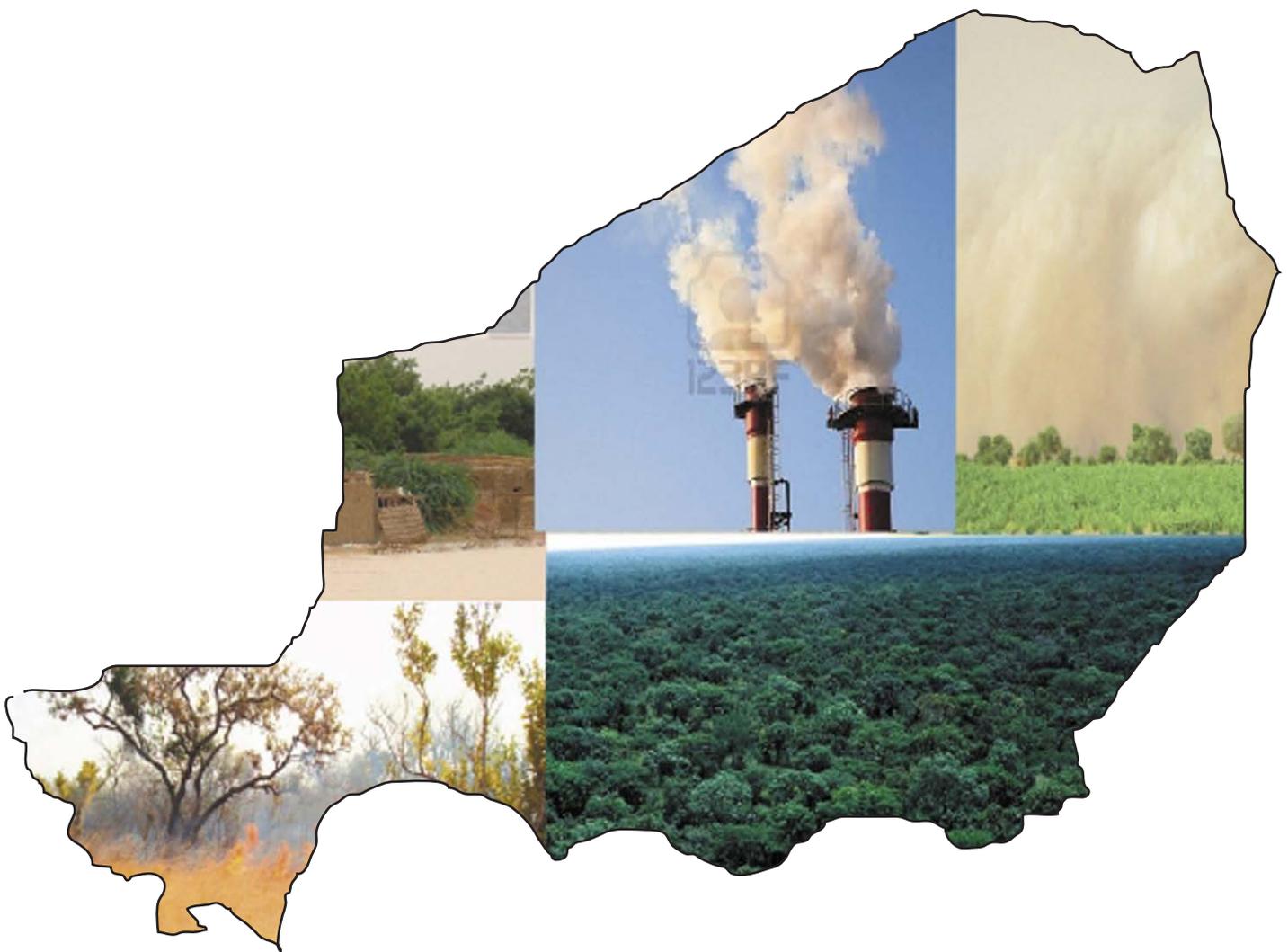


Atlas agroclimatique sur la variabilité et le changement climatique au Niger



Janvier 2015



Préface

Le secteur agricole est le plus affecté par les tendances et la variabilité climatiques 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 (agriculture, élevage, pêche, etc.) dont les performances sont étroitement soumises au climat. Cette vulnérabilité structurelle au climat s'est particulièrement amplifiée au Sahel et au Niger en particulier à la fin du 20^e siècle, suite à une réduction des précipitations concomitante à une augmentation de la population. Les sécheresses des années 1970 et 1980, l'accroissement observé 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 de mener des études diagnostiques sur la variabilité et les changements climatiques en Afrique de l'ouest et son impact sur les secteurs stratégiques. C'est dans ce contexte que s'inscrit le projet Global Climate Change Alliance (GCCA) ou Alliance Mondiale contre le Changement Climatique. Le GCCA/AMCC dans les régions et pays ACP, est une initiative créée en septembre 2007, entre l'Union Européenne et les pays en développement les plus vulnérables aux changements climatiques. Il a pour objectif, d'appuyer les pays à faire face aux changements climatiques en vue de la réduction de la pauvreté.

Remerciements

L'atlas agroclimatique sur le changement climatique au Niger a été conduit dans le cadre du programme régional intra ACP AMCC/GCCA. Il a été préparé conjointement par 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 de 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, Mlle Mariama Moussa pour le traitement des textes et enfin Messieurs Pape Omar Dièye et Adboul Aziz Boubacar Mainassara pour l'infographie.

L'équipe exprime ses sincères remerciements à tous les relecteurs 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.

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

Mots clés : Bénin, changement climatique, réchauffement climatique, variabilité des précipitations et ses composantes, rendements agricole.

Editeurs

Dr Benoît SARR (Agrhymet, CILSS, Niger),

Auteurs

Dr Benoit SARR, agrométéorologue, coordonnateur scientifique du programme AMCC/GCCA, Centre Régional Agrhymet

Mr Mandéla HOUNGNIBO; climatologue, Direction de la Météorologie Nationale du Bénin

Contributeurs

Dr Benoit SARR, agrométéorologue, coordonnateur scientifique du programme AMCC/GCCA, Centre Régional Agrhymet

Mr Mandéla HOUNGNIBO; climatologue, Direction de la Météorologie Nationale du Bénin

Dr Mohamed Ly, climatologue, Centre Régional Agrhymet

Dr Seyni Salack, agrométéorologue, Centre Régional Agrhymet

Dr Alhassane Agali, agrophysiologiste, , Centre Régional Agrhymet

Dr Seydou Traoré, agrométéorologue, chef de l'Unité de Coordination scientifique du Centre Régional Agrhymet.

Mr Jean Claude Ouédraogo, expert SIG, Centre Régional Agrhymet

Mr Oumbama Zakaria, assistant, Centre Régional Agrhymet

Relecteurs

Professeur AbdelKrim Ben Mohamed, Université Abdou Moumouni

Professeur Ibrahim Bouzou Moussa, Université Abdou Moumouni

Dr AMADOU M. Laouali, Centre Régional Agrhymet

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
Kc	Coefficient cultural
MDP	Mécanisme pour un Développement Propre
MGC	Modèles Globaux de Climat
MOA	Mousson Ouest Africain
MRC	Modèles Régionaux de Climat
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

Avant propos

Sur la base d'analyse des observations climatiques historiques, d'analyse du climat futur, et de simulations à l'aide de modèles de cultures, cet atlas contient un ensemble de représentations cartographiques, graphiques et tabulaires qui permet de répondre aux questions que posent les citoyens sur les changements climatiques.

Cet atlas a pour ambition de toucher une large communauté d'utilisateurs. Il est traduit en langage simple et compréhensible par tous. Il est, en effet, une source d'informations importantes sur la variabilité et les changements climatiques au Niger. L'état du réchauffement climatique, la variabilité accrue des pluies, le dysfonctionnement des paramètres de la saison agricole, la recrudescence des événements extrêmes (vague de chaleur, sécheresse, fortes pluies), les impacts du changement climatique sur les cultures, la voie à emprunter en matière d'agriculture «intelligente» sont autant d'informations qui y sont illustrées. Il fournit des pistes et des recettes sur la manière d'agir à court, moyen et long terme pour adapter les secteurs clés du développement socio_économique aux impacts des changements climatiques.

Résumé exécutif

Le Niger compte parmi les pays les plus vulnérables au monde en raison du contexte lié à son climat, ses sources de revenus, son économie et son environnement. L'agriculture est le secteur le plus important de l'économie du Niger. Elle représente plus de 40 % du produit intérieur brut national et constitue la principale source de revenus pour plus de 80 % de la population. La performance du secteur agricole est néanmoins très instable du fait de sa forte exposition aux risques de type climatique notamment. Au cours de ces dernières décennies, le Niger a subi de nombreux chocs climatiques qui pèsent lourdement sur le bien-être, des populations (Banque Mondiale, 2013). Les changements climatiques actuels et futurs constituent de ce fait une menace sérieuse pour l'économie nationale. Les changements climatiques se manifestent au cours des dernières années par une hausse continue des températures depuis les années 80-90. Les températures des années les plus chaudes, concentrées à l'image du monde, autour des années 2000 et 2010, ont connu une hausse moyenne de l'ordre + 1,13°C avec des hausses record atteignant 1,7°C comparativement à la normale 1961-1990. Par ailleurs, les nombres de nuits, de jours et de vagues de chaleur sont passés entre la période actuelle et la période normale 1961-1990 quasiment du simple au double. La période récente est également caractérisée par une variabilité accrue de la pluviométrie et ses composantes telles que les dates de début et la longueur de saison agricole qui semble être amplifiée par les changements climatiques.

En outre, on enregistre une tendance à la baisse du nombre d'événements pluvieux associée toutefois à une augmentation de l'intensité des pluies et à une recrudescence par endroits de fortes pluies causant des inondations. L'analyse des modèles de climat donne une «enveloppe du réchauffement climatique» régionale de +0.6oC à +1.8oC sur l'horizon 2011-2050 qui est associée à une variabilité des précipitations. Des simulations réalisées à l'aide du modèles DSSAT ont montré qu'une hausse de température de + 2°C se traduirait par (i) une baisse de la longueur des cycles des cultures de mil précoce de 5 à 10 %, (ii) une augmentation des besoins en eaux des cultures de l'ordre de 10 % (iii) et une baisse des rendements pouvant aller au-delà de 10 à 20 % à l'horizon 2050 quel que soit le scénario pluviométrique.

Table des matières

Contexte environnemental	9
Enjeux et défis pour un atlas agroclimatique sur les changements climatiques	9
Objectifs et Public Visés	9
Méthodologie de l'étude	10
Les changements climatiques dans le monde et en Afrique	12
Impacts des changements climatiques sur le mil	27
De l'analyse des risques climatiques à l'intégration des changements climatiques dans la planification du développement	29
Conclusion	30
Références bibliographiques	31
Annexe	35

1. Contexte environnemental

Selon l'Organisation des Nations Unies, la population des pays d'Afrique au Sud du Sahara passera de 850 millions aujourd'hui à près de 1,7 milliards en 2050 (UN, 2008). Ce qui équivaut 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 durable. La difficulté des pays de la zone CILSS/CEDEAO à maintenir une production alimentaire durable tient principalement au fait que l'agriculture est étroitement tributaire du 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 épicycles de la crise alimentaire en Afrique sub-saharienne et les changements climatiques prévus au cours de la première moitié du 21ème siècle affecteront durement ces 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 agrométéorologiques 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. Objectifs et Public Visés

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 intervenant dans les secteurs clés du développement (agriculture, élevage, foresterie, eau, santé, énergie), planificateurs, les aménagistes et divers spécialistes du monde de la recherche et de la formation. Par ailleurs, cet atlas fournit aux négociateurs sur le climat des arguments scientifiques et techniques de base pour mieux défendre la position commune de l'Afrique sur l'adaptation et son financement.

