

VARIABILITE DU CLIMAT AU SAHEL CENTRAL DEPUIS 1950 : ESSAIS D'ANALYSES STATISTIQUES DES RELATIONS ENTRE PRECIPITATIONS, VENT ET VISIBILITE HORIZONTALE AU SE-NIGER

DIEPPOIS B.^{1,6}, HASSANE B.^{1,2,6}, DURAND A.^{1,6}, FOURNIER M.¹, GARBA Z.^{2,6}, MASSEI N.¹,
NGOUNOU NGATCHA B.^{3,6}, RAJOT J.L.^{4,6}, SEBAG D.^{1,5,6}, TRAORE A.⁷

¹ Université de Rouen, CNRS-INSU, Laboratoire M2C, UMR 6143, Rouen, France

² Université Abdou Moumouni, Dpt Sciences de la Terre, Niamey, Niger

³ Université de Ngaoundéré, Dpt Sciences de la Terre, Ngaoundéré, Cameroun

⁴ Université Paris Est Créteil, IRD, UMR BIOEMCO, CNRS, UMR LISA, Créteil, France

⁵ Université de Montpellier, IRD, Laboratoire HSM, UMR 5569, Montpellier, France

⁶ Projet CORUS-2 6116

⁷ Direction de la Météorologie Nationale, Niamey, Niger

Résumé

Mainé-Soroa et N'Guigmi sont situées au SE du Niger, dans le bassin du lac Tchad. Diverses méthodes dérivées du traitement du signal et plus communément utilisées en hydrologie y ont été testées sur les précipitations, la vitesse du vent et la visibilité horizontale. L'analyse de la tendance par une régression polynomiale non paramétrique montre un changement de régime à la fin des années 60. L'analyse de la variabilité a été réalisée par la méthode des transformées en ondelettes continues. Si le contenu fréquentiel des trois paramètres s'accorde aux échelles saisonnière et quasi-décennale, les relations précipitations-visibilité et vitesse du vent-visibilité apparaissent très complexes. Les échelles saisonnières et intra-saisonnières ont été analysées avec des hystérésis moyennes journalières et des intercorrélogrammes journaliers. Ces analyses montrent que si la pluie améliore la visibilité elle n'agit pas régionalement directement sur les apports de poussières. Par contre, ces apports sont liés à la vitesse du vent.

Abstract - Climate variability in Central Sahel since 1950 : SE-Niger rainfall, wind and horizontal visibility: Mainé-Soroa and N'Guigmi are located in SE Niger, in the Lake Chad basin. Some signal analysis methods used in hydrology were tested on the rainfalls, the wind speed and the horizontal visibility data. Using a local polynomial fitting reveals a long-term trend change of regime in the late 1960s. The Continuous Wavelets Analysis reveals some coherent frequency modes at seasonal and quasidecadal scales, but the rainfall-visibility and the wind speed-visibility relationship are more complex. Hysteresis and cross-correlation function of mean daily regimes were used for study the intra-seasonal and seasonal scales. We notice that, even if the rainfall increases the visibility, this one doesn't modulate instantaneously the regional dust contributions. On the contrary, these contributions are linked to the wind speed.

Introduction

Depuis la fin des années 60, les sécheresses qui marquent le climat au Sahel sont l'un des signaux climatiques inter-décennaux les plus forts observés au XX^{ème} siècle. A cela se superposent également des variations interannuelles (Le Barbé *et al.*, 2002 ; Lebel et Ali, 2009) et intra-saisonnières importantes (Sultan et Janicot, 2003). Ces périodes de sécheresse intense sont liées à un déficit pluviométrique pratiquement continu de la fin des années 60 au milieu des années 90 (Le Barbé *et al.*, 2002). Au déficit pluviométrique s'ajoute une réactivation de la dynamique éolienne (Courel et Chamard, 1987 ; Mainguet *et al.*, 2001), ainsi qu'une augmentation de la fréquence des événements de poussières qui diminuent la visibilité horizontale (N'Tchayi Mbourou *et al.*, 1996). L'objectif de cet article est d'observer à quelles échelles de temps fluctuent la visibilité, la vitesse des vents et les précipitations et de tester les relations pouvant exister entre ces paramètres.

Dans cette étude, nous considérerons tout système comme une boîte noire transformant un signal d'entrée et un signal de sortie à travers une fonction de transfert. La vitesse du vent et les précipitations seront toujours considérées comme un signal d'entrée puisqu'elles mettent en jeu des mécanismes d'érosion, de mise en suspension et de transport de poussières, d'une part, et de lessivage des poussières d'autre part. Au contraire, la visibilité sera considérée comme un niveau de turbidité de l'atmosphère, donc un signal de sortie. A partir des stations de Mainé-Soroa et N'Guigmi (SE Niger), nous analyserons les fluctuations à

long terme de ces trois paramètres représentatifs du climat sahélien à l'aide de méthodes issues du traitement du signal. Puis, nous testerons les relations, à diverses échelles de temps, de la visibilité avec les précipitations et la vitesse du vent en utilisant la cohérence et la phase par ondelettes, les hystérésis et les intercorrélations. Toutes ces méthodes sont utilisées relativement couramment en hydrologie (pluie, débit, turbidité) et c'est à titre d'essai que nous les appliquons à d'autres paramètres.

Cadre géographique

Les stations de Maïné-Soroa et N'Guigmi sont situées au SE du Niger, dans le bassin du lac Tchad. Cette région très plate comprend trois domaines géomorphologiques (Durand, 1995). Un domaine lacustre : le lac Tchad ; un domaine fluvio-éolien : le Kadzell (plaine alluviale de la Yobe) ; un domaine éolien : le Manga (plateau sableux). Les deux stations sont situées dans le domaine éolien (Manga), Maïné-Soroa (13.2N ; 12.0E) se situant en bordure du Kadzell et N'Guigmi (14.3N ; 13.1E) en bordure du lac Tchad. Les deux stations se trouvent sur une importante trajectoire éolienne continentale NE-SW (Mainguet, 1984), qui se charge en poussières dans la dépression du Bodélé, au Nord du Tchad (Tanaka et Chiba, 2006). Les moyennes des cumuls de précipitations annuelles de ces stations sont comprises entre 100 et 400mm/an, soit dans la zone sahélienne.



