



Analyse rétrospective de l'évolution climatique récente en Afrique du Nord-Ouest

Laila Amraoui, Mamadou Adama Sarr, Didier Soto

► **To cite this version:**

Laila Amraoui, Mamadou Adama Sarr, Didier Soto. Analyse rétrospective de l'évolution climatique récente en Afrique du Nord-Ouest. *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, AERES, 2011, 5, pp.125-142. <<http://physio-geo.revues.org/1959>>. <10.4000/physio-geo.1959>. <hal-01316465>

HAL Id: hal-01316465

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01316465>

Submitted on 17 May 2016

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.

Physio-Géo

Géographie, physique, et environnement

Volume 5 | 2011 :

Varia

Analyse rétrospective de l'évolution climatique récente en Afrique du Nord-Ouest

LAÏLA AMRAOUI, MAMADOU ADAMA SARR ET DIDIER SOTO

p. 125-142

Résumés

La présente étude vise à évaluer et à comprendre les tendances climatiques récentes et les ruptures de stationnarité au Maroc, en Mauritanie, au Sénégal et sur le proche océan. Pour cela est entreprise une analyse statistique de l'évolution annuelle des températures de l'air, des pressions atmosphériques au niveau de la mer, des précipitations et de la dynamique éolienne.

Les analyses confirment le tournant climatique des années 1970-1980. Ainsi les températures varient-elles localement, avec un réchauffement sensible au-dessus de l'Océan Atlantique entre 40°N et 14°N, au Maroc et au Sénégal (région du Nord), alors que le Sud-Est de la Mauritanie se refroidit. De même, le renforcement de la pression atmosphérique est accompagné d'un renversement de l'harmattan, avec une augmentation de la fréquence de sa composante orientale.

L'éclairage apporté par les données paléoclimatiques ne permet pas de déterminer une analogie uniforme avec les deux derniers extrêmes climatiques connus (optimum climatique holocène et dernier maximum glaciaire). Le réchauffement littoral et continental, de même que le renforcement de la composante franchement orientale de l'harmattan, rappellent les caractéristiques de la circulation atmosphérique du début de l'Holocène. Cependant l'augmentation des précipitations au cours des dernières années est moins significative. Par ailleurs, le renforcement de la pression atmosphérique suggère, d'un côté, le renforcement de l'agglutination anticyclonique continentale et, d'un autre, un affaiblissement de la dépression saharienne pendant l'été.

Le signal climatique s'avère donc complexe à saisir, dans ses dimensions spatiale et temporelle, et requiert d'étendre l'étude à d'autres variables aussi bien qu'à d'autres périodes analogues.

The following study aims to evaluate and understand the recent climatic trends and significant stationary breaks in Morocco, Mauritania, Senegal and the nearest ocean. It is therefore necessary to statistically analyze the annual evolution of the air temperature, the atmospheric pressure at sea level, the rainfall as well as the aeolian dynamic.

The analyses bear out the climatic turning point since the 1970's, which does not lead to homogenous trends. Thus, the Atlantic Ocean between latitudes 40°N and 14°N but also Morocco and Northern Senegal are getting warmer. However, Southeastern Mauritania seems to have a tendency to cooling. Moreover, the strengthening of sea level pressure is followed by a shift of the harmattan trade wind and by a strengthening of its eastern component.

Paleoclimatic data highlight the difficulty to find significant similarities with the last major climatic changes (Holocene Climatic Optimum and the Last Glacial Maximum). The littoral and continental warming as well as the wind reversal remembers the early Holocene. However, increase rainfalls in recent years remain less significant. Besides, the strengthening of sea level pressure reveals a strengthening of the subtropical high, but also a weakening of the Saharan low.

The climatic signal is therefore very difficult to understand focusing to his spatiotemporal measurement. Several studies concerning other climatic parameters or past analogues are still required.

Entrées d'index

Index de mots-clés : changement climatique, ruptures, températures, pluviométrie, pression atmosphérique au niveau de la mer, alizés, Afrique du Nord-Ouest

Index by keywords : climate change, rainfall, breaks, temperatures, sea level pressure, trade winds, North-Western Africa

Texte intégral

I - Introduction

- 1 Le dernier rapport du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) (GIEC, 2007) fait état d'un réchauffement climatique mondial sans équivoque, caractérisé par une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan. Le continent africain semble particulièrement touché, puisque la variation de température entre 1970 et 2004 y est estimée entre 0,2 et 2 °C. Selon les prévisions, établies par l'application de modèles de circulation atmosphérique présentant encore bien des incertitudes, la hausse des températures devrait se confirmer dans les années à venir. Par rapport à la période 1980-1999, le réchauffement pourrait atteindre des valeurs comprises entre 0,5 et 1,5 °C pour la décennie 2020, entre 1,5 et 6 °C pour la décennie 2090 (GIEC, 2007). Par ailleurs, la pluviométrie devrait baisser d'environ 20 % pour la décennie 2090, notamment en Afrique du Nord-Ouest, et revêtir un caractère erratique et variable, à l'origine de risques accrus de ruissellement, d'érosion et d'inondation. Le continent africain mérite toutefois une analyse plus fine du changement climatique qui l'affecte, notamment à des échelles régionales, pour perfectionner les modèles de prévision.
- 2 Dans cet article, sont poursuivies les analyses déjà initiées par la présentation de nouveaux résultats sur le Maroc, la Mauritanie et le Sénégal, qui subissent dans les basses couches de l'atmosphère l'influence des masses d'air tropicales et extratropicales (M. LEROUX, 2000, 2001). Cette influence s'exprime notamment par l'agglutination anticyclonique des Açores. Pressée sur le bord nord-ouest du continent, elle souffle un alizé maritime à l'origine d'une remontée d'eaux profondes. En outre, les hautes pressions de

l'agglutination anticyclonique saharo-méditerranéenne, au niveau de laquelle s'accroissent les anticyclones originaires de l'Atlantique et de l'Europe centrale, sont à l'origine d'un puissant alizé continental, l'harmattan, dont l'écoulement, canalisé par les massifs centraux sahariens, est intensifié en hiver en Mauritanie comme au Sénégal. En été, les hautes pressions sont plutôt positionnées au large des côtes méditerranéennes de l'Afrique du Nord. Le Maroc se trouve donc alors nettement au sud de l'agglutination continentale, devenue "méditerranéenne", et subit un alizé d'est, appelé Chergui, qui apporte de l'air saharien chaud et sec dans les régions occidentales du pays (D. NOIN, 1963). Dans ces conditions, la circulation de l'alizé continental sur le Sahara provoque un fort réchauffement des basses couches, ce qui favorise la formation de la dépression thermique saharienne. Le flux de mousson est donc particulièrement actif. Attiré par les températures élevées des basses couches sahariennes, l'alizé, soufflé par l'agglutination de Sainte-Hélène, franchit l'équateur géographique et contribue alors à déplacer vers le nord la trace au sol de l'équateur météorologique, dont l'effet pluviogénique est contrarié par l'inversion d'alizés (M. LEROUX, 2001).

- 3 La dynamique des masses d'air tropicales et extratropicales place donc l'aire d'étude dans un domaine climatique chaud et semi-aride, pour lequel les précipitations sont conditionnées, d'une part, par l'apport inégal du flux de mousson et, d'autre part, par les dépressions qui se forment dans le bassin méditerranéen. L'évolution pendant la période 1950-2008 des variables climatiques fait état d'une rupture temporelle déjà entrevue en Afrique du Nord-Ouest (L. AMRAOUI, 2010 ; S. BRÖNNIMANN *et al.*, 2008 ; F. DRIOUECH, 2006 ; V. HOMAR *et al.*, 2010 ; Z. NOUACEUR, 2009 ; P. OZER, 1996 ; M.A. SARR, 2009-a ; L. STOUR et A. AGOUMI, 2008). La présente étude vise à mieux évaluer cette rupture en proposant une analyse régionale des moyennes annuelles des températures de l'air, des précipitations, des pressions atmosphériques au niveau de la mer, de la vitesse et de la fréquence des directions des vents, indispensables pour reconstituer précisément la dynamique aérologique des basses couches.

II - Données exploitées et méthodes

- 4 L'évolution du climat de l'Afrique du Nord-Ouest est étudiée pour plusieurs régions et à travers plusieurs paramètres qu'il convient de définir.

1) Au Maroc, en Mauritanie et sur le proche océan

- 5 Les données exploitées sont ici extraites des fichiers NCEP-NCAR (Ré-analyses 1) et concernent, pour la période 1950-2008, les moyennes annuelles des températures de l'air à 2 m de hauteur, des pressions atmosphériques au niveau de la mer, et des vents à 10 m de hauteur. Les ré-analyses (E. KALNAY *et al.*, 1996) couvrent l'espace s'étendant du 35^{ème} méridien de longitude Ouest à celui de Greenwich, ainsi que du 40^{ème} au 15^{ème} parallèles de latitude Nord. La résolution spatiale est de 2,5° en latitude et longitude en ce qui concerne la pression atmosphérique au niveau de la mer et

de 1,87° en latitude et longitude pour les températures et les vents.