4. Méthodologie de l'étude

4.1 Données de base

Les données météorologiques de pluviométrie, de températures minimales et maximales journalières des années 1960 à 2010 ont été exploitées. Ces données proviennent de la base de données de la Direction de la Météorologie Nationale compilées au niveau du Système Régionale de Gestion des Bases de Données (SRGBD) du Centre Régional Agrhy-met. Pour des analyses de sensibilité et les études d'impact avec le modèle de cultures DSSAT, nous avons complété les valeurs manquantes des données historiques par des données de rayonnement et vitesse du vent des réanalyses de la NASA (<http://power.larc.nasa.gov/cgi-bin/cgiwrap/solar/agro.cgi?email=agroclim@larc.nasa.gov>).

Les données de quatre modèles régionaux de climat (MRC) issues de l'expérience AM-MA-ENSEMBLES (<http://ensemblesrt3.dmi.dk/>) et celles des modèles globaux de climat (MGC) des simulations du CMIP5 (Climate Model Inter-comparison Project version 5, Taylors et al., 2011) notamment le scénario socio-économique A1B et le Representative Concentration Pathway 8.5 (RCP8.5) ont été exploitées. Ces sorties des modèles climatiques sont utilisées pour déterminer «l'enveloppe du réchauffement climatique» aux horizons 2030 et 2050.

4.2 Indices climatiques et agroclimatiques

Les indices climatiques les plus pertinents pour détecter les changements climatiques ont été recensés et analysés à l'aide du logiciel RClimdev (Zhang, X., Yang, F., 2004).

4.3 Analyse des données historiques

Pour identifier les risques associés à la pluviométrie et les températures récentes, on a procédé à une analyse des composantes saisonnières observées de 1960-2010. Deux approches différentes mais complémentaires sont utilisées. La 1ere approche consiste à faire:

- un contrôle qualité de données statistiques des données sur la base des principes définis par Easterling et al., (2006).
- l'application du schéma statistique Student-Fisher, SFS, (Salack et al., 2011, Al hassane et al., 2013) pour identifier le signe, le niveau de significativité et le taux de changement des paramètres agroclimatiques estimés ou simulés.
- La comparaison de la période normale 1961-1990 avec celle de la sous période 1991-2010 considérée dans la sous-région comme la période de l'intensification du réchauffement climatique et de la recrudescence d'événements extrêmes.
- Les indices climatiques tels que les nuits et jours chauds, les nuits et jours froids, les vagues de chaleur ont été calculés à l'aide de logiciel R Climdex (Zhang, X., Yang, F., 2004).
- Les paramètres de la saison des pluies tels que les dates de début, de fin, la longueur de la saison des pluies, la distribution des pluies et des séquences sèches ont été calculés à l'aide du logiciel Instat+ (Stern et al., 2006). Les critères de calcul de ces paramètres sont indiqués en annexe 1.

Seules les stations dont les données manquantes inférieures à 10 % ont été sélectionnées dans l'étude. La période normale 1961-1990 a été considérée. La période récente 1991-2010 a été comparée à celle de 1961-1990.

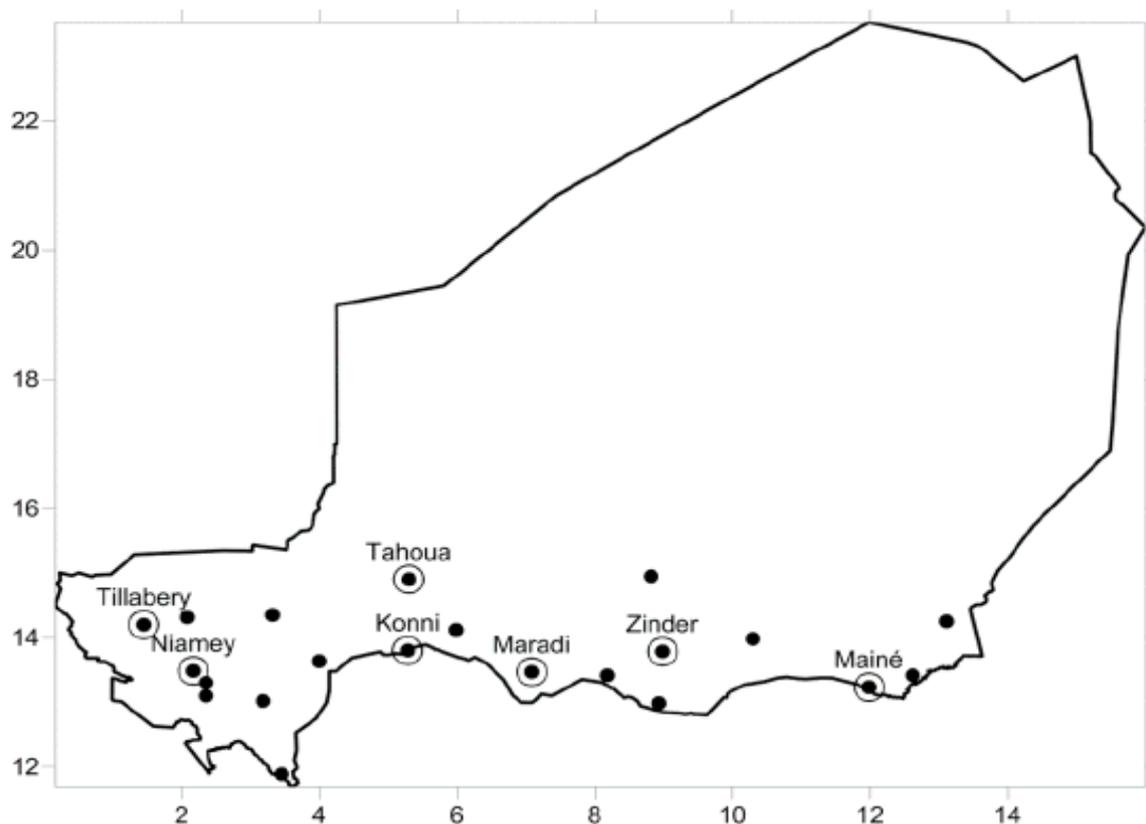


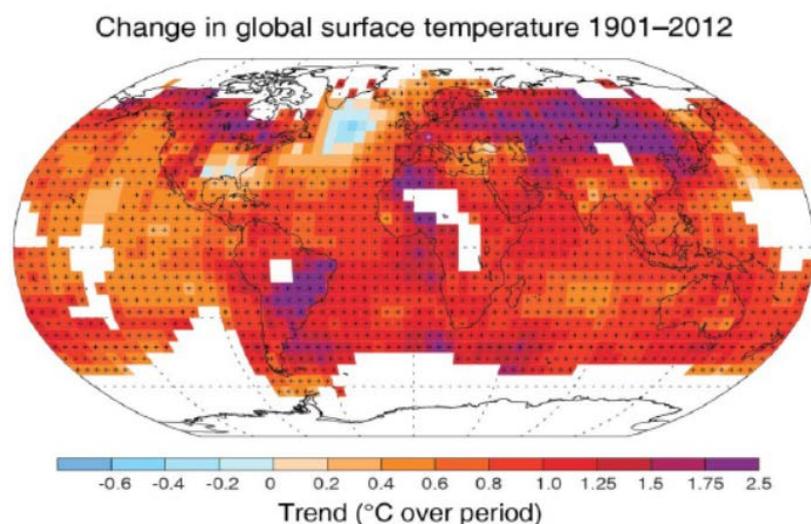
Figure 1: Localisation des stations de référence dont les données sont utilisées dans les analyses. Les points indiquent les stations pluviométriques et les cercles représentent les stations synoptiques ayant des données journalières de températures maximales et minimales pour la période 1961-2010.

4.4 Simulation des impacts du réchauffement et variabilité pluviométrique sur les cultures

Les simulations ont été faites à l'aide du modèle des cultures Decision Support System for Agro-technology Transfer, DSSAT4.5 (Hoogenboom et al., 2010). Les résultats de «l'enveloppe du réchauffement climatique» sont utilisés pour générer des données journalières en perturbant les données du climat de référence 1981-2010 avec les projections consensuelles des modèles selon le scénario socio-économique A1B et le Representative Concentration Pathway 8.5 (RCP8.5).

5. Les changements climatiques dans le monde et en Afrique

5.1. Le changement climatique dans le monde



Selon le 5ème rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), de 1906 à 2012, la température moyenne à la surface de la Terre a augmenté de 0.80°C (figure 2). Cette hausse est de 0.85 [0.65 à 1.06] °C sur la période 1880-2012 (GIEC, AR5, 2014) et les incertitudes sur le réchauffement climatique futur sont faibles. Le 20e 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).

Figure 2: Taux d'accroissement des températures dans le monde de 1901-2012

Selon UK Met Office (novembre 2015) les températures moyennes globales en 2015 sont de 1,02 °C supérieures par rapport à celles de l'ère préindustrielle (1850-1900). Les niveaux de CO₂ ont atteint en moyenne 400 ppm dans le monde au début de 2015.

Le GIEC (2014) conclut alors qu'il est extrêmement probable que l'influence humaine a été la cause principale du réchauffement climatique car l'essentiel de l'élévation de la température observée depuis le milieu 20e siècle est très probablement attribuable à la hausse de la concentration des gaz à effet de serre (GES) anthropiques. Ce réchauffement global sera plus intense, plus rapide que prévu et inexorable (avec ou sans mesures d'atténuation) d'ici la moitié du 21^e siècle. Les conséquences sur la vie humaine risquent d'être catastrophiques. 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 Afrique de l'Ouest, il se situe autour de 2030 (± 8 ans de variabilité spatiale).

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).

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)

Selon le Goddard Institute for Space Studies (GISS) de la NASA, entre 1880 et 2013, 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 météorologiques, 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.

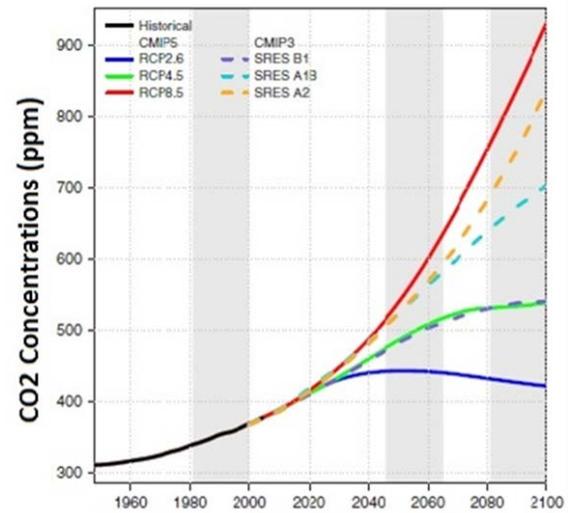


Figure 3: Evolution de la concentration globale du dioxyde de carbone en parties par million (ppm). (Source : Sillmann et al., 2013).

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 3), la température globale moyenne 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) et le 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 4).

