

Les poussières terrigènes au Sahel – un marqueur climatique ou anthropique ?

Jean Louis RAJOT^{1,2}, Amadou ABDOURHAMANE TOURE^{1,3,4}, Rodrigue GUILLON⁴, Zibo GARBA³, Christophe PETIT⁵, Vincent BICHET⁶, Alain DURAND⁷, David SEBAG^{7,8}, Béatrice MARTICORENA².

1- IRD, BIOEMCO, UMR 211, Paris, France

2- LISA, UMR CNRS 7583, Université Paris Est Créteil, Créteil, France

3- Université Abdou Moumouni, Département des Sciences de la Terre, BP 10662, Niamey, Niger

4- Université de Bourgogne, Laboratoire ARTeHis, UMR 5594 CNRS, Dijon, France

5- Université Paris I Panthéon Sorbone, ARSCAN, Paris France.

6- Université de Franche-Comté, Laboratoire Chrono-Environnement, UMR 6249 CNRS, Besançon, France

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

8- Université de Montpellier, Laboratoire HSM, UMR 5569 IRD, Montpellier, France

Résumé

Dans la région de Niamey, le cycle annuel des poussières terrigènes est bien documenté tant par des mesures directes, au sol ou aéroportées, que par télédétection. Il est possible de décrire à la fois l'origine des poussières, leurs conditions de transport et leurs caractéristiques. Même au début de la saison des pluies, l'atmosphère sahéenne est encore dominée par les poussières sahariennes transportées en altitude. Cependant, dans cette zone, les émissions locales qui traduisent l'aptitude du sol à s'éroder sont actuellement liées aux activités humaines. Dans quelle mesure ces activités peuvent-elles brouiller le signal climatique généralement attribué aux aérosols terrigènes ?

Desert dust in the Sahel – climatic or anthropogenic tracer?

Abstract

In Niamey region, the annual dust cycle is well documented by ground base, airborne and remote-sensing measurements. They allow the description of sources, transport pattern and dust characteristics. Even at the beginning of the rainy season, Saharan dusts, transported in elevated atmospheric layer are prevalent in the Sahel. Nevertheless, in this area, local emissions are currently clearly linked to agricultural activities. Do these activities confuse the climatic information generally attributed to desert dust?

Introduction

Au cours du quaternaire, les périodes glaciaires étaient accompagnées de phases d'érosion éolienne majeures. Les particules érodées et transportées par le vent se sont déposées en périphérie des zones sources formant les dépôts de Loess dont l'épaisseur varie de quelques décimètres à plusieurs centaines de mètres en Chine par exemple. Les flux de dépôts éoliens à l'origine de ces formations dépasseraient 4 mm par an par exemple pour la formation des Peoria Loess dans l'Iowa (USA) (Muhs and Bettis, 2000). Plus récemment au cours de l'Holocène, des variations climatiques moins intenses qu'au cours des cycles glaciaires / interglaciaire du Pléistocène se sont néanmoins traduites par de remarquables changements dans les flux de dépôts de poussières désertiques qui traduisent là encore des variations dans l'intensité de l'érosion éolienne par exemple sur le Sahara (deMenocal et al. 2000). Encore plus récemment, des mesures directes de visibilité, liées aux concentrations de poussières dans l'atmosphère ont clairement montré une relation entre les périodes de sécheresse au Sahel et l'augmentation de la fréquence et de la durée des épisodes de brumes sèches (N'Tchayi Mbourou et al., 1997; Prospero and Nees, 1986 ; Dieppois et al., ce volume). Pour ces périodes récentes, il est théoriquement possible de croiser à la fois les mesures de la dynamique actuelle et leur enregistrement dans les sédiments. Pourtant les communautés travaillant sur ces deux domaines de recherche se connaissent relativement mal. Dans le cadre du projet Corus2 1664 (Impact de la pression anthropique et du changement global sur les

flux sédimentaires en zone sahélienne : rôle et évolution de la dynamique éolienne et des aérosols terrigènes) nous avons tenté de mener de front ces deux approches en couplant des mesures de la dynamique actuelle généralement effectuées ou initiées dans le cadre de l'expérience AMMA et des études de carottes sédimentaires échantillonnées dans des lacs récemment apparus au Sahel (Abdourhamane Touré et al., Ce volume).