- 6 Pour obtenir la direction du vent, l'angle a été calculé en se fondant sur les fichiers quotidiens des flux méridiens et zonaux. Une distribution en 8 classes de directions : N, NE, E, SE, S, SO, O et NO a été effectuée. Puis, la fréquence annuelle relative de chaque direction a été calculée pour dresser une chronologie interannuelle sur la période allant de 1950 à 2008. Les fichiers annuels de la vitesse du vent ont été également constitués à partir des fichiers des flux méridiens et zonaux (L. AMRAOUI, 2011).

2) Au Nord du Sénégal

- 7 Les postes de mesure sélectionnés (Linguère, Saint-Louis, Podor) l'ont été en fonction de la disponibilité des données, de la longueur des séries et de leur fiabilité (M.A. SARR, 2009-a). Ils sont présentés dans le tableau I. Les données, qui concernent les cumuls annuels de pluie et les températures moyennes annuelles sur la période 1951-2005, ont été communiquées par la Direction de la Météorologie Nationale.

Tableau I - Données et caractéristiques des postes de mesure dans le Nord du Sénégal.

Station	Type	Altitude (m)	Coordonnées géographiques		Paramètres utilisés et longueurs des séries	
			Latitude Nord	Longitude Ouest	Pa	Tn et Tx
Linguère	Synoptique	20	15°38	15°12	1951-2005	1960-1998
Podor	Synoptique	6	16°65	14°93	1951-2005	1951-2005
Saint-Louis	Synoptique	4	16°05	16°45	1951-2005	1951-2005

Pa : Pluviométrie annuelle. Tn : moyennes annuelles des températures minimales journalières.

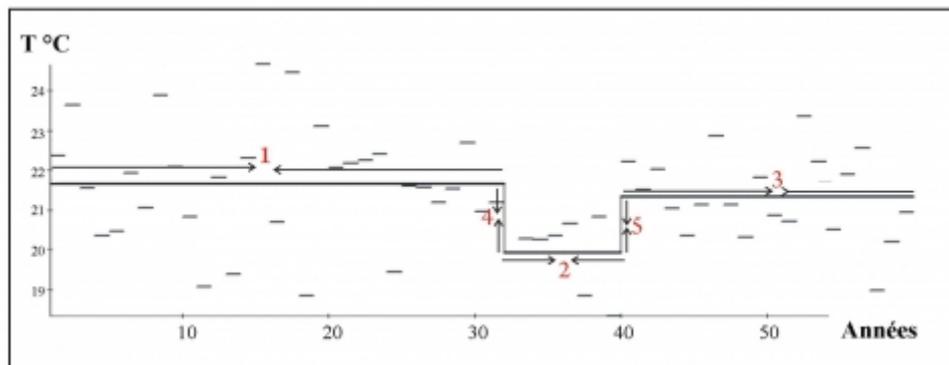
Tx : moyennes annuelles des températures maximales journalières.

3) Traitement statistique des données

- 8 Trois méthodes statistiques ont été retenues dans cette étude pour analyser l'évolution annuelle de chacune des variables.
- 9 Dans un premier temps, la tendance de fond est déterminée par une analyse systématique par la méthode classique paramétrique de régressions linéaires utilisant la technique des moindres carrés.
- 10 Dans un second temps, et après avoir exploité plusieurs tests de stationnarité, a été utilisée la segmentation d'HUBERT (P. HUBERT *et al.*, 1989). Cette procédure, appliquée initialement aux séries chronologiques des précipitations ou des débits des fleuves (P. HUBERT *et al.*, 1998 ; A. KINGUMBI, 2006 ; T. FEUILLET, 2009), a pour principe le découpage d'une série en plusieurs sous-séries de manière à ce que la moyenne correspondant à chaque sous-série soit sensiblement différente de la moyenne de la ou des sous-séries voisines (P. HUBERT *et al.*, 1998). On considère que la série chronologique est stationnaire lorsque le test de stationnarité est nul. La segmentation est retenue lorsque l'écart quadratique entre elle et la série est minimum. Cette condition est nécessaire mais non suffisante pour la détermination de la segmentation optimale. Il faut lui adjoindre, par application d'un test de vraisemblance, la contrainte selon laquelle les

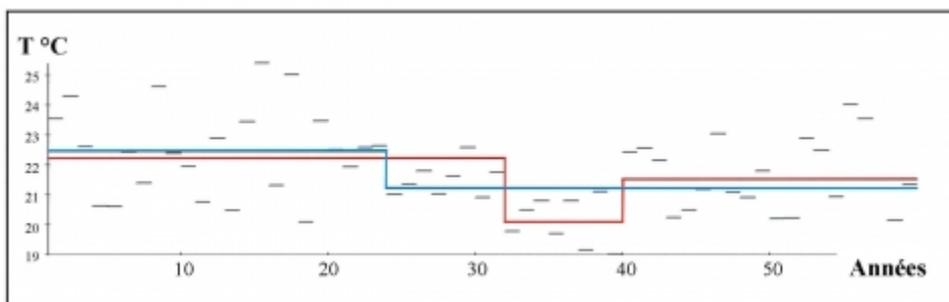
moyennes des deux segments contigus doivent être significativement différentes. En comparaison des tests d'A.N. PETTITT (1979), d'A.F.S. LEE et S.M. HEGHIMIAN (1977) et de T.A. BUIHAND (1982), la segmentation d'HUBERT présente l'avantage de pouvoir rechercher des changements multiples de moyenne dans une même série chronologique. La robustesse de cette méthode a été confirmée par son application dans le cadre de nombreuses études, à des séries d'origines et de caractéristiques variées (P. HUBERT *et al.*, 1989). Ci-dessous, figurent deux exemples des résultats obtenus après l'application du test de stationnarité d'HUBERT aux séries chronologiques des températures annuelles. Le premier graphique (Fig. 1) représente une série chronologique caractérisée par un seul découpage valide en trois sous-périodes. Le deuxième graphique (Fig. 2) représente une série chronologique où la segmentation d'HUBERT a permis de faire ressortir deux découpages valides ; le premier divise la série chronologique en deux sous-périodes, tandis que le deuxième la divise en trois sous-périodes. Notons que lorsque plusieurs découpages sont considérés valides par l'algorithme, c'est le découpage maximal qui est retenu.

Figure 1 - Segmentation des températures annuelles du point de grille : 18,70°N/5,61°O situé en Mauritanie (1950-2008).



1 : premier segment (première sous-période). 2 : deuxième sous-période. 3 : troisième sous-période. 4 : premier saut (différence de moyenne entre le premier et le second segment). 5 : deuxième saut (différence de moyenne entre le deuxième et le troisième segment).

Figure 2 - Segmentation des températures annuelles du point de grille : 16,83°N/5,61°O situé en Mauritanie (1950-2008).



En bleu : découpage valide en deux sous-périodes. En rouge : découpage valide en trois sous-périodes.