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

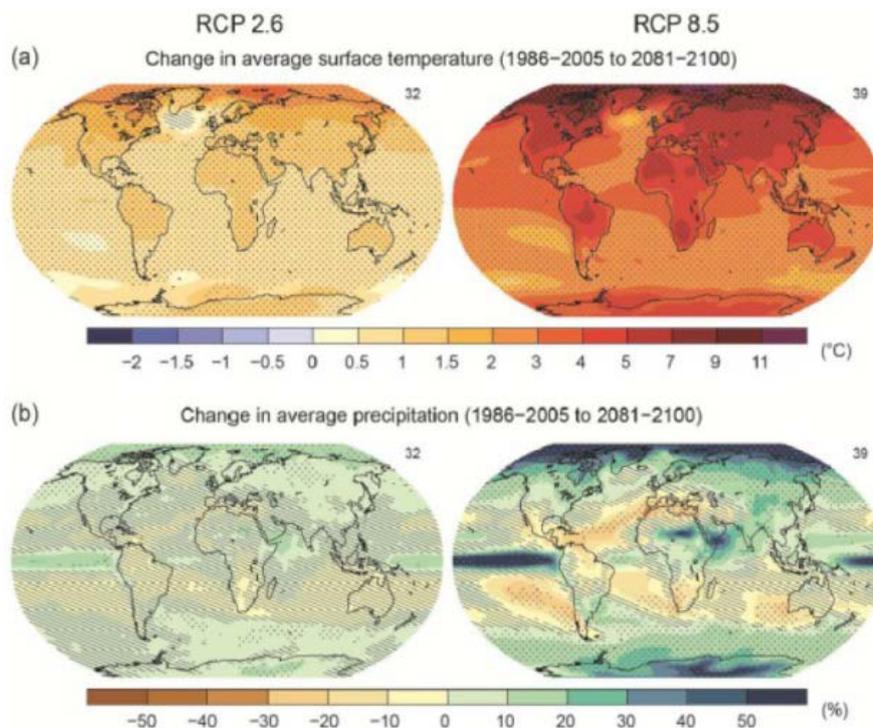


Figure 4: Projections climatiques à la fin du 21ème siècle. (a) taux d'augmentation de la température de l'air à la surface du globe et (b) pourcentage des précipitations, au cours de la période 2081-2100 comparée à la période 1986-2005 (GIEC, 2013).

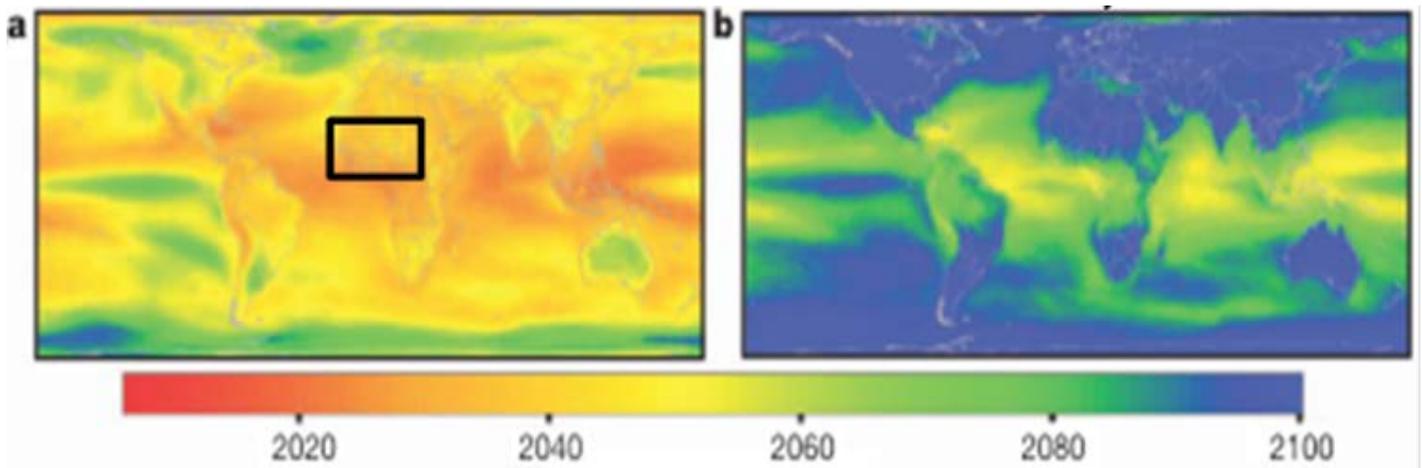


Figure 5: Années de début du réchauffement permanentement supérieur aux records historiques. a) variabilité interannuelle et b) variabilité mensuelle (Source : Mora et al., 2013)

5.2. Causes du réchauffement climatique

Pour l'essentiel, les scientifiques s'accordent pour dire que le rejet massif de gaz à effet de serre dans l'atmosphère dû aux activités humaines est la cause principale 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 (2014), 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 est un phénomène naturel. 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 dit 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 6) en référence au comportement d'une serre vis à vis de la lumière et de la chaleur (figure 7). Sans ce phénomène, la température moyenne sur terre serait en moyenne de -18°C. Or, les observations montrent une température de la terre de l'ordre de + 15°C. Cette différence de température est due à l'effet de serre. 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 moyenne du globe pourrait atteindre + 16,5°C à 19,5°C (figure 8). 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 6. Principe de l'effet de serre et mécanisme de réchauffement de la terre

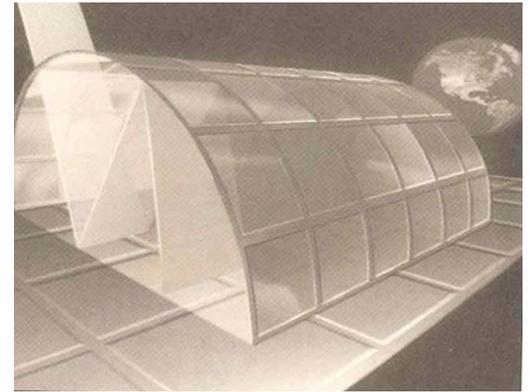


Figure 7. Vue d'une serre et de son comportement vis-à-vis du rayonnement solaire et de la chaleur.

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 et 400 ppm en mai 2013 (OMM, 2012; GIEC, 2014). 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, 2014).

En 2012, 35,44 milliards de tonnes équivalent CO₂ ont été émises par

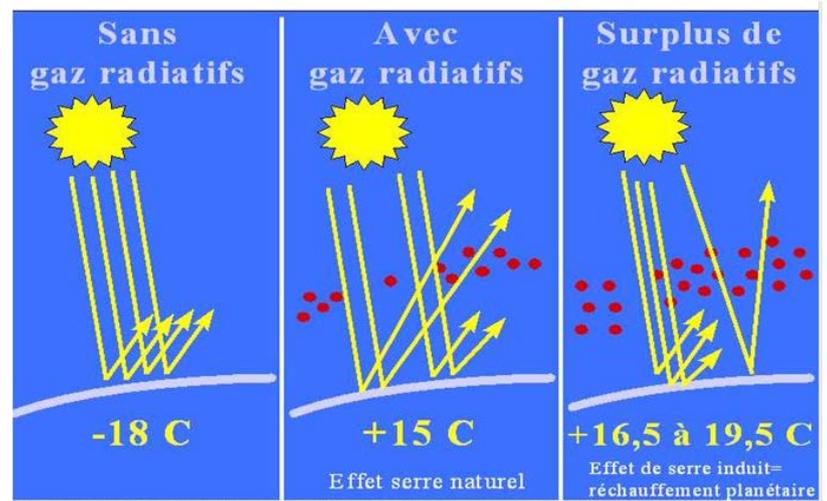


Figure 8: Effet de serre naturel et effet de serre anthropique

les activités humaines (www.planetoscope.com/climat/co2). Ces émissions se répartissent comme suit (figure 9a) :

- la part due au secteur énergétique est de 25,9 % ;
- 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 21ème siècle. Ce qui prouve l'ancienneté de la théorie scientifique du réchauffement climatique.

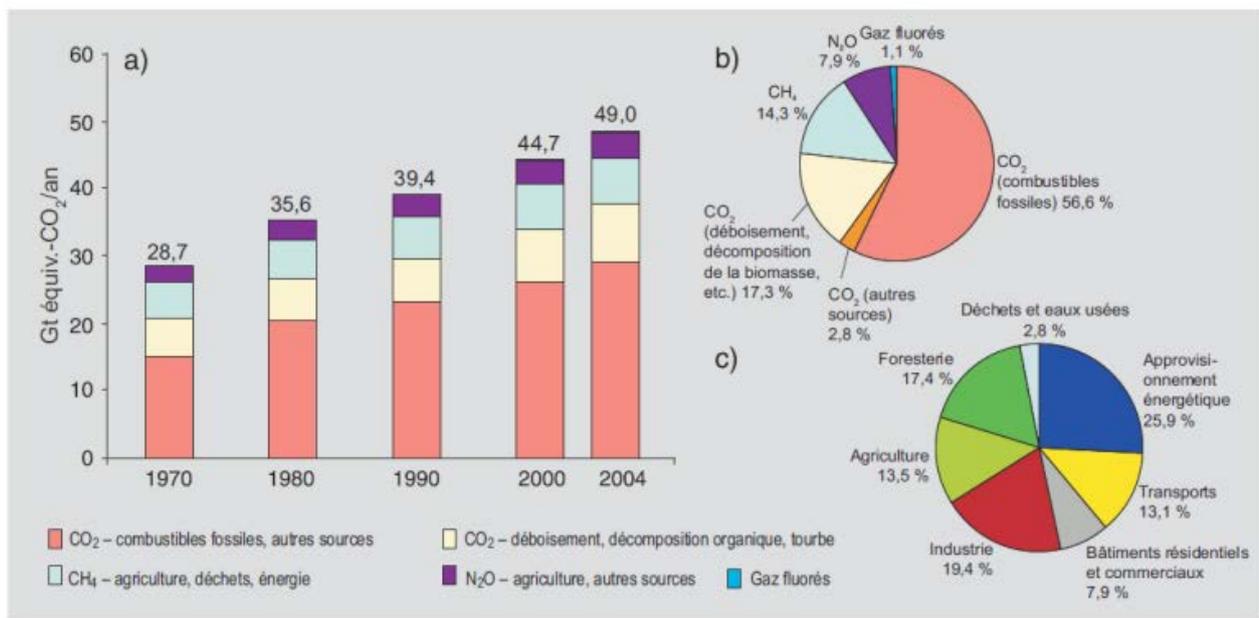
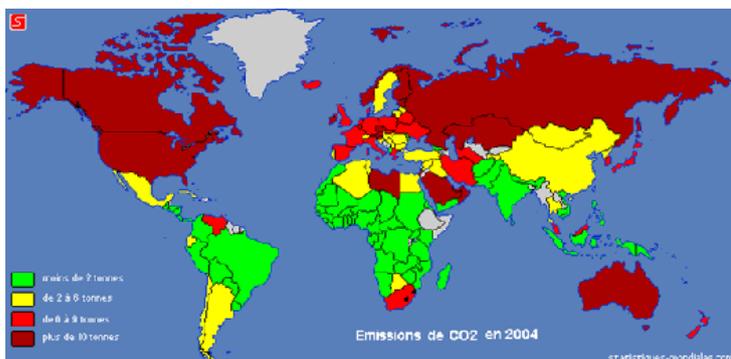


Figure 9a: Gaz à effet de serre et secteurs émetteurs (Source GIEC, 2007)

Les cinq premiers pays émetteurs sont la Chine, les USA, l'Inde, la Russie et le Japon, qui représentent à eux-seuls 56,6% des émissions de CO₂ dues à la combustion fossile en particulier (figure 9b). Le continent africain dans son ensemble ne représente que 3,4% des émissions mondiales et les pays de l'espace CILSS/CEDEAO moins de 1%.



Figure 9b Emission totale de CO₂ par pays (2012)



En revanche, pour les émissions de CO₂ par tête d'habitant, les pays pétroliers du Golfe à économies « énergivores », puis les pays développés comme les USA, la Russie, l'Australie, le Canada sont les plus gros émetteurs (figure 9c).

Figure 9c : Emission de CO₂ par tonne par habitant dans le monde en 2004 (source, office statistique ONU, 2004)

5.3 Etat du réchauffement climatique observé au Niger

5.3.1. Rappel du climat du Niger

Le climat du Niger est de type tropical semi -aride, caractérisé par deux saisons : une saison sèche allant d'octobre à mai et une saison pluvieuse allant de juin à septembre. Pendant la saison sèche, la température moyenne varie entre 18,1 et 33,1 °C. Les records de températures observées sont de - 2,4°C (observé le 13 janvier 1995 à Bilma) pour les températures minimales et de 49,5 °C (observé le 07 septembre 1978 à Diffa) pour les températures maximales (PANA, Niger 2006). Pendant la saison des pluies, la température moyenne varie entre 28,1 et 31,7 °C. Partout le régime pluviométrique est unimodal avec un maximum des précipitations survenant autour du mois d'août.