L'érosion éolienne est un processus complexe qui repose sur deux facteurs : l'intensité de l'agent érosif : le vent, et l'aptitude des surfaces à s'éroder. C'est un phénomène à seuil. L'érosion ne se déclenche que lorsque le vent dépasse un seuil d'intensité contrôlé par les propriétés des surfaces. L'érosion sera d'autant plus intense que le seuil sera largement dépassé, mais aussi que la durée de dépassement de ce seuil sera longue. Le seuil d'érosion est fixé par la taille des particules libres à la surface des sols, par la rugosité de la surface, par l'humidité de l'horizon de surface et par le taux de recouvrement par la végétation (Marticorena et Bergametti, 1995). Si l'influence de l'homme sur les vitesses de vent paraît actuellement peu marquée par rapport au forçage climatique (Vautard et al. 2010), les activités anthropiques modifient en revanche très fortement les surfaces des sols essentiellement par leur mise en culture et/ou par leur utilisation comme pâturage.

L'objectif de cette présentation est de montrer l'intérêt de prendre en compte la connaissance de la dynamique actuelle de l'érosion éolienne pour interpréter les enregistrements sédimentaires en particulier en termes d'influence de l'homme sur le milieu et de son éventuelle traduction dans les flux sédimentaires de poussière à différentes échelles d'espace.

Matériel et méthode

La zone d'intérêt du programme Corus2 concerne le Sahel et le Sahara, même si les mesures directes ont été effectuées spécifiquement au sud ouest du Niger (environ 13° N et 2° E - 500 mm de pluie annuelle en moyenne). En effet, les poussières mesurées peuvent être d'origine locale, mais aussi intégrer des sources sahariennes beaucoup plus éloignées. Plusieurs types d'instruments de mesures ont été utilisés à différents pas de temps de mesure dans le cadre du programme AMMA et/ou du programme Corus. Ils comprennent des mesures optiques qui renseignent sur les quantités et les propriétés des aérosols contenus dans l'ensemble de la colonne atmosphérique (Holben et al., 2001 - <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). Des mesures directes de flux :

- horizontaux de particules de la taille des sables (flux de saltation),
- verticaux de dépôt de particules de la taille des limons et des argiles transportées en suspension dans l'air.

Au cours de 2 périodes de mesures intensives effectuées dans le cadre du programme AMMA, des flux d'émission d'aérosol ont également été mesurés (Sow et al. 2009) ainsi que des prélèvements en ligne et sur filtre de poussières en suspension dans l'air qui permettent de déterminer les concentrations, les distributions granulométriques et les compositions élémentaires des aérosols. Les différents dispositifs instrumentaux sont décrits en détail par Rajot et al. (2008), Marticorena et al. (2010) et Abdourhamane Touré et al. (Ce volume).

Résultats

Cycle annuel

Au Niger comme dans tout le Sahel, le cycle saisonnier est rythmé par l'alternance de deux régimes de vents induite par le déplacement de la Zone de Convergence Intertropicale (ITCZ).

De novembre à mars, l'ITCZ est au sud du Sahel et le vent au sol, marqué par un très fort cycle diurne, souffle depuis le nord est : c'est l'Harmattan, vent sec typique de la saison sèche. De mai à septembre, l'ITCZ est au nord du Sahel et le vent au sol souffle depuis le sud ouest : c'est le flux de mousson, chargé d'humidité, qui engendre les pluies. Celles-ci ne débutent vraiment qu'à partir du mois de juin sur la zone d'étude. Les mois d'avril et d'octobre sont des périodes de transition entre ces deux saisons lorsque l'ITCZ se déplace vers le nord et lorsqu'elle redescend vers le sud. Au niveau de l'ITCZ, le vent d'Harmattan passent au-dessus du flux de Mousson ce qui crée donc, au sud, deux couches atmosphériques superposées avec des vents de directions sensiblement inverses.

