

Atlas agroclimatique sur la variabilité et le changement climatique au Sahel



Janvier 2015



Préface

Les secteurs prioritaires (agriculture, élevage, eau, etc..) sont les plus affectés par le climat et ses variations dans les pays en voie de développement de l'Afrique de l'Ouest. Dans ces régions, l'agriculture vivrière pluviale occupe une place capitale dans les économies nationales. En effet, les populations de ces pays sont majoritairement rurales et exploitent des systèmes de production dont les performances sont étroitement soumises au climat. Cette vulnérabilité structurelle au climat s'est particulièrement amplifiée au Sahel à la fin du 20ème siècle, suite à une réduction des précipitations concomitante à une augmentation de la population. Les sécheresses des années 1970 et 1980, l'accroissement des températures, la variabilité accrue des pluies et ses composantes ainsi que les fortes pluies récurrentes des années 2000 qui ont frappé la zone, constituent quelques-uns des événements extrêmes qui seront, sans doute, amplifiés par les changements climatiques (IPCC, 2013).

Au regard de ce contexte climatique, le Centre Régional Agrhymet (CRA) se doit d'élaborer et de disséminer des informations pertinentes sur les risques climatiques du secteur agricole et faire des propositions pour faire face aux menaces liées au climat sur le secteur agricole. C'est dans ce contexte que s'inscrit le projet Global Climate Change Alliance (GCCA) ou Alliance Mondiale contre le Changement Climatique. Il a pour objectif d'appuyer les pays à faire face aux changements climatiques pour l'atteinte des objectifs de réduction de la pauvreté. L'élaboration d'un atlas agroclimatique sur le changement climatique s'inscrit dans le cadre de la composante 1 «Amélioration des systèmes d'informations hydroclimatologiques ainsi que les capacités d'analyse de l'évolution du climat et ses conséquences en Afrique de l'Ouest» du programme regional GCCA/AMCC dans la zone CILSS-CEDEAO.

Remerciements

L'atlas agroclimatique sur le changement climatique au Sahel a été conduit dans le cadre du programme régional intra ACP AMCC/GCC. Il a été préparé conjointement une équipe dirigée par Dr Benoit SARR, agrométéorologiste, et coordonnateur scientifique du programme AMCC/GCCA zone CILSS/CEDEAO et composé de Dr Mohamed Ly, climatologue, Dr Seyni Salack, agrométéorologiste, Dr Alhassane Agali, agrophysiologiste, Dr Seydou Traoré, agrométéorologiste et chef de l'Unité de Coordination scientifique du Centre Régional Agrhymet. Toutes ces compétences ont contribué à la préparation, au contrôle qualité et l'analyse des données climatiques. Mr Brahim Koné et Oumbama Zakaria ont fourni un appui dans la collecte et l'organisation des données, Mr Jean Claude Ouédraogo à la représentation cartographique et en fin Mlle Mariama Moussa pour le traitement des textes.

L'équipe exprime ses sincères remerciements à tous les rélecteurs qui ont fait des commentaires et observations pertinentes tendant à améliorer la qualité du document.

Cet atlas a été réalisé avec le soutien financier de l'Union Européenne à travers le programme Alliance Mondiale contre le changement climatique, une initiative du Secrétariat ACP. L'équipe tient à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de cette étude.

Auteurs

Dr Benoît SARR (Agrhymet, CILSS, Niger), Dr Mohamed Ly (Agrhymet, CILSS, Niger), Dr Seyni Salack (Agrhymet, CILSS, Niger et programme Wascal), Dr Alhassane Agali (Agrhymet, CILSS, Niger), Dr Seydou Traoré (Agrhymet, CILSS, Niger),

Contributeurs

Dr Benoît SARR (Agrhymet/ CILSS, Niger), Dr Mohamed Ly (Agrhymet / CILSS, Niger), Dr Seyni Salack (Agrhymet / CILSS, Niger et programme Wascal), Dr Alhassane Agali (Agrhymet / CILSS, Niger), Dr Seydou Traoré (Agrhymet / CILSS, Niger),

Relecteurs

Prof Amadou GAYE (Laboratoire Physique atmosphère, UCAD, Sénégal) Dr P. Hiernaux (CNRS, France), Pierre Camberlin (Centre de recherche de Climatologie, Dijon, France), M'Baye Diop (ISRA, Sénégal), Chritian Baron (CIRAD, France)

Infographie et cartographie

Jean claude Ouédraogo (Agrhymet / CILSS, Niger),
Pape Oumar DIEYE UCID/Agrhymet
Boubacar Mainassara Abdoul Aziz UCID/Agrhymet

Publié par :

Le centre Régional Agrhymet / CILSS

Ce document a été élaboré avec l'appui financier de l'Union Européenne (UE). Le contenu de la présente publication n'engage que les auteurs et l'UE n'est pas responsable de l'usage qui pourrait être fait des informations qui y sont contenues.

Les utilisations à des fins non commerciales seront autorisées à titre gracieux sur demande. La reproduction pour la revente ou à d'autres fins commerciales, y compris à des fins didactiques, pourront être soumises à des frais.

Liste des acronymes

ACP	Afrique, Caraïbes, Pacifiques
AEJ	Jet d'Est Africain
AMCC	Alliance Mondiale contre le Changement climatique
CC	Changement Climatique
CCNUCC	Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique
CEDEAO	Communauté Economique des Etats d'Afrique de l'Ouest
CILSS	Comité permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel
CNRS	Centre National de Recherche Scientifique
CRA	Centre Régional de Formation et d'Application en Agrométéorologie et Hydrologie Opérationnelles (Centre Régional AGRHYMET)
ETc	Evapotranspiration maximale
ETo	Evapotranspiration potentielle
DS	Date de sémis
DSSAT	Decision Support System for Agro-technology
FIT	Front InterTropical
FOD	Faux départs
FOF	Fins précoces
GCCA	Global Climate change Alliance
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat
ISRA	Institut Sénégalais de Recherche Agricole
MDP	Mécanisme pour un Développement Propre
MOA	Mousson Ouest Africain
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PAN	Plan d'Adaptation Nationaux
PANA	Programme d'action national d'adaptation aux changements climatiques
PMA	Pays moins avancés
REDD+	Réduction des émissions due à la dégradation et à la déforestation
SOA	Sahel Ouest Africain
TEJ	Jet d'Est Tropical
UCAD	Université Cheikh Anta Diop
UCID	Unité, Communication, Information et Documentation
UE	Union Européenne
ZCIT	Zone de convergence intertropicale

Titres : Atlas agroclimatique sur la variabilité et le changement climatique au Sahel

Mots clés : variabilité et changement climatique, réchauffement climatiques, risques climatiques, impact, agriculture, stratégies d'adaptation

Résumé exécutif

Sur la base d'observations climatiques historiques, d'analyse du climat observé et futur, et de simulations à l'aide de modèles biophysiques des impacts du climat sur l'agriculture, cet atlas présente un ensemble de représentations cartographiques, graphiques et tabulaires qui permet de répondre à l'ensemble des questions que posent tout citoyen sur l'état du changement climatique.

L'atlas abrite, en effet, un socle d'informations importantes sur la variabilité et les changements climatiques au Sahel. L'état du réchauffement climatique, la variabilité accrue des pluies, le dysfonctionnement des paramètres de la saison des pluies, la recrudescence des phénomènes climatiques et météorologiques extrêmes (vague de chaleur, sécheresse, fortes pluies), les impacts du changement climatique sur les cultures, la voie à emprunter en matière d'agriculture mieux réfléchi face au climat sont autant d'informations qui y sont illustrées. Il fournit, en effet, des pistes et de recettes sur la manière d'agir à court, moyen et long terme pour adapter les secteurs clés au changement climatique.

Enfin, cet atlas qui a pour ambition de toucher une large communauté d'utilisateurs est traduit en langage clair et compréhensible par tous.

1. Contexte environnemental

Selon l'Organisation des Nations Unies, la population des pays d'Afrique au Sud du Sahara passera de 850 million aujourd'hui à près de 1,7 milliards en 2050 (UN, 2009). Ce qui correspond à plus de 35 % d'accroissement. Le principal corollaire de cet accroissement de la population est l'augmentation concomitante de la demande en nourriture et l'énorme défi à maintenir une production agricole durable. La difficulté des pays de la zone CILSS/CEDEAO tient principalement au fait que l'agriculture est tributaire au climat et les populations ont une capacité économique et institutionnelle limitée pour s'adapter aux changements. Par ailleurs, en se basant sur la synthèse de nombreuses publications scientifiques, le quatrième rapport d'évaluation du Groupe Intergouvernemental des Experts du Climat a désigné l'Afrique de l'Ouest comme étant l'un des épice de la crise alimentaire en Afrique sub-saharienne et les changements climatiques prévus au cours de la première moitié du 21ème siècle affecteront durement les zones déjà vulnérables.

2. Enjeux et défis pour un atlas agroclimatique sur les changements climatiques

Avec les pratiques agricoles existantes et la très grande variabilité climatique caractérisant la zone, l'approvisionnement en nourriture des populations représentera un défi encore plus difficile à surmonter. Si des mesures d'adaptation ne sont pas prises, la fréquence de plus en plus élevée des événements extrêmes tels que les inondations, l'occurrence des pauses pluviométriques extrêmes, les sécheresses etc. vont accentuer, la vulnérabilité des systèmes de production agricole. Dans ce contexte, la veille climatique des régions semi-arides doit être améliorée et renforcée avec des applications agro-météorologiques qui tiennent compte non seulement du niveau de significativité statistique des changements observés mais aussi de leurs impacts sur les cultures. Le défi majeur est de fournir des informations de qualité afin de guider la prise de décision pour mieux faire face aux climats et ses variations.

3. Public Visé

Cet atlas est destiné aux décideurs politiques, à de nombreux usagers et aux agences de coopération pour le développement, etc. Il est conçu afin de présenter aussi un intérêt pour les acteurs et les usagers de terrain intervenant dans les secteurs clés du développement (agriculture, élevage, foresterie, eau, santé, énergie), les planificateurs, les aménagistes et divers spécialistes du monde de la recherche et de la formation. Cet atlas est également destiné aux négociateurs ouest africains et aux points focaux de la CCNUCC sur le climat. Il contient également une masse d'information capitale qui constituent des arguments techniques pour les négociateurs climat ouest africains dans le cadre des débats inter gouvernementaux sur le climat

4. Objectifs spécifiques

Cet atlas a pour objectif de promouvoir la compréhension de la variabilité et du changement climatique et de ses impacts sur les secteurs prioritaires tels que l'agriculture et susciter des actions qui favorisent l'intégration de l'adaptation au changement climatique dans la planification du développement.

Spécifiquement, l'atlas a pour objectifs:

- de produire des informations pertinentes sur le réchauffement climatique dans le monde et en Afrique de l'Ouest,
- de fournir des informations sur la variabilité, les tendances de la pluviométrie et des caractéristiques de la saison des pluies ainsi que les extrêmes climatiques,
- d'identifier les risques climatiques actuels et futurs majeurs et de leurs impacts pour l'agriculture,
- de diffuser auprès des groupes cibles et des usagers finaux les produits climatiques générés en langage clair et compréhensible,
- de susciter la prise de conscience et de décision au niveau des acteurs et favoriser l'adaptation au changement climatique dans les plans, stratégies et politiques de développement.

5. Méthodologie de l'étude

Données de base

Les données météorologiques de pluviométrie, de températures minimales et maximales journalières des années 1950 à 2010 ont été exploitées. Pour le cas des pays du CILSS, les données pluviométriques proviennent du Système de Gestion de la Base de Données Régionales (SGBD) du Centre Régional Agrhymet. Pour les données de températures minimales et maximales, elles proviennent du SGBD et de différentes sources dont les bases de données météorologiques des pays, complétées par des bases de données disponibles sur internet.

Indices climatiques et agroclimatiques

Les indices climatiques et agroclimatiques les plus pertinents pour détecter la variabilité et le changement climatique ont été recensés et analysés (Annexe1).

Méthodologies d'analyse des données

Les données ont fait l'objet :

- de contrôle qualité de données à l'aide du progiciel RClimDex,
- l'analyse statistique des données à l'aide du logiciel R et la cartographie des risques,
- d'analyse des tendances sur les séries temporelles des températures (calcul de l'indice de Lamb, notamment le test non paramétriques de Tau Kendall de la pente a été utilisé pour estimer la tendance dans les séries chronologique (Si la valeur de p est inférieure à 0.05 la tendance est significative avec un niveau de confiance de 95 %) et test de Student de changement de moyennes entre deux sous échantillons,
- L'application du test paramétrique t de Student de comparaison des moyennes des deux sous séries obtenues de part et d'autre du point de rupture (Arlery et al., 1973) a permis également de mettre en évidence la significativité des ruptures liées aux variations du climat,
- Seules les stations dont les données manquantes inférieures à 10 % ont été sélectionnées dans l'étude. La période normale 1961-1990 a été considérée. Au regard du contexte climatique de la période actuelle caractérisée par une variabilité accrue des pluies, la recrudescence des événements extrêmes tels que les fortes pluies l'accroissement des températures, la période 1990-2010, quoique constituée d'une vingtaine d'années a été également étudiée.

Etude des impacts des changements climatique sur l'agriculture

Des simulations ont été réalisées à l'aide du modèle biophysique Decision Support System for Agro-technology Transfer (DSSAT) (Jones et al. 2003, Hoogenboom et al. 2010) afin d'étudier les Impacts de la hausse des températures, du CO₂ et les variations des pluies sur les cultures de mil et de maïs.

6. Les changements climatiques dans le monde et en Afrique

Change in global surface temperature 1901–2012

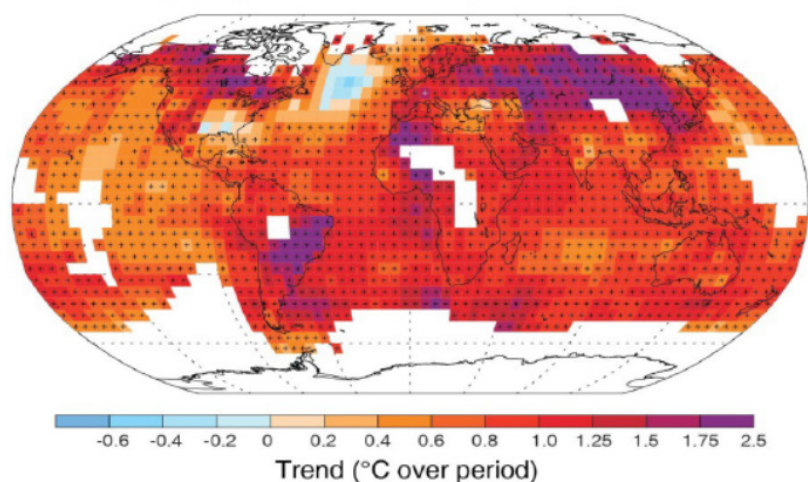


Figure 1: Taux d'accroissement des températures dans le monde de 1901-2012

Selon le 5^{ème} rapport du Groupe Intergouvernemental des Experts en Climat (GIEC), de 1906 à 2012, la température moyenne à la surface de la Terre a partout augmenté (figure 1). La hausse moyenne sur cette période est de 0,80°C et les incertitudes sur le réchauffement climatique futur sont faibles. Au cours de la même période, le niveau moyen des mers s'est élevé de 0,19 m. Le 20^{ème} siècle a probablement été le siècle le plus chaud depuis 1000 ans et les décennies 1990 et 2000 ont connu le réchauffement le plus important de ce siècle.

Tableau 1: Les 10 années les plus chaudes entre 1880 et 2013 dans le monde (d'après les seules mesures des stations météorologiques au sol) source NASA 2013.

N°	Année	Écarts par rapport à la moyenne de 1951–1980
1	2010	+0,92 °C
2	2005	+0,86 °C
3	2007	+0,85 °C
4	1998	+0,82 °C
5	2013	+0,82 °C
6	2009	+0,79 °C
7	2011	+0,78 °C
8	2002	+0,77 °C
9	2003	+0,77 °C
10	2006	+0,77 °C

Selon le Goddard institute for space studies (GISS) de la NASA, l'année 2010 (tableau 1) a été l'année la plus chaude et marque une suite de 30 années les plus chaudes jamais enregistrées depuis l'avènement des observations météorologique, en dépit des effets d'une faible activité solaire. Le réchauffement s'est globalement poursuivi sans discontinuer de 1980 à 2010, sur 30 ans, intervalle de temps généralement considéré par les climatologues comme suffisamment représentatif des tendances du climat d'une région donnée.

Ce réchauffement planétaire semble de plus corrélé avec une forte augmentation dans l'atmosphère de la concentration de plusieurs gaz à effet de serre, dont le dioxyde de carbone, le méthane et le protoxyde d'azote.

Selon les profils représentatifs d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre (RCP) qui sont des scénarii de référence de l'évolution du forçage radiatif (changement de bilan radiatif en Watt par m², figure 2), la température du global augmenterait en moyenne de 1°C [0,4 à 1,6] et de 2° C [1,4 à 2,6] en 2046 -2065 respectivement pour le RCP2,6 (scénario minimal) au RCP8,5 (scénario maximal). Cette hausse atteindrait en moyenne plus de 1°C [0,3 à 1,7] et 3,7 ° C [2,6 à 4,8] en 2081-2100 pour le RCP2,6 et le RCP8,5 respectivement (figure 3).