La pluviométrie est caractérisée par une forte variation dans l'espace et dans le temps. Cette pluviométrie permet en année normale la recharge des nappes, la formation des plans d'eau et le développement du couvert végétal. Depuis le début des années 70, on observe une baisse de la pluviométrie qui se traduit par une migration des isohyètes vers le Sud. Les décennies 90 et 2000 sont caractérisées par une variabilité accrue des pluies (alternance d'années sèches, humides parfois associées à de fortes pluies).

5.3.2. Un réchauffement plus important sur les températures minimales

Les températures en Afrique de l'Ouest, 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. Au Niger aussi, la hausse de température est devenue continue depuis les années 80 pour les minimas et 90 pour les maximas (figure 10). La hausse des températures minimales est estimée à +1.2 °C contre +0.48°C sur les températures maximales entre 1991-2010. L'accroissement des températures est plus marqué entre Novembre - Mars par rapport au mois de Juin-Octobre (figure 11).

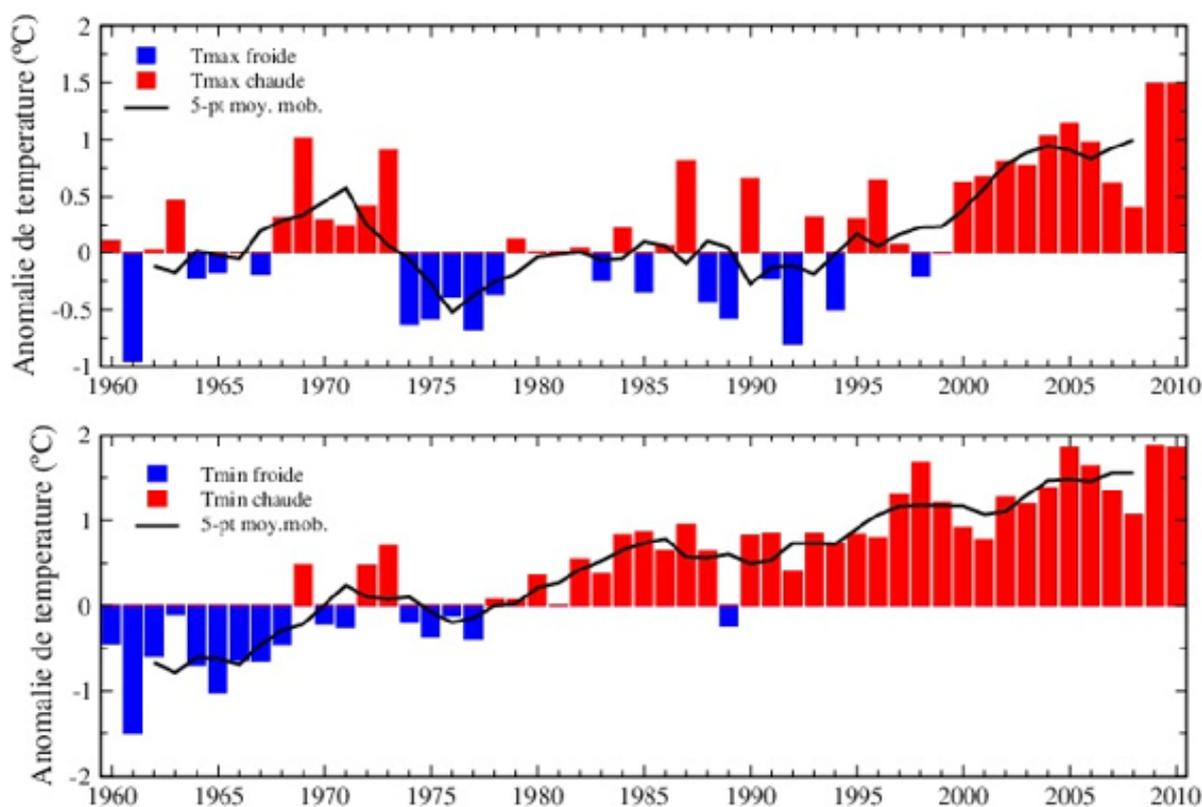


Figure 10: Variabilité des anomalies de températures maximales et minimales au Niger.

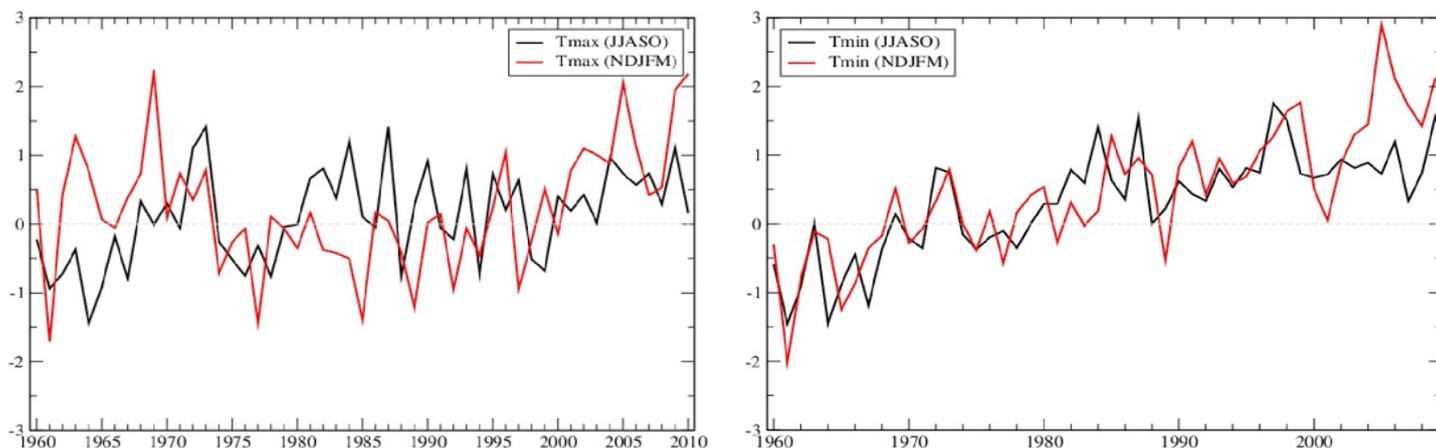


Figure 11: Variabilité interannuelle des températures saisonnières moyennes des maximas (en haut) et moyenne des minimas (en bas) pour 7 stations synoptiques et pour la période 1960-2010 au Niger. JJASO indique Les mois de juillet à octobre ; NDJFM indique les mois de novembre à mars

Selon les analyses de la température au Niger (tableau 2), les 10 années les plus chaudes sur l'ensemble du Niger sur la période 1961 -2010 comparativement à la période 1961 - 1990 sont 2010 (1.6°C), 2009 (1.6°C) 2005 (1.5°C), 2006 (1.3°C), 2004 (1.2°C), 2002 (1.0°C), 2003 (1.0°C), 2007 (1.0°C), 2000 (0.8°C), 2008 (0.7°C) et 2001 (0.7°C).

Tableau 2: Les 10 années les plus chaudes au Niger (d'après les seules mesures des stations météorologiques au sol) de 1960-2010

N°	Année	Écart par rapport à la moyenne de 1951–1980
1	2010	+ 1,6 °C
2	2009	+ 1,6°C
3	2005	+ 1,5 °C
4	2006	+ 1,3 °C
5	2004	+ 1,2 °C
6	2002	+ 1° C
7	2003	+ 1 °C
8	2007	+ 0,8 °C
9	2000	+ 0,7 °C
10	2008	+ 0,7 °C
11	2001	+ 0,7 °C
Moyenne		+1,3 °C

5.3.3 Augmentation des événements extrêmes de températures

Les indices des températures montrent un réchauffement généralisé à travers le Niger sur la période 1991-2010. En effet, si l'on examine la fréquence des nuits froides, on s'aperçoit qu'elles diminuent (figure 12). A l'inverse, les jours chauds augmentent (figure 12) et les vagues de chaleurs sont devenues plus fréquentes (figure 13). Le nombre de nuits froides est passé en moyenne de 10 à 5 entre la période 1961 -1990 et la période récente 1991 -2010. En revanche, les jours chauds sont passés de 10 environ entre 1961 -1990 et plus de 15 voire plus soit plus de 20 jours à Zinder et à Konni par exemple. Le nombre de vagues de chaleur a fortement augmenté passant de 6 en moyenne entre 1961-1990 à plus de 20 jours au cours de la période actuelle.

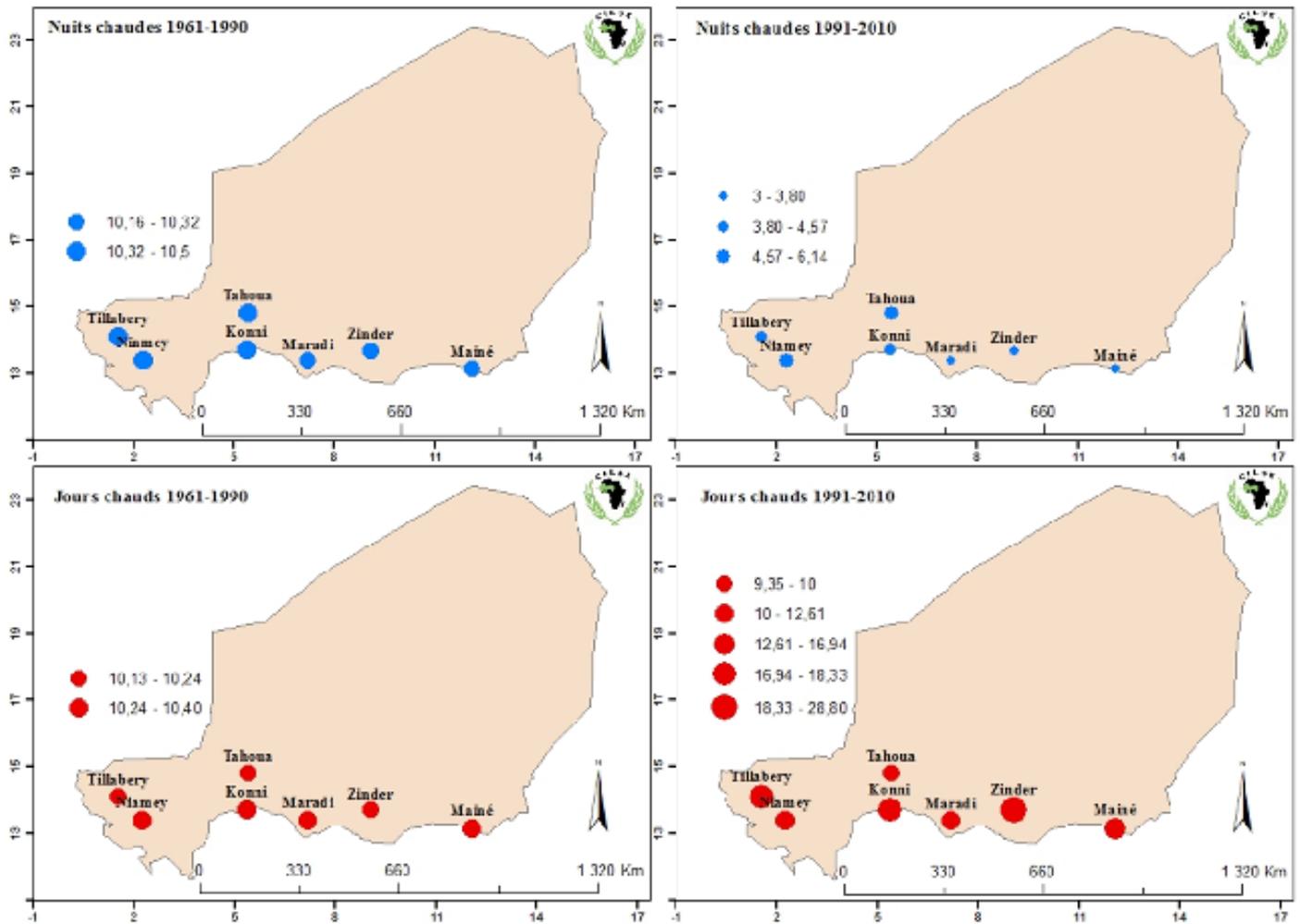
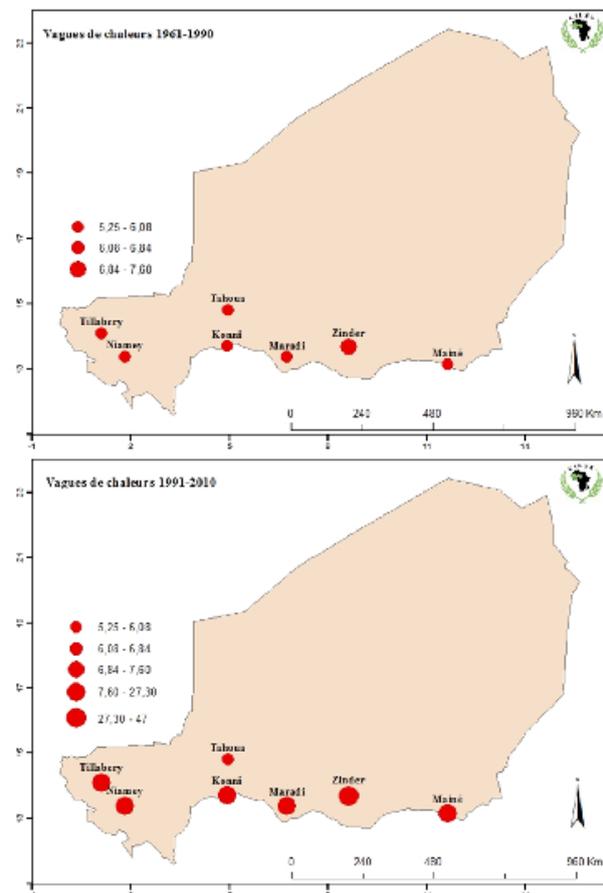


