



HAL
open science

**Variabilité de la dynamique éolienne au Sahel :
caractéristiques des vents et de la visibilité horizontale
entre 1950 et 1989 à Maïne-Soroa (Niger Oriental).
Aeolian dynamics variability between 1950 and 1989 in
the Sahel: wind characteristics and horizontal visibility
at Maïne-Soroa (eastern Niger)**

B. Hassane, B. Dieppois, Z. Garba, David Sebag, J.L. Rajot, B. Ngounou
Ngatcha, A. Traore, A.K. Moussa, A. Durand

► **To cite this version:**

B. Hassane, B. Dieppois, Z. Garba, David Sebag, J.L. Rajot, et al.. Variabilité de la dynamique éolienne au Sahel : caractéristiques des vents et de la visibilité horizontale entre 1950 et 1989 à Maïne-Soroa (Niger Oriental). Aeolian dynamics variability between 1950 and 1989 in the Sahel: wind characteristics and horizontal visibility at Maïne-Soroa (eastern Niger). Pangea infos, 2010, 47/48, pp.19-26. insu-00956985

HAL Id: insu-00956985

<https://insu.hal.science/insu-00956985v1>

Submitted on 7 Mar 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Volume spécial :

Géosciences & Développement

IMPACTS DE L'HOMME ET DU CLIMAT SUR LES MILIEUX SAHELIENS

Editeurs scientifiques : Zibo GARBA, Benjamin NGOUNOU NGATCHA, David SEBAG, Alain DURAND

VARIABILITE DE LA DYNAMIQUE EOLIENNE AU SAHEL : CARACTERISTIQUES DES VENTS ET DE LA VISIBILITE HORIZONTALE ENTRE 1950 ET 1989 A MAÏNE-SOROA (NIGER ORIENTAL)

Bouba HASSANE^{1,2}, Bastien DIEPPOIS², Zibo GARBA¹,
David SEBAG², Jean-Louis RAJOT³, Benjamin NGOUNOU NGATCHA⁴,
Abdoukarim TRAORE⁵, Abdoul Kader MOUSSA¹, Alain DURAND²

1- Université Abdou Moumouni, Département des Sciences de la Terre, Niamey, Niger

2- Université de Rouen, Laboratoire M2C, UMR 6143 CNRS, Mont Saint Aignan, France

3- IRD, Laboratoire BIOEMCO, UMR 211, Niamey, Niger

4- Université de Ngaoundéré, Département des Sciences de la Terre, Ngaoundéré, Cameroun

5- Direction de la Météorologie Nationale, BP 218 Niamey, Niger

correspondant : bouba.hassane@etu.univ-rouen.fr

RESUME

Au Sahel, les études sur le changement climatique portent principalement sur les précipitations. Pourtant, ces précipitations sont peu représentatives des conditions locales permanentes car elles sont concentrées sur une partie de l'année (saison des pluies) et ne concernent que quelques dizaines de jours seulement. Au contraire les jours sans vent sont rares. Cette étude a donc pour objectif de savoir si le changement climatique peut être appréhendé à partir des paramètres du vent. Elle concerne la station de Maïné-Soroa (Niger oriental) entre 1950 et 1989. Elle porte sur les chroniques de 3 mesures journalières instantanées (à 6h, 12h et 18h) de la vitesse, de la direction du vent et de la visibilité horizontale liée aux poussières transportées par le vent. Les variations de vitesse et direction du vent permettent aisément de retrouver le changement majeur de la période 1967-1972 aussi bien que les fortes anomalies, tant aride (1984-1986) qu'humide (1951-1954). On observe une diminution très importante de la visibilité horizontale après 1969.

Aeolian dynamics variability between 1950 and 1989 in the Sahel: wind characteristics and horizontal visibility at Maïné-Soroa (eastern Niger)

ABSTRACT

Studies on climate change in the Sahel mainly concerns precipitations. However, these precipitations are not very representative of the permanent local conditions because they are concentrated during a part of the year (rainy season) and only during a few tens of days. On the contrary, the days without wind are rare. The aim of this study is thus to know if the climate change can be appraised by an analysis of wind parameters. The study concerns the meteorological station of Maïné-Soroa (Eastern Niger) between 1950 and 1989. It relates to the high frequency chronicle (3 measurements each day at 6:00, 12:00 and 18:00) of the speed and direction of the wind and the horizontal visibility related to the dust transported by the wind. The variations of speed and direction show the well-known major change during the period 1967-1972 as well as the strong anomalies, arid (1984-1986) and wet (1951-1954). Since 1969, we also observe a very important reduction in the horizontal visibility.

Introduction

Des sécheresses apparaissent au Sahel dès 1968 (Janicot, 1990) et affectent l'ensemble de la région à partir de 1970 (L'Hôte *et al.*, 2002). Au Niger, ces sécheresses ont conduit à un déplacement des isohyètes vers le Sud (Ozer et Ericum, 1995) et à un bouleversement de l'équilibre des écosystèmes qui sont naturellement fragiles (UNEP, 1992). Ainsi, à Maïné-Soroa (Fig. 1), la moyenne des cumuls annuels de précipitation est passée de 420 mm (en 42,5 jours de pluie) entre 1950 et 1969, à 305 mm (en 34 jours de pluies) entre 1970 et 1990 (Mugnier, 1995). Ceci a coïncidé avec une remobilisation des dunes (Alou Tidjani, 2006) et avec une augmentation des particules en suspension dans l'atmosphère, réduisant la visibilité horizontale (Ozer, 2004). En fait, les précipitations au Sahel sont peu représentatives des conditions locales permanentes, car concentrées sur une partie de l'année (saison des pluies) et ne concernant que quelques dizaines de jours seulement. Au contraire, les jours sans vent sont rares (Leroux, 1983). Cette étude a donc pour objectif d'appréhender les changements climatiques à partir des paramètres du vent. Elle concerne la station de Maïné-Soroa au Niger oriental.