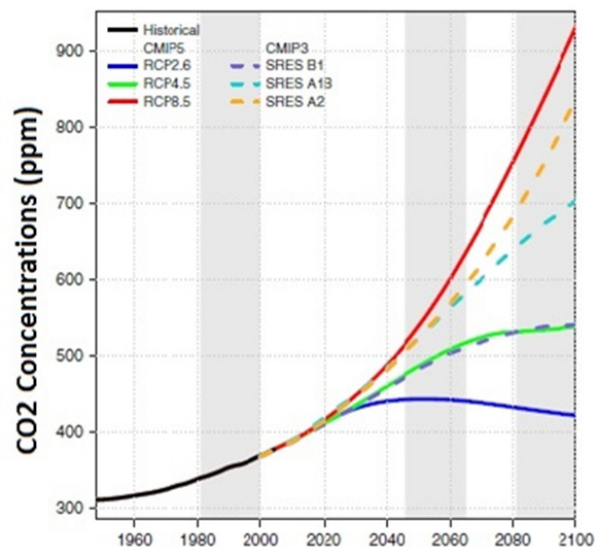


Figure 2: Evolution de la concentration globale du dioxyde de carbone en parties par million (ppm). (Source : Sillmann et al., 2013).

Ce réchauffement global sera plus intense, plus rapide que prévu et inexorable (avec ou sans mesures d'atténuation) d'ici la moitié du 21^{ème} siècle.

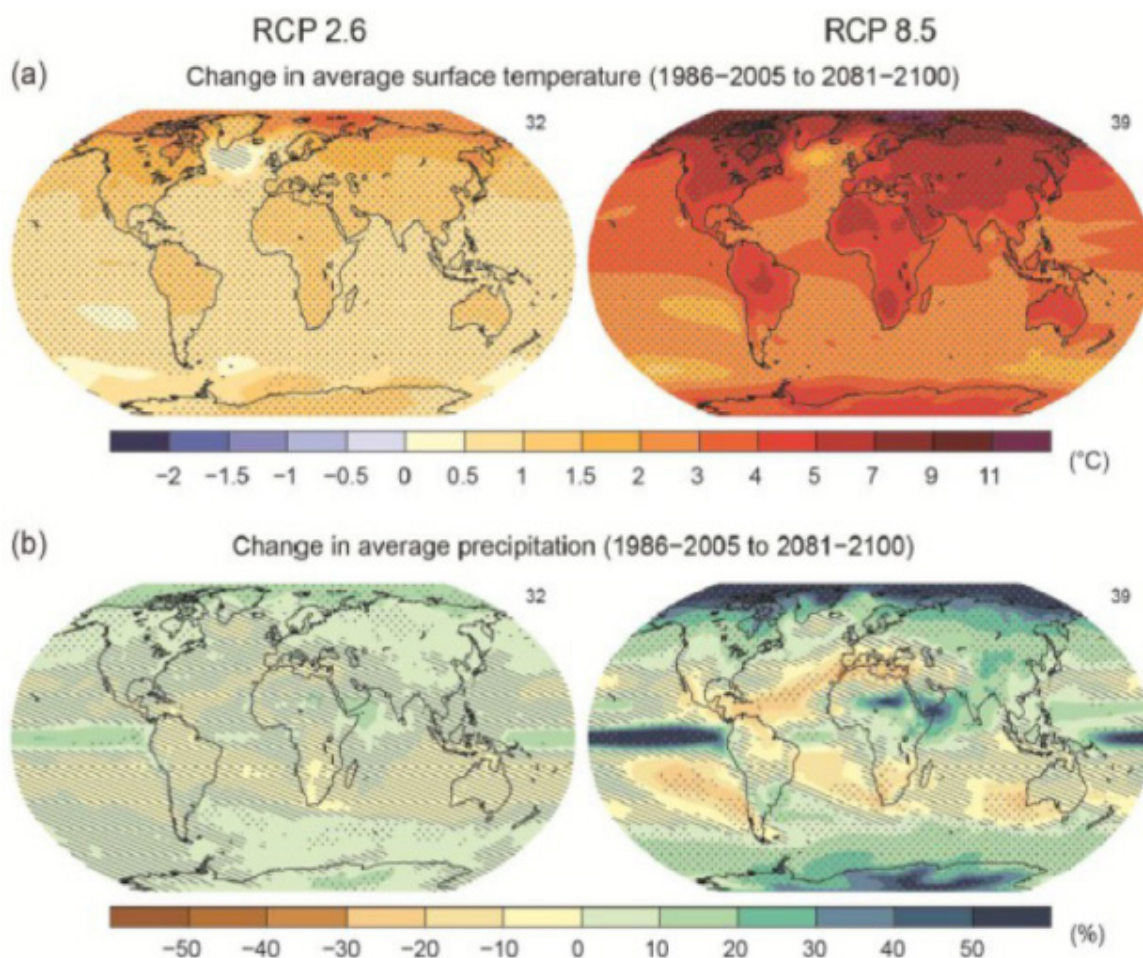


Figure 3: Projections climatiques à la fin du 21^{ème} siècle. (a) taux d'augmentation de la température de l'air à la surface du globe et (b) pourcentage des précipitations, au cours de la période 2081 -2100 comparée à la période 1986 -2005 (GIEC, 2013).

L'état d'un réchauffement permanent supérieur aux records historiques est prévu en moyenne globale en 2047 (± 14 ans de variabilité spatiale) alors qu'en en Afrique de l'Ouest, il se situe autour de 2030 (± 8 ans de variabilité spatiale).

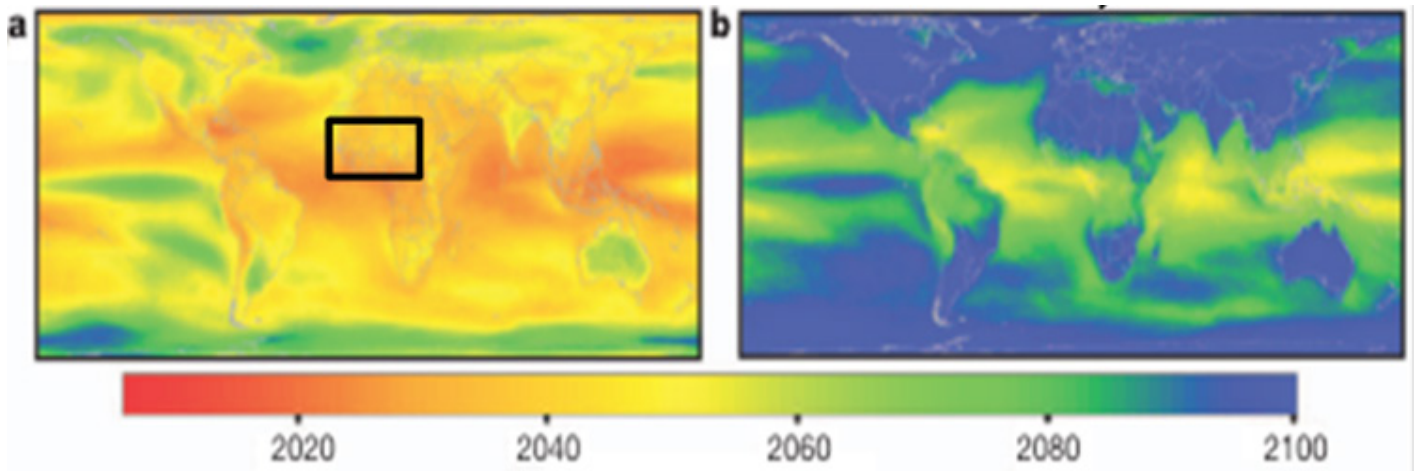


Figure 4: Années de début du réchauffement permanent supérieur aux records historiques. a) variabilité interannuelle et b) variabilité mensuelle (Source : Mora et al., 2013)

6.1 Causes du réchauffement climatique

Pour l'essentiel, les scientifiques s'accordent pour dire que le rejet massif de gaz à effet de serre (ges) dans l'atmosphère dû aux activités humaines est la cause principal du réchauffement climatique. Depuis 1750, sous l'effet des activités humaines, les concentrations atmosphériques de CO₂, et autres gaz à effet de serre (GES) anthropiques se sont fortement accrues. Selon le GIEC (2013), il est extrêmement probable que l'influence humaine a été la cause principale du réchauffement climatique du fait de l'accentuation de l'effet de serre anthropique.

L'effet de serre : une partie du rayonnement infrarouge émis par la Terre vers l'atmosphère terrestre reste piégée dans les basses couches par les gaz dits « à effet de serre », augmentant ainsi la température de la basse atmosphère .

Lorsque le rayonnement solaire atteint l'atmosphère terrestre, une partie (28 %) est directement réfléchi (renvoyé vers l'espace) par l'air, les nuages et la surface claire de la Terre particulièrement les surfaces blanches, c'est l'albédo. Les rayons incidents qui n'ont pas été réfléchis vers l'espace sont absorbés par l'atmosphère (21 %) et la surface terrestre (51 %). Cette partie du rayonnement absorbée par la Terre crée de la chaleur (énergie) qui est restituée à son tour, la nuit notamment, en direction de l'atmosphère sous forme de rayons infrarouges : c'est le rayonnement du corps noir. Ce rayonnement est en partie absorbé par les gaz à effet de serre, puis réémis sous forme de chaleur vers la Terre : c'est l'effet de serre (figure 5) en référence au comportement d'une serre vis à vis de la lumière et de la chaleur (figure 6). Sans ce phénomène, la température moyenne sur terre chuterait d'abord à -18 C. Or, les observations montrent une température de la terre de l'ordre de + 15 °C. Selon les scénarii d'émission de gaz à effet de serre qui sont étroitement dépendant de l'évolution démographique, technologique et socio-économique du monde, la température du globe pourrait atteindre + 16,5° C à 19,5 ° C (figure 7). Les constituants de l'atmosphère qui participent au phénomène de l'effet de serre sont notamment la vapeur d'eau, le gaz carbonique, l'ozone, le méthane et l'oxyde nitreux. Environ un tiers du CO₂ a été produit par l'homme.

Encadré 3 : L'effet de serre

L'effet de serre est la rétention de chaleur dans la couche inférieure de l'atmosphère due à l'absorption et à la réémission par les nuages et certains gaz.

La plus grande partie du rayonnement que la Terre reçoit du soleil traverse l'atmosphère et réchauffe la surface de la Terre. La surface, à son tour, renvoie dans l'atmosphère la chaleur sous forme de rayonnement thermique de grande longueur d'onde. Celui-ci est absorbé et renvoyé par les gaz à effet de serre dans toutes les directions. Une partie du rayonnement est dirigée vers la surface de la Terre, ce qui contribue à la réchauffer.



Source : Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie <http://www.developpement-durable.gouv.fr/L-essentiel.html>

Figure 5. Principe de l'effet de serre et mécanisme de réchauffement de la terre

L'augmentation actuellement observée des quantités de gaz à effet de serre, comme le CO₂, contribue à renforcer l'effet de serre. Les concentrations actuelles de CO₂ dans l'atmosphère dépassent de loin les taux des 650 000 dernières années. Elles sont passées de 280 ppm en 1970 à 379 ppm en 2005, 391 ppm en 2011. Il a été prouvé par l'étude isotopique du carbone dans l'air que cette augmentation des quantités de gaz à effet de serre est due pour plus de la moitié à la combustion de matière carbonée fossile, l'autre partie étant due essentiellement à la déforestation. Les concentrations atmosphériques du dioxyde de carbone (CO₂), du méthane et de l'oxyde nitreux ont augmenté pour atteindre des niveaux sans précédent depuis au moins 800 000 ans. Les concentrations de CO₂ ont augmenté de 40% depuis la période préindustrielle. Cette augmentation s'explique en premier lieu par l'utilisation de combustibles fossiles, et en second lieu par des émissions nettes dues à des changements d'utilisation des sols. Les émissions anthropiques de CO₂ ont accumulé 240 [230 à 250] GtC dans l'atmosphère (GIEC, 2013).

En 2004, 49 milliards de tonnes équivalent CO₂ sont émises annuellement par les activités humaines, réparties comme suit (figure 8) :

- la part due au secteur énergétique est de 25,9 % ;

- suivie par l'industrie à 19,4 % ;
- le secteur forestier à 17,4 % ;
- l'agriculture à 13,5 % ;
- les transports à 13,1 % ;
- les habitations à 7,9 % ;
- les déchets et eaux usées à 2,8 %.

L'hypothèse d'un lien entre la température moyenne du globe et le taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère a été émise pour la première fois en 1895 par le Prix Nobel de Chimie Svante Arrhenius. Ce dernier avait démontré que l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère risquait d'accroître très significativement la température de la planète. Il avait calculé qu'un doublement de la teneur en CO₂ pourrait provoquer un réchauffement de 4 à 6°C. Ces valeurs sont parfaitement en cohérence avec celles fournies par les modèles climatiques du 21^{ème} siècle. Ce qui prouve l'ancienneté de la théorie scientifique du réchauffement climatique.

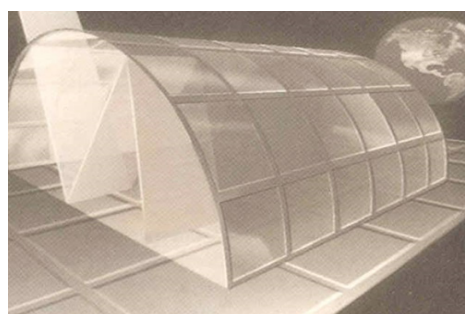


Figure 6: Vue d'une serre et de son comportement vis-à-vis du rayonnement solaire et de la chaleur

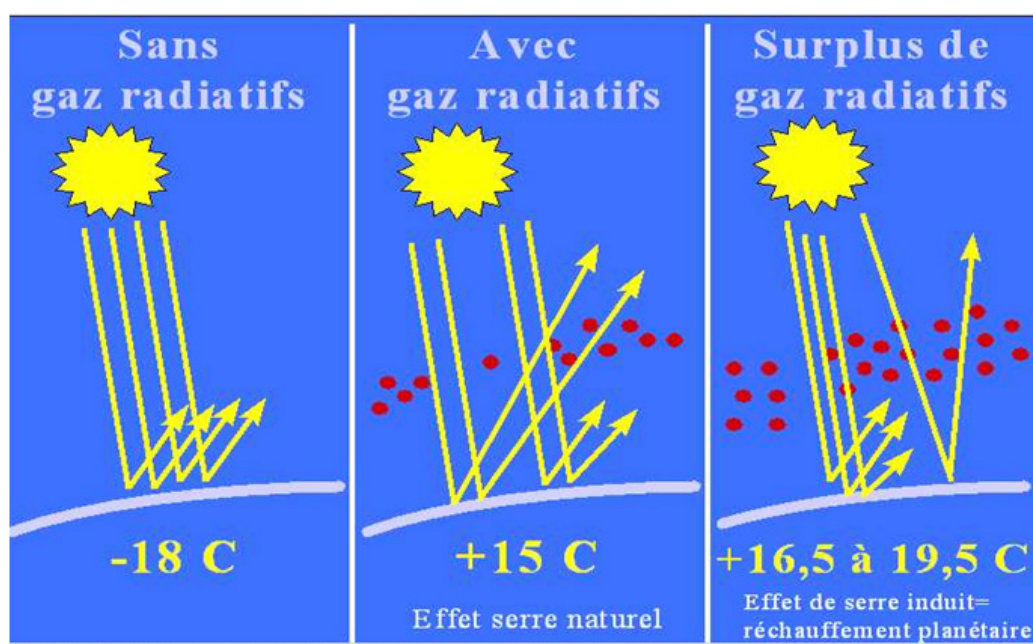


Figure 7: Effet de serre naturel et effet de serre anthropique

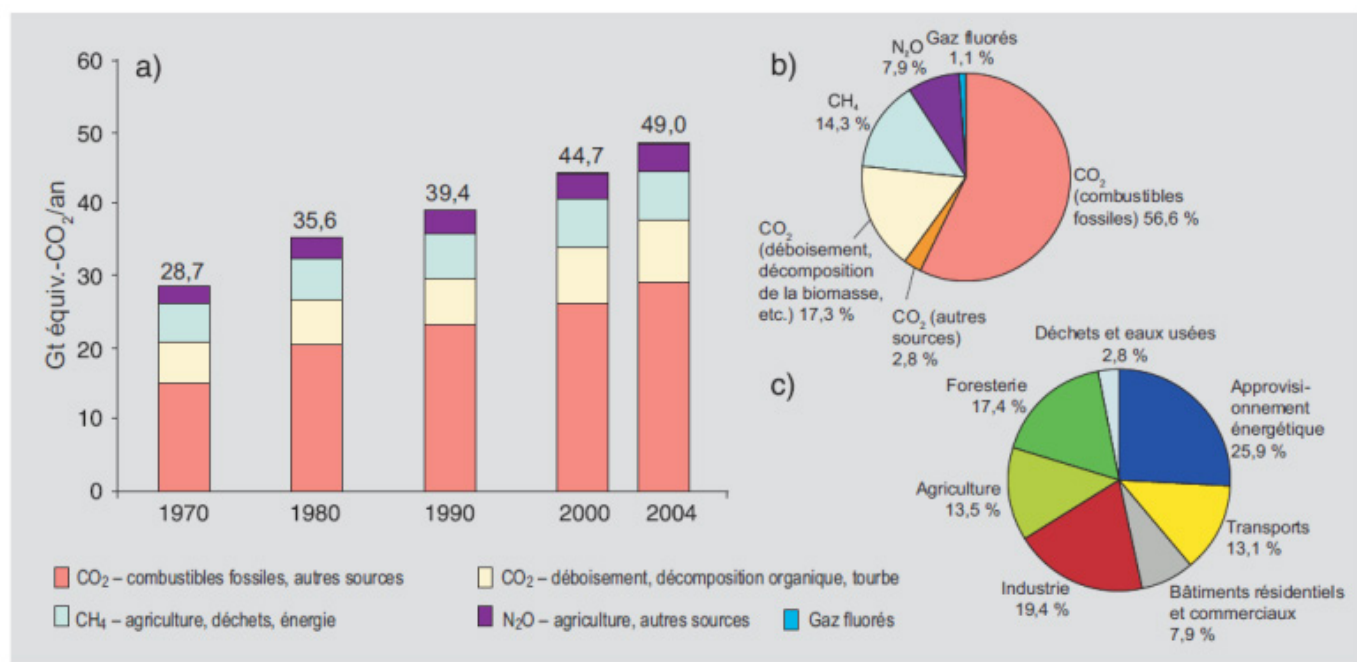


Figure 8: Gaz à effet de serre et secteurs émetteurs de gaz à effet de serre

6.2 Les changements climatiques au Sahel Ouest Africain

La région CILSS/CEDEAO est la zone comprise entre les longitudes 18°W et 25°E et les latitudes 3°N et 28°N. Elle couvre plus de 5 millions de km² et compte plus de 300 millions d'habitants. Elle comprend 17 pays à savoir le Bénin, le Burkina Faso, le Cap vert, la Côte d'Ivoire, la Gambie, le Ghana, la Guinée-Bissau, la Guinée, le Liberia, le Mali, la Mauritanie, le Niger, le Nigeria, le Sénégal, la Sierra Leone, le Tchad et le Togo.

