

République du Niger



MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT,
DE LA SALUBRITÉ URBAINE
ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE



CONSEIL NATIONAL DE
L'ENVIRONNEMENT POUR UN
DÉVELOPPEMENT DURABLE



HAUT-COMMISSARIAT
À L'INITIATIVE
3N



MINISTÈRE DE
L'AGRICULTURE
ET DE L'ÉLEVAGE

Facilité Adapt'Action

NIGER – Appui à la formulation concertée de la SPN2A (Axe 2)

Evaluation désagrégée de l'impact des changements climatiques au Niger sur les risques de dégradation des terres, les rendements agricoles et la production de biomasse herbacée



LIVRABLE N°2 – Version finale

15/12/2019

Avec l'appui technique et financier de :



Cette opération d'assistance technique est financée par l'Agence Française de Développement (AFD) dans le cadre de la Facilité Adapt'Action. Cette Facilité, démarrée en mai 2017, appuie les pays africains, les PMA et les PEID dans la mise en œuvre de leurs engagements pris dans le cadre de l'Accord de Paris sur le Climat, par le financement d'études, d'activités de renforcement des capacités et d'assistance technique, dans le secteur de l'adaptation en particulier. Les auteurs assument l'entière responsabilité du contenu du présent document. Les opinions exprimées ne reflètent pas nécessairement celle de l'AFD ni de ses partenaires.

NIGER – Appui à la formulation concertée de la SPN2A (Axe 2)

Evaluation désagrégée de l'impact des changements climatiques au Niger sur les risques de dégradation des terres, les rendements agricoles et la production de biomasse herbacée

Version finale - 15/12/2019

Le travail cartographique et analytique présenté dans ce rapport a bénéficié de l'appui du Centre Régional AGRHYMET, institution du CILSS membre du comité de pilotage et de suivi de la formulation concertée de la Stratégie et du Plan National d'Adaptation face au Changement Climatique dans le secteur Agricole pour la République du Niger (SPN2A).

Mentions :

Auteurs du rapport : Issaka LONA, Agali ALHASSANE, Kadidiatou SOULEY-YERO, Issa GARBA, Damien HAUSWIRTH

Citation suggérée : LONA I., ALHASSANE A., SOULEY-YERO K., GARBA I., HAUSWIRTH D. (2019). Appui à la formulation concertée de la SPN2A pour la République du Niger : Evaluation désagrégée de l'impact des changements climatiques au Niger sur les risques de dégradation des terres, les rendements agricoles et la production de biomasse herbacée. Ministère de l'Environnement, de la Salubrité Urbaine et du Développement Durable. Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage. Conseil National de l'Environnement pour un Développement Durable. Haut-Commissariat à l'Initiative 3N. Centre Régional Agrhymet. AFD. Facilité Adapt'Action. Niamey, Niger. Baastel - BRL - ONFI. Bruxelles, Belgique.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES.....	5
LISTE DES TABLEAUX.....	7
SIGLES ET ABREVIATIONS	8
RÉSUMÉ EXÉCUTIF.....	9
INTRODUCTION	10
I. REVUE DE QUELQUES CARACTERISTIQUES DE L'AGRICULTURE NIGERIENNE ET DE L'IMPACT PROJETE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR L'AGRICULTURE ET L'ELEVAGE.....	11
1.1. CONTEXTE BIOPHYSIQUE ET CLIMATIQUE.....	11
1.1.1. Zones climatiques du Niger	11
1.1.2. Ressources en sol.....	11
1.1.3. Ressources en eau	12
1.2. ELEMENTS CLES DE LA MISE EN VALEUR DU MILIEU PAR L'AGRICULTURE ET L'ELEVAGE.....	13
1.2.1. Productions végétales.....	13
1.2.2. Productions animales	14
1.3. LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES EN COURS ET LEURS IMPACTS SUR L'AGRICULTURE NIGERIENNE	15
II. METHODOLOGIE	17
2.1. EVALUATION DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET DEMOGRAPHIQUES SUR LE RISQUE DE DEGRADATION DES TERRES 17	
2.1.1. Modèle utilisé.....	17
2.1.2. Calcul de l'indice de référence du risque de dégradation.....	19
2.1.3. Simulation d'impact du changement climatique et de la croissance démographique sur le risque de dégradation des terres.....	20
2.2. EVALUATION DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES RENDEMENTS EN GRAINS ET EN BIOMASSE AERIENNE DES CEREALES PLUVIALES.....	21
2.2.1. Modèle utilisé.....	21
2.2.2. Matériel végétal considéré dans les simulations réalisées	21
2.2.3. Paramétrage du modèle	22
2.2.4. Données climatiques d'entrée	22
2.2.5. Simulations réalisées	23
2.3. EVALUATION DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA PRODUCTION DE BIOMASSE VEGETALE.....	24
2.3.1. Modèle utilisé.....	24
2.3.2. Données d'entrée.....	25
2.3.3. Simulations réalisées	25
III. RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	26
3.1. IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET DEMOGRAPHIQUES SUR LE RISQUE DE DEGRADATION DES TERRES	26
3.1.1. Evolution démographique aux horizons 2030 et 2050	26
3.1.2. Pluviométrie simulée pour la période 2010-2039 et 2040-2069	27
3.1.3. Indice de risque de dégradation des terres pour les périodes 2010-2039 et 2040-2069.....	29
3.1.4. Détection de l'évolution du risque de dégradation des terres pour les périodes 2010-2039 et 2040-2069 (i.e. impact du changement climatique)	33
3.1.5. Discussion : limites de l'évaluation d'impact des changements climatiques et démographiques sur le risque de dégradation des terres.	37
3.2. IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RENDEMENTS EN GRAINS DES CEREALES PLUVIALES.....	38

3.2.1.	<i>Potentiels de rendements en grains des céréales pluviales</i>	38
3.2.2.	<i>Rendements en grains du mil 90 jours</i>	39
3.2.3.	<i>Rendements en grains du mil photopériodique</i>	43
3.2.4.	<i>Rendements en grains du sorgho 90 jours</i>	46
3.2.5.	<i>Rendements en grains du maïs 90 jours</i>	49
3.2.6.	<i>Eléments de discussion</i>	52
3.3.	IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RENDEMENTS EN BIOMASSE AERIENNE DES CEREALES PLUVIALES	55
3.3.1.	<i>Potentiels de rendements en biomasse aérienne des céréales pluviales</i>	55
3.3.2.	<i>Rendements en biomasse aérienne du mil 90 jours</i>	56
3.3.3.	<i>Rendements en biomasse aérienne du mil photopériodique</i>	60
3.3.4.	<i>Rendements en biomasse aérienne du sorgho 90 jours</i>	63
3.3.5.	<i>Rendements en biomasse aérienne du maïs 90 jours</i>	66
3.4.	IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA PRODUCTION DE BIOMASSE HERBACEE	69
3.4.1.	<i>Impact du changement climatique à l'horizon 2050 sur la production potentielle de biomasse herbacée</i>	69
3.4.2.	<i>Impact du changement climatique à l'horizon 2069 sur la production moyenne de biomasse herbacée dans chacune des stations synoptiques</i>	69
CONCLUSION		72
BIBLIOGRAPHIE		73
ANNEXE 1. LISTE DES 5 MODELES CLIMATIQUES RETENUS SUR CHAQUE STATION SYNOPTIQUE (LY ET TOUNE, 2019), POUR SIMULER L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RENDEMENTS DU MIL, SORGHO ET MAÏS AU NIGER.		75
ANNEXE 2 : RENDEMENTS GRAINS ET RENDEMENTS EN BIOMASSE AERIENNE SIMULES AUX HORIZONS 2039, 2069 ET 2099 POUR DIFFERENTES CULTURES PLUVIALES (MIL 90 JOURS, MIL PHOTOPERIODIQUE, SORGHO 90 JOURS ET MAÏS 90 JOURS), SUR CHACUNE DES 15 STATIONS SYNOPTIQUES DU NIGER, ET POUR CHACUN DES 5 MODELES SELECTIONNES LOCALEMENT COMME REPRESENTATIFS DE TENDANCES D'EVOLUTION DU CLIMAT SUR LA BASE DU SCENARIO GLOBAL DE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE RCP8.5.		77
ANNEXE 3. RENDEMENTS GRAINS ET RENDEMENTS EN BIOMASSE AERIENNE SIMULES AUX HORIZONS 2039, 2069 ET 2099 POUR DIFFERENTES CULTURES PLUVIALES (MIL 90 JOURS, MIL PHOTOPERIODIQUE, SORGHO 90 JOURS ET MAÏS 90 JOURS), SUR CHACUNE DES 15 STATIONS SYNOPTIQUES DU NIGER, ET POUR CHACUN DES 5 MODELES SELECTIONNES LOCALEMENT COMME REPRESENTATIFS DE TENDANCES D'EVOLUTION DU CLIMAT SUR LA BASE DU SCENARIO GLOBAL DE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE RCP4.5.		86
ANNEXE 4. PRODUCTION SIMULEE DE BIOMASSE HERBACEE A L'HORIZON 2050 DANS CHACUNE DES 15 STATIONS SYNOPTIQUES DU NIGER POUR 5 TENDANCES DES PROJECTIONS CLIMATIQUES DESAGREGES (RCP 4.5 ET RCP 8.5)		94

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. PRINCIPALES ZONES CLIMATIQUES DU NIGER.....	11
FIGURE 2. PRINCIPAUX TYPES DE SOL DU NIGER	12
FIGURE 3. PRINCIPES DU MODELE D’EVALUATION DU RISQUE POTENTIEL DE DEGRADATION DES TERRES	18
FIGURE 4. CHAINE DE TRAITEMENT DES DONNEES POUR L’EVALUATION DU RISQUE DE DEGRADATION DES TERRES	19
FIGURE 5. RESEAU D’OBSERVATIONS METEOROLOGIQUES AU NIGER.	22
FIGURE 6. SITUATION GEOGRAPHIQUE DES SITES DE RELEVÉ DE VEGETATION UTILISES POUR VALIDER LE MODELE BIOMASSAH ...	24
FIGURE 7. SIMULATION DE L’EVOLUTION DE LA DENSITE DE POPULATION POUR LES ANNEES 2015, 2030 ET 2050 (A GAUCHE, SCENARIO TENDANCIEL (ST) ; A DROITE, SCENARIO DE REDUCTION RAPIDE DE LA FECONDITE (RFF) D’APRES HAROUNA S. ET AL., 2005, APPLIQUES AUX DONNEES LANDSCAN POUR L’ANNEE 2012),.....	26
FIGURE 8. REPRESENTATION DES CUMULS PLUVIOMETRIQUES ANNUELS MOYENS DE LA PERIODE 2040-2069 POUR LE SCENARIO RCP 8.5 POUR DIFFERENTES TENDANCES DE MODELES DE CHANGEMENT CLIMATIQUE (INTERPOLATION DES PROJECTIONS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR 15 STATIONS SYNOPTIQUES DU NIGER).....	27
FIGURE 9. REPRESENTATION DE LA PLUVIOMETRIE MOYENNE DE LA PERIODES 2010-2039 POUR LES SCENARIOS RCP4.5 (A GAUCHE) ET RCP8.5 (A DROITE), POUR DIFFERENTES TENDANCES DE MODELES DE CHANGEMENT CLIMATIQUE, OBTENUE PAR INTERPOLATION DES PROJECTIONS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE PAR TENDANCE D’EVOLUTION SUR LES 15 STATIONS SYNOPTIQUES DU NIGER, D’APRES LY ET TOUNE, 2019.....	28
FIGURE 10. INDICE DE RISQUE STRUCTUREL DE DEGRADATION DES TERRES DE REFERENCE, CALCULE SUR LA BASE DE LA POPULATION 2012 (DONNEES LANDSCAN) ET DE LA PLUVIOMETRIE MOYENNE SUR LA PERIODE 1983-2010 (RFE TAMSAT).....	29
FIGURE 11. INDICE DE RISQUE STRUCTUREL DE DEGRADATION DES TERRES POUR LES PERIODES 2010-2039 ET 2040-2069 DANS LE CAS DU SCENARIO DEMOGRAPHIQUE TENDANCIEL ET D’UN SCENARIO DE RECHAUFFEMENT GLOBAL RCP 8.5.....	30
FIGURE 12. INDICE DE RISQUE STRUCTUREL DE DEGRADATION DES TERRES POUR LES PERIODES 2010-2039 ET 2040-2069 DANS LE CAS DU SCENARIO DE REDUCTION RAPIDE DE LA FECONDITE ET D’UN SCENARIO DE RECHAUFFEMENT GLOBAL RCP 8.5.....	31
FIGURE 13. INDICE DE RISQUE STRUCTUREL DE DEGRADATION DES TERRES POUR LES PERIODES 2010-2039 ET 2040-2069 DANS LE CAS D’UN SCENARIO RCP 4.5 ET D’UNE TENDANCE MEDIANE DES PROJECTIONS CLIMATIQUES DESAGREGES.....	32
FIGURE 14. CARTES DE DETECTION DES CHANGEMENTS D’INDICE DE RISQUE STRUCTUREL DE DEGRADATION DES TERRES POUR LE RCP 4.5 ET POUR LES PERIODES 2010-2039 ET 2040-2069, COMPARES ENTRE LES SCENARIOS DEMOGRAPHIQUES POUR LA TENDANCE CLIMATIQUE INTERMEDIAIRE.....	33
FIGURE 15. CARTES DE DETECTION DE CHANGEMENTS D’INDICE DE RISQUE STRUCTUREL DE DEGRADATION DES TERRES POUR LA PERIODE 2010-2039 ET POUR LE RCP 8.5, COMPARES ENTRE LES SCENARIOS DEMOGRAPHIQUES POUR DIFFERENTES TENDANCES D’EVOLUTION DU CLIMAT	35
FIGURE 16. CARTES DE DETECTION DE CHANGEMENTS D’INDICE DE RISQUE STRUCTUREL DE DEGRADATION DES TERRES POUR LA PERIODE 2040-2069 ET POUR LE RCP 8.5, COMPARES ENTRE LES SCENARIOS DEMOGRAPHIQUES POUR DIFFERENTES TENDANCES D’EVOLUTION DU CLIMAT	36
FIGURE 17. RENDEMENTS POTENTIELS DE PRODUCTION CEREALIERE SUIVANT LES SITES	39
FIGURE 18. RENDEMENTS EN GRAINS PROJETES DU MIL 90 JOURS DANS CHACUNE DES 15 STATIONS SYNOPTIQUES	40
FIGURE 19. ANOMALIES DE RENDEMENTS EN GRAINS DU MIL 90 JOURS PAR RAPPORT A LA REFERENCE AUX HORIZONS 2039-2069-2099.....	41
FIGURE 20. EVOLUTION DES ISOLIGNES DE RENDEMENT EN GRAINS DU MIL 90 JOURS PAR RAPPORT A LA REFERENCE AUX HORIZONS 2039, 2069 ET 2099 (RCP 4.5 ET RCP 8.5).	42
FIGURE 21. RENDEMENTS GRAINS SIMULES DU MIL PHOTOPERIODIQUE POUR LES STATIONS SYNOPTIQUES DU NIGER	43
FIGURE 22. ANOMALIES DE RENDEMENTS EN GRAINS DU MIL PHOTOPERIODIQUE AUX HORIZONS 2039-2069-2099.....	44
FIGURE 23. EVOLUTION DES ISOLIGNES DE RENDEMENTS EN GRAINS DU MIL PHOTOPERIODIQUE PAR RAPPORT A LA PERIODE DE REFERENCE AUX HORIZONS 2039, 2069 ET 2099 (RCP 4.5 ET RCP 8.5).	45
FIGURE 24. RENDEMENTS EN GRAINS SIMULES DU SORGHO POUR LES STATIONS SYNOPTIQUES DU NIGER.....	46
FIGURE 25. ANOMALIES DE RENDEMENTS EN GRAINS DU SORGHO 90 JOURS AUX HORIZONS 2039-2069-2099.....	47
FIGURE 26. EVOLUTION DES ISOLIGNES DE RENDEMENT EN GRAINS DU SORGHO PAR RAPPORT A LA PERIODE DE REFERENCE AUX HORIZONS 2039, 2069 ET 2099 (RCP 4.5 ET RCP 8.5).....	48
FIGURE 27. RENDEMENTS GRAINS SIMULES DU MAÏS POUR LES STATIONS SYNOPTIQUES DU NIGER.....	49
FIGURE 28. ANOMALIES DE RENDEMENTS EN GRAINS DU MAÏS AUX HORIZONS 2039-2069-2099.....	50

FIGURE 29. EVOLUTION DES ISOLIGNES DE RENDEMENT EN GRAINS DU MAÏS PAR RAPPORT A LA PERIODE REFERENCE AUX HORIZONS 2039, 2069 ET 2099 (RCP 4.5 ET RCP 8.5).	51
FIGURE 30. EVOLUTION PROJETEE DES RENDEMENTS DES CULTURES PLUVIALES DANS LA REGION DE TILLABERI A L'HORIZON 2050 PAR COMPARAISON A 2010, D'APRES IFAD, 2019 : CARD WEST AFRICA.	53
FIGURE 31. EVOLUTION PROJETEE DES RENDEMENTS DES CULTURES PLUVIALES DANS LA REGION DE TAHOUA A L'HORIZON 2050 PAR COMPARAISON A 2010, D'APRES IFAD, 2019 : CARD WEST AFRICA.	53
FIGURE 32. EVOLUTION PROJETEE DES RENDEMENTS DES CULTURES PLUVIALES DANS LA REGION DE DOSSO A L'HORIZON 2050 PAR COMPARAISON A 2010, D'APRES IFAD, 2019 : CARD WEST AFRICA.	53
FIGURE 33. EVOLUTION PROJETEE DES RENDEMENTS DES CULTURES PLUVIALES DANS LA REGION DE MARADI A L'HORIZON 2050 PAR COMPARAISON A 2010, D'APRES IFAD, 2019 : CARD WEST AFRICA.	54
FIGURE 34. EVOLUTION PROJETEE DES RENDEMENTS DES CULTURES PLUVIALES DANS LA REGION DE ZINDER A L'HORIZON 2050 PAR COMPARAISON A 2010, D'APRES IFAD, 2019 : CARD WEST AFRICA.	54
FIGURE 35. EVOLUTION DES RENDEMENTS DES CULTURES PLUVIALES DANS LA REGION DE DIFFA A L'HORIZON 2050 PAR COMPARAISON A 2010, D'APRES IFAD, 2019 : CARD WEST AFRICA.	54
FIGURE 36. RENDEMENTS POTENTIELS EN BIOMASSE AERIENNE DES CEREALES PLUVIALES SIMULES POUR LES STATIONS SYNOPTIQUES DU NIGER A DIFFERENTS HORIZONS TEMPORELS	56
FIGURE 37. RENDEMENTS SIMULES EN BIOMASSE AERIENNE DU MIL 90 JOURS POUR LES STATIONS SYNOPTIQUES DU NIGER	57
FIGURE 38. ANOMALIES DE RENDEMENTS EN BIOMASSE AERIENNE DU MIL 90 JOURS PAR RAPPORT A LA PERIODE DE REFERENCE AUX HORIZONS 2039-2069-2099 POUR LES DIFFERENTES STATIONS SYNOPTIQUES DU NIGER.....	58
FIGURE 39. EVOLUTION DES ISOLIGNES DE RENDEMENT EN BIOMASSE AERIENNE DU MIL 90 JOURS PAR RAPPORT A LA PERIODE DE REFERENCE AUX HORIZONS 2039, 2069 ET 2099 (RCP 4.5 ET RCP 8.5).	59
FIGURE 40. RENDEMENTS SIMULES EN BIOMASSE AERIENNE DU MIL PHOTOPERIODIQUE POUR LES STATIONS SYNOPTIQUES DU NIGER	60
FIGURE 41. ANOMALIES DE RENDEMENTS EN BIOMASSE AERIENNE DU MIL PHOTOPERIODIQUE PAR RAPPORT A LA PERIODE DE REFERENCE AUX HORIZONS 2039-2059-2099 POUR LES DIFFERENTES STATIONS SYNOPTIQUES DU NIGER	61
FIGURE 42. EVOLUTION DES ISOLIGNES DE RENDEMENT EN BIOMASSE AERIENNE DU MIL PHOTOPERIODIQUE PAR RAPPORT A LA PERIODE DE REFERENCE AUX HORIZONS 2039, 2069 ET 2099 (RCP 4.5 ET RCP 8.5).	62
FIGURE 43. RENDEMENTS SIMULES EN BIOMASSE AERIENNE DU SORGHO POUR LES STATIONS SYNOPTIQUES DU NIGER	63
FIGURE 44. ANOMALIES DE RENDEMENT EN BIOMASSE AERIENNE DU SORGHO PAR RAPPORT A LA REFERENCE AUX HORIZONS 2039-2069-2099 POUR LES DIFFERENTES STATIONS SYNOPTIQUES DU NIGER.....	64
FIGURE 45. EVOLUTION DES ISOLIGNES DE RENDEMENT EN BIOMASSE AERIENNE DU SORGHO 90 JOURS PAR RAPPORT A LA PERIODE REFERENCE AUX HORIZONS 2039, 2069 ET 2099 (RCP 4.5 ET RCP 8.5).	65
FIGURE 46. RENDEMENTS SIMULES EN BIOMASSE AERIENNE DU MAÏS POUR LES STATIONS SYNOPTIQUES DU NIGER.....	66
FIGURE 47. ANOMALIES DE RENDEMENTS EN BIOMASSE AERIENNE DU MAÏS PAR RAPPORT A LA PERIODE DE REFERENCE AUX HORIZONS 2039-2069-2099 POUR LES DIFFERENTES STATIONS SYNOPTIQUES DU NIGER.....	67
FIGURE 48. EVOLUTION DES ISOLIGNES DE RENDEMENT EN BIOMASSE AERIENNE DU MAÏS 90 JOURS PAR RAPPORT A LA PERIODE DE REFERENCE AUX HORIZONS 2039, 2069 ET 2099 (RCP 4.5 ET RCP 8.5).	68
FIGURE 49. PRODUCTIVITES SIMULEES DE BIOMASSE HERBACEE (KG MS.HA ⁻¹) COMPAREES ENTRE LA PERIODE DE REFERENCE ET LA PERIODE 2040-2069 POUR LE RCP 4.5 ET LE RCP 8.5 DANS TOUTES LES STATIONS	70
FIGURE 50. PLUVIOMETRIE ANNUELLE (MM) ET PRODUCTIVITES MOYENNES EN BIOMASSE HERBACEE (KG MS. HA ⁻¹) SELON LE SCENARIO GLOBAL RCP 4.5, SIMULEES DANS CHAQUE STATION SYNOPTIQUE POUR LA PERIODE DE REFERENCE (1981-2010) ET POUR CHACUNE DES 5 TENDANCES DE MODELES CLIMATIQUES SUR LE MOYEN TERME (2040-2069).	70
FIGURE 51. PLUVIOMETRIE ANNUELLE (MM) ET PRODUCTIVITES MOYENNES EN BIOMASSE HERBACEE (KG MS. HA ⁻¹) SELON LE SCENARIO GLOBAL RCP 8.5, SIMULEES DANS CHAQUE STATION SYNOPTIQUE POUR LA PERIODE DE REFERENCE (1981-2010) ET POUR CHACUNE DES 5 TENDANCES DE MODELES CLIMATIQUES SUR LE MOYEN TERME (2040-2069).....	71

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. MODES DE MISE EN VALEUR AGRICOLE DOMINANTS SELON LA ZONE CLIMATIQUE CONSIDEREE	11
TABLEAU 2. APTITUDE CULTURALE DES SOLS DU NIGER	12
TABLEAU 3. SURFACES EMBLAVEES ET RENDEMENTS MOYENS ESTIMES EN 2016 ET 2017 POUR LES PRINCIPALES PRODUCTIONS VEGETALES	14
TABLEAU 4. CLASSES DE SOLS UTILISEES PAR LE MODELE POUR LES DIFFERENTES STATIONS SYNOPTIQUES DU NIGER	25
TABLEAU 5. RENDEMENTS CEREALIERES SIMULES AUX HORIZONS 2039-2069-2099 POUR LE RCP4.5 ET RCP 8.5 COMPARES AUX RENDEMENTS MOYENS SIMULES POUR LA PERIODE DE REFERENCE – TOUTES STATIONS ET TOUTES CEREALES CONFONDUES..	38
TABLEAU 6. RENDEMENTS GRAIN SIMULES POUR LE MIL 90 JOURS (KG.HA ⁻¹), COMPARES AVEC LA REFERENCE, TOUTES STATIONS CONFONDUES	39
TABLEAU 7. RENDEMENTS GRAIN SIMULES DU MIL PHOTOPERIODIQUE COMPARES A CEUX DE LA REFERENCE, TOUTES STATIONS CONFONDUES	43
TABLEAU 8. RENDEMENTS EN GRAIN SIMULES DU SORGHO 90 JOURS COMPARES A CEUX DE LA REFERENCE, TOUTES STATIONS CONFONDUES	46
TABLEAU 9. RENDEMENTS EN GRAINS SIMULES DU MAÏS 90 JOURS COMPARES A CEUX DE LA REFERENCE, TOUTES STATIONS CONFONDUES	49
TABLEAU 10. SYNTHESE DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES RENDEMENTS GRAIN DU MIL, DU SORGHO ET DU MAÏS 90 JOURS PAR RAPPORT A LA PERIODE DE REFERENCE 1981-2010	52
TABLEAU 11. RENDEMENTS SIMULES EN BIOMASSE AERIENNE DES CEREALES PLUVIALES AUX HORIZONS 2039-2069-2099, COMPARES A LA REFERENCE (TOUTES CEREALES ET TOUTES STATIONS CONFONDUES, EN KG/HA).....	55
TABLEAU 12. RENDEMENTS EN BIOMASSE AERIENNE SIMULES POUR LE MIL 90 JOURS, COMPARES A CEUX DE LA PERIODE DE REFERENCE, TOUTES STATIONS CONFONDUES	56
TABLEAU 13. RENDEMENTS EN BIOMASSE AERIENNE SIMULES POUR LE MIL PHOTOPERIODIQUE, COMPARES A CEUX DE LA REFERENCE, TOUTES STATIONS CONFONDUES.....	60
TABLEAU 14. RENDEMENTS EN BIOMASSE AERIENNE SIMULES POUR LE SORGHO, COMPARES A CEUX DE LA PERIODE DE REFERENCE, TOUTES STATIONS CONFONDUES.....	63
TABLEAU 15. RENDEMENTS EN BIOMASSE AERIENNE SIMULES POUR LE MAÏS, COMPARES A CEUX DE LA REFERENCE, TOUTES STATIONS CONFONDUES	66
TABLEAU 16. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE A L'HORIZON 2069 SUR LA PRODUCTION DE BIOMASSE HERBACEE, TOUTES STATIONS ET TOUTES PROJECTIONS CLIMATIQUES LOCALES CONFONDUES	69

SIGLES ET ABBREVIATIONS

Sigle	Définition
AFD	Agence Française de Développement
AFOLU	Agriculture, Forestry and Other Land Use
AGRHYMET	Centre Régional d'applications en Agro-Hydro-Météorologie
AIC	Agriculture Intelligente face au Climat
AMMA-CATCH	Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine - Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique
BIOMASSAH	Modèle d'évaluation de la biomasse sahélienne
CARD	Climate Adaptation in Rural Development Assesment Tool
CC	Changement climatique
CCNUCC	Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CDN	Contribution Déterminée au niveau National
CGIAR	Groupe Consultatif pour la Recherche Agricole Internationale
CILSS	Comité Permanent Inter Etat de Lutte contre la Sécheresse au Sahel
CMIP5	Projet d'Intercomparaison des modèles couplés
CNEDD	Conseil National pour l'Environnement et le Développement Durable
CILSS	Comité permanent Inter États de Lutte contre la Sécheresse au Sahel
DMN	Direction de la Météorologie Nationale
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
FIDA / IFAD	Fonds International de Développement Agricole
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat
GLASOD	Global Assessment of Human-induced Soil Degradation
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
ISMIP	Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project
MAG/EL	Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage
MESUDD	Ministère de l'Environnement, de la Salubrité Urbaine et du Développement Durable
PIC-RS	Plan d'Investissement Climatique pour la Région du Sahel
RCP	Representative Concentration Pathway
RFE	Rainfall Index Estimate
SARRA-H	Système d'Analyse Régionale des Risques Agro-climatiques, version H
UBT	Unité de Bétail Tropical

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Au Niger, le secteur de l'Agriculture, de la Foresterie et des autres utilisations des terres (AFOLU) contribue à 38,4% au produit intérieur brut (INS, 2019) et constitue la principale source de revenus pour plus de 80 % de la population. L'adaptation face au changement climatique des producteurs constitue une clé du développement durable du secteur agricole et de la sécurité alimentaire des populations.

Le Gouvernement du Niger s'est engagé dans la formulation concertée d'une stratégie et d'un plan national d'adaptation aux changements climatiques dans le secteur agricole (SPN2A), qui bénéficie d'un appui de l'AFD à travers la facilité Adapt'action, dont l'objectif est de contribuer à l'intégration de l'adaptation aux effets attendus des changements climatiques dans la planification et la mise en œuvre du développement du secteur agricole.

La deuxième étape du processus de formulation de la SPN2A concerne l'élaboration de projections désagrégées d'impact du changement climatique sur les productions agrosylvopastorales pour les périodes 2010-2039 (court terme) et 2040-2069 (moyen terme). Ces projections constituent un préalable à l'identification d'options d'adaptation en AIC appropriées aux différents territoires du Niger.

Dans le cadre de ce travail soutenu par le Centre Régional AGRHYMET, 3 modèles d'évaluation d'impact validés pour le Niger ont été mobilisés pour analyser i/ l'impact des changements climatiques et de la croissance démographique sur le risque de dégradation des terres, ii/ l'impact des changements climatiques sur les rendements en grains et en biomasse aérienne des principales céréales pluviales et iii/ l'impact des changements climatiques sur la production de biomasse herbacée. Ces travaux ont permis d'élaborer des projections désagrégées d'impact des changements climatiques sur les productions agropastorales, pour chacune des 15 stations synoptiques du Niger.

Les résultats qui sont présentés démontrent la nécessité de maîtriser des risques élevés de dégradation des terres que la croissance démographique et les changements climatiques viendront accentuer. Les cartes élaborées peuvent être mobilisées pour concentrer les efforts de restauration des sols sur les zones présentant un risque fort de dégradation des terres et une forte probabilité d'accroissement de ce risque.

Les projections désagrégées indiquent également un impact variable du changement climatique sur les rendements agricoles selon :

- d'une part, la culture considérée : avec les changements climatiques, les rendements du mil non photopériodique et du sorgho tendent à diminuer alors que les rendements du mil photopériodique et du maïs tendent à augmenter ;
- d'autre part, la station synoptique considérée : pour une culture donnée, les tendances d'évolution des rendements en grain et en biomasse aérienne peuvent varier fortement entre les stations.

Elles démontrent enfin une modification de l'aire potentielle d'extension de certaines cultures pluviales (mil, notamment) et une augmentation de la productivité en biomasse herbacée dans une fourchette de 6% à 16% d'ici 2050.

Ces résultats impliquent qu'il est nécessaire de construire l'adaptation des systèmes de culture et d'élevage face aux changements climatiques à des échelles locales. Ils montrent aussi l'existence d'opportunités pour appuyer l'adaptation des systèmes de culture face au changement climatique en raisonnant les choix variétaux et en optimisant les calendriers culturaux.

Les projections désagrégées d'impacts des changements climatiques issues de ce travail sont à la libre disposition des acteurs souhaitant les mobiliser, dans le respect des règles usuelles de citation des auteurs.

Elles sont téléchargeables à partir du lien suivant :

<https://www.dropbox.com/sh/vxdi6t5xprux9wo/AABoX1wOdMKqtkBxFALsLLBra?dl=0>

Dans le cadre du processus de formulation concertée de la SP2NA, ces évaluations viendront appuyer l'identification des options d'adaptation en AIC appropriées à chaque région agraire du Niger (activité 3).

INTRODUCTION

Au Niger, le défi d'adaptation face à la variabilité et aux changements climatiques se conjugue à des défis démographiques, environnementaux, sociaux et sécuritaires. L'aridité du milieu et la très forte variabilité spatio-temporelle des précipitations contribuent à la forte vulnérabilité des populations dont les moyens d'existence dépendent principalement du secteur agricole. La capacité des producteurs agricoles à s'adapter aux changements climatiques constitue à cet égard l'une des clés du développement durable du secteur agricole et de la sécurité alimentaire des populations.

Appuyée par la facilité Adapt'Action (AFD), la formulation d'une stratégie et d'un plan national d'adaptation face au changement climatique dans le secteur agricole (SPN2A) constitue à cet égard une opportunité pour anticiper les changements à venir dès aujourd'hui, en déterminant de façon concertée et inclusive les priorités d'investissement pour développer une agriculture intelligente face au climat dans le secteur agricole.

Ce processus nécessite de disposer d'informations fiables en matière de changement climatique et de ses impacts sur les productions agro-sylvo-pastorales. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette seconde étape du processus de formulation concertée de la SPN2A, articulée autour d'une évaluation désagrégée des impacts des changements climatiques sur les productions agropastorales.

Disposer d'informations concernant l'impact des changements climatiques sur les productions agricoles et pastorales à une échelle locale constitue un préalable à la planification et à la mise en œuvre d'actions pertinentes en faveur de l'adaptation des populations rurales face au changement climatique dans le secteur AFOLU. C'est l'objectif visé par la présente étude. Celle-ci mobilise des modèles d'impact, alimentés par les projections climatiques désagrégées antérieurement générées par Ly et Touné (2019) pour chaque station synoptique du Niger sur le court terme (2010-2039), le moyen terme (2040-2069) et le long terme (2070-2099). Ce premier travail a permis de sélectionner, pour chaque station synoptique du Niger, les 5 modèles climatiques les plus représentatifs du climat observé. Il a également permis de générer des projections climatiques au pas de temps journalier pour chacun de ces modèles sur le court terme, le moyen terme et le long terme.

Nous utilisons ces données pour analyser :

- d'une part, l'impact des changements climatiques et démographiques sur le risque de dégradation des terres au Niger ;
- d'autre part, l'impact des changements climatiques sur les rendements en grains et en biomasse aérienne des céréales pluviales ;
- enfin, l'impact des changements climatiques sur la production potentielle de biomasse herbacée.

Le présent rapport est structuré en trois parties. La première partie offre une revue succincte des caractéristiques de l'agriculture du Niger et de l'impact projeté des changements climatiques sur les systèmes de culture. Dans une seconde partie, nous présentons la démarche méthodologique qui a été mise en œuvre dans le cadre de cette évaluation d'impact. La troisième partie de ce rapport est consacrée à la présentation des résultats obtenus et de leur domaine de validité.

I. Revue de quelques caractéristiques de l'agriculture nigérienne et de l'impact projeté des changements climatiques sur l'agriculture et l'élevage

1.1. Contexte biophysique et climatique

1.1.1. Zones climatiques du Niger

Le Niger peut être subdivisé en 5 zones climatiques (Figure 1 et tableau 1) auxquelles correspondent 3 principaux modes de mise en valeur agricole.

Figure 1. Principales zones climatiques du Niger

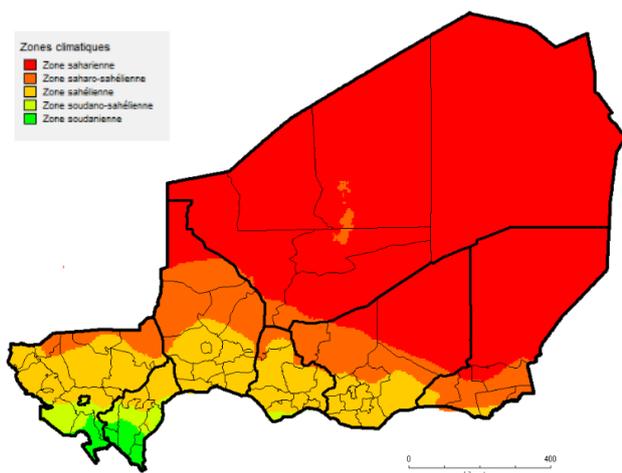


Tableau 1. Modes de mise en valeur agricole dominants selon la zone climatique considérée

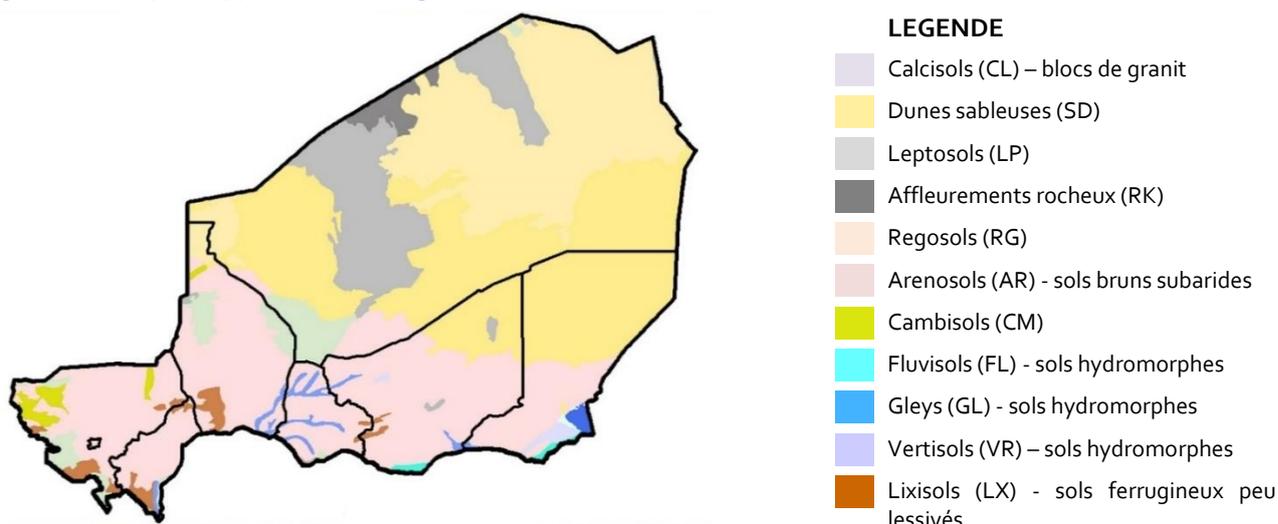
Zone climatique	% superficie totale du Niger*	Extension du (Mha)*	Pluviométrie annuelle moyenne (mm)*	Durée de la période de croissance des végétaux	Principaux modes de mise en valeur
saharienne	69	81,45	< 200	< 15 jours	Agriculture oasisienne
saharo-sahélienne	13	15,14	200-300		Elevage nomade et transhumant
sahélienne	15	17,77	300-500	15-100 jours	
soudano-sahélienne	2	2,20	500-600		Agriculture pluviale ;
soudanienne	1	1,65	600-800	100-150 jours	élevage sédentaire et transhumant

Source : *Fick, S.E. and R.J. Hijmans, 2017. Worldclim - Global climate data 1970-2000: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology.

1.1.2. Ressources en sol

Le Niger abrite différents types de sols (Figure 2) d'aptitude culturale majoritairement faible (Tableau 2). La moitié Nord du pays comporte majoritairement des sols minéraux bruts : lithosols dans les massifs montagneux et plateaux d'altitude, sols d'ablation sur roches diverses et sols sableux d'apport éolien dans le Ténéré, les vallées encaissées de l'Air et dans certaines zones du Kaouar. La moitié Sud du pays est essentiellement constituée de sols bruns subarides et de sols peu différenciés. Moins de 20% de la partie méridionale du pays abrite des sols hydromorphes à teneur en argile variable (SEDES, 1987), qui sont bien représentés au niveau des dallols, des goulbis, de la vallée de la Tarka, des terrasses du fleuve Niger, et des cuvettes du Manga (PANA, 2006). Les espaces situés à proximité de la Komadougou-Yobé et du Lac Tchad abritent également des vertisols d'extension limitée. D'une façon générale, les sols cultivés sont fragiles et leur fertilité tend à baisser rapidement à partir du moment où ils sont mis en culture. Ils présentent de faibles taux de matière organique et des carences en phosphore (Bationo, 1991). Sensibles à l'érosion hydrique et éolienne, ils montrent une tendance à l'acidification, une faible capacité de rétention en eau et peuvent être affectés par des phénomènes d'alcalinisation et de salinisation.