Figure 1 : Localisation et domaines géomorphologiques.

Données

Pour Maïné-Soroa nous disposons de données journalières de précipitations, vitesse des vents et visibilités horizontales entre 1950 et 1992. Les vitesses du vent et les visibilités horizontales sont disponibles à 6h, 12h et 18h (Hassane *et al.*, 2010). Mais nous avons choisi d'effectuer une moyenne journalière de ces deux paramètres pour rester au même pas de temps que la pluviométrie. A N'Guigmi, nous disposons des mêmes données, sauf pour la pluviométrie journalière qui va jusqu'en 1980 seulement. Ces données ont été obtenues grâce à un accord entre la Direction de Météorologie Nationale du Niger (DMN) et le projet ROSELT-Niger. Nous disposons en outre des données pluviométriques mensuelles de 1992 à 2005 pour Maïné-Soroa et 1980-1995 pour N'Guigmi, données disponibles sur le site du Koninkrijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI).

Les précipitations sont mesurées avec précision et correspondent à un cumul journalier. Il en est autrement des vitesses du vent et de la visibilité horizontale. La vitesse du vent est une mesure ponctuelle (6h, 12h et 18h) et fait l'objet d'une approximation. En effet, elle est exprimée uniquement en valeurs entières (1, 2, 3 m.s⁻¹, etc.) pour tenir compte des oscillations pendant la mesure. Ainsi, la valeur 2 regroupe les mesures comprises entre 1.5 et 2.5 m.s⁻¹. La visibilité horizontale est définie comme étant la distance maximale à laquelle un observateur peut voir et identifier un objet situé à proximité du plan horizontal où il se trouve lui-même. C'est donc un paramètre ponctuel (6h, 12h et 18h) et estimé, dépendant de l'observateur. La qualité de ce paramètre a été très largement discutée, mais il reste utilisée car c'est le seul paramètre permettant d'appréhender le flux de poussière sahélien avant l'installation d'appareils de mesure dans les années 90 (Middleton, 1985 ; Ozer, 2000).

Analyse de la tendance à long terme

Afin d'étudier les variations à long terme, nous avons appliqué une régression polynomiale non paramétrique (méthode LOESS) en ajustant des fenêtres de largeur égale à 100% et 25%. La fin des années 60 est marquée par un changement de tendance (LOESS-100%) sur quasiment tous les paramètres observés (Fig.2).

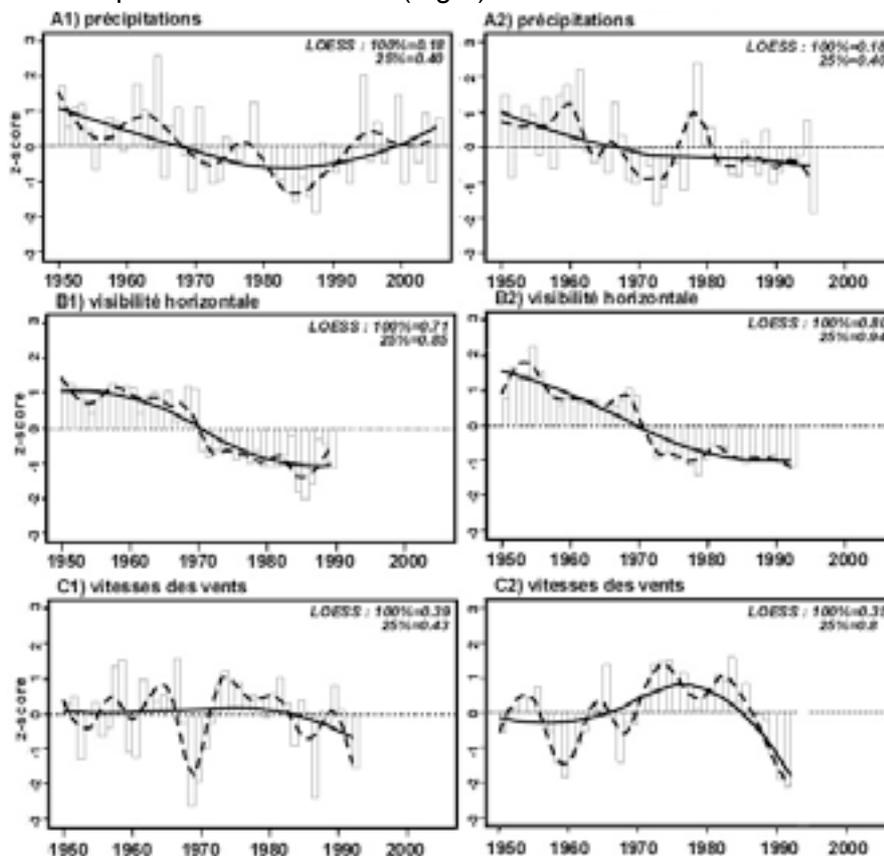


Figure 2.A : précipitations annuelles standardisées et LOESS; B : visibilités horizontales annuelles standardisées et LOESS ; C : vitesses annuelles des vents et LOESS à Maïné-Soroa (1) et N'Guigmi (2). (trait continu : LOESS-100% ; pointillés : LOESS-25%). Visibilités et vitesses annuelles moyennes résultent des moyennes de trois mesures quotidiennes (6, 12 et 18h TU) (Hassane et al., 2010).