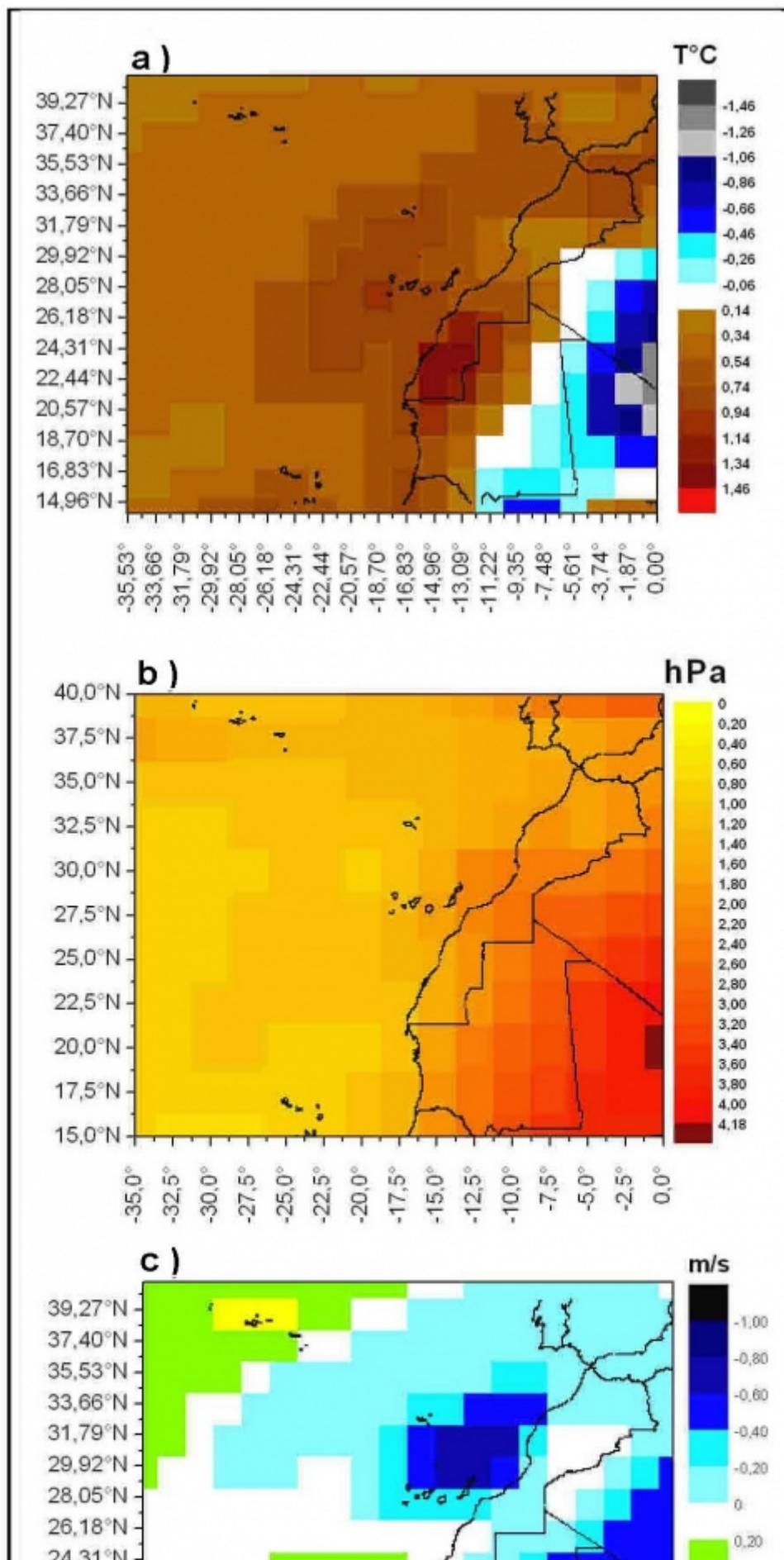
- 11 Enfin, à l'échelle de la région Nord du Sénégal, la méthode des quartiles constitue une bonne approche lorsque doivent être appréciées les tendances saisonnières générales à travers l'évolution des températures minimales et maximales (M.A. SARR, 2009-a, 2009-b). Pour cela, ces deux variables sont

classées en fonction des limites définies par le quartile inférieur (Q1), le quartile médian (la médiane ou Q2) et le quartile supérieur (Q3) de la série statistique. Si les températures sont inférieures ou égales à la valeur limite du quartile inférieur, elles sont considérées comme les plus fraîches. En revanche, lorsqu'elles se trouvent supérieures ou égales à Q3, elles sont les plus chaudes de la série. Enfin, lorsqu'elles sont situées entre Q1 et Q3, elles sont dites "normales". Seul le quartile inférieur est considéré dans l'analyse.

III - Analyse des changements climatiques contemporains majeurs en Afrique du Nord-Ouest

- 12 L'évolution des températures, des pressions et des vents entre 1950 et 2008 a été déterminée pour le Maroc, la Mauritanie et le proche océan (Fig. 3).

Figure 3 - Évolution de la température de l'air à 2 m de hauteur (a), de la pression atmosphérique au niveau de la mer (b) et de la vitesse du vent à 10 m de hauteur (c) au Maroc, en Mauritanie et sur le proche océan entre 1950 et 2008.



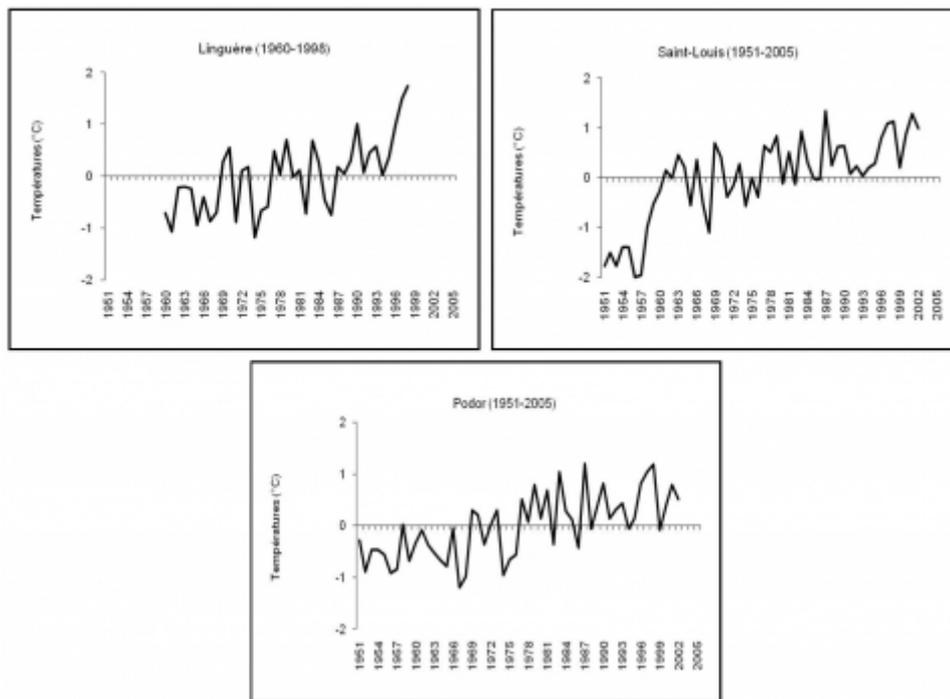
Les situations de référence initiale et finale ont été déterminées par la méthode des régressions linéaires appliquée aux données annuelles.

- 13 En ce qui concerne les températures, le traitement statistique des données a également permis de dégager des tendances régionales pour le Nord du Sénégal.
- 14 Quant à la dynamique des précipitations, seule la variation des cumuls annuels de pluie au Sénégal a pu être mesurée.

1) Évolution des températures : réchauffement généralisé sur la frange littorale et le proche océan et évolution hétérogène sur le continent

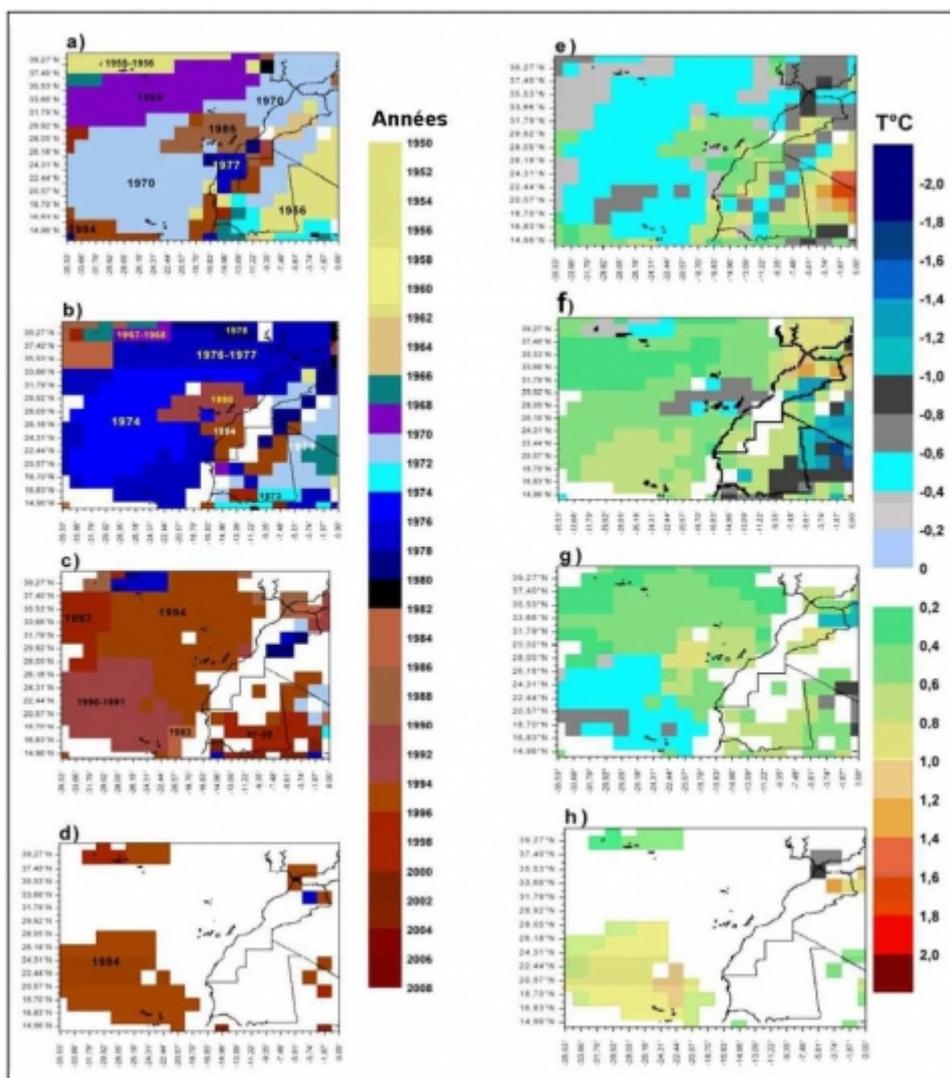
- 15 La tendance de fond des températures de l'air montre un réchauffement généralisé au-dessus de l'Atlantique pendant la période 1950-2008. Il se caractérise néanmoins par une intensité variable d'une région à l'autre. La hausse la plus forte des températures s'observe au niveau des îles Canaries avec un maximum de 0,97 °C (Fig. 3-a). Cependant le réchauffement diminue en s'éloignant de la côte, à l'exception de la région comprise entre Cap Ghir et Tarfaya (31,79°N-28,05°N).
- 16 Alors que la totalité du territoire marocain subit un réchauffement, la Mauritanie connaît deux évolutions opposées : la moitié ouest enregistre une hausse des températures qui s'estompe toutefois en direction de l'est et du sud-est, tandis que l'est de la Mauritanie sahélienne enregistre une légère tendance au refroidissement, avec une baisse thermique de l'ordre de 0,45 °C (Fig. 3-a). Au Sénégal, l'évolution des écarts centrés réduits des températures moyennes annuelles montre une tendance à l'augmentation, qui s'accélère à partir des années 1970-1980, à des dates différentes selon les régions (Fig. 4).