Figure 2. Principaux types de sol du Niger



Source: FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2012. *Harmonized World Soil Database (version 1.2)*. FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria & CAIMA : Etude de la fertilité des sols du Niger

Tableau 2. Aptitude culturale des sols du Niger

Classification	Type de sol	Aptitude culturale	Occupation des sols
CL, SD, RK	Sols minéraux bruts	Très faible	Nulle sauf oueds (sols alluviaux)
LP	Sols très peu évolués < 10 cm de profondeur		
RG	Sols peu développés sur matériaux non consolidés	Faible	Pâturage extensif
AR	Sols bruns à dominance sableuse pauvres en éléments nutritifs		
CM	Sols à horizons peu différenciés sur apport alluvial ou éolien	Bonne	Agriculture pluviale
LX	Sols ferrugineux peu lessivés, à forte saturation de base		
FL, GL, VR	Sols hydromorphes et vertisols	Très bonne sous maîtrise de l'eau	Riziculture et maraîchage irrigué

Source: FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2012. *Harmonized World Soil Database (version 1.2)*. FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria & CAIMA : Etude de la fertilité des sols du Niger

1.1.3. Ressources en eau

Le potentiel en eaux de surface du Niger a été estimé à 32 km³/an dont la grande majorité (29 km³) provient des écoulements du fleuve Niger et de ses affluents. Le réseau hydrographique du Niger se répartit entre le bassin du fleuve Niger et le bassin du Lac Tchad. On dénombre par ailleurs plus de 970 mares naturelles, dont 165 mares permanentes. Le Niger compte par ailleurs 69 retenues d'eau artificielles totalisant environ 150 millions de m³ d'eau.

Le potentiel en eaux souterraines s'élève à 2,5 km³ de ressources hydriques renouvelables (SPIN, 2015), qui sont exploitées à moins de 20%, et à 2 000 km³ de ressources hydriques non renouvelables (MHE, 1995). Les contraintes de mise en valeur des eaux souterraines découlent de leurs profondeurs élevées, des débits insuffisants par endroits et du faible taux de réussite des forages dans des zones à socle, se traduisant par un coût élevé d'exploitation et d'entretien des infrastructures (MHE, 2014).

Le potentiel de terres irrigables à partir des seules eaux de surface a été estimé en 1981 à 270 000 ha (SOGREAH/BRGM, 1981), soit environ 2% de la surface cultivable, et n'a pas été réactualisé depuis lors. Cependant, le potentiel total de terres irrigables devrait être revu à la hausse (PANGIRE, 2017), notamment en tenant compte des possibilités d'exploitation à faible coût des eaux souterraines renouvelables les plus accessibles (Nazoumou et al., 2016).

D'après Tillie et al. (2019), le Niger abrite 5,7 millions d'hectares de terres qui surmontent une nappe souterraine comprise entre 0 et 15 mètres de profondeur.

1.2. Éléments clés de la mise en valeur du milieu par l'agriculture et l'élevage

1.2.1. Productions végétales

Les superficies emblavées en 2017 ont été estimées à 16 810 381 hectares, soit 13,27% de la superficie totale du pays (MAG/EL, 2019). L'espace consacré à l'agriculture connaît une progression constante. Les surfaces emblavées ont fortement augmenté entre 2013 et 2017, avec par exemple une progression de plus de 18% des surfaces consacrées à l'arachide et de 14% pour le niébé. La production agricole est passée dans le même temps de 6,7 à 8,4 millions de tonnes, dont 5,7 millions de tonnes de céréales, 2,1 millions de tonnes de légumineuses, et 564 080 tonnes de tubercules.

L'agriculture au Niger reste essentiellement pluviale, avec des rendements le plus souvent inférieurs à 600 kg.ha⁻¹ (Tableau 3). L'agriculture est principalement le fait de petites exploitations familiales d'abord orientées vers la subsistance, avec une très faible proportion de cultures de rente. Les cultures sont dominées par le mil (46% de la superficie totale), le niébé (32%), et le sorgho (18%). Les autres cultures pratiquées comprennent notamment le manioc, la patate douce, le riz, le maïs, le blé et le fonio, conduits en pluvial ou en irrigué. Le coton, l'arachide, le voandzou et le souchet sont également cultivés dans certaines régions, telles que Dosso, Maradi et Zinder.

Un seul cycle de culture est généralement possible dans l'année, pendant la saison des pluies, sauf dans les zones autour des rivières et des bas-fonds où l'irrigation permet une deuxième culture pendant la saison sèche (le plus souvent maïs, riz, blé, tubercules ou cultures maraichères). D'une façon générale, les rendements agricoles sont faibles et varient fortement d'une année à l'autre.

Au Niger, le principal risque agro-climatique pour la production des céréales pluviales est le manque d'eau, en relation avec la variabilité aussi bien spatiale que temporelle (intra et inter-saisonnière) des pluies pendant la période de croissance des cultures (Waongo et al., 2015).

Ben Mohamed et al. (2002) ont montré que les prédicteurs les plus significatifs du rendement du mil au Niger sont (i) les anomalies de températures de surface des océans, (ii) les cumuls de précipitation durant les mois de Juillet, Août et Septembre, (iii) le nombre de jours de pluie et (iv) l'érosion. Selon Van Duivenbooden et al. (2000), « le stress hydrique des cultures au Niger peut résulter de sécheresses climatiques (faible disponibilité de l'eau pour les cultures liée au manque de précipitations) ou édaphiques (liées à des caractéristiques particulières des sols se traduisant soit par la formation de barrières physiques à l'infiltration de l'eau telles que l'encroûtement, soit par des contraintes à la croissance racinaire et l'absorption d'eau par les racines) ». Les sécheresses édaphiques peuvent intervenir même en cas de pluies suffisantes et bien réparties. De plus, la majorité de l'eau disponible est perdue par ruissellement, drainage de profondeur, évaporation de surface, et transpiration par les adventices.

Dans ce contexte, le développement de systèmes irrigués constitue le principal levier de la politique gouvernementale de développement agricole (HCl3N, 2019). Cependant, les systèmes irrigués n'occupent aujourd'hui que 107 000 ha, incluant 14 000 ha de périmètres irrigués encadrés par l'Office National des Aménagements Hydro Agricoles (ONAHA), dont 6 800 ha exploités en maîtrise totale de l'eau. La petite irrigation est pratiquée sur 93 000 ha (y compris les périmètres de contre-saison) et la submersion contrôlée est pratiquée sur 5 300 ha.

Tableau 3. Surfaces emblavées et rendements moyens estimés en 2016 et 2017 pour les principales productions végétales

	Superficie emblavée (ha)		Rendements (kg.ha ⁻¹)	
	2016	2017	2016	2017
Mil	7 230 200	6 998 776	537	542
Sorgho	3 604 700	3 819 935	502	509
Maïs	9 700	9 567	732	667
Fonio	10 900	11 310	560	549
Riz paddy	7 400	7 403	1 527	1 783
Niébé	5 188 900	5 858 085	382	334
Arachide	770 816	921 502	588	501
Voandzou	65 700	78 967	496	456
Oignon	33 288	34 642	30 389	33 458
Manioc	6 272	11 955	23 368	23 325
Patate douce	4 400	4 787	24 773	24 958
Pomme de terre	5 600	5 650	28 786	29 337

Source : Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage, 2019.

Les systèmes agricoles nigériens sont mixtes. Il est rare que les exploitations soient spécialisées dans une seule culture. La culture intercalaire (céréales-légumineuses ou céréales-céréales) est largement pratiquée. Dans certaines zones caractérisées par une hétérogénéité considérable des sols, un agriculteur peut planter différentes cultures (mil, sorgho, maïs ou légumineuses) dans le même champ.

Principalement basée sur des techniques traditionnelles de mise en valeur du milieu, l'agriculture nigérienne est opérée au sein d'écosystèmes vulnérables et fait face à de nombreux défis. Les contraintes majeures pour le développement de l'agriculture (CNEDD, 2011 ; Lona, 2014 ; PIC-RS, 2018) sont de différentes natures :

- dépendance vis-à-vis de la pluviométrie en lien avec l'extension limitée de l'irrigation,
- faible accessibilité des intrants et équipements agricoles pour les producteurs,
- accessibilité limitée au conseil et à l'information technique,
- exposition des producteurs à des attaques fréquentes de ravageurs des cultures,
- diminution de la fertilité des sols et tendance à l'acidification des sols,
- faible degré d'adoption de pratiques de gestion intégrée de la fertilité des sols et des cultures.

1.2.2. Productions animales

L'élevage est pratiqué par plus de 87 % de la population en tant qu'activité principale ou secondaire. Il génère 15% du revenu des ménages et assure la satisfaction de 25% des besoins alimentaires de la population (INS / SDDEL 2013-2035). L'élevage, notamment pastoral, contribuait en 2018 à hauteur de 8,54% du PIB et pour 22,23% au PIB du secteur primaire (INS, 2019). En 2013, les produits d'élevage représentaient 21% des recettes d'exportation du pays (seconde source de revenu après les ressources minières) et 62 % des recettes d'exportation des produits agro-sylvo-pastoraux (SDDEL, 2017). En 2018, le PIB de l'élevage s'élevait à 608,48 milliards de FCFA (INS, 2019).

En 2017, le cheptel du Niger était estimé à plus de 46 millions de têtes, dont 13 550 562 bovins, 12 315 737 ovins, 16 741 981 caprins, 1 788 148 camelins, 250 682 équins et 1 837 429 asins (MAG/EL, 2019). Plusieurs types de systèmes d'élevage peuvent être différenciés selon le degré d'intensification et le mode de gestion de l'espace : nomade ou pastoral qui sont basés sur des transhumances de grande amplitude, agropastoral avec des transhumances d'extension spatiale limitée, intégré aux exploitations avec ou sans confiage du cheptel, et périurbain semi-intensif. Les principales sources d'alimentation des systèmes d'élevage sont la biomasse végétale aérienne issue des pâturages naturels, les résidus de récolte, et les compléments alimentaires.

La surface de la zone à vocation pastorale, qui ne dépasse guère 350 000 km², tend à se réduire sous l'effet conjugué de l'installation d'agriculteurs migrants en zone pastorale et de l'accaparement de terres pastorales par des opérateurs économiques. Son intégrité est remise en cause au nord de la limite des cultures par une agriculture extensive. 69% des parcours se trouvent localisés dans la zone pastorale et 25% sont situés dans la zone intermédiaire (MAG/EL, 2019).

1.3. Les changements climatiques en cours et leurs impacts sur l'agriculture nigérienne

Les changements climatiques en cours se manifestent par une hausse des températures et une variabilité accrue de la pluviométrie, entraînant des phénomènes extrêmes (sécheresse, inondations) plus fréquents. Ces changements présentent des externalités négatives sur les ressources naturelles et les activités agro-sylvo-pastorales, en lien notamment avec les perturbations qu'elles entraînent sur le déroulement des saisons agricoles. L'utilisation de la modélisation permet à cet égard d'explorer l'impact de différents scénarios de changement climatique sur la productivité agricole et les risques de dégradation des sols (Crane et al., 2011).

Pour les agriculteurs sahéliens, les aspects les plus préoccupants des changements climatiques sont une installation plus tardive de la saison pluvieuse conjuguée à un arrêt précoce des pluies, avec une diminution estimée à 20% de la durée de la période de croissance (Sarr, 2012). En réduisant les surfaces adaptées à l'agriculture, la durée de la saison pluvieuse, et les potentiels de rendements, le changement climatique affecte toutes les dimensions de la sécurité alimentaire (i.e. disponibilité, accessibilité, usage et stabilité de la production), en particulier dans les marges semi-arides et arides (Kotir, 2011)

La majorité des auteurs s'accordent sur des impacts négatifs des changements climatiques sur la production agricole au Niger. L'augmentation de température projetée a pour effet la diminution des rendements, dans une ampleur qui dépend de l'évolution de la pluviométrie. Celle-ci peut partiellement compenser ou au contraire aggraver l'impact négatif sur les rendements de l'augmentation de température (Roudier et al., 2011). Dans le cas d'un scénario présentant une concentration élevée de CO₂, l'impact du changement climatique peut être positif pour certaines cultures ayant un métabolisme de type C₃ (soja, manioc), sous réserve d'une fertilisation adéquate. Ceci aura peu d'effet sur la production agricole nationale dans le cas du Niger car son agriculture repose principalement sur des cultures pluviales (mil, sorgho, maïs) de type C₄ (Roudier et al., 2011).

Les rendements des cultures clés pour la sécurité alimentaire vont diminuer sous l'influence du changement climatique. L'impact simulé du changement climatique sur les rendements des cultures dans la région du Sahel varie largement en fonction des auteurs (Challinor et al., 2007; Roudier et al., 2011), avec une perte médiane de rendement estimée à 11% (Roudier et al., 2011). La réduction de la pluviométrie durant la saison pluvieuse, combinée avec l'augmentation de température, devrait diminuer la production de mil de 13% en 2025 (Ben Mohamed et al., 2002). D'ici 2050, le changement climatique dans les pays subsahariens les moins arides devrait conduire à une diminution des rendements céréaliers de 17 à 22% et à une diminution des rendements arachidier de 18% (Wolfram et David, 2010). A l'échelle continentale, la probabilité que le changement climatique diminue le rendement de la plupart des cultures d'au moins 7% a été estimée à 95%.

La plupart des auteurs s'accordent sur un impact négatif du changement climatique sur les potentiels de rendement, notamment céréaliers. **Cependant, de nombreux auteurs ont également démontré l'existence d'importants gaps entre les rendements obtenus par les producteurs et les rendements atteignables (i.e. potentiels).**

Ceci suggère qu'il existe des marges de manœuvre considérables pour augmenter les rendements des cultures au Sahel. A titre d'exemple, les gaps de rendements en riziculture irriguée au Niger ont été estimés à une fourchette comprise en 0.3 et 8.2 t / ha (Wopereis et al., 1999).

En combinaison avec d'autres pratiques d'agriculture intelligente face au climat, l'optimisation des dates de semis / calendriers cultureux offre une opportunité d'adaptation des cultures face au changement climatique. Au Burkina Faso, Waongo et al. (2015) ont montré que l'optimisation des dates de plantations peut considérablement réduire le stress hydrique et les pertes de rendements induites par la chaleur. Traore et al. (2014) ont évalué les effets de la date de semis sur les rendements d'une série de cultures (maïs, sorgho, mil et coton) dans la région soudano-sahélienne. Ils préconisent de séquencer le semis des cultures. Waha et al. (2013) indiquent que le choix de cultures, de systèmes de cultures et de dates de semis adaptées constitue une stratégie à bas coût d'adaptation au changement climatique.

De nombreuses autres options d'adaptation de l'agriculture au changement climatique sont par ailleurs envisageables, telles que la reconception des systèmes de culture, l'intégration dans les exploitations de l'agroforesterie, de l'agroécologie, et de la gestion intégrée de la fertilité des sols, ou encore le développement de mécanismes assurantiels collectifs. Les options d'adaptation de l'agriculture à considérer doivent être raisonnées selon la zone agro-climatique considérée (Mertz et al., 2010)

Les systèmes d'élevage constituent de leur côté une source nette de gaz à effets de serre, mais subissent aussi directement les effets néfastes des changements climatiques. Les principaux facteurs de vulnérabilité des systèmes d'élevage directement ou indirectement liés au climat (SDDEL, 2017) comprennent la sécheresse, qui affecte la disponibilité en ressources alimentaires pour le cheptel ; les inondations, qui entraînent une mortalité importante du cheptel ; les attaques acridiennes qui aggravent les situations de déficit fourrager ; les stress thermiques qui affectent les performances des systèmes d'élevage ; les épizooties climato-sensibles ; les feux de brousse, la dégradation de la qualité des parcours, et la modification des pratiques agricoles (collecte intégrale des résidus par les agriculteurs) qui affectent négativement l'accessibilité des résidus de récolte pour les éleveurs. Deux indicateurs peuvent notamment être mobilisés pour évaluer l'impact des changements climatiques sur les ressources alimentaires mobilisables pour le cheptel : ce sont l'évolution des rendements en biomasse aérienne des céréales pluviales et la productivité en biomasse herbacée des pâturages naturels.

Au Niger, les options techniques mobilisable pour l'adaptation des systèmes d'élevage face au climat (SDDEL, 2017) relèvent principalement des leviers d'intervention suivants :

- sélection génétique ;
- réhabilitation des parcours et pâturages naturels dégradés ;
- intégration accrue de l'élevage et de l'agriculture ;
- amélioration des systèmes d'alimentation ;
- renforcement de la couverture vétérinaire ;
- mise en place de systèmes d'information pastorale ;
- accroissement des capacités d'intervention en cas de crise pastorale.

II. Méthodologie

2.1. Evaluation de l'impact des changements climatiques et démographiques sur le risque de dégradation des terres

2.1.1. Modèle utilisé

L'évaluation de l'impact des changements climatiques sur le risque potentiel de dégradation des terres a été réalisée en utilisant un modèle d'évaluation des risques conjoncturels et potentiels de dégradation des terres antérieurement développé par Souley-Yero (2015), dans le cadre du Programme Régional de Gestion Durable des terres (PRGDT) mis en œuvre par le Comité Inter-Etats de de lutte contre la sécheresse au Sahel. Développé et testé dans 6 pays de l'espace CILSS/CEDEAO (Bénin, Burkina Faso, Ghana, Mali, Niger et Togo), ce modèle repose sur l'évaluation d'un indice agrégé de risque structurel de dégradation des sols tenant compte de 4 indicateurs (Figure 3) :

- l'érosivité de la pluie, évaluée d'une part à partir du cumul annuel moyen de précipitations, exprimé en mm de pluie, et d'autre part à partir de l'intensité moyenne des épisodes pluvieux de plus de 20 mm par jour, exprimée en mm précipitation / heure, selon la formule suivante :

$$\text{Erosivité de la pluie} = 0.4 \times \text{cumul annuel pluviométrique (mm)} + 0.6 \times \text{intensité moyenne des précipitations de plus de 20 mm par 24 h (mm / heure)}$$

- la pression humaine et animale, évaluée à partir de la densité de cheptel, exprimée en Unités de Bétail Tropical, et de la densité de population, exprimée en nombre d'habitants par km², selon la formule suivante :

$$\text{Pression humaine et animale} = 0.6 \times \text{densité de cheptel (UBT)} + 0.4 \times \text{densité de population (hab.km}^{-2}\text{)}$$

- l'érodibilité des sols, évaluée à partir de la texture du sol et du taux de matière organique dans l'horizon superficiel 0-5 cm ;

- la topographie, évaluée à partir d'un modèle numérique de terrain.

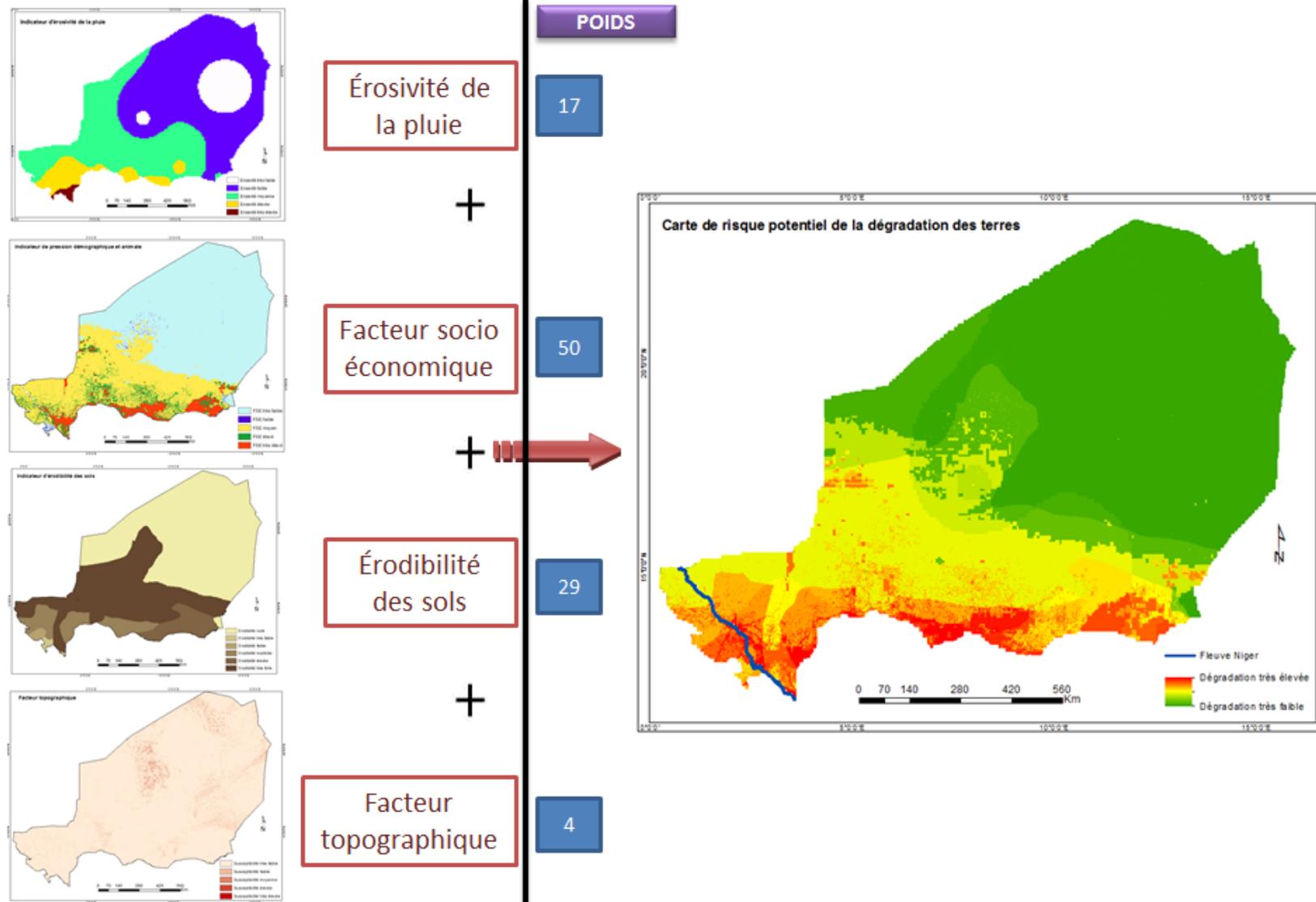
Chaque critère représente un poids spécifique dans le calcul de l'indice du risque potentiel de dégradation :

- 17% pour l'érosivité de la pluie ;
- 50% pour la pression humaine et animale ;
- 29% pour l'érodibilité des sols ;
- 4% pour la topographie.

La technique de pondération utilisée a été discutée et validée par un panel d'experts nationaux lors d'un atelier de pré-validation du modèle organisé au Centre Régional Agrhymet les 2 et 3 juillet 2015.

Figure 3. Principes du modèle d'évaluation du risque potentiel de dégradation des terres

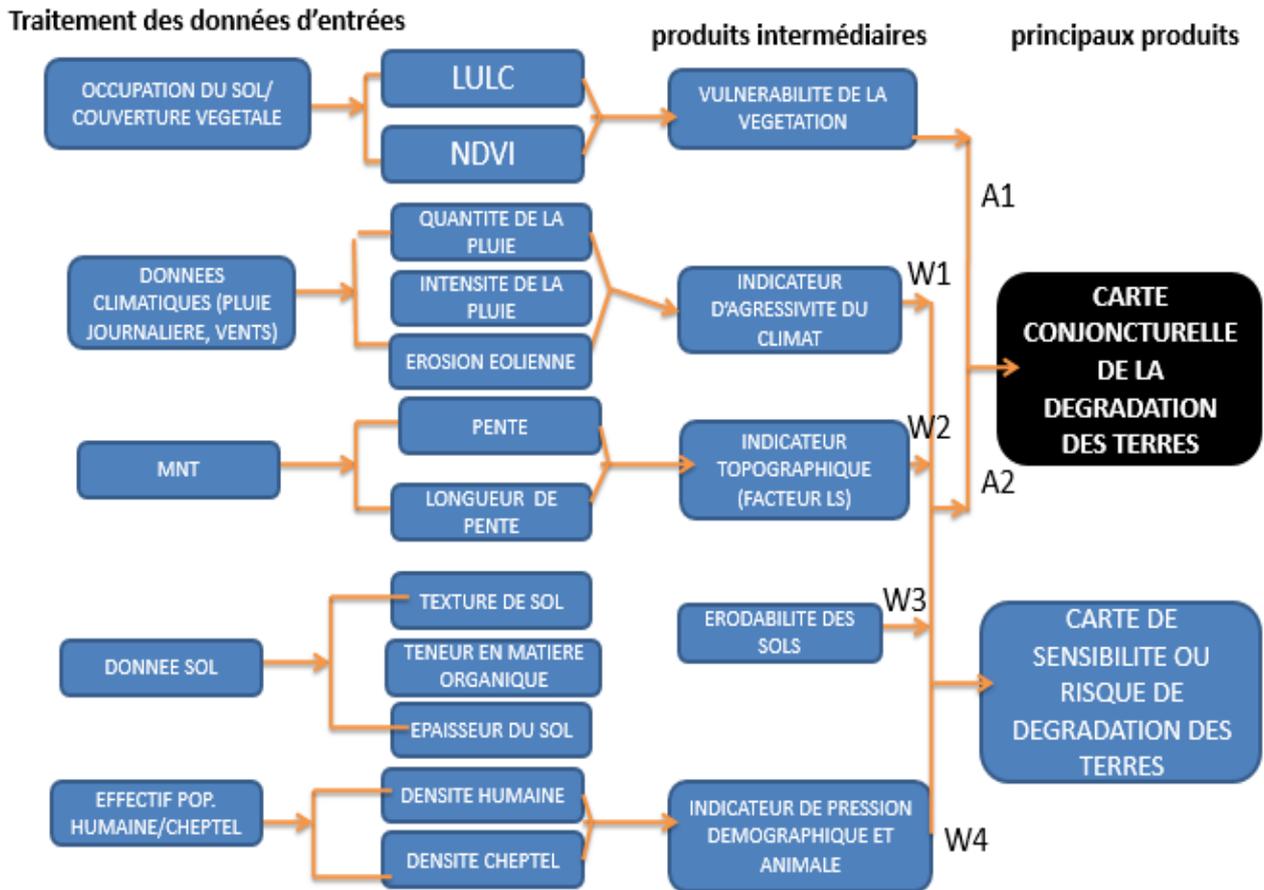
INDICE POTENTIEL DE LA DEGRADATION DES TERRES



Source : Souley Yero, 2019

La chaîne de traitement des données pour le calcul de l'indice de référence du risque potentiel de dégradation des terres est représentée dans la figure 4 ci-dessous.

Figure 4. Chaîne de traitement des données pour l'évaluation du risque de dégradation des terres



Source : Souley Yero, 2015

2.1.2. Calcul de l'indice de référence du risque de dégradation

L'indice de référence du risque de dégradation des terres a été évalué à partir des données spatiales suivantes :

- Cumul pluviométrique annuel et érosivité de la pluie : utilisation des données journalières sur la saison juin-juillet-août-septembre-octobre (JJASO) estimées par satellite pour la période 1983¹ - 2010 (Rainfall Index Estimate (RFE) Tamsat : <https://www.tamsat.org.uk/data/rfe/>) ;
- Charge animale (UBT) : données de la FAO pour l'année 2009 ;
- Densité de population : données Landsat pour l'année 2012 ;
- Erodibilité du sol : données GLASOD (Global Assessment of Human-induced Soil Degradation) <https://www.isric.org/projects/global-assessment-human-induced-soil-degradation-glasod>.

¹ 1983 est l'année la plus ancienne où des données d'estimation satellitaire TAMSAT sont disponibles. D'autres sources possibles de données pluviométriques estimées par satellite (RFE) ont été écartées du fait du trop petit nombre d'années disponibles.

2.1.3. Simulation d'impact du changement climatique et de la croissance démographique sur le risque de dégradation des terres

Pour évaluer l'impact du changement climatique et de la croissance démographique sur le risque de dégradation des terres à l'horizon 2030 et 2050, nous nous sommes basés sur :

- 1) Les taux projetés d'accroissement démographique de la population nationale, résultant de 2 scénarios contrastés de croissance démographiques (scénario de réduction rapide de la fécondité (RFF) et scénario tendanciel (ST), décrits par Harouna S. et al. (2005)². Pour chacun de ces scénarios, le taux simulé d'accroissement de la population nationale entre 2012 et 2030 d'une part, et entre 2012 et 2050 d'autre part a été appliqué aux données spatiales de population de l'année 2012 pour construire des cartes de population projetée aux horizons 2030 et 2050.
- 2) Les projections climatiques journalières simulées pour les 15 stations synoptiques du Niger (Ly M. et Toune N., 2019)³. Dans chaque station synoptique, 5 scénarios d'évolution du climat, correspondant chacun à un modèle climatique distinct, sont possibles (annexe 1) :
 - Projections relativement froides (i.e. traduisant un réchauffement relativement faible) et humides (cool/wet) ;
 - Projections relativement froides et sèches (cool/dry) ;
 - Projections relativement chaudes et humides (hot/wet) ;
 - Projections relativement chaudes et sèches (hot/dry) ;
 - Projections au comportement intermédiaire (i.e. proches de la médiane de l'ensemble des projections).

Les cumuls annuels pluviométriques moyens et l'intensité pluvieuse moyenne des précipitations projetées ont été évalués à partir des projections climatiques journalières, pour chacune des 15 stations synoptiques, pour les périodes 2010-2039 (court terme) et 2040-2069 (moyen terme), pour chacune des 5 tendances de modèles de changement climatique et chacun des deux scénarios de réchauffement climatique global (RCP 4.5 et RCP 8.5). Ces deux variables ont ensuite été interpolées entre les stations synoptiques pour chaque combinaison « scénario de réchauffement climatique » x « tendance de modèle de changement climatique », afin de reconstruire des cartes de cumuls annuels moyens de précipitations projetées et d'intensité pluvieuse moyenne projetée sur les horizons temporels visés.

A partir des indices de risque structurel simulé de dégradation des terres aux horizons 2030 et 2050 pour chaque combinaison « population projeté » x « scénario de changement climatique », nous avons produit des cartes représentant l'impact des changements climatiques et démographiques sur l'évolution du risque de dégradation des terres. Ces cartes reposent sur la représentation spatialisée de la variation d'indice de risque, entre la situation projetée et la situation de référence. Elles permettent d'identifier les espaces d'accroissement du risque de dégradation des terres du fait de l'évolution démographique et pluviométrique projetée (les autres paramètres étant inchangés).

² Harouna S., Soumaila B., Issaka Maga H., Guengant J.-P. (2005). Projections de la population du Niger de 2005 à 2050. Travaux démographiques. Vol 1. N°1. UNICEF. IRD. Ministère de l'Economie et des Finances. Secrétariat Général. Bureau Central du Recensement.

³ Ly M. et Toune N. (2019). Appui à la formulation concertée de la SPN2A pour la République du Niger – Facilité Adapt'Action – Elaboration des projections désagrégées sur le Niger. Bruxelles, Belgique.

2.2. Evaluation de l'impact des changements climatiques sur les rendements en grains et en biomasse aérienne des céréales pluviales

2.2.1. Modèle utilisé

Pour évaluer l'impact des changements climatiques sur les rendements en grains et en biomasse aérienne des céréales pluviales, nous avons utilisé le modèle SARRA-H-V33 (Système d'Analyse Régionale des Risques Agro-climatiques, version H, mise à jour n°33). Ce modèle a été développé par le CIRAD en collaboration avec le Centre Régional AGRHYMET, le CERAAS et d'autres institutions nationales de l'Afrique de l'Ouest (INERA au Burkina Faso, IER au Mali). Il s'agit d'un modèle déterministe au pas de temps journalier, simulant la croissance des cultures à partir d'un bilan hydrique, d'un bilan carboné et de la phénologie de la variété considérée (approche degrés jours et photopériodisme). D'après Alhassane A., Traoré S. B., Bonnal V. et Baron C. (2013) : « Ce modèle de culture simule le rendement potentiel sous contraintes hydriques en intégrant les processus de bilan hydrique des sols, d'évaporation et de transpiration potentielle et réelle, de phénologie, d'assimilation potentielle et sous contrainte hydrique, de respiration de maintenance et enfin de répartition des biomasses (feuilles, tiges, racines, grains). Ce modèle de culture a montré de bonnes performances dans le cadre de plusieurs analyses d'impact du climat pour des céréales tropicales (Mishra et al. 2008 ; Oettli et al. 2011). Il a été calibré avec une série de variétés locales et améliorées de mil, de sorgho et de maïs à partir d'essais en milieux contrôlés et d'enquêtes en milieu paysan dans plusieurs sites notamment au Niger, au Mali, au Burkina Faso et au Sénégal ».

Le modèle SARRA-H permet d'évaluer l'influence des facteurs pédologiques et climatiques sur la croissance des cultures. Il peut également être utilisé pour identifier les pratiques culturales appropriées pour l'augmentation de la production agricole, pour différents agro-écosystèmes / zones agroécologiques. Il est couramment utilisé pour mener des études d'impact du climat (variabilité et changements climatiques), sur les rendements des cultures, en particulier les céréales pluviales (mil, sorgho, maïs, riz pluvial, blé, etc.).

Ce modèle a également été adapté pour le suivi de la croissance des cultures et la prévision des rendements agricoles en Afrique de l'Ouest dans une version « Ocelet » (SARRA-O). Les sorties obtenues sont actuellement utilisées pour produire et diffuser des informations d'alerte précoce sur la situation des cultures. Elles permettent d'anticiper la formation de zones à risques (en termes de déficit de production agricole) afin de faciliter les prises de décisions par les différents acteurs (décideurs politiques, services techniques de l'Etat, partenaires techniques et financier, ONGs, organisations paysannes, etc.). Il s'agit donc d'un outil de suivi rapproché de la campagne agricole et d'aide à l'identification des stratégies d'adaptation de l'agriculture appropriées aux conditions locales.

2.2.2. Matériel végétal considéré dans les simulations réalisées

Partant du caractère essentiellement vivrier de la production agricole du Niger, caractérisé par la prédominance des cultures céréalières, souvent associées avec le niébé ou l'arachide, la présente étude s'est concentrée sur les cultures du mil, du sorgho et du maïs. Le mil précoce est le plus cultivé au Niger, sur des sols à prédominance sableux. Le sorgho est la seconde céréale par ordre d'importance. Il est cultivé sur des sols argilo-sableux, et même sableux pour certaines variétés adaptées. La culture du maïs est relativement marginale au Niger. Elle est surtout emblavée autour des cases, dans les bas-fonds et dans les parcelles les plus fertiles, notamment dans certaines localités des régions de Dosso, du sud Tahoua et de Maradi.

Les variétés retenues pour la simulation sont :

- pour le mil : variété Heini Kirey Précoce (HKP) de 90 jours, non photopériodique, et variété Somno de 120 jours, photopériodique ;
- pour le sorgho : variété Caudatum de 90 jours, non photopériodique ;
- pour le maïs : variété DMR-ESRW (du Bénin) de 90 jours, non photopériodique.

2.2.3. Paramétrage du modèle

Les types de sols retenus pour la simulation sont les suivants : sol sableux pour le mil (de façon systématique), sol sableux (pour les stations d'Agadez et de Bilma) ou sablo-argileux (pour les autres stations) pour le sorgho, et sol argilo-sableux pour le maïs (de façon systématique). Dans les simulations, il a été considéré que le niveau de fertilité du sol était bon pour toutes les cultures/variétés, avec Epsilon B = 4 pour le mil et le sorgho et Epsilon B = 5,8 pour le maïs.

Les variétés / cultures retenues pour la simulation sont des variétés / cultures pré-paramétrées / calibrées dans le modèle sur la base de données de suivi agronomique (phénologie, biomasse, pratiques agricoles, sol) antérieurement collectées sur des essais agronomiques (Alhassane A., 2009 ; Akanvou L. et al., 2009).

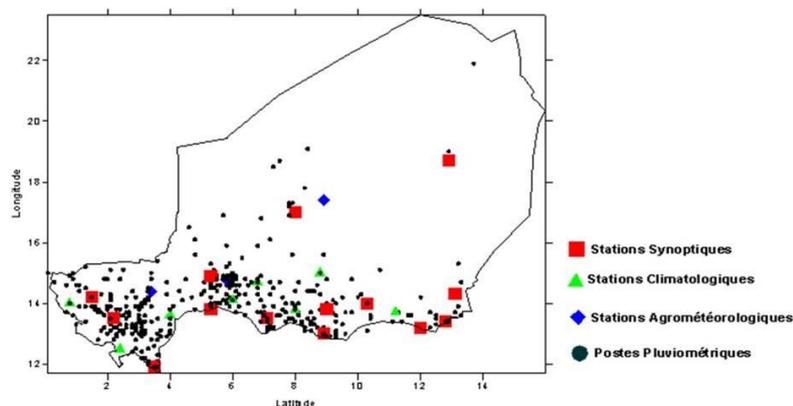
Les dates de semis des différentes espèces/variétés sont automatiquement détectées par le modèle à partir des conditions pluviométriques et d'un seuil d'eau dans le sol (SeuilEauSemis) fixé à 10 mm, correspondant à i/ une possibilité de survie des jeunes plants à un épisode sec de 20 jours, et ii/ un seuil de mortalité de 5 jours lié au rapport entre la transpiration réelle et la demande potentielle de la plante (constante de stress hydrique), agissant comme un frein vis-à-vis de la croissance de la biomasse. Les densités de semis utilisées sont de 40 000 plants/ha pour le mil, 50 000 plants/ha pour le sorgho et 65 000 plants/ha pour le maïs.

2.2.4. Données climatiques d'entrée

Les données climatiques nécessaires à la modélisation sont la pluviométrie, les températures (minimales et maximales), l'humidité relative moyenne, la vitesse moyenne du vent à 2m/s et le rayonnement global, au pas de temps journalier. Le modèle SARRA-H utilise ces données pour estimer l'évapotranspiration journalière de référence (ET_o), à partir de la formule de Penmann-Monteith recommandée par la FAO (Allen et al., 2006).

Nous avons utilisé les données observées et projetées sur chacune des 15 stations synoptiques du Niger (Agadez aéroport, Bilma, Diffa, Dosso, Gaya, Gouré, Magaria, Maradi, Mainé Soroa, N'guigmi, Konni, Niamey aéroport, Tahoua, Tillabéry et Zinder). Ces stations sont réparties dans toutes les zones agroécologiques du Niger, avec une plus forte concentration dans la zone agricole où les cultures connaissent souvent une faible productivité, du fait de la variabilité et des changements climatiques, de la mauvaise qualité des sols et de la pauvreté des producteurs. Deux stations synoptiques (Agadez et Bilma) sont hors de la zone de production des cultures pluviales (Figure 5).

Figure 5. Réseau d'observations météorologiques au Niger.



Source : <https://www.meteo-niger.org/content.php?page=148>

Nous avons estimé les productions de référence pour chaque station à partir des données climatiques observées sur trois décennies. La période de référence retenue s'étend de 1980 à 2010 (31 ans), sauf sur certaines stations où les séries climatiques observées disponibles sont un peu plus courtes. Les productions de référence ont ainsi été évaluées sur la période 1983-2010 (28 ans) pour les stations de Diffa, Dosso, et Gouré ; et sur la période 1984-2010 (27 ans) pour les stations de N'guigmi et Bilma.