Comment se situent, dans ce cadre climatique, les aérosols terrigènes émis par l'érosion éolienne des sols? La figure 1 montre l'épaisseur optique (AOT) qui renseigne sur le contenu en aérosol intégré sur l'épaisseur totale de la colonne atmosphérique et le coefficient d'Angstrom qui est d'autant plus faible que la taille des particules est grande. Indirectement ce dernier paramètre permet d'identifier dans cette région la présence d'aérosols terrigènes qui se caractérisent par leur grande taille (Holben et al 2001). Un cycle annuel apparaît nettement sur cette figure avec une concentration maximale en aérosols terrigènes de janvier à juillet. Cette période de forte occurrence d'aérosols terrigènes ne suit donc pas le cycle saisonnier local, mais se trouve à cheval sur la fin de la saison sèche, quand souffle l'Harmattan, et le début de la saison des pluies quand souffle le vent du sud ouest.

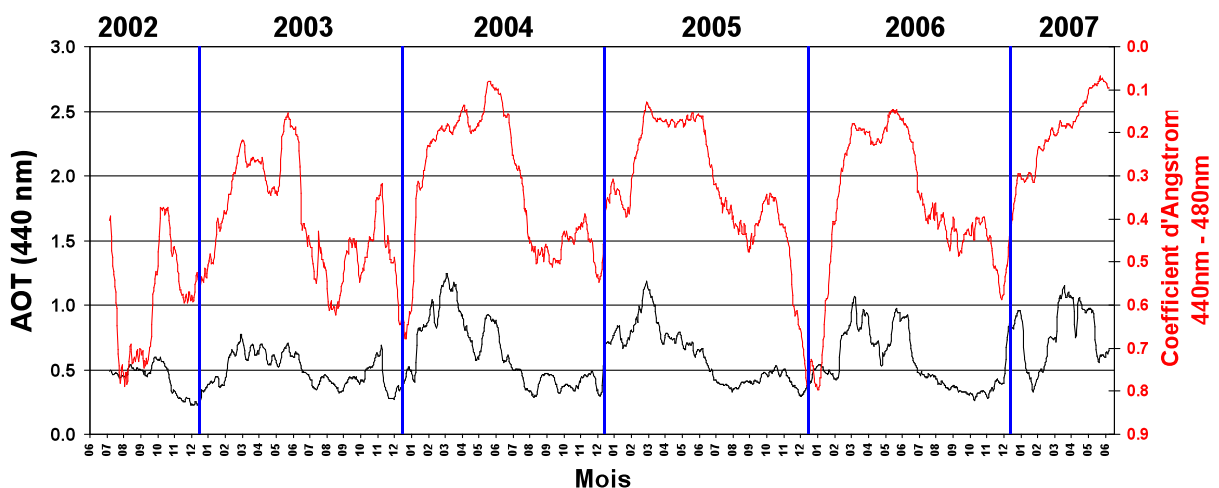


Figure 1. Epaisseur optique en aérosol et coefficient d'Angstrom de 2002 à 2007 issus de la base de données AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) Moyenne glissante sur 30 jours des données de qualité 2. D'après Rajot et al. 2008.

La figure 1 montre aussi une très forte variabilité interannuelle avec des années où la présence d'aérosols terrigènes est beaucoup moins marquée telle qu'en 2003.

Localisation des aérosols terrigènes dans la colonne atmosphérique

Comme indiqué ci-dessus, ces mesures sont valables pour l'ensemble de la colonne atmosphérique sans présager de la localisation des aérosols dans les couches atmosphériques ni de leur origine. Le suivi des concentrations au sol (Rajot et al., 2008 ; Marticorena et al., 2010) les mesures optique par LIDAR (Cavalieri et al., 2010 ; Léon et al. 2009) et les mesures aéroportées (Formenti et al., sous presse) montrent que les aérosols terrigènes se trouvent

dans les couches de surface pendant la période d'harmattan et sont ensuite le plus souvent localisés en altitude après le passage de l'ITCZ.