Le Sahel Ouest Africain (SOA) désigne les pays de la bande sahélienne et le Nord des pays côtiers humides (Bénin, Nigéria, Togo) à régime pluviométrique unimodal (Figure 9).

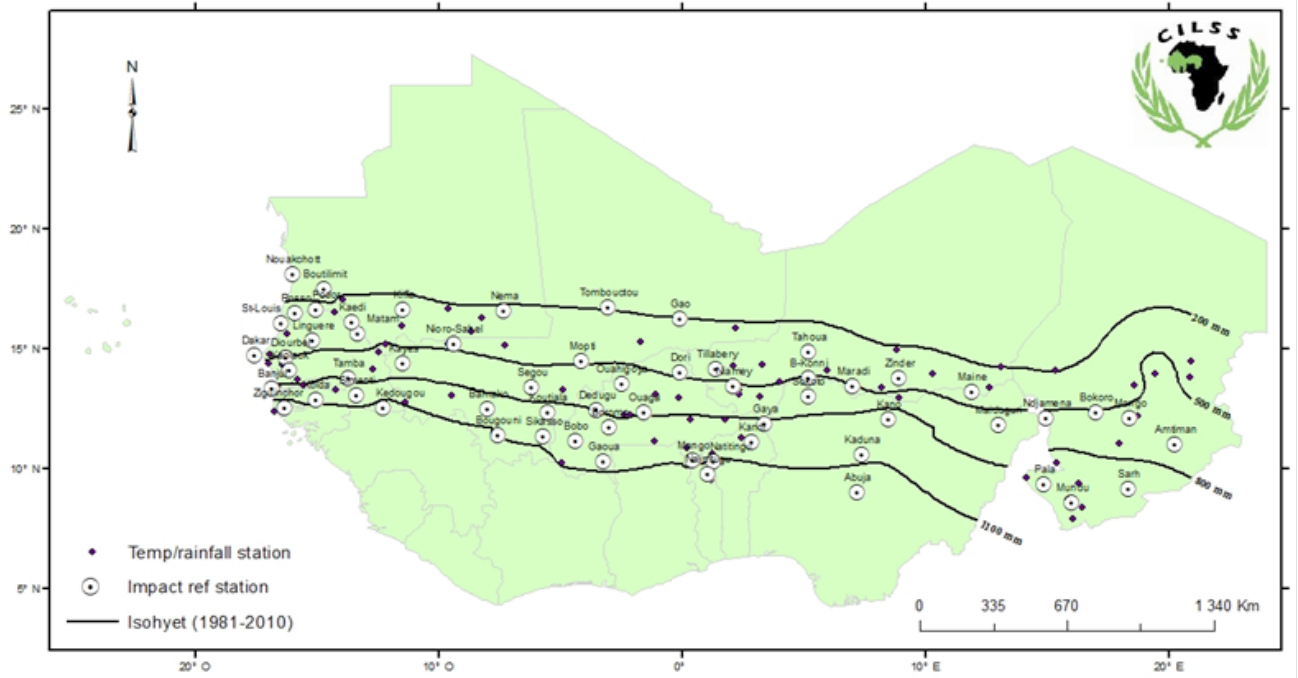


Figure 9: Zone du Sahel Ouest Africain, le réseau de station utilisé et la climatologie des précipitations de la période 1981-2010

La dynamique de la circulation atmosphérique dans la région du Sahel Ouest Africain (SOA) est constituée de deux flux importants : les vents Nord/Nord-Est appelés les alizés et les vents du Sud/Sud-Ouest appelés la mousson qui s'installent sur la région sahélienne de mars à octobre.

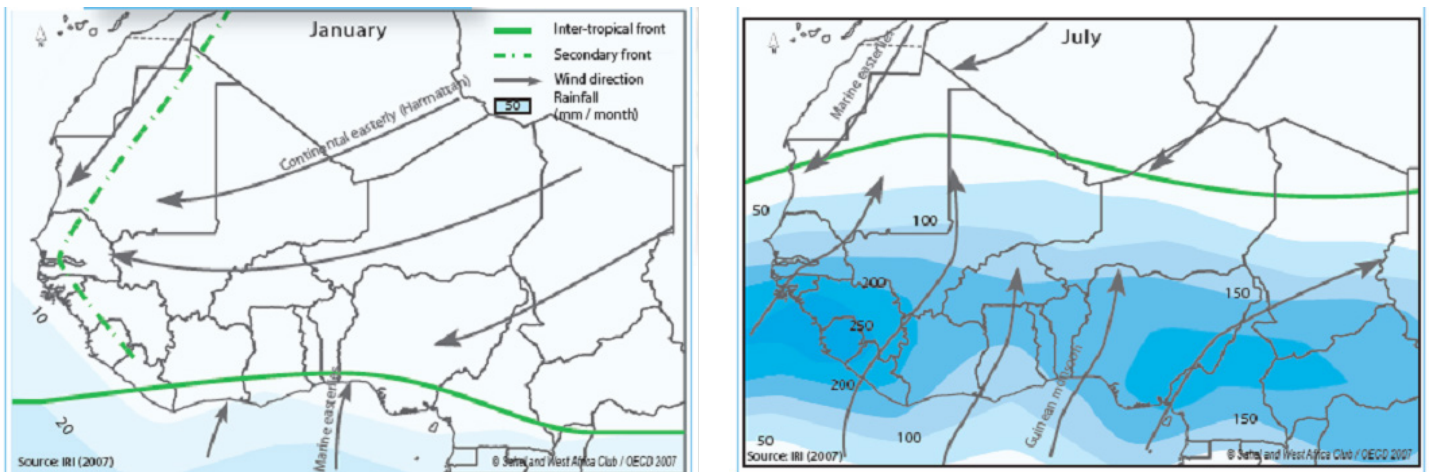


Figure 10 : Cycle de l'harmattan et de la mousson en Afrique de l'Ouest, en saison sèche (à gauche) and saison des pluies (droite)

L'interface entre ces deux courants d'air est la zone de convergence intertropicale (ZCIT). La trace de la ZCIT au sol est dénommée le front intertropical (FIT) dont le déplacement latitudinal (entre 4-6°N en Janvier et 20-25°N en Août) favorise la pénétration de la mousson (figure 10). Les facteurs physiques et dynamiques de l'atmosphère déterminants pour la mousson Ouest Africain (MOA) sont le Front Intertropical (FIT), La dépression thermique saharienne, le Jet d'Ouest Subtropical, les Thalwegs en provenance des moyennes latitudes, le Jet d'Est Tropical (TEJ), le Jet d'Est Africain (AEJ), Les Ondes d'Est Africaines et les vortex cycloniques, l'Air sec en moyenne troposphère, le flux d'humidité, l'énergie des basses couches et l'activité convective.

La coexistence et l'interaction de ses éléments avec d'autres parties du système climatique, tels que la distribution et l'occupation des sols, déterminent le temps météorologique dominant dans la sous-région.

6.3 Etat du réchauffement climatique observé en Afrique de l'Ouest

Un réchauffement plus rapide que la moyenne mondiale

Les températures en Afrique de l'Ouest et particulièrement dans le Sahel, ont évolué quelque peu plus rapidement que la moyenne mondiale, avec des augmentations allant de 0,5°C à 0,8°C depuis la fin des années 1970. La hausse de température devient continue et plus importante sur les températures minimales que sur les températures maximales. Cela est bien visible sur toutes les sous-régions du Sahel-Est, Ouest et Central. Dans la partie Nord des pays humides (Bénin, Togo, Nigeria) la hausse des températures minimales est moins marquée comparativement aux zones sahéniennes (fig 12a et 12b).

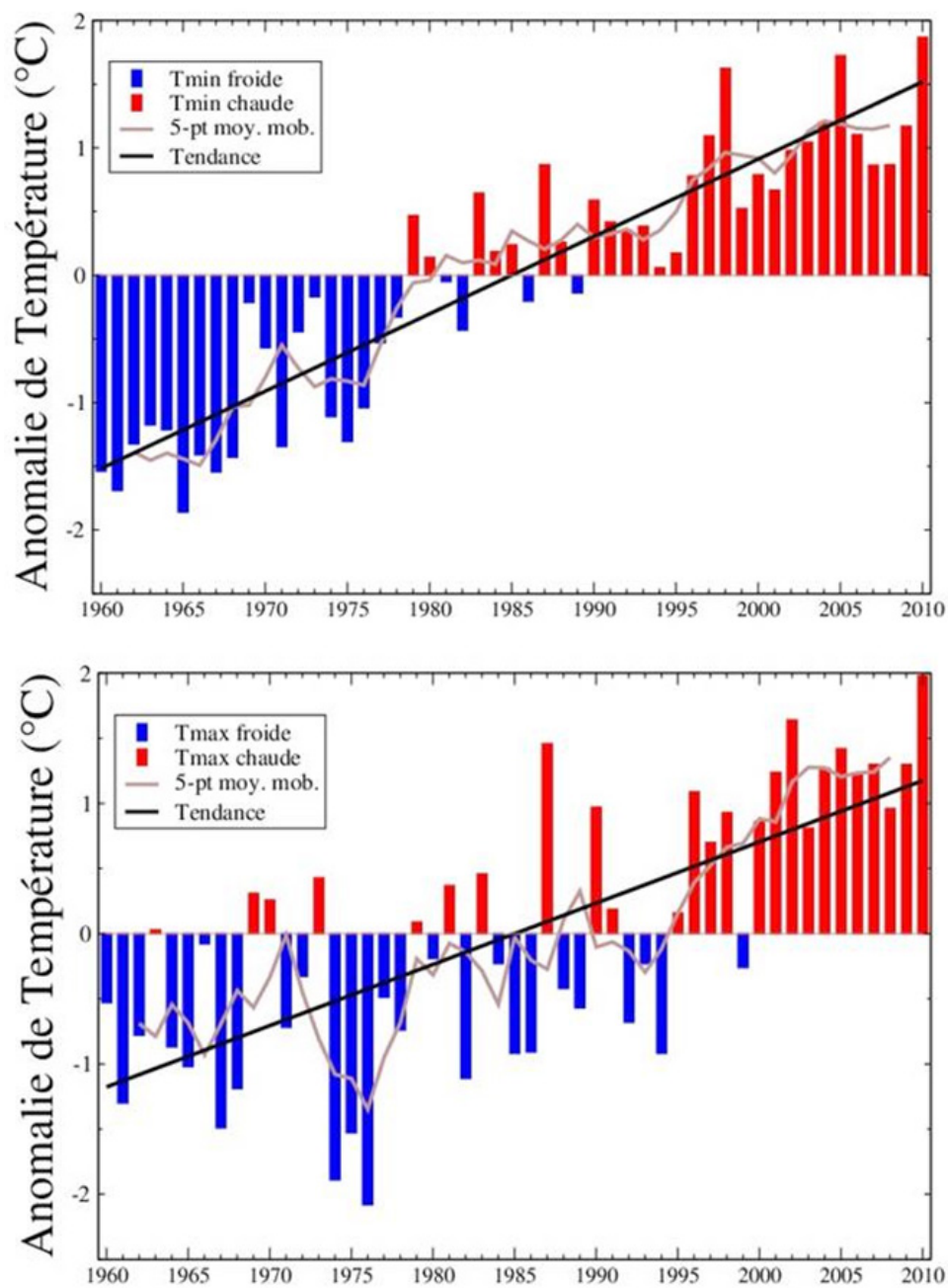


Figure 11: Anomalies des températures minimales (en haut) et maximales (en bas) au Sahel ouest africain

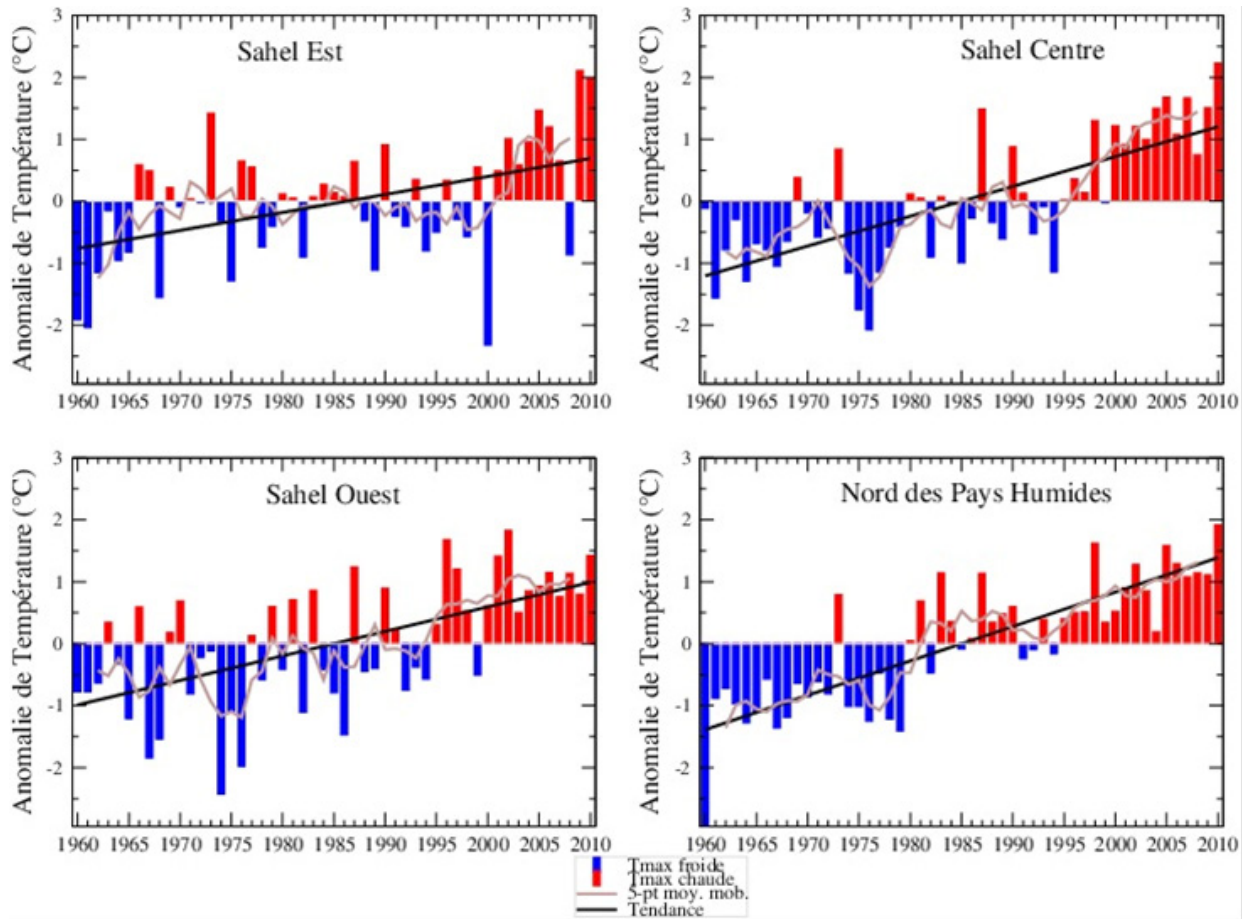


Figure 12 a: Anomalies de températures maximales de 1960 à 2010 dans les sous-régions du Sahel ouest Africain