1. PRESENTATION DU SITE D'ETUDE

1.1. CADRE CLIMATIQUE

Le Sahel est une large bande s'étendant des côtes du Sénégal jusqu'au Soudan, délimitée par convention entre les isohyètes 100 mm (Nord) et 700 mm (Sud) (Toupet, 1992). C'est une zone soumise aux oscillations de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) marquant le rythme saisonnier. Ainsi, on observe deux saisons distinctes : une saison des pluies (mai à septembre) marquée par la montée de la ZCIT vers le Nord et une saison sèche (octobre à avril) lorsque la ZCIT est en position sud.

La saison des pluies est marquée par la présence des vents dits de mousson, alizés de l'hémisphère sud qui se chargent de vapeur d'eau au-dessus du golfe de Guinée. Ces alizés sont déviés par la force de Coriolis en remontant vers la ZCIT et prennent une direction SW-NE (Janicot et Fontaine, 1993). La saison sèche est caractérisée par une prédominance des alizés de l'hémisphère nord, de direction sensiblement opposée, constituant l'harmattan, vent continental sec en provenance du Sahara. Pendant la saison sèche, les vents sont souvent chargés de poussières qui réduisent la

visibilité locale avant d'être entraînées sur de très longues distances à l'échelle planétaire (Anuforum, 2007 ; Schwanghart et Schütt, 2008).

Au Sahel, les précipitations non orageuses liées à la montée vers la ZCIT de l'air humide de mousson sont minoritaires. Les pluies viennent majoritairement de perturbations orageuses, les lignes de grains, liées à la confrontation de l'air humide de mousson et de masses d'air septentrionales qui franchissent la ZCIT. Ces structures orageuses se déplacent d'Est en Ouest sur le Sahel (Leroux, 1983).

2.2. CADRE GEOMORPHOLOGIQUE

Maïné-Soroa appartient à la partie occidentale du bassin du lac Tchad qui constitue la région administrative de Diffa (Niger oriental, Fig. 1). Cette région est constituée de zones aplanies dont l'altitude varie du NW au SE de 400 à 280 m environ. On distingue trois domaines géomorphologiques (Durand, 1995). Un domaine lacustre : le lac Tchad ; un domaine fluvio-éolien : le Kadzell (plaine alluviale de la Yobe) constitué en majorité de sables éoliens anciens, étalés par la Yobe et mélangés avec les apports fluviaux en grande partie silto-argileux ; un domaine éolien : le Manga (plateau sableux) qui est un erg ancien aplani à l'Holocène par l'alternance de nombreuses phases humides (ruissellement) et arides (érosion éolienne). Depuis le 19^{ème} siècle au moins, l'érosion éolienne a provoqué l'accumulation d'une bande de sables vifs en bordure du plateau du Manga, orientée NE-SW comme les vents dominants : le désert de Tal. Les sécheresses récentes ont conduit à l'apparition d'une nouvelle génération de dunes vives en de nombreux endroits du Manga et du Kadzell.

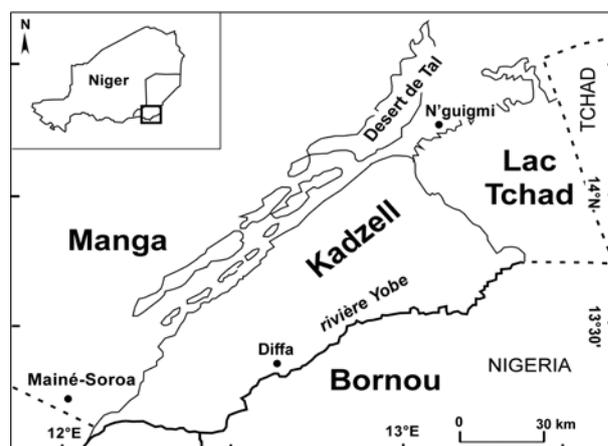


Figure 1 : Localisation du site d'étude et domaines géomorphologiques (d'après Durand, 1995).

Mainé-Soroa est située à la limite des domaines éolien (Manga) et fluvio-éolien (Kadzell) et se trouve sur une importante trajectoire éolienne NE-SW (Mainguet, 1984), qui se charge en poussières dans la dépression du Bodélé, au Nord du Tchad (Bertrand 1977; Mac Tainsh, 1987; Tanaka et Chiba, 2006). Cette zone est actuellement l'une des plus importantes sources de poussière dans le monde (Engelstaedter *et al.*, 2006).

2. DONNEES ET METHODES

La station météorologique de Mainé-Soroa (13°13' N, 12°7' E, altitude : 337 m) a été installée en 1936 comme station climatique. Elle est devenue station synoptique en 1961. Nous disposons d'un set de quarante années de mesures du vent (direction et vitesse) et de la visibilité horizontale à 6h, 12h et 18h, couvrant la période 1950-1989. Ces données sont issues des carnets originaux stockés à la