L'impact des changements climatiques sur les rendements du mil, du sorgho et du maïs a été évalué en considérant les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 pour les périodes 2010-2039 (court terme), 2040-2069 (moyen terme) et 2070-2099 (long terme). Le RCP 8.5 est un scénario pessimiste, reposant sur l'absence de politique volontariste de réduction des émissions de GES. Le RCP4.5 est un scénario modérément optimiste anticipant la mise en œuvre de politiques publiques pour réduire les émissions de GES.

Nous avons utilisé les données climatiques journalières projetées sur chaque station synoptique pour simuler les productions en grains et en biomasse aérienne à l'horizon 2039 (i.e. période 2010-2039) ; 2069 (i.e. période 2040-2069) et 2099 (i.e. période 2070-2099). Les projections climatiques utilisées sont issues des travaux de Ly et Touné (2019), menés dans le cadre du processus de formulation concertée de la SPN2A (activité 1). Pour chaque station synoptique, les données utilisées correspondent aux cinq modèles climatiques globaux (MCGs) représentant au mieux les conditions climatiques au niveau de la station (Annexe 1), parmi 29 modèles climatiques testés dans le cadre du projet AgMIP (Agriculture Model Intercomparison and Improvement Project) selon l'approche CMIP5 (Five Coupled Model Intercomparison).

2.2.5. Simulations réalisées

Nous avons d'abord évalué les rendements en grains et en biomasse aérienne pour chaque culture retenue, sur chaque station synoptique, pour la période de référence (données observées 1981-2010) et pour chacune des périodes considérées (projections pour les périodes 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099). Cette évaluation a été réalisée en simulant les rendements annuels sur la totalité de la période projetée pour chacune des 5 tendances possibles d'évolution du climat au niveau de la station, correspondant aux 5 modèles climatiques retenus comme les plus représentatifs parmi 29 modèles (Ly et Touné, 2019). Les rendements moyens en grains et en biomasse aérienne, simulés pour chacune des périodes considérées et chaque tendance de modèle, sont restituées pour les scénarios globaux de changement climatique RCP 4.5 et RCP 8.5 (voir annexes 2 et 3 du présent rapport).

Pour analyser l'impact des changements climatiques sur les rendements en grains et biomasse aérienne des céréales pluviales, nous avons ensuite évalué et comparé aux rendements de référence :

- les rendements moyens obtenus toutes céréales confondues, toutes tendances d'évolution climatique confondues, pour l'ensemble des stations confondues, puis pour chaque station indépendamment ;
- les rendements moyens obtenus pour chaque céréale pluviale évaluée, toutes tendances d'évolution climatique confondues, pour toutes les stations confondues puis pour chaque station indépendamment.

Nous avons également évalué les anomalies de rendement, exprimées en pourcentage du rendement de la référence, par la formule suivante :

$$\text{Anomalie de rendement (\%)} = 100 \times \frac{\text{rendement projeté} - \text{rendement moyen pour la période de référence}}{\text{rendement moyen pour la période de référence}}$$

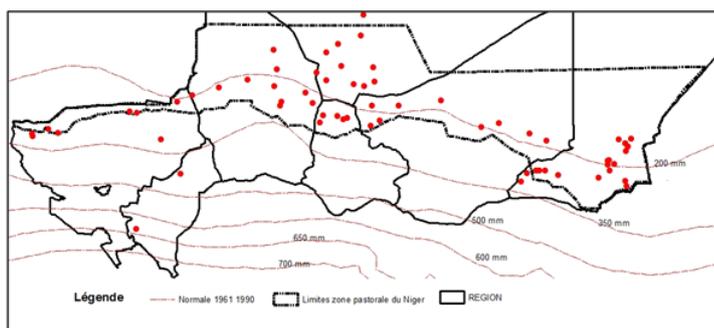
A l'aide du logiciel Surfer, nous avons enfin représenté sur la carte du Niger les isolignes de rendement pour la référence et chaque situation projetée. Le gridding a été effectué par variogramme linéaire. Cette technique permet de spatialiser les tendances d'évolution des rendements moyens à partir des données simulées sur les 15 stations synoptiques du Niger. Elle doit être ici considérée comme plus fiable dans la zone agricole et agropastorale du Niger, où la densité spatiale des valeurs simulées est plus élevée.

2.3. Evaluation de l'impact des changements climatiques sur la production de biomasse végétale

2.3.1. Modèle utilisé

Pour évaluer l'impact de changement climatique sur la production de biomasse végétale, nous avons utilisé le modèle BIOMASSAH, développé dans le cadre du projet « Alerte Précoce et Préviation des Productions Agricoles » (AP3A), utilisé par le centre régional AGRHYMET dans le cadre des prévisions saisonnières et du suivi des campagnes agropastorales, et validé pour la zone sahélienne par Garba I. (2017), à partir de données de phytomasse aérienne herbacée collectées par les services du Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage entre 2000 et 2012 (Figure 6 ci-dessous).

Figure 6. Situation géographique des sites de relevé de végétation utilisés pour valider le modèle BIOMASSAH



Source : Garba I., 2017

BIOMASSAH est un modèle d'estimation de la biomasse fourragère au Sahel basé sur le bilan hydrique, le bilan azoté et la production de matières sèches des herbacées dans les pâturages. Ce modèle utilise des données de texture de sols, ainsi que des données de cumuls de pluies, pouvant notamment être estimées par satellite. Le calcul du bilan hydrique est réalisé dans chaque unité pastorale préalablement classée en unités géomorphologiques homogènes, codifiée selon leur texture (AGRHYMET, 2001). Un coefficient de ruissellement moyen par type de sol est attribué à chaque unité composée d'une combinaison d'unités pastorales et d'unités géomorphologiques. L'infiltration dans chaque unité est calculée suivant la formule suivante (Garba I., 2017) :

$$I = P(1 - CR)$$

Avec I : quantité d'eau infiltrée (mm/an) ; P pluviosité annuelle (mm/an) ; et CR : coefficient de ruissellement.

Le modèle simule la croissance des végétaux en considérant que l'eau constitue le facteur limitant pour la croissance des végétaux quand l'infiltration est inférieure à 250 mm, mais que l'azote et le phosphore sont déterminants lorsque l'infiltration est supérieure à 250 mm (Penning et al., 1982). En conditions limitantes liées à l'azote, les pertes annuelles du système sont évaluées en fonction de la pluviosité moyenne (Penning et al., 1982). En conditions limitantes liées à l'eau, le modèle calcule la biomasse herbacée produite sur la base des relations ci-après :

$$\text{Éq.1 (CR=0)} : B_1 = 5.11 * \text{Pluviométrie totale annuelle} - 48.28 \text{ (B}_1\text{)}$$

$$\text{Éq.2 (CR=0.5)} : B_2 = 2.37 * \text{Pluviométrie totale annuelle} - 216 \text{ (B}_2\text{)}$$

$$\text{Éq.3 (CR} \neq 0 ; \text{CR} \neq 0.5) : B = B_1 CR * (B_1 - B_2) 0,5$$

Avec B : production de biomasse (Kg MS. ha⁻¹) ; B_1 : biomasse en condition de ruissellement ($CR=0$) et B_2 : biomasse en condition de ruissellement ($CR=0.5$).

2.3.2. Données d'entrée

La modélisation de la biomasse herbacée en fin de saison des pluies nécessite de disposer des cumuls pluviométriques annuels. Nous avons mobilisé à cet effet les projections climatiques désagrégées sur les stations synoptiques du Niger sur l'horizon 2040-2069. Ces projections sont issues des travaux de Ly et Touné (2019), menés dans le cadre du processus de formulation concertée de la SPN2A (activité 1). Le modèle nécessite également de disposer des types de sols au point considéré. Dans le modèle, les classes de sols associées aux différentes stations synoptiques du Niger sont les suivantes (Tableau 4) :

Tableau 4. Classes de sols utilisées par le modèle pour les différentes stations synoptiques du Niger

Station synoptique	Classe de sol utilisée pour la simulation réalisée
Agadez Aéro	Sols squelettiques gravillonnaires
Bilma	Non défini (hors de la limite d'utilisation du modèle)
Diffa	Sols argileux à horizon imperméable de mares ou de bas-fonds
Mainé Soroa	Sols argileux à horizon imperméable de mares ou de bas-fonds
N'Guigmi	Sols argileux à horizon imperméable de mares ou de bas-fonds
Dosso	Sols rouges limono-sableux profonds
Gaya	Sols sableux dunaires anciens
Maradi Aéro	Sols sableux de plaines alluviales
Niamey Aéro	Sols caillouteux ou à blocs rocheux
Konni	Sols caillouteux ou à blocs rocheux
Tahoua Aéro	Sols sableux de plaines alluviales
Tillabéry	Sols argileux à horizon imperméable de mares ou de bas-fonds
Gouré	Sols argileux à horizon imperméable de mares ou de bas-fonds
Magaria	Sols salés
Zinder Aéro	Sols caillouteux ou à blocs rocheux

Aucune simulation n'a pu être réalisée pour la station de Bilma car celle-ci est localisée en dehors de la limite d'application géographique du modèle.

2.3.3. Simulations réalisées

Nous avons d'abord évalué la production de biomasse de référence sur chaque station synoptique, en utilisant la moyenne des cumuls annuels pluviométriques observés sur la période de référence 1981-2010.

Nous avons ensuite simulé la production de biomasse sur le moyen terme pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 en utilisant les cumuls annuels moyens projetés sur la période 2040-2069. Cette évaluation a été réalisée pour chacune des 5 tendances possibles d'évolution du climat sur chaque station, correspondant aux 5 modèles climatiques les plus représentatifs du climat de la station parmi 29 modèles globaux (Ly et Touné, 2019).

Les niveaux de biomasse herbacée obtenus peuvent être convertis en nombre de journées de pâture par hectare en considérant d'une part qu'une UBT (250 kg) consomme au maximum 6,25 kg MS par jour, et d'autre part qu'un tiers seulement de la biomasse herbacée peut être consommée par les animaux en zone sahélienne du fait des pertes liées au vent, aux termites et au piétinement, contre deux tiers en zone soudanienne (Boudet, 1991).

III. Résultats et discussions

3.1. Impact des changements climatiques et démographiques sur le risque de dégradation des terres

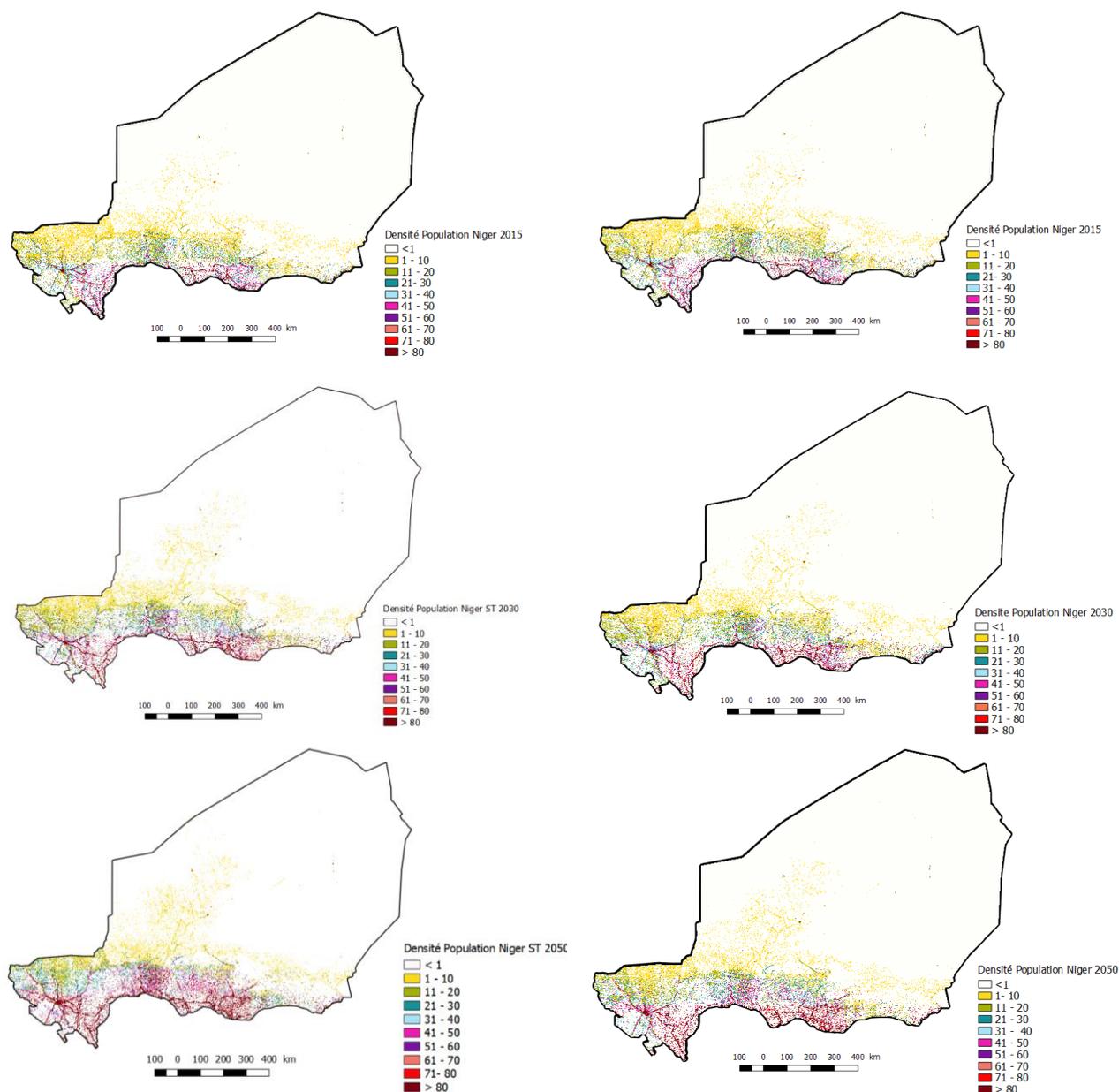
3.1.1. Evolution démographique aux horizons 2030 et 2050

Les cartes intermédiaires ci-dessous (Figure 7) représentent l'évolution simulée de la densité de population aux horizons 2030 et 2050 selon deux scénarios : croissance tendancielle (ST) et réduction rapide de la fécondité (RFF). Elles anticipent dans les deux cas une forte augmentation de la pression démographique dans la zone agricole et agropastorale.

Figure 7. Simulation de l'évolution de la densité de population pour les années 2015, 2030 et 2050 (à gauche, scénario tendanciel (ST) ; à droite, scénario de réduction rapide de la fécondité (RFF) d'après Harouna S. et al., 2005, appliqués aux données Landsat pour l'année 2012),

Scénario tendanciel (ST)

Scénario de réduction rapide de la fécondité (RFF)



Source : Souley-Yero K., 2019. AGRHYMET. Niamey, Niger.

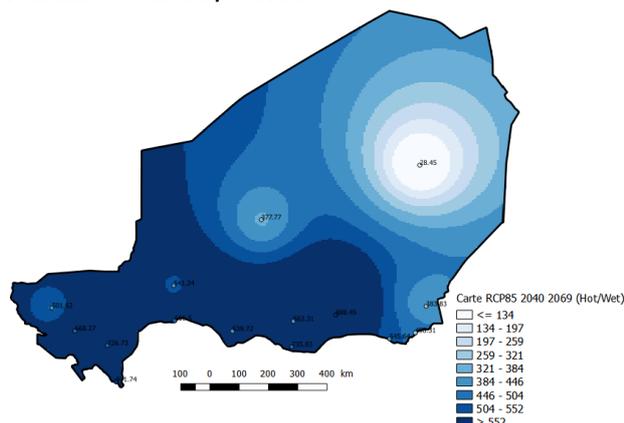
3.1.2. Pluviométrie simulée pour la période 2010-2039 et 2040-2069

Les cartes intermédiaires ci-dessous (Figures 8) et ci-après (Figure 9) représentent les cumuls pluviométriques moyens simulés pour les périodes 2010-2039 et 2040-2069, pour différentes tendances locales d'évolution du climat, et pour deux scénarios de réchauffement global (RCP 4.5 et RCCP 8.5).

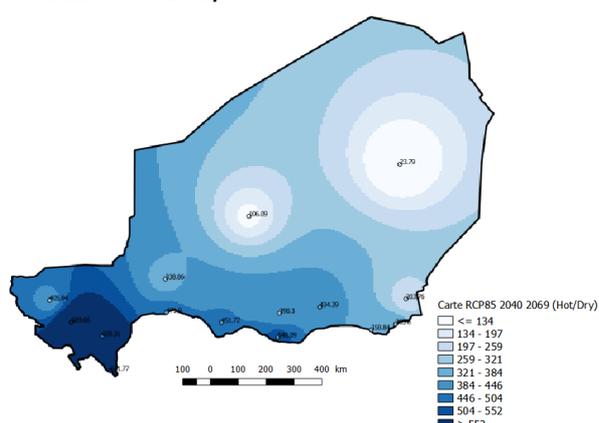
Ces cartes montrent des variations importantes du cumul pluviométrique annuel moyen et de sa répartition selon d'une part la tendance des projections climatiques considérées et d'autre part le scénario RCP retenu.

Figure 8. Représentation des cumuls pluviométriques annuels moyens de la période 2040-2069 pour le scénario RCP 8.5 pour différentes tendances de modèles de changement climatique (interpolation des projections de changement climatique sur 15 stations synoptiques du Niger)

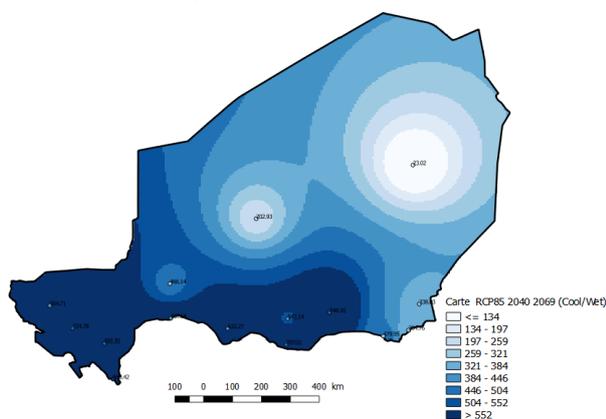
Tendance « chaud / humide »



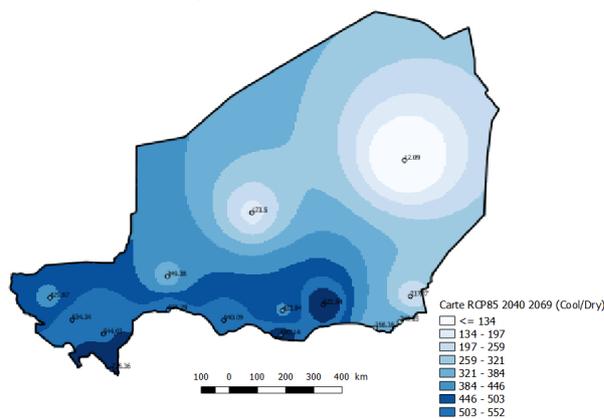
Tendance « chaud / sec »



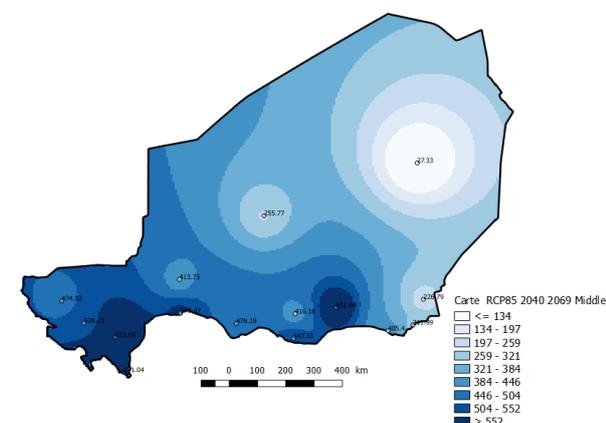
Tendance « frais / humide »



Tendance « frais / sec »

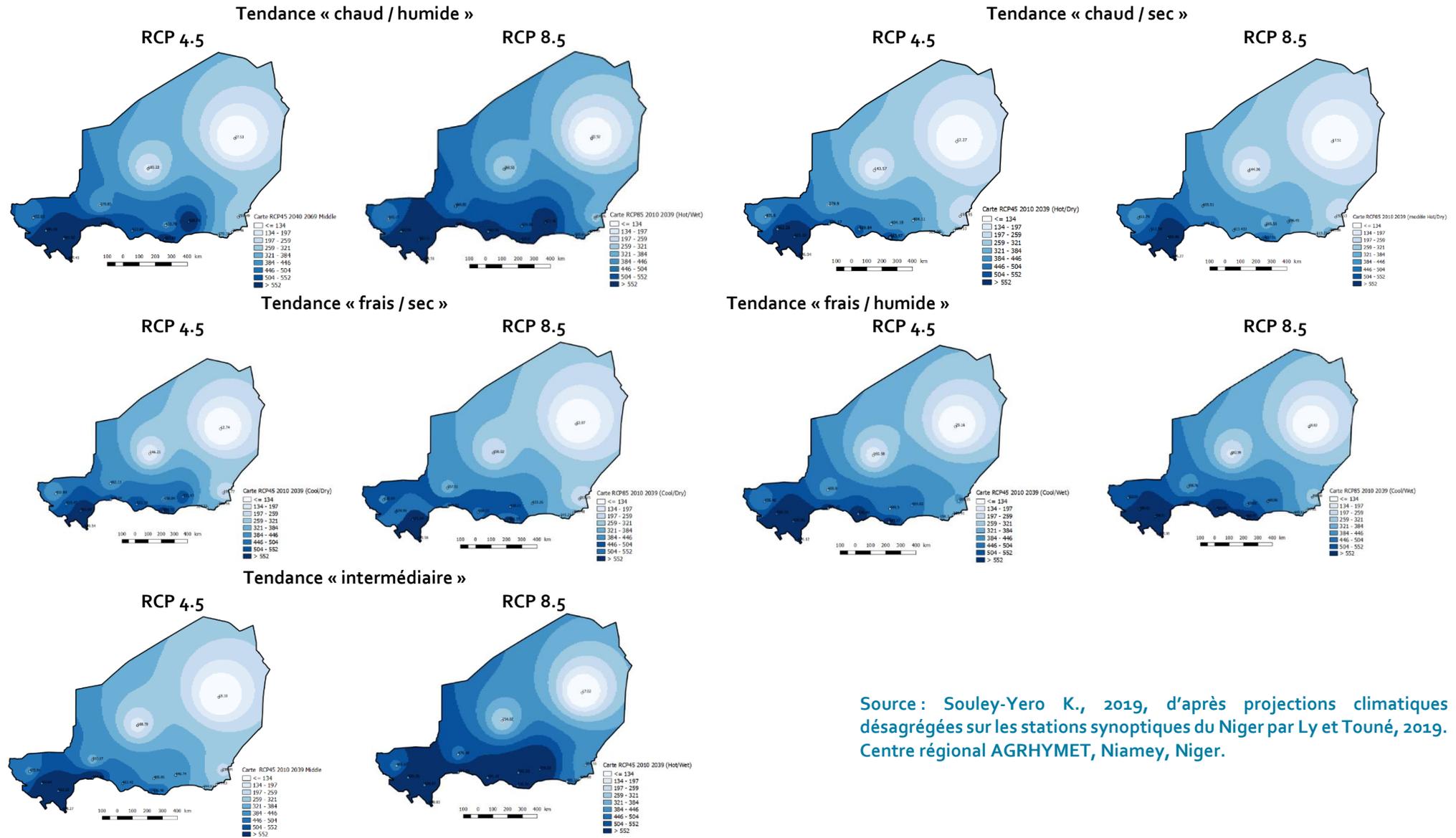


Tendance « intermédiaire »



Source : Souley-Yero K., 2019, Souley-Yero K., 2019, d'après projections climatiques désagrégées sur les stations synoptiques du Niger par Ly et Touné, 2019. Centre régional AGRHYMET, Niamey, Niger.

Figure 9. Représentation de la pluviométrie moyenne de la périodes 2010-2039 pour les scénarios RCP4.5 (à gauche) et RCP8.5 (à droite), pour différentes tendances de modèles de changement climatique, obtenue par interpolation des projections de changement climatique par tendance d'évolution sur les 15 stations synoptiques du Niger, d'après Ly et Touné, 2019

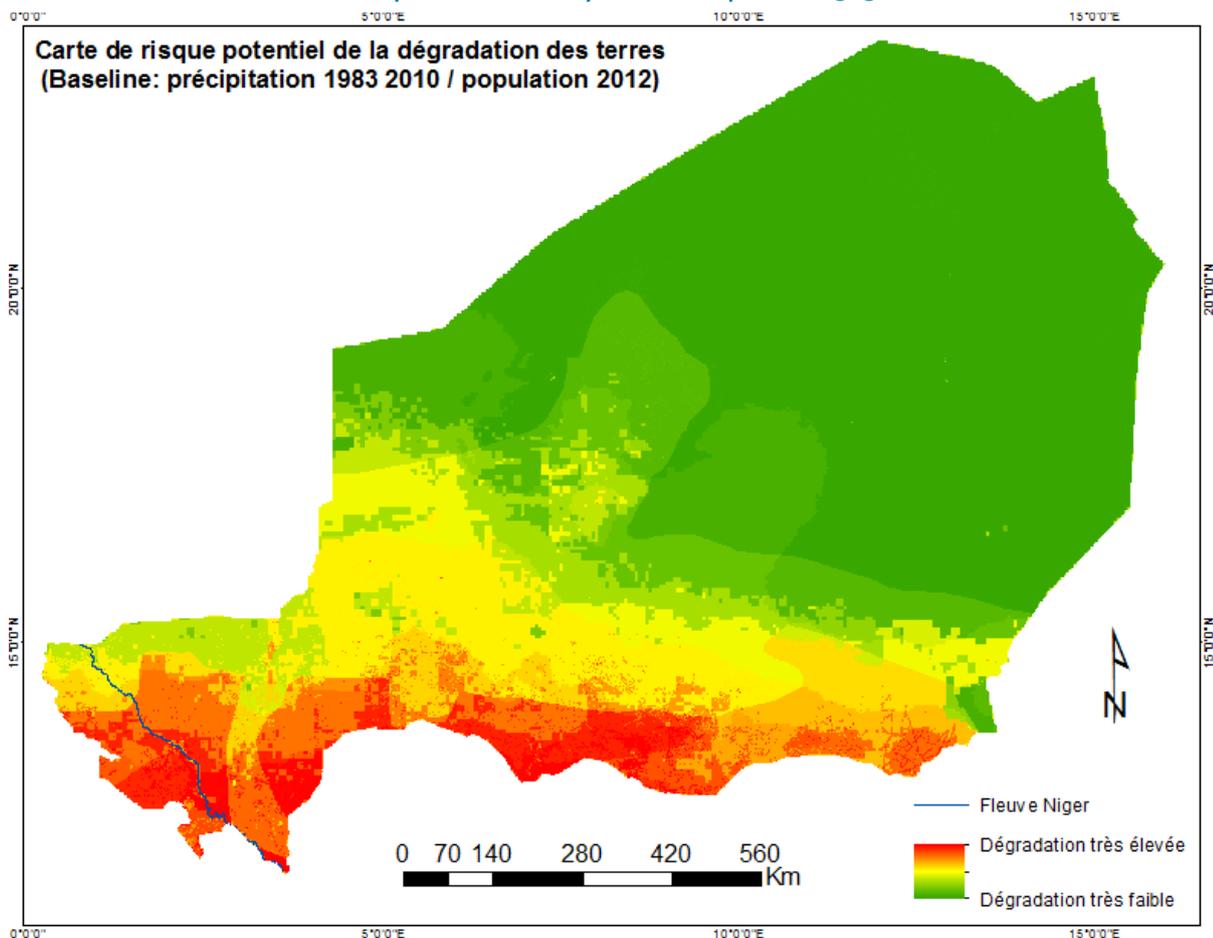


Source : Souley-Yero K., 2019, d'après projections climatiques désagrégées sur les stations synoptiques du Niger par Ly et Touné, 2019. Centre régional AGRHYMET, Niamey, Niger.

3.1.3. Indice de risque de dégradation des terres pour les périodes 2010-2039 et 2040-2069

La carte ci-dessous (Figure 10) représente l'indice de référence du risque potentiel de dégradation des terres au Niger. Cette référence a été établie sur la base de la moyenne des cumuls annuels pluviométriques pour la période 1983-2010 (Tamsat) et de la répartition spatiale de la population en 2012 (Landsat). L'indice de référence montre une concentration des risques de dégradation des terres au sud du pays, dans les zones agricoles et agropastorales présentant une forte densité de population et des pluviométries moyennes plus élevées.

Figure 10. Indice de risque structurel de dégradation des terres de référence, calculé sur la base de la population 2012 (données Landsat) et de la pluviométrie moyenne sur la période 1983-2010 (RFE Tamsat)

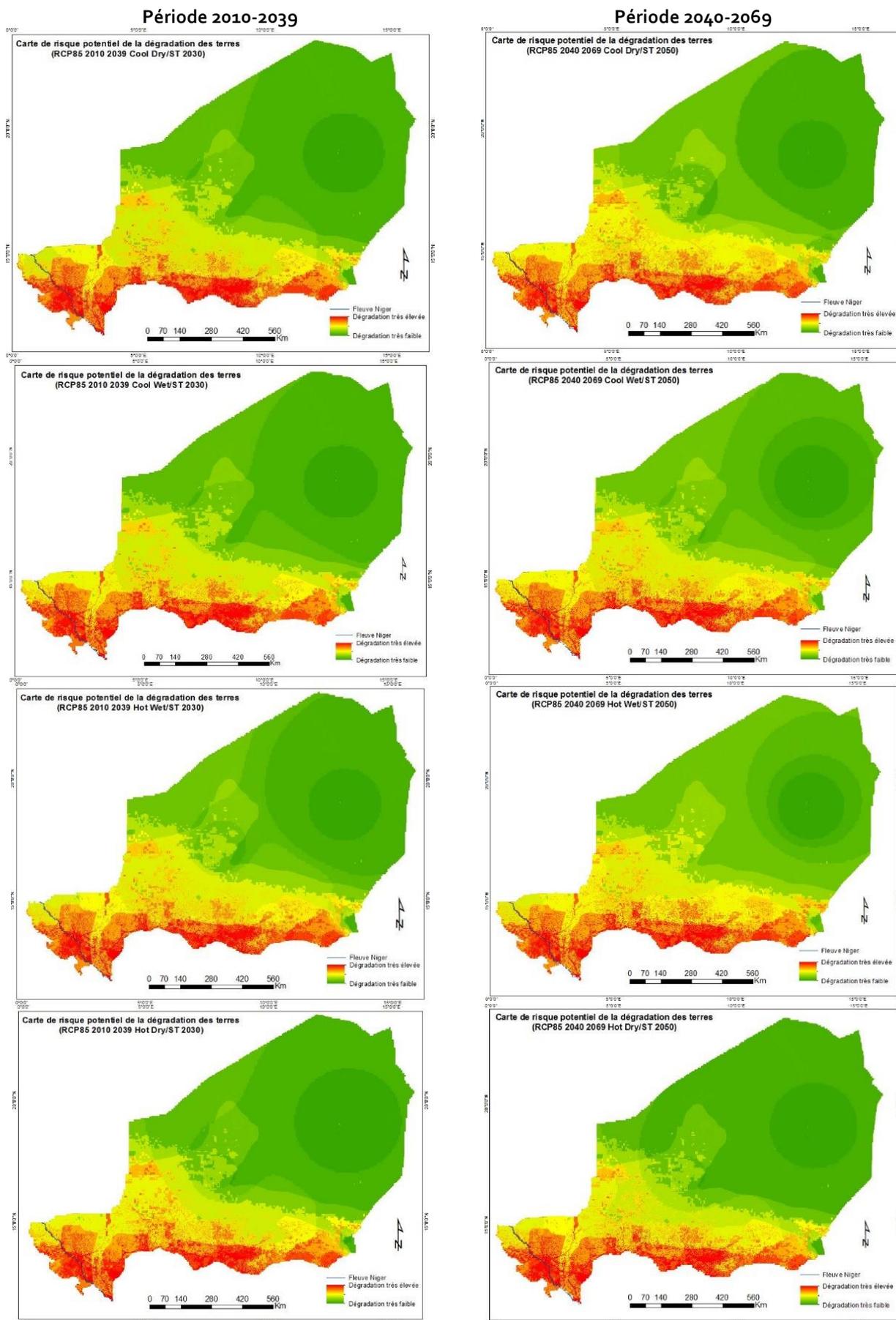


Source : Souley-Yero K., 2019. AGRHYMET. Niamey, Niger.

Les cartes ci-après représentent les indices de risque de dégradation des terres du Niger pour les périodes 2010-2039 et 2040-2069 dans le cas du scénario de réchauffement global RCP 8.5 et d'une croissance démographique tendancielle (Figure 11) ou avec réduction rapide de la fécondité (Figure 12). Ces indices sont simulés pour 4 tendances contrastées de projections climatiques désagrégées (projections relativement froides et sèches, froides et humides, chaudes et sèches, chaudes et humides – cf. Ly et Touné, 2019).

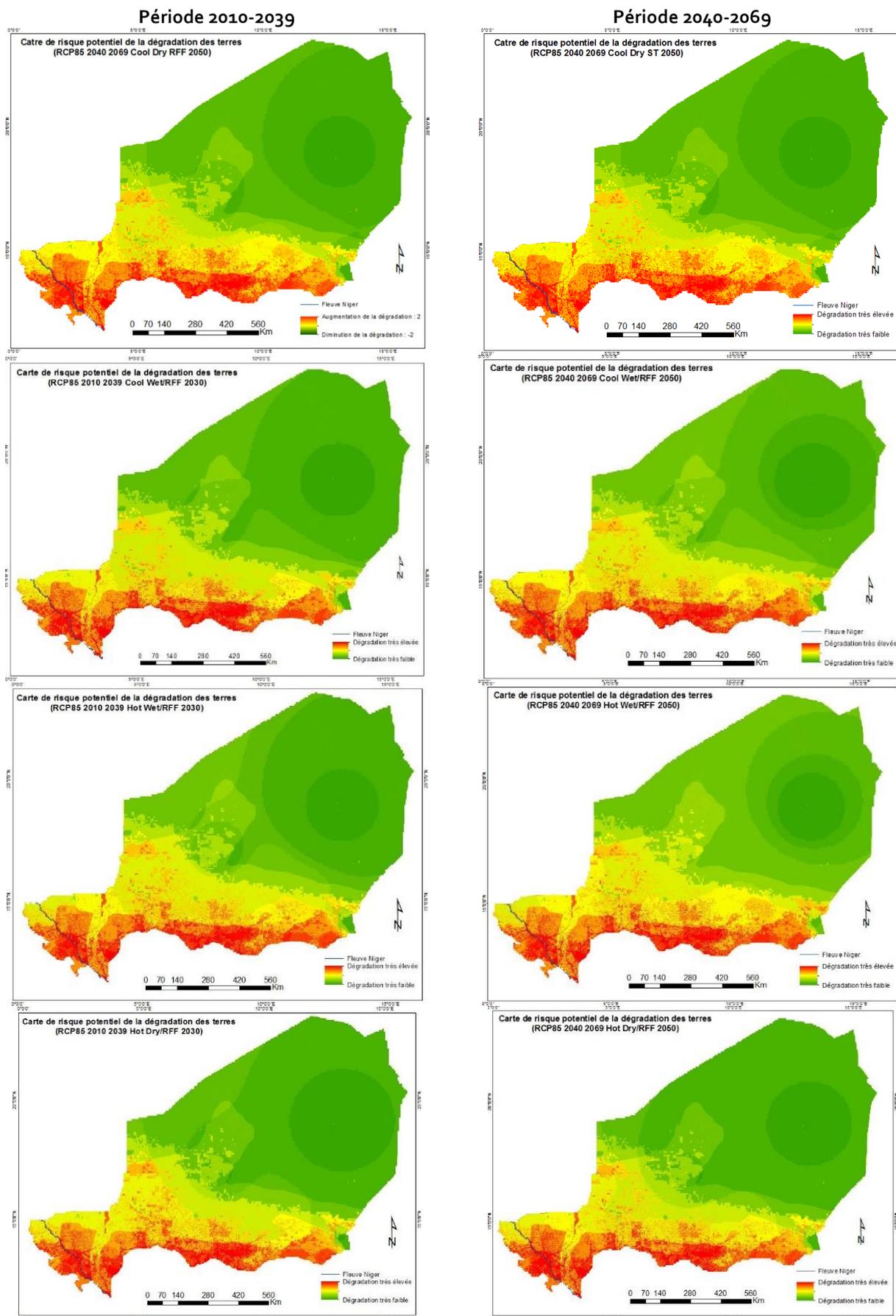
Toutes les cartes indiquent une concentration des risques de dégradation des terres au sud du pays, dans les zones agricoles et agropastorales. Elles indiquent aussi une croissance du risque de dégradation des terres plus particulièrement marqué en zone agropastorale et pastorale, sensible à l'horizon temporel considéré (croissance de l'indice avec le temps). Les projections se montrent en revanche assez peu sensibles au scénario démographique considéré.

Figure 11. Indice de risque structurel de dégradation des terres pour les périodes 2010-2039 et 2040-2069 dans le cas du scénario démographique tendanciel et d'un scénario de réchauffement global RCP 8.5



Source : Souley-Yero K., 2019. AGRHYMET. Niamey, Niger.