Figure 4 - Écarts centrés réduits des températures moyennes annuelles (1951-2005).



- 17 La méthode de segmentation appliquée aux moyennes annuelles des températures au Maroc et en Mauritanie permet de mettre en évidence la particularité des deux décennies comprises entre 1970 et 1990, qui sont ponctuées par une ou plusieurs ruptures dans les séries statistiques (Fig. 5). Ainsi, en 1970-1971, une rupture négative est détectée sur le littoral marocain septentrional et oriental, ainsi qu'en Mauritanie, aussi bien sur le littoral qu'à l'intérieur des terres. Cette rupture pourrait être liée à un refroidissement qui est intervenu dans un contexte hémisphérique, en touchant particulièrement l'Atlantique Nord. Il est par ailleurs concomitant à l'arrivée d'un flux d'eaux douces depuis le pôle Nord (D. THOMPSON *et al.*, 2010). Ces régions touchées par la rupture de 1970-1971, ont connu ultérieurement une rupture positive entre 1974 et 1977 (Fig. 5-a). Il est intéressant de remarquer que lorsque la rupture survient à la fin des années 1960 ou au début des années 1970, elle s'accompagne d'un refroidissement sur les espaces concernés (Mauritanie orientale, Maroc septentrional). En revanche, lorsqu'elle survient au milieu ou à la fin de la décennie 1970, elle exprime une hausse des températures (littoral mauritanien, Maroc septentrional entre 1979 et 2008, Sahara marocain, Ferlo). La même bipolarité est observée pendant la décennie 1990, dont le début (1991) est caractérisé par une rupture négative au-dessus de l'Atlantique (Fig. 5-b et 5-c), en relation vraisemblablement avec l'explosion volcanique du Pinatubo. La tendance repart vers la hausse à partir de l'année 1994 (Fig. 5-c et 5-d), qui marque en quelque sorte la fin de l'influence thermique des aérosols projetés par le Pinatubo au-dessus de l'Atlantique.

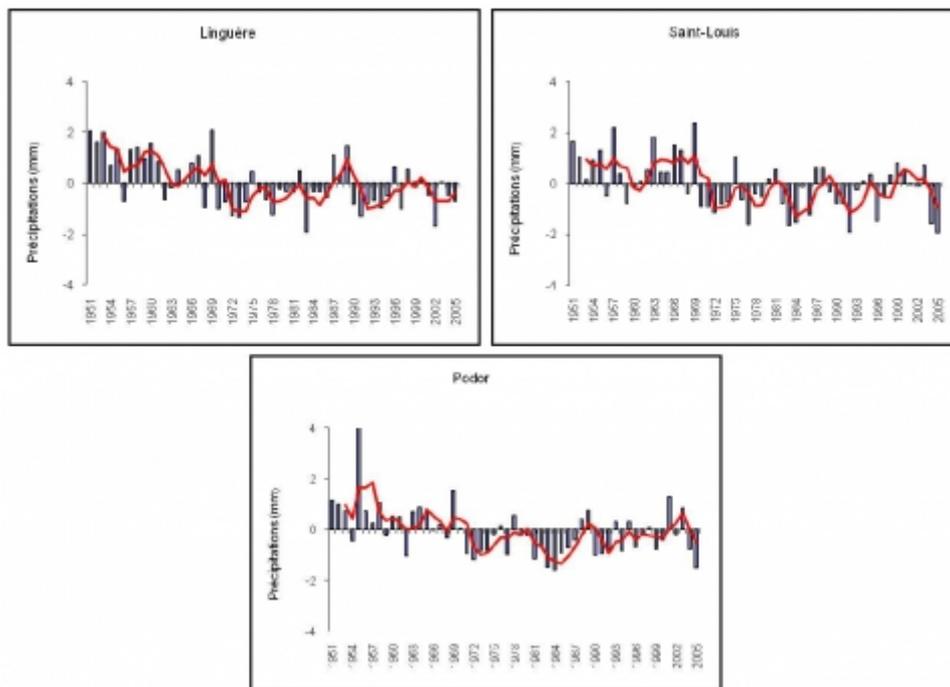
Figure 5 - Spatialisation des résultats de la segmentation d'HUBERT appliquée aux moyennes annuelles des températures de l'air à 2 m de hauteur entre 1950 et 2008.



a : années de la première rupture. b : années de la deuxième rupture. c : années de la troisième rupture. d : années de la quatrième rupture. e : premier saut (différence de moyenne entre la première sous-période et la deuxième sous-période). f : deuxième saut. g : troisième saut. h : quatrième saut.

- 18 Au Sénégal, l'analyse des données montre une forte variabilité interannuelle (saison sèche/saison des pluies) et une évolution contrastée au sein d'un même domaine climatique, comme le prouvent les stations du Ferlo (Fig. 6).

Figure 6 - Écart centrés réduits des cumuls annuels dans le Nord du Sénégal et moyenne mobile sur trois ans (1951-2005).



2) Les précipitations : amélioration récente en Mauritanie et au Sénégal mais sécheresse persistante au Maroc