A Maïné-Soroa (N'Guigmi), on observe : un passage humide/aride en 1968 (1967), une diminution de la visibilité en 1970 (1969), et une augmentation de la vitesse des vents à N'Guigmi en 1965 (Fig.2). La vitesse des vents à Maïné-Soroa reste stable jusqu'à 1982, puis baisse fortement (Fig.2C1). Cette baisse s'observe également en 1985 à N'Guigmi (Fig.2C2). L'ajustement du LOESS à 25%, nous permet d'observer la variabilité interannuelle des chroniques. Cette variabilité est plus marquée pour les précipitations et les vitesses des vents, tandis qu'elle suit la courbe de tendance pour les visibilités (Fig2). Les vitesses des vents montrent deux sous-régimes marqués par une baisse d'intensité : la première est plus marquée à N'Guigmi (1956-1962) (Maïné-Soroa : 1959-1961) ; la deuxième est plus importante à Maïné-Soroa (1966-1971) (N'Guigmi : 1965-1969) (Fig2C). Sur les deux stations, les précipitations montrent un sous-régime humide plus marqué à N'Guigmi (1976-1981) qu'à Maïné-Soroa (1976-1978) (Fig2A). De plus, on observe un régime semi-aride (précipitations très variables) depuis les années 90 à Maïné-Soroa (Fig.2A1).

Analyse de la variabilité à long terme

L'utilisation de la Transformée en Ondelettes Continues, nous permet de décomposer le signal en une somme d'ondes de longueurs finies, localisées dans le temps. Ceci permet d'analyser les variations localisées de puissance (variance) et l'instationnarité du contenu fréquentiel d'un signal selon un repère cartographique : x=temps, y=périodes et z (couleurs)=variance (Labat, 2005). Plus simplement, cette analyse qui tient compte de la

non-linéarité et de l'instationnarité des chroniques, nous permet d'observer la répartition temporelle des modes fréquentiels à la fois de basses et hautes fréquences. Divers tests de significativité sont indiqués : le cône d'influence qui permet de délimiter les fréquences soumises aux effets de bords dus à la taille de la chronique ; le test de significativité par secteur (areawise test) au niveau 90% (Schaeffli *et al.*, 2007). Notons cependant qu'une bande non reproduite par le test de significativité ne signifie pas que le mode fréquentiel est inexistant, mais simplement qu'il ne peut pas être reproduit par un signal aléatoire de même propriété.

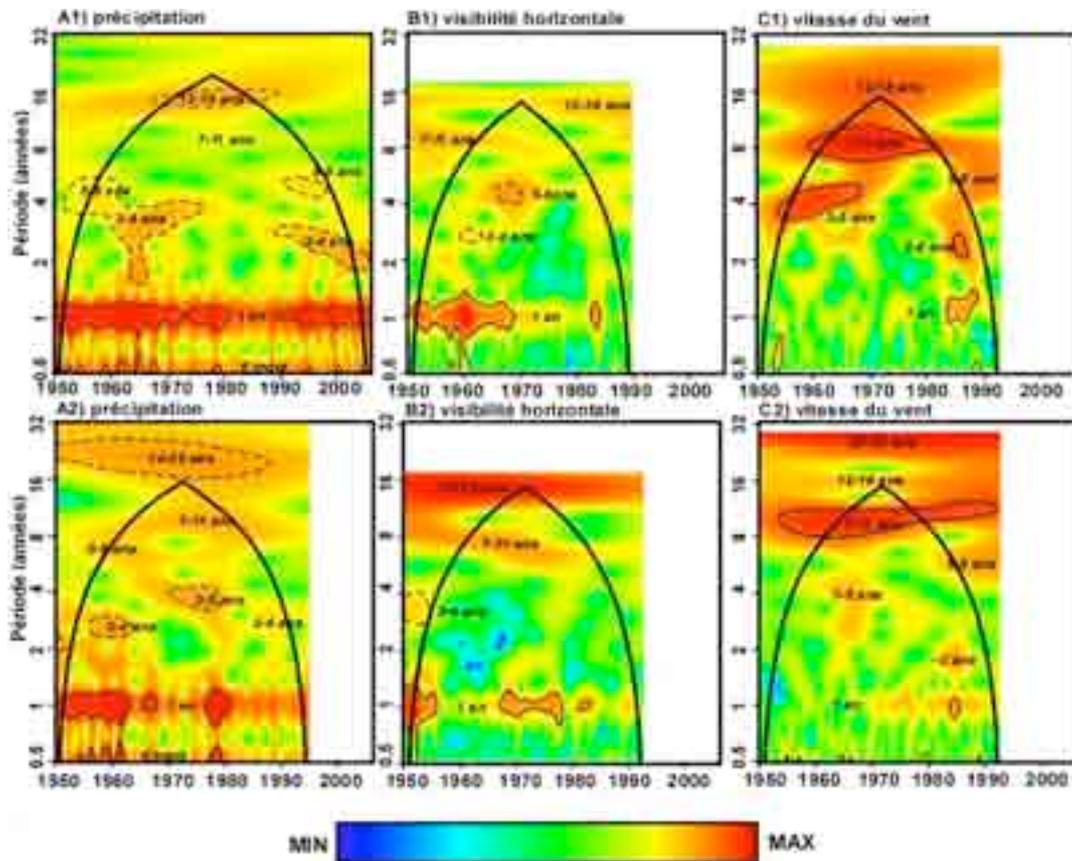


Figure 3.A : spectre en ondelettes des cumuls mensuels de précipitations ; B : spectre en ondelettes de la visibilité horizontale moyenne mensuelle ; C : spectre en ondelettes de la vitesses moyenne mensuelle du vent à Maïné-Soroa (1) et N'Guigmi (2). (trait continu gras : cône d'influence ; traits continus fins : limite de confiance à 90% ; pointillés : limite de confiance à 90% après filtrage des bandes 6 mois et 1 an)

En règle générale, la variabilité haute fréquence (1an et moins) est dominante pour les précipitations (73% de la variance totale à Maïné-Soroa et 57% à N'Guigmi). Ce n'est pas le cas des visibilités et des vitesses des vents (Maïné-Soroa : 28.5% et 4.7% ; N'Guigmi : 12.3% et 3.2%) (Fig.3). Pour les visibilités et les précipitations, on remarque que le cycle annuel connaît des baisses de variance, voire des ruptures, depuis le début des années 60 (Fig.3A-B). Au contraire, le cycle annuel des vitesses des vents qui était quasi-absent gagne en variance depuis les années 70 (Fig.3C).