Figure 12. Indice de risque structurel de dégradation des terres pour les périodes 2010-2039 et 2040-2069 dans le cas du scénario de réduction rapide de la fécondité et d'un scénario de réchauffement global RCP 8.5



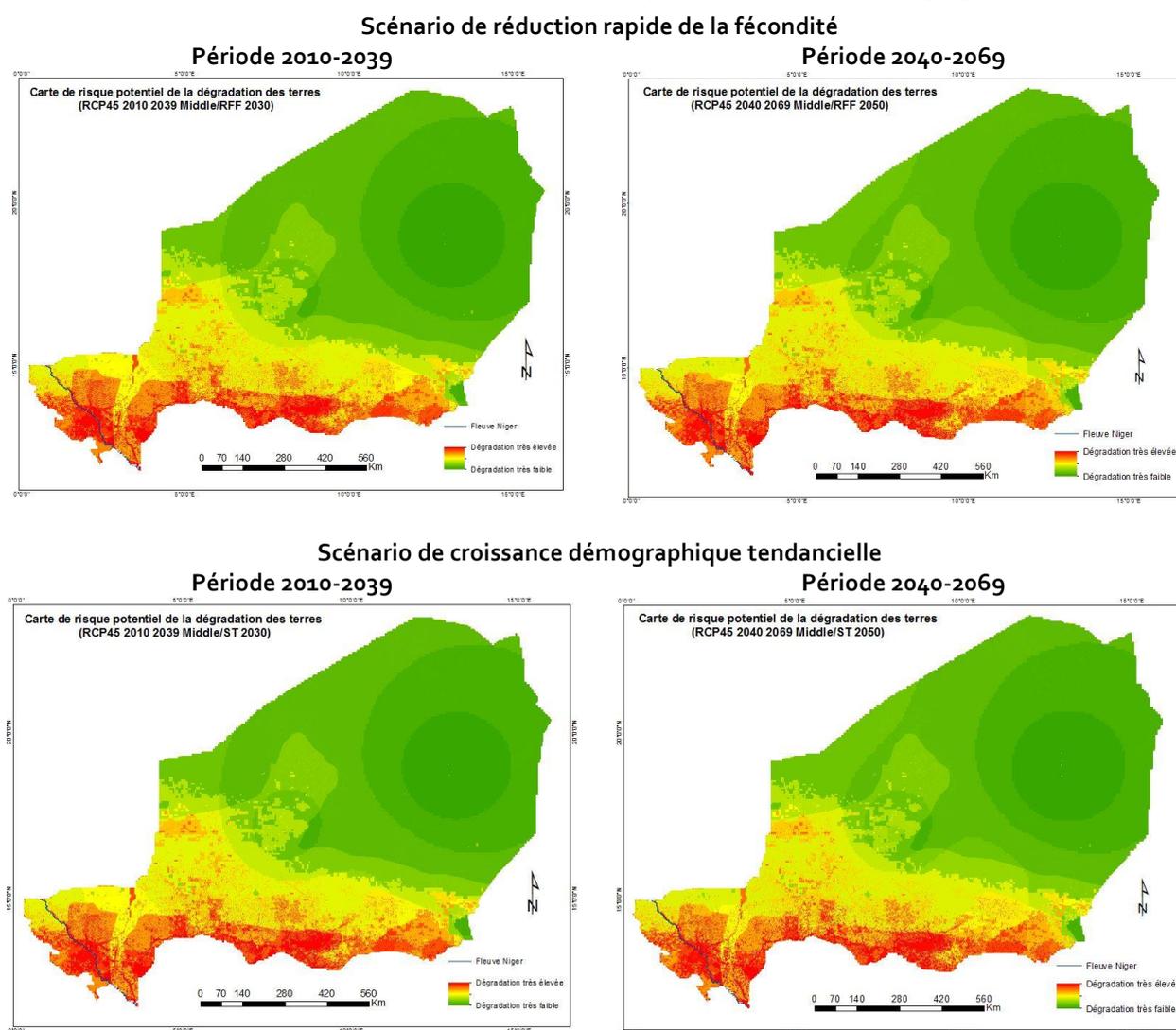
Source : Souley-Yero K., 2019. AGRHYMET. Niamey, Niger

Les cartes ci-dessous représentent les indices de risque de dégradation des terres du Niger dans le cas d'un scénario de réchauffement global RCP 4.5, simulés pour les périodes 2010-2039 et 2040-2069 avec une tendance médiane des projections climatiques désagrégées (Figure 13).

En comparant ces cartes à celles des figures 10 et 11, nous pouvons faire l'hypothèse que le risque structurel de dégradation des terres est moins élevé dans le cas du scénario RCP 4.5 que dans le cas du scénario RCP 8.5.

On observe par ailleurs une augmentation du risque de dégradation des terres pour la période 2040-2069 comparée à la période 2010-2039, et ce quel que soit le scénario démographique considéré. Aux horizons temporels considérés, le type de scénario démographique influence en effet assez peu le niveau de risque de dégradation des terres.

Figure 13. Indice de risque structurel de dégradation des terres pour les périodes 2010-2039 et 2040-2069 dans le cas d'un scénario RCP 4.5 et d'une tendance médiane des projections climatiques désagrégées



Source : Souley-Yero K., 2019. AGRHYMET. Niamey, Niger

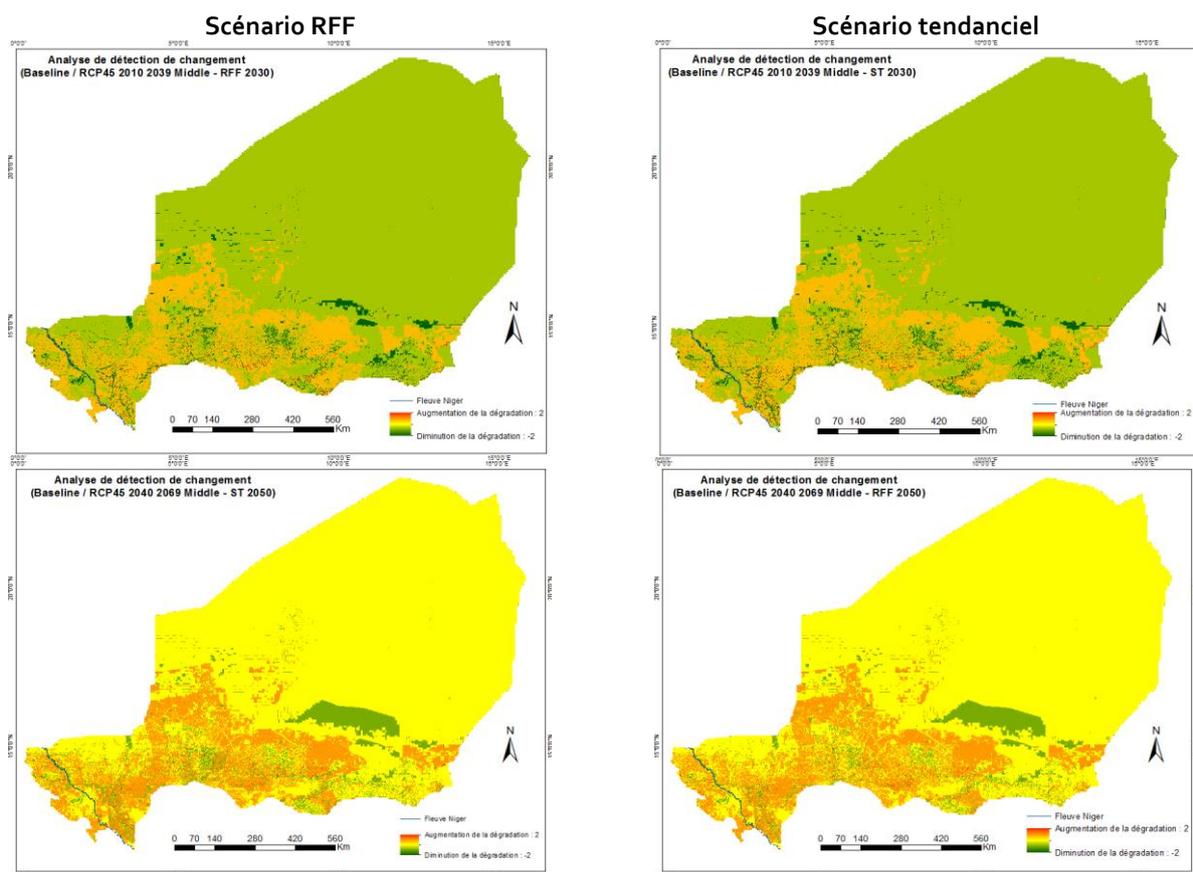
3.1.4. Détection de l'évolution du risque de dégradation des terres pour les périodes 2010-2039 et 2040-2069 (i.e. impact du changement climatique)

Dans cette section, les cartes présentées représentent les variations d'indice de risque de dégradation des terres du Niger entre l'indice projeté et la référence. Elles servent à détecter les zones d'accroissement (indiquée en rouge) ou de réduction (indiquée en vert) de l'indice de risque de dégradation par rapport à la situation de référence.

La figure 14 ci-dessous représente les variations d'indice de risque de dégradation des terres pour le scénario de réchauffement global RCP 4.5 et les périodes 2010-2039 d'une part, et 2040-2069 d'autre part, comparées entre deux scénarios contrastés de croissance démographique. Les indices sont calculés à partir des projections climatiques pour la tendance intermédiaire des modèles climatiques dans toutes les stations synoptiques.

Aux horizons temporels considérés, l'évolution du risque de dégradation des terres apparaît faiblement sensible au type de scénario démographique retenu mais fortement sensible à l'horizon temporel considéré. Ces cartes indiquent un accroissement du risque de dégradation des terres à court terme (2010-2039) dans les zones agricoles, agropastorales et pastorales, qui s'amplifie sur le moyen terme (2040-2069).

Figure 14. Cartes de détection des changements d'indice de risque structurel de dégradation des terres pour le RCP 4.5 et pour les périodes 2010-2039 et 2040-2069, comparés entre les scénarios démographiques pour la tendance climatique intermédiaire



Source : Souley-Yero K., 2019. AGRHYMET. Niamey, Niger

Les cartes ci-après représentent la variation d'indice de risque de dégradation des terres sur les périodes 2010-2039 (Figure 15) et 2040-2069 (Figure 16) dans le cas du scénario de réchauffement global RCP 8.5. Les indices sont calculés à partir des projections climatiques classées selon 4 tendances contrastées d'évolution (projections relativement chaudes et sèches, froides et sèches, chaudes et humides, froides et humides). Les cartes sont comparables deux à deux entre les deux scénarios contrastés de croissance démographiques.

Ces cartes montrent d'abord que les espaces présentant une augmentation du risque de dégradation des terres sont concentrés dans les zones agricole, agropastorale et pastorale.

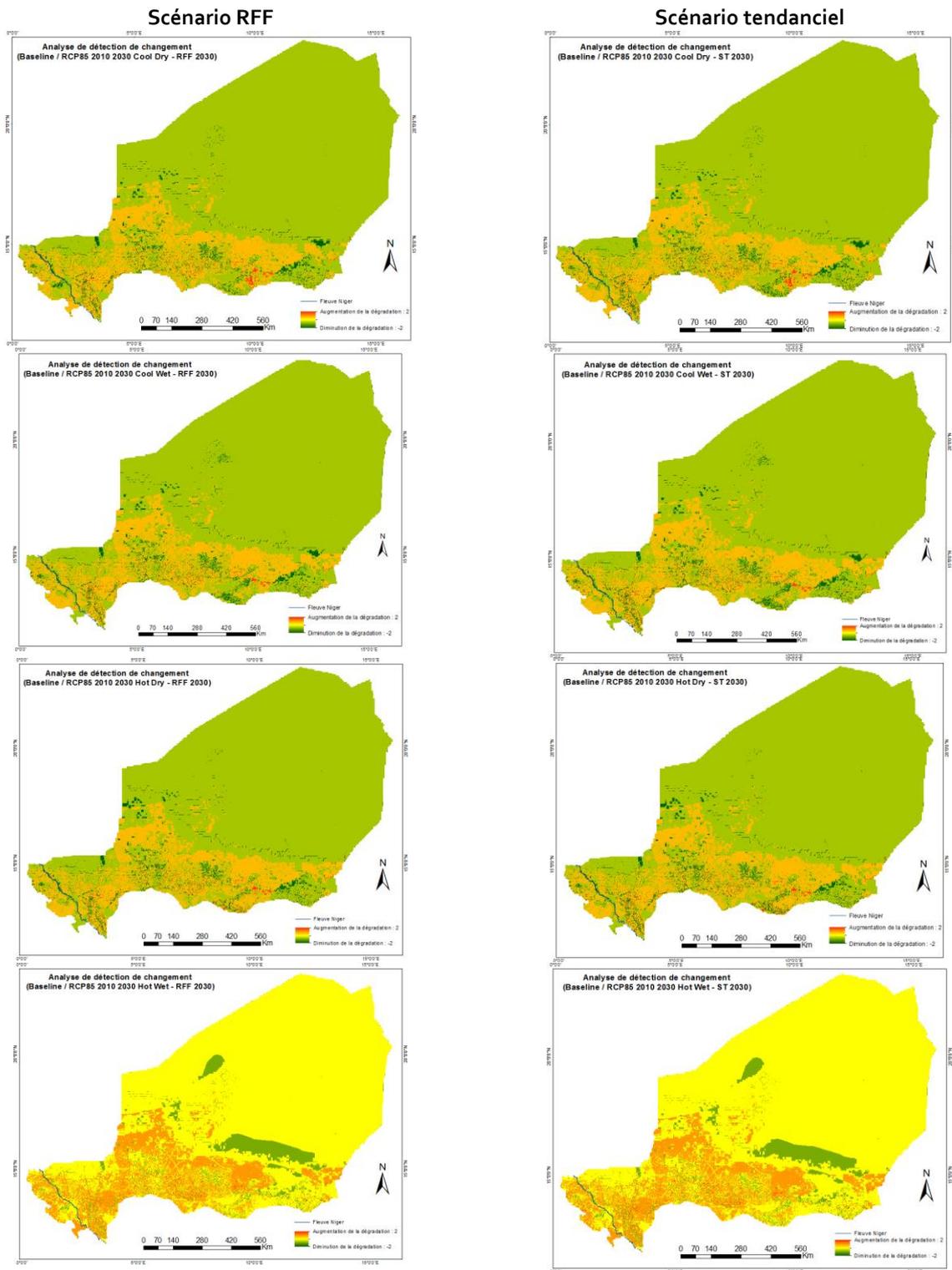
Ces cartes montrent également que l'évolution du risque de dégradation des terres sur le court et le moyen termes dépendent peu du scénario d'accroissement démographique considéré, et que le risque de dégradation des terres augmente avec l'horizon temporel considéré.

L'évolution du risque de dégradation des terres apparaît modérément sensible aux tendances des données climatiques projetées.

A court et moyen termes (2010-2039 et 2040-2069), les projections climatiques relativement chaudes et humides sont celles qui génèrent la plus forte augmentation du risque de dégradation des terres, en relation avec une augmentation des cumuls pluviométriques, et de la fréquence des épisodes pluvieux de plus de 20 mm.

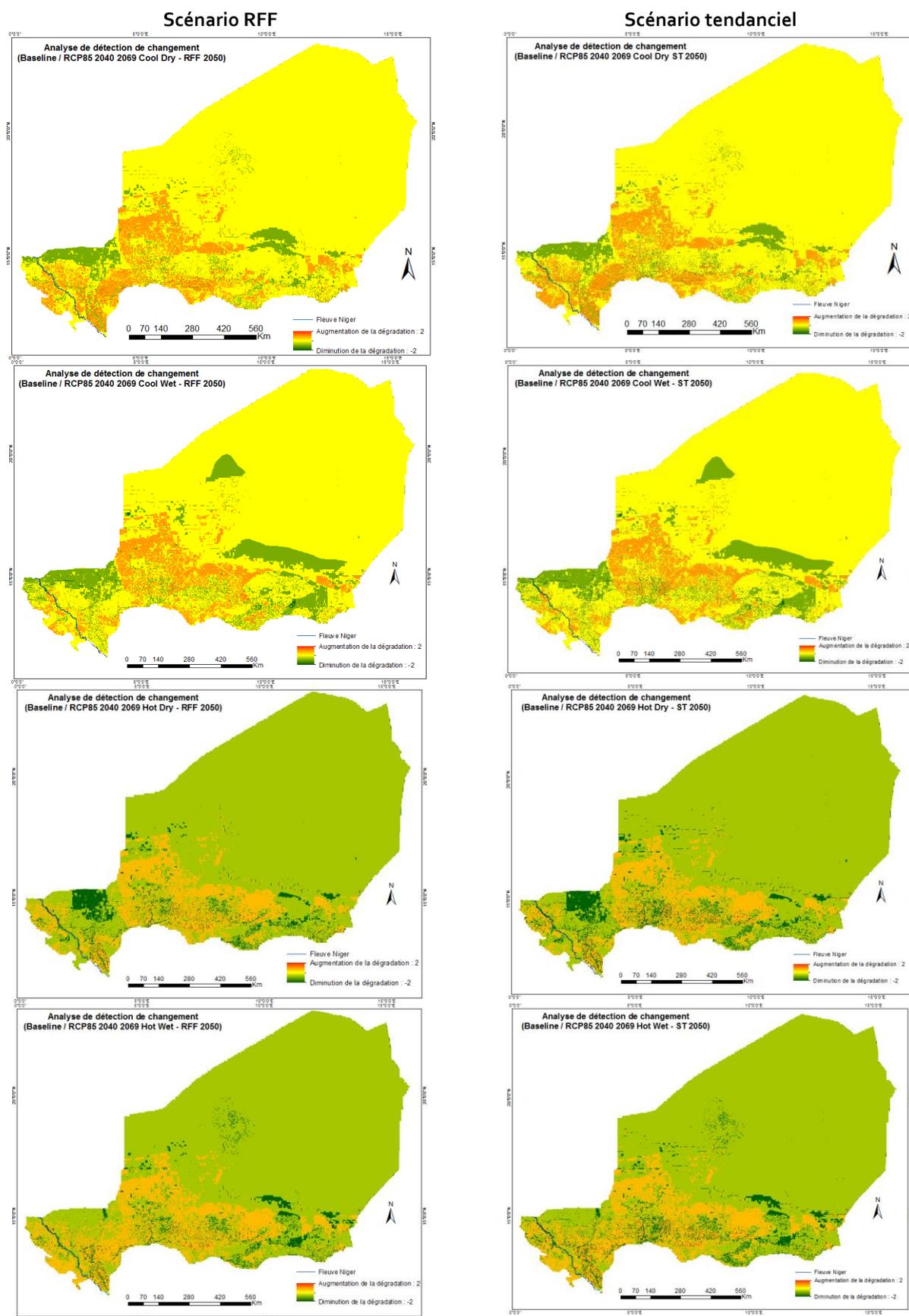
Des zones de réduction du risque de dégradation des terres d'extension variable selon la simulation réalisée peuvent également être observées en zone agricole, agro-pastorale et pastorale. Nous faisons l'hypothèse que la réduction du risque potentiel de dégradation, par comparaison à la situation actuelle, s'explique par une diminution du nombre d'événements érosifs de plus de 20 mm plutôt que par l'évolution des cumuls pluviométriques moyens.

Figure 15. Cartes de détection de changements d'indice de risque structurel de dégradation des terres pour la période 2010-2039 et pour le RCP 8.5, comparés entre les scénarios démographiques pour différentes tendances d'évolution du climat



Source : Souley-Yero K., 2019. AGRHYMET. Niamey, Niger

Figure 16. Cartes de détection de changements d'indice de risque structurel de dégradation des terres pour la période 2040-2069 et pour le RCP 8.5, comparés entre les scénarios démographiques pour différentes tendances d'évolution du climat



Source : Souley-Yero K., 2019. AGRHYMET. Niamey, Niger

3.1.5. Discussion : limites de l'évaluation d'impact des changements climatiques et démographiques sur le risque de dégradation des terres.

La méthode utilisée permet d'une part d'identifier les zones présentant un fort risque de dégradation des terres, et d'autre part de détecter les zones présentant un accroissement significatif du niveau de risque de dégradation des terres, en raison des changements pluviométriques combinés aux changements démographiques.

Les produits cartographiques générés indiquent où des mesures peuvent être prises pour prévenir ou atténuer les phénomènes de dégradation. Pour que ces résultats soient utiles à la prise de décision, il est nécessaire de disposer d'une compréhension complète de leurs limites. Ces limites, dont certaines pourraient être levées en disposant de données complémentaires, sont les suivantes :

Tout d'abord, les projections présentées visent à évaluer l'effet des seuls changements pluviométriques et démographiques sur le risque de dégradation des terres, en considérant les autres facteurs comme restant constants. Ces autres facteurs, incluant par exemple l'évolution de la charge animale sur le milieu, sont susceptibles d'amplifier ou réduire le risque de dégradation des terres dans une proportion très importante, notamment à l'échelle locale.

Ensuite, les projections pluviométriques utilisées à l'échelle du territoire, qui contribuent pour 17% à l'indice de risque de dégradation, reposent sur l'interpolation de données projetées de changement climatique à partir de seulement 15 stations synoptiques, inégalement réparties sur le territoire. Du fait de la répartition spatiale des stations synoptiques, l'évaluation d'impact proposée doit être considérée comme plus fiable dans la zone agricole et agropastorale du Niger que sur le reste du territoire (zone pastorale et zone désertique). Pour améliorer la qualité de la spatialisation d'impact, l'interpolation des projections de changement pluviométriques aux différents horizons temporels pourrait intégrer des projections de changement climatique sur les stations synoptiques des pays voisins.

Les scénarios démographiques utilisés, qui contribuent pour 20% à l'indice de risque de dégradation des terres, reposent sur la projection d'un taux moyen d'accroissement démographique sur l'ensemble du territoire. La qualité de l'évaluation réalisée pourrait être améliorée en intégrant des projections démographiques désagrégées à l'échelle des communes du Niger, à condition que de telles données soient disponibles.

Le modèle utilisé a pour avantage d'être ouvert à l'intégration d'autres types d'indicateurs. Bien que la méthode déployée présente certaines limites, elle permet néanmoins d'identifier conjointement des espaces / territoires à fort risque structurel de dégradation des sols, et des espaces / territoires présentant un risque majeur d'aggravation du risque de dégradation des terres.

Les moyens disponibles pour remédier à la dégradation des terres devraient logiquement être concentrés sur les espaces / territoires identifiés comme présentant actuellement un fort risque de dégradation des terres et sur ceux où les projections montrent une forte aggravation du risque dans le temps.

3.2. Impacts du changement climatique sur les rendements en grains des céréales pluviales

3.2.1. Potentiels de rendements en grains des céréales pluviales

Les simulations de rendements des céréales ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) faites à l'aide du modèle SARRA-H (toutes céréales évaluées, toutes stations synoptiques et toutes tendances de modèles confondues), montrent qu'en moyenne (Tableau 5) :

- Le potentiel de rendement céréalier avec le scénario RCP4.5 est supérieur au potentiel obtenu avec le RCP8.5, et ce quel que soit l'horizon temporel considéré (2039, 2069 et 2099) ;
- Cependant la variabilité du potentiel de rendement céréalier est très importante à tous les horizons temporels (écart type compris entre ± 507 kg grain/ha et ± 630 kg grain/ha) ;
- Le potentiel maximum de rendement est obtenu pour le RCP4.5 à l'horizon 2039 (1189,7 kg grain/ha en moyenne, avec un écart type de ± 630 kg grain/ha) ;
- Le potentiel minimum de rendement est obtenu pour le RCP8.5 à l'horizon 2099 (1036,5 kg grain/ha avec un écart type de $\pm 507,5$ kg grain/ha) ;
- Les rendements moyens en grain des céréales simulées augmentent de 3% (RCP 8.5) à 6% (RCP 4.5) dans le court terme (2039) ;
- Cette augmentation se réduit dans le moyen terme (2069) ;
- Sur le long terme (2099), les rendements grain des céréales pluviales diminuent de 1% (RCP 4.5) à 8% (RCP 8.5) par rapport à la référence ;
- Une trajectoire de réchauffement correspondant à une augmentation du forçage radiatif de 4 points (RCP 8.5 – RCP 4.5) se traduirait par des baisses des rendements céréaliers moyens respectivement de $35,7 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ à l'horizon 2039 ; $29,5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ à l'horizon 2069 et $77,6 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ à l'horizon 2099.

La baisse du potentiel de rendement céréalier sur le long terme peut être attribuée à un impact négatif de la hausse des températures sur les rendements qui n'est pas compensée par l'évolution de la pluviométrie.

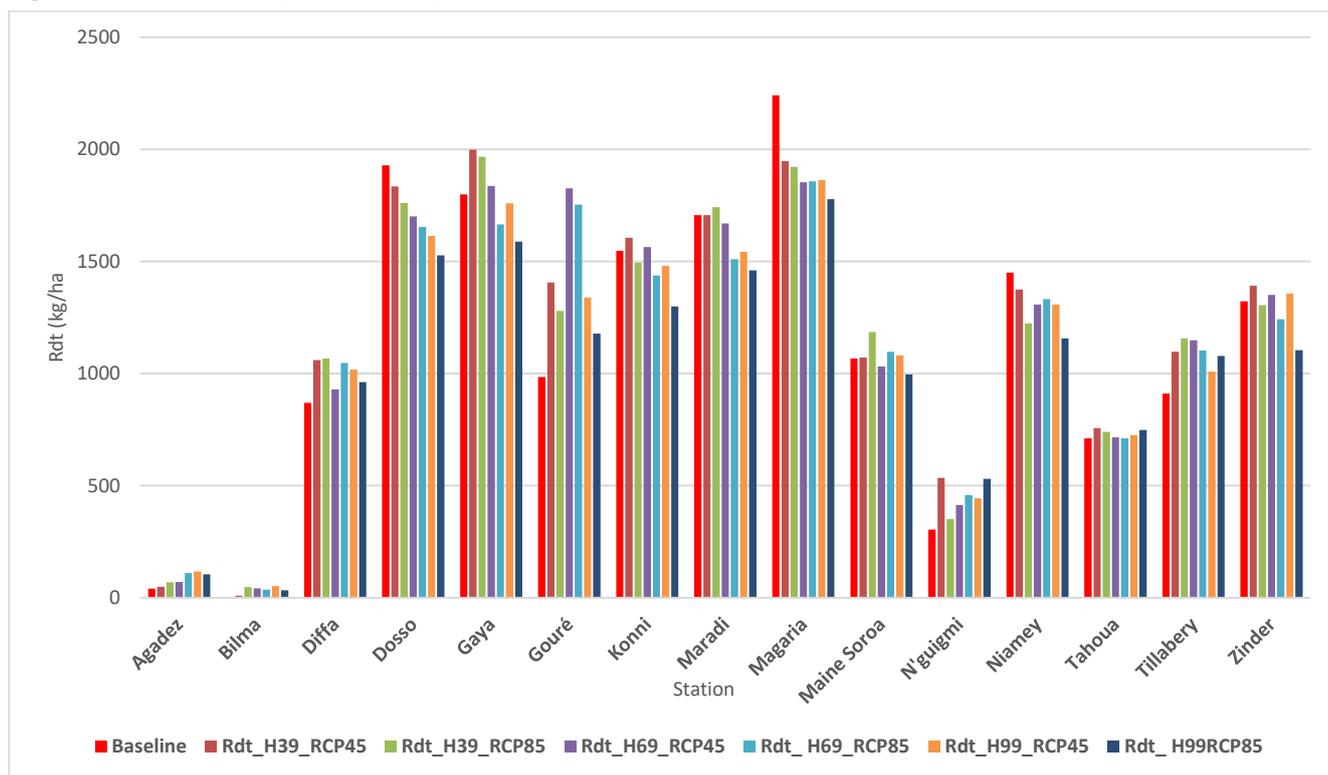
Tableau 5. Rendements céréaliers simulés aux horizons 2039-2069-2099 pour le RCP4.5 et RCP 8.5 comparés aux rendements moyens simulés pour la période de référence – Toutes stations et toutes céréales confondues

	Référence	RCP4.5			RCP8.5		
	1981-2010	2039	2069	2099	2039	2069	2099
Rendement moyen (kg grain /ha)	1125,7	1189,7	1164,1	1114,1	1154,0	1134,6	1036,5
Ecart-type (kg grain/ha)	677,5	630,0	621,9	562,9	618,2	576,1	507,5
Différence / référence (kg grain/ha)		64,0	38,4	-11,6	28,3	8,9	-89,1
Variation / référence (%)		6	3	-1	3	1	-8

La simulation du potentiel de rendement céréalier (kg grains / ha , toutes céréales confondues) pour chacune des 15 stations synoptiques (Figure 17), montre les éléments suivants :

- Le potentiel maximum de rendement grain céréalier s'obtient à Magaria, Dosso et Gaya ;
- Le potentiel minimum de rendement grain céréalier s'obtient à Bilma, Agadez et Nguimi ;
- Les rendements en grains projetés aux différents horizons temporels sont toujours inférieurs à ceux obtenus pour la période de référence à Dosso, Magaria et Niamey ;
- A l'inverse, les rendements en grains projetés aux différents horizon temporels sont toujours supérieurs à ceux de la période de référence à Agadez, Nguimi, Gouré et Tillabéri.

Figure 17. Rendements potentiels de production céréalière suivant les sites



3.2.2. Rendements en grains du mil 90 jours

Les rendements en grains simulés pour la variété de mil de 90 jours aux horizons 2039, 2069 et 2099 varient selon l’horizon temporel et le scénario RCP considérés (Tableau 6).

Pour tous les horizons (2039, 2069 et 2099), les rendements simulés de la variété de mil 90 jours sont plus élevés avec le scénario RCP 4.5 qu’avec le scénario RCP 8.5. Les rendements projetés de la variété de mil 90 jours retenue diminuent par rapport à la référence. Avec le scénario RCP4.5, ils diminuent de 1% à l’horizon 2039 et de 16% à l’horizon 2099. Avec le scénario RCP 8.5, ils vont baisser de 4% à l’horizon 2039 et de 31%, à l’horizon 2099.

Une trajectoire de réchauffement correspondant à une augmentation du forçage radiatif de 4 points (RCP 8.5 – RCP 4.5) se traduirait par des baisses des rendements grains du mil 90 jours respectivement de 19,2 kg.ha⁻¹ à l’horizon 2039 ; 48,4 kg.ha⁻¹ à l’horizon 2069 et 107,4 kg.ha⁻¹ à l’horizon 2099.

Tableau 6. Rendements grain simulés pour le mil 90 jours (kg.ha⁻¹), comparés avec la référence, toutes stations confondues

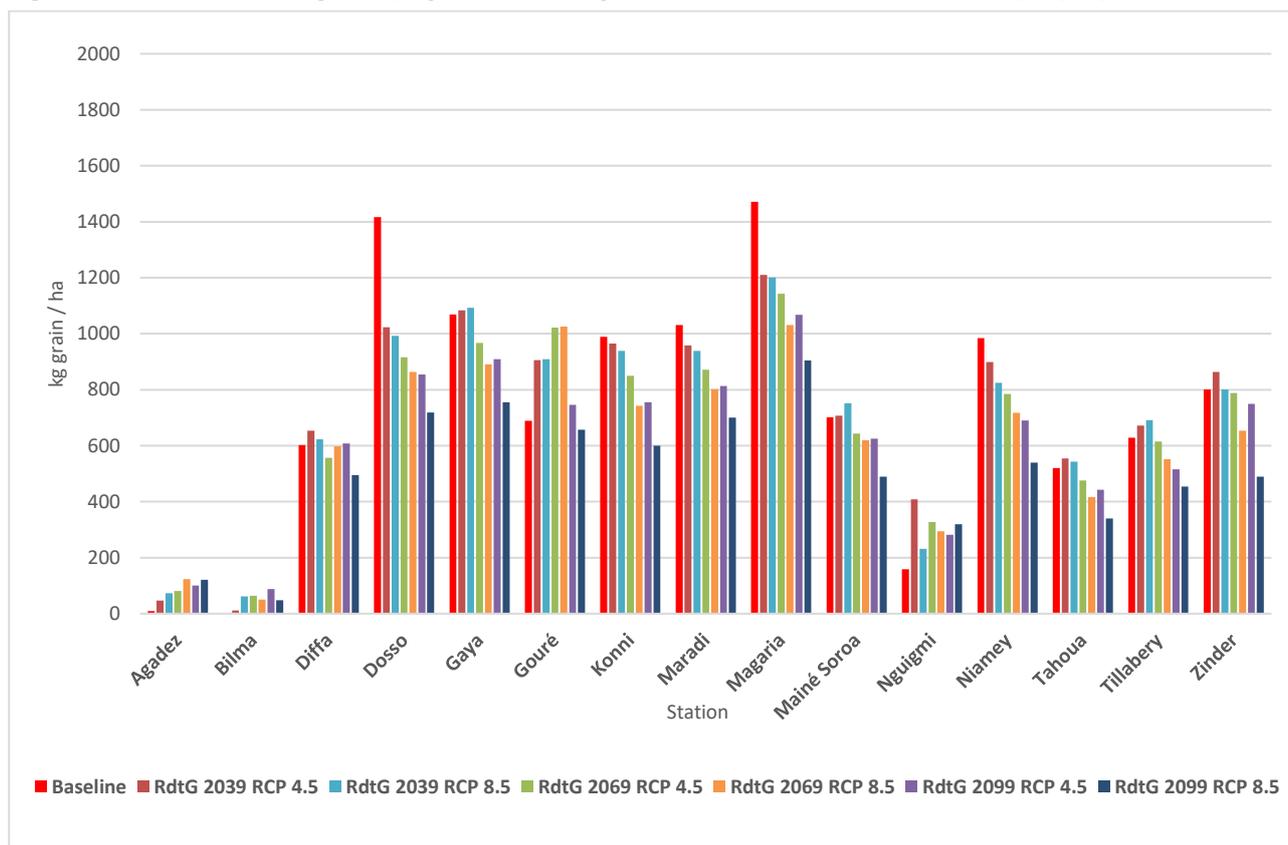
	Référence	RCP4.5			RCP8.5		
	1981-2010	2039	2069	2099	2039	2069	2099
Rendement moyen (kg grain /ha)	738,2	730,8	673,7	616,2	711,6	625,3	508,8
Ecart-type (kg grain/ha)	448,2	353,8	325,2	233,1	351,1	298,5	233,2
Différence / référence (kg grain/ha)		-7,4	-64,5	-121,8	-26,6	-112,8	-229,4
Variation / référence (%)		-1	-9	-16	-4	-15	-31

Les rendements grains simulés pour la variété de mil de 90 jours varient d’une station synoptique à une autre, à tous les horizons (2039, 2069 et 2099). La figure 18 montre que :

- Les rendements projetés à l’horizon 2039 sont supérieurs à 600 kg grains/ha dans 11 stations synoptiques sur les 15, contre 10 pour la référence, avec un maximum de 1210,1 kg grains/ha obtenus à Magaria avec le scénario RCP4.5 ;

- Les rendements projetés à horizon 2069 dépassent 600 kg grains/ha dans 9 stations synoptiques sur les 15, avec un maximum de 1142,5 kg grains/ha obtenu toujours à Magaria, avec le RCP4.5 ;
- Les rendements projetés à l'horizon 2099 dépassent 600 kg grains/ha dans 6 stations (avec le RCP 8.5) et dans 9 stations (avec le RCP 4.5), pour un maximum de 1759,0 kg grains / ha obtenus à Gaya avec le RCP4.5 ;
- Les rendements projetés décroissent avec les horizons temporels à Dosso, Konni, Maradi, Magaria et Niamey ;
- Les rendements projetés croissent dans le court terme puis décroissent sur le moyen terme et sur le long terme à Tahoua, Tillabéri et Diffa.

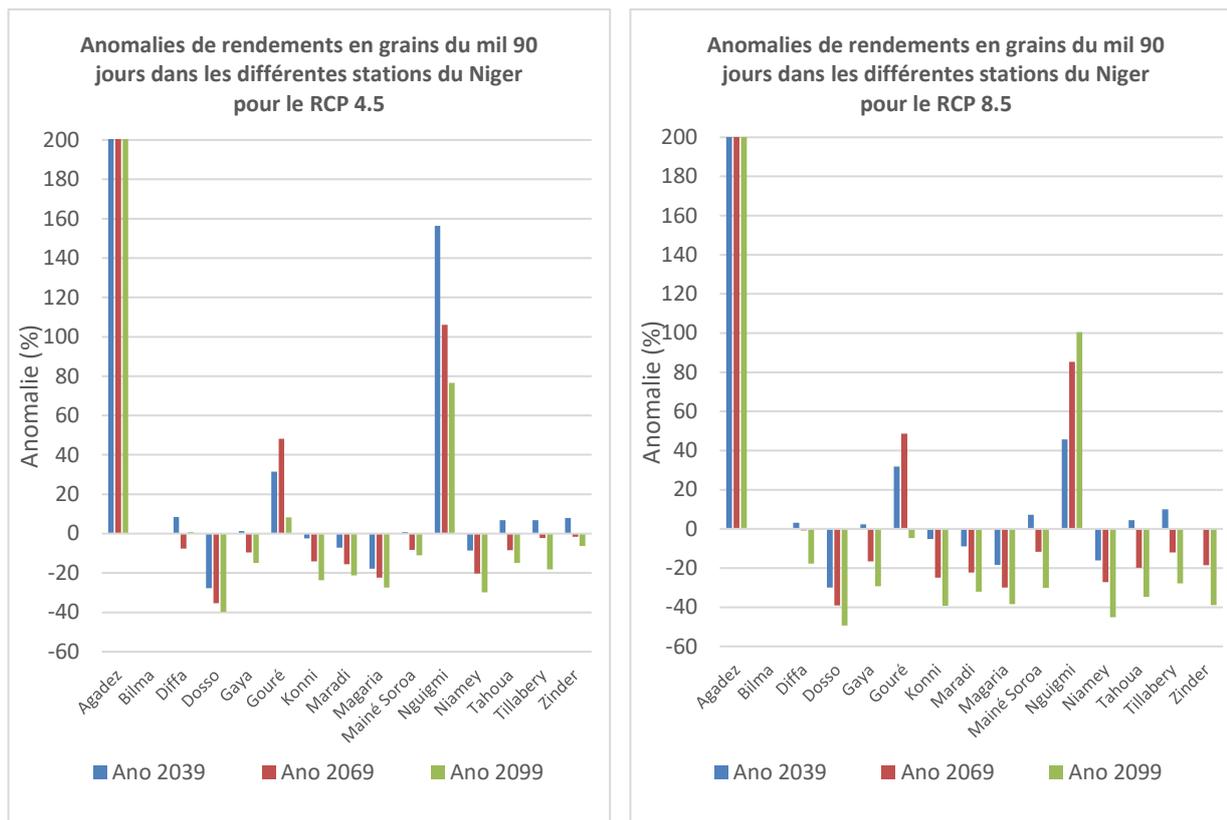
Figure 18. Rendements en grains projetés du mil 90 jours dans chacune des 15 stations synoptiques



La représentation (Figure 19) des anomalies de rendements en grains du mil 90 jours par rapport à la référence, simulées aux horizons 2039, 2069 et 2099 dans les différentes stations synoptiques du Niger montre :

- Une hausse des rendements projetés pour tous les horizons à Gouré et N'guigmi quel que soit le RCP considéré ;
- Dans le cas du RCP 4.5 : on observe une baisse des rendements projetés à Dosso, Konni, Maradi, Magaria et Niamey. A Tahoua, Tillabéri et Zinder, les rendements projetés sont plus ou moins équivalents à la référence dans le court terme, puis ils diminuent sur le moyen et long terme. A Gaya, les rendements augmentent par rapport à la référence à l'horizon 2099 ;
- Dans le cas du RCP 8.5, les rendements projetés du mil 90 jours décroissent avec le temps dans toutes les stations à l'exception de Gouré et N'guigmi. Sur le moyen terme (2069), les rendements projetés du mil 90 jours diminuent de plus de 20% par rapport à ceux obtenus pour la période de référence à Dosso, Konni, Maradi, Magaria et Niamey.