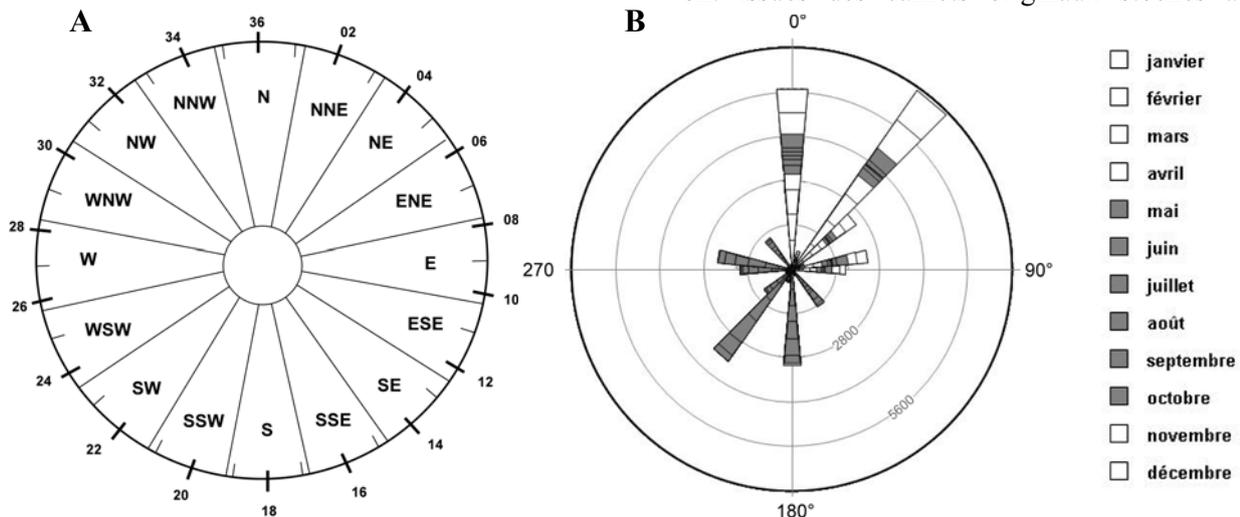


Figure 2 : Roses des vents. A : Rose des vents normalisée des relevés météorologiques. B : Ensemble des observations (6h, 12h et 18h) de la direction d'un vent significatif entre 1950 et 1989 à Mainé-Soroa. Les 36 directions possibles ont presque toutes été observées (Tab.1) mais l'échelle du graphique ne permet de visualiser que celles qui comptent au moins quelques centaines d'observations sur toute la période considérée.

direction	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
nbr obs 6h	0	262	7	2075	814	108	30	347	194	29	7	32	4	365	0	87	0	1123
nbr obs 12h	1	190	2	2592	836	184	270	1091	1034	32	58	51	11	619	2	53	0	850
nbr obs 18h	0	0	0	2230	0	0	0	973	455	0	0	0	8	429	0	0	0	1048
direction	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360
nbr obs 6h	0	175	0	1505	492	87	55	30	645	775	13	36	38	402	1	109	0	2280
nbr obs 12h	0	112	0	1204	389	81	53	23	695	1062	24	26	113	545	1	28	0	1519
nbr obs 18h	0	0	0	824	218	0	0	0	317	545	0	0	0	290	0	0	0	1896

Direction de la Météorologie Nationale du Niger et saisies sur logiciel Excel. Les vents sont mesurés par une girouette et un anémomètre à une hauteur de 10m. Les directions de vent sont enregistrées dans les carnets sur deux colonnes, en valeurs numériques (par dizaines de degrés) puis regroupées en secteurs de 22,5° (N, NNE, NE, etc. ; Fig.2A). Les vitesses de vent sont exprimées 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. Les valeurs inférieures à 0.5 m.s⁻¹ sont comptées pour 0. Dans ce cas, on considère que la mesure de la direction n'est pas significative et elle n'est pas relevée. Les données de direction de vent ont été traitées à l'aide du logiciel Oriana 2 qui a permis de tracer

les roses des vents à partir des valeurs numériques (en degrés). Ce logiciel représente en même temps le nombre des observations de vents significatifs par direction (Fig. 2B). Les vitesses et visibilités horizontales ont fait l'objet de calculs statistiques classiques : moyennes interannuelles, moyennes annuelles, moyennes mensuelles et tendances (régression locale non paramétrique), à l'aide du logiciel/programme R. Le classement des données de visibilité que nous avons adopté est proche de celui utilisé par Anuforum (2007) au Nigeria : visibilités médiocres lorsque la distance est comprise entre 5 et 10 km, visibilités faibles entre 5 et 1 km et visibilités très faibles avec des distances inférieures ou égales à 1 km.

3. RESULTATS

3.1. DIRECTIONS

La figure 2B représente la rose de direction des trois observations journalières (6, 12 et 18h) cumulées sur 40 ans. Elle montre une prédominance des directions NE, SW, N et S pour les 83,5 % des observations qui ont mesuré un vent significatif ($\geq 0.5 \text{ m.s}^{-1}$). Parmi ces 83,5 %, les directions NE (21,4 %), N (13 %) et E (9,3 %)

caractérisent la saison sèche (septembre/octobre à avril). Les directions SW (10,5 %), S (9,2 %), W (6,9 %), SE (3,2 %) et NW (3,2 %) sont quasi-exclusives de la saison des pluies (mai à septembre/octobre). Les vents significatifs sont les plus fréquents à 12h avec 13751 mesures, soit 31,4 % des observations totales (27,6 % à 6h et 24,5 % à 18h). Autrement dit, pour 94 % des jours observés, un vent $\geq 0.5 \text{ m.s}^{-1}$ a été mesuré à 12h et sa direction notée.