L'étude des modes de basse fréquence (> 1 an) est beaucoup plus complexe. Les précipitations présentent de nombreux modes fréquentiels interannuels (< 10 ans) : à Maïné-Soroa deux modes, 2-4ans et 5-8ans ; à N'Guigmi trois modes, 2-4ans, 3-5ans et 5-8ans (Fig.3A). Pour les visibilités et les vitesses des vents, les modes interannuels s'expriment peu et n'apparaissent que ponctuellement. La majeure partie de la variance de ces paramètres s'exprime à l'échelle quasi-décennale. On distingue deux modes quasi-décennaux, 7-11ans et 12-18ans (Fig.3B-C). Le mode 7-11ans est le mode de variabilité dominant pour les vitesses des vents (Maïné-Soroa : 29% ; N'Guigmi : 24% (Fig.3C). Le

mode 12-18ans (ou 12-16ans) est le mode de variabilité dominant pour les visibilités (Maïné-Soroa : 23%, N'Guigmi : 55%) (Fig.3B).

Selon ces observations, les deux stations présentent donc globalement un contenu fréquentiel cohérent à l'échelle saisonnière et quasi-décennale, ce qui suggère des interactions importantes entre vitesses des vents, précipitations et visibilités à ces échelles.

Relations à long terme

Les relations à l'échelle quasi-décennale seront étudiées à l'aide des analyses de cohérence par ondelettes qui permettent d'identifier des oscillations communes significatives entre deux signaux à certaines échelles et pour certains intervalles de temps (Maraun, 2006). Dans ces analyses, la phase associée à ce calcul montre le retard entre les maxima des deux signaux. Un signal s'approchant de la valeur π ou $-\pi$ sera en opposition de phase, donc avec un retard maximum. Au contraire une valeur proche de 0 aura un écart minimum et les signaux seront en phase. Les valeurs proches de $\pi/2$ et $-\pi/2$ ou quadratures de phase (retard intermédiaire) sont difficilement interprétables.

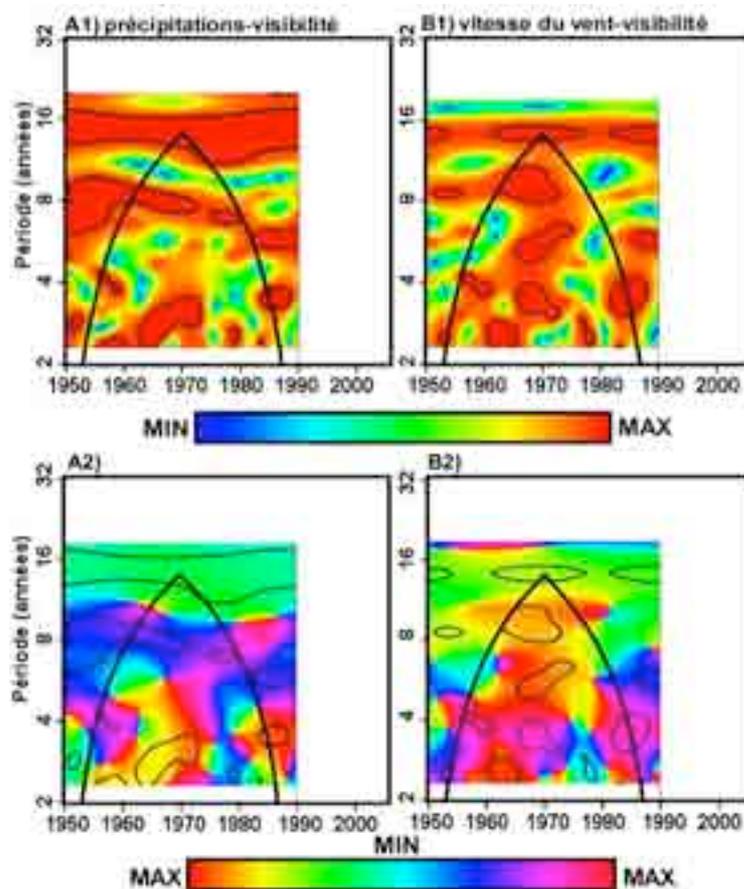


Figure 4. Mainé Soroa : A : (1) spectre de cohérence par ondelettes entre la visibilité horizontale et les précipitations, (2) spectre de phase associé ; B : (1) spectre de cohérence par ondelettes entre la visibilité horizontale et la vitesse des vents, (2) spectre de phase associé. (trait gras : cône d'influence; traits fins : limite de confiance 90%).

A Maïné-Soroa, de 1950 à 2005, on observe une relation (cohérence) présentant un léger retard ($\text{lag} = -\pi/5$ ou ~ 3 ans), entre la visibilité et les précipitations sur le mode 12-18ans (Fig.4B-C). Sur le même mode, la visibilité et la vitesse du vent sont moins cohérentes et en quadrature de phase ($-\pi/2$), soit un retard important (~ 7.5 ans) fragilisant l'hypothèse de l'existence d'une relation.

A l'échelle interannuelle (2-4ans et 5-8ans), des relations s'observent ponctuellement entre la vitesse du vent et la visibilité, mais en opposition de phase sur toute la chronique (Fig.4B).