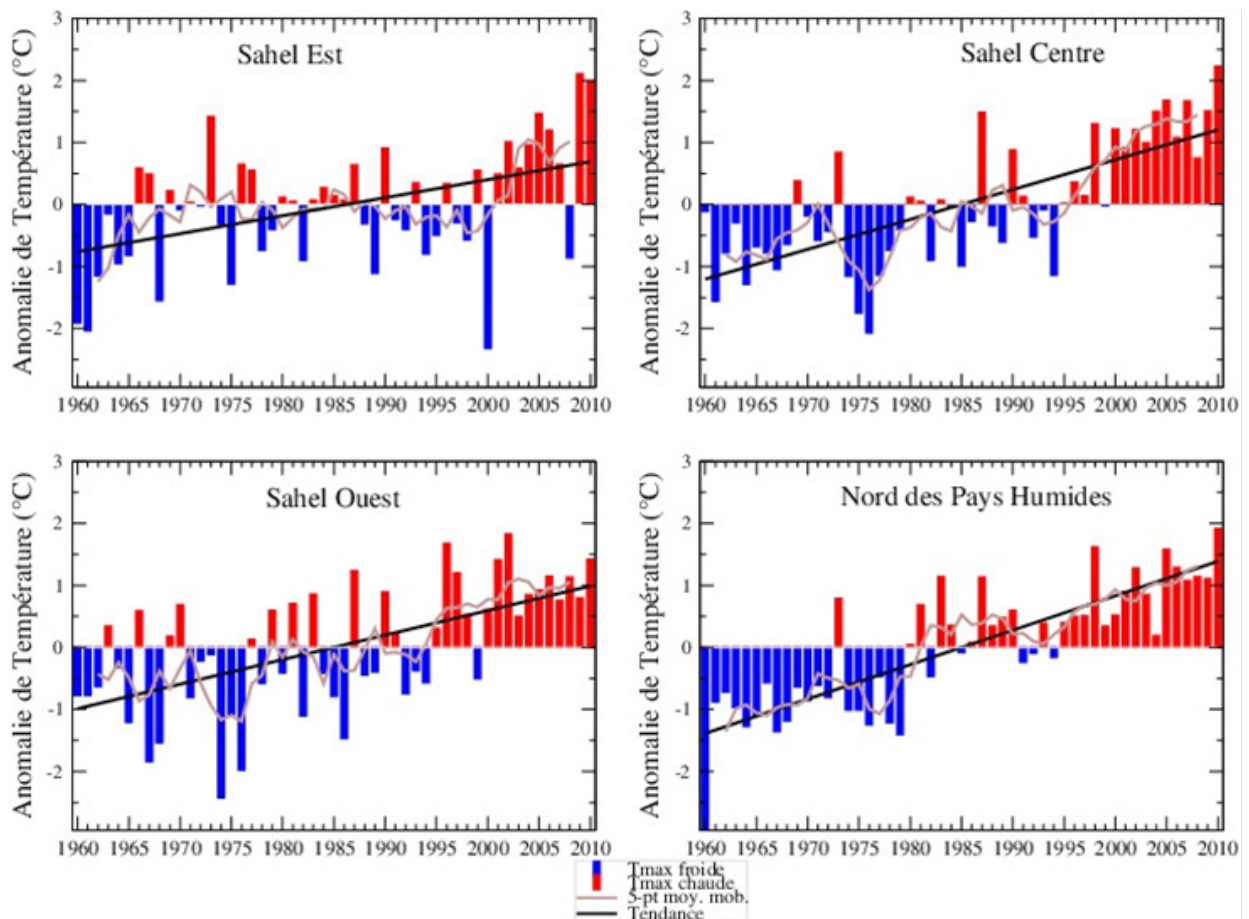


Figure 12b: Anomalies de températures minimales de 1960 à 2010 dans les sous-régions du Sahel ouest Africain

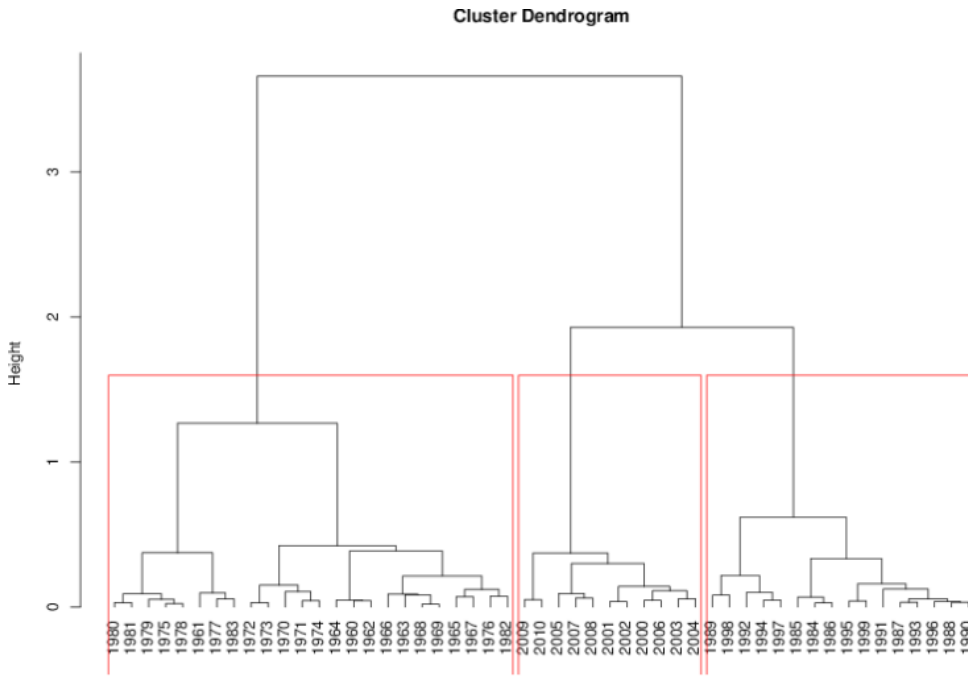


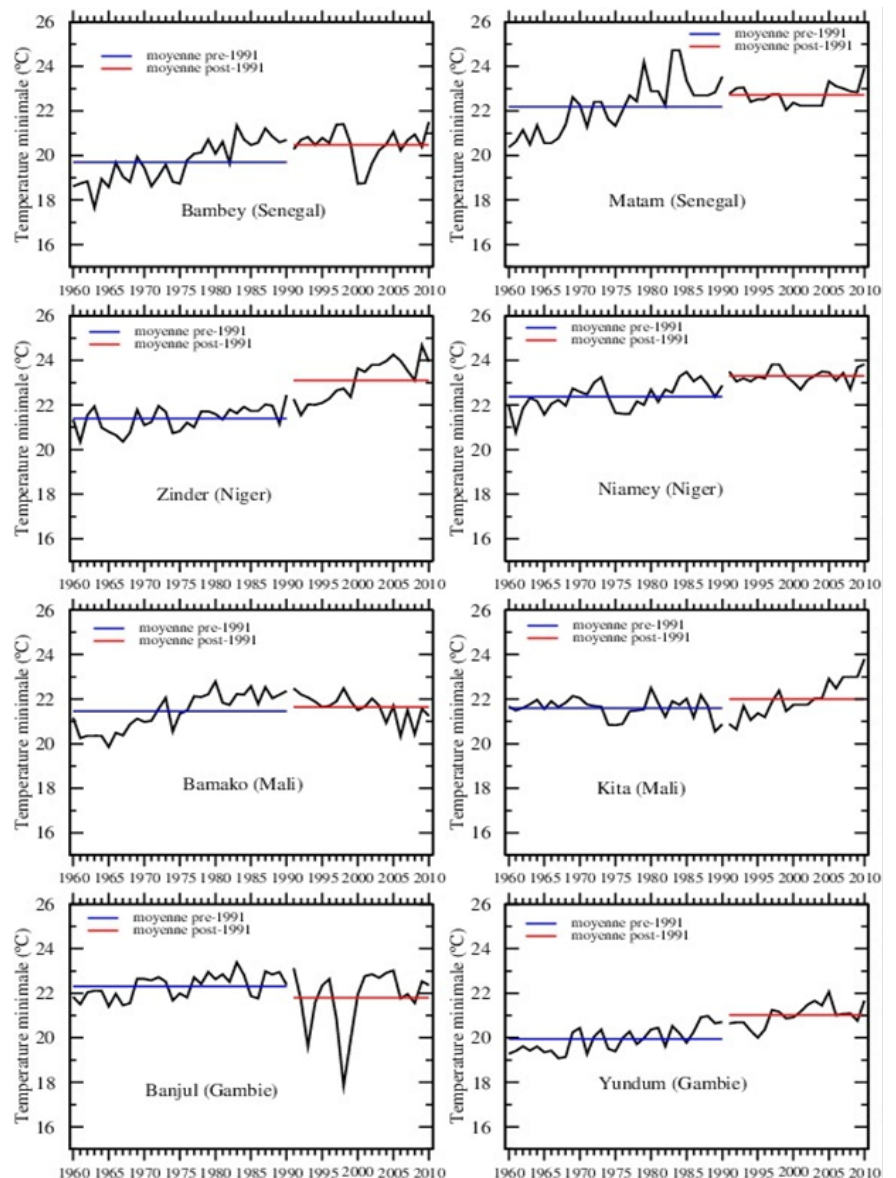
Figure 13: Typologie des années du point de vue thermique : année «chaudes», «moyennes» «froides», selon la méthode d'Analyse en Composante Principale.

Les années 90 et 2000 ont constitué la décennie la plus chaude du 20^{ème} siècle (figure 13). Les années 1998, 2005, 2003 et 2002 ont été les plus chaudes jamais enregistrées depuis 1861.

Le dendrogramme a permis d'identifier trois grandes périodes d'évolution des températures au Sahel avec un réchauffement climatique plus intense, comme au niveau mondial au cours de la décennie 2000-2010 (figure 13).

Les années 2004, 2003, 2006, 2000, 2002, 2001, 2008, 2007, 2005, 2010, 2009 ont été les plus chaudes depuis le début des enregistrements dans la zone.

Depuis 1976, la hausse s'est nettement accélérée, atteignant $0,18^{\circ}\text{C}$ par décennie. La tendance linéaire du réchauffement sur les 50 dernières années de 1956 à 2005 ($0,13^{\circ}\text{C}$ par décennie) est presque deux fois celui des 100 ans de 1906 à 2005 (Sarr, 2009).



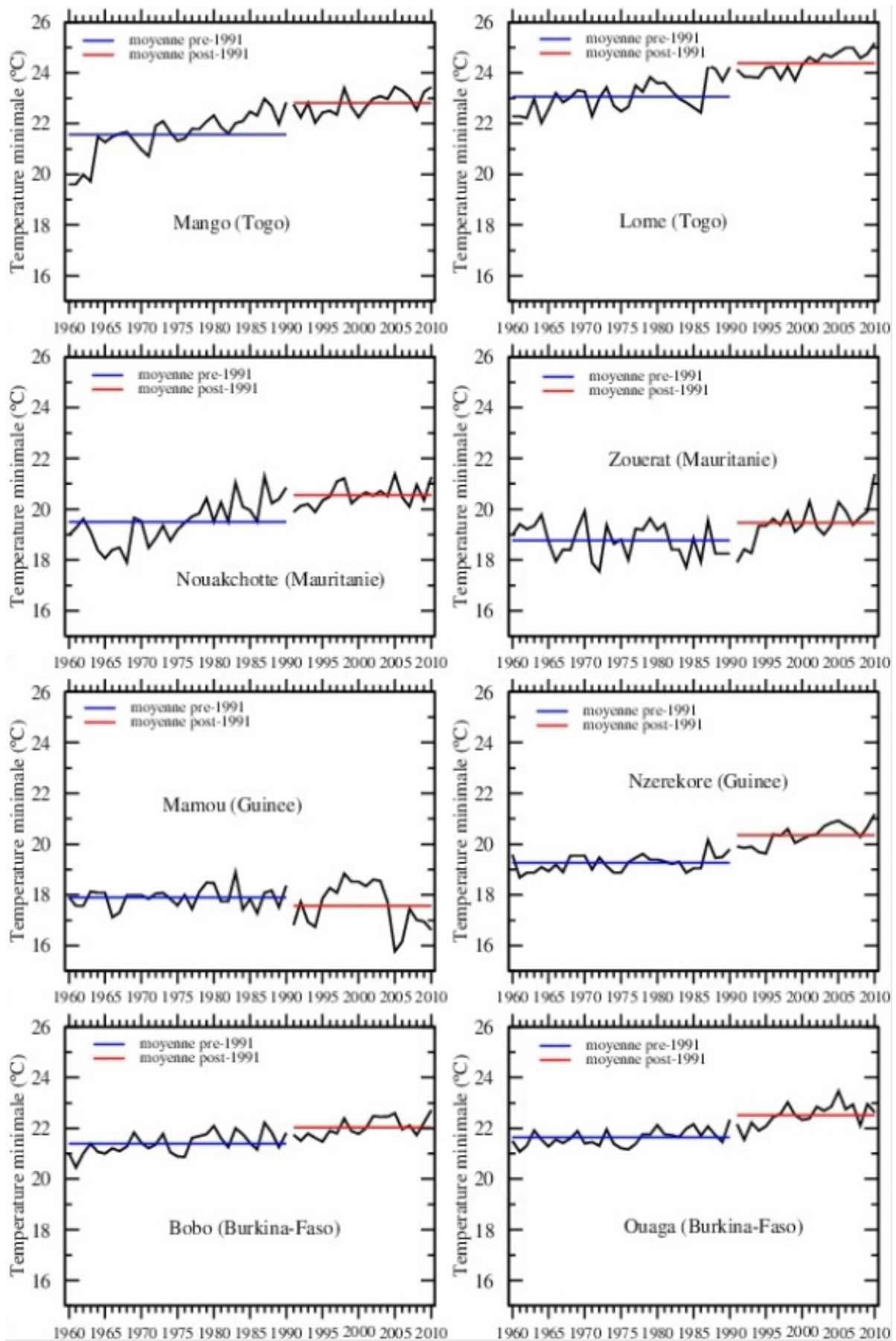


Figure 14 : Evolution des températures minimales au niveau de certaines localités du SOA

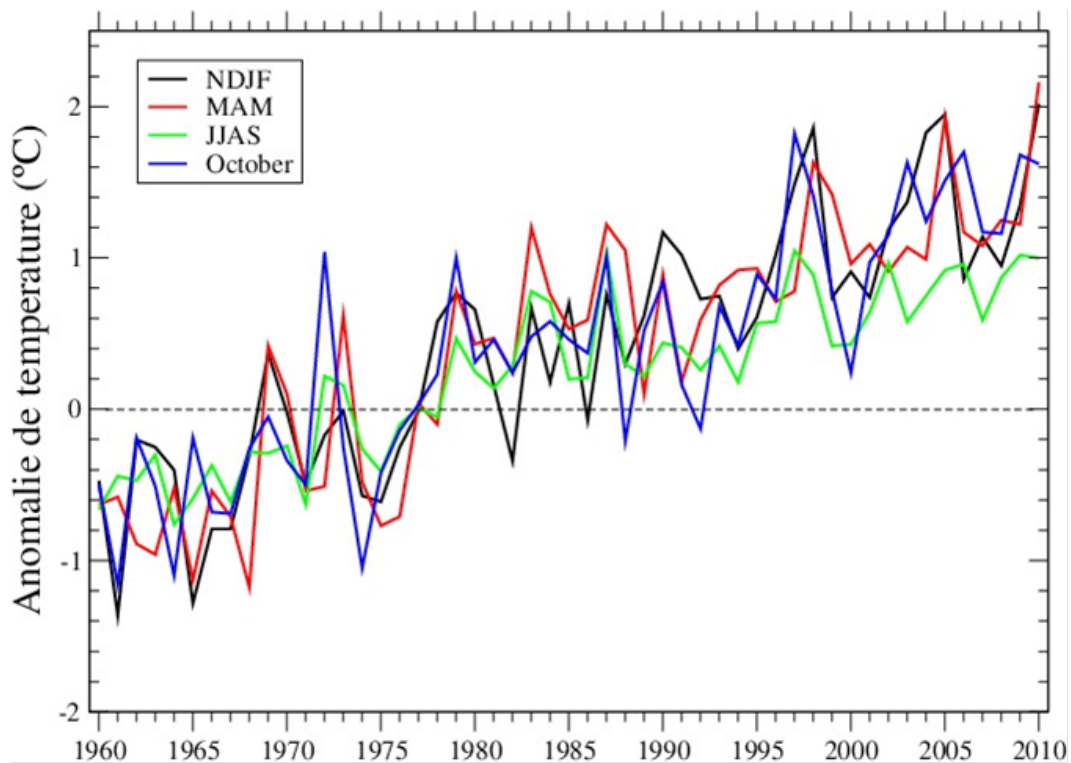


Figure: 15 variabilité des température moyennes saisonnières relativement à la normale 1961-1990 au SOA.

La figure 15 montre que la saison sèche (mars, avril, mai), le mois d'octobre et la saison froide (Novembre, décembre, janvier) se sont plus réchauffés que la saison des pluies. La plus faible hausse des températures durant la saison des pluies pourrait être due à la tendance à un retour à des conditions pluviométriques meilleures observées dans la zone depuis les années 90.

L'augmentation des températures selon les différents modèles climatiques et le scénario dit pessimiste RCP8,5 à l'horizon 2050 serait comprise entre 1 et 1,5 sur les zones côtières, entre 1,5 et 2 dans la zone sud humide et sahélienne et supérieure à 2°C dans la bande saharienne.

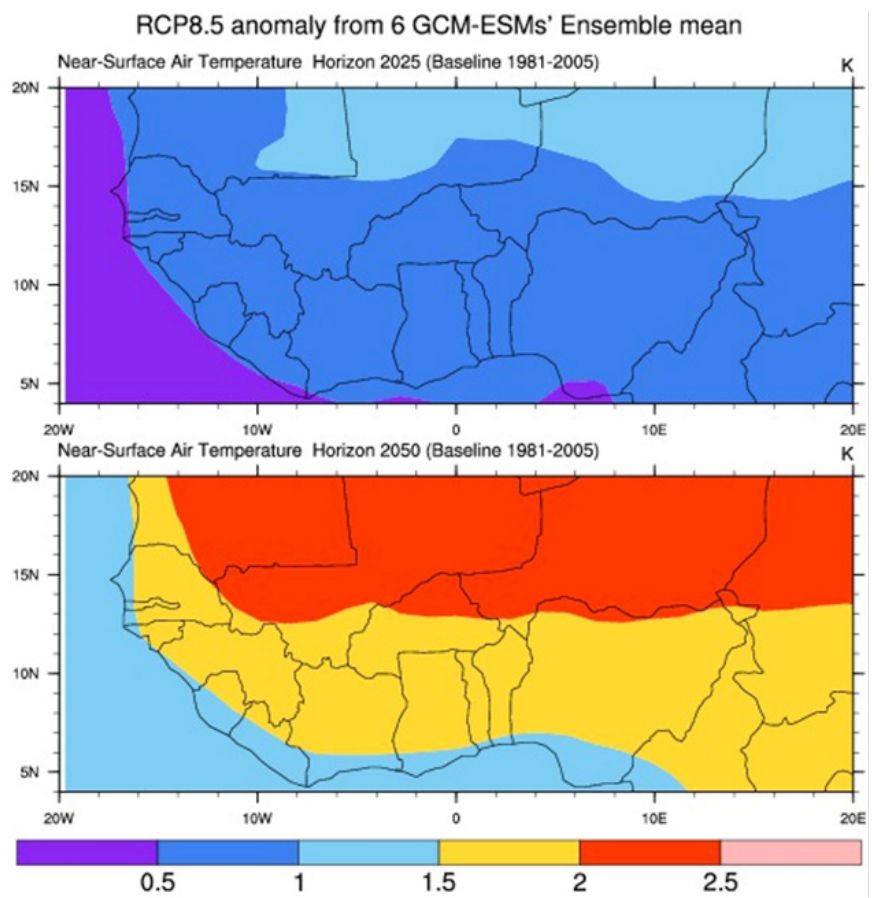


Figure 16: Taux de réchauffement projeté par la moyenne d'ensemble de 6 modèles climatique du GIEC (2013) [BCC-CSMI, CSIRO-Mk3-6-0, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, MIROC5, NorESM1-M] selon le forçage radiatif RCP8.5 à l'horizon 2050.