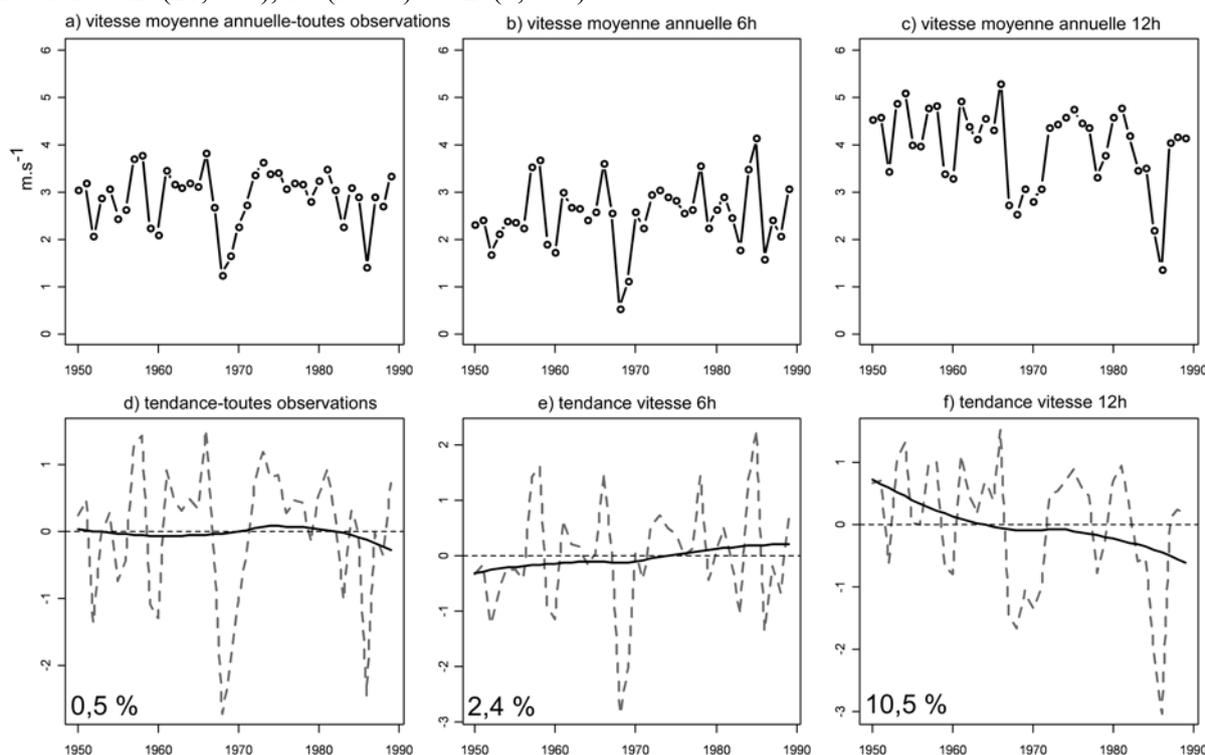


Figure 3 : Vitesses moyennes annuelles de 1950 à 1989 et tendances. Les vitesses moyennes sont calculées en comptant pour 0 les mesures de vents non significatifs ($v < 0.5 \text{ m.s}^{-1}$). Les tendances sont calculées selon le modèle « loess » du logiciel libre R (régression locale non paramétrique) ; la tendance n'est significative que lorsque la variance est supérieure à 10%.

3.2. VITESSES

D'une manière générale, les vitesses sont nettement plus importantes à 12h qu'à 6h. Toujours à 12h, la moyenne des vitesses obtenues en prenant en compte les vents nuls est de $4,28 \text{ m.s}^{-1}$ ($\sigma = 1,62$) de 1950 à 1967 et $3,72 \text{ m.s}^{-1}$ ($\sigma = 1,93$) de 1968 à 1989. Sur l'ensemble de la série, on note deux baisses importantes de la vitesse moyenne annuelle, la première sur la période 1967-1971 et la deuxième, moins marquée que la première, en 1986 (Fig. 3a). Les tendances, indiquent des variations opposées entre 6h et 12h. Il y a une tendance à l'augmentation des vitesses à 6h (Fig. 3e) et à la baisse à 12h (Fig. 3f). La tendance sur l'ensemble des observations étant légèrement à la baisse (Fig. 3d).

3.3. DIRECTIONS ET VITESSES

Pour cette analyse, nous avons regroupé les directions selon les subdivisions utilisées en météorologie (Fig.2A). L'analyse des vitesses mesurées en fonction des directions permet de mettre en évidence des variations au cours du temps. Nous n'avons examiné ici que les directions principales NE/SW, N/S et E/W aux heures d'observations extrêmes (6h et 12h), les mesures à 18h étant généralement intermédiaires. Sur la figure 4, chaque trait vertical (en gris) correspond à une mesure journalière de vent significatif ($v \geq 0.5 \text{ m.s}^{-1}$). Sur l'axe NE (-) / SW (+), on observe une baisse de la vitesse moyenne mensuelle pendant les années 1968 à 1971, conséquence d'une diminution des vents significatifs, encore plus marquée pour les vents de NE que de SW. Cette

diminution est beaucoup plus marquée à 6h (Fig. 4a) qu'à 12h (Fig. 4b). Une deuxième anomalie est observée durant les années 1984 à 1986. Celle-ci est plus marquée à 12h, avec une quasi-absence des vents significatifs sur les axes NE-SW, E-W et S (Fig. 4b, d et f), mais un important renforcement des vents du N (Fig. 4f). Cette quasi-exclusivité des vents de Nord à 12h pose question. Il ne peut s'agir d'une panne d'appareil puisque des relevés variés existent à 6h pendant la même période. Il conviendrait donc de pouvoir vérifier la

retranscription des relevés manuscrits. Sur la direction N-S, on observe une troisième anomalie avec une quasi-absence des vents de 1951 à 1954. Les trois anomalies observées ne sont pas comparables : celle de 1968-1970 est connue comme une crise d'aridité marquant un changement majeur du climat, celle de 1984-1986 comme une anomalie aride et celle de 1951-1954 comme une anomalie humide (Nicholson, 2001).