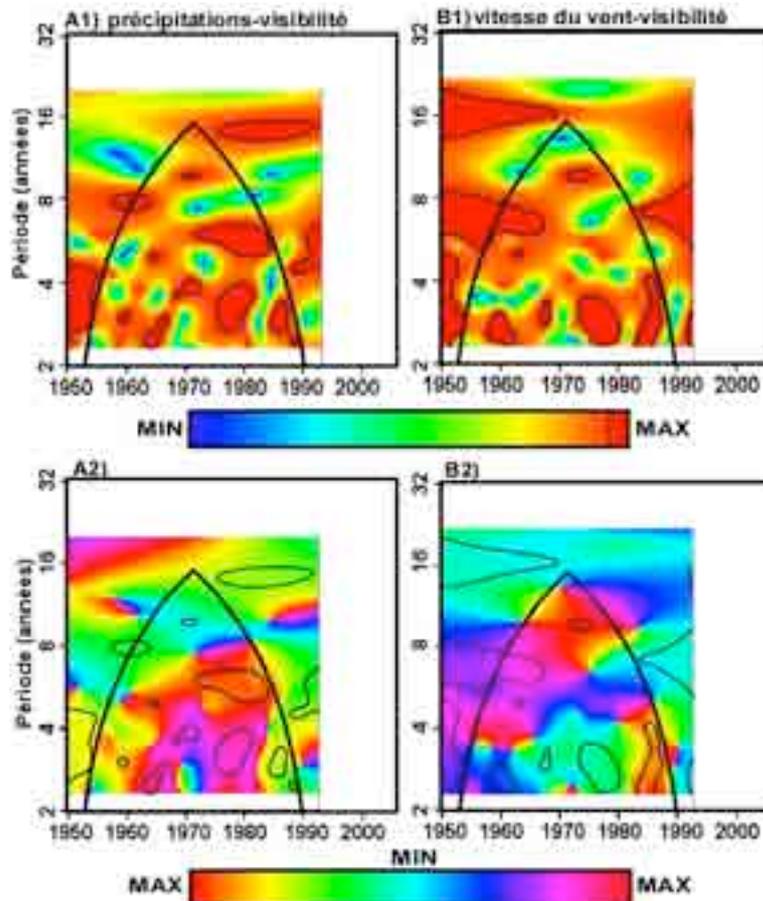


Figure 5. N'Guigmi : A : (1) spectre de cohérence par ondelettes entre la visibilité horizontale et les précipitations, (2) spectre de phase associé ; B : (1) spectre de cohérence par ondelettes entre la visibilité horizontale et la vitesse des vents, (2) spectre de phase associé; à N'Guigmi. (trait gras : cône d'influence ; traits fins : limite de confiance 90%).

A N'Guigmi, on observe une relation (cohérence) en phase ($\text{lag} = -\pi/23$ ou ~ 6 mois) entre la visibilité et les vitesses de vents (Fig.5B). Cette relation change d'échelle au cours du temps : 12-18ans jusqu'à 1970, 2-4ans entre 1965 et 1980 puis 5-8ans dans les années 80 (Fig.5B). Sur le mode 12-18, Les précipitations et la visibilité montrent peu de cohérence entre eux et le retard associé est important (~ 10 ans).

Les relations observées sont donc complexes et différentes sur les deux stations. Ce type d'analyse apporte finalement peu d'informations véritablement déterminantes. Peut-être aurait-il été plus intéressant de comparer un même paramètre entre les deux stations plutôt que deux paramètres sur une même station ?

Relations saisonnières et intra-saisonnières

Afin de mieux observer la variabilité saisonnière, nous avons établi les moyennes journalières (pour chaque jour de l'année sur toutes les années considérées) lors des deux régimes extrêmes. Compte tenu des données disponibles et des changements de tendances (Fig.1) à Maïné-Soroa, nous avons choisi les périodes 1950-1967 (régime humide) et (1970-1990 (régime aride) et à N'Guigmi, les périodes 1950-1967 et 1970-1980.

Dans l'ensemble, les régimes humides et arides semblent similaires à Maïné-Soroa et N'Guigmi. En régime humide, l'amélioration de la visibilité est progressive et précède la pluie (Fig.6A1-B1). En régime aride, les deux semblent concomitants et l'amélioration de la visibilité est plus brutale avec un net décrochement (idem pour la détérioration en fin de saison des pluies) (Fig.6A2-B2).

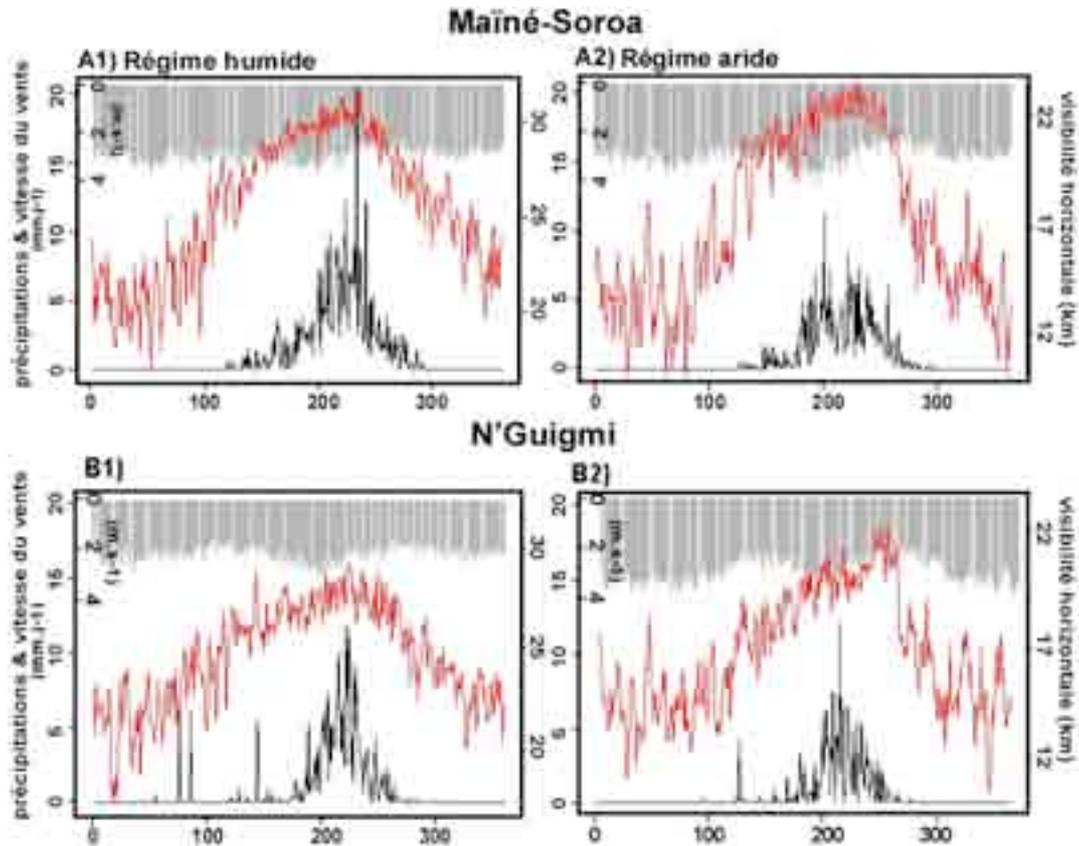


Fig 6 A : régime journalier moyen humide (1) et aride (2) de précipitations (mm.jr-1) (courbe noire), visibilité horizontale (km) (courbe rouge) et vitesse du vent (m.s-1) (histogramme gris) à Maïné-Soroa ; B : régime journalier moyen humide (1) et aride (2) de précipitations (mm.jr-1) (courbe noire), visibilité horizontale (km) (courbe rouge) et vitesse du vent (m.s-1) (histogramme gris) à N'Guigmi. Attention, pour des raisons de lisibilité, l'échelle de la visibilité en période aride est différente et décalée.