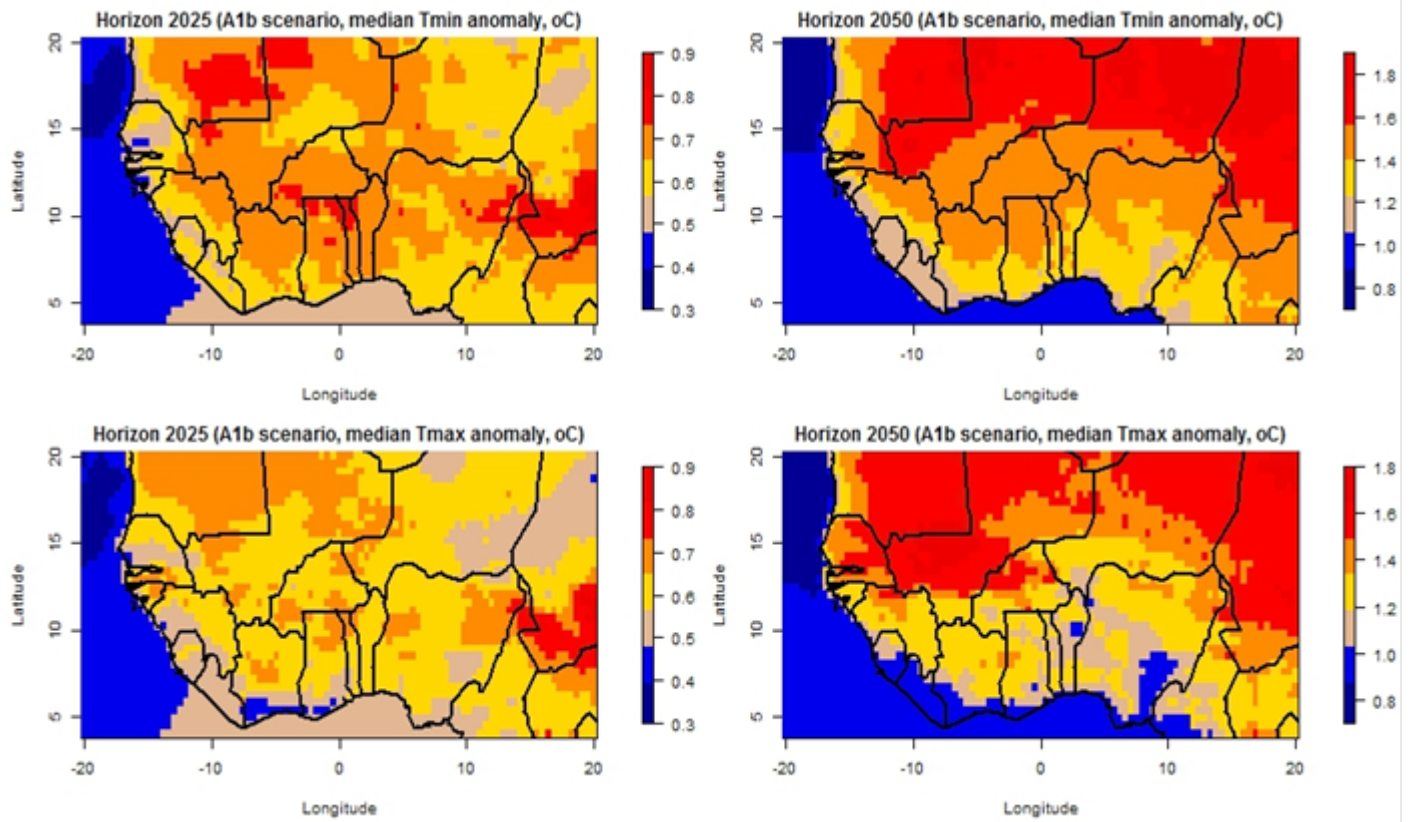


Figure 17: Réchauffement climatique projeté par quatre modèles climatiques régionaux [CLM, HadRM3P, RACMO, REMO] selon le scénario socio-économique A1B du GIEC (2007) à l'horizon 2050.

Augmentation des événements extrêmes de température

Les indices des températures montrent un réchauffement généralisé à travers le SOA sur la période 1960-2010. En effet, si l'on examine la fréquence des nuits froides, on s'aperçoit que la tendance présente une pente négative. Ce qui veut dire que les nuits froides diminuent.

Quant aux jours chauds ils augmentent également alors que les vagues de chaleurs sont devenues de plus en plus fréquentes. Les températures minimales et maximales augmentent et l'amplitude diurne des températures baisse. Ce qui suppose que le réchauffement est plus important sur les températures minimales que sur les températures maximales. Figures 18 à 21.

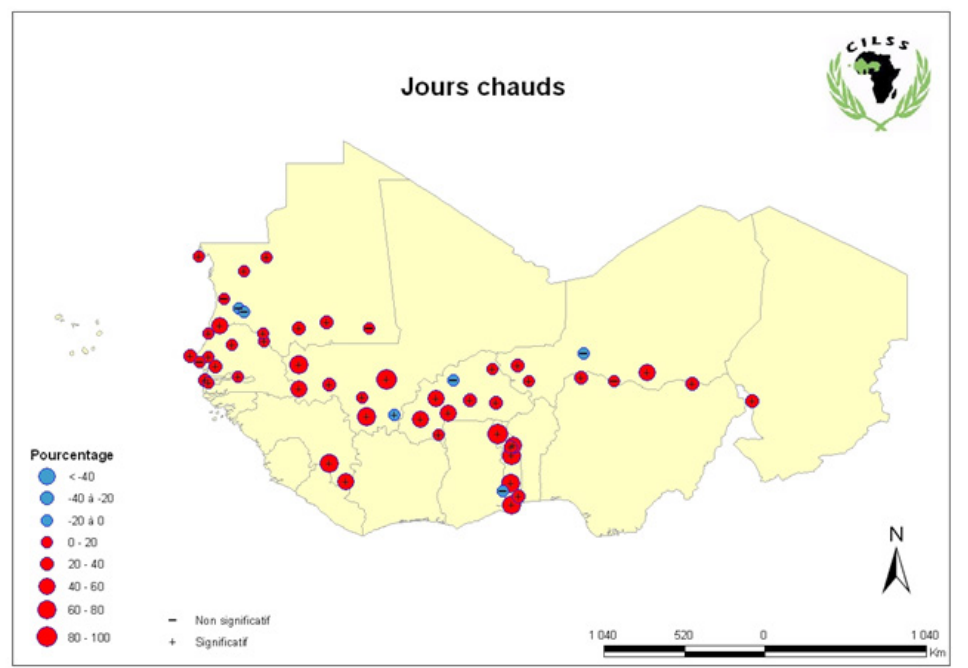


Figure 18: Tendence historique (1960-2010) des jours chauds.

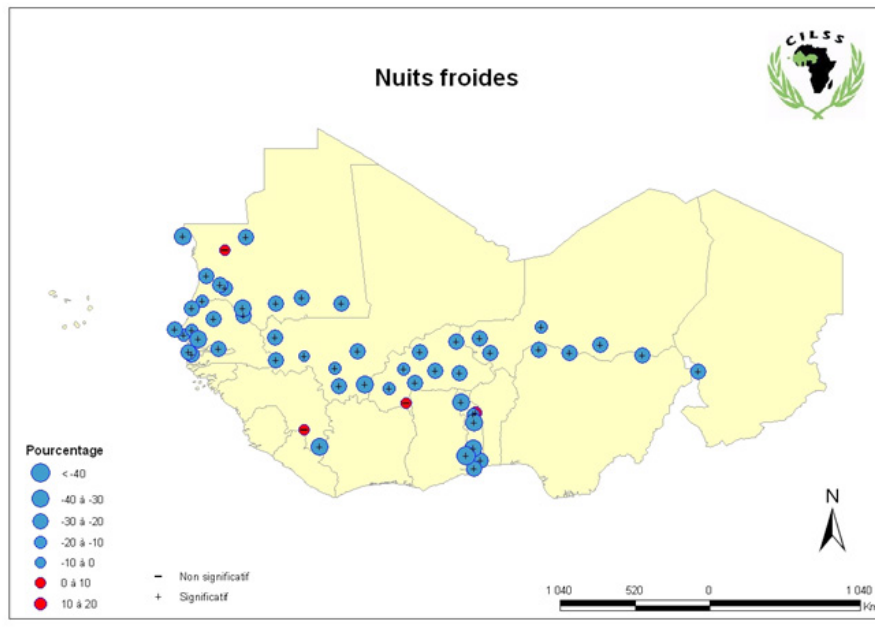


Figure 19: Tendance historique (1960-2010) des nuits froides.

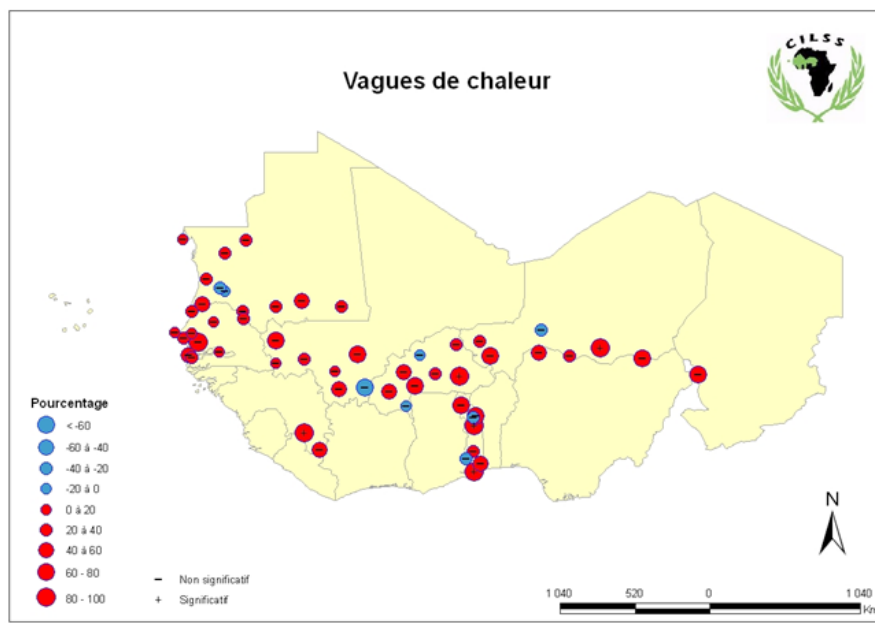


Figure 20: Tendance historique (1960-2010) des vagues de chaleur

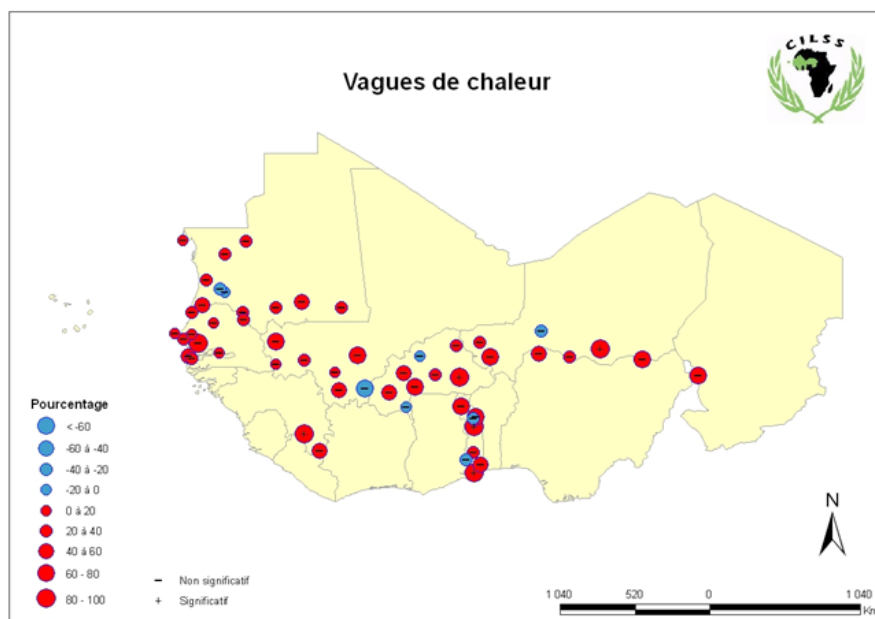


Figure 21: Tendance historique (1960-2010) de l'amplitude thermique (Source: Ly et al., 2013)

En outre, il a été observé une tendance à une augmentation en plusieurs endroits, sans cohérence spatiale, de fortes pluies journalières au cours de ces 20 dernières années (fig 22).

Cette situation serait en concordance avec la recrudescence des inondations enregistrées dans la région depuis les années 90. Le nombre d'inondations est passé en moyenne de 2 à plus de 6-8 par an au cours de ces dernières décennies. Il est très probable (90 %) selon le GIEC (2007) que ces inondations soient liées au changement climatique et qu'elles continuent à devenir plus fréquentes et plus intenses (Sarr, 2012).

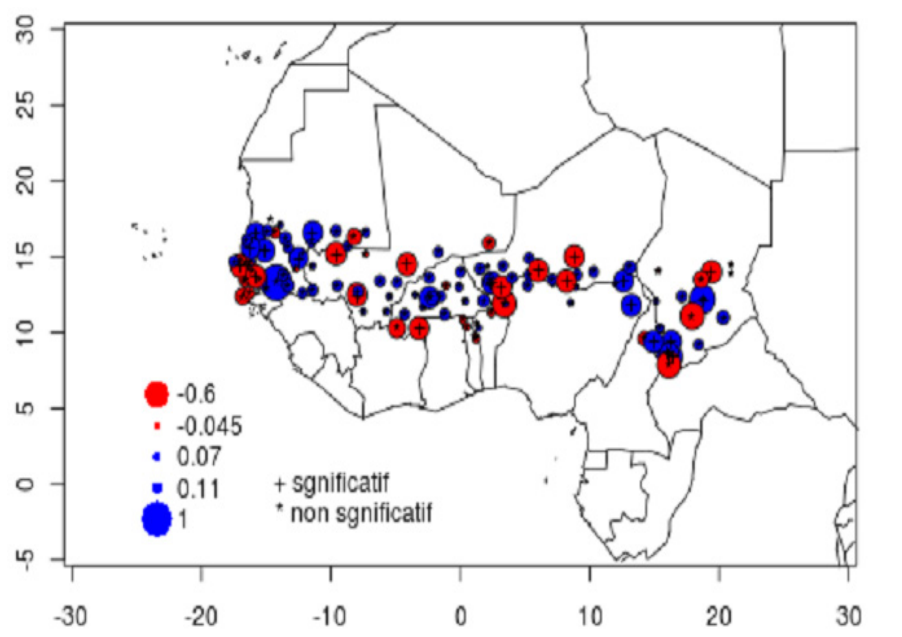


Figure 22 : Tendances des pluies maximales journalières cumulées en 3 jours consécutifs entre 1990 et 2010

6.4 Risques agroclimatiques associés à la pluviométrie observée

Une variabilité accrue des précipitations

L'analyse du cumul annuel de la pluie met en exergue trois époques du régime pluviométrique dans le SOA. Dans la période 1950-1969 les cumuls pluviométriques et l'intensité des cumuls journaliers sur 3 jours consécutifs sont excédentaires. Dans la période 1970-1990 les cumuls et l'intensité des cumuls journaliers sont déficitaires. La période 1991-2010 est caractérisée par des déficits la moyenne des cumuls pluviométriques, l'intensité des cumuls journaliers sur 3 jours, assez proches de la normale (tableau 2). Ce « retour apparent » de la pluviométrie, vers des conditions normales des années post-1990 est caractérisé par une variabilité accrue (fig 23) de la pluviométrie qui rend difficile la planification agricole. La variabilité inter décennale est statistiquement significative et dénote un changement du régime pluviométrique notable.