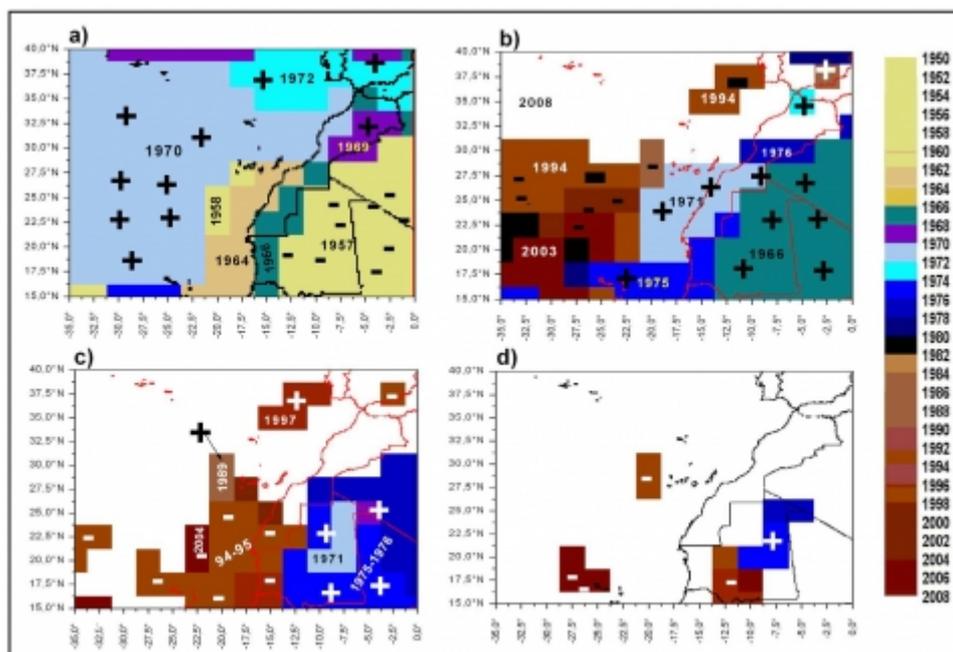
- 19 Au Maroc, la sécheresse sévit depuis 1972, année qui clôt une période pluvieuse (1961-1972). En association avec une forte variabilité interannuelle, la tendance vers la diminution des précipitations moyennes et des cumuls durant les saisons d'hiver et du printemps est quasi-générale au Maroc (F. DRIOUECH, 2010). Le déficit hydrique se prolonge donc jusqu'à aujourd'hui, à l'exception des années 1996, 2008 et 2009, très humides (L. STOUR et A. AGOUMI, 2008). Par ailleurs, en Mauritanie, la période 1994-2005 marque un retour "timide" des précipitations, caractérisé par un nombre égal d'années sèches et humides. En cela, elle contraste fortement avec la période 1970-1994, pendant laquelle le pays a été frappé par une sécheresse hydrique exceptionnelle (Z. NOUACEUR, 2009).
- 20 En ce qui concerne les mesures, seuls sont présentés dans cette étude les cumuls annuels de pluie obtenus grâce aux postes de mesure du Nord du Sénégal (Fig. 6), auxquels il est difficile d'accorder une signification qui dépasse le cadre régional. Toutefois, sur le plan statistique, l'analyse des séries permet de dégager deux séquences temporelles relativement distinctes, qui rappellent la tendance entrevue en Mauritanie (M.A. SARR, 2009-a, 2009-b). La première traduit une baisse généralisée des pluies jusqu'à la fin des années 1970 et le début des années 1980. La seconde souligne une stabilité, et même une augmentation, des valeurs précipitées, qui ne se manifeste pas toujours simultanément sur l'ensemble du terrain d'étude.
- 21 De ce fait, la valeur actuelle des précipitations moyennes annuelles se rapproche de celle de la période continûment humide des années 1951 à 1968 (T. LEBEL et J.L. REDELSPERGER, 2008), même si elle n'en atteint pas le niveau maximal. Avec ce retour des précipitations, certains pays sahéliens ont

enregistré des productions agricoles record au cours des cinq dernières années, en contraste avec l'idée fréquemment répandue, notamment par le GIEC, d'une sécheresse ininterrompue au Sahel occidental.

3) La pression atmosphérique au niveau de la mer : un renforcement depuis les années 1970

- 22 L'analyse des résultats montre une tendance générale à la hausse, particulièrement en Mauritanie (voir Fig. 3-b).
- 23 Pour la période 1950-2008, la méthode de segmentation permet de détecter de nouveau une rupture évidente pendant la décennie 1970. Sur le proche océan, elle débute en 1970, alors qu'au Maroc et en Mauritanie, elle succède en 1971 à une rupture antérieure, datée entre 1964 et 1966. Sur le continent, la variabilité interannuelle est prononcée. Ainsi, en Mauritanie, malgré une évolution négative entre 1950 et 1957, les valeurs concourent toutes au même résultat, en l'occurrence un renforcement de la pression atmosphérique (Fig. 7).

Figure 7 - Spatialisation des résultats de la segmentation d'HUBERT appliquée aux moyennes annuelles des pressions atmosphériques au niveau de la mer entre 1950 et 2008.



a : années de la première rupture. b : années de la deuxième rupture. c : années de la troisième rupture. d : années de la quatrième rupture. Le symbole (+) indique une rupture positive et le symbole (-) une rupture négative.

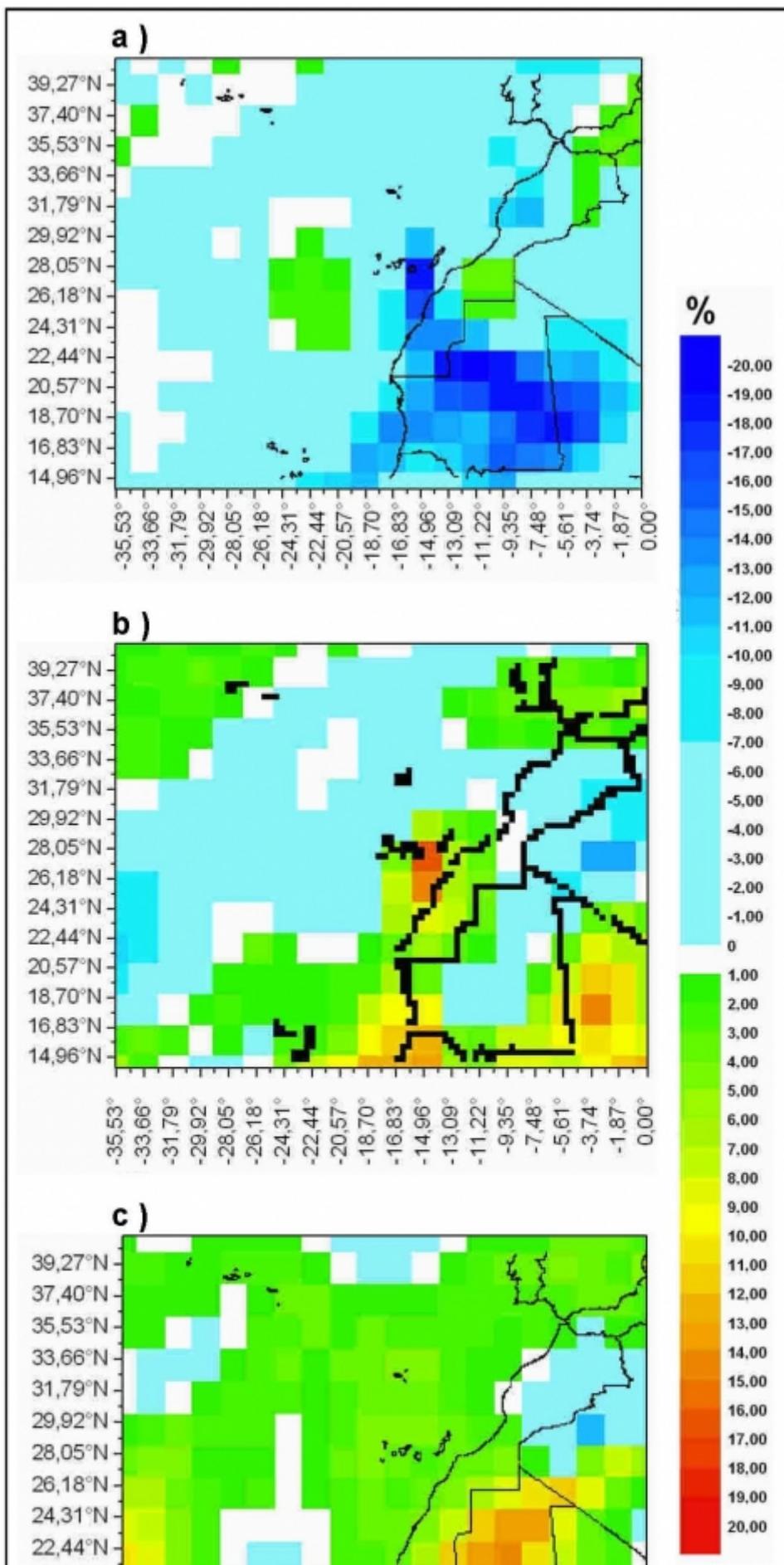
- 24 En revanche, sur l'océan, malgré une rupture positive entre 1970 et 1975, la succession des ruptures négatives entre 1994 et 2004 modère cette tendance à la hausse (Fig. 7).

4) Une décélération éolienne, qui

s'accompagne d'un renversement directionnel du champ de vent.

- 25 Le renforcement de la pression atmosphérique s'accompagne d'une baisse de la vitesse du vent (voir Fig. 3-c), plus accentuée sur la côte mauritanienne (-0,7 m/s), sur la côte marocaine entre cap Ghir et cap Bodjor (-0,7 m/s), ainsi que sur le Nord-Est de la Mauritanie (-0,5 m/s).
- 26 Les évolutions respectives de la fréquence des composantes nord ($337,5^{\circ}$ - $22,5^{\circ}$), nord-est ($22,5^{\circ}$ - $67,5^{\circ}$) et est ($67,5^{\circ}$ - $112,5^{\circ}$) permettent de supposer un renversement du régime éolien, qui prône en faveur d'un renforcement de la composante est de l'harmattan, plus constant mais toutefois moins rapide que le vent de secteur nord (Fig. 8). Par ailleurs, la réduction de la vitesse du vent sur le littoral survient simultanément à un accroissement de la fréquence des alizés maritimes de secteur nord-est.