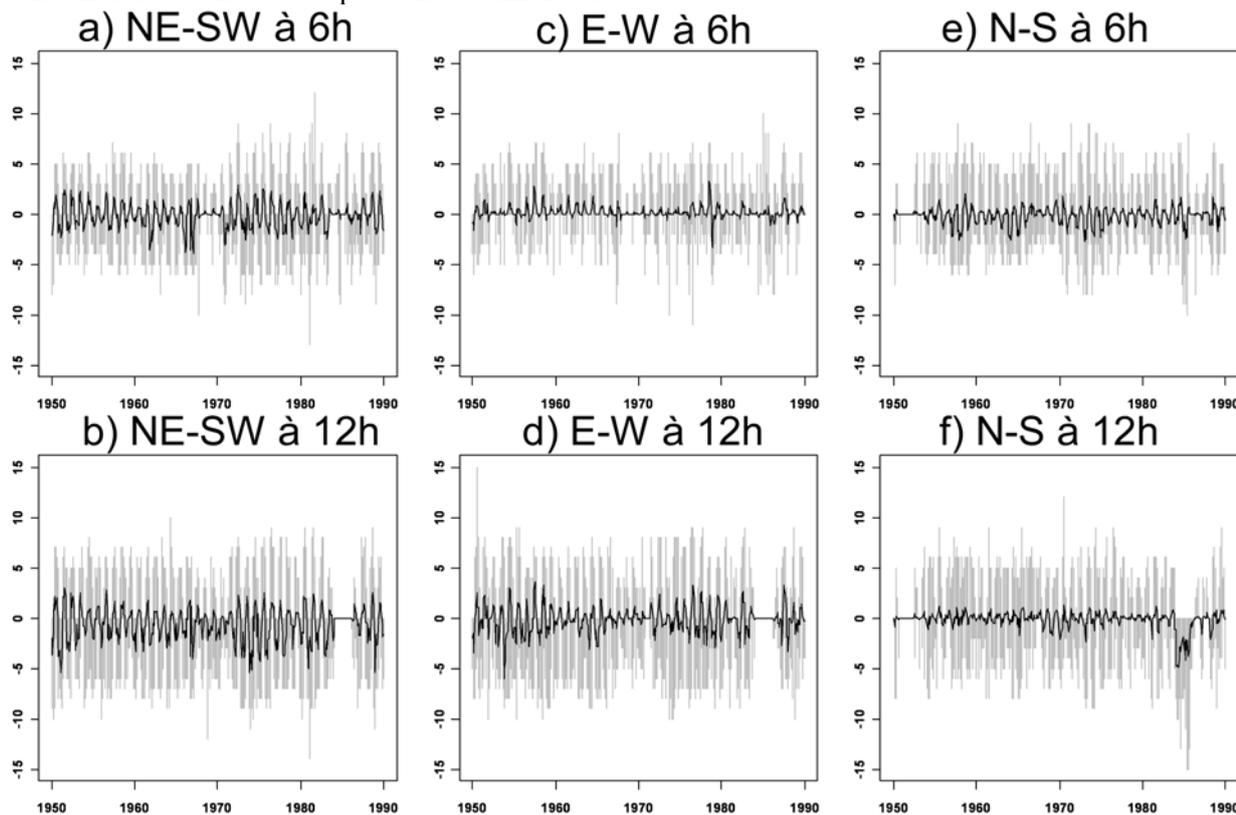


Figure 4 : Vitesses des vents ($m.s^{-1}$) sur les principaux axes. Mesures journalières en gris et moyennes mensuelles en noir.

3.4. VISIBILITES

Après 1969, les visibilitées moyennes annuelles montrent une forte baisse. On distingue ainsi deux périodes par les valeurs moyennes : 26 km ($\sigma = 0,92$; 1950-1969) et 16,4 km ($\sigma = 0,93$; 1970-1989), la valeur minimale (11,8 km) étant atteinte en 1985 (Fig. 5a).

La baisse de visibilité moyenne après 1969 est due essentiellement à l'augmentation des occurrences des visibilitées médiocres et faibles à toutes les heures (Fig. 5b à g) et des visibilitées très faibles à 12h (Fig. 5i). Pour ces visibilitées très faibles, on note une inversion entre les observations à 6h et 12h (Fig. 5h et j).

Les visibilitées médiocres ($5 < V_b < 10$ km) et faibles ($1 < V_b < 5$ km) coïncident avec les vents

des secteurs N à E. Les visibilitées très faibles (≤ 1 km) coïncident plutôt avec les vents des secteurs NE à E, mais aussi avec des vents venant du SW.

4. DISCUSSION

A l'échelle de ce travail préliminaire sur une seule station, il est difficile de percevoir un lien entre les différents paramètres analysés. Ainsi, il serait tentant d'expliquer les variations des visibilitées par celles des vitesses, mais dans le détail les données sont contradictoires. On reconnaît deux périodes de baisses importantes des vitesses moyennes annuelles (1967-1968 et 1985-1986, Fig. 3). La première est la plus marquée à 6h ($0,53 m.s^{-1}$ en 1968) et la seconde à 12h ($1,87 m.s^{-1}$ en 1986). Dans le premier cas, on observe ensuite une augmentation de la vitesse qui s'accompagne d'une

diminution importante de la visibilité (1968-1973, Fig. 3 et 5a); au contraire, dans le second cas, l'augmentation de la vitesse correspond à une augmentation de visibilité (1986-1987, Fig. 3 et 5a). De plus, dans le premier cas, on ne revient pas aux conditions de visibilité antérieures, tant pour la visibilité moyenne annuelle (Fig. 5a) que pour les différentes heures d'observations (Fig. 5b-j). On remarque notamment une augmentation importante des épisodes de visibilités médiocres, faibles et très

faibles à 12h et à 18h après 1970 (Fig. 5e-j). Il est possible que la diminution générale de la visibilité après 1968 soit liée à la très nette diminution de vitesse à 12h qui ne permettrait plus une dispersion des poussières. Mais, cette très nette diminution de la vitesse ne se maintient pas à partir de 1972 alors que la diminution de la visibilité se maintient.