Tableau 2: Paramètres du test de significativité au seuil de 5%, obtenus sur les caractéristiques du régime pluviométrique (Source: Alhassane et al., 2013)

Variable	Comparaison	Test des Variances (p.valeur)	Test des moyennes (p.valeur)	Pourcentage relatif (%)
Cumul annuel (mm)	1970-1990 versus 1950-1969	0.000*	0.000*	-28.1*
	1970-1990 versus 1991-2010	0.026*	0.000*	-9.0*
	1991-2010 versus 1961-1990	0.867	0.135	+2.2
Cumul en 2 jours consécutifs (mm)	1970-1990 versus 1950-1969	0.000*	0.000	-23.0
	1970-1990 versus 1991-2010	0.000*	0.000*	-10.2*
	1991-2010 versus 1961-1990	0.000*	0.000*	+4.1*

*Statistiquement significatif au seuil de 5%

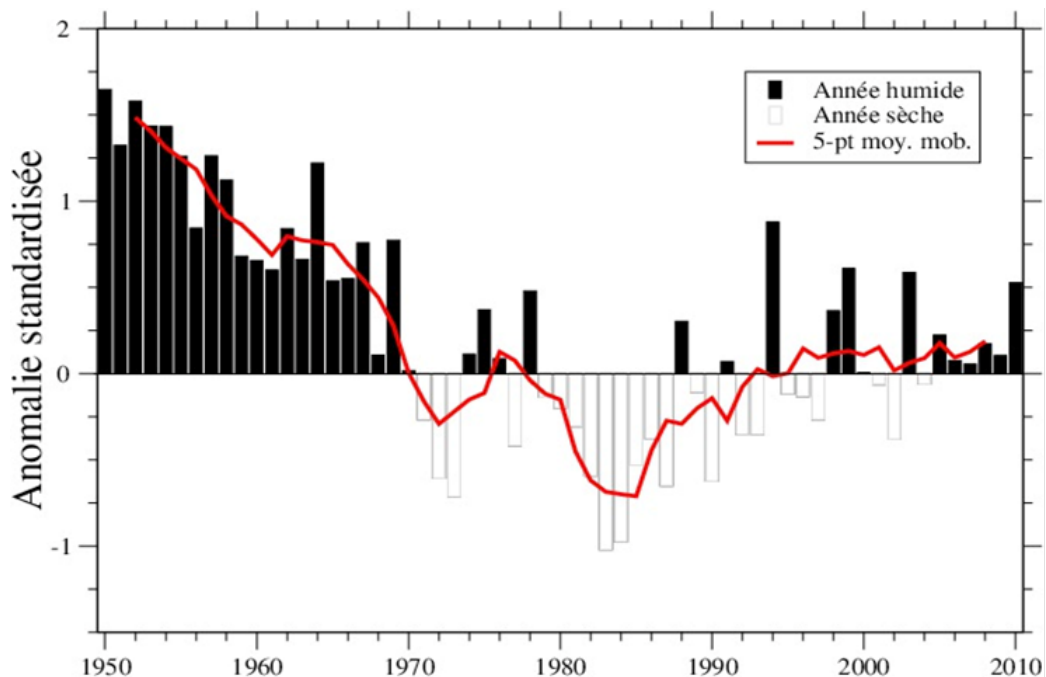


Figure 23: Anomalies (relatives à la moyenne 1961-1990) des cumuls pluviométriques annuels au SOA

Des faux départs et fins précoces persistants

Les pauses pluviométriques (DS) sont des indicateurs de la répartition intrasaisonnière de la pluie pendant la saison culturale. Les DS qui durent deux semaines ou plus sont observés en début de la saison des pluies (catégorie DS4). Celles qui durent plus d'une semaine sont observés souvent vers la fin de la saison des pluies (catégorie DS3). Toutes les deux catégories sont liées aux faux départs (FOD), fins précoces (FOF), et aux raccourcissements de la saison culturale.

Une analyse de l'occurrence des FOD/FOF montre que dans les années humides (P1), les dates de FOD sont plus fréquents deux semaines ou plus avant la 1ère decade de juin (avec une valeur médiane de 16 jours). Alors que, de 1970 à nos jours, les périodes à risques de FOD, sont observées un peu après le début juin (avec des valeurs médianes de 0-5 jours par rapport au 10-juin). Par ailleurs, les dates de FOF sont plus tardives dans les années 1950-1969 que dans les années 1970-2010. Dans la période actuelle qui semble revenir vers une situation pluviométrique normale, les risques de faux départs/fin précoce de saison sont très probables (fig 24).

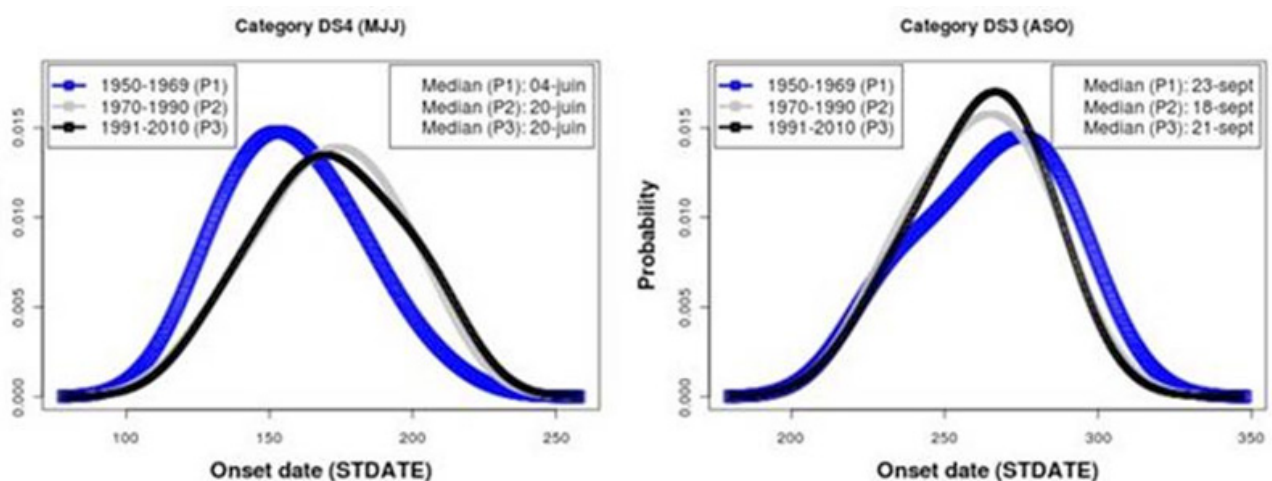


Figure 24: Evolution comparative des dates d'occurrence des pauses pluviométriques extrêmes caractérisant les faux départ/fin précoce des saisons (Source: Salack et al., 2013)

Des dates de semis tardives et longueurs de saisons culturelles courtes

La période 1950-1969 dans laquelle les cumuls pluviométriques et l'intensité des cumuls journaliers sur 3 jours consécutifs sont excédentaires, les dates de début de saison sont précoces et les saisons sont assez longues. La période 1970-1990 sur laquelle les cumuls et les intensités des pluies sont déficitaires, les longueurs des saisons sont plus courtes et les dates de début des saisons sont devenues tardives par rapport à la moyenne 1961-1990. La période 1991-2010 qui est caractérisée par des déficits pluviométriques assez proches de la normale, et comportant quelques années excédentaires, les dates de début de saison restent relativement tardives, avec seulement quelques années à début normal ou précoce, comme dans la période précédente 1970-1990 (fig 25).

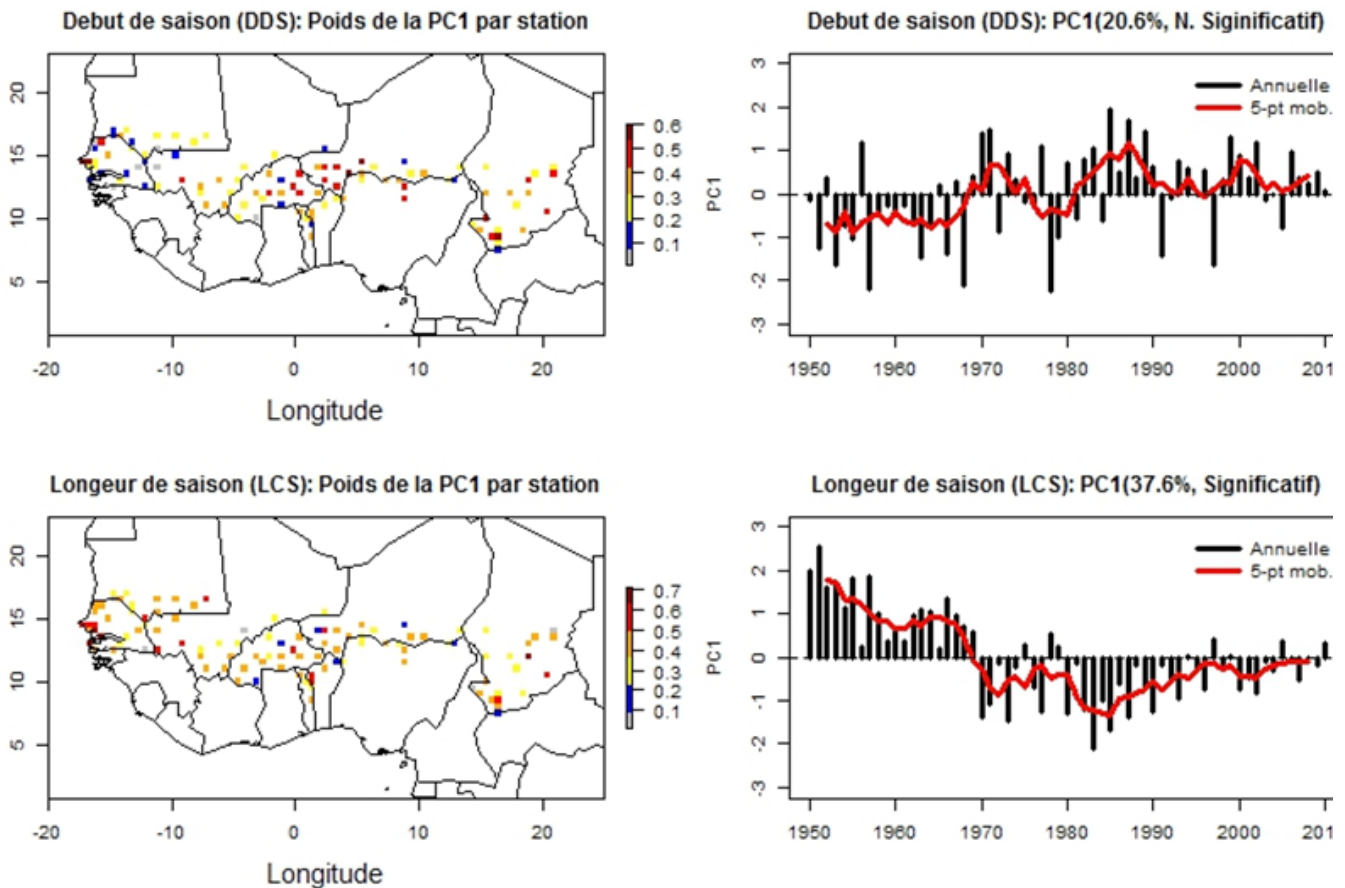


Figure 25: Evolution des indices d'anomalies des dates de semis et longueurs moyennes des saisons au Sahel Ouest Africain (Source : Alhassane et al., 2013).

Ré-semis et Stress hydrique post-floraison très probables

On définit les risques de ré-semis dans la région, lorsqu'il y a occurrence de séquence sèche d'une durée relativement longue après les semis. L'indice agroclimatique correspondant à ce paramètre de la pluviométrie locale est la séquence sèche maximale dans les 30 jours après la date de début de saison (SQSsem). Cet événement est de plus en plus fréquent dans le SOA surtout en 1991-2010. En passant d'une période à l'autre, la durée moyenne de SQSsem n'a pas connu un changement statistiquement significatif, au seuil de 5%. Néanmoins, la variabilité est plus importante. Ces résultats renforcent l'hypothèse selon laquelle les risques de ré-semis sont beaucoup plus probables dans les périodes récentes (Agali et al 2013).

Pour des variétés non-photopériodiques, ayant une durée moyenne de cycle de 90 jours ou un peu moins, le début de la période épiaison-floraison est estimé à 50 jours après semis. La durée moyenne de ces pauses observée en 1950-1960 (P1) est de 7 jours (± 5), alors qu'elle est de 9 jours (± 7) en 1961-1990 (période de référence) et de 9 jours (± 6) en 1991-2010 (P3). Ces différences de moyennes sont statistiquement significatives entre la période P1 et la période de référence P3. Alors qu'il n'y a pas de différence entre la période de référence et la P3. Il ressort de ces résultats que les risques de stress hydriques augmentent avec l'augmentation de la durée des séquences sèches, en phase reproductive des cultures pluviales, notamment les céréales précoces (mil, sorgho, maïs, etc.).

Amplitude et fréquence accrues des cumuls journaliers intenses

L'amplitude des cumuls journaliers intenses et leur fréquence d'occurrence augmentent de manière significative. Dans la période 1991-2010, la situation est très variable avec une majorité d'excédents pluviométriques expliqués par une fréquence élevée d'événements intense. L'analyse de l'évolution temporelle de la fréquence des événements pluviométriques extrêmes dans le SOA montre une augmentation statistiquement significative du nombre de jour pluvieux intenses dans les deux dernières décennies. Cela n'est visible que lorsque les quantités de fortes pluies et très intense sont extraites du nombre total annuel des jours pluvieux. Cette tendance à l'augmentation est très similaire à celle des années 1950-1969. Par contre, cette évolution est différente de la tendance quasi-stationnaire des cumuls pluviométriques journaliers faibles (fig 26).

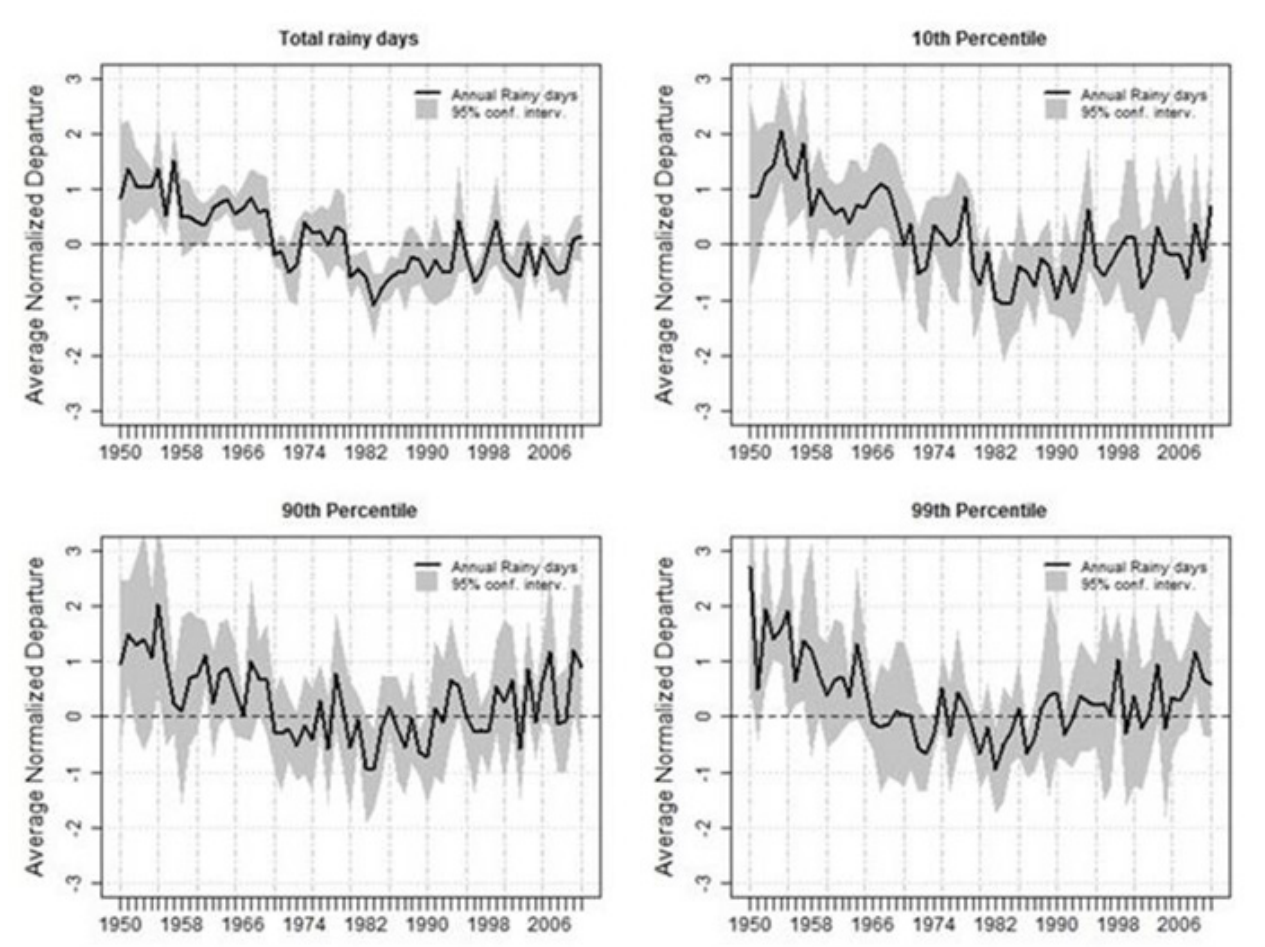


Figure 26: Variabilité interannuelle du nombre de jours pluvieux 1950-2010 sur la région du Sahel Ouest Africain. (a) Nombre total saisonnier, (b) Nombre de jours pluvieux faibles, (c) Nombre de jours pluvieux forts (d) Nombre de jours pluvieux très intenses

Tableau 3: Evolution des indicateurs des extrêmes pluviométriques à certaines villes (Source: Ly et al., 2013)

Indices Périodes	Nouakchott		Bamako		Ouagadougou		Niamey		N'Djamena		Units
	1960-1990	1991-2010	1960-1990	1991-2010	1960-1990	1991-2010	1960-1990	1991-2010	1960-1990	1991-2010	
Cumul pentadaire max	33,7	44,7	123	117	104	109	86	97	88	103	mm
Cumul du jour extr. Humide	5,7	18,6	481	62,7	44,4	45,6	30,9	37,8	29,3	45,7	mm
Nbr. max. jours cons. Hum	2,1	1,5	5,4		5,1	4,6	3,8	3,8	4,2	3,7	jour
Cumul annuel moyen	84,6	95,5	913	943	782	724	535	541	505	583	mm

6.5 Les perspectives de réchauffement climatique et de variabilité des précipitations vers 2050

L'augmentation des températures est l'une des caractéristiques climatiques communes aux projections des modèles de climat. Par contre, pour les précipitations, ils divergent, tant sur le plan quantitatif que sur la répartition intrasaisonnière. Par conséquent, l'utilisation de plusieurs hypothèses combinant des distributions intrasaisonnières différentes (pluie, températures et concentration de CO₂) permet de réduire les incertitudes dans l'évaluation des impacts sur l'agriculture. L'analyse des modèles de climat donne une «enveloppe du réchauffement climatique» régionale de +0.6°C à +1.8°C sur l'horizon 2011-2050. Ainsi, les températures de l'air augmenteront même si les amplitudes spatio-temporelles ne seront les mêmes sur toute la région du SOA. Cette «enveloppe du réchauffement climatique» est associée à une variabilité des précipitations envisagée selon deux scénarii:

- i) une augmentation faible à modéré des températures associée à une tendance normale du cumul pluviométrique (régime stationnaire) en 2011-2050.
- ii) une augmentation faible à modéré des températures associée à un cumul pluviométrique déficitaire à légèrement excédentaire en 2011-2050. Scénario très plausibles lorsqu'on considère la moyenne d'ensemble des modèles climatiques sur la sous-région.