Figure 12 : Nombre moyen de nuits froides (en haut) et jours chauds (en bas) au cours de la période 1961-1990 et 1991-2010.

Figure 13 : Nombre moyen des vagues de chaleur au cours de la période 1991 - 2010



5.4 Risques agroclimatiques associés à la pluviométrie observée

5.4.1 Une variabilité accrue des précipitations

La saison pluvieuse au Niger est monomodale. La quantité des pluies et la durée de la saison des pluies diminuent à mesure que l'on se déplace vers le Nord. Les cumuls pluviométriques moyens annuels vont pratiquement de 0 mm à 800 mm du Nord au Sud du pays. Les pluies journalières les plus abondantes se produisent généralement en juillet et en août, si bien que les quantités de pluies reçues durant ces deux mois représentent plus de 70 % du total annuel. La tendance des anomalies interannuelles sur la période 1960-2010, montre que le régime pluviométrique est très variable. Après près de deux décennies de déficit pluviométrique, on observe une reprise des excédents pluviométriques à partir des années 1990. Toutefois le fait marquant de cette période est l'alternance d'hivernages secs et humides qui accroît la variabilité inter annuelle de la pluviométrie. (figure 14a et 14b). En dépit de cette alternance, un retour à des conditions pluviométriques bien meilleures semblent se dessiner (14b).

La distribution des cumuls pluviométriques moyens annuels semble confirmer par endroits le retour à des conditions pluviométriques meilleures au cours de ces deux dernières décennies. Une remontée des isohyètes 400 et 300 mm de plusieurs km est enregistrée par endroits (figure 15).

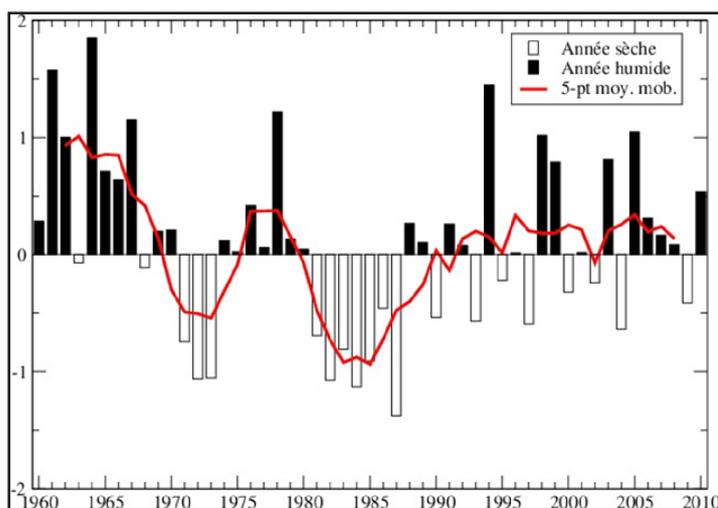


Figure 14a: Variabilité interannuelle de la pluviométrie annuelle au Niger

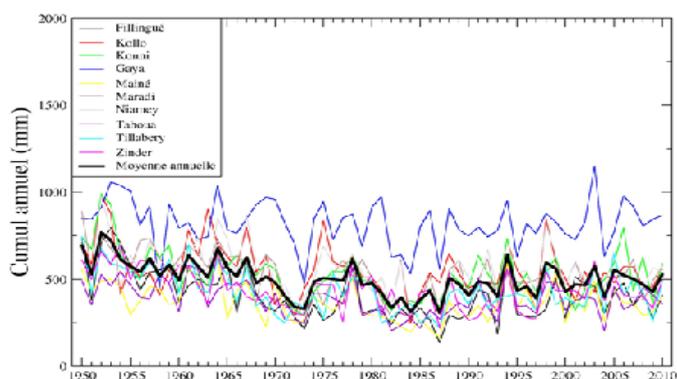


Figure 14b: Variabilité interannuelle de la pluviométrie annuelle dans quelques stations principales au Niger

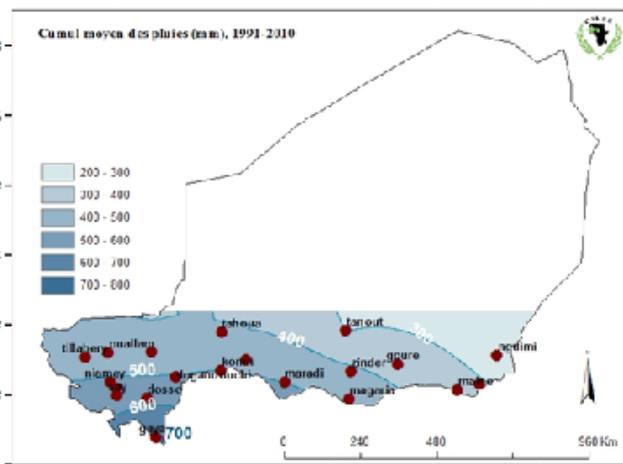
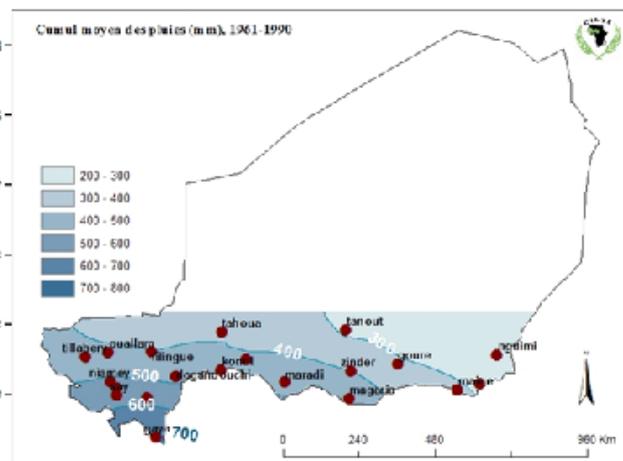


Figure 15: Comparaison entre les périodes 1961-1990 et 1991-2010 des cumuls moyens saisonniers des précipitations

Quelques stations comme Konni et Filingué enregistrent un retour significatif à des conditions pluviométriques bien meilleures au cours de la période récente 1990 -2010 comparativement à 1961-1990 (figure 16).

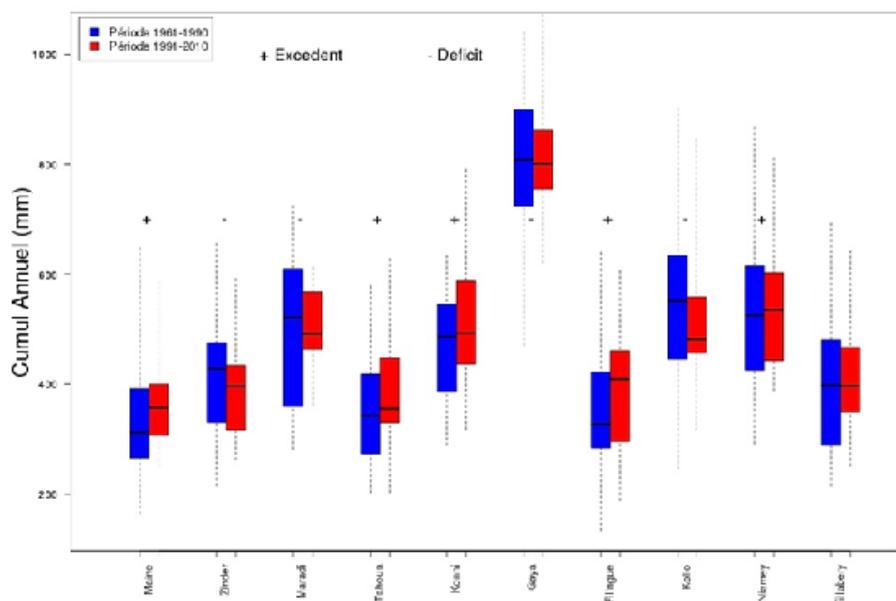


Figure 16: Distribution comparée entre les périodes 1961-1990 et 1991-2010 des cumuls annuels au Niger. De la gauche vers la droite, les stations sont classées de l'Est vers l'Ouest.

Le nombre de jour pluvieux au Niger va de moins de 20-30 jours à l'Est de la zone agricole à 40 voire de 50 jours dans l'extrême sud du pays dans la zone de Gaya (figure 17). Le nombre de jours de pluie de la période récente n'est pas en général statistiquement différent de celui de la période 1961-1990 (figure 18), même si la tendance est à la baisse dans plusieurs stations.

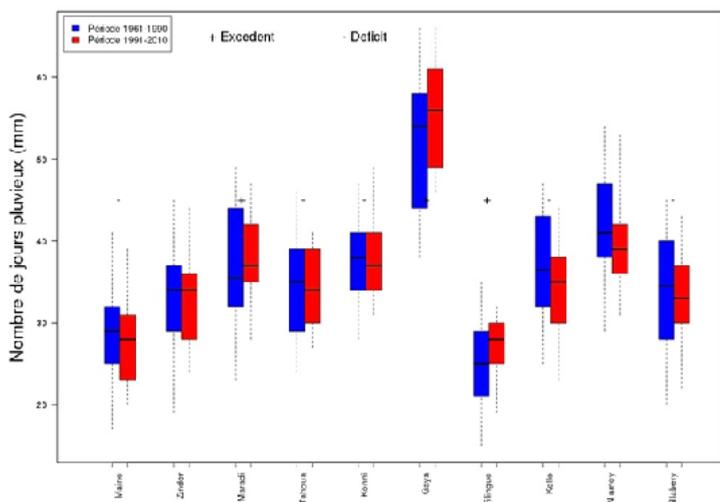


Figure 18: Distribution comparée entre les périodes 1961-1990 et 1991-2010 du nombre total de jours pluvieux au Niger. De la gauche vers la droite, les stations sont classées de l'Est vers l'Ouest.