Origine des aérosols terrigènes : Sahara / Sahel

La localisation des aérosols terrigènes dans les couches atmosphériques ne permet pas d'en déduire directement leur origine. Les mesures directes de l'érosion éolienne réalisées dans la région de Niamey depuis le début des années 1990 (voir Bielders *et al.* 2004 pour une revue, Abdourhamane Touré *et al.*, Ce volume) montrent très clairement que la phase d'érosion éolienne se situe de mai à mi-juillet, c'est-à-dire après le passage de l'ITCZ lorsque le flux de mousson est installé sur la zone. Elles montrent aussi que l'érosion se produit quasi exclusivement sur les sols cultivés. Cette érosion est causée soit par une augmentation d'intensité des vents du sud ouest du flux de mousson, soit par les vents très violents associés aux systèmes convectifs locaux ou de mésoéchelle qui génèrent l'essentiel des pluies au Sahel.

Ces mesures démontrent donc que pendant la phase d'Harmattan l'essentiel des poussières reconnues ne sont pas émises localement, à partir du Sahel cultivé, mais sont plutôt originaire des zones désertiques. Ce résultat est largement confirmé par l'étude de la composition des poussières couplée à l'analyse des rétro-trajectoires des masses d'air chargées en poussière (e.g. Chou *et al.* 2008 ; Rajot *et al.* 2008).

En revanche, la situation est plus complexe après le passage de l'ITCZ, lorsque le flux de mousson est installé et que l'érosion locale des champs cultivés se produit. La figure 2A montre l'évolution des concentrations en aérosols terrigènes et les périodes d'érosion locale. Celles-ci provoquent une augmentation considérable des concentrations en aérosols terrigènes dans la couche de surface. Mais dès que cette érosion cesse, les concentrations chutent généralement très rapidement. Ceci peut s'expliquer soit par :

- le lessivage des poussières par les pluies qui suivent généralement les événements d'érosion provoqués par les systèmes convectifs (Desboeufs *et al.* 2010),
- la sédimentation rapide de ces poussières en l'absence de pluie comme on l'observe après les événements du 9 juin et du 18 juin (figure 2A),
- le transport des poussières vers le nord est dans le flux de mousson.

Cependant en dehors des relativement brèves périodes d'érosion et d'advection locale, les variations de concentrations suivent un cycle journalier sensiblement calqué sur le cycle des températures de l'air (Figure 2B). Cette dynamique s'explique par le développement d'une couche limite atmosphérique par turbulence thermique. Cette couche limite devient d'autant plus épaisse que la température de surface est élevée, elle atteint donc son épaisseur maximale au maximum de température. Lorsque cette couche limite est suffisamment épaisse, elle rejoint la couche atmosphérique d'altitude (correspondant à l'Harmattan) généralement chargée en poussières terrigènes et entraîne ces poussières près de la surface d'où l'augmentation de concentration mesurée au sol. Dans ce cas, la composition des aérosols est généralement plus proche des compositions mesurées en saison sèche et témoigne alors d'une origine plutôt désertique des poussières.

