboré par un groupe international de scientifiques et est actuellement financé par un grand nombre d'agences, spécialement en France, Royaume-Uni, États-Unis et Afrique. AMMA a reçu une contribution majeure de la Communauté européenne dans le cadre du 6^e PCRD. Des informations détaillées sur la coordination et les financements peuvent

être trouvées sur le site Internet d'AMMA <http://www.amma-international.org>. Nos remerciements vont aux porteurs de ce projet ainsi qu'aux services de météorologie nationaux des pays sahéliens qui fournissent les données pluviométriques au centre AGRHYMET, et à B. Somé pour ses efforts visant à faciliter leur valorisation. Nous tenons enfin à remercier un réviseur anonyme pour ses commentaires très pertinents qui ont permis une amélioration sensible du manuscrit initialement soumis.

Références

1. Katz RW, Glantz MH. Anatomy of a rainfall index. *Monthly Weather Review* 1986 ; 114 : 764-71.
2. Dai A, Fung IY, Del Genio AD. Surface observed global land precipitation variations during 1900-88. *J Climate* 1997 ; 10 : 2943-62.
3. New M, Todd M, Hulme M, Jones P. Precipitation measurements and trends in the twentieth century. *Int J Climatol* 2001 ; 21 : 1899-922.

4. Ozer P, Ergicim M, Demarée G, Vandiepenbeeck M. The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Hydrol Sci J* 2003 ; 48 : 489-92.
5. L'Hôte Y, Mahé G, Somé B, Triboulet JP. Analysis of a Sahelian index from 1896 to 2000 ; the drought continues. *Hydrol Sci J* 2002 ; 47 : 563-72.
6. Dai A, Lamb PJ, Trenberth KE, Hulme M, Jones PD, Xie P. The recent Sahel drought is real. *Int J Climatol* 2004 ; 24 : 1323-31.
7. Chappell A, Agnew CT. Modelling climate change in West African Sahel rainfall (1931-90) as an artifact of changing station. *Int J Climatol* 2004 ; 24 : 547-54.
8. Ali A, Lebel T, Amani A. Estimation of Rainfall in the Sahel. Part 1 : Error Function. *J Appl Meteorol* 2005 ; 44 : 1691-706.
9. Ali A, Amani A, Lebel T. Utilisation d'un modèle d'erreur pour évaluer réseau sol et produits satellitaires. *Sécheresse* 2004 ; 15 : 271-8.
10. Bowman AW, Azzalini A. *Applied Smoothing Techniques for Data Analysis : The Kernel Approach with S-PLUS Illustrations*. Oxford (United Kingdom) : Oxford University Press, 1997.