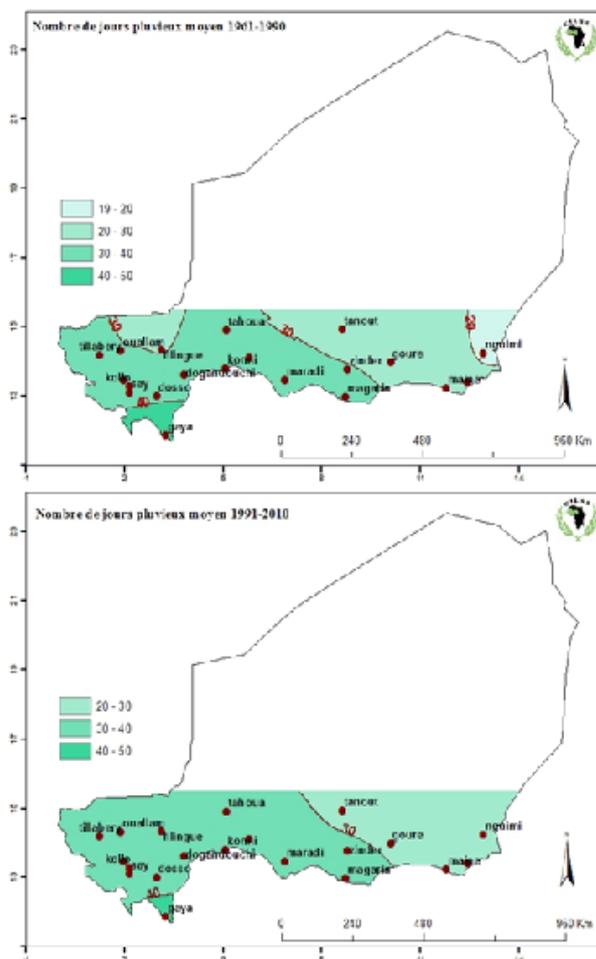


Figure 17 : Comparaison entre les périodes 1961-1990 et 1991-2010 du nombre moyen saisonnier de jour pluvieux (> 1mm)

Comparativement à la période 1961 -1990, le nombre moyen de jour de 20 mm de pluie semble en revanche augmenter au cours de la période récente (figure 19). Il semble que le nombre de systèmes convectifs de méso échelle tend donc à augmenter. Toutefois il a été montré précédemment que le nombre de jour d'événements pluvieux tend à baisser (figure 17 et 18).

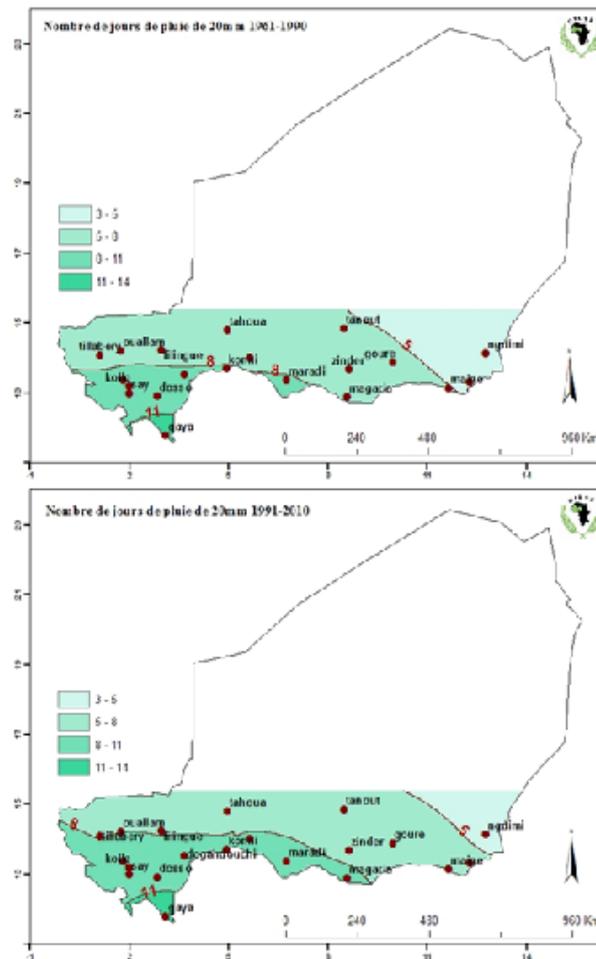


Figure 19 : Comparaison entre les périodes 1961-1990 et 1991 -2010 du nombre moyen saisonnier de jour de 20 mm de pluie

5.4.2. Une évolution très variable des dates de débuts, de fin et des longueurs de saisons agricoles

La période 1991-2010 est caractérisée par des dates de début relativement tardives pour quelques stations. Cette tendance est plus marquée au niveau des stations de Maradi et Zinder (figure 20). Dans les stations de Tahoua, Filingué, Niamey, Tillabery et Maïné, des dates précoces sont observées mais elles sont souvent associées à des pauses pluviométriques extrêmes. Elles constituent des situations de « faux départs (voir plus loin). La fin de la saison des cultures est relativement stable et ne présente aucun changement significatif (figure 21). Les longueurs de saisons même si elles dégagent une tendance à un allongement, restent très variables d'une station à une autre. Peu de stations comme Tillabery et Filingué montrent une tendance à la hausse significative au cours de la période récente 1991 -2010 (figure 22).

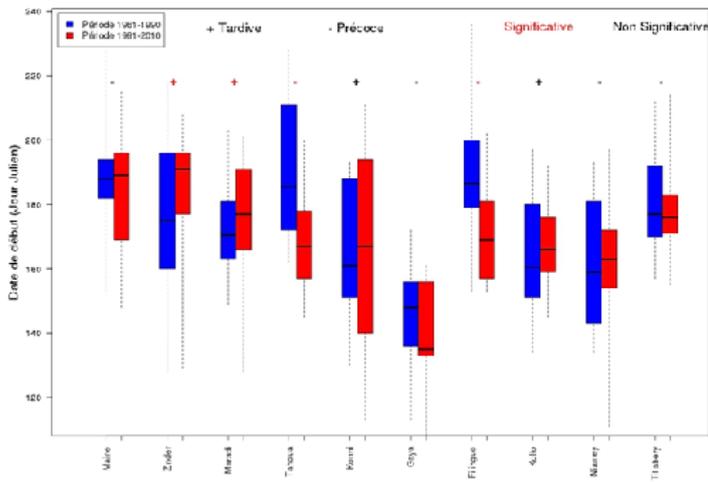


Figure 20: Distribution comparée entre les périodes 1961-1990 et 1991-2010 des dates de début de la saison des pluies au Niger. De la gauche vers la droite, les stations sont classées de l'Est vers l'Ouest.

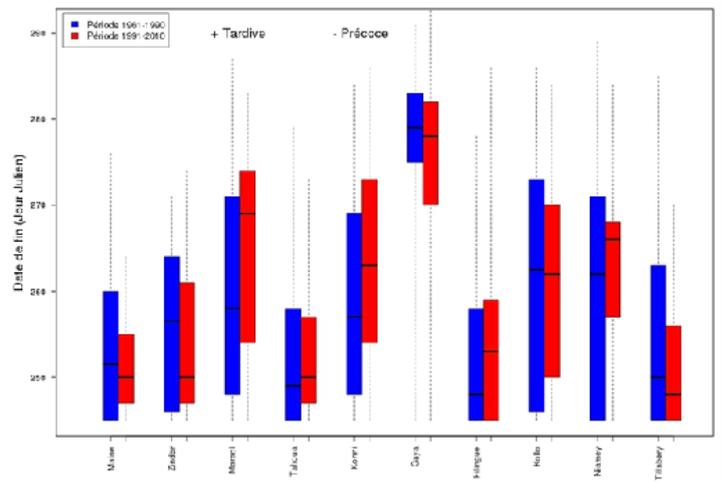


Figure 21 : Distributions comparées entre les périodes 1961-1990 et 1991-2010 des dates de fin de la saison de pluie au Niger. Les stations sont classées de l'Est vers l'Ouest

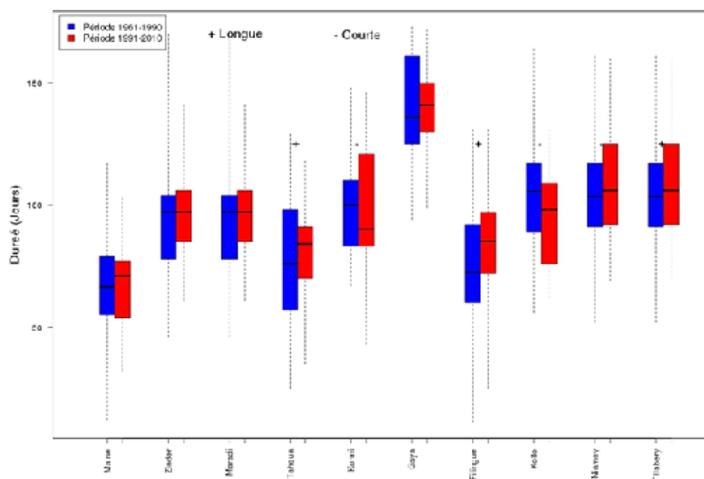


Figure 22 : Distributions comparées entre les périodes 1961-1990 et 1991-2010 des longueurs de la saison de pluie au Niger. Les stations sont classées de l'Est vers l'Ouest

5.4.3. Amplitude et fréquence des cumuls journaliers intenses

L'évolution du nombre de jours pluvieux intenses reste stationnaire. Mais l'intensité des événements augmente de manière significative. Dans la période 1991-2010, la situation est très variable avec une majorité d'excédents pluviométriques expliquée par l'intensité des cumuls journaliers qui tend à augmenter (figure 23).

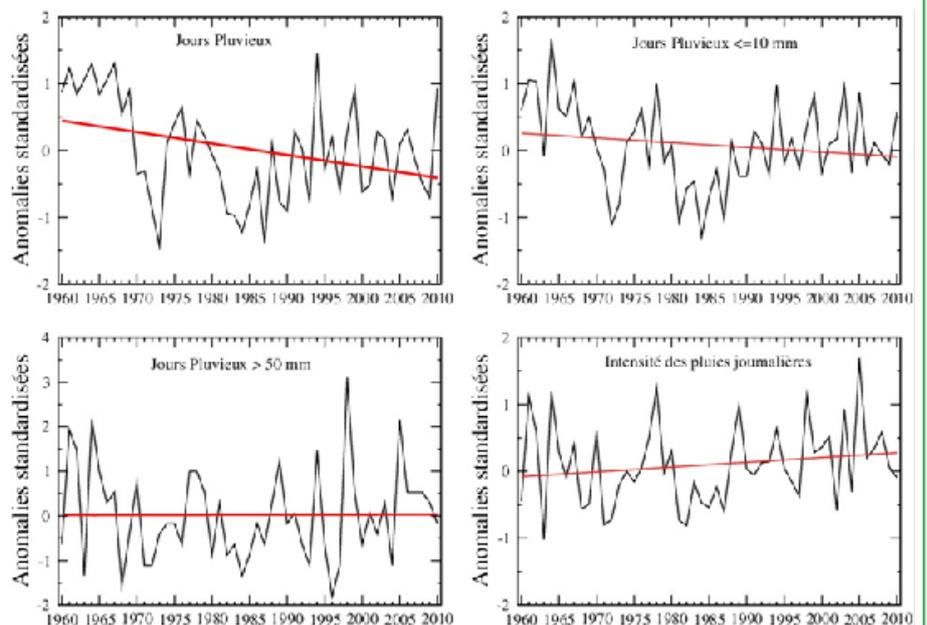


Figure 23: Variabilité interannuelle de l'amplitude et intensité des pluies journalières au Niger de 1960 à 2010

Les pluies maximales moyennes cumulées en trois jours consécutifs ont tendance à augmenter en plusieurs endroits au Niger au cours la période actuelle comparativement à la période 1961-1990 (figure 24).