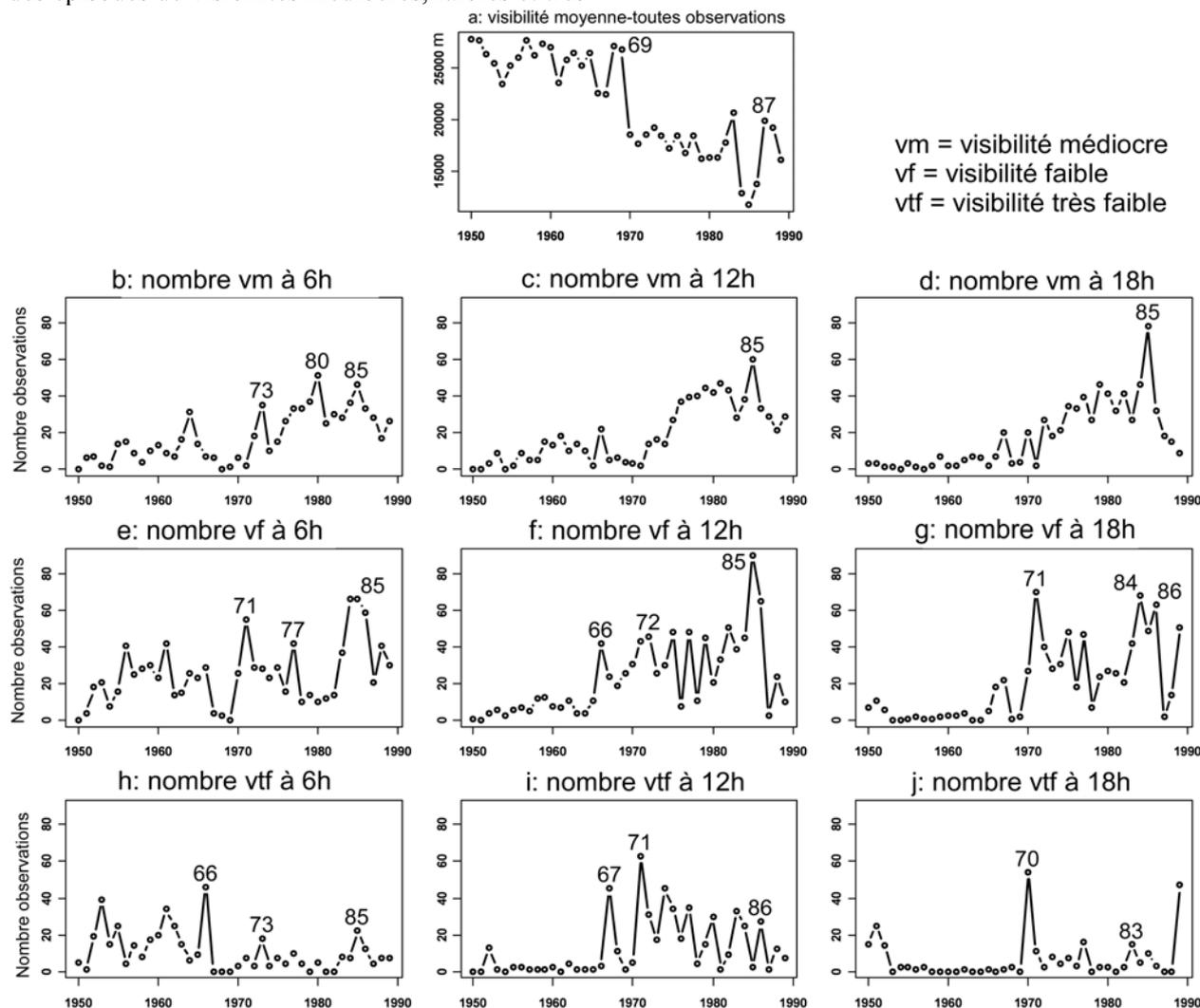


Figure 5 : Evolution de la visibilité moyenne annuelle et nombres annuels d'observations de visibilités médiocres (vm), faibles (vf) et très faibles (vtf) à 6h, 12h et 18h. Les chiffres sur les courbes correspondent aux années.

On pourrait aussi envisager une relation à l'échelle régionale avec la pluviosité. En effet, Courrel et Chamard (1987) observent qu'en conséquence des sécheresses de la décennie 1970, les formations végétales au Sahel, notamment les steppes arbustives, sont passées de l'état diffus à l'état contracté. La couverture végétale protégeant le sol de l'érosion éolienne, la pluviométrie pourrait donc avoir un lien avec la visibilité. Pourtant, en

considérant la pluviométrie à Maïné-Soroa comme étant représentative à l'échelle régionale (Mugnier, 1995), il est là encore difficile de percevoir un lien précis avec la visibilité.