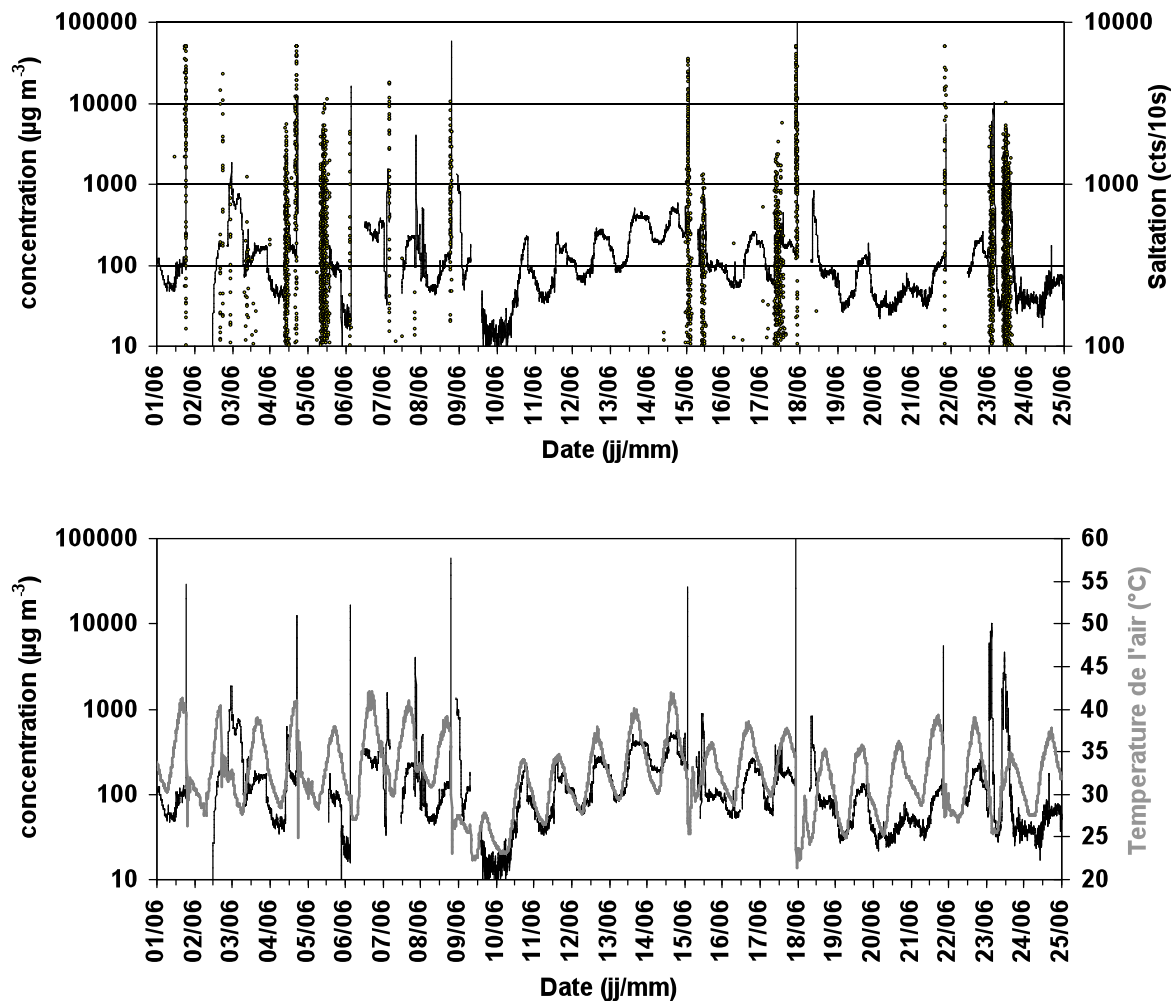


Figure 2 : Concentration en aérosol terrigène mesurée à 6 m de haut (ligne noire continue) avec les périodes de saltation (points) qui révèlent les événements locaux d'érosion éolienne des sols (A) et avec la température de l'air à 6 m de haut (ligne grise continue) (B).

Conséquence sur les flux sédimentaires.

Au sud ouest du Niger, les aérosols terrigènes mesurés près de la surface du sol **en période d'harmattan** ne sont pas émis localement. Ils ne peuvent donc pas témoigner d'une activité anthropique de mise en culture. Cette affirmation valable pour le sud ouest du Niger pourrait être nuancée en fonction de la zone d'étude. En effet, Abdourhamane Touré *et al.* (2011) ont montré que si les sols cultivés sont nus en saison sèche les vents d'harmattan sont alors suffisamment forts pour provoquer l'érosion éolienne. Or certaines pratiques culturales à l'est du Niger consistent actuellement à collecter les résidus de culture à la surface des champs pour les utiliser comme fourrage. L'érosion locale peut alors se produire. Mais ces émissions locales liées à la mise en culture seront très généralement masquées par les fortes concentrations d'aérosols transportés depuis le nord est, donc provenant de zones non cultivées.