En régime aride, à Maïné-Soroa, le déficit du cœur de la saison des pluies (Chaouche, 1988) est particulièrement net (Fig6A2). Les vitesses des vents varient peu au cours des saisons, mais on remarque que les minima de visibilité et les maxima de précipitations correspondent à des maxima de vitesse des vents en saison sèche et en saison humide. Cependant, ces variations saisonnières de vitesse des vents marquent sans doute simplement le changement de direction des vents entre la saison sèche (Harmattan : vent de NE) et la saison des pluies (Mousson : vent de SW).

A l'échelle saisonnière, l'analyse d'un schéma temporel normalisé (x-y), entre précipitations-visibilité, nous permet d'étudier les variations systémiques des modes saisonniers de précipitations et de visibilité. Cette méthode d'analyse d'hystérésis est communément utilisée en hydrologie pour observer la relation débit-turbidité (Williams, 1989 ; Valdès, 2005). Dans notre étude, elle permet d'observer le retard de l'effet éventuel des précipitations sur la visibilité, et l'évolution d'un système quand la cause extérieure qui a produit le changement d'état a cessé.

Toujours selon la même démarche, pour l'échelle événementielle, nous avons appliqué la fonction d'intercorrélations sur les mesures journalières de visibilité, précipitations et vitesses de vent avant et après 1967 (le premier changement majeur observé sur les trois paramètres). Cette fonction quantifie la dépendance linéaire entre les signaux d'entrée et les signaux de sortie. Si le signal d'entrée n'est pas de type gaussien (ce qui est le cas ici), la fonction d'intercorrélations renseigne sur les relations de causalité entre le signal d'entrée et le signal de sortie (Valdès, 2005). Si le signal n'est pas symétrique, lorsque l'intercorrélogramme présente un retard ou lag positif (négatif), le signal d'entrée (sortie) influence le signal de sortie (entrée). Si l'intercorrélogramme est symétrique et centré sur un lag=0, leur réponse est alors dépendante d'un troisième signal.

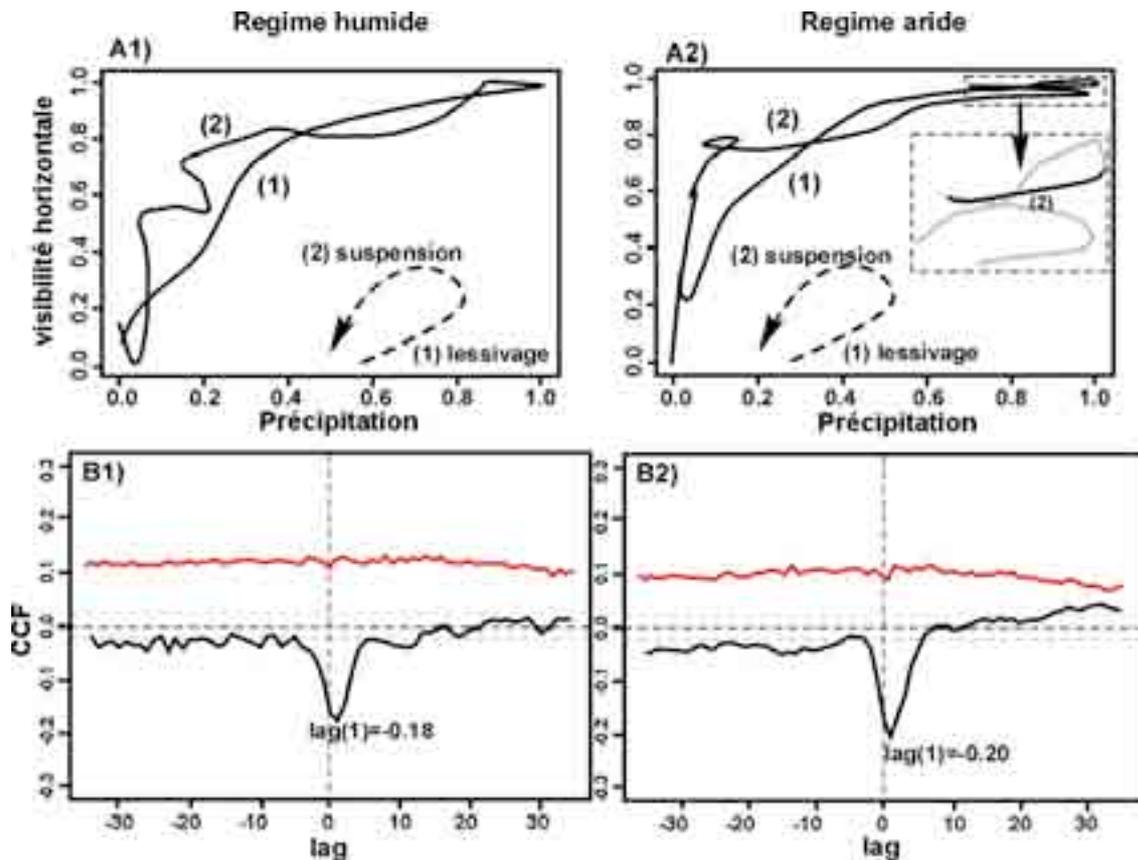


Figure 7.A : Hystérésis moyenne journalière du système précipitations-visibilité ; B : Intercorrélogramme journalier du système précipitations-visibilité (rouge), vitesse du vent-visibilité (noir) en régime humide (1) et aride (2) à Maïné-Soroa.