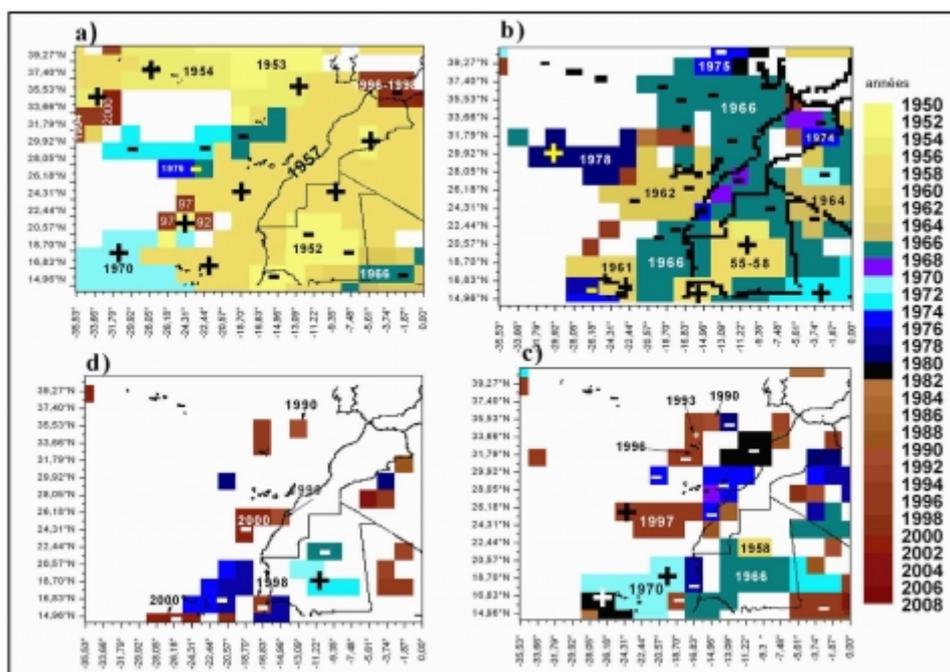
Figure 8 - Évolution (en %) de la fréquence relative des principales directions de vent au Maroc, en Mauritanie et sur le proche océan entre 1950 et 2008.



a : vents de direction nord (de 337,5° à 22,5°). b : fréquence des vents de direction nord-est (de 22,5° à 67,5°). c : fréquence des vents de direction est (de 67,5° à 112,5°). Les situations de référence initiale et finale ont été déterminées par la méthode des régressions linéaires appliquée aux données annuelles.

- 27 L'étude par la segmentation des moyennes annuelles de vitesse et de fréquence directionnelle du vent traduit une fois de plus la rupture climatique de la décennie 1970 (résultats non illustrés dans cet article). En revanche, la réduction moyenne de la vitesse du vent commence plus tôt (1965-1966), notamment sur les îles Canaries et la côte mauritanienne (Fig. 9).

Figure 9 - Spatialisation des résultats de la segmentation d'HUBERT appliquée aux moyennes annuelles de la vitesse du vent entre 1950 et 2008.



d'un refroidissement (J.J. LOWE, 1994 ; H. RENSEN et R.F.B. ISARIN, 2001 ; A.H.L. VOEKLER, 2002).

29 La tendance à la hausse des températures en Afrique du Nord-Ouest, à l'exception du Sud-Est de la Mauritanie, s'inscrit ainsi dans un processus de réchauffement que connaît l'espace subtropical est-atlantique depuis les années 1950 (S. BRÖNNIMANN *et al.*, 2008 ; J. COMBY, 2009). En ce sens, cette tendance pourrait être rapprochée des conditions connues pendant les optima climatiques, comme celui de l'Holocène, survenu voici 6000 ans : les modélisations régionales récentes suggèrent un réchauffement significatif des surfaces continentales (P. BRACONNOT *et al.*, 2007), qui permettait le creusement de dépressions thermiques couplées à une inversion d'alizés moins contraignante. Ces dernières autorisaient alors une pénétration plus aisée des flux de mousson dans la zone tropicale et une progression vers le nord de la trace au sol de l'équateur météorologique. C'est également dans cette optique que pourrait être interprétée l'augmentation récente des cumuls annuels de pluie au Nord du Sénégal et en Mauritanie, même si l'interprétation des pressions atmosphériques au niveau de la mer met en avant un affaiblissement de la dépression plutôt qu'un creusement.

30 Parallèlement, le renforcement observé de la composante orientale de l'harmattan concorde avec les travaux déjà publiés sur la direction et la vitesse des vents en Mauritanie et au Sénégal (P. OZER, 1996) ; il pourrait rappeler le début de l'Holocène en Afrique du Nord-Ouest (P. ROGNON et G. COUDÉ-GAUSSSEN, 1996), alors que prédominaient les vents de secteur nord-ouest pendant le dernier maximum glaciaire et le Tardiglaciaire (21000-11600 *Before Present*). L'ensemble de ces signaux climatiques pourrait ainsi concourir à la même interprétation, selon laquelle l'Afrique du Nord-Ouest est entrée depuis les années 1970 dans un mode de circulation atmosphérique dit homogène (M. LEROUX, 2000 ; A. POMMIER, 2005), propice à un réchauffement des températures de surface et à un affaiblissement des anticyclones : ces derniers pénétreraient donc moins facilement aux latitudes "tempérées" et subtropicales ; les alizés seraient moins rapides et leur déplacement subméridien moins prononcé, ce qui pourrait expliquer la baisse de la fréquence des vents de direction nord et nord-est. L'espace balayé par l'équateur météorologique serait alors élargi et profiterait aux flux de mousson (P. BRACONNOT *et al.*, 2007 ; M. LEROUX, 2000).

31 Cependant, ni la tendance au refroidissement de la Mauritanie sahélienne, ni le renforcement de la pression atmosphérique, ni même l'accroissement de la fréquence de l'harmattan de secteur est au détriment de la direction nord-est ne s'inscrivent dans cette logique de circulation homogène. Au contraire, elles rappellent davantage les conditions atmosphériques connues pendant les épisodes de refroidissement des 50000 dernières années (N. COMBOURIEU NEBOUT *et al.*, 2009), comme le dernier maximum glaciaire (P. BRACONNOT *et al.*, 2007) ou les événements d'Heinrich H1 (Dryas Ancien) et Ho (Dryas Récent) du Tardiglaciaire würmien (D. SOTO, 2011), périodes pendant lesquelles l'agglutination anticyclonique des Açores pénétrait sur le bord ouest du continent et imposait un climat relativement froid et sec en Afrique du Nord-Ouest (P. BRACONNOT *et al.*, 2007 ; M. LEROUX, 2000, 2001 ; P. ROGNON et G. COUDÉ-GAUSSSEN, 1996), mais aussi sur le bassin méditerranéen sud-occidental (N. COMBOURIEU NEBOUT *et al.*, 2009). La pression atmosphérique était alors renforcée ; les cellules anticycloniques

soufflaient des vents puissants (E.C. GRIMM *et al.*, 2006), à l'origine d'une inversion d'alizés très contraignante pour les précipitations.

32 En outre, la sécheresse que les écosystèmes sahéliens ont subi pendant les années 1970-2000, semble s'inscrire davantage dans l'optique d'un mode de circulation atmosphérique abrupt depuis la zone arctique jusqu'aux latitudes subpolaires, caractérisé par un renforcement des échanges méridiens, d'autant plus que le bassin méditerranéen oriental enregistre également une tendance au refroidissement (V. HOMAR *et al.*, 2010).

33 L'éclairage apporté par les données paléoclimatiques se révèle intéressant dans le sens où il permet de procéder à une analyse spatio-temporelle analogique des changements climatiques qui caractérisent la dynamique atmosphérique actuelle de l'Afrique du Nord-Ouest. À la lumière de cette approche, il apparaît que cette région emprunte simultanément des caractéristiques aux modes passés de circulation dits homogène (comme pendant l'optimum climatique holocène) et abrupt (à l'instar du dernier maximum glaciaire).

34 Toutefois il convient d'être conscient des limites d'un tel exercice d'analogie, compte tenu de la diversité des proxy et de l'hétérogénéité des échelles temporelles comparées (décennies contre millénaires), mais aussi des forçages climatiques très différents qui pouvaient s'exprimer pendant le dernier maximum glaciaire et l'optimum climatique holocène, aussi bien en termes d'insolation journalière, d'inclinaison de l'axe de la terre par rapport au plan de l'écliptique, de concentration atmosphérique en CO₂ ou d'englacement des surfaces continentales. Il convient donc d'apprécier cette analyse analogique essentiellement comme un éclairage des modes passés de circulation atmosphérique, desquels pourraient se rapprocher les conditions actuelles.