Figure 19. Anomalies de rendements en grains du mil 90 jours par rapport à la référence aux horizons 2039-2069-2099

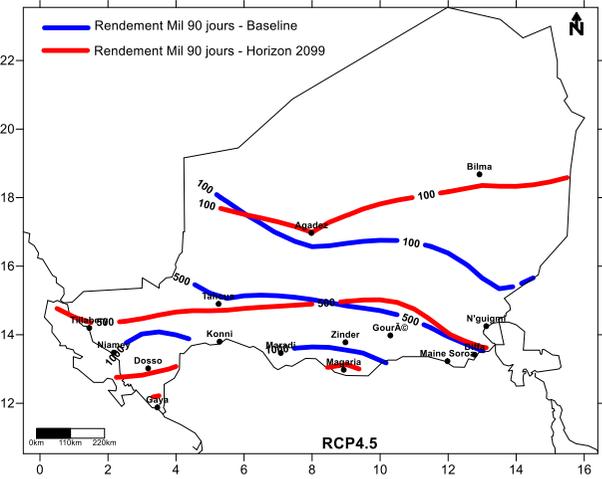
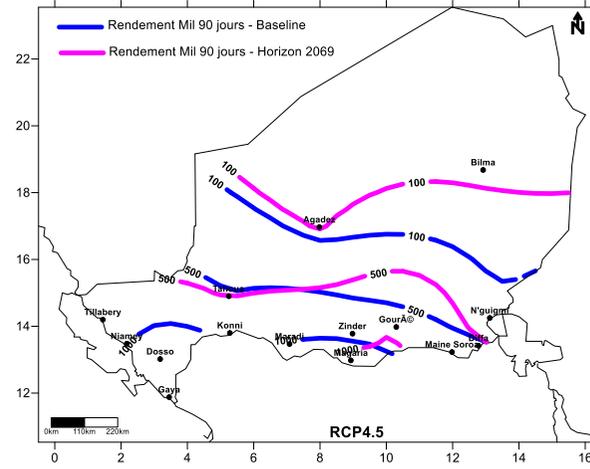
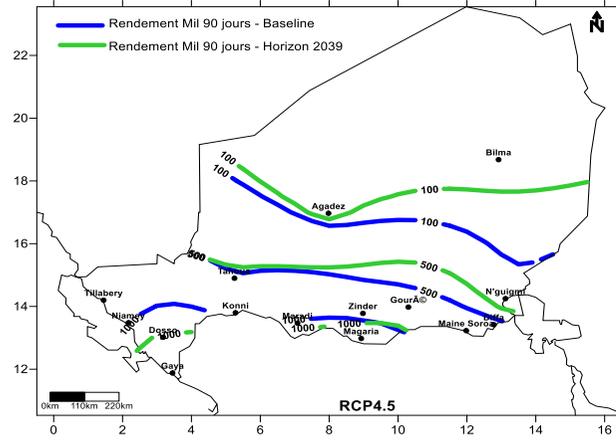


La représentation de l'évolution des isolignes de rendements (100 kg grains/ha ; 500 kg grains/ha et 1000 kg grains /ha) pour le mil 90 jours aux horizons 2039-2069-2099 (Figure 20) montre les résultats suivants :

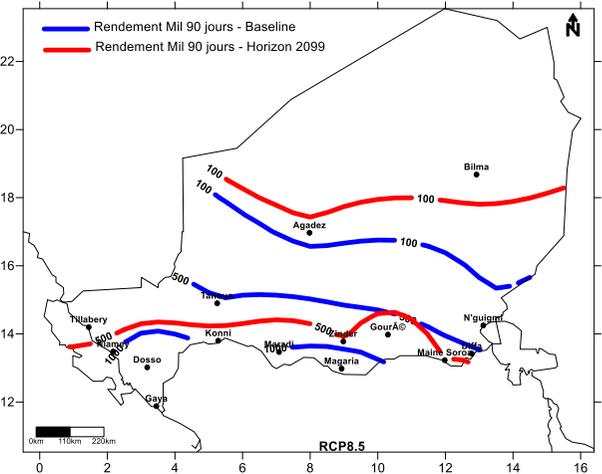
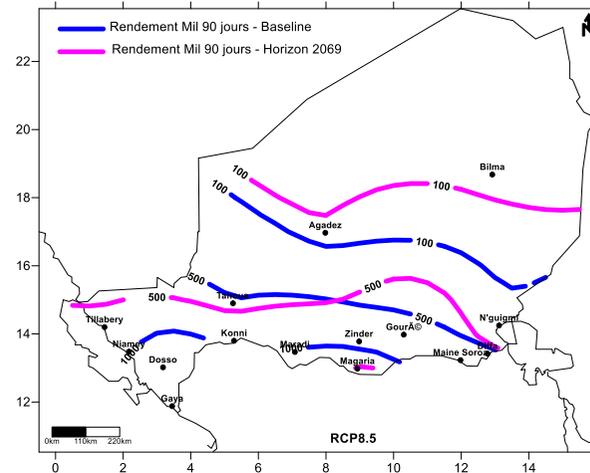
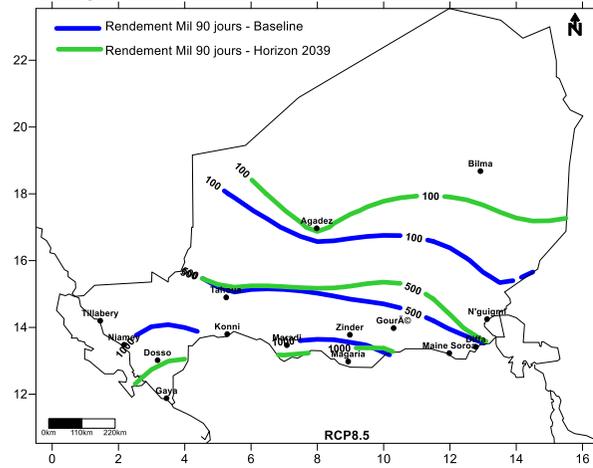
- L'isoline de rendement 100 kg grains/ha se déplace vers le nord quel que soit le RCP considéré. Ce déplacement est particulièrement marqué dans l'Est du Niger (Nord Zinder, Mainé Soroa) ;
- Dans l'est du pays, l'isoline 500 kg grains/ha migre vers le nord, avec une ampleur moins marquée comparé à l'isoline 100 kg grains/ha. Ceci implique une augmentation des superficies à productivité comprise entre 100 kg/ha et 500 kg/ha dans l'Est du pays aux horizons 2039 et 2069 ;
- Dans l'ouest du pays, l'isoline de rendement 500 kg grains/ha se déplace progressivement vers le sud d'environ 120 km. Les superficies à productivité 500 kg/ha vont ainsi régresser notamment dans les régions de Tillabéri et Tahoua ;
- L'isoline 1000 kg grains/ha régresse vers le sud, d'une façon plus particulièrement marquée dans la région de Dosso, impliquant une diminution des superficies à productivité élevée d'environ 1° (soit 110 km) pour cette région à l'horizon 2039. Cette diminution est moins marquée dans les régions de Maradi et Zinder. La régression de l'isoline 1000 kg grains/ha se poursuit à l'horizon 2069, entraînant une disparition des superficies à productivité supérieure à 1000 kg grains/ha dans la région de Dosso. A l'horizon 2069, seul le département de Magaria connaît des rendements supérieur ou égal à 1000 kg grains/ha. Entre 2069 et 2099, le déplacement de l'isoline 1000 kg grains / ha s'inverse dans le cas du RCP 4.5.

Figure 20. Evolution des isolignes de rendement en grains du mil 90 jours par rapport à la référence aux horizons 2039, 2069 et 2099 (RCP 4.5 et RCP 8.5).

RCP 4.5



RCP 8.5



3.2.3. Rendements en grains du mil photopériodique

Toutes stations confondues, les rendements en grains du mil photopériodique simulés aux horizons 2039, 2059 et 2099 sont supérieurs de 13 à 25% aux rendements simulés pour la période de référence, et ce quel que soit le scénario RCP considéré (Tableau 7). Dans le scénario RCP 4.5, les rendements moyens projetés croissent avec le temps. Dans le scénario RCP 8.5, les rendements moyens projetés croissent jusqu'à l'horizon 2069, puis décroissent à l'horizon 2099, tout en restant supérieurs à ceux de la référence. Les rendements moyens projetés avec le scénario RCP4.5 sont par ailleurs légèrement supérieurs à ceux projetés avec le scénario RCP 8.5 aux horizons 2039 et 2099, alors que c'est l'inverse pour l'horizon 2069. Une trajectoire de réchauffement correspondant à une augmentation du forçage radiatif de 4 points (RCP 8.5 – RCP 4.5) se traduirait par des baisses des rendements en grains du mil photopériodique, respectivement de 30,4 kg.ha⁻¹ à l'horizon 2039 et 80,2 kg.ha⁻¹ à l'horizon 2099. A moyen terme (2069), cette trajectoire de réchauffement entraînerait une hausse de 27,3 kg.ha⁻¹ des rendements en grains du mil photopériodique.

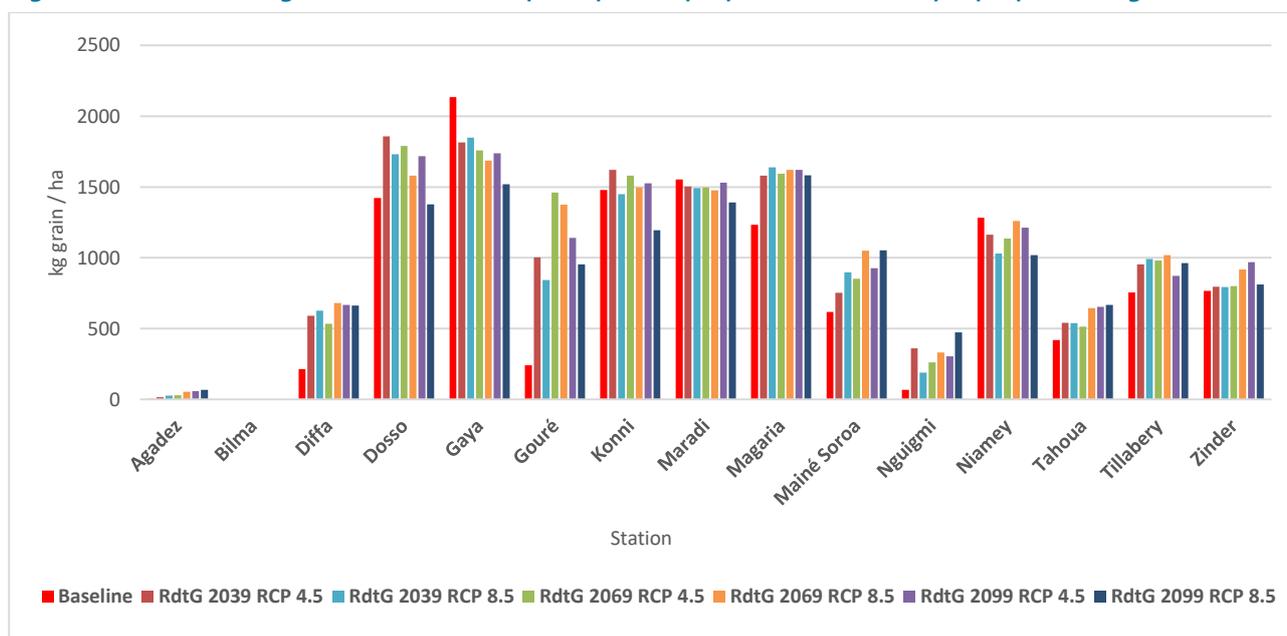
Tableau 7. Rendements grain simulés du mil photopériodique comparés à ceux de la référence, toutes stations confondues

	Référence	RCP4.5			RCP8.5		
	1981-2010	2039	2069	2099	2039	2069	2099
Rendement moyen (kg grain /ha)	812,6	969,9	985,6	995,8	939,5	1012,9	915,6
Ecart-type (kg grain/ha)	669,1	612,5	619,1	579,1	602,6	564,0	481,9
Différence / référence (kg grain/ha)		157,3	172,9	183,2	126,9	200,3	102,9
Variation / référence (%)		19	21	23	16	25	13

La modélisation des rendements grains de la variété de mil photopériodique aux horizons 2039, 2069 et 2099, pour chaque station synoptique (Figure 21), montre que :

- à l'horizon 2039, les rendements en grains dépassent 600 kg/ha dans 10 (RCP 4.5) à 11 (RCP 8.5) stations synoptiques, avec un maximum de 1857,8 kg/ha à Dosso pour le RCP4.5 ;
- à l'horizon 2069, les rendements en grains dépassent 600 kg/ha dans 10 (RCP 4.5) à 12 (RCP 8.5) stations synoptiques, avec un maximum de rendement projeté de 1788,8 kg/ha pour Dosso avec le RCP4.5 ;
- à l'horizon 2099, les rendements en grains dépassent 600 kg/ha dans 12 stations synoptiques, quel que soit le RCP considéré.

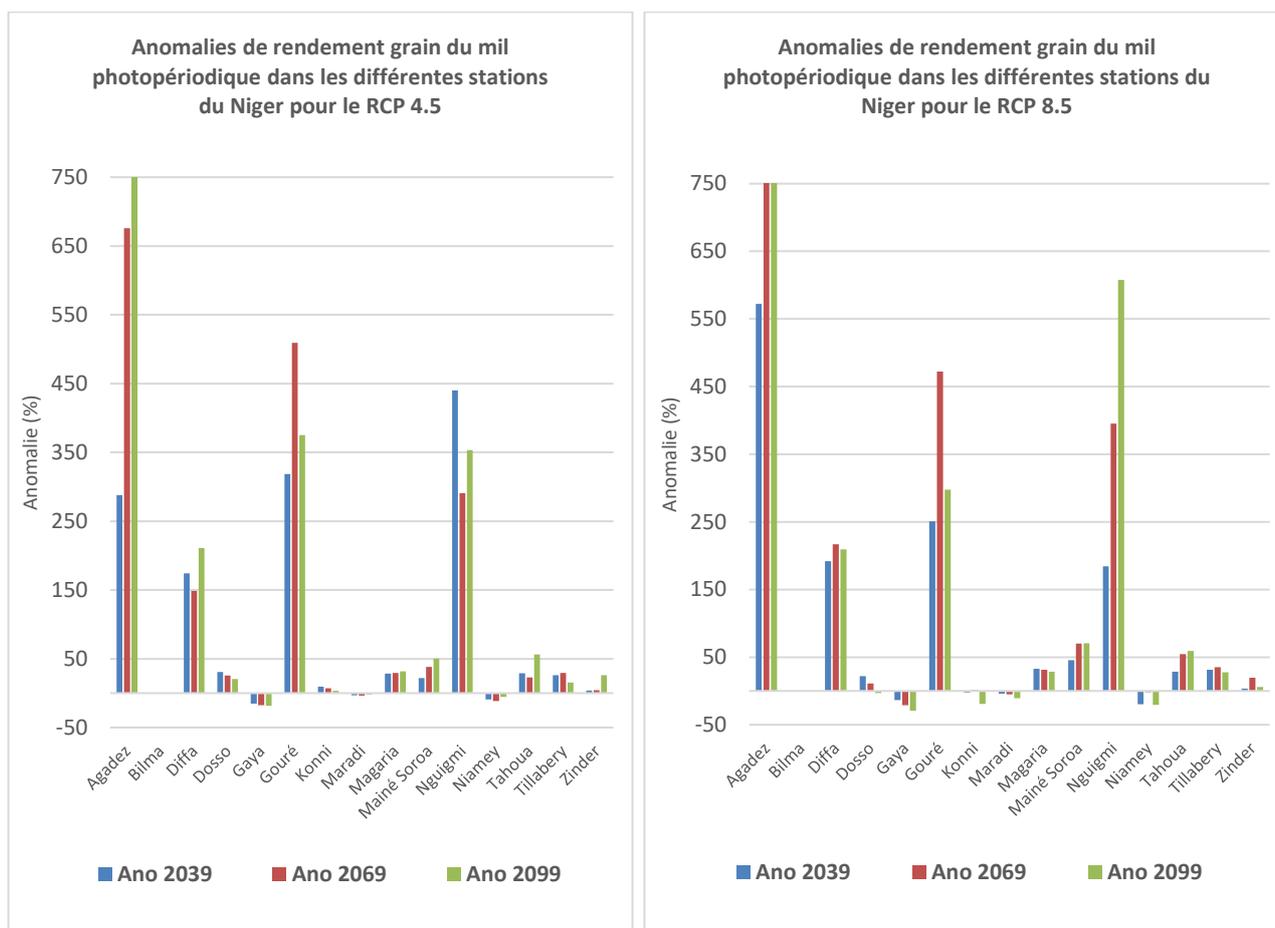
Figure 21. Rendements grains simulés du mil photopériodique pour les stations synoptiques du Niger



La représentation (Figure 22) des anomalies de rendements en grains du mil photopériodique par rapport à la période de référence, simulées aux horizons 2039, 2069 et 2099 dans les différentes stations synoptiques du Niger montre :

- Une forte augmentation des rendements en grains simulés aux horizons 2039, 2069 et 2099 pour Gouré, N’Guigmi et Diffa ;
- Une augmentation modérée des rendements en grains simulés à Magaria, Mainé Soroa, Tahoua et Tillabéri ;
- Une diminution des rendements en grains par rapport à la période de référence pour Gaya et Niamey.

Figure 22. Anomalies de rendements en grains du mil photopériodique aux horizons 2039-2069-2099

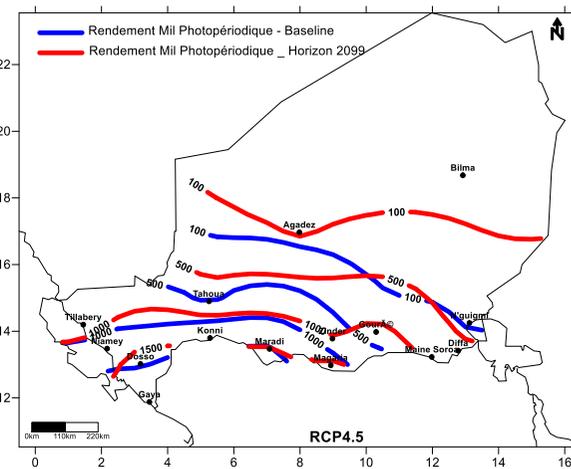
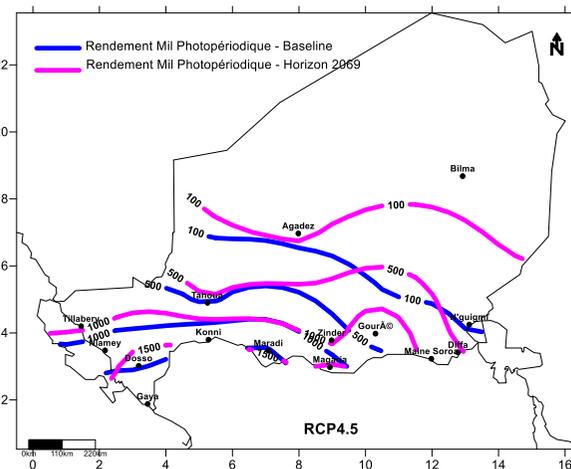
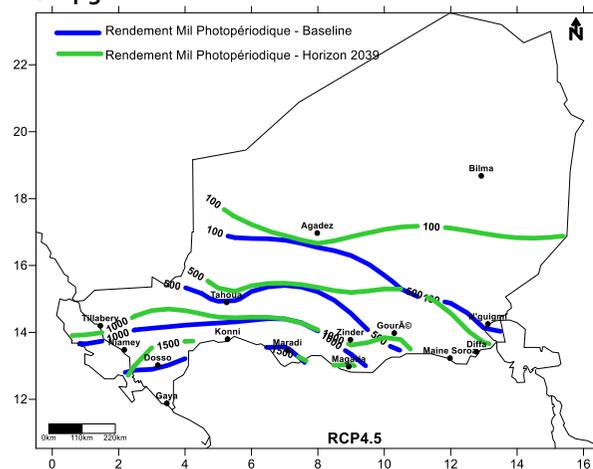


La représentation de l'évolution des isolignes de rendements (100 kg/ha ; 500 kg/ha, 1000 kg/ha et 1500 kg/ha) pour le mil photopériodique aux horizons 2039-2069-2099 (Figure 23) montre :

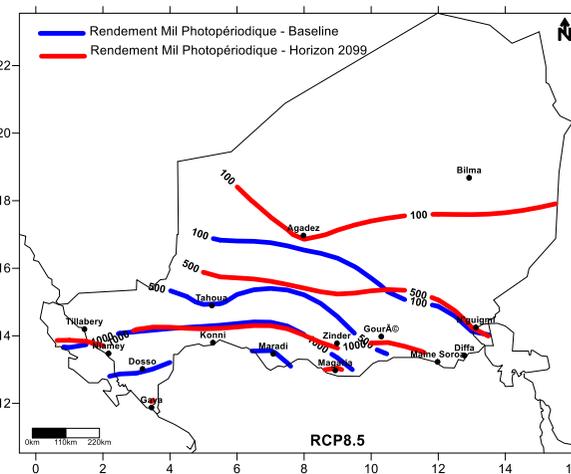
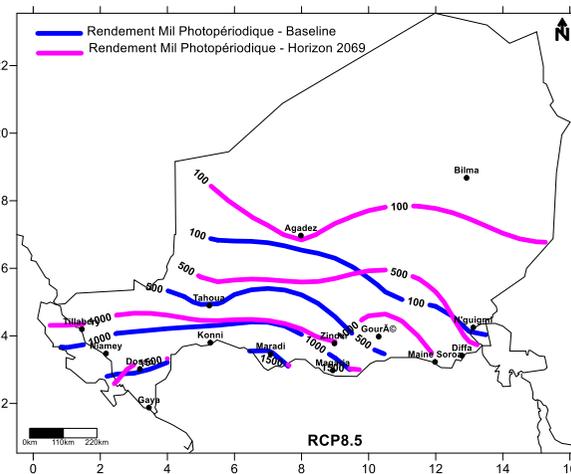
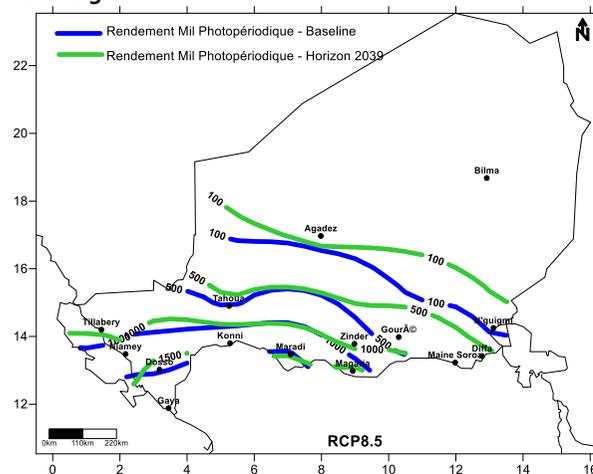
- Pour l'horizon 2039 dans le cas du RCP 4.5, un déplacement vers le nord des isolignes de rendement 500, 1000 et 1500 kg/ha, compris entre 50 et 110 km au nord de Dosso, au nord-est de Tillabéri, au nord de Gouré et au nord de Mainé Soroa ;
- Pour l'horizon 2039 dans le cas du RCP 8.5, un déplacement vers le nord des isolignes de rendement 500, 1000 et 1500kg/ha, de 50 km (nord de Téra et Filingué) à 200 km (nord de Gouré et Mainé Soroa) ;
- Pour l'horizon 2069, les déplacements vers le nord des isolignes de rendement 100, 500, 1000 et 1500 kg/ha s'amplifient ;
- Pour l'horizon 2099, les localisations des isolignes de rendement sont pratiquement identiques à celles projetées pour l'horizon 2069.

Figure 23. Evolution des isolignes de rendements en grains du mil photopériodique par rapport à la période de référence aux horizons 2039, 2069 et 2099 (RCP 4.5 et RCP 8.5).

RCP 4.5



RCP 8.5



3.2.4. Rendements en grains du sorgho 90 jours

Toutes stations confondues, les rendements en grains du sorgho simulés aux horizons 2039, 2069 et 2099 décroissent de 12 à 40% par rapport à la période de référence (Tableau 8). La baisse de rendement est supérieure dans le cas du RCP 8.5. Les rendements moyens projetés avec le scénario RCP4.5 restent supérieurs à ceux projetés avec le RCP 8.5 à tous les horizons temporels considérés. La baisse de rendement du sorgho atteint 12 à 15% dans le court terme, 18 à 23% dans le moyen terme, et 28 à 40% sur le long terme. Une trajectoire de réchauffement correspondant à une augmentation du forçage radiatif de 4 points (RCP 8.5 – RCP 4.5) se traduirait par des baisses des rendements grains du sorgho 90 jours respectivement de 18,9 kg.ha⁻¹ à l’horizon 2039 ; 39,9 kg.ha⁻¹ à l’horizon 2069 et 106,1 kg.ha⁻¹ à l’horizon 2099.

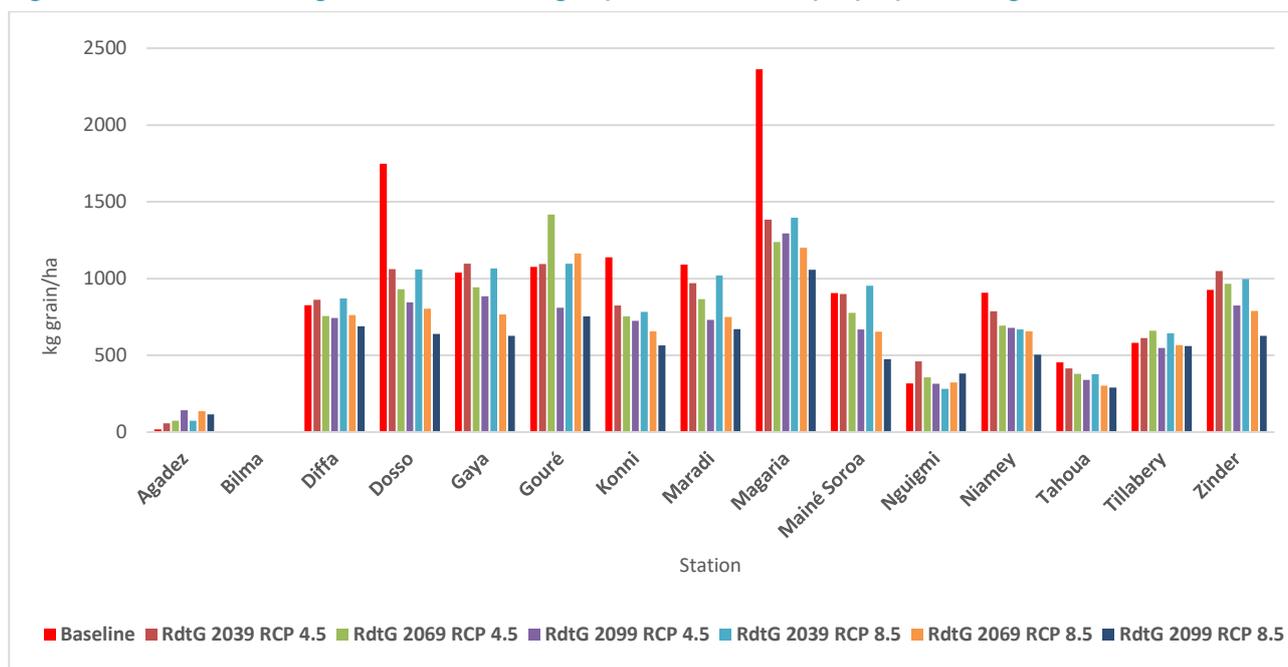
Tableau 8. Rendements en grain simulés du sorgho 90 jours comparés à ceux de la référence, toutes stations confondues

	Référence	RCP4.5			RCP8.5		
	1981-2010	2039	2069	2099	2039	2069	2099
Rendement moyen (kg grain /ha)	881,3	771,5	720,6	636,4	752,6	680,7	530,3
Ecart-type (kg grain/ha)	609,5	393,2	389,3	325,3	407,0	295,1	259,3
Différence / référence (kg grain/ha)		-109,8	-160,8	-244,9	-128,7	-200,7	-351,0
Variation / référence (%)		-12	-18	-28	-15	-23	-40

La modélisation des rendements en grains du sorgho aux horizons 2039, 2069 et 2099, pour chaque station synoptique (Figure 22), montre les résultats suivants :

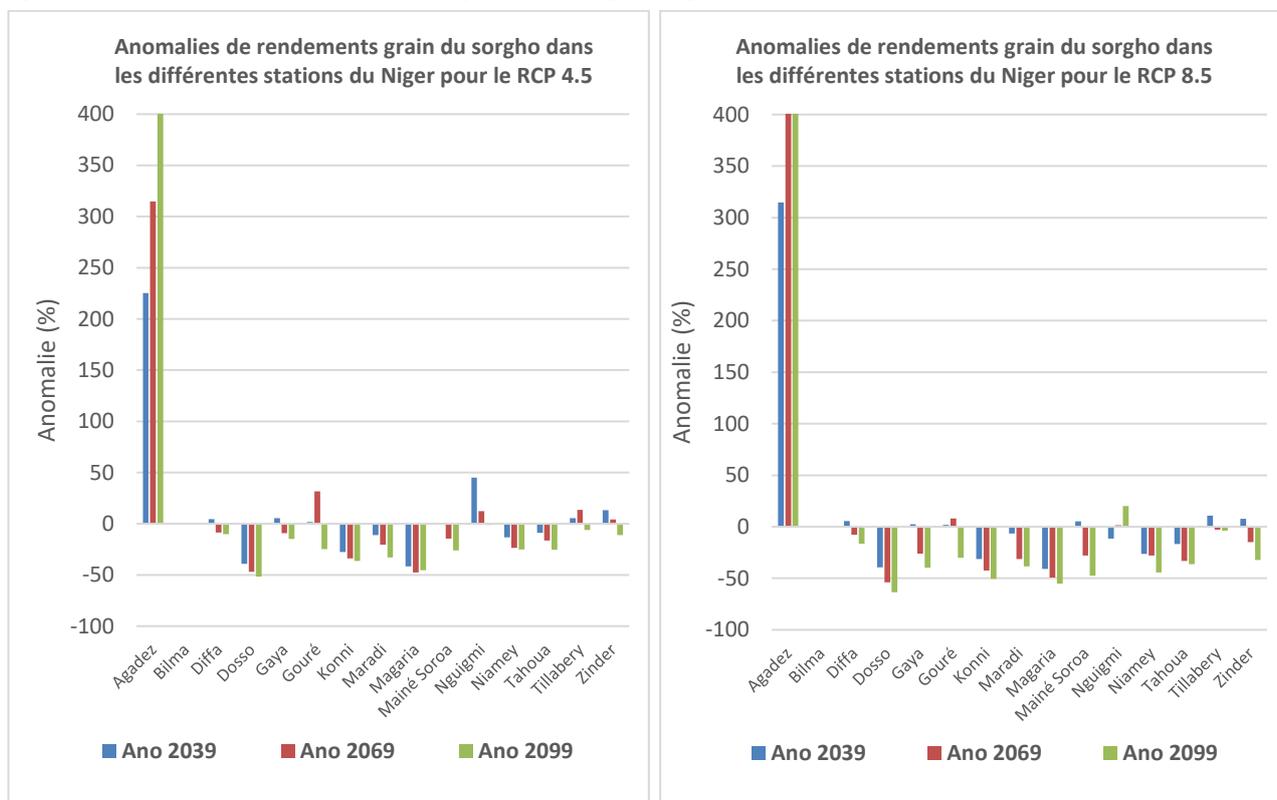
- A l’horizon 2039, les rendements en grains dépassent 600 kg/ha dans 11 stations synoptiques sur 15, avec un maximum de 1416 kg grain/ha à Gouré pour le RCP4.5 ;
- A l’horizon 2069, les rendements en grains dépassent 600 kg/ha dans 10 (RCP 8.5) à 11 (RCP 4.5) stations synoptiques ;
- A l’horizon 2099, les rendements en grains du sorgho dépassent 600 kg/ha dans 7 (RCP 8.5) à 10 (RCP 4.5) stations synoptiques ;
- A Bilma, quel que soit l’horizon considéré, le modèle ne simule pas de rendement parce que les conditions hydriques projetées ne permettent pas une initiation végétative.

Figure 24. Rendements en grains simulés du sorgho pour les stations synoptiques du Niger



La représentation (Figure 25) des anomalies de rendements en grains du sorgho par rapport à la référence, simulées aux horizons 2039, 2069 et 2099 dans les différentes stations synoptiques du Niger montre une baisse des rendements supérieure à 30% à Dosso, Konni, Magaria.

Figure 25. Anomalies de rendements en grains du sorgho 90 jours aux horizons 2039-2069-2099.

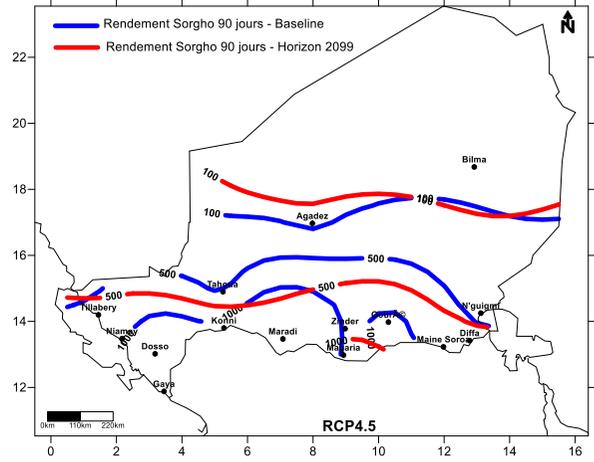
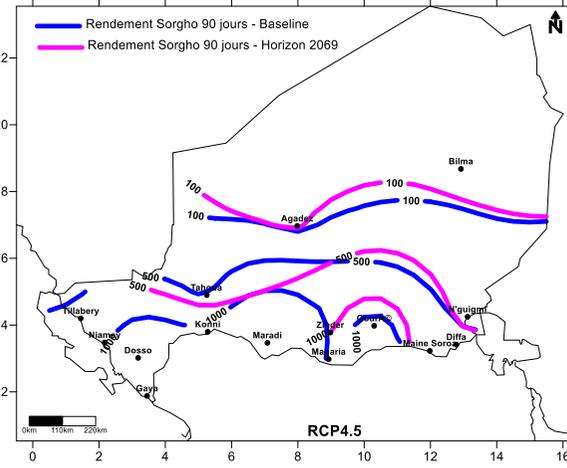
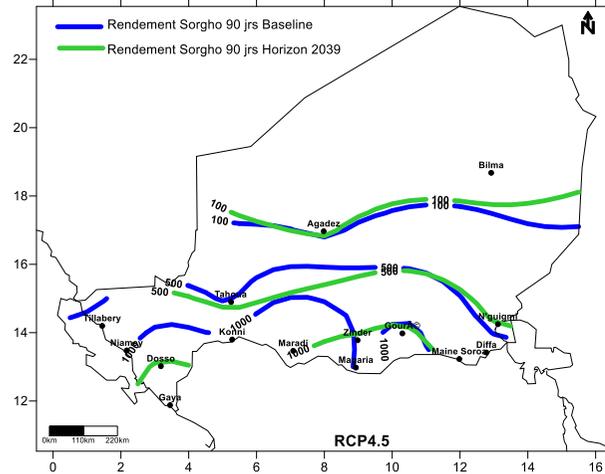


La représentation de l'évolution des isolignes de rendements (100 kg/ha ; 500 kg/ha, 1000 kg/ha et 1500 kg/ha) pour le sorgho aux horizons 2039-2069-2099 (Figure 26) montre :

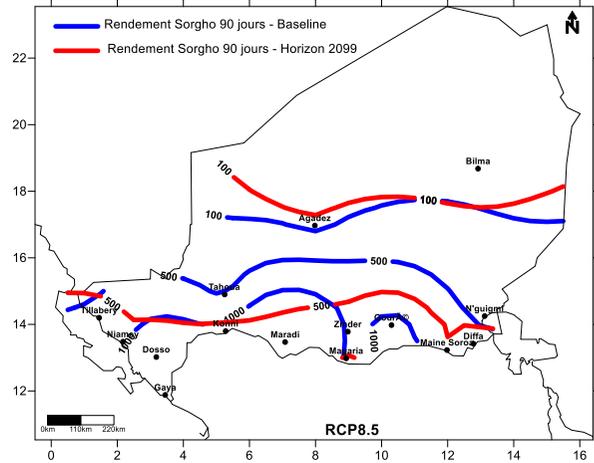
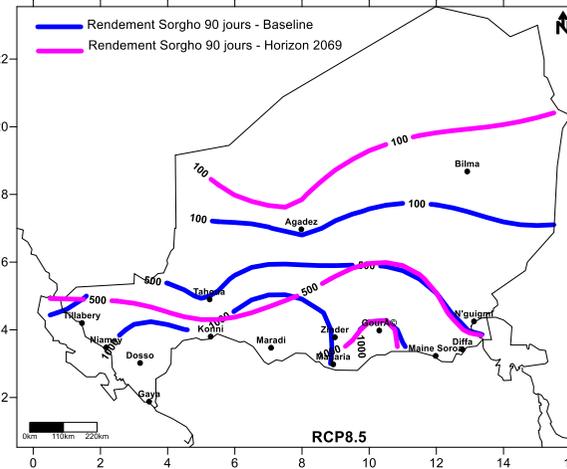
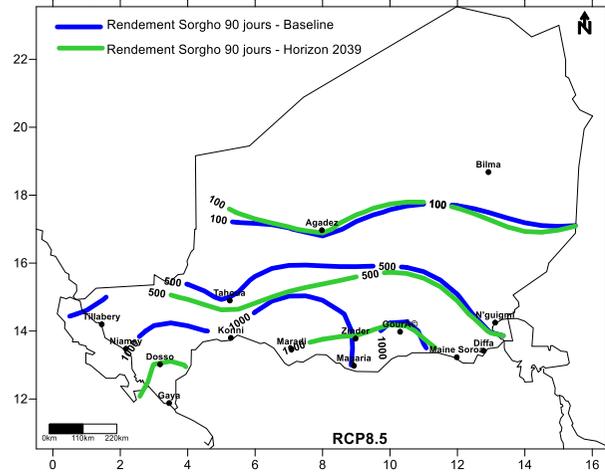
- Pour l'horizon 2039, une réduction des superficies de productivité comprise entre 500 et 1000 kg/ha. Cette réduction de superficie est plus particulièrement marquée dans la région de Dosso, Maradi et sud Tahoua (la descente des isolignes de rendement 1000 kg/ha atteint 100 à 250 km vers le sud) ;
- Pour l'horizon 2069, seul le sud de Zinder (Magaria et Gouré) présente encore des rendements de 1000 kg/ha. Les isolignes de rendement à 500 kg/ha descendent vers le sud dans l'est Tillabéry, le centre Tahoua et le nord Maradi ;
- Le déplacement des isolignes de rendement se poursuivra à l'horizon 2099 dans toute la zone agricole.

Figure 26. Evolution des isolignes de rendement en grains du sorgho par rapport à la période de référence aux horizons 2039, 2069 et 2099 (RCP 4.5 et RCP 8.5)

RCP 4.5



RCP 8.5



3.2.5. Rendements en grains du maïs 90 jours

Toutes stations confondues, les rendements moyens en grains du maïs, simulés aux horizons 2039, 2069 et 2099, sont supérieurs de 7 à 19% à ceux de la période de référence (Tableau 9). Aux horizons 2039 et 2069, les rendements moyens simulés avec le scénario RCP 4.5 sont supérieurs à ceux simulés avec le RCP 8.5. C'est l'inverse pour l'horizon 2099. Le rendement maximum simulé atteint 2456,8 kg/ha à l'horizon 2039 (RCP 4.5) contre 2062,3 kg/ha pour la période de référence. La variabilité des rendements moyen du maïs demeure élevée (écart type > 1t/ha) L'évolution des rendements varie selon l'horizon considéré. Dans le cas du RCP 4.5 comme du RCP 8.5, les rendements augmentent de 15 à 19% d'ici 2039, restent équivalents en 2069, puis diminuent entre 2069 et 2099, tout en restant supérieurs à ceux de la période de référence. Une trajectoire de réchauffement correspondant à une augmentation du forçage radiatif de 4 points (RCP 8.5 – RCP 4.5) se traduirait par des baisses des rendements en grains du maïs 90 jours respectivement de 87,1 kg.ha⁻¹ à l'horizon 2039 et 23,4 kg.ha⁻¹ à l'horizon 2069 mais par une hausse du rendement en grain de 147,2 kg.ha⁻¹ à l'horizon 2099.