Tableau 4: Scénarios membres décrivant les perspectives du climat futur selon les familles de scénarios de réchauffement et de variabilité pluviométrique (SN0 et SNP) sur la période 2011-2050 en Afrique de l'Ouest

Scénario principal	Scénario membre	Libellé (relatif à la Baseline 1981-2010)
Scénario Neutre (SN0)	SN0-30	Augmentation des températures de +0.6°C, une pluviométrie stationnaire (+0%) et un enrichissement carbone de 421.6 ppm sur la période 2011-2030.
	SN0-50	Augmentation des températures de +1.8°C, une pluviométrie stationnaire (+0%) et un enrichissement carbone de 492.6 ppm sur la période 2031-2050.
Scénario variable (SNP)	SN10-30	Augmentation des températures de 0.6°C, une pluviométrie qui baisse de 10% et un enrichissement carbone de 421.6 ppm sur la période 2011-2030.
	SP07-50	Augmentation des températures de +1.8°C, une pluviométrie qui augmente de 07% et un enrichissement carbone de 492.6 ppm sur la période 2031-2050.

7. Impacts des changements climatiques sur le mil et le maïs

7.1 Impacts sur le cycle de développement et les besoins en eau

Les résultats des simulations du modèle biophysique DSSAT indiquent un raccourcissement de la durée du cycle de toutes les variétés de mil et maïs précoces de 4 à 8 jours en moyenne sur la région avec une variation spatiale estimée à 2 jours. Cette baisse va de 5 à 12% de la durée normale du cycle des variétés sélectionnées. Cette réduction de la durée du cycle est essentiellement liée à l'augmentation des températures qui accélèrent le développement des plantes. En effet, une augmentation des températures se traduit par une accumulation rapide des degrés jours et par conséquent une réduction des stades de développement et de la durée du cycle.

L'évapotranspiration maximale des cultures (ETc) est déterminée par le produit de l'évapotranspiration potentielle de référence (ETo) et du coefficient cultural (Kc) de la plante à différents stades phénologiques. L'analyse de l'ETc cumulée pendant le cycle des variétés de mil et maïs montre une tendance à la baisse de 7% sur la période 2011-2030 et une légère augmentation de l'ETc entre 2-5% sur la majeure partie de la zone d'étude. Dans le cas d'un réchauffement associé à un régime pluviométrique stationnaire, la baisse est estimée à 3% sur 80% des stations de référence et de 5-10% sur plus de la moitié du réseau, respectivement en début et vers la moitié du 21^{ème} siècle. L'augmentation des besoins en eau des variétés de mil et de maïs précoces s'explique par la baisse de 10% des précipitations associée à une légère hausse des températures. Lorsque le réchauffement est proche de 2°C, une augmentation de la pluviométrie de l'ordre de +7% ne permet pas de contre balancer les effets négatifs du stress thermique sur les besoins en eau.

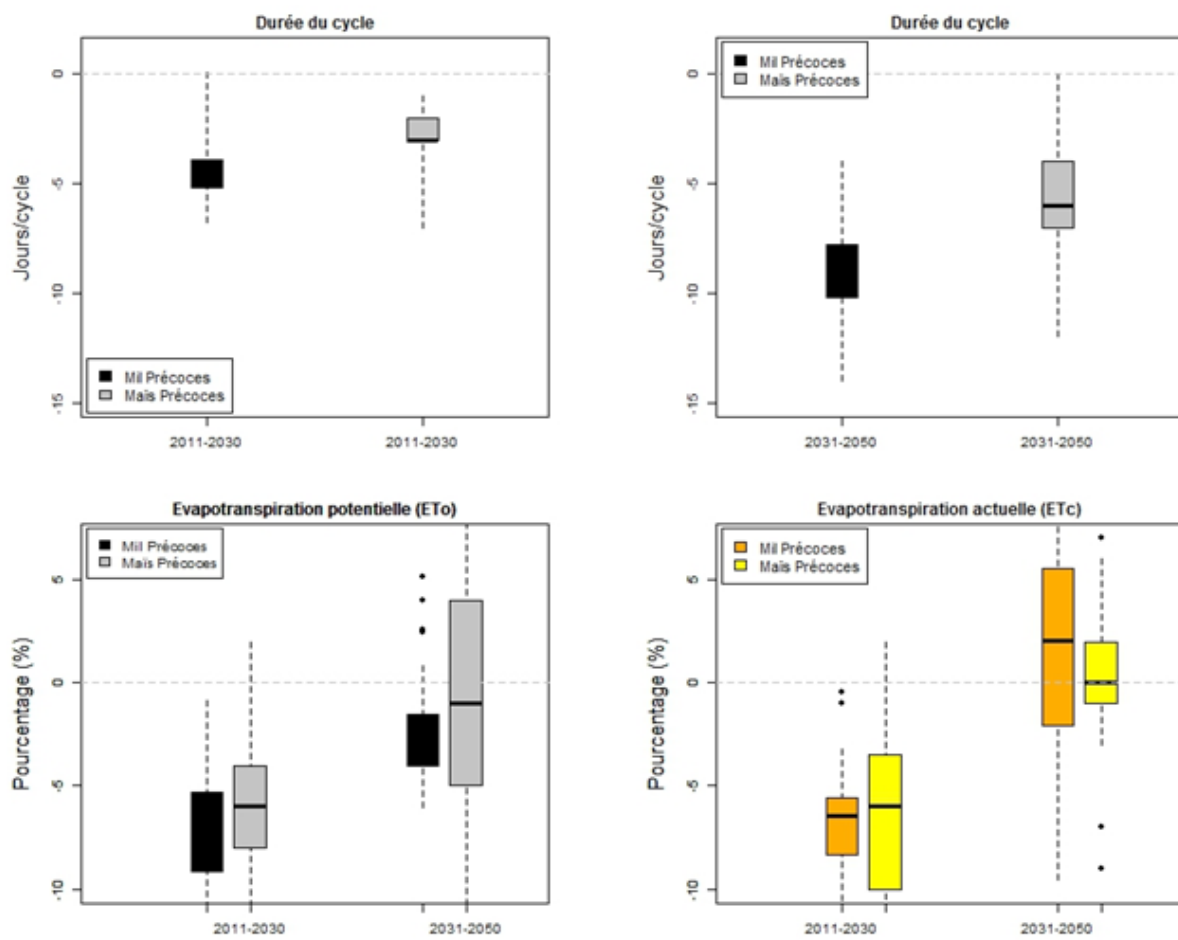


Figure 27 : Effet de la variabilité climatique sur la durée du cycle, l'évapotranspiration potentielle et les besoins en eau des variétés précoces du mil au Sahel.

7.2 Impacts sur la production

Lorsque le réchauffement climatique faible à modéré est associé à une certaine variabilité des précipitations, alors la production des variétés de mil et de maïs précoces sera plus affectée. Sur la période 2011-2030, la biomasse foliaire et les rendements en grains baisseront respectivement de 5-15% et 8-15%. Lorsque, le réchauffement est modéré (+1.4 à 1.8°C), cette baisse va s'accroître surtout sur les rendements (-10 à -20%) même s'il y a une faible augmentation la pluviométrie. Mais cette pratique n'est pas assez efficace pour résorber les pertes de production vers la fin de l'horizon 2050 (fig 28).

Dans une approche plus générale, de forçage des sorties des modèles climatiques directement sur un autre modèle biophysique, d'autres résultats montrent que les plantes en C4 subissent une perte moyenne de -6% (avec une gamme de dispersion des scénarii individuels de -29% à +11%). Selon les zones climatiques de la classification de Köppen, l'effets de la hausse des températures est plus importants et moins robustes dans les zones arides et semi-arides à cause des incertitudes liées à la projection des modèles. Ainsi, un taux de réchauffement inférieures à +2°C et une baisse des précipitations (de l'ordre de -10%) peuvent amplifier les pertes en production foliaire et en grains du mil et du maïs précoces. Par ailleurs, si ce taux de réchauffement est associée à une augmentation des précipitations, elle permettra de réduire faiblement les pertes en biomasse foliaire et non les rendements grains.

Selon des contributions récentes sur l'effet d'une augmentation de température supérieure +2°C, l'impact négatif de la hausse des températures est plus important sur toute la production (biomasse foliaire et grains). Cet impact négatif ne pourra pas être compensé par une quelconque augmentation de la pluviométrie.

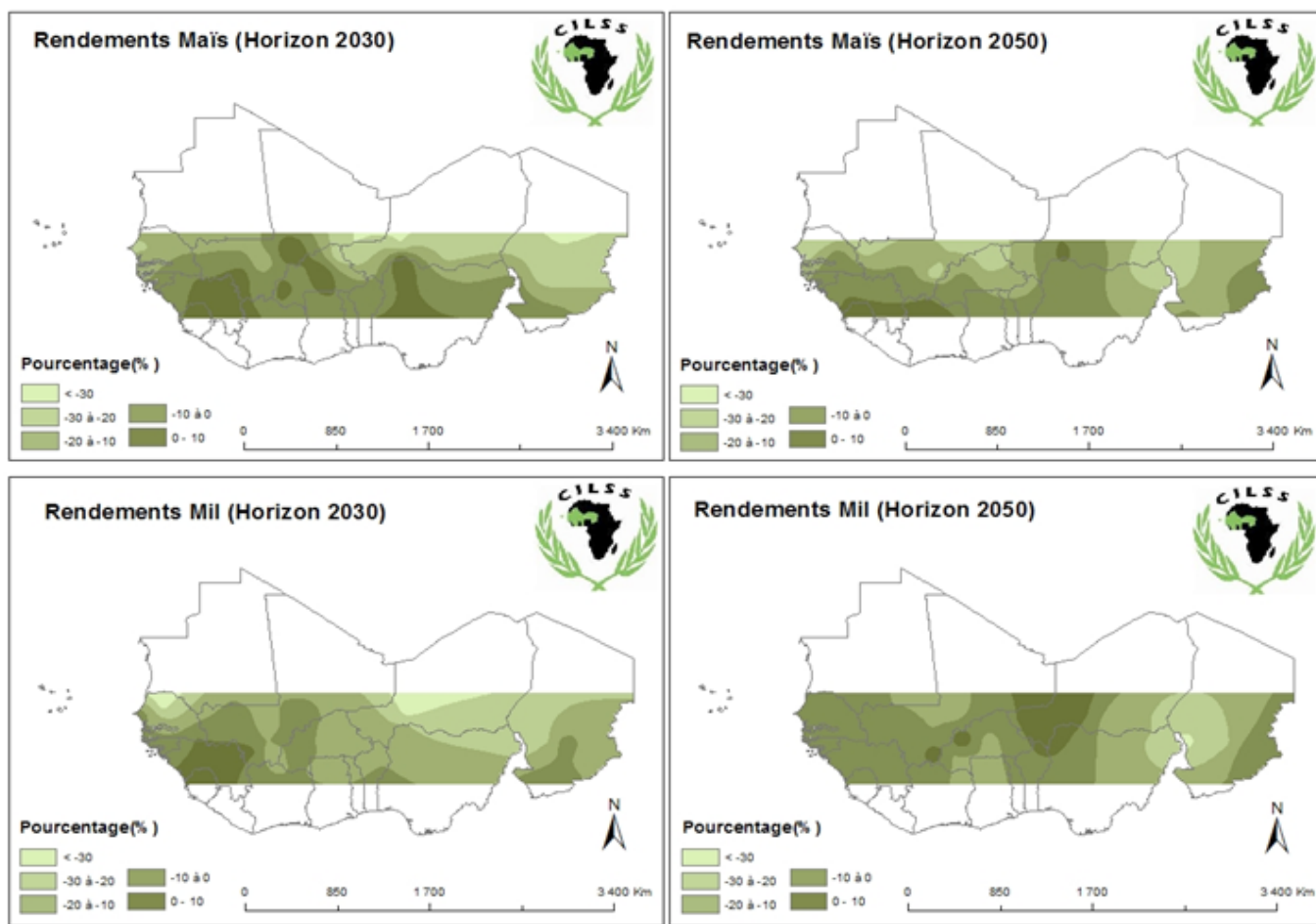


Figure 28 : Pourcentage de changement de la production de trois variétés de mil précoce [SOUNA3, HKP, ZATIB] et trois variétés de maïs [OBATAMPA, EV99-QVM, EV-8443] simulées par DSSAT selon un scénario d'augmentation progressive des températures associées à une variabilité de la pluviométrie en 2011-2050 relativement au climat de référence 1981-2010

8. Des options d'adaptation urgentes aux options d'adaptation planifiées

L'agriculture de la zone représente 20% du PIB de la région et occupe 67% de la force totale de travail, principal moyen de subsistance de la population pauvre. Elle est caractérisée par de petites exploitations paysannes familiales. Leur vulnérabilité étant déjà forte de par les contextes socio-économiques et physiques dans lesquels elles évoluent et leur grande exposition aux impacts des changements climatiques. Toutefois, ces systèmes agricoles sont dotées de capacités de résilience importantes, qui ont déjà fait leur preuve dans le passé (survivance des systèmes agraires traditionnels à des chocs climatiques violents). Toutefois cette résilience sera de plus en plus mis à mal par les CC actuel et à venir marqués par une variabilité accrue des pluies et ses composantes, une recrudescence de phénomène extrêmes, une augmentation des températures et des vagues de chaleur. L'adaptation est l'ensemble des solutions apportées dans les différents secteurs (agriculture, élevage, pêche, foresterie, habitat, infrastructures, etc); pour répondre aux effets néfastes ou positifs des changements climatiques. Ces mesures peuvent être de court, moyen et long terme.

8.1 Des changements institutionnels aux mesures techniques

Au cours des décennies passées, face aux divers aléas climatiques, les populations locales et les institutions nationales de recherche et de vulgarisation de la sous-région ont continuellement identifié et adopté des mesures d'adaptation. En effet, en matière d'adaptation, un large éventail d'expériences novatrices existe aujourd'hui, en particulier dans le domaine de la gestion durable des ressources (terre, eau et espèces végétales et animales) dans un contexte de variabilité et de changement climatique (Sarr et al, 2014).

Les pays de la région du Sahel ont déjà du adapter leurs méthodes agricoles à l'aridité et à la désertification au cours des deux dernières décennies et ont acquis des expériences considérables dans l'application de ces mesures d'adaptation au CC. Il existe aujourd'hui une gamme de technologies innovantes d'adaptation résilientes vis à – vis du climat qui ont été recensées, capitalisées sous formes de fiches techniques et mis en œuvre avec succès in situ en Afrique de l'Ouest et qui pourraient révolutionner l'agriculture de la sous région.



8.2 L'approche Programme d'action national d'adaptation aux changements climatiques (PANA)

Le processus PANA a permis aux PMA d'identifier et de mettre en œuvre des activités prioritaires répondant aux besoins d'adaptation urgents et immédiats. Il est participatif et implique les communautés locales. Les contributions de la communauté sont considérées comme une source importante d'informations

La plupart des projets sont locaux d'échelle infranationale comprennent une multitude de mesures d'adaptation, par ex : récupérer l'eau de ruissellement, développer l'irrigation, réhabiliter les pâturages, développer la pisciculture, etc.). Sur 217 projets d'adaptation, 195 soit 90% peuvent être considérés comme étant des projets d'adaptation agricole. En somme, 97% des budgets des PANA vont vers l'agriculture.

8.3 Vers l'approche Plan d'Adaptation Nationaux (PAN)

Quant aux plans d'adaptation nationaux (PAN), créé en 2010, l'idée vient de la reconnaissance du besoin de faire entreprendre au PMA des actions améliorées d'adaptation à long terme et les intégrer dans la planification du développement. En effet, l'adaptation n'est pas une action unique et ponctuelle, mais un processus à long terme. Ce processus doit faciliter l'intégration dans des processus particuliers de planification du développement au sein de secteurs pertinents et à différents niveaux.

8.4 Vers une agriculture intelligente face au climat

Au regard du contexte climatique actuel et aux axes stratégiques d'intervention proposées pour faire face et lutter contre le CC, il est nécessaire de promouvoir dans les approches PAN des pratiques d'agriculture mieux réfléchit « réfléchie » face au climat. Ces pratiques doivent exploiter les synergies existantes entre l'adaptation et l'atténuation du CC. De ce fait, elles intègrent plusieurs innovations technologiques afin d'améliorer la résilience des systèmes agro sylvo pastoraux, contribuer à l'atteinte de la sécurité alimentaire et des objectifs de développement local et national.

Cette agriculture "réfléchie en fonction du climat" concourent à :

- augmenter la résilience (adaptation)
- réduire les émissions de gaz à effet de serre tout en favorisant l'adapatation
- augmenter durablement la productivité des systèmes.

En outre, ces pratiques devraient favoriser l'accès des pays en développement au marché carbone dans le cadre du Mécanisme pour un Développement Propre (MDP) ou dans les marchés volontaires.