En début de période de mousson, il y a indéniablement une influence majeure de l'homme sur la production d'aérosol en zone sahélienne : si les sols n'étaient pas cultivés, il n'y aurait quasi pas d'érosion éolienne dans la zone d'étude. Cependant, les mesures montrent qu'une

grande partie de ces émissions locales sédimente également localement soit par dépôt humide, soit par dépôt sec. Une partie des émissions locales est également transportée dans le flux de mousson vers le nord est. La question est alors de savoir si ces émissions d'origine sahélienne peuvent être incorporées à la couche d'Harmattan pour être ensuite transportée en altitude vers l'ouest et au dessus de l'océan Atlantique. Les mesures aéroportées réalisées en 2006 dans le cadre de l'expérience AMMA (Formenti et al., 2011) ont permis d'identifier quelques cas qui suggèrent un tel processus. Mais là encore ces poussières Sahéliennes sont mélangées à des aérosols d'origine purement désertique ou émis dans les zones non cultivées du nord du Sahel.

Ces études de dynamique éolienne actuelle menées dans le cadre de AMMA et de Corus2 montrent donc que l'essentiel des aérosols terrigènes exportés hors de l'Afrique ne proviennent pas des zones cultivées. Ainsi, l'hypothèse retenue par Mulitza et al. (2010) consistant à expliquer les flux sédimentaires, mesurés dans une carotte au large de Nouakchott, par les dépôts d'aérosols émis en saison sèche à partir des sols cultivés de façon intensive dès le 18^{ème} siècle en Afrique de l'Ouest, paraît doublement fausse : non seulement il n'y a pas d'érosion éolienne des sols cultivés en saison sèche, mais en plus les masses d'air transportant les aérosols au large de Nouakchott ne proviennent jamais des zones cultivées. Cet exemple récent démontre toute l'importance de prendre en compte les dynamiques actuelles pour interpréter les archives sédimentaires.

Si l'intense mise en culture actuelle des sols sahéliens (Loireau, 1998 ;Hiernaux *et al.* 2009) ne semble pas encore se traduire à large échelle dans les quantités d'aérosols exportées hors de l'Afrique, nous avons vu cependant qu'à l'échelle locale les flux sédimentaires sont considérablement modifiés par la mise en culture. Cependant, comme le montrent Abdourhamane Touré et al. (Ce volume), l'enregistrement de ces flux est extrêmement difficile à mettre en évidence en l'absence de traceur qui permettrait de les distinguer de l'érosion hydrique qui mobilise elle aussi les sédiments locaux et en raison aussi de la faible intensité des dépôts éoliens relativement à ceux engendrés par cette érosion hydrique. Paradoxalement, c'est plutôt au nord du Sahel qu'il faudrait rechercher des séquences sédimentaires susceptibles d'enregistrer les aérosols émis dans les champs cultivés puisqu'ils sont d'abord transportés vers le nord est dans le flux de mousson.

Conclusion

Ainsi à large échelle, dans les carottes prélevées au large du continent africain, ou dans le suivi des concentrations mesurées sur la rive ouest de l'Atlantique, les aérosols terrigènes resteraient actuellement avant tout un marqueur climatique pouvant traduire une intensification des vents érosifs comme mis en évidence par Dieppois *et al.* (ce volume) pendant les périodes de sécheresse et/ou une plus forte vulnérabilité des sols dans la zone nord sahélienne non cultivée.

Cependant, il faut noter que dans cette dernière zone, le pâturage par le bétail est une autre activité humaine qui peut contribuer à augmenter l'érodibilité des sols en diminuant leur protection par la végétation, comme lors de la mise en culture. Pour l'instant peu de mesure d'érosion éolienne concernent directement la zone pastorale du Sahel. Les travaux de Tidjani (2008) et Rajot et al. (2009) suggèrent que les périodes d'érosion les plus intenses sont les mêmes que plus au sud en zone cultivée. Néanmoins, dans cette frange fragile du nord du Sahel, il est probable que les émissions d'aérosols terrigènes causées par une période de déficit pluviométrique soient encore renforcées par ce type d'activité anthropique. L'impact du pastoralisme sur l'érosion éolienne reste donc à étudier de façon détaillée au Sahel. C'est

l'un des objectifs de la Jeune Equipe Associée à l'IRD, ADE (Anthropisation et Dynamique Eolienne) qui s'est créée en 2011 au Niger à la suite du programme Corus 2.