Pour pouvoir tester les relations avec la pluie, nous avons restreint les analyses à la saison des pluies. A Maïné-Soroa, en régime humide et aride, l'hystérésis du système précipitations-visibilité montre une amélioration progressive de la visibilité (1) suivi d'une période de réduction de la visibilité (2) dès que la pluie diminue (Fig.7A). On attribue l'amélioration de la visibilité au lessivage des poussières par la pluie et sa détérioration à de nouveaux apports en suspension (Pye, 1987). En régime aride le déficit de pluie d'août est marqué par une courte période de détérioration de la visibilité (encadré, Fig.7A). L'étude des intercorrélogrammes, à Maïné-Soroa, montre que les précipitations et la visibilité (rouge) sont modulés par un troisième paramètre en régime humide comme aride (végétation ?) (Fig.7B). Par contre, on observe une réponse impulsionnelle avec un retard d'un jour ($\text{lag}1$) entre la vitesse des vents et la visibilité ; la visibilité dépend alors de la vitesse des vents (Fig.7B).

A N'Guigmi, en régime humide, l'hystérésis présente une boucle semblable à celle de Maïné-Soroa (Fig.8A1). En régime aride, on remarque de nouvelles particularités : en début de saison, la visibilité s'améliore durant une courte séquence sèche, et en fin de saison une amélioration de la visibilité alors que les pluies diminuent (2') (Fig.8A2). Aurait-on un balayage des poussières en réponse à un autre paramètre (vitesse du vent) ? L'étude des intercorrélogrammes, à N'Guigmi, montre les mêmes résultats qu'à Maïné-Soroa pour la relation précipitations-visibilités (Fig.8B). Concernant la relation vitesse du vent-visibilité, comme à Maïné-Soroa, une relation de dépendance de la visibilité à la vitesse des vents existe (Fig.8B). Mais à N'Guigmi la réponse des visibilités à un changement de la vitesse du vent est instantanée, et en régime aride plus puissante ($\text{lag}=0\text{jr}$ et $\text{CCF}=-0.39$) (Fig.8B).

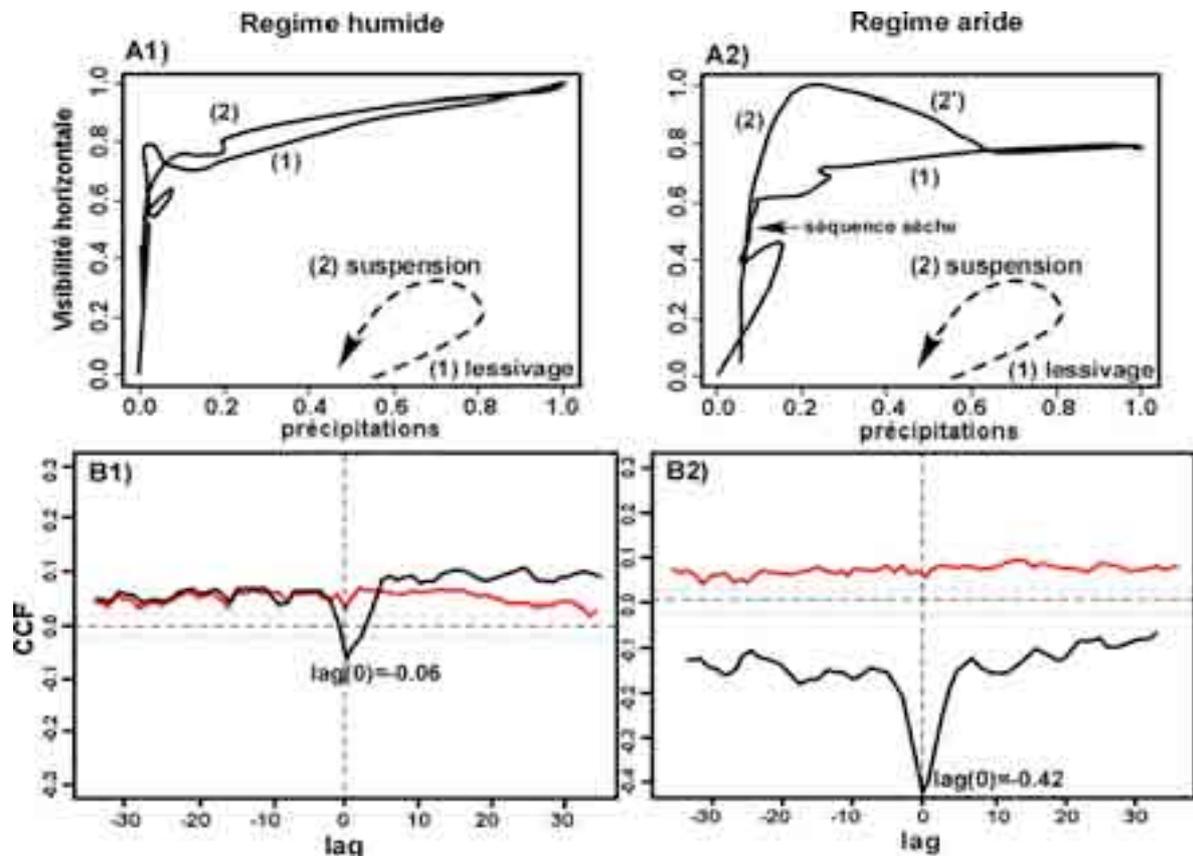


Figure 8.A : Hystérésis moyenne journalière du système précipitations-visibilités ; B : Intercorrélogramme journalier du système précipitations-visibilités (rouge), vitesse du vent-visibilité (noir) en régime humide (1) et aride (2) à N'Guigmi.