Ces actions devraient être financées d'une part par les budgets nationaux des pays. Toutefois, des ressources financières additionnelles provenant des différents fonds mondiaux sur le climat sont susceptibles d'être captées (fonds d'adaptation et d'atténuation de la CCNUCC dont le Fond Vert Climat, fonds multilatéraux et bilatéraux, fonds atténuation dans le cadre des marchés carbone dans le cadre du MDP et des marchés volontaires, les fonds REDD+, etc..). L'accès de l'Afrique à ces fonds est en cours de négociation et devra être encore être mieux négocié au cours des débats inter gouvernementaux sur le climat, la COP21 à Paris notamment.



Conclusion

Cet atlas agroclimatique sur le CC regorge une source inestimable d'informations pertinentes sur la variabilité et le changement climatique au Sahel élargie à certaines zones subhumides des pays côtiers du Golfe de Guinée. Il a permis de démontrer combien les tendances actuelles du climat marquées par un réchauffement climatique sans précédent, une variabilité accrue des pluies, une recrudescence des phénomènes extrêmes constituent une menace de taille pour les systèmes agrosylvopastoraux, halieutiques et humains. En outre, ces tendances seront davantage amplifiées par les changements climatiques à venir au cours de ce siècle.

L'identification des risques climatiques du secteur agricole constitue un véritable point de départ pour les études d'impact et de vulnérabilité du secteur agricole. Elle sert également de base pour des actions concertées, réfléchies et planifiées à moyen voire long terme tendant à promouvoir l'agriculture intelligente face au climat dans le cadre de la mise en œuvre des plans d'adaptation nationaux (PANs). Dans ce sens, la sous région a à gagner en capitalisant et en mettant en œuvre à travers des projets d'investissements terrain de grande envergure, la gamme de technologies innovantes d'adaptation sobres en carbone et résilientes au climat dans les domaines de l'agriculture, la conservation des eaux et des sols, l'agroforesterie, la foresterie, recensées et évaluées (d'un point de vue socio économique et environnemental) par le programme régional Intra ACP, Alliance Mondiale contre le Changement Cluimatique, zone CILSS / CEDEAO.

Références bibliographiques

AGRHYMET (2013) Bulletin spécial sur la mise à jour des prévisions des caractéristiques agro-hydro-climatiques de la campagne d'hivernage 2013 en Afrique de l'Ouest, au Tchad et au Cameroun. Bulletin Spécial No 03. Centre Régional AGRHYMET. 6p

Ali A, Lebel T (2009) The Sahelian standardized rainfall index revisited. *International Journal of Climatology* 29 (12):1705–1714. doi:10.1002/joc.1832.

Ali A, Lebel T, Amani A (2008) Signification et usage de l'indice pluviométrique au Sahel. *Sécheresse* ; 19 (4) : 227-35.

Annou MG (2003) Les grands types de sols du Niger. dans : Quatorzième réunion du Sous-Comité ouest et centre africain de corrélation des sols. 151-167.

AP3A (2001) Les aptitudes agricoles et pastorales des sols dans les pays du CILSS. Centre Régional AGRHYMET (CRA) et l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). 173p.

Baron C, Sultan B, Balme M, Sarr B, Traore S, Lebel T, Janicot S, Dingkuhn M (2005) From GCM grid cell to agricultural plot : scale issues affecting modeling of climate impact. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 360 (1463) :2095_2108. Doi :10.1098/rstb.2005.1741.

Bazzaz F, Sombroek W (1996) Changement du climat et production agricole. FAO et Polytechnica, Rome. 406p.

Berg A, de Noblet-Ducoudré N, Sultan B, Lengaigne M, Guimberteau M (2013) Projections of climate change impacts on potential C4 crop productivity over tropical regions. *Agricultural and Forest Meteorology* 170: 89–102.

Bell MA, Lamb PJ (2006) Integration of weather system variability to multidecadal regional climate change: the West African Sudan–Sahel Zone, 1951–98. *Journal of Climate* 19: 5343–5365.

Ben Mohamed A (2010) Climate change risks in Sahelian Africa. *Regional of Environmental Change*. doi: 10.1007/s10113-010-0172-y

Boko M, Niang IA, Nyong C, Vogel A, Githeko M, et al. (2007) Africa. *Climate Change 2007 in Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge UK, 433-467.

Camberlin P, Diop M (2003) Application of daily rainfall principal component analysis to the assessment of the rainy season characteristics in Senegal. *Climate Research*, 23: 159–169.

Challinor AJ, Smith MS, Thornton P (2013) Use of agro-climate ensembles for quantifying uncertainty and informing adaptation. *Agric. Forest Meteorol.* 170, 2–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.007>

Chappell A, Agnew CT (2004) Modeling climate change in West African Sahel rainfall (1931–90) as an artifact of changing station locations. *International Journal of Climatology* 24: 547–554.

Dai A, Lamb JP, Trenberth VE, Hulme M, Jones PD, Xie P (2004) Comment the recent Sahel drought is real. *International Journal of Climatology*. 24: 1323–1331.

Diouf M, Nonguierma A, Abou A, Royer A, Somé B (2000) Lutte contre la sécheresse au Sahel : acquis et perspective au Centre Régional Agrhymet. *Sécheresse* 11(4): 257-266.

ECOWAS-SWAC/OECD, FAO, CILSS (2008) Climate and Climate Change. The Atlas on Regional Integration in West Africa. Environment Series. January 2008. Available at: www.atlas-westafrica.org.

FAO (1978) Report on the agro-ecological zones project. Vol 1: Results for Africa. World Soil Resources Report 48/1. FAO, Rome. 158pp.

FAO (1990) Soil map of the world. Revised Legend. World Soil Resources Report, n°60. Rome. 119p.

FAO (2012) L'état de l'insécurité alimentaire dans le monde. Resume 2012. FAO, rome, Italie. 4pp. <http://www.fao.org/docrep/016/i2845f/i2845f00.pdf> (viste du 04/14/2014)

Giannini A, Salack S, Loudon T, Ali A, Ndiaye O (2012) A unifying view of climate change in the Sahel linking intra-seasonal, interannual and longer time scales. Environ. Res. Lett. 8 (2013) 024010 (8pp). doi:10.1088/1748-9326/8/2/024010

Gijsman AJ, Thornton PK, Hoogenboom G (2007) Using the WISE database to parameterize soil inputs for crop simulation models. Computers and Electronics in Agriculture 56: 85–100

Godfray, C.H., Beddington, Crute, I.R., Haddad, L. Lawrence, D., Muir; J.F., Pretty, J. Robinson, S., Thomas, S.M., Toulmin, C. (2010) Food security: the challenge of feeding 9 billion people. Science, 327, 812-818.

Hansen JW, Challinor A, Ines A, Wheeler T, Moron V (2006) Translating climate forecasts into agricultural terms : advances and challenges Translating. Climate Research 33. 27_41.

Hoogenboom G., Jones JW, Porter CH, Wilkens PW, Boote KJ, Batchelor WD, Hunt LA, Tsuji GY (2003) Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0. University of Hawaii, Honolulu, HI.

Hulme, M (1992) A 1951-1980 Global Land Precipitation Climatology for the Evaluation of General Circulation Models. Climate Dynamics, vol. 7, p. 57-72.

IPCC, (2012) Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA. 582p.

IPCC (2007) Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp.

Janicot S, Caniaux G, Chauvin F, de Coetlogon G, Fontaine B, et al. (2011) Intraseasonal variability of the West African monsoon. Atmospheric Science Letters 12: 58–66, DOI: 10.1002/asl.280.

Katz R W, Glantz M H (1986) Anatomy of a rainfall index. Monthly Weather Review, 114:764-771.

Keita B (2000) Les sols dominants du Mali dans: Quatorzième réunion du Sous-Comité ouest et centre africain de corrélation des sols. 95-103

Khouma M (2000) Les grands types de sols du Sénégal. dans : Quatorzième réunion du Sous-Comité ouest et centre africain de corrélation des sols. 77-94.

Kissou R, L. Thiombiano, AK Nébié , A Semde, K J Yago (2000) La Base mondiale de données sur les sols: avantages et faiblesses pour la connaissance et l'utilisation des milieux édaphiques au Burkina Faso. Dans: Quatorzième réunion du Sous-Comité ouest et centre africain de corrélation des sols. Food and Agriculture Organisation (FAO), Rome, Italie. 121-149

L'Hôte Y, Mahé G, Somé B, Triboulet JP (2002) Analysis of Sahelian rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. *Journal of Hydrological Science* 47(4):563–572.

Le Barbé L, Lebel T, . Tapsoba D, 2002. Rainfall Variability in West Africa during the Years 1950-1990. *Journal of Climate*, 15, no 2:187-202.

Lebel T, Ali A (2009) Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). *Journal of Hydrology*. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.11.030

Lodoun T, Giannini A, Traore PS, Some L, Sanon M, Vaksman M, Rasolodimby J.M (2009) Changes in seasonal descriptors of precipitation in Burkina Faso associated with late 20th century drought and recovery in West Africa. *Environmental Development* 5 (2013) 96–108.

Lona I (2010) Changement climatique et développement agricole dans la commune rurale de Diagourou (région de Tillabéry) : de l'observation à l'analyse des données. Mémoire de DEA. Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger. 86p

Ly M, Traoré S, Agali A, Sarr B (2013) Evolution of Some Observed Climate Extremes in the West African Sahel. *Weather and Climate Extremes* 1 (2013) 19–25.

Marteau R (2011) Cohérence spatiale et prévisibilité potentielle des descripteurs intra-saisonniers de la saison des pluies en Afrique soudano-sahélienne : application a la culture du mil dans la région de Niamey. Thèse de Doctorat. Université de Bourgogne. 242p.

Moron V, Robertson and Ward MN (2006) Seasonal Predictability and spatial coherence of rainfall characteristics in the tropical setting of Senegal. *Monthly Weather Review* 134: 3248-3262.

Nicholson SE (2001). Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries. *Climate Research*, 17, 123-144.

Nicholson SE (2005) On the question of the “recovery” of the rains in the West African Sahel. *Journal of Arid Environmen*, 63:615–641

Ozer P, Ercicum M, Demarée G, Vandiepenbeeck M (2003) The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Journal of Hydrologic Science* 48:489–492.

Rosenzweig C, Jones JW, Hatfield JL, Ruane AC, Boote KJ, Thorburn P, Antle JM, Nelson GC, Porter C, Janssen S, Asseng S, Basso B, Ewert F, Wallach D, Baigorria G, Winter JM (2013) The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): Protocols and pilot studies. *Agric. Forest Meteorol.*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.011>.

Roudier P, Sultan B, Quirion P, Baron C, Alhassane A, Traore SB, Muller B (2011) An ex-ante evaluation of the use of seasonal climate forecasts for millet growers in SW Niger. *International Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.2308.

Salack S, Muller B, Gaye AT (2011) Rain-based factors of high agricultural impacts over Senegal. Part I. Integration of local to sub-regional trends and variability. *Theoretical and Applied Climatology* 106 : 1-22. doi : 10.1007/s00704-011-0414-z.

Salack S, Muller B, Gaye AT, Hourdin F, Cisse N (2012) Analyses multi-échelles des pauses pluviométriques au Niger et au Sénégal. *Sécheresse* 23:3–13. doi:10.1684/sec.2012.0335.

Salack S (2013) Analyse des pauses pluviométriques et évaluation des incertitudes de la pluie des modèles régionaux de climat à l'aide d'un modèle de culture. Thèse de doctorat. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal. 140p.

Salack S, Giannini A, Diakhaté M, Gaye AT, Muller B (2013) Oceanic influence on the subseasonal to interannual timing and frequency of extreme dry spells over the West African Sahel. *Climate Dynamics*. DOI 10.1007/s00382-013-1673-4

Sarr B (2011) Present and future climate change in West Africa: a crucial input for agricultural research prioritization for the region. *Atmospheric Sciences*, Vol 13, Issue 2, 108-112.

Sarr B, Traoré S B, Salack S (2006) Evaluation de l'incidence des changements climatiques sur les rendements des cultures céréalières en Afrique soudano sahélienne. Centre Régional Agrhymet, CILSS, Niamey. 100p.

Sene S, Ozer P (2002) Evolution pluviométrique et relation inondations-événements pluvieux au Sénégal. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 42:27–33

Sillmann, J., V.V. Kharin, F. W. Zwiers, X. Zhang, and D. Bronaugh (2013) Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 2473–2493, doi:10.1002/jgrd.50188.

Sivakumar MVK (1988) Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology* 42 :295-305.

Sivakumar MVK (1992) Empirical analysis of dry-spells for agricultural applications in West Africa. *Journal of Climate* 5: 532–539.

Steduto P, T C. Hsiao, D Raes, E Fereres (2009) AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles: *Agronomy Journal* 101:426–437. doi:10.2134/agronj2008.0139s

Sultan B (2012) Global warming threatens agricultural productivity in Africa and South Asia. *Environmental Research Letter*, 7, 041001.

Sultan B, Baron C, Dingkuhn M and Janicot S (2005) Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon. *Agricultural and Forest Meteorology*. 128, 93–110

Stern R, Rijks D, Dale I, Knock J (2006) *Instat Climatic Guide*. University of Reading, Reading, UK. 330p.

Traoré SB, Reyniers FN, Vaksman M, Kouressy M, Yattara K, Yoroté A, Sidibé A, Koné B (2000) Adaptation à la sécheresse des écotypes locaux de sorgho du Mali. *Sécheresse* 11(4): 227-237.

Vincent LA, Aguilar E, Saindou M, Hassane AF, Jumaux G, Roy D, et al. (2011) Observed trends in indices of daily and extreme temperature and precipitation for the countries of the western Indian Ocean, 1961–2008, *Journal of Geophysical Research*, 116, D10108, doi:10.1029/2010JD015303.

UN (2008) *World Population Prospects: The 2008 Revision*, vol. I, (United Nations publication, forthcoming)

Winkel T., Do F (1992) Caractéristiques morphologiques et physiologiques de résistance du mil (*P. glaucum*) à la sécheresse. *Agronomie Tropicale* 46: 339-351.

Ziad AM, Sireen AJ (2010) Climate change and agricultural water demand: Impacts and adaptations. *African Journal of Environmental Science and Technology* Vol. 4(4), pp. 183-191.

ANNEXE 1 : LISTE DES INDICES CLIMATIQUES ET AGROCLIMATIQUES

Sigle	Signification
HWDI	Nombre de jours de vague de chaleur (Tx supérieure de 5°C pendant au moins 6 jours à la moyenne quotidienne calculée sur une fenêtre de 5 jours centrée sur la journée, et pour la période 1971-2000)
Tx10p	Pourcentage de jours climatologiquement froids (journées où Tx inférieure au premier décile (décile quotidien calculé sur une fenêtre de 5 jours, sur la période 1971-2000)
Tx90p	Pourcentage de jours climatologiquement chauds (journées où Tx supérieure au dernier décile (décile quotidien calculé sur une fenêtre de 5 jours, sur la période 1971-2000)
Tx>37,5 ou un autre seuil	Nombre de jours où la températures maximales est supérieurs à 37,5 ,C

Indices basés sur les températures minimales (Tn)

Sigle	Signification
Tn10p	Pourcentage de nuits climatologiquement froides (Tn inférieure au premier décile (décile quotidien calculé sur une fenêtre de 5 jours, sur la période 1971-2000)
Tn90	Décile supérieur de la température minimale
Tn90p	Pourcentage de nuits climatologiquement chaudes (Tn supérieure au dernier décile (décile quotidien calculé sur une fenêtre de 5 jours, sur la période 1971-2000)

TN et TX : températures minimale et maximale

Sigle	Signification
ETR	Amplitude thermique absolue (maximum des Tx moins minimum des Tn)

Indices basés sur les précipitations (RR)

Sigle	Signification
Prectot	Précipitation totale (saisonnier, mensuel, décadaire) en mm
RR1	Nombre de jours de pluie (RR >=1.0 mm)
CDD	Nombre maximal de jours secs consécutifs (lorsque RR<1mm)
R3d	Maximum des précipitations cumulées sur 3 jours
prec90	Décile supérieur des précipitations quotidiennes (parmi les jours pluvieux)
R20	Nombre de jours de fortes précipitations (RR >=20 mm)
R50	Nombre de jours de très fortes précipitations (RR >=50 mm)
SDII	Intensité moyenne des précipitations par jour de pluie ≥ 1 mm

Les indices agroclimatiques

Sigle	Signification
DDS	Date de début de la saison des pluies
DFS	Date de fin de la saison des pluies
LSC	Longueur de la saison des pluies
Sqspl	Séquence sèche la plus longue de la date de début à la date de fin de l'hivernage
Sqsmoysaison	Durée moyenne des séquences sèches pendant la saison agricole
Sqs7semis	Probabilité d'avoir une séquence sèche de plus de 7 jours 30 jours après le semis
Sqs10semis	Probabilité d'avoir une séquence sèche de plus de 10 jours 30 jours après le semis
Sqs7DFlo	Probabilité d'avoir une séquence sèche de plus de 7 jours pendant la période de la floraison

Critères de détermination des paramètres de la saison des pluies

- o La date de démarrage est déterminée en considérant la date à partir du 1er mai où un cumul pluviométrique de 20 mm est obtenu en un à trois jours consécutifs, sans qu'il ne soit suivi d'une séquence sèche de plus de 20 jours dans les trente jours qui suivent. Ce critère de date de démarrage de saison culturale (DDS) est une légère modification apportée au critère de Sivakumar (1988).
- o La détermination de la date de fin de saison (DFS) incorpore un critère de bilan hydrique. Ainsi on définit une DFS comme la date après le 1er septembre à laquelle la consommation en eau de la plante épuise la réserve hydrique du sol jusqu'au seuil de 0.05 mm (Stern et al., 2006). Pour cela, nous avons considéré la réserve utile (RU) qui correspond aux sols des différentes stations basée sur la carte de la FAO (1978).
- o La longueur de la saison (LSC) est la différence entre la date de fin (DFS) et la date de début de la saison (DDS) des pluies.