Remerciements

Basé sur une initiative française, AMMA a été construit par un groupe scientifique international et est actuellement financé par un grand nombre d'agences, en particulier de France, du Royaume-Uni, des Etats-Unis d'Amérique et d'Afrique. Il a été le bénéficiaire d'une contribution majeure du 6ème Programme-Cadre de Recherche et Développement de la Communauté européenne.

Références bibliographiques

- Abdourhamane Touré, A., Guillon, R., Garba, Z., Rajot, J.L., Petit, C., Bichet V., Durand A., Sebag D. Caractérisation et quantification des flux sédimentaires éoliens participant au comblement des lacs du Sahel central : cas de Bangou Bi (SW Niger). Ce volume.
- Abdourhamane Touré, A., Rajot, J.L., Garba, Z., Marticorena B, Petit. C., Sebag, D. 2011. Impact of very low crop residues cover on wind erosion in the Sahel. *Catena*. Sous presse.
- Biielders, C.L., Rajot, J.R., Karlheinz, M., 2004. L'érosion éolienne dans le Sahel nigérien : influence des pratiques culturales actuelles et méthodes de lutte. *Sécheresse*, 15, 19-32.
- Cavaliere, O., Cairo, F., Fierli, F., Di Donfrancesco, G., Snels, M., Viterbini, M., Cardillo, F., Chatenet, B., Formenti, P., Marticorena, B., and Rajot, J. L.: Variability of aerosol vertical distribution in the sahel, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 10, 17609-17655, 10.5194/acpd-10-17609-2010, 2010.
- Chou, C., Formenti, P., Maille, M., Ausset, P., Helas, G., Harrison, M., and Osborne, S.: Size distribution, shape, and composition of mineral dust aerosols collected during the african monsoon multidisciplinary analysis special observation period 0: Dust and biomass-burning experiment field campaign in niger, january 2006, *J. Geophys. Res.*, 113, D00C10, 10.1029/2008jd009897, 2008.
- deMenocal, P., Ortiz, J., Guilderson, T., Adkins, J., Sarnthein, M., Baker, L., Yarusinsky, M., 2000. Abrupt onset and termination of the African Humid Period: rapid climate responses to gradual insolation forcing. *Quaternary Science Reviews* 19, 347-361
- Desboeufs, K., Journet, E., Rajot, J. L., Chevaillier, S., Triquet, S., Formenti, P., and Zakou, A., 2010. Chemistry of rain events in west africa: Evidence of dust and biogenic influence in convective systems, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 9283-9293, 10.5194/acp-10-9283-2010.
- Dieppoiss, B., Hassane, B., Durand, A., Fournier, M., Garba, Z., Massei, N., Ngounou Ngatcha, B., Rajot, J.L., Sebag, D., Traoré, A., Variabilité du climat au Sahel central depuis 1950: essais d'anayses statistiques des relations entre précipitations, vent et visibilité horizontale au SE-Niger. Ce volume.
- Formenti, P., Grand, N., Chevaillier, S., Desboeufs, K., Rajot, J.L., Klaver, A., Schmechtig, C., Saïd, F., 2011. Airborne observations of mineral dust over western Africa in the summer Monsoon season: spatial and vertical variability of physico-chemical and optical properties. *Atmospheric Chemistry and Physics*. Sous presse.
- Hiernaux, P., Diarra, L., Trichon, V., Mougin, E., Soumaguel, N., Baup, F., 2009. Woody plant population dynamics in response to climate changes from 1984 to 2006 in Sahel (Gourma, Mali). *Journal of Hydrology* 375, 103-113.
- Holben, B.N., Tanre, D., Smirnov, A., Eck, T.F., Slutsker, I., Abuhassan, N., Newcomb, W.W., Schafer, J., Chatenet, B., Lavenue, F., Kaufman, Y.J., Vande Castle, J., Setzer, A., Markham, B., Clark, D., Frouin, R., Halthore, R., Karnieli, A., O'Neill, N.T., Pietras, C., Pinker, R.T., Voss, K.,