On retrouve bien deux grandes périodes (1950-1967 et 1968-1989) tant pour la quantité de pluie annuelle que pour sa répartition (Fig.6), mais des contradictions apparaissent à l'échelle inter-annuelle. Ainsi, la pluviométrie des années 1984-

1985 où la visibilité moyenne est fortement dégradée (Fig.5a), ne paraît pas fondamentalement différente de celle des années 1981-1983 et 1986-1987, où la visibilité s'améliore (Fig. 5 et 6). La pire saison des pluies en quantité et en répartition, 1987 (Fig.6), correspond même à une amélioration notable de la visibilité moyenne (Fig.5a).

Conclusion

Les paramètres relatifs au vent sont bien des indicateurs pertinents de l'évolution du climat au Sahel. Ils soulignent le changement majeur survenu vers 1967-1972, mais ils enregistrent aussi des variations moins importantes, aussi bien pendant les anomalies arides (1984-1986) qu'humides (1951-1954). A chaque fois, les caractéristiques de direction et de vitesse des vents sont différentes.

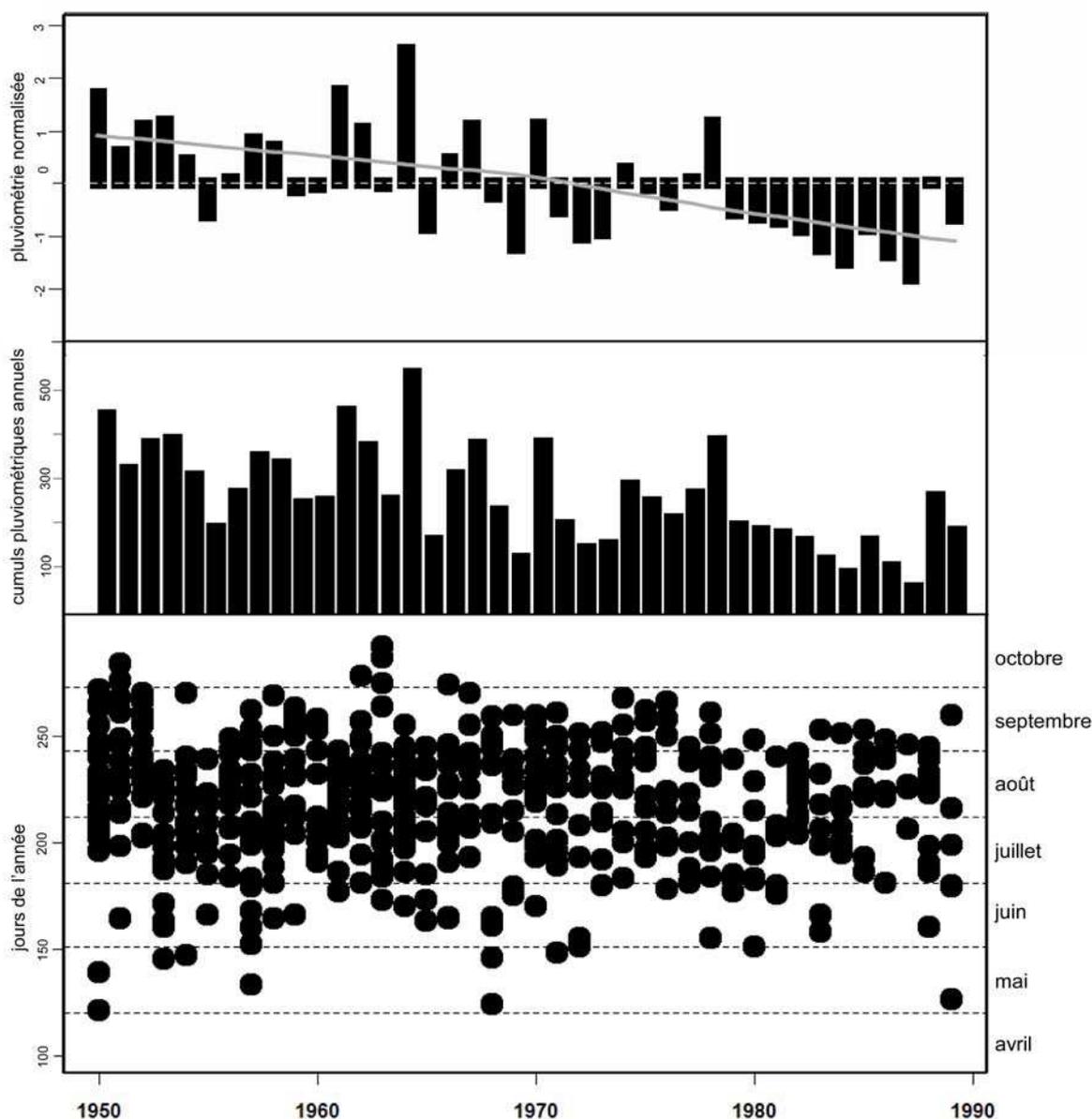


Figure 6 : Evolution de la pluviométrie annuelle et du fractionnement de la saison des pluies. Chacun des points noirs représente une pluie ≥ 10 mm, et son diamètre correspond à un intervalle de 10 jours. En effet, au Nigeria voisin, la valeur journalière de 10 mm de pluie a été définie comme limite du « bruit de fond » pluviométrique au-delà duquel on peut observer des variations significatives de l'évolution climatique (Olaniran, 1991). Aussi, à titre exploratoire, nous avons étudié la répartition temporelle des pluies ≥ 10 mm au sein de chaque saison des pluies, ainsi que des périodes de plus de 10 jours entre ces pluies ; les trop longues interruptions étant défavorables à la végétation. Ainsi, la dernière longue saison des pluies sans interruptions (plus de deux mois) date de 1964. A partir de 1968, on remarque un fractionnement important de la saison des pluies qui s'ajoute au déficit pluviométrique général et à la diminution du nombre de jours de pluies.