Les pluies maximales cumulées en 3 jours consécutifs sont comprises en moyenne entre 50 et 90 mm. Elles augmentent progressivement du Nord Est vers le Sud Ouest. Les stations de Maïné, Kollo, Niamey et Tillabéry enregistrent une hausse significative de ces fortes pluies au cours de la période récente (figure 25).

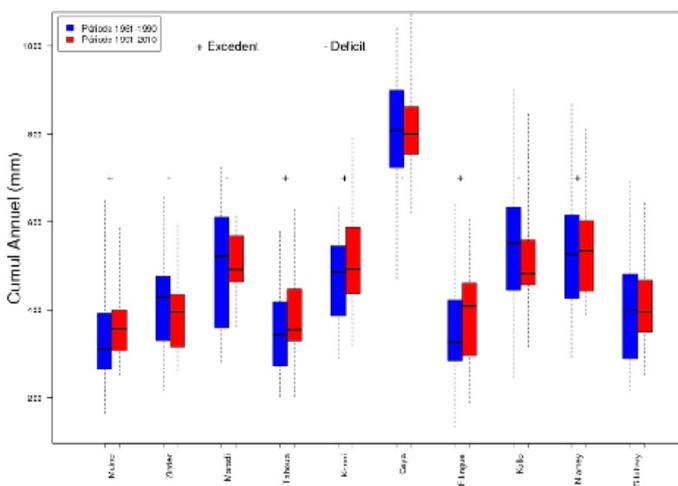


Figure 25 Distribution comparée entre les périodes 1961-1990 et 1991-2010 des pluies maximales moyennes cumulées en trois jours consécutifs au Niger. De la gauche vers la droite, les stations sont classées de l'Est vers l'Ouest.

Lorsqu'il pleut au Niger, on enregistre en moyenne une pluie d'une intensité comprise entre 10 et 16 mm. L'intensité moyenne augmente du Nord Est vers le Sud Ouest (figure 26). Les stations de Maïné, Tahoua, Konni, Niamey et Tillabéry montrent une hausse significative de l'intensité moyenne des pluies journalières au cours de la période récente (figure 27).

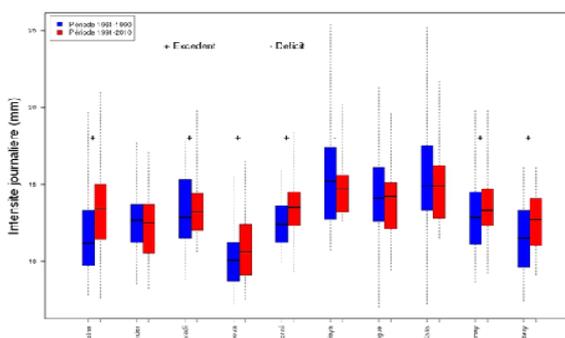


Figure 27: Distribution comparée entre les périodes 1961-1990 et 1991-2010 de l'intensité moyenne des pluies journalières au Niger. De la gauche vers la droite, les stations sont classées de l'Est vers l'Ouest

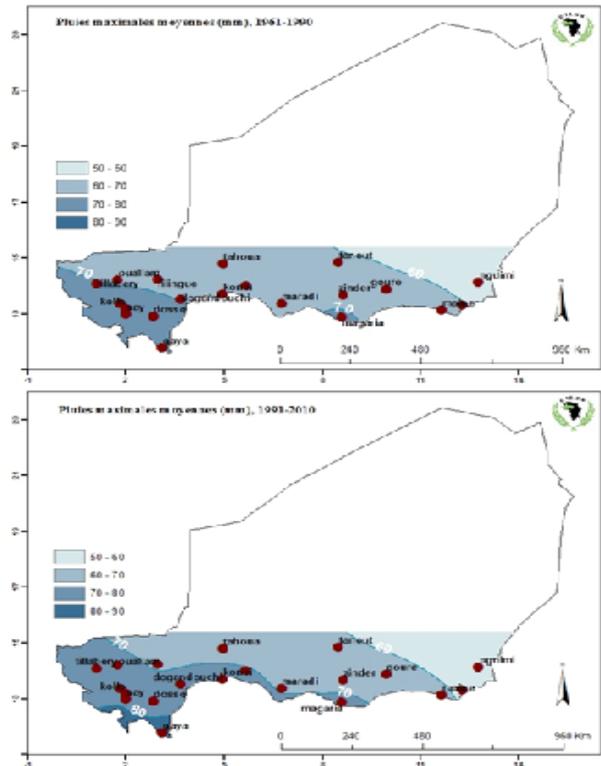


Figure 24 : Comparaison entre les périodes 1961-1990 et 1991 -2010 des pluies maximales moyennes cumulées en trois jours consécutifs

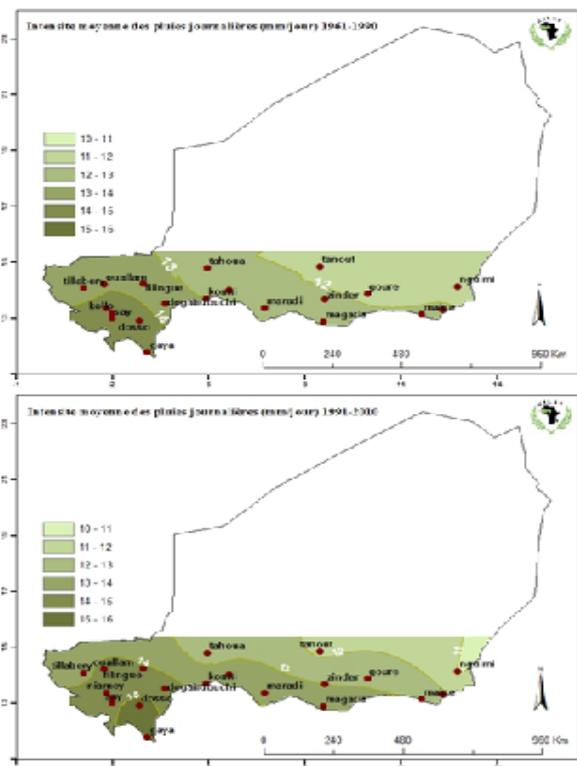


Figure 26 : Comparaison entre les périodes 1961-1990 et 1991 -2010 des intensités moyennes saisonnières des pluies journalières.

5.4.4. Ré-semis et stress hydrique post-floraison

On définit les risques de ré-semis dans la région, lorsqu'il y a une occurrence de séquence sèche d'une durée relativement longue supérieure ou égale à 15 jours ou plus dans les 30 jours après la date de début de saison. Ces événements sont assez fréquents au Niger. La durée moyenne de ces types de séquences sèches n'a pas connu un changement significatif (figure 28). La durée des séquences sèches les plus longues post floraison semble toutefois se raccourcir au cours de la période récente (figure 29).

L'analyse des dates d'occurrence de faux départs liés à des pauses pluviométriques très longues de l'ordre de 15 jours ou plus et fins précoces des saisons de pluies montre que les risques de ré-semis sont très élevés dans la période 1991-2010 (figure 30). En effet les dates d'occurrence des faux départs sont très importantes et débutent en moyenne dans la 2ème décennie de Mai (avec une médiane autour du 12-Mai sur tout le pays). Les pauses pluviométriques d'une durée comprise entre 8 et 14 jours sont plus fréquentes dans cette même période 1991 – 2000 comparées avec une date médiane dans la 2ème décennie de Septembre (figure 30).

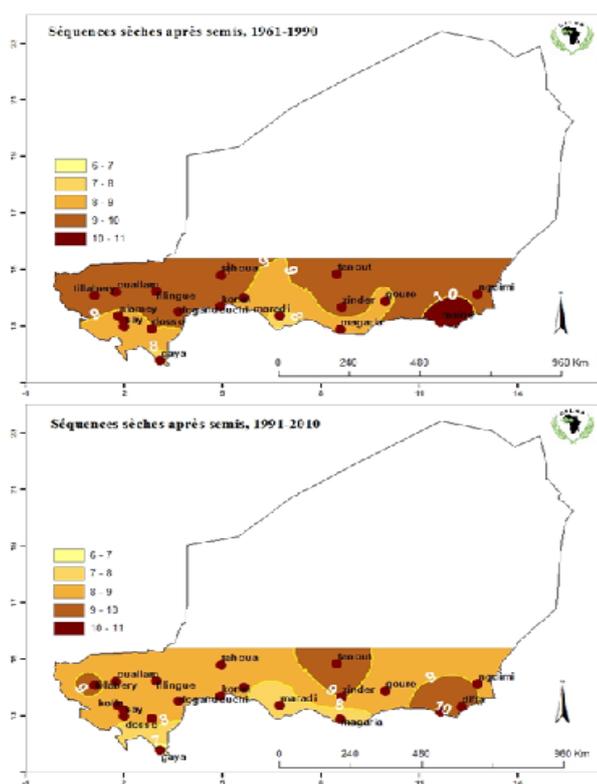


Figure 28: Comparaison entre les périodes 1961-1990 et 1991-2010 de la durée moyenne des séquences sèches maximales en jours dans les 30 jours après la date de début de saison à certaines stations du Niger

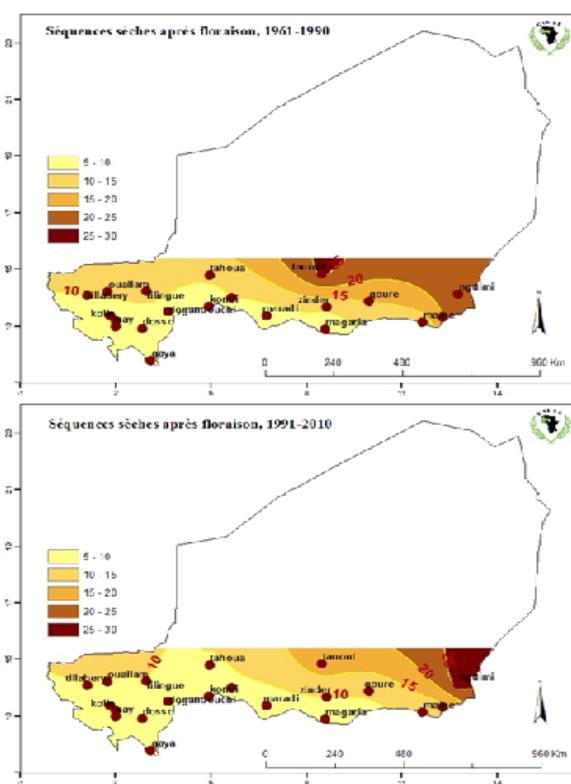


Figure 29: Comparaison entre les périodes 1961-1990 et 1991-2010 de la durée des séquences sèches post-floraison à certaines stations du Niger

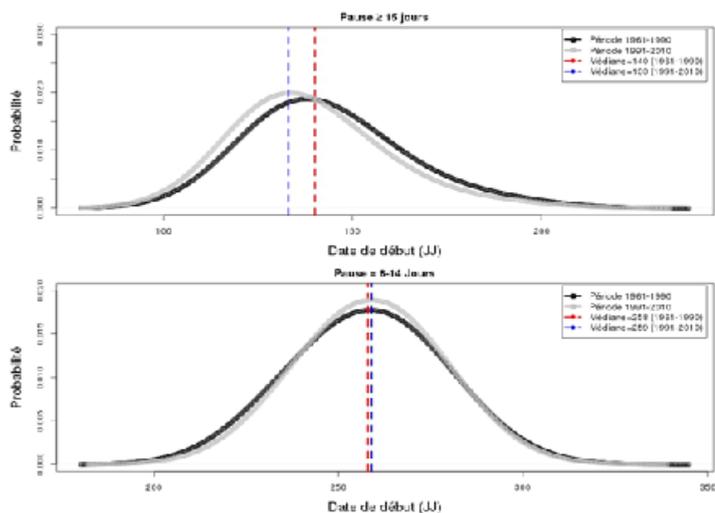


Figure 30: Distribution des dates d'occurrence des faux départs ou séquences sèches supérieures ou égales à 15 jours (en haut) et des séquences sèches de 8 au 14 jours au cours de la saison des pluies au Niger.