- Zibordi, V., 2001. An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol Optical Depth from AERONET, *J. Geophys. Res.*, *106*, 12 067-12 097.
- Léon, J. F., Derimian, Y., Chiapello, I., Tanré, D., Podvin, T., Chatenet, B., Diallo, A., and Deroo, C., 2009. Aerosol vertical distribution and optical properties over M'Bour (16.96 deg; W; 14.39 deg; N), senegal from 2006 to 2008, *Atmos. Chem. Phys.*, *9*, 9249-9261, 10.5194/acp-9-9249-2009.
- Loireau, M., 1998. Espaces, ressources, usages: spatialisation des interactions dynamiques entre les systèmes sociaux et les systèmes écologiques au Sahel nigérien. PhD thesis, Montpellier III University, France.
- Marticorena, B., G. Bergametti., 1995. Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme, *J. Geophys. Res.*, *100*, 16415-16430.
- Marticorena, B., Chatenet, B., Rajot, J. L., Traoré, S., Coulibaly, M., Diallo, A., Koné, I., Maman, A., NDiaye, T., and Zakou, A., 2010. Temporal variability of mineral dust concentrations over West Africa: analyses of a pluriannual monitoring from the AMMA Sahelian Dust Transect, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, *10*, 8051-8101.
- Muhs, D.R., Bettis, E.A., 2000. Geochemical Variations in Peoria Loess of Western Iowa Indicate Paleowinds of Midcontinental North America during Last Glaciation. *Quaternary Research* **53**, 49–61 doi:10.1006/qres.1999.2090
- Mulitza, S., Heslop, D., Pittauerova, D., Fischer H.W., Meyer, I., Stuut, J.B., Zabel, M., Mollenhauer, G., Collins, J.A., Kuhnert, H., Schulz, M., 2010. Increase in African dust flux at the onset of commercial agriculture in the Sahel region. *Nature* *466*, 226-228 doi:10.1038/nature09213.
- 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.
- Prospero, J.M., Nees, R.T., 1986. Impact of North African drought and el Nino on mineral dust in the Barbados trade winds. *Nature*, *320*, 735-738.
- Rajot, J.L., Formenti P., Alfaro S., Desboeufs, K., Chevaillier S., Chatenet, B., Gaudichet, A., Journet, E., Marticorena, B., Triquet, S., Maman A., Mouget N., Zakou A., 2008. AMMA dust experiment: An overview of measurements performed during the dry season special observation period (SOP 0) at the Banizoumbou (Niger) supersite. *J. Geophys. Res.* *113*, D00C14, doi:10.1029/2008JD009906.
- Rajot, J.L., Karambiri, H., Ribolzi, O., Planchon, O., Thiébaux, J.P., 2009. Interaction entre érosions hydrique et éolienne sur sols sableux pâturés au Sahel : cas du bassin-versant de Katchari au nord du Burkina Faso. *Sécheresse* *20*, 17-30.
- Sow, M., Alfaro, S., Rajot, J.L., Marticoréna, B., 2009. Size resolved dust emission fluxes measured in Niger during 3 dust storms of the AMMA experiment. *Atmospheric Chemistry and Physics* *9*, 3881–3891
- Tidjani, A.D., 2008. Erosion éolienne dans le Damagram Est (sud-est du Niger) Paramétrisation, quantification et moyens de lutte. Thèse de doctorat s sciences. Université catholique de Louvain, 1-171p
- Vautard, R., Cattiaux, J., Yiou, P., Thépaut, J.N., Ciais, P., 2010 Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness. *Nature* DOI: 10.1038/NGEO979