V - Conclusion

35 L'analyse régionale en Afrique du Nord-Ouest (Maroc, Mauritanie, Sénégal) des moyennes annuelles des températures de l'air, des précipitations, des pressions atmosphériques, ainsi que de la vitesse et de la fréquence des vents permet de dégager les conclusions suivantes :

- Les températures de l'air montrent une tendance à la hausse pour la période 1950-2008, malgré le refroidissement dans lequel semble s'engager l'est de la Mauritanie sahélienne. Elles expriment également une forte variabilité interannuelle, illustrée dans les données par plusieurs ruptures, particulièrement pendant les décennies 1970 et 1990.
- Les précipitations moyennes annuelles, mesurées au Nord du Sénégal, connaissent une augmentation depuis la fin des années 1990. Cette amélioration pluviométrique contraste avec les années précédentes de sécheresse pluviométrique. La réalité statistique des séries présentées rompt d'ailleurs avec l'idée couramment admise d'une baisse à venir des précipitations sur le continent africain.
- La totalité du domaine d'étude connaît depuis les années 1970 une rupture positive de la pression atmosphérique au niveau de la mer.
- En Mauritanie, s'observe un renversement du régime des vents entre

- 1968 et 1990, suite à une diminution de la fréquence des vents de secteur nord et un renforcement de la composante orientale de l'harmattan.
- 36 Le tournant climatique des années 1970, mais aussi des années 1990 (températures), est donc confirmé à la lumière des résultats présentés dans cet article. Il ne se manifeste toutefois pas par des tendances homogènes, mais reflète plutôt le poids des particularités régionales, dont certaines, à la lumière des données paléoclimatiques, s'inscrivent dans une logique :
- de circulation atmosphérique homogène, plutôt propice à un réchauffement des températures de surface en Afrique du Nord-Ouest, une amélioration des précipitations et un renforcement de la composante est de l'alizé continental ;
 - de circulation abrupte, génératrice d'échanges méridiens plus intenses : la pression atmosphérique serait alors renforcée au niveau des cellules anticycloniques, comme l'agglutination des Açores, qui pénétrerait davantage sur le continent ; les alizés maritimes seraient également plus fréquents.
- 37 Devant la difficulté à saisir toute la complexité des dimensions spatiale et temporelle du signal climatique, l'étude devra être étendue à d'autres phénomènes (*upwelling* côtier) et d'autres variables. Il conviendrait, en particulier, de travailler sur des cumuls annuels de pluie portant sur l'ensemble de l'aire d'étude et non sur la seule région du Nord du Sénégal. Par ailleurs, il est envisagé de se focaliser sur un pas de temps saisonnier, voire mensuel, afin d'affiner les analyses et de chercher d'autres périodes passées analogues à l'actuel, pour discerner les "conditions limites" de la modélisation du climat en Afrique du Nord-Ouest.

Remerciements : Nous sommes reconnaissants à Monsieur Luc BARTHELEMY de ses précieux conseils. Nos remerciements vont aussi à nos réviseurs et au Directeur de publication de *Physio-Géo* pour leurs remarques et suggestions.

Bibliographie

- AMRAOUI L. (2010) - Caractérisation du tournant climatique des années 1970 en Afrique du Nord-Ouest. *Publication IAHS*, vol. 340, p. 513-520.
- AMRAOUI L. (2011) - *Évolution climatique récente en Afrique du Nord-Ouest (Maroc, Mauritanie et leur proche océan entre 1950 et 2008*. Thèse de l'Université Jean Moulin - Lyon III (à paraître).
- BRACONNOT P., OTTO-BLIESNER B., HARRISON S., JOUSSAUME S., PETERCHMITT J.Y., ABE-OUCHI A., CRUCIFIX M., DRIESSCHAERT E., FICHEFET T., HEWITT C.D., KAGEYAMA M., KITO H. A., LAÏNÉ A., LOUTRE M.F., MARTI O., MERKEL U., RAMSTEIN G., VADES P., WEBER S.L., YU Y. et ZHAO Y. (2007) - Results of PMIP2 coupled simulations of the mid-Holocene and Last Glacial Maximum – Part 1: experiments and large-scale features. *Climate of the Past*, n° 3, p. 261-277.
- BRÖNNIMANN S., EWEN T., LUTERBACHER J., DIAZ H.F., STOLARSKI S. et NEU U. (2008) - A focus on climate during the past 100 years. *In : Climate Variability and Extremes during the Past 100 Years*, S. BRÖNNIMANN, T. EWEN, J. LUTERBACHER, H.F. DIAZ, S. STOLARSKI et NEU U. édit, Édit. SPRINGER, coll. Advances in Global

- Change Research, vol. 33, Berlin-Heidelberg-New-York..., p. 1-25.
- BUISHAND T.A. (1982) - Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, vol. 50, p. 11-27.
- COMBOURIEU NEBOUT N., BOUT-ROUMAZEILLES V., DORMOY I. et PEYRON O. (2009) - Sécheresses récurrentes en Méditerranée au cours des derniers 50 000 ans. *Sécheresse*, vol. 20, n° 2, p. 210-216.
- COMBY J. (2009) - Les changements climatiques récents : alternatives aux explications d'un réchauffement planétaire d'origine anthropique. *Cahiers de Mars*, vol. 200, p. 42-46.
- DRIOUECH F. (2006) - *Rapport sur les changements climatiques au Maroc : observations et projections*. Direction de Météorologie Nationale du Maroc, Casablanca, 45 p.
- DRIOUECH F. (2010) - *Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique*. Thèse de Doctorat de l'Institut national polytechnique de Toulouse, 163 p.
- FEUILLET T. (2009) - L'évolution des températures à Nantes entre 1946 et 2000. Analyses statistiques des ruptures de tendance et interprétations. *Cahiers nantais*, vol. 2009-2, p. 15-21.
- GIEC (2007) - *Changements climatiques 2007 – Rapport de synthèse*. Rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur le climat, Édité. OMM-PNUE, Genève, 108 p. (5 + 103).
- GRIMM E.C., WATTS W.A., JACOBSON J.L., HANSEN B.C.S., ALMQUIST H.R. et DIEFFENBACHER-KRALL A.C. (2006) - Evidence for warm Heinrich events in Florida. *Quaternary Science Reviews*, vol. 25, n° 4, p. 12197-12211.
- HOMAR V., RAMIS C., ROMERO R. et ALONSO S. (2010) - Recent trends in temperature and precipitation over the Balearic Islands (Spain). *Climatic Change*, vol. 98, p. 199211.
- HUBERT P., CARBONNEL J.P. et CHAUCHE A. (1989) - Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, vol. 110, p. 349-367.
- KALNAY E., KAMAMITSU M., KISTLER R. et collaborateurs (1996) - The NCEP-NCAR 40-years reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*; vol. 77, n° 3, p. 437-471.
- KINGUMBI A. (2006) - *Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation. Cas de Merguelli en Tunisie centrale*. Thèse de Doctorat, Université de Tunis El Manar, 218 p. (9 + 199).
- LEBEL T. et REDELSPERGER J.L.. (2008) - Le projet AMMA, un exemple d'étude intégré et multidisciplinaire sur un système climatique régional. *La Houille Blanche*, n° 2, p. 3844.
- LEE A.F.S. et HEGHINIAN S.M. (1977) - A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables. A Bayesian approach. *Technometrics*, vol. 19, n° 4, p. 503-506.
- LEROUX M. (2000) - *La dynamique du temps et du climat*. Édité. DUNOD, Paris, 366 p.
- LEROUX M. (2001) - *The Meteorology and Climate of Tropical Africa*. Édité. SPRINGER (Berlin-Heidelberg-New-York...) et Praxis (Chichester), 548 p.
- LOWE J.J., AMMANN B., BIRKS S., COOPE G.R., CWYNAR L., DE BEAULIEU J.L., MOTT R.J., PETE D.M. et WALKER M.J.C. (1994) - Climatic changes in areas adjacent to the North Atlantic during the last glacial-interglacial transition (14-9 ka B.P.): a contribution to IGCP-253. *Journal of Quaternary Science*, vol. 9, n° 2, p. 185-198.
- NOIN D. (1963) - Types de temps d'été au Maroc. *Annales de Géographie*, vol. 72, n° 389, p. 1-12.
- NOUACEUR Z. (2009) - Évolution des précipitations depuis plus d'un demi-siècle en Mauritanie. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, vol. 22, p. 361-366.
- OZER P. (1996) - Évolution des directions et des vitesses des vents de 1951 à 1994 sur la façade atlantique de l'Afrique de l'ouest du sud du Sénégal au nord de la Mauritanie.

Publications de l'Association Internationale de Climatologie, vol. 9, p. 479-486.