5.5 Les scénarii de réchauffement climatique et 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 intra saisonnière. Par conséquent, l'utilisation de plusieurs hypothèses combinant des distributions intra saisonnières 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 +0.6oC à +1.8oC sur l'horizon 2011-2050. Ainsi, les températures de l'air augmenteront même si les amplitudes spatio-temporelles ne seront pas les mêmes sur toute la sous région Ouest Africaine. Cette «enveloppe du réchauffement climatique» est associée à une variabilité des précipitations envisagée selon deux scénarii:

- i) une augmentation faible à modérée des températures associée à une tendance normale du cumul pluviométrique (régime stationnaire) en 2011-2050 ;
- ii) une augmentation faible à modérée 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 dans la sous-région.

Tableau 3: Scénarii 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

Scenario principal	Scenario membre	Libellé (relatif à la Baseline 1981-2010)
Scenario Neutre (SN0)	SN0-30	Augmentation des températures de +0.6oC et une pluviométrie stationnaire (+0%) sur la période 2011-2030.
	SN0-50	Augmentation des températures de +1.8oC et une pluviométrie stationnaire (+0%) sur la période 2031-2050.
Scenario variable (SNP)	SN10-30	Augmentation des températures de 0.6oC et une pluviométrie qui baisse de 10% sur la période 2011-2030.
	SP07-50	Augmentation des températures de +1.8oC et une pluviométrie qui augmente de 07% sur la période 2031-2050.

6. Impacts des changements climatiques sur le mil

6.1 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 des variétés de mil [HKP, Souna 3, Zatib] de 5 jours à 10 jours en moyenne sur tout le pays. 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 (figure 31)

L'évapotranspiration maximale (ET_c) est déterminée par le produit de l'évapotranspiration potentielle de référence (ET_o ou ETP) et du coefficient cultural (K_c) de la plante à différents stades phénologiques. L'analyse de l'ET_c cumulée pendant le cycle des variétés de mil montre une légère baisse sur la période 2011-2030 puis une légère augmentation à l'horizon 2050 (figure 31). L'augmentation des besoins en eau des variétés de mil précoce 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% n'entrave pas l'augmentation de l'évapotranspiration (besoins en eau du mil précoce vers les années 2050). On en conclut qu'en dépit du raccourcissement du cycle lié à la hausse des températures, les besoins en eau du mil augmentent du fait de l'accroissement de la demande évaporative (ETP).

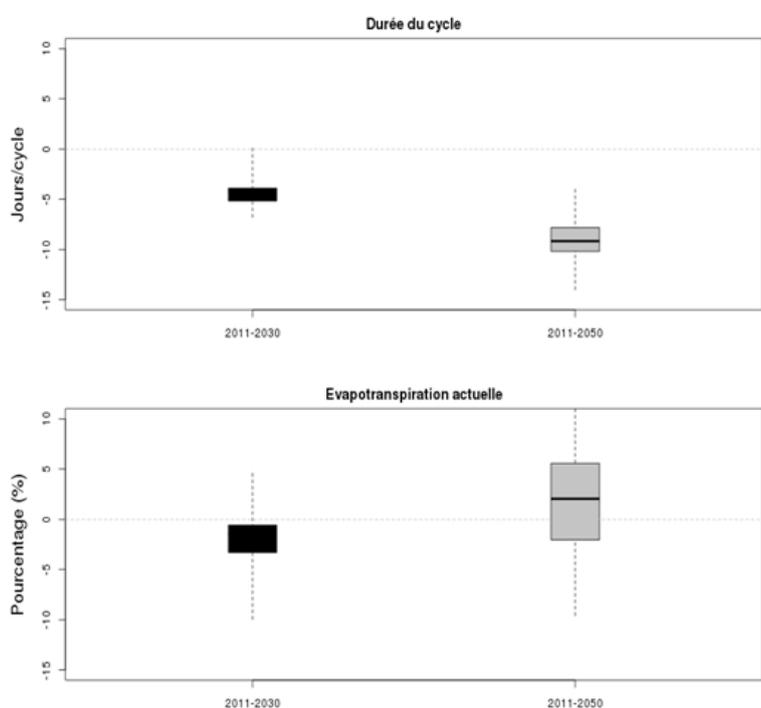


Figure 31: Effet du stress thermique et de la variabilité pluviométrique sur la durée du cycle (en haut) et les besoins en eau (en bas) des variétés de mil précoce [HKP, Souna 3 et Zatib] Niger.

6.2 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 précoce sera plus affectée. Sur la période 2011-2030, on s'attend à une baisse de 5-10% (figure 32). Lorsque, le réchauffement est de l'ordre de +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 de la pluviométrie, et la biomasse ne baisserait que de 0-5% sur tout le pays.

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%). Ainsi, un taux de réchauffement inférieur à +2°C et une baisse des précipitations (de l'ordre de -10%) peuvent amplifier les pertes en production de biomasse et de grains de mil précoce de l'ordre de 10 à plus de 25%.

Par ailleurs, si ce taux de réchauffement est associé à une augmentation des précipitations, cela permettra de réduire faiblement les pertes en biomasse foliaire et non les rendements en grains. On en conclut que le changement climatique affectera davantage la production en grains que la production en biomasse foliaire.

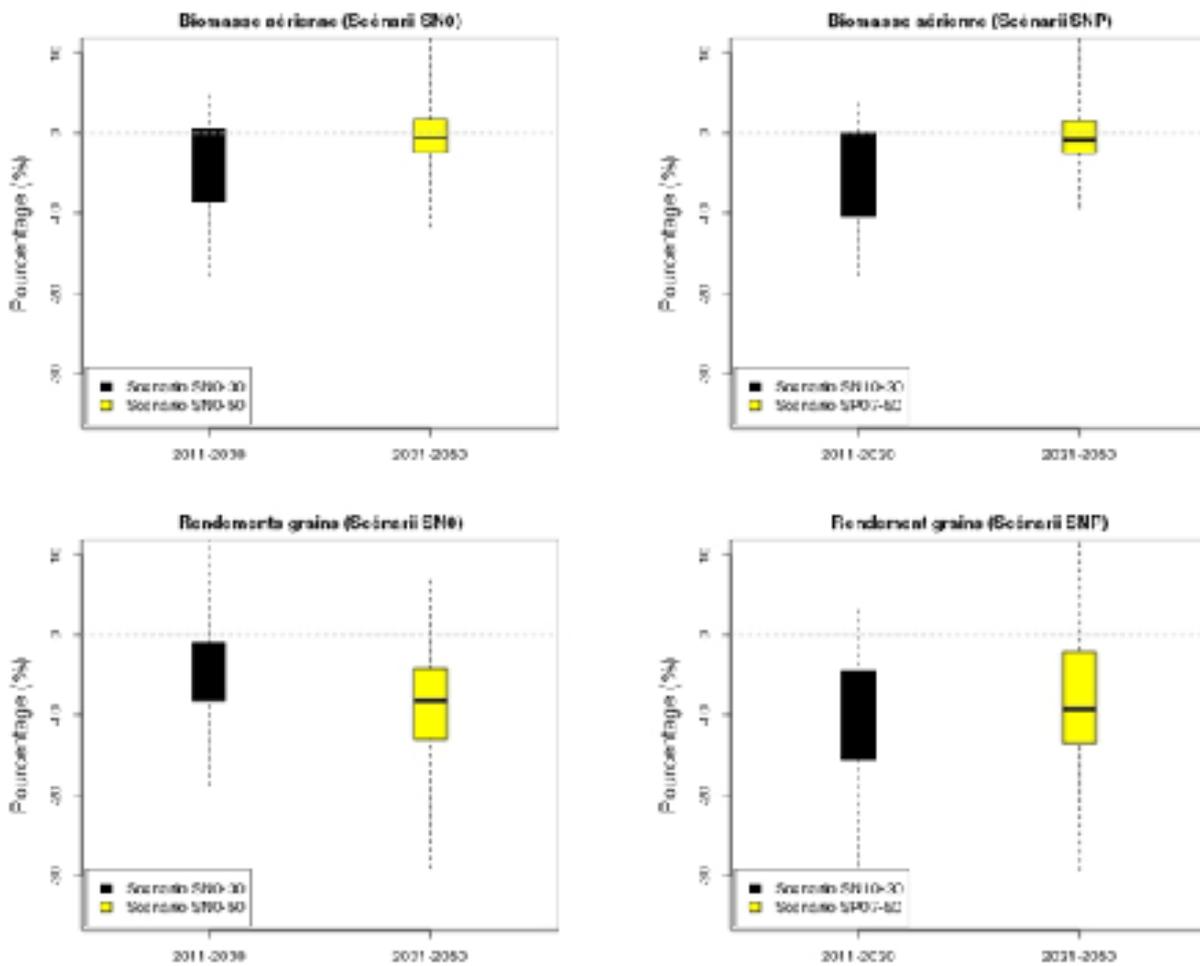


Figure 32: Pourcentages de changement de la production en biomasse (en haut) et en grain (en bas) pendant la grande saison des pluies pour les variétés de mil précoce [HKP, Souna 3, Zatib] simulée par DSSAT selon un scénario d'augmentation progressive des températures associées à un régime pluviométrique stationnaire et une variabilité de la pluviométrie en 2011-2050 (scénarii SN0, SNP) relativement au climat de référence 1981-2010.

7. De l'analyse des risques climatiques à l'intégration des changements climatiques dans la planification du développement.

Les éléments contenus dans cet atlas constituent des informations précieuses devant permettre aux différents acteurs impliqués au Niger sur les questions liées à la réduction des effets des changements climatiques de mieux apprécier les facteurs de vulnérabilité liés au climat. Ils permettent en effet de mieux prendre en compte les risques et les impacts sur les systèmes agricoles dans la planification de l'adaptation au changement climatique au niveau national, sectoriel et local. Par conséquent, cet atlas est appelé à servir de base pour la révision et la mise à jour du PANA et la formulation du plan national d'adaptation (PAN) du Niger.



Conclusion

Cet atlas a pour objectif de produire et de disséminer des informations pertinentes sur les risques climatiques du secteur agricole au Niger en vue d'aider les acteurs impliqués sur les questions relatives au changement climatique à mieux aborder les études de vulnérabilité, d'impact de la variabilité et du changement climatiques sur le secteur agricole. Il constitue une source inestimable d'informations en mesure de susciter l'intégration de l'adaptation au changement climatique dans la planification dans tous les secteurs et à différents niveaux.

Cet atlas a permis la description de l'état du réchauffement climatique, la variabilité accrue des précipitations au cours de ces dernières années et l'émergence de phénomènes climatiques extrêmes, le dysfonctionnement des paramètres de la saison culturale, les impacts du changement climatique sur les cultures. Ces informations permettent de guider la prise de décision pour mieux faire face à la variabilité et aux changements climatiques, l'élaboration et la mise en œuvre d'options d'adaptations à court, moyen et long terme, afin de renforcer la résilience des populations et des écosystèmes face au changement climatique.

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 température maximale est supérieur 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 minimales et maximales

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 \geq 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 \geq 20 mm)
R50	Nombre de jours de très fortes précipitations (RR \geq 50 mm)
SDII	Intensité moyenne des précipitations par jour de pluie \geq 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.