Conclusion

Ce travail a donc été l'occasion de tester à titre exploratoire diverses méthodes dérivées du traitement du signal et plus communément utilisées en hydrologie. A la fin des années 60, nous avons observé un changement de tendance pour la visibilité, les précipitations et la vitesse des vents (sauf à Maïné-Soroa où il n'y a qu'une anomalie pour la vitesse) (Fig.2). L'utilisation de la transformée en ondelettes nous montre que les changements du contenu fréquentiel sont globalement cohérents aux échelles saisonnière et quasi-décennale (Fig.3). Mais les relations statistiques à long terme précipitations-visibilité et vitesse du vent-visibilité sont très complexes (Fig.4-5). Les modifications à long terme observées apparaissent comme des réponses à un changement de large échelle. Ces changements peuvent donc mettre en jeu aussi bien l'aridification du Sahel et la diminution du couvert végétal, mais également l'origine distale des poussières ou les activités humaines. Cependant, comme dans toutes les études des relations à long terme, la longueur des chroniques est probablement ici aussi insuffisante et il conviendrait donc d'abord de chercher à étendre les chroniques. Peut-être serait-il aussi plus intéressant de comparer un même paramètre entre les deux stations plutôt que deux paramètres sur une même station ?

A l'échelle saisonnière, la pluie améliore donc la visibilité (lessivage des poussières ; Fig.7A-8A). Mais la pluie n'agit pas sur les apports de poussières : en période humide la visibilité s'améliore avant que la saison des pluies ne commence véritablement (Fig.6) et en période aride la visibilité continue de s'améliorer alors que les pluies diminuent (Fig.6 et surtout 8A2). On ne peut donc pas dire que la pluie en provoquant la croissance du couvert herbacé régional diminue l'érosion éolienne et la mise en suspension de poussières locales. Par contre, le fait que la relation entre vitesse du vent et visibilité soit instantanée à N'Guigmi et avec un retard d'un jour à Maïné-Soroa, et aussi plus puissante en période aride et plus puissante à N'Guigmi qu'à Maïné-Soroa, suggère que le contexte local intervient dans cette relation (Fig.7B-8B). Le plus simple est alors d'envisager à ce niveau le rôle du gradient

pluviométrique sur la couverture végétale et donc sur la rugosité du substrat qui intervient à son tour sur la vitesse des vents. Disposant de trois mesures de la vitesse du vent et de la visibilité par jour (6h, 12h, 18h) les relations d'intercorrélation pourraient être précisées. Il conviendrait pour cela de redécouper les données en fonction d'une année anémométrique (octobre-avril) plutôt que d'une année civil centrée sur la saison des pluies...

Bibliographie

- Chaouche A., 1988 : *Structure de la saison des pluies en Afrique soudano-sahélienne*. Thèse de l'Ecole Nat. Sup des Mines de Paris, 263p.
- Courrel M-F., Chamard Ph., 1987 : Apparition de nouvelles formes dunaires dans l'Azawad et le Gourma septentrional (Mali). *Rev. Photo-Interprétation*, **87-3**, **3**, 25-33.
- Durand A., 1995 : Sédiments quaternaires et changements climatiques au Sahel central (Niger et Tchad). *Africa Geoscience Review*, **2**, **3-4**, 323-614.
- Hassane B., Moussa A., Dieppois B., Garba Z., Sebag D., Rajot J.L., Ngounou Ngatcha B. & Durand A., 2010 : Variabilité de la dynamique éolienne au Niger Orientale : caractéristiques des vents et de la visibilité horizontale entre 1950 et 1989 à Maïné-Soroa (région de Diffa, Niger oriental), *PANGEA*, **47-48**, à paraître.
- Labat D., 2005 : Recent advances in wavelet analyses : Part 1. A review of concepts. *Journal of Hydrology*, **314**, 275-288.
- Le Barbé L., Lebel T. & Tapsoba D., 2002 : Rainfall Variability in West Africa during the Years 1950-90. *Journal of Climate*, **15**, 187-202.
- Lebel T., Ali A., 2009 : Recent trends in the Central and Western Sahel regime (1990-2007). *Journal of Hydrology*, **375**, 52-64.
- Mainquet M., 1984: Space observation of Saharan aeolian dynamics. In: Farouk El-Baz (ed.) "*Deserts and arid lands*". Kluwer Acad. Pub., 59-77.
- Mainquet M., Dumay F., Lémone Ould El Hacen & Maefouh A., 2001 : Diagnostic par télédétection d'un changement de rythme de la dynamique éolienne : période amorce de la désertification en Mauritanie saharo-sahélienne. *Télédétection*, **2**, 129-136.
- Maraun D., 2006: *What Can We Learn from Climate Data? Methods for Fluctuation Time/Scale and Phase Analysis*. Universitât Postdam, 127p.
- Middleton N.J., 1985 : Dust production in the Sahel - Reply to M. Hulme, *Nature*, **318**, 488.
- N'Tchayi Mbourou G., Bertrand J.J. & Nicholson S.E., 1997 : The Diurnal and Seasonal Cycles of Wind-Borne Dust over Africa North of the Equator. *J. Appl Meteor*, **36**, 868-882.
- Ozer P., 2000 : Les lithométérores en région sahélienne : un indicateur climatique de la désertification. *GEO-ECO-TROP*, **24**, 1-317.
- Pye K., 1987 : *Aeolian Dust and Dust Deposits*. Academic Press, 334p.
- Schaefli B., Maraun D. & Holschneider M., 2007 : What drives high flow events in the Swiss Alps? Recent developments in wavelet spectral analysis and their application to hydrology. *Advances in Water Ressources*, **30**, 2511-2525.
- Sultan B. et Janicot S., 2003 : The West African monsoon dynamics. Part I : Documentation of Intraseasonal Variability. *Journal of Climate*, **16 (21)**, 3389-3406.
- Tanaka T. Y. & Chiba M., 2006: A numerical study of the contributions of dust source regions to the global dust budget. *Global and Planetary Change*, **52**, 88-104.
- Valdès, 2005 : *Variabilité spatiale du fonctionnement hydrologique de l'aquifère karstique de la craie (Eure (27), France)*. Thèse Université de Rouen, 287 p.
- Williams G.P., 1989 : Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *Journal of Hydrology*, **111**, 89-106.