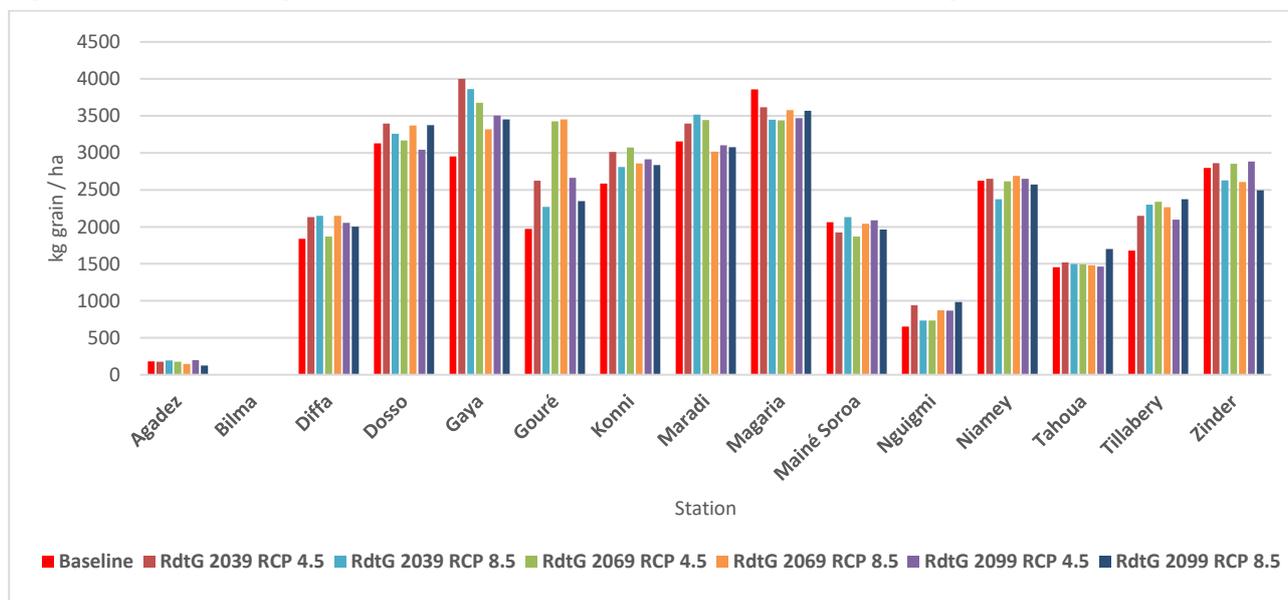
Tableau 9. Rendements en grains simulés du maïs 90 jours comparés à ceux de la référence, toutes stations confondues

	Référence	RCP4.5			RCP8.5		
	1981-2010	2039	2069	2099	2039	2069	2099
Rendement moyen (kg grain/ha)	2062,3	2456,8	2441,0	2200,4	2369,7	2417,6	2347,6
Ecart-type (kg grain/ha)	1129,0	1070,5	1082,1	1114,6	1040,0	1017,8	964,7
Différence / référence (kg grain/ha)		394,5	378,7	138,1	307,5	355,3	285,4
Variation / référence (%)		19	18	7	15	17	14

La modélisation des rendements en grains du maïs aux horizons 2039, 2069 et 2099, pour chaque station synoptique (Figure 27), donne les résultats suivants :

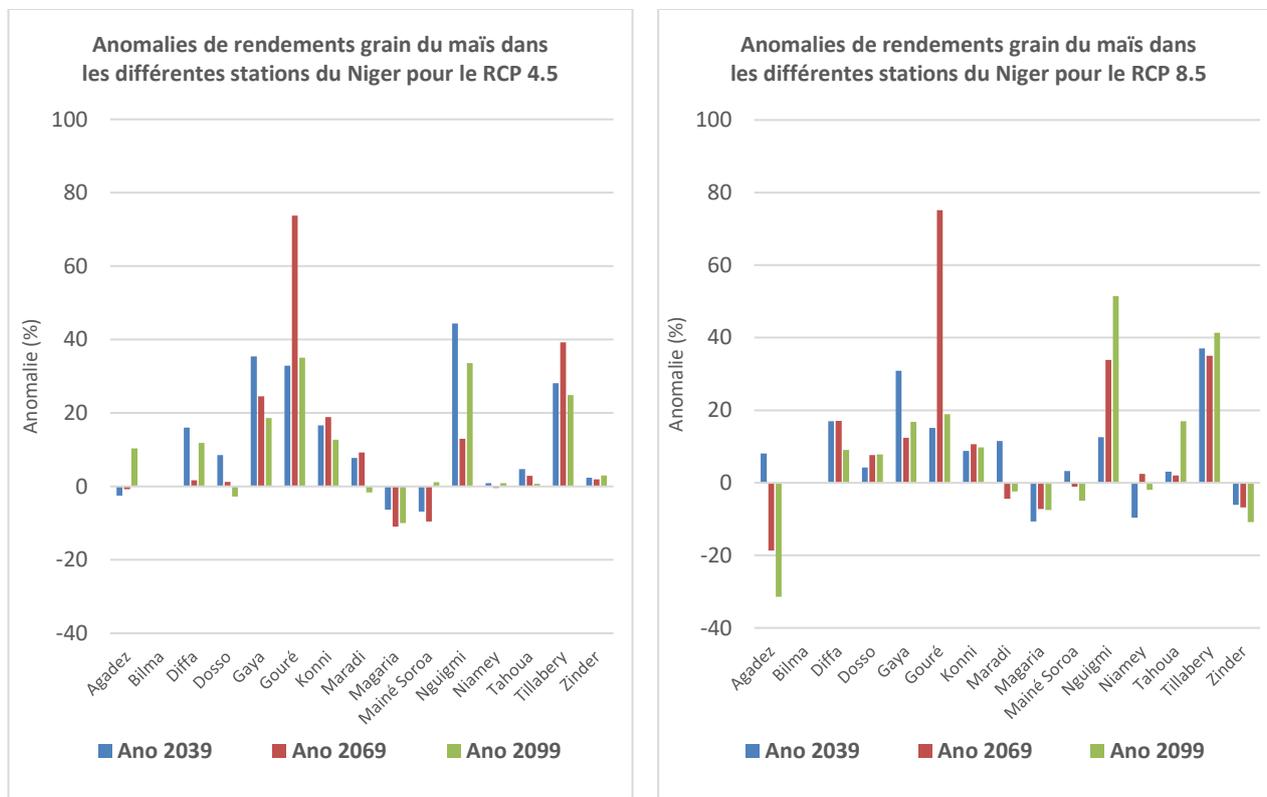
- A Diffa, Gaya, Gouré, Konni, Nguigmi, Tahoua, et Tillabéri, les rendements en grains du maïs augmentent par rapport à la période de référence quel que soit l'horizon temporel et le scénario RCP considéré ;
- Les rendements en grains du maïs dépassent 1000 kg/ha dans toutes les stations à l'exception de N'guigmi, Agadez et Bilma.

Figure 27. Rendements grains simulés du maïs pour les stations synoptiques du Niger



La représentation (Figure 28) des anomalies de rendements en grains du maïs par rapport à la période référence, simulées aux horizons 2039, 2069 et 2099 dans les différentes stations synoptiques du Niger montre une augmentation des rendements pour la plupart des sites à l'exception de Magaria (RCP 4.5 et RCP 8.5), Mainé Soroa (RCP 4.5) et Zinder (RCP 8.5).

Figure 28. Anomalies de rendements en grains du maïs aux horizons 2039-2069-2099.

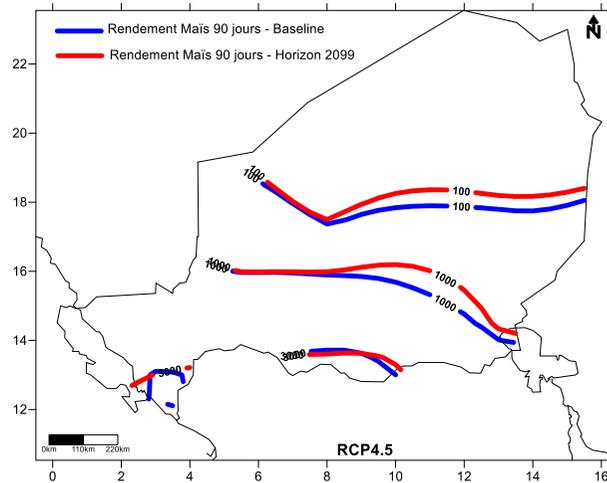
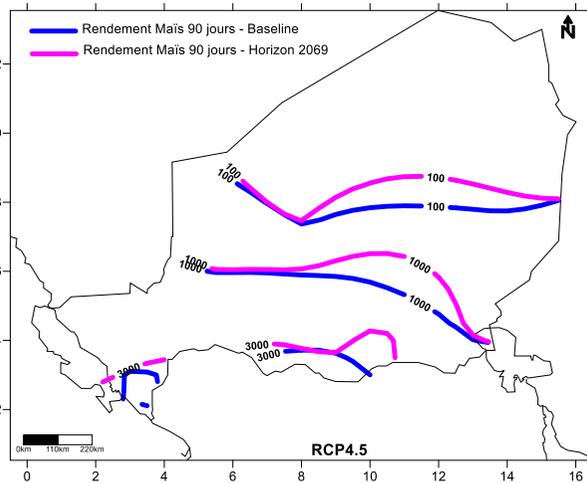
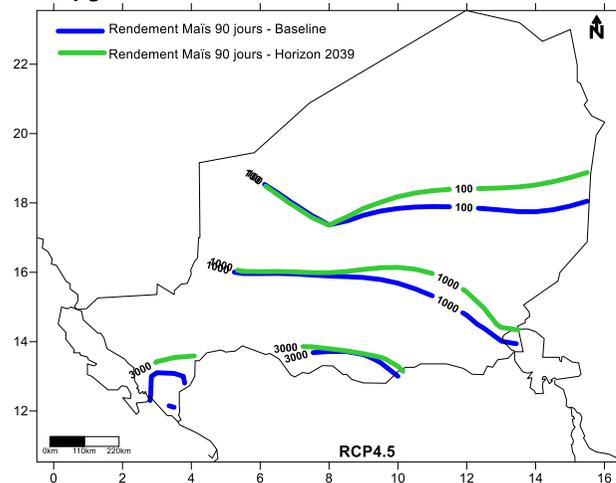


La représentation de l'évolution des isolignes de rendements (100 kg/ha ; 1000 kg/ha et 3000 kg/ha) pour le maïs aux horizons 2039-2069-2099 (Figure 29) montre :

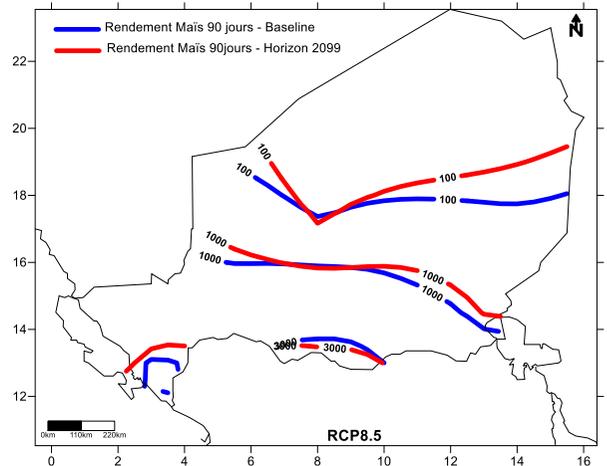
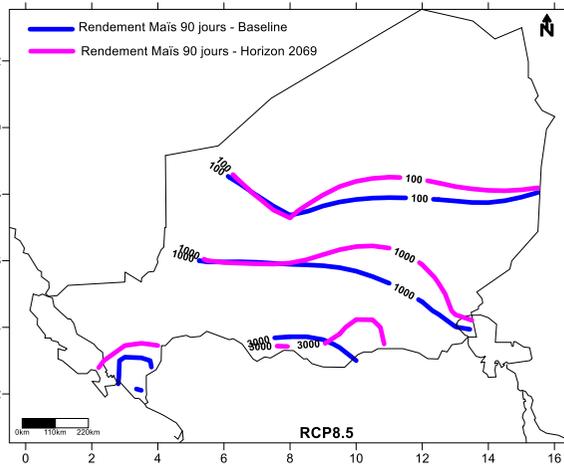
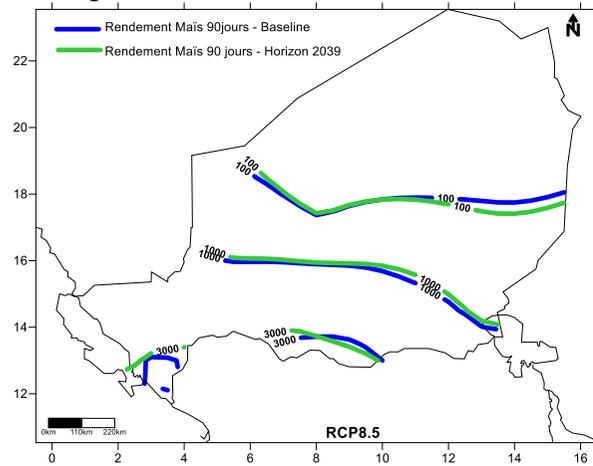
- Pour l'horizon 2039, des isolignes des rendements pratiquement superposées à celles de la période de référence, à l'exception des zones de Boboye et Dogondoutchi ;
- Pour les horizons 2069 et 2099, un déplacement vers le nord des isolignes de rendement 100, 1000 et 3000 kg/ha, plus particulièrement marqué dans les régions de Dosso, de Gouré et au nord de Mainé Soroa.

Figure 29. Evolution des isolignes de rendement en grains du maïs par rapport à la période référence aux horizons 2039, 2069 et 2099 (RCP 4.5 et RCP 8.5).

RCP 4.5



RCP 8.5



3.2.6. Eléments de discussion

La simulation à l'aide du modèle SARRA-H du rendement en grains des céréales permet de prédire des tendances contrastées selon la céréale considérée (Tableau 10), avec :

- **une baisse des rendements du mil 90 jours** de 1% (RCP 4.5) à 4% (RCP 8.5) sur le court terme (2039), s'amplifiant avec le temps pour atteindre une fourchette comprise entre 16% (RCP 4,5) et 31% (RCP 8.5) sur le long terme (2099) ;
- **une baisse des rendements en grains du sorgho** comprise entre 12% (RCP 4.5) et 15% (RCP 8.5) dans le court terme, s'amplifiant avec le temps pour atteindre 28 à 40% sur le long terme ;
- **un accroissement des rendements du mil photopériodique** dans une fourchette comprise entre 16% (RCP 8.5) et 19% (RCP 4.5) dans le court terme, pour atteindre sur le long terme (2099) une fourchette comprise entre 13% (RCP 8.5) et 23% (RCP 4.5) d'accroissement par rapport aux rendements de référence sur la période 1981 – 2010 ;
- **un accroissement des rendements en grains du maïs** dans une fourchette comprise entre 15% et 19% sur le court terme (2039), s'atténuant ensuite avec le temps pour atteindre sur le long terme (2099) un accroissement compris entre 7% (RCP 4.5) et 14% (RCP 8.5) des rendements sur la période de référence 1981 2010 ;
- à court terme (horizon 2039), **un déplacement vers le nord** de 50 à 400 km des isolignes de faible productivité des mils 90 jours et photopériodiques (100 et 500 kg/ha) et du maïs (100 et 1000 kg/ha), correspondant à une extension limitée des surfaces potentiellement utilisables pour la production de céréales pluviales ;
- à court terme (horizon 2039), **un déplacement vers le sud** des isolignes de forte productivité (1000 kg/ha) du mil 90 jours et du sorgho, traduisant une diminution des performances de ces deux cultures dans la zone agricole.

Tableau 10. Synthèse de l'impact des changements climatiques sur les rendements grain du mil, du sorgho et du maïs 90 jours par rapport à la période de référence 1981-2010

Culture	Impact sur le rendement à l'horizon 2039	Remarques horizon 2039	Impact sur le rendement à l'horizon 2099	Remarques horizon 2099
Mil 90 jours	-1% à -4%	Déplacement vers le N des isolignes de faible productivité (100 à 500 kg/ha), Déplacement vers le S des isolignes de forte productivité (1000 kg/ha)	-16% à -31%	Déplacement vers le N des isolignes de faible productivité (100 kg/ha) = extension potentielle de la zone de culture du mil
Mil photopériodique	+16% à +19%	Déplacement vers le N des isolignes de faible productivité (100 à 500 kg/ha) et de forte productivité (1000 kg/ha)	+13 à +23%	
Sorgho	-12% à -15%	Déplacement vers le S des isolignes de forte productivité (1000 kg/ha)	-28% à -40%	Déplacement vers le S des isolignes de faible productivité (500 kg/ha) = réduction potentielle de la zone favorable à la culture du sorgho
Maïs	+15 à +19%	-	+7% à +14%	Déplacement vers le N des isolignes de faible productivité (100 à 1000 kg/ha)

Les résultats obtenus sont globalement cohérents avec ceux issus des travaux de Sarr et al. (2007) et CILSS/CRA (2009), qui prédisent, à pluviométrie équivalente, une baisse des rendements du mil et du sorgho de plus 10 % en cas d'augmentation des températures de 2°C, et de 15 à 25% en cas d'augmentation des températures de 3°C. Ils sont également cohérents avec les projections du CGIAR (2012) qui prévoient une baisse des rendements du sorgho pluvial de 5% à 25% d'ici 2050 par comparaison aux rendements obtenus dans les années 2000.

Ces résultats sont aussi globalement cohérents avec les prédictions régionalisées proposées par l'IFAD pour le RCP 8.5 à partir de l'expérience ISMIP (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project - Fast Track output), dont les résultats, reproduits ci-dessous (Figures 30 à 35), sont librement accessibles à travers l'outil « Climate Adaptation in Rural Development Assesment Tool (CARD West Africa) ».

Figure 30. Evolution projetée des rendements des cultures pluviales dans la région de Tillabéri à l'horizon 2050 par comparaison à 2010, d'après IFAD, 2019 : CARD West Africa.

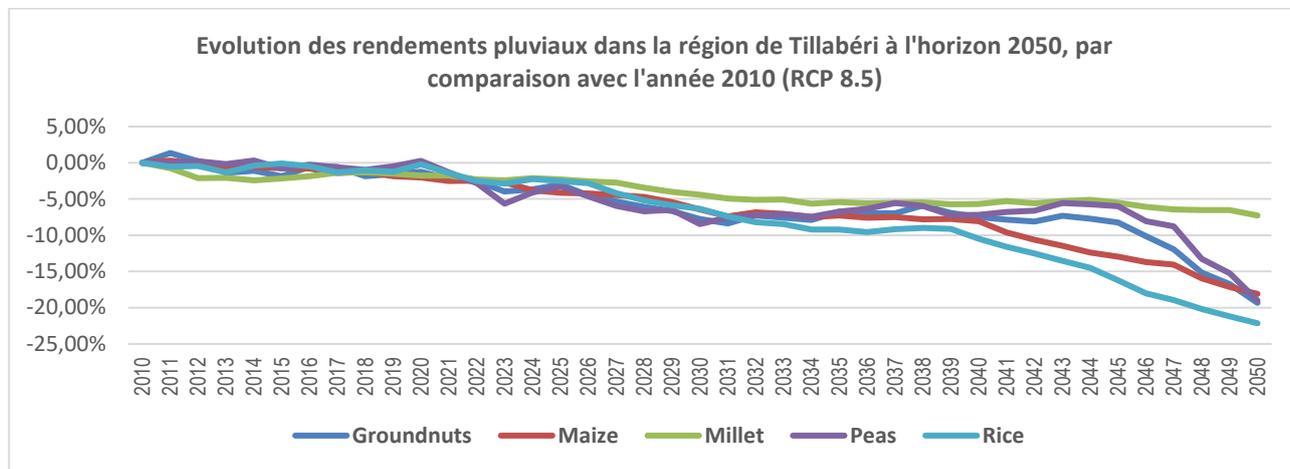


Figure 31. Evolution projetée des rendements des cultures pluviales dans la région de Tahoua à l'horizon 2050 par comparaison à 2010, d'après IFAD, 2019 : CARD West Africa.

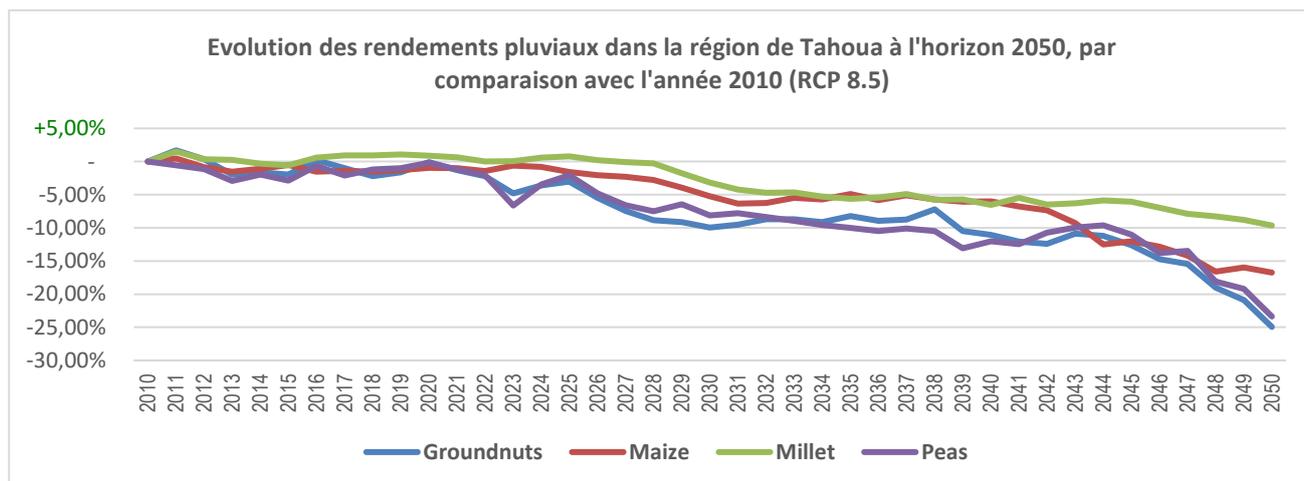


Figure 32. Evolution projetée des rendements des cultures pluviales dans la région de Dosso à l'horizon 2050 par comparaison à 2010, d'après IFAD, 2019 : CARD West Africa.

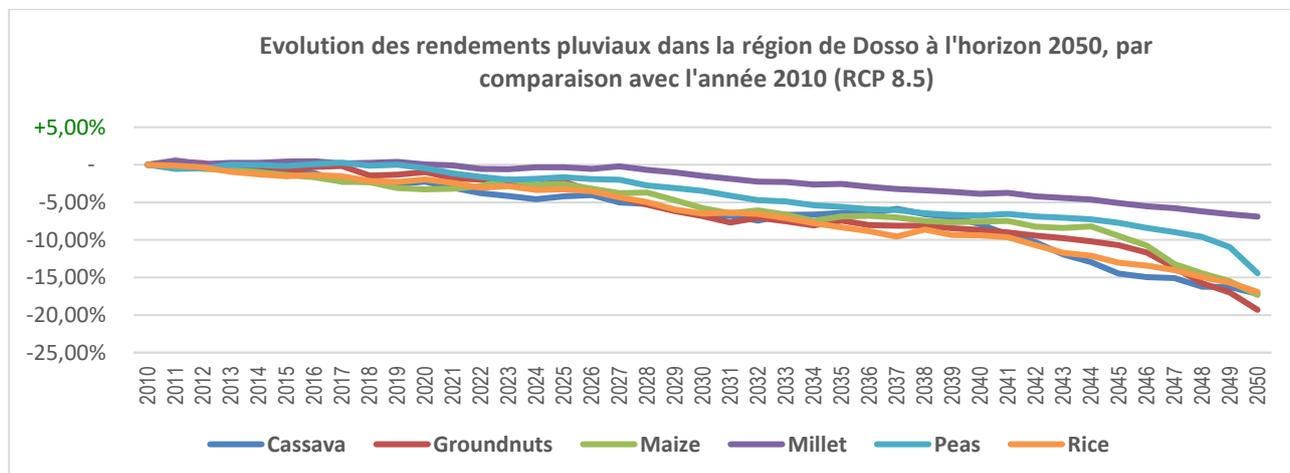


Figure 33. Evolution projetée des rendements des cultures pluviales dans la région de Maradi à l'horizon 2050 par comparaison à 2010, d'après IFAD, 2019 : CARD West Africa.

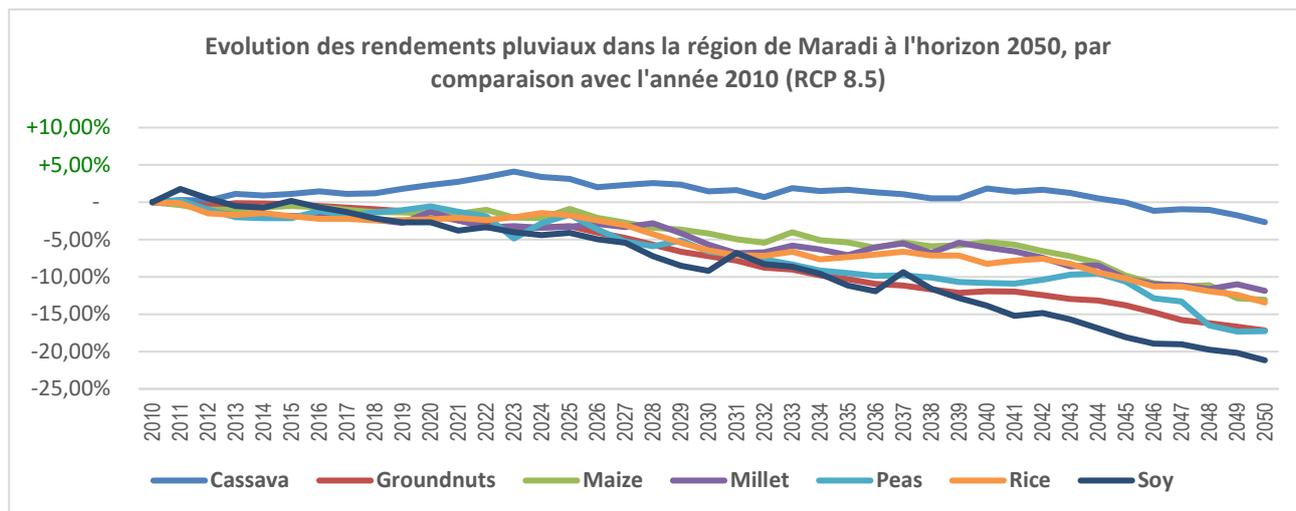


Figure 34. Evolution projetée des rendements des cultures pluviales dans la région de Zinder à l'horizon 2050 par comparaison à 2010, d'après IFAD, 2019 : CARD West Africa.

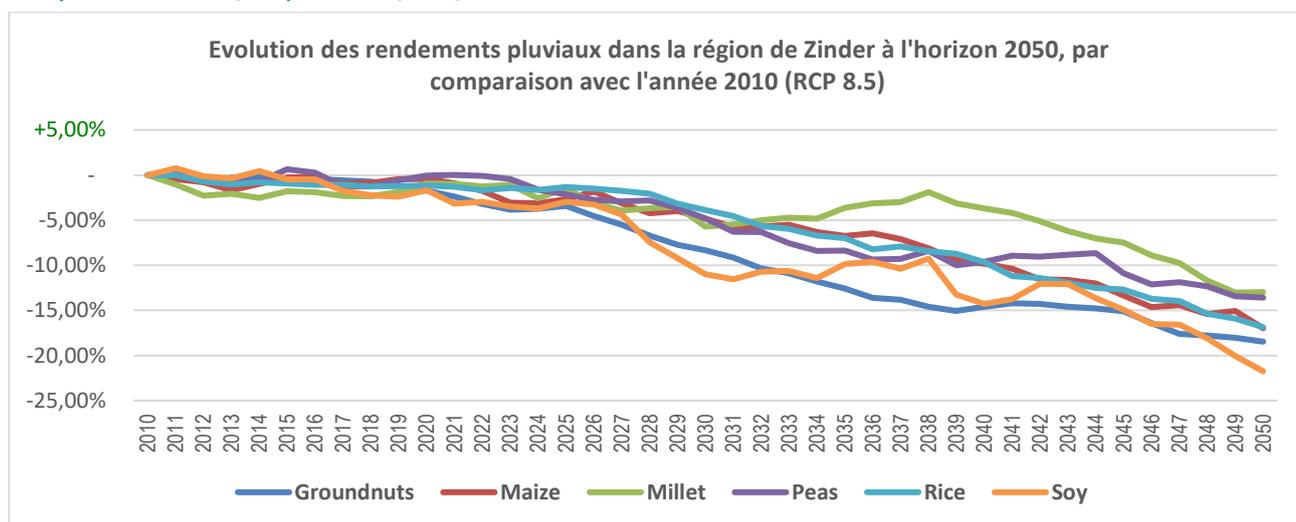
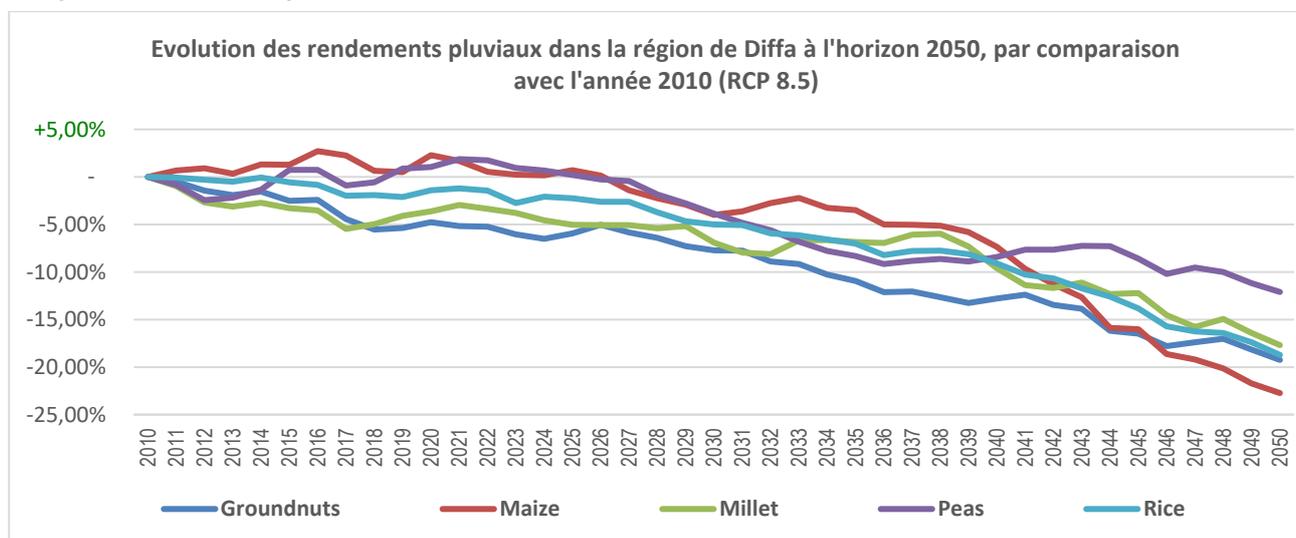


Figure 35. Evolution des rendements des cultures pluviales dans la région de Diffa à l'horizon 2050 par comparaison à 2010, d'après IFAD, 2019 : CARD West Africa.



Source: IFAD, Climate Adaptation in Rural Development assessment tool, 2019

3.3. Impacts du changement climatique sur les rendements en biomasse aérienne des céréales pluviales

3.3.1. Potentiels de rendements en biomasse aérienne des céréales pluviales

La simulation du potentiel de rendement céréalier moyen en biomasse aérienne (kg MS.ha⁻¹, toutes céréales confondues, toutes stations synoptiques confondues), montre qu'en moyenne (Tableau 11) :

- Le potentiel de rendement en biomasse aérienne avec le scénario RCP4.5 est supérieur à celui obtenu avec le RCP8.5, et ce quel que soit l'horizon considéré (2039, 2069 ou 2099) ;
- Le potentiel maximum de rendement en biomasse aérienne est obtenu à l'horizon 2039 pour le RCP4.5 (3051,3 kg MS/ha) ;
- Le potentiel minimum de rendement en biomasse aérienne est obtenu à l'horizon 2099 pour le RCP8.5 (2312,9 kg MS/ha) ;
- Le potentiel de rendement en biomasse aérienne diminue quel que soit le RCP considéré, pour tous les horizons temporels ;
- La diminution du potentiel de rendement en biomasse aérienne varie de -3% (RCP4.5, horizon 2039) à -26% (RCP 8.5, horizon 2099) ;
- Une trajectoire de réchauffement correspondant à une augmentation du forçage radiatif de 4 points (RCP 8.5 – RCP 4.5) se traduirait par des baisses des rendements moyens en biomasse aérienne des céréales pluviales, respectivement de 91,4 kg MS.ha⁻¹ à l'horizon 2039 ; 198,9 kg MS.ha⁻¹ à l'horizon 2069 et 337 kg MS.ha⁻¹ à l'horizon 2099.

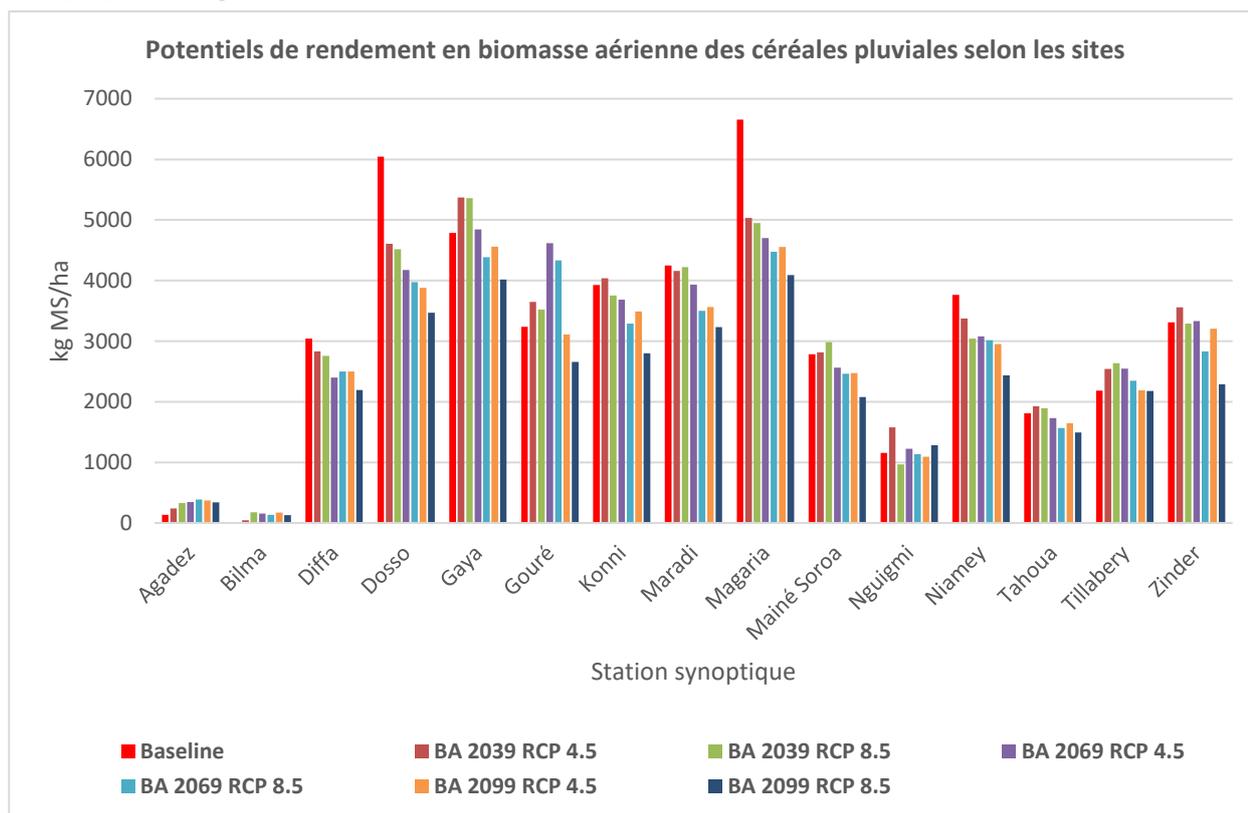
Tableau 11. Rendements simulés en biomasse aérienne des céréales pluviales aux horizons 2039-2069-2099, comparés à la référence (toutes céréales et toutes stations confondues, en kg/ha)

	Référence	RCP4.5			RCP8.5		
	1981-2010	2039	2069	2099	2039	2069	2099
Rendement moyen (kg MS/ha)	3139,8	3051,3	2888,8	2650,8	2959,9	2689,9	2312,9
Ecart Type (kg MS/ha)	1916,8	1590,1	1517,8	1362,2	1574,9	1395,5	1168,3
Différence / référence (kg MS/ha)		-88,4	-250,9	-489,0	-179,9	-449,8	-826,9
Variation / référence (%)		-3	-8	-16	-6	-14	-26

La simulation du potentiel de rendement des céréales pluviales en biomasse aérienne (kg MS / ha, toutes céréales confondues, tous modèles climatiques confondus) pour chacune des 15 stations synoptiques (Figure 36), montre les résultats suivants :

- Le potentiel maximum de rendement en biomasse aérienne des céréales pluviales s'observe à Magaria, Dosso et Gaya ;
- Le potentiel minimum de rendement en biomasse aérienne des céréales pluviales s'observe à Bilma, Agadez et Nguimi ;
- Les potentiels de rendement en biomasse aérienne des céréales pluviales, projetés aux différents horizons temporels, sont toujours inférieurs à ceux obtenus pour la période de référence à Diffa, Dosso, Maradi, Magaria et Niamey. Ces potentiels de rendement diminuent par ailleurs avec le temps ;
- A l'inverse, les rendements grains projetés aux différents horizon temporels sont toujours supérieurs à ceux de la période de référence à Agadez, Bilma, et Tillabéri.

Figure 36. Rendements potentiels en biomasse aérienne des céréales pluviales simulés pour les stations synoptiques du Niger à différents horizons temporels



3.3.2. Rendements en biomasse aérienne du mil 90 jours

Toutes stations confondues, les rendements simulés en biomasse aérienne du mil 90 jours (Tableau 12) :

- Diminuent de 10% (RCP 4.5) à 13% (RCP 8.5) par rapport à la référence à l’horizon 2039 ;
- Diminuent de 20% (RCP 4.5) à 29 % (RCP 8.5) par rapport à la référence à l’horizon 2059 ;
- Diminuent de 30% (RCP 4.5) à 46% (RCP 8.5) par rapport à la référence à l’horizon 2099 ;
- Une trajectoire de réchauffement global correspondant à une augmentation du forçage radiatif de 4 points (RCP 8.5 – RCP 4.5) se traduirait par des baisses des rendements moyens en biomasse aérienne du mil 90 jours, respectivement de 68,8 kg MS.ha⁻¹ à l’horizon 2039 ; 226,1 kg MS.ha⁻¹ à l’horizon 2069 ; et 386 kg MS.ha⁻¹ à l’horizon 2099.

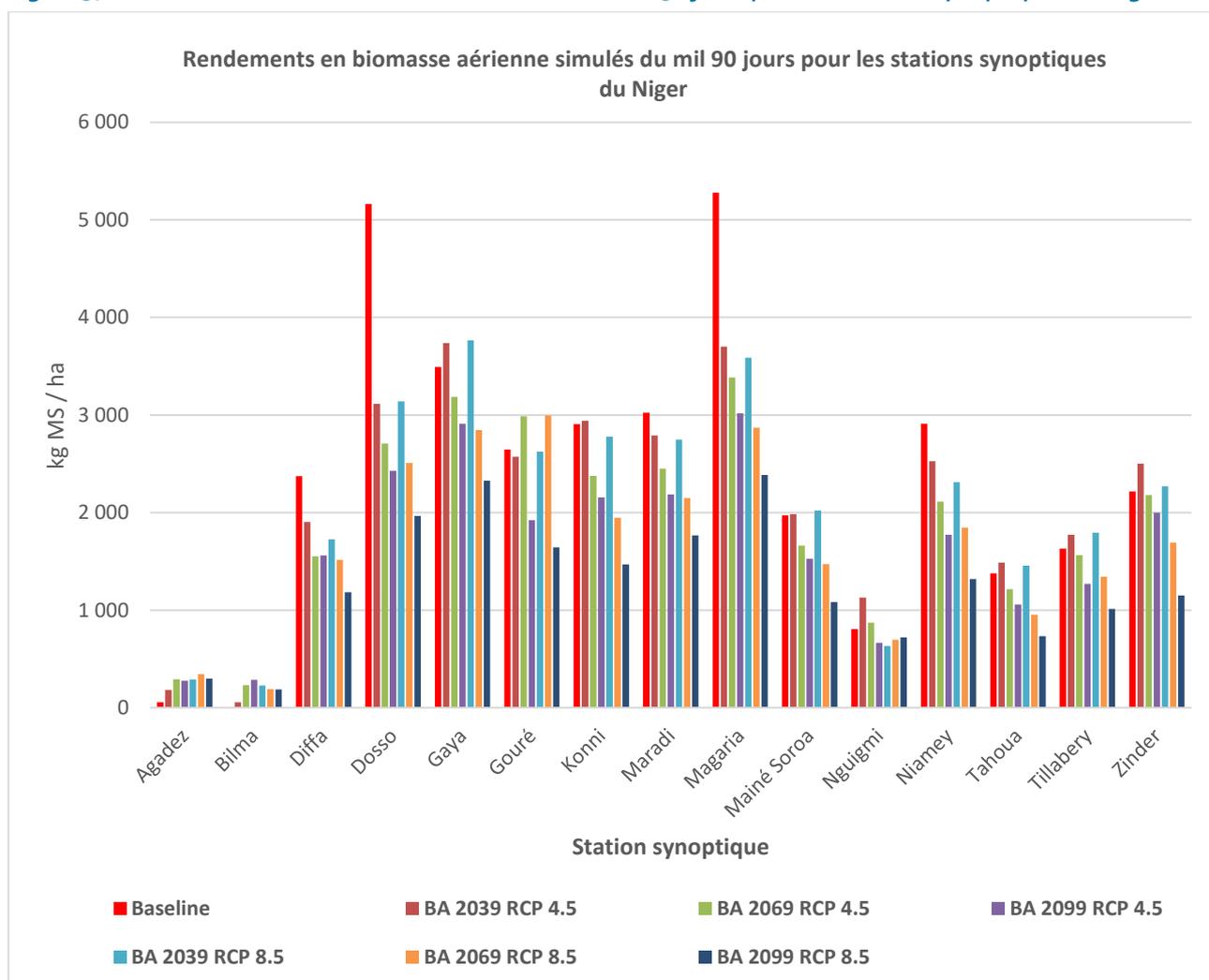
Tableau 12. Rendements en biomasse aérienne simulés pour le mil 90 jours, comparés à ceux de la période de référence, toutes stations confondues

	Référence	RCP4.5			RCP8.5		
	1981-2010	2039	2069	2099	2039	2069	2099
Rendement moyen (kg MS /ha)	2390,5	2160,2	1917,9	1669,6	2091,4	1691,8	1283,6
Ecart Type	1552,3	1111,8	983,4	847,0	1098,4	894,0	660,3
Différence / référence (kg MS/ha)		-230,3	-472,6	-720,9	-299,1	-698,7	-1106,9
Variation / référence (%)		-10	-20	-30	-13	-29	-46

L'impact du changement climatique sur les rendements en biomasse aérienne du mil 90 jours varie selon la station synoptique (Figure 37). La modélisation des rendements en biomasse aérienne du mil 90 jours aux horizons 2039, 2069 et 2099, pour chaque station synoptique, donne les résultats suivants :

- Sur le long terme (2099), les rendements en biomasse aérienne du mil 90 jours diminuent dans toutes les stations excepté Agadez et Bilma ;
- A Agadez et Bilma, les rendements en biomasse aérienne du mil 90 jours augmentent par rapport à la référence quel que soit l'horizon temporel et le scénario RCP considéré ;
- A Diffa, Dosso, Magaria, Maradi et Niamey, les rendements en biomasse aérienne du mil diminuent par rapport à la référence quel que soit l'horizon temporel et le scénario RCP considéré, et cette diminution s'accroît avec le temps.

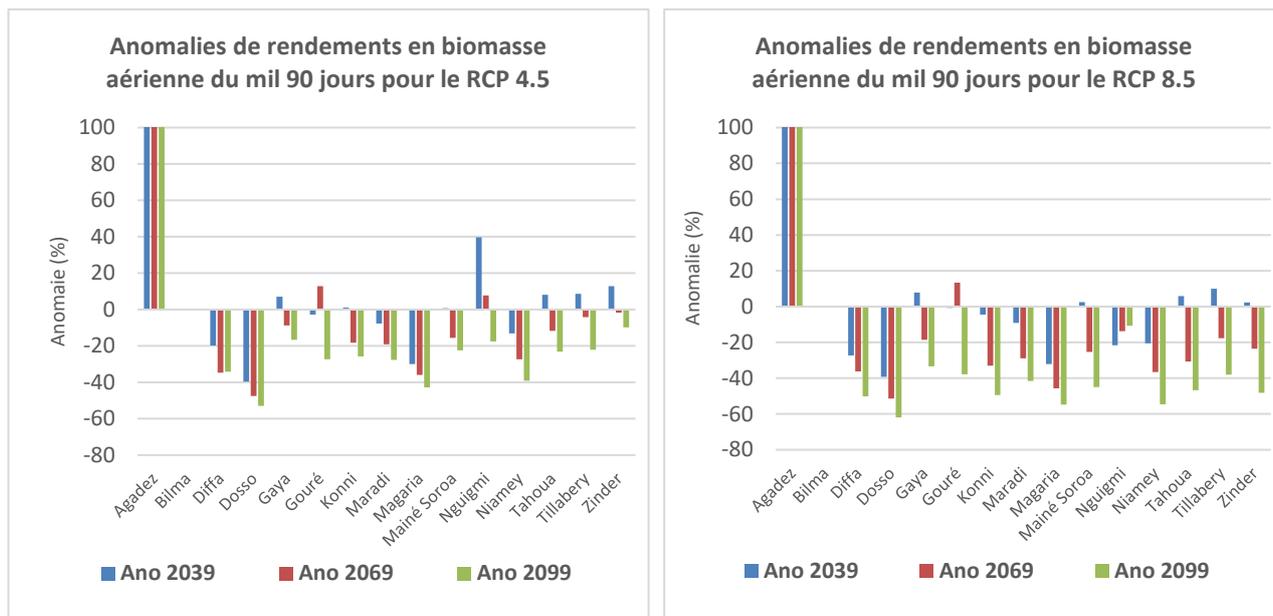
Figure 37. Rendements simulés en biomasse aérienne du mil 90 jours pour les stations synoptiques du Niger



La représentation (Figure 38) des anomalies de rendements en biomasse aérienne du mil 90 jours simulées aux horizons 2039, 2069 et 2099 dans les différentes stations synoptiques du Niger montre une diminution des rendements en biomasse aérienne sur le moyen terme (2069) dans la quasi-totalité des stations synoptiques considérées à l'exception d'Agadez et N'guigmi.

Dans le court terme (2039), les rendements en biomasse aérienne du mil 90 jours augmentent à Agadez, Gaya, Gouré, Tahoua, Tillabéri et Zinder.

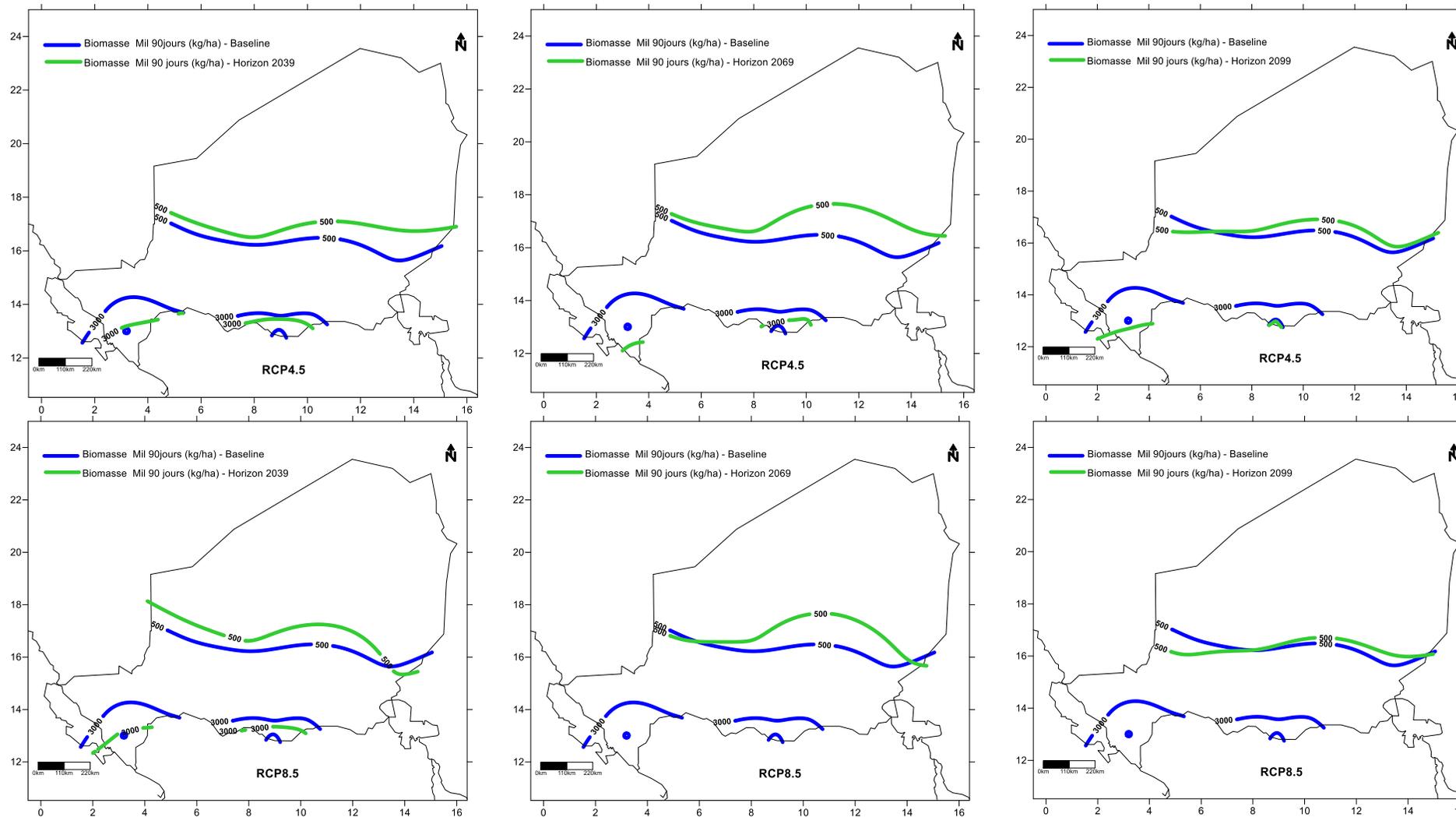
Figure 38. Anomalies de rendements en biomasse aérienne du mil 90 jours par rapport à la période de référence aux horizons 2039-2069-2099 pour les différentes stations synoptiques du Niger



La représentation de l'évolution des isolignes de rendements en biomasse aérienne (500 kg/ha ; 3000 kg/ha) pour le mil 90 jours aux horizons 2039-2069-2099 (Figure 39) montre :

- un déplacement vers le Nord de l'isoligne de rendement en biomasse aérienne 500 kg MS/ha dans le court terme (2039), s'amplifiant sur le moyen terme (2069), avant de régresser vers le Sud dans le long terme pour revenir quasiment à la situation actuelle ;
- un déplacement vers le Sud de l'isoligne de rendement en biomasse aérienne 3000 kg MS/ha dans le court terme (2039), s'amplifiant sur le moyen terme (2069). Ensuite, l'isoligne de rendement en biomasse aérienne 3000 kg MS/ha n'évolue pas significativement entre le moyen et le long terme (2099).

Figure 39. Evolution des isolignes de rendement en biomasse aérienne du mil 90 jours par rapport à la période de référence aux horizons 2039, 2069 et 2099 (RCP 4.5 et RCP 8.5).



3.3.3. Rendements en biomasse aérienne du mil photopériodique

Toutes stations confondues (Tableau 13), les rendements simulés en biomasse aérienne du mil photopériodique :

- Diminuent de 1% (RCP 4.5) à 3% (RCP 8.5) par rapport à la référence à l'horizon 2039 ;
- Diminuent de 5% (RCP 4.5) à 9 % (RCP 8.5) par rapport à la référence à l'horizon 2059 ;
- Diminuent de 10% (RCP 4.5) à 25% (RCP 8.5) par rapport à la référence à l'horizon 2099 ;
- Une trajectoire de réchauffement global correspondant à une augmentation du forçage radiatif de 4 points (RCP 8.5 – RCP 4.5) se traduirait par des baisses des rendements moyens en biomasse aérienne du mil photopériodique, respectivement de 120,4 kg MS.ha⁻¹ à l'horizon 2039 ; 141,6 kg MS.ha⁻¹ à l'horizon 2069 ; et 596,2 kg MS.ha⁻¹ à l'horizon 2099.

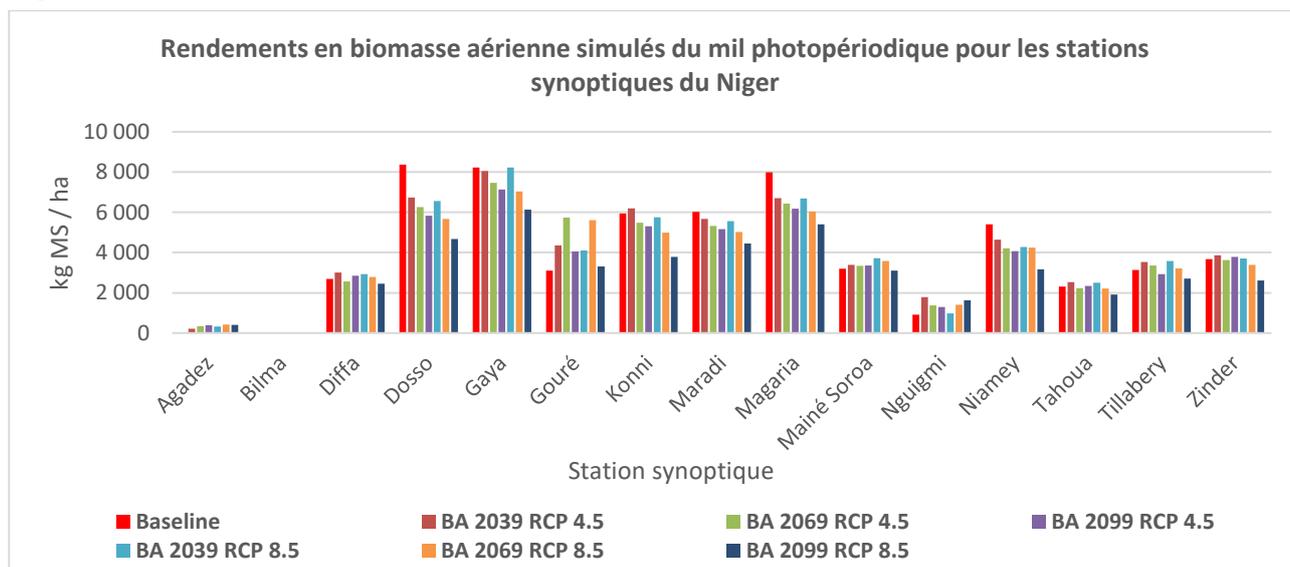
Tableau 13. Rendements en biomasse aérienne simulés pour le mil photopériodique, comparés à ceux de la référence, toutes stations confondues

	Référence	RCP4.5			RCP8.5		
	1981-2010	2039	2069	2099	2039	2069	2099
Rendement moyen (kg MS/ha)	4069,3	4048,0	3850,1	3647,0	3927,6	3708,5	3050,8
Ecart Type	2811,7	2366,6	2270,3	2090,6	2382,8	2085,6	1702,7
Différence / référence (kg MS/ha)		-21,4	-219,3	-422,3	-141,8	-360,8	-1018,6
Variation / référence (%)		-1	-5	-10	-3	-9	-25

La représentation, station par station, des rendements moyens projetés en biomasse aérienne du mil photopériodique (Figure 40) montre des tendances contrastées selon les stations :

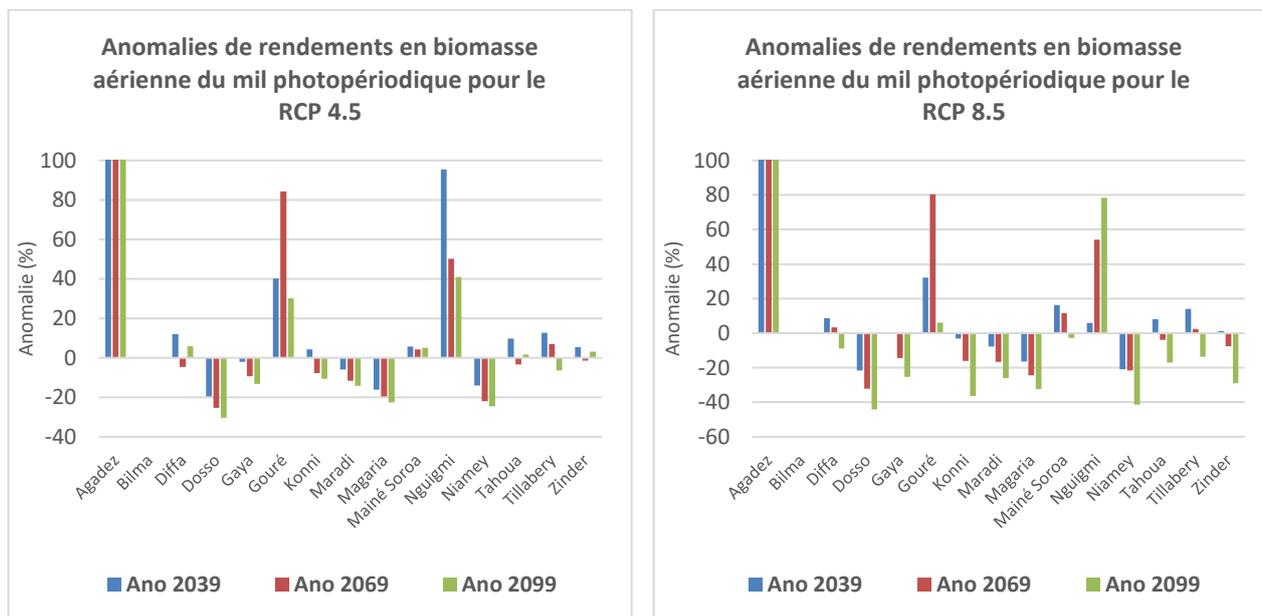
- A Dosso, Maradi, Magaria, Niamey, les rendements en biomasse aérienne décroissent et la diminution de rendement s'amplifie au fur et à mesure du temps ;
- A Diffa, Maine Soroa, Tahoua, Tillabéri et Zinder, les rendements en biomasse aérienne du mil photopériodique évoluent peu sur le court (2039) et le moyen terme (2069) mais décroissent sur le long terme (2099) ;
- A Agadez, Gouré, Maine Soroa et N'guigmi, les rendements en biomasse aérienne du mil photopériodique augmentent sur le court terme, puis les évolutions divergent selon les stations.

Figure 40. Rendements simulés en biomasse aérienne du mil photopériodique pour les stations synoptiques du Niger



La représentation des anomalies de rendement en biomasse aérienne du mil photopériodique (Figure 41) montre également des tendances d'évolution très contrastées selon la station considérée.

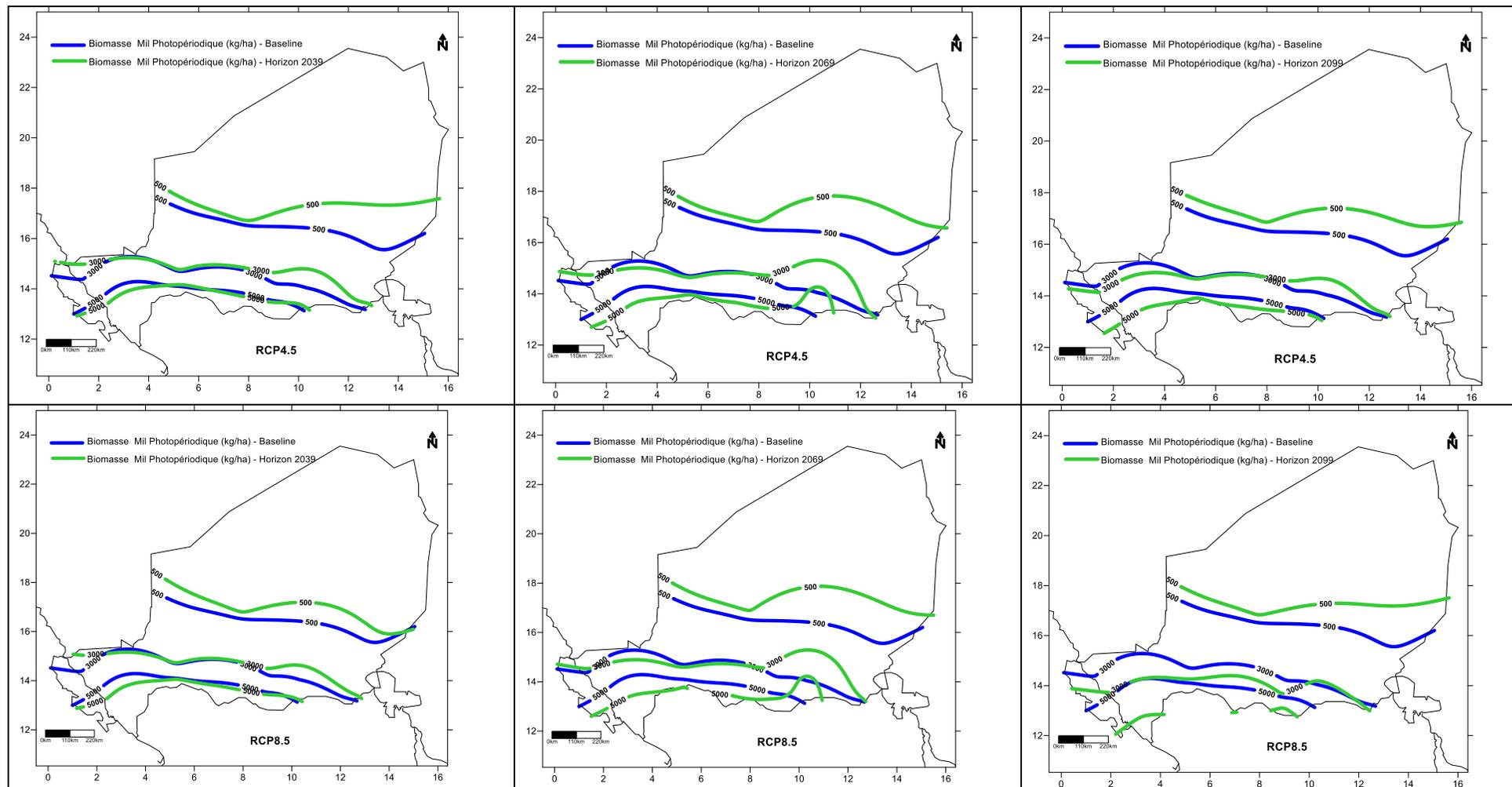
Figure 41. Anomalies de rendements en biomasse aérienne du mil photopériodique par rapport à la période de référence aux horizons 2039-2059-2099 pour les différentes stations synoptiques du Niger



La représentation de l'évolution des isolignes de rendements en biomasse aérienne (500 kg MS/ha ; 3000 kg MS/ha et 5000 kg MS/ha) pour le mil photopériodique aux horizons 2039-2069-2099 (Figure 42) montre :

- un déplacement vers le Nord de l'isoline de rendement en biomasse aérienne 500 kg MS/ha dans le court terme (2039), s'amplifiant sur le moyen terme (2069). L'isoline de rendement en biomasse arienne 500 kgMS/ha n'évolue ensuite pas significativement entre le moyen et le long terme (2099) ;
- pour l'Est du Niger uniquement, un déplacement vers le Nord de l'isoline de rendement en biomasse aérienne 3000 kg MS/ha dans le court terme (2039), s'amplifiant sur le moyen terme (2069) ;
- l'absence de déplacement de l'isoline de rendement en biomasse aérienne 5000 kg MS/ha dans le court terme (2039). Sur le long terme (2099), l'isoline de rendement en biomasse aérienne 3000 kg MS/ha se déplace vers le Sud.

Figure 42. Evolution des isolignes de rendement en biomasse aérienne du mil photopériodique par rapport à la période de référence aux horizons 2039, 2069 et 2099 (RCP 4.5 et RCP 8.5).



3.3.4. Rendements en biomasse aérienne du sorgho 90 jours

Toutes stations confondues (Tableau 14), les rendements simulés en biomasse aérienne du sorgho pluvial de 90 jours :

- Diminuent de 21% (RCP 4.5) à 24% (RCP 8.5) par rapport à la référence à l'horizon 2039 ;
- Diminuent de 29% (RCP 4.5) à 36 % (RCP 8.5) par rapport à la référence à l'horizon 2069 ;
- Diminuent de 39% (RCP 4.5) à 53% (RCP 8.5) par rapport à la référence à l'horizon 2099 ;
- Une trajectoire de réchauffement global correspondant à une augmentation du forçage radiatif de 4 points (RCP 8.5 – RCP 4.5) se traduirait par des baisses des rendements moyens en biomasse aérienne du sorgho, respectivement de 52,1 kg MS.ha⁻¹ à l'horizon 2039 ; 145,6 kg MS.ha⁻¹ à l'horizon 2069 ; et 282,7 kg MS.ha⁻¹ à l'horizon 2099.

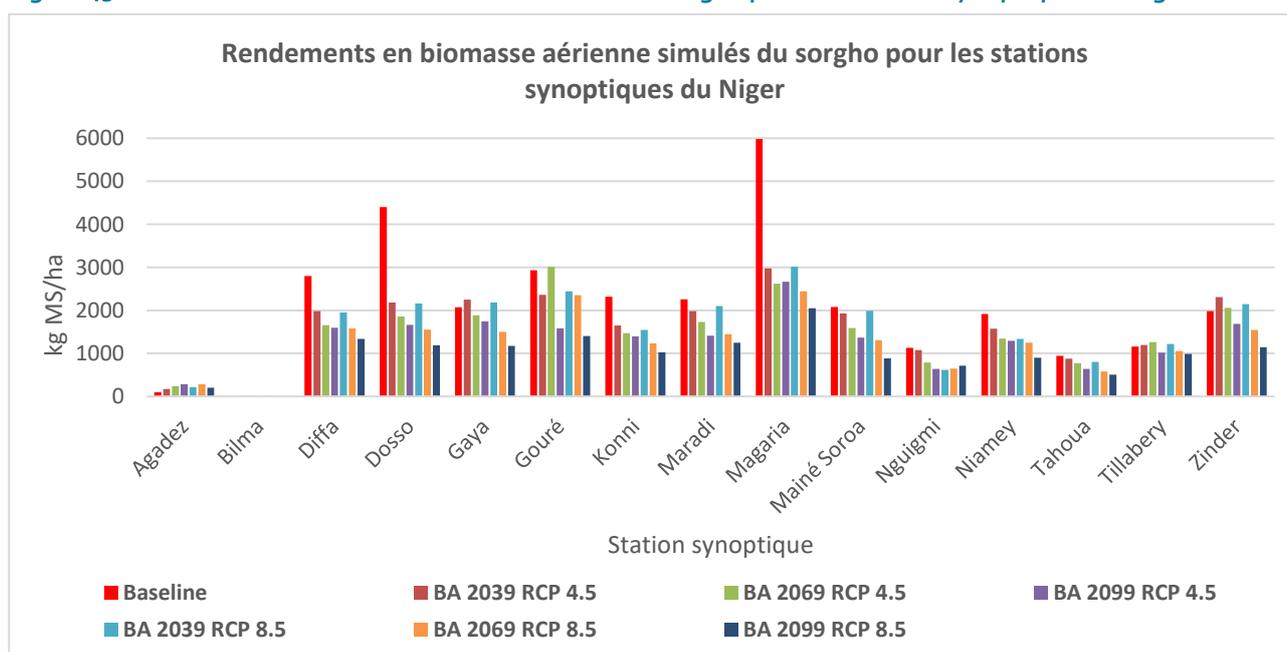
Tableau 14. Rendements en biomasse aérienne simulés pour le sorgho, comparés à ceux de la période de référence, toutes stations confondues

	Référence	RCP4.5			RCP8.5		
	1981-2010	2039	2069	2099	2039	2069	2099
Rendement moyen (kg MS /ha)	2081,2	1635,3	1486,8	1267,5	1583,2	1341,2	984,8
Ecart Type	1525,7	830,4	809,6	665,5	865,1	600,9	500,2
Différence / référence (kg MS/ha)		-445,9	-594,4	-813,7	-498,0	-740,0	-1096,3
Variation / référence (%)		-21	-29	-39	-24	-36	-53

La représentation, station par station, des rendements moyens projetés en biomasse aérienne du sorgho pluvial (Figure 43) montre des tendances différentes selon les stations :

- A Diffa, Dosso, Konni, Maradi, Magaria, Mainé Soroa, N'guigmi, Niamey et Tahoua, les rendements en biomasse aérienne du sorgho diminuent. L'amplitude de la baisse de rendement en biomasse aérienne est plus marquée pour le scénario RCP 8.5 que pour le scénario RCP 4.5, et cette diminution s'accroît avec le temps ;
- A Zinder, les rendements en biomasse aérienne du sorgho augmentent sur le court terme, puis diminuent sur le moyen-long terme, dans une amplitude variable selon le scénario RCP considéré (RCP 4.5 et RCP 8.5).

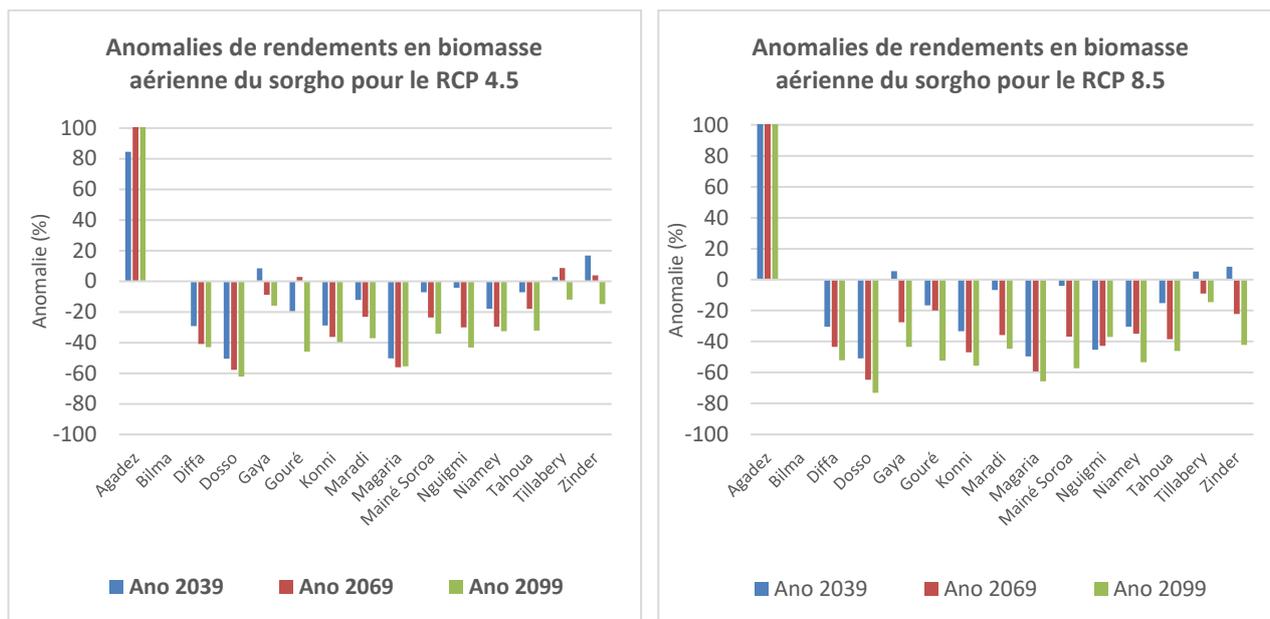
Figure 43. Rendements simulés en biomasse aérienne du sorgho pour les stations synoptiques du Niger



La représentation des anomalies de rendement moyens projetés en biomasse aérienne du sorgho pluvial (Figure 44) montre une diminution des rendements sur le long terme (2099) sauf à Agadez. Sur le long terme, la diminution des rendements en biomasse aérienne du sorgho est plus forte dans le cas du RCP 8.5 que dans le cas du scénario RCP 4.5.

Dans le court terme, les rendements projetés en biomasse aérienne du sorgho pluvial de 90 jours diminuent de plus de 25% à Diffa, Dosso, Konni et Magaria quel que soit le RCP considéré. Dans le cas du RCP 8.5, il en est de même pour les stations de N'guigmi et Niamey.

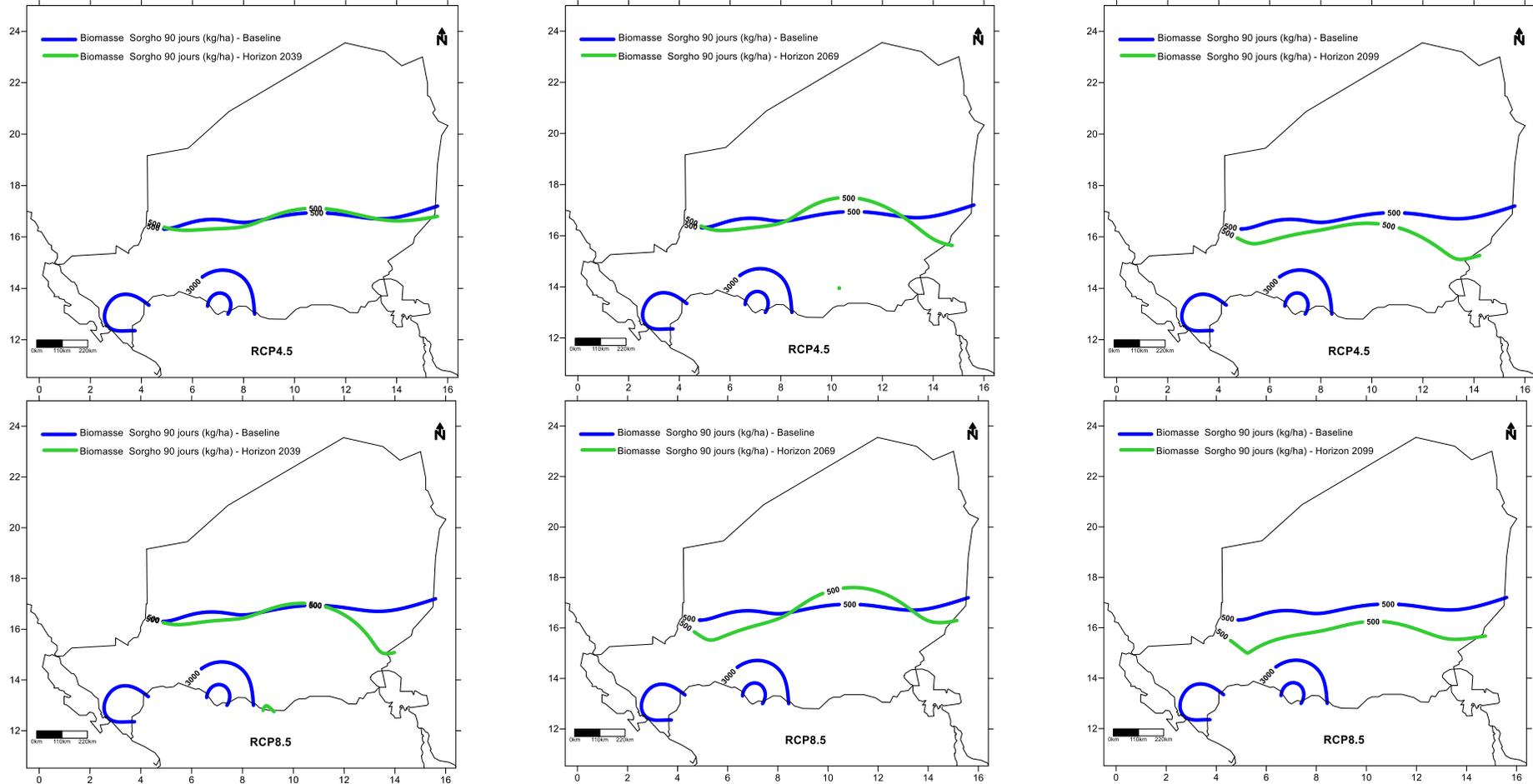
Figure 44. Anomalies de rendement en biomasse aérienne du sorgho par rapport à la référence aux horizons 2039-2069-2099 pour les différentes stations synoptiques du Niger



La représentation (Figure 45) de l'évolution des isolignes de rendements en biomasse aérienne du sorgho pluvial 90 jours aux horizons 2039-2069-2099 montre :

- un déplacement vers le Sud de l'isoline de rendement en biomasse aérienne 500 kg MS/ha dans le court terme (2039) pour l'Est du pays, plus marqué dans le cas du scénario RCP 8.5 que dans le cas du RCP 4.5 ;
- sur le moyen terme, l'isoline de rendement en biomasse aérienne 500 kg se déplace vers Sud à l'Ouest et à l'Est du pays. Dans le centre du pays, cette isoligne se déplace vers le Nord ;
- sur le long terme, l'isoline de rendement en biomasse aérienne 500 kg MS/ha régresse nettement vers le Sud quel que soit le scénario RCP considéré.

Figure 45. Evolution des isolignes de rendement en biomasse aérienne du sorgho 90 jours par rapport à la période référence aux horizons 2039, 2069 et 2099 (RCP 4.5 et RCP 8.5).



3.3.5. Rendements en biomasse aérienne du maïs 90 jours

Toutes stations confondues (Tableau 15), les rendements simulés en biomasse aérienne du maïs :

- Augmentent de 14% (RCP 8.5) à 18% (RCP 4.5) par rapport à la référence à l'horizon 2039 ;
- Demeurent 10% (RCP 8.5) à 16% (RCP 4.5) supérieurs à la référence à l'horizon 2069 ;
- Reviennent quasiment au niveau de la référence à l'horizon 2099 ;
- Une trajectoire de réchauffement global correspondant à une augmentation du forçage radiatif de 4 points (RCP 8.5 – RCP 4.5) se traduirait par des baisses des rendements moyens en biomasse aérienne du maïs 90 jours, respectivement de 162,0 kg MS.ha⁻¹ à l'horizon 2039 et 250,2 kg MS.ha⁻¹ à l'horizon 2069. A l'horizon 2099, un tel réchauffement se traduirait par une hausse du rendement en biomasse aérienne de 197,0 kg MS.ha⁻¹.

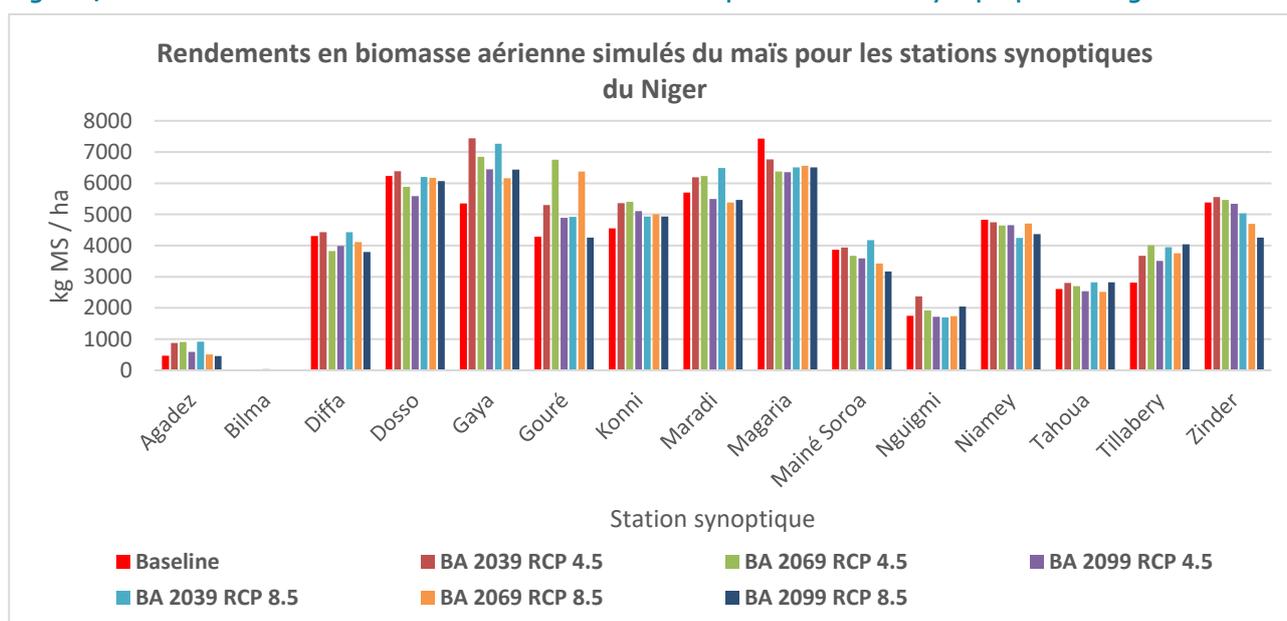
Tableau 15. Rendements en biomasse aérienne simulés pour le maïs, comparés à ceux de la référence, toutes stations confondues

	Référence	RCP4.5			RCP8.5		
	1981-2010	2039	2069	2099	2039	2069	2099
Rendement moyen (kg MS /ha)	3971,1	4703,0	4615,5	3989,9	4541,0	4365,3	4186,9
Ecart Type	2094,9	1832,9	1855,6	1993,1	1821,5	1827,8	1702,8
Différence / référence (kg MS/ha)		731,9	644,4	18,8	569,9	394,2	215,8
Variation / référence (%)		18	16	0	14	10	5

La représentation, station par station, des rendements moyens projetés en biomasse aérienne du maïs pluvial (Figure 46) montre des tendances différentes selon les stations :

- A Magaria et Niamey, les rendements projetés en biomasse aérienne du maïs sont inférieurs à la référence à tous les horizons temporels, et ce quel que soit le scénario RCP considéré ;
- A Agadez, Gaya et Tillabéri, les rendements projetés en biomasse aérienne du maïs sont supérieurs à la référence à tous les horizons temporels, et ce quel que soit le scénario RCP considéré ;
- A N'guigmi et Tahoua, les rendements projetés en biomasse aérienne du maïs demeurent quasiment inchangés à tous les horizons temporels, et ce quel que soit le scénario RCP considéré.

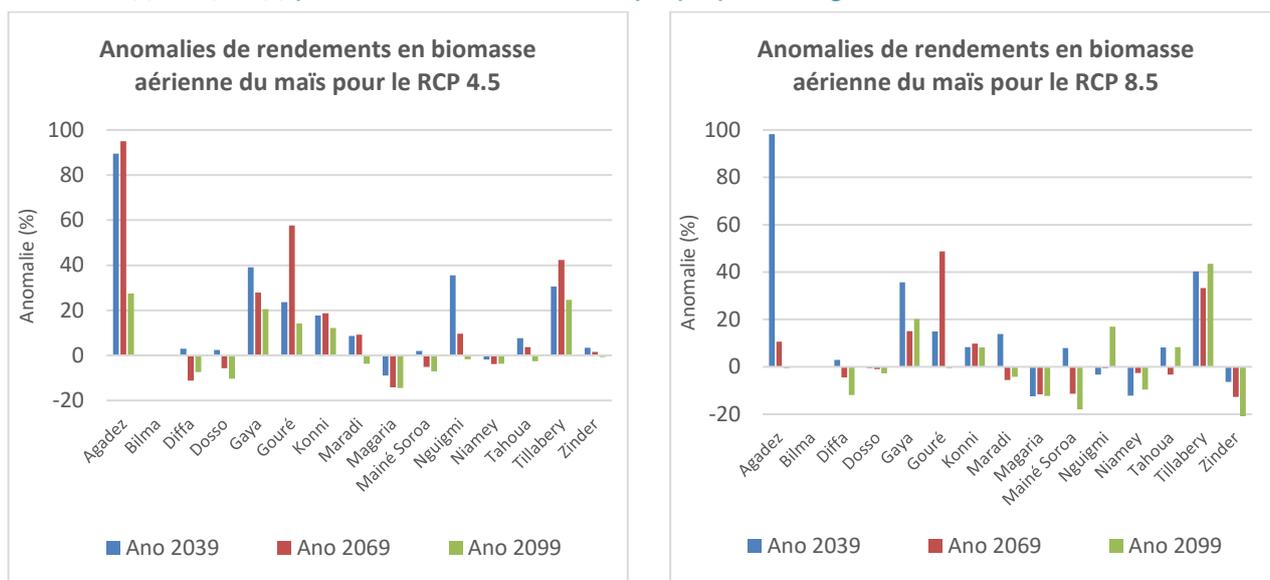
Figure 46. Rendements simulés en biomasse aérienne du maïs pour les stations synoptiques du Niger



La représentation des anomalies de rendements moyens projetés en biomasse aérienne du maïs (Figure 47) montre :

- des anomalies positives de rendements à tous les horizons temporels pour Agadez, Gaya, Konni et Tillabéri (RCP 4.5 et RCP 8.5) ainsi que Gouré dans le cas du RCP 4.5 ;
- une augmentation des rendements en biomasse aérienne du maïs supérieure à 20% dans le court terme (2039) pour les stations d'Agadez, Gaya, et Tillabéri (RCP 4.5 et RCP 8.5), ainsi que Gouré dans le cas du RCP 4.5
- une diminution inférieure à 20% sur le moyen – long terme des rendements en biomasse aérienne du maïs pour les stations de Diffa, Dosso, Magaria, Mainé Soroa, Niamey, et, dans le cas du RCP 8.5, de Zinder

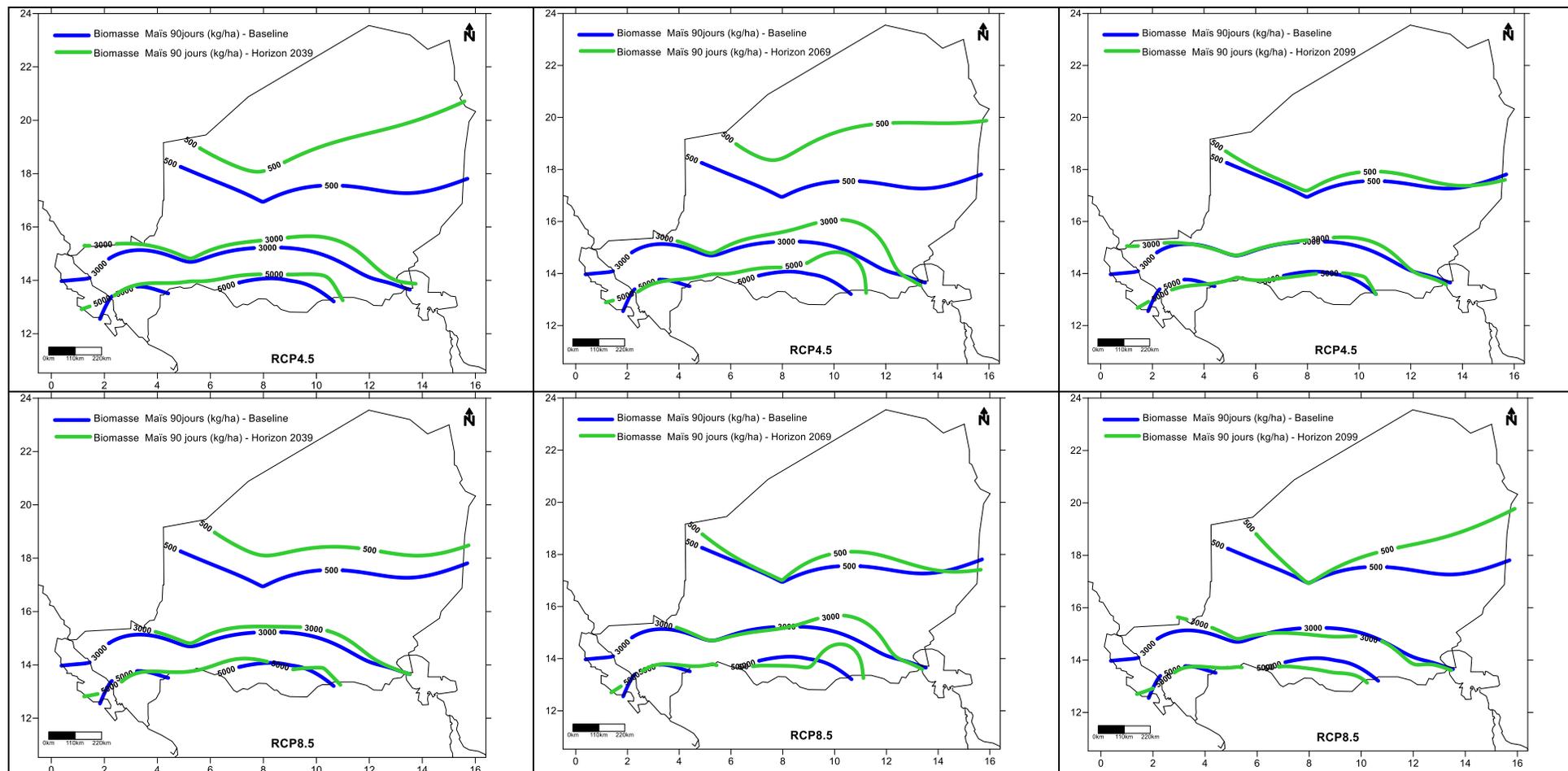
Figure 47. Anomalies de rendements en biomasse aérienne du maïs par rapport à la période de référence aux horizons 2039-2069-2099 pour les différentes stations synoptiques du Niger



La représentation de l'évolution des isolignes de rendements en biomasse aérienne (500 kg MS/ha ; 3000 kg MS/ha et 5000 kg MS/ha) du maïs aux horizons 2039-2069-2099 (Figure 48) montre :

- sur le court terme (2039), un déplacement vers le Nord des isolignes de rendement en biomasse aérienne 500 kg MS/ha et 3000 kg MS/ha, ne s'amplifiant sur le moyen terme (2069) que dans le cas du scénario RCP 4.5
- sur le long terme, une localisation quasi-identique à celle d'aujourd'hui des isolignes de rendement en biomasse aérienne 3000 et 5000 kg MS/ha, sauf dans l'extrême-ouest du pays où l'isoligne de rendement en biomasse aérienne 3000 kg MS/ha se situe plus au Nord qu'aujourd'hui.

Figure 48. Evolution des isolignes de rendement en biomasse aérienne du maïs 90 jours par rapport à la période de référence aux horizons 2039, 2069 et 2099 (RCP 4.5 et RCP 8.5).



3.4. Impacts du changement climatique sur la production de biomasse herbacée

3.4.1. Impact du changement climatique à l'horizon 2050 sur la production potentielle de biomasse herbacée

Les productions potentielles simulées de biomasse herbacée (kg MS.ha⁻¹), toutes stations synoptiques et toutes tendances locales d'évolution du climat confondues (Tableau 16) montre qu'en moyenne :

- la production simulée en biomasse herbacée à l'horizon 2069 augmente de 7,6% (RCP 4.5) à 13,3% (RCP 8.5) par rapport à la production de la période de référence ;
- une trajectoire de réchauffement global correspondant à une augmentation du forçage radiatif de 4 points (RCP 8.5 – RCP 4.5) entraînerait une hausse de la production simulée de biomasse herbacée de 88 kg.ha⁻¹ à l'horizon 2069.
- l'écart type de la production simulée en biomasse herbacée est élevé pour la période de référence (± 520 kg MS/ha) ; et varie peu à l'horizon 2069 (± 588 kg MS/ha) ;
- A l'horizon 2069, le gain moyen en production herbacée représente une capacité de charge additionnelle de 6 à 10 jours pour une UBT de 250 kg sur un hectare.

Tableau 16. Impact du changement climatique à l'horizon 2069 sur la production de biomasse herbacée, toutes stations et toutes projections climatiques locales confondues

	Référence 1981-2010	RCP4.5 2040-2069			RCP 8.5 2040-2069		
		Min	Moy	Max	Min	Moy	Max
Production moyenne (kg MS /ha)	1538	959	1655	3111	1014	1743	3283
Ecart Type	520		557			588	
Différence / référence (kg MS/ha)	-	-579	117	1573	-524	205	1745
Variation / référence (%)	-	-38	8	102	-34	13	113
Capacité de charge moyenne en jours pour 1 UBT.ha-1	82	51	88	166	54	93	175

3.4.2. Impact du changement climatique à l'horizon 2069 sur la production moyenne de biomasse herbacée dans chacune des stations synoptiques

A l'horizon 2069, la production simulée en biomasse herbacée augmente dans toutes les stations (Figures 49, 50 et 51 et annexe 4), dans un intervalle compris :

- entre 6% et 9% dans le cas du scénario RCP 4.5 ;
- entre 10% et 16% dans le cas du scénario RCP 8.5.

La productivité en biomasse herbacée diffère fortement entre les stations prises en compte. Elle est la plus élevée pour les stations de Niamey, Konni et Dosso. Elle est la moins élevée pour les stations d'Agadez, Magaria et Tillabéri.

Les figures 50 et 51 montrent qu'il n'existe pas de corrélation directe entre la production de biomasse herbacée et la pluviométrie annuelle pour les différentes stations simulées.

Ceci s'explique d'abord par les différences de classes / textures de sol affectées aux différentes stations simulées, qui se traduisent par des coefficients différents d'infiltration et de ruissellement.

Ceci s'explique aussi par des facteurs limitants de la productivité de biomasse qui diffèrent entre les stations. A Gaya par exemple, l'azote est considéré par le modèle comme le principal facteur limitant de la productivité de biomasse, tandis qu'à N'guigmi, c'est la disponibilité de l'eau pour les plantes qui limite la productivité herbacée.

Il peut enfin être relevé que le modèle a été développé / calibré / validé pour la zone pastorale et agropastorale, où il peut donc être considéré comme fiable. En revanche, la qualité des simulations est moindre pour les stations situées en dehors de cette zone, par exemple Gaya.

Figure 49. Productivités simulées de biomasse herbacée (kg MS.ha⁻¹) comparées entre la période de référence et la période 2040-2069 pour le RCP 4.5 et le RCP 8.5 dans toutes les stations

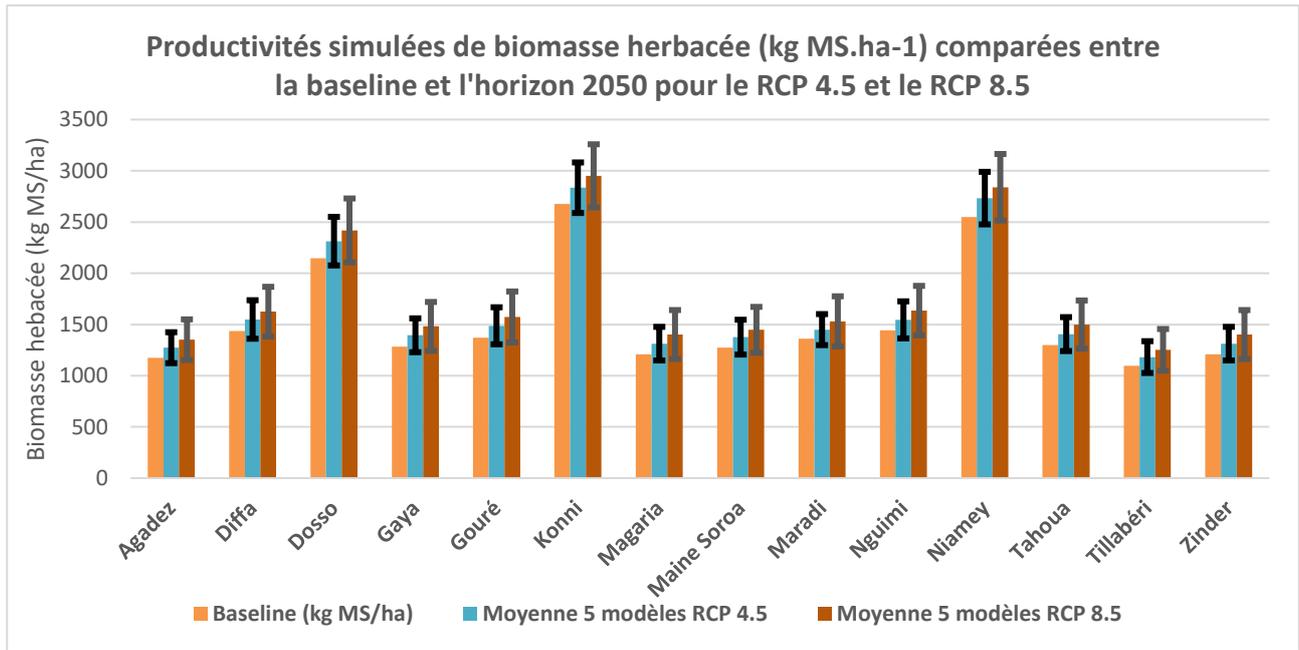
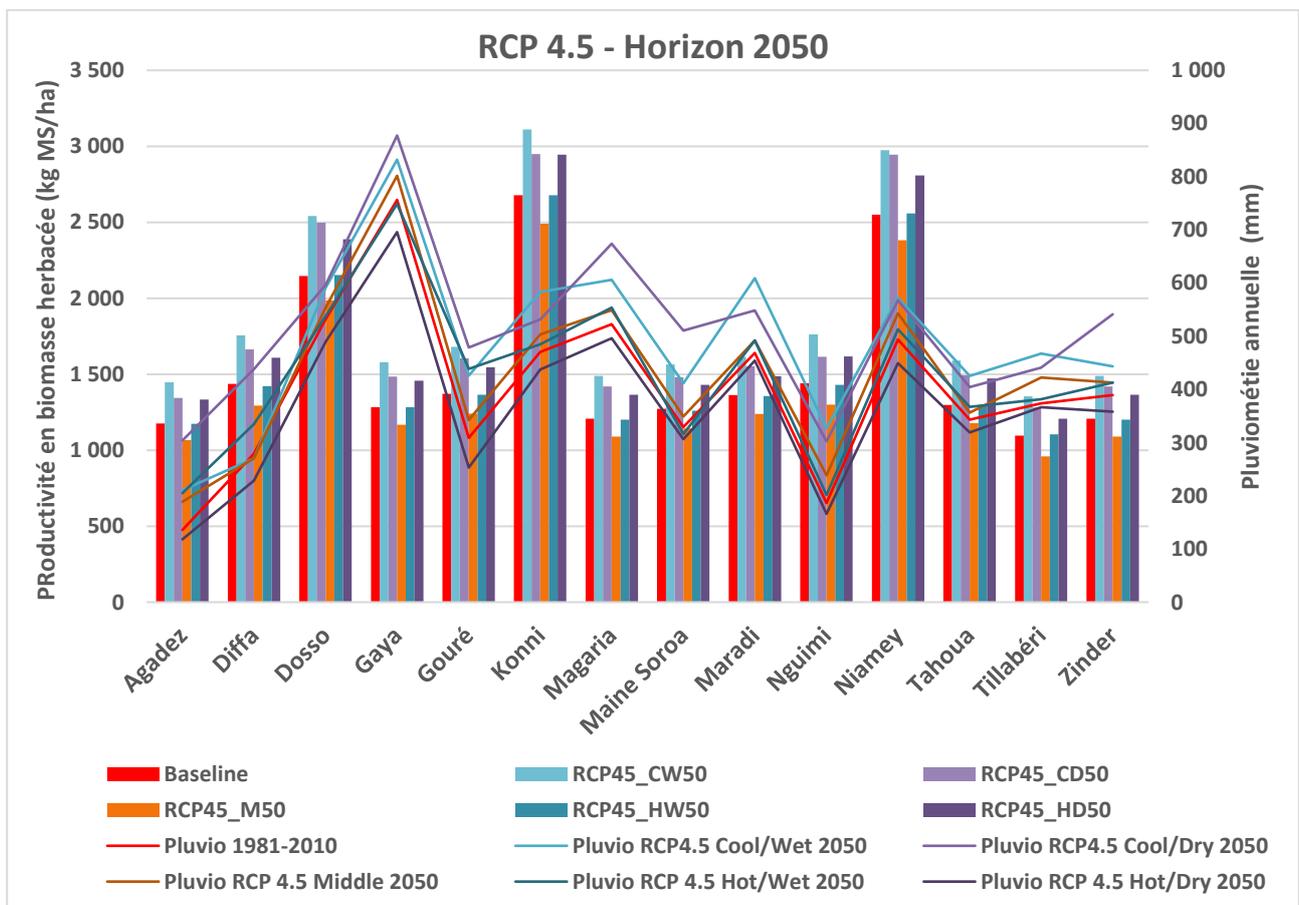
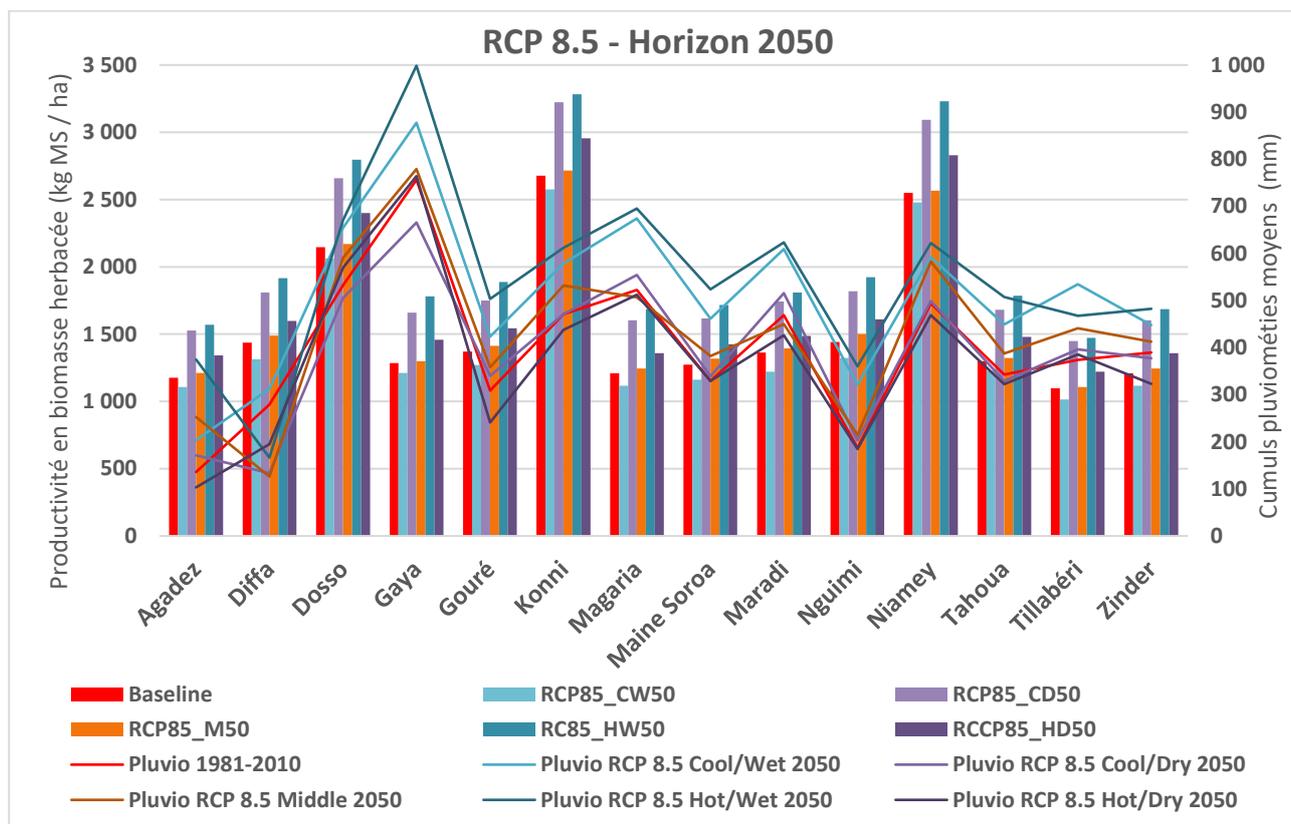


Figure 50. Pluviométrie annuelle (mm) et productivités moyennes en biomasse herbacée (kg MS. ha⁻¹) selon le scénario global RCP 4.5, simulées dans chaque station synoptique pour la période de référence (1981-2010) et pour chacune des 5 tendances de modèles climatiques sur le moyen terme (2040-2069).



M = modèle "middle", HW = modèle "Hot / Wet"; CW = modèle "Cool Wet"; HD = modèle « Hot / Dry » et CD = modèle « Cool / dry »

Figure 51. Pluviométrie annuelle (mm) et productivités moyennes en biomasse herbacée (kg MS. ha⁻¹) selon le scénario global RCP 8.5, simulées dans chaque station synoptique pour la période de référence (1981-2010) et pour chacune des 5 tendances de modèles climatiques sur le moyen terme (2040-2069).



M = modèle "middle", HW = modèle "Hot / Wet" ; CW = modèle "Cool Wet" ; HD = modèle « Hot / Dry » et CD = modèle « Cool / dry »

CONCLUSION

La présente étude avait pour objectif de fournir des projections désagrégées d'impact des changements climatiques sur la production agricole. Nous avons mobilisé des modèles robustes et validés dans le cas du Niger pour évaluer d'une part l'impact des changements démographiques et climatiques sur le risque de dégradation des terres ; d'autre part l'impact des changements climatiques sur les rendements en grain et en biomasse aérienne des principales cultures pluviales pratiquées au Niger, et enfin l'impact des changements climatique sur la productivité en biomasse herbacée.

Nos résultats montrent un risque élevé de dégradation des terres dans le sud du pays, en zone agricole, agropastorale et pastorale, accentué par les évolutions climatiques et démographiques en cours. Ils montrent également :

- une baisse de 12 à 15% des rendements en grains du sorgho sur le court terme, allant jusqu'à 40% sur le long terme ;
- une baisse inférieure à 5% des rendements du mil non photopériodique sur le court terme, allant jusqu'à 31% sur le long terme ;
- une augmentation de 16 à 19% des rendements du mil photopériodique sur le court terme, atteignant 13 à 23% sur le long terme ;
- une augmentation de 15% à 19% des rendements grains du maïs sur le court terme, s'atténuant avec le temps pour atteindre sur le long terme une augmentation comprise entre 7% et 14% des rendements de référence pour la période 1981-2010 ;
- une extension possible vers le Nord des aires de culture du mil ;
- d'importantes variations d'impacts des changements climatiques sur les rendements en grains et en biomasse aérienne selon la station considérée ;
- une augmentation de 6% à 16% de la productivité en biomasse herbacée à l'horizon 2050, représentant en moyenne une capacité de charge additionnelle de 6 à 10 jours pour une UBT.ha⁻¹.

Les principales implications de nos résultats sont :

- la nécessité d'investissements pour maîtriser et réduire les risques élevés de dégradation des terres dans les espaces concernées en zone agricole, agro-pastorale et pastorale ;
- la nécessité de raisonner l'adaptation des systèmes de culture face au changement climatique à des échelles locales et désagrégées ;
- l'existence de marges de manœuvre pour appuyer l'adaptation de l'agriculture face au changement climatique en raisonnant les choix variétaux, en appuyant la reconception de certains systèmes de culture, et en optimisant les calendriers culturaux.

BIBLIOGRAPHIE

La liste de références bibliographiques ci-dessous comprend à la fois les références citées dans le texte et les références consultées lors de la réalisation de ce travail.

- Abdoulaye T., Lowenberg-DeBoer J. (2000). Intensification of Sahelian farming systems: evidence from Niger. *Agricultural Systems*, 64(2), 67-81. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0308-521X\(00\)00014-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0308-521X(00)00014-7)
- Alhassane A., Salack S., Ly M., Lona I., Traoré S. B., Sarr B. (2013). Évolution des risques agroclimatiques associés aux tendances récentes du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 24(4)(4), 282-293. doi: [doi:10.1684/sec.2013.0400](https://doi.org/10.1684/sec.2013.0400)
- Alhassane A., Traoré S. B., Bonnal V., Baron C. (2013). SARRA-H. Modèle de simulation de la croissance des cultures. Guide l'utilisateur.
- Akanvou I., Akanvou R., Koffi C., Saraka D. (2009). Evaluation agronomique des variétés de maïs riches en protéines de qualité (MRP) en station et en milieu paysan dans la zone forestière de côte d'ivoire. *Agronomie Africaine* 21 (3) : 309 - 317 (2009)
- Aune J. B., Coulibaly A., Giller K. E. (2017). Precision farming for increased land and labour productivity in semi-arid West Africa. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(3), 16. doi: [10.1007/s13593-017-0424-z](https://doi.org/10.1007/s13593-017-0424-z)
- Barbier B., Yacouba H., Karambiri H., Zoromé M., Somé, B. (2009). Human Vulnerability to Climate Variability in the Sahel: Farmers' Adaptation Strategies in Northern Burkina Faso. *Environmental management*, 43(5), 790-803. doi: [10.1007/s00267-008-9237-9](https://doi.org/10.1007/s00267-008-9237-9)
- Bayala J., Sanou J., Teklehaimanot Z., Kalinganire A., Ouédraogo S. J. (2014). Parklands for buffering climate risk and sustaining agricultural production in the Sahel of West Africa. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6, 28-34. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.10.004>
- Bayala J., Sileshi G. W., Coe R., Kalinganire A., Tchoundjeu Z., Sinclair F., Garrity D. (2012). Cereal yield response to conservation agriculture practices in drylands of West Africa: A quantitative synthesis. *Journal of Arid Environments*, 78, 13-25. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.10.011>
- Becker M., Johnson D. E., Wopereis M. C. S., Sow A. (2003). Rice yield gaps in irrigated systems along an agro-ecological gradient in West Africa. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 166(1), 61-67. doi: [10.1002/jpln.200390013](https://doi.org/10.1002/jpln.200390013)
- Ben Mohamed A., van Duivenbooden N., Abdoussallam S. (2002). Impact of Climate Change on Agricultural Production in the Sahel – Part 1. Methodological Approach and Case Study for Millet in Niger. *Climatic Change*, 54: 327-348
- CILSS (2016). Les Paysages de l'Afrique de l'Ouest : Une Fenêtre sur un Monde en Pleine Évolution. U.S. Geological Survey EROS, 47914 252nd St, Garretson, SD 57030, United States of America.
- CILSS / Centre Régional AGRHYMET (2016). Lutte contre le changement climatique : les réalisations du CILSS.
- CILSS / Centre Régional AGRHYMET (2010). Le Sahel face au Changement Climatique. Enjeux pour un développement durable. Niamey (Niger), 42 p.
- Crane T. A., Roncoli C., Hoogenboom G. (2011). Adaptation to climate change and climate variability: The importance of understanding agriculture as performance. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 57(3), 179-185. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.njas.2010.11.002>
- de Rouw A. (2004). Improving yields and reducing risks in pearl millet farming in the African Sahel. *Agricultural Systems*, 81(1), 73-93. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2003.09.002>
- Erdenetuya M. (2004). Application of remote sensing in climate change study: vulnerability and adaptation assessment for grassland ecosystem and livestock sector in Mongolia project. AIACC Annual Report, Washington, DC.
- GIEC (2014). Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p.
- Giannini A., Biasutti M., Verstraete M. M. (2008). A climate model-based review of drought in the Sahel: desertification, the re-greening and climate change. *Global and planetary Change*, 64(3), 119-128.
- Giller K. E., Witter E., Corbeels M., Tittonell P. (2009). Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. *Field Crops Research*, 114(1), 23-34. doi: [10.1016/j.fcr.2009.06.017](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.06.017)
- Graef F., Haigis J. (2001). Spatial and temporal rainfall variability in the Sahel and its effects on farmers' management strategies. *Journal of Arid Environments*, 48(2), 221-231. doi: <http://dx.doi.org/10.1006/jare.2000.0747>

- Jarvis A., Ramirez-Villegas J., Herrera Campo B. V., Navarro-Racines C. (2012). Is Cassava the Answer to African Climate Change Adaptation? *Tropical Plant Biology*, 5(1), 9-29. doi: 10.1007/s12042-012-9096-7
- Klajj M. C., Renard C., Reddy K. C. (2008). Low Input Technology Options for Millet-based Cropping Systems in the Sahel. *Experimental Agriculture*, 30(1), 77-82. doi: 10.1017/S0014479700023863
- Kotir J. H. (2011). Climate change and variability in Sub-Saharan Africa: a review of current and future trends and impacts on agriculture and food security. *Environment, Development and Sustainability*, 13(3), 587-605. doi: 10.1007/s10668-010-9278-0
- Harouna S., Soumaila B., Issaka Maga H., Guengant J.-P. (2005). Projections de la population du Niger de 2005 à 2050. *Travaux démographiques*. Vol 1. N°1. UNICEF. IRD. Ministère de l'Economie et des Finances. Secrétariat Général. Bureau Central du Recensement.
- Hountondji Y.C., Sokpon N., Nicolas J., Ozer P. (2009). Ongoing desertification processes in the sahelian belt of West Africa: an evidence from the rain-use efficiency. in: *Recent Advances in Remote Sensing and Geoinformation Processing for Land Degradation Assessment*. Röder A., Hill J. (eds.), ISPRS Series, Taylor and Francis, 173-186.
- Ly M., Toune N. (2019). Appui à la formulation concertée de la SPN2A pour la République du Niger – Facilité Adapt'Action – Elaboration des projections désagrégées sur le Niger. Bruxelles, Belgique.
- Ozer P. (2004). Bois de feu et déboisement au Sahel : mise au point. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 15: 243-251
- Ozer P. (2010). Impact des changements climatiques dans les pays en développement *In : Refonder les politiques de développement : Les relations Nord-Sud dans un monde multipolaire*. Zacharie A. (Ed.). Eds. La Muette, Bruxelles, Belgique.
- Plan d'Investissement Climat de la Région du Sahel (2018) : Rapport diagnostic. Niamey, Niger. 158p
- Roudier P., Sultan B., Quirion P., Berg A. (2011). The impact of future climate change on West African crop yields: What does the recent literature say? *Global Environmental Change*, 21(3), 1073-1083. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.04.007>
- Sarr B., Atta S., Ly M., Salack S., Ourback T., Subsol S., George D. A. (2015). Adapting to climate variability and change in smallholder farming communities: A case study from Burkina Faso, Chad and Niger (CVCADAPT). *Journal of Agricultural Extension and Rural Development*, 7(1), 16-27.
- Sarr B. (2012). Present and future climate change in the semi-arid region of West Africa: a crucial input for practical adaptation in agriculture. *Atmospheric Science Letters*, 13(2), 108-112. doi: 10.1002/asl.368
- TerrAfrica (2009) : Gestion durable des terres en Afrique subsaharienne : Politiques et financement. Le Mécanisme mondial de l'UNCCD et la FAO, 42 p.
- Tillie P., Louhichi K., Gomez-Y-Paloma S., 2019. Impacts ex-ante de la Petite Irrigation au Niger : Analyse des effets micro-économiques à l'aide d'un modèle de ménage agricole, EUR 29836 FR, Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISBN 978-92-76-09722-8, doi:10.2760/70964, JRC115744
- Salack S., Muller B., Gaye A. T. (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* ISSN 0177-798X Volume 106 Combined 1-2 DOI 10.1007/s00704-011-0414-z
- Traoré S. B., Alhassane A., Muller B., Kouressy M., Somé L., Sultan B., Baron C. (2011). Characterizing and modeling the diversity of cropping situations under climatic constraints in West Africa. *Atmospheric Science Letters*, 12(1), 89-95. doi: 10.1002/asl.295
- Tschakert P. (2007). Views from the vulnerable: Understanding climatic and other stressors in the Sahel. *Global Environmental Change*, 17(3-4), 381-396. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.11.008>
- United Nations Convention to Combat Desertification (2019). *The Global Land Outlook, West Africa Thematic Report*, Bonn, Germany, 56 p.
- UNEP (2018). *The Emissions Gap Report 2018*. United Nations Environment Program, Nairobi
- Waongo M., Laux P., Kunstmann H. (2015). Adaptation to climate change: The impacts of optimized planting dates on attainable maize yields under rainfed conditions in Burkina Faso. *Agricultural and Forest Meteorology*, 205, 23-39. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.006>
- Wolfram S., David B. L. (2010). Robust negative impacts of climate change on African agriculture. *Environmental Research Letters*, 5(1), 014010

Annexe 1. Liste des 5 modèles climatiques retenus sur chaque station synoptique (Ly et Touné, 2019), pour simuler l'impact du changement climatique sur les rendements du mil, sorgho et maïs au Niger.

Tendance du modèle	Frais/Humide	Chaud/Humide	Intermédiaire	Frais/Sec	Chaud/Sec
Tillabéri					
RCP85	O = MIROC5	A = ACCESS1-0	Q = MPI-ESM-LR	X = CNRM-CM5	W = CMCC-CMS
RCP45	T = NORESM1-M	J = HADGEM2-CC	B = BCC-CSM1-1	I = GFDL-ESM2M	N = IPSL-CM5A-MR
Niamey					
RCP85	T = NORESM1-M	A = ACCESS1-0	Z = IPSL-CM5B-LR	2 = GISS-E2-R	D = CanESM2
RCP45	O = MIROC5	A = ACCESS1-0	S = MRI-CGCM3	2 = GISS-E2-R	W = CMCC-CMS
Dosso					
RCP85	S = MRI-CGCM3	J = HadGEM2-CC	Z = IPSL-CM5B-LR	2 = GISS-E2-R	M = IPSL-CM5A-LR
RCP45	C = BNU-ESM	D = CanESM2	S = MRI-CGCM3	F = CESM1-BGC	W = CMCC-CMS
Gaya					
RCP85	S = MRI-CGCM3	A = ACCESS1-0	3 = GISS-E2-H	L = inmcm4	V = CMCC-CM
RCP45	2 = GISS-E2-R	J = HADGEM2-CC	3 = GISS-E2-H	I = GFDL-ESM2M	W = CMCC-CMS
Konni					
RCP85	T = NORESM1-M	A = ACCESS1-0	Q = MPI-ESM-LR	2 = GISS-E2-R	R = MPI-ESM-MR
RCP45	T = NORESM1-M	A = ACCESS1-0	Z = IPSL-CM5B-LR	X = CNRM-CM5	W = CMCC-CMS
Tahoua					
RCP85	U = FGOALS-g2	A = ACCESS1-0	Q = MPI-ESM-LR	2	W = CMCC-CMS
RCP45	T = NORESM1-M	A = ACCESS1-0	F = CESM1-BGC	Z = IPSL-CM5B-LR	W = CMCC-CMS
Maradi					
RCP85	O = MIROC5	D = CanESM2	B = bcc-csm1-1	F = CESM1-BGC	R = MPI-ESM-MR
RCP45	T = NORESM1-M	K = HadGEM2-ES	B = bcc-csm1-1	H = GFDL-ESM2G	Q = MPI-ESM-LR
Magaria					
RCP85	O = MIROC5	D = CanESM2	H = GFDL-ESM2G	F = CESM1-BGC	R = MPI-ESM-MR
RCP45	T = NORESM1-M	K = HadGEM2-ES	B = BCC-CSM1-1	H = GFDL-ESM2G	Q = MPI-ESM-LR
Zinder					
RCP85	T