Ainsi, le changement majeur (1967-1972) correspond-il à une très forte diminution des vents

de NE, SW, E, et W à 6h, à une moins forte diminution de ces mêmes vents à 12h et, au

contraire, à une légère augmentation des vents de N et S à 6h et 12h. L'anomalie humide (1951-1954) correspond à une intensification des vents de NE et SW à 6h et 12h alors que les vents de N et S disparaissent à 6h comme à 12h. Enfin, pendant l'anomalie aride (1984-1986), les vents de NE et SW diminuent fortement à 6h et disparaissent à 12h ; les vents d'E et W sont plus intenses à 6h et disparaissent à 12h. Les vents de N et S sont très diminués à 6h, alors qu'à 12h, ceux de S disparaissent pendant que ceux du N sont anormalement intenses. L'analyse des paramètres du vent replacés dans le cadre de la circulation atmosphérique générale apporterait donc plus d'informations sur la nature et l'origine du changement que la seule évolution de la pluviométrie annuelle.

Néanmoins, il conviendra d'abord de vérifier, à partir de comparaisons avec des stations proches, la fiabilité des mesures réalisées à Mainé-Soroa. Ce type de données n'est pas *a priori* à l'abri de problèmes mécaniques, voire humains, qui n'apparaissent pas forcément à la lecture des cahiers des relevés (Ozer, 2004). La quasi-exclusivité des vents du Nord à 12h en 1984-1985 aux dépens de toutes les autres directions sera un point à vérifier en priorité.

Les données sur la visibilité horizontale sont également intéressantes, mais la forte diminution générale de la visibilité après 1969 (moyenne passant de 26 km à 16,4 km) a une origine complexe qu'une simple analyse visuelle des graphiques ne permet pas de comprendre. Il conviendrait sans doute d'étudier les relations entre les différents paramètres à une échelle saisonnière et d'utiliser des méthodes statistiques (analyse factorielle des correspondances, segmentation des séries, analyses en ondelettes, etc.). Dans tous les cas, il paraît également nécessaire d'étudier l'évolution de la zone majeure de production de poussière au Nord du Tchad replacée, là aussi, dans le cadre de l'évolution de la circulation atmosphérique générale.

Les données météorologiques ont été obtenues grâce à un accord entre la DMN et le projet ROSELT-Niger que nous remercions tous deux ici.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Alou Tidjani A. (2006) - *Apports de la télédétection dans l'étude de la dynamique environnementale de la région de Tchago (nord-ouest de Gouré, Niger)*. Mém. DEA en Sciences, Université de Liège, 82 p.

Anuforom A. C. (2007) - Spatial distribution and temporal variability of Harmattan dust haze in sub-Saharan West Africa. *Atmospheric Environment*, 41, 9079-9090.

Bertrand J.-J. (1977) - *Action des poussières subsahariennes sur le pouvoir glacigène de l'air en Afrique de l'Ouest*. Thèse d'état, Université de Clermont – Ferrand, 197 p.

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.

Engelstaedter S., Tegen I., Washington R. (2006) - North African dust emissions and transport. *Earth-Science Reviews*, 79 (1-2), 73-100.

Janicot S. (1990) - *Variabilité des précipitations en Afrique de l'Ouest et circulations quasi-stationnaires durant une phase de transition climatique*. Thèse de Doctorat, Université Paris 6, 600 p.

Janicot S. et Fontaine B. (1993) - L'évolution des idées sur la variabilité interannuelle récente des précipitations en Afrique de l'Ouest. *La météorologie* 8è série, 1, 28-53.

Leroux M. (1983) - *Le climat de l'Afrique tropicale*. - Champion, Paris, 2 vol., 636 p + atlas.

L'Hôte T., Mahé G., Somé B., Triboulet J. P. (2002) - Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000, the drought continues. *Hydrological Sciences Journal*, 47 (4), 563-572.

Mc Tainsh G. (1987). - Desert loess in northern Nigeria. *Z. Geomorphologie N. F.*, 31 (2), 145-165.

Mainguet M. (1984). - Space observation of Saharan aeolian dynamics. In: Farouk El-Baz (ed.) "*Deserts and arid lands*". Kluwer Acad. Pub., 59-77.

Mugnier S. (1995) - *Pluviométrie journalière et types de pluie au Sahel central : Manga et Bornu (Niger et Nigeria)*. Evolution de 1950 à 1990. Mémoire DEA « Climats et contraintes climatiques », U. Dijon, 48 p.

Nicholson S. E. (2001) - Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries. *Clim. Res.*, 17, 123-144.

Olaniran O. J. (1991) - Evidence of climatic change in Nigeria based on annual series of rainfall of different daily amounts, 1919-1985. *Climatic change*, 19, 319-340.

Ozer P., Erpicum M. (1995) - Méthodologie pour une meilleure représentation spatio-temporelle des fluctuations pluviométriques observées au Niger depuis 1905. *Sécheresse*, 6 (1), 103-108.

Ozer P. (2004) - Les lithométéores en région sahélienne : un indicateur climatique de la

- désertification. *Revue internationale d'écologie et de géographie tropicales*, Liège, 24, 312 p.
- Schwanghart W., Schütt B. (2008) - Meteorological causes of Harmattan dust in West Africa. *Geomorphology*, 95 (3-4), 412-428.
- 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 (1-4), 88-104.
- Toupet C. (1992) - *Le Sahel*. Nathan Ed., Paris, 192 p.
- UNEP (1992) - *World atlas of desertification*. Edward Arnold, Londres, 69 p.