PETTITT A.N. (1979) - A non parametric approach to the change point problem. *Applied Statistics*, vol. 28, n° 2, p. 126-135.

POMMIER A (2005) - *Analyse objective de la dynamique aérologique de basses couches dans l'espace Atlantique nord : mécanismes et évolution de 1950 à 2000*. Thèse de l'Université Jean Moulin - Lyon III, 316 p.

RENSEN H. et ISARIN R.F.B. (2001) - The two major warming phases of the last deglaciation at ≈ 14.7 and ≈ 11.5 Ka cal BP in Europe: climate reconstructions and AGCM experiments. *Global and Planetary Change*, vol. 30, p. 117-153.

ROGNON P. et COUDÉ-GAUSSSEN G. (1996) - Changements dans les circulations atmosphérique et océanique à la latitude des Canaries et du Maroc entre les stades isotopiques 2 et 1. *Quaternaire*, vol. 7, n° 4, p. 197-207.

SARR M.A. (2009-a) - *Évolution climatique récente et dynamique de la végétation par l'imagerie satellitaire (Ferlo, Sénégal)*. Thèse en cotutelle de l'Université Jean Moulin - Lyon III et de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 403 p.

SARR M.A. (2009-b) - Tournant dans l'évolution des précipitations et des températures au Ferlo (Sénégal) : deux paramètres traduisant une tendance au réchauffement. *Actes de colloque de l'AIC*, p. 425-430.

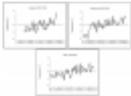
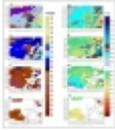
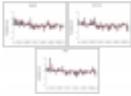
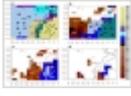
SOTO D. (2011) - *Analyse et réinterprétation des variations climatiques lors du Tardiglaciaire würmien dans l'espace Nord-Atlantique*. Thèse de l'Université Jean Moulin - Lyon III, à paraître.

STOUR L. et AGOUMI A. (2008) - Sécheresse climatique au Maroc durant les deux dernières décennies. *Hydroécologie Appliquée*, vol. 16, p. 215-232.

THOMPSON D.W.J., WALLACE J.M., KENNEDY J.J. et JONES P.D. (2010) - An abrupt drop in Northern Hemisphere sea surface around 1970. *Nature*, vol. 467, p. 444-447.

VOELKER A.H.L. (2002) - Global distribution of centennial-scale records for marine isotope state (MIS) 3: a database. *Quaternary Science Reviews*, vol. 21, n° 10, p. 1185-1214.

Titre	Tableau I - Données et caractéristiques des postes de mesure dans le Nord du Sénégal.
 Légende	Pa : Pluviométrie annuelle. Tn : moyennes annuelles des températures minimales journalières. Tx : moyennes annuelles des températures maximales journalières.
URL	http://physio-geo.revues.org/docannexe/image/1959/img-1.jpg
Fichier	image/jpeg, 160k
Titre	Figure 1 - Segmentation des températures annuelles du point de grille : 18,70°N/5,61°O situé en Mauritanie (1950-2008).
 Légende	1 : premier segment (première sous-période). 2 : deuxième sous-période. 3 : troisième sous-période. 4 : premier saut (différence de moyenne entre le premier et le second segment). 5 : deuxième saut (différence de moyenne entre le deuxième et le troisième segment).
URL	http://physio-geo.revues.org/docannexe/image/1959/img-2.jpg
Fichier	image/jpeg, 212k
Titre	Figure 2 - Segmentation des températures annuelles du point de grille : 16,83°N/5,61°O situé en Mauritanie (1950-2008).
 Légende	En bleu : découpage valide en deux sous-périodes. En rouge : découpage valide en trois sous-périodes.
URL	http://physio-geo.revues.org/docannexe/image/1959/img-3.jpg

	Fichier	image/jpeg, 216k
	Titre	Figure 3 - Évolution de la température de l'air à 2 m de hauteur (a), de la pression atmosphérique au niveau de la mer (b) et de la vitesse du vent à 10 m de hauteur (c) au Maroc, en Mauritanie et sur le proche océan entre 1950 et 2008.
	Légende	Les situations de référence initiale et finale ont été déterminées par la méthode des régressions linéaires appliquée aux données annuelles.
	URL	http://physio-geo.revues.org/docannexe/image/1959/img-4.jpg
	Fichier	image/jpeg, 796k
	Titre	Figure 4 - Écartés centrés réduits des températures moyennes annuelles (1951-2005).
	URL	http://physio-geo.revues.org/docannexe/image/1959/img-5.jpg
	Fichier	image/jpeg, 288k
	Titre	Figure 5 - Spatialisation des résultats de la segmentation d'HUBERT appliquée aux moyennes annuelles des températures de l'air à 2 m de hauteur entre 1950 et 2008.
	Légende	a : années de la première rupture. b : années de la deuxième rupture. c : années de la troisième rupture. d : années de la quatrième rupture. e : premier saut (différence de moyenne entre la première sous-période et la deuxième sous-période). f : deuxième saut. g : troisième saut. h : quatrième saut.
	URL	http://physio-geo.revues.org/docannexe/image/1959/img-6.jpg
	Fichier	image/jpeg, 764k
	Titre	Figure 6 - Écartés centrés réduits des cumuls annuels dans le Nord du Sénégal et moyenne mobile sur trois ans (1951-2005).
	URL	http://physio-geo.revues.org/docannexe/image/1959/img-7.jpg
	Fichier	image/jpeg, 236k
	Titre	Figure 7 - Spatialisation des résultats de la segmentation d'HUBERT appliquée aux moyennes annuelles des pressions atmosphériques au niveau de la mer entre 1950 et 2008.
	Légende	a : années de la première rupture. b : années de la deuxième rupture. c : années de la troisième rupture. d : années de la quatrième rupture. Le symbole (+) indique une rupture positive et le symbole (-) une rupture négative.
	URL	http://physio-geo.revues.org/docannexe/image/1959/img-8.jpg
	Fichier	image/jpeg, 948k
	Titre	Figure 8 - Évolution (en %) de la fréquence relative des principales directions de vent au Maroc, en Mauritanie et sur le proche océan entre 1950 et 2008.
	Légende	a : vents de direction nord (de 337,5° à 22,5°). b : fréquence des vents de direction nord-est (de 22,5° à 67,5°). c : fréquence des vents de direction est (de 67,5° à 112,5°). Les situations de référence initiale et finale ont été déterminées par la méthode des régressions linéaires appliquée aux données annuelles.
	URL	http://physio-geo.revues.org/docannexe/image/1959/img-9.jpg
	Fichier	image/jpeg, 1,1M

	Titre Figure 9 - Spatialisation des résultats de la segmentation d'HUBERT appliquée aux moyennes annuelles de la vitesse du vent entre 1950 et 2008.
	Légende a : années de la première rupture. b : années de la deuxième rupture. c : années de la troisième rupture. d : années de la quatrième rupture. Le symbole (+) indique une rupture positive et le symbole (-) une rupture négative.
	URL http://physio-geo.revues.org/docannexe/image/1959/img-10.jpg
	Fichier image/jpeg, 1,1M

Pour citer cet article

Référence électronique

Laïla Amraoui, Mamadou Adama Sarr et Didier Soto, « Analyse rétrospective de l'évolution climatique récente en Afrique du Nord-Ouest », *Physio-Géo* [En ligne], Volume 5 | 2011, mis en ligne le 25 juillet 2011, Consulté le 22 juin 2013. URL : <http://physio-geo.revues.org/1959> ; DOI : 10.4000/physio-geo.1959

Auteurs

Laïla Amraoui

Laboratoire Climatologie Risques Environnement, UMR 5600 "Environnement, Villes et Sociétés", Université Jean Moulin - Lyon III, 18 Rue Chevreul, Case 20, 69007 LYON, FRANCE.

Courriel : lailaamraoui@yahoo.com

Mamadou Adama Sarr

Laboratoire Climatologie Risques Environnement, UMR 5600 "Environnement, Villes et Sociétés", Université Jean Moulin - Lyon III, 18 Rue Chevreul, Case 20, 69007 LYON, FRANCE / Laboratoire de Développement Durable et Dynamique Territoriale, Université de Montréal, 520, Côte Sainte-Catherine, local 305, OUTREMONT (Qc) H2V 2B8, CANADA.

Courriel : mamadou.adama.sarr@umontreal.ca

Didier Soto

Laboratoire Climatologie Risques Environnement, UMR 5600 "Environnement, Villes et Sociétés", Université Jean Moulin - Lyon III, 18 Rue Chevreul, Case 20, 69007 LYON, FRANCE.

Courriel : didier.soto@gmail.com

Droits d'auteur

Tous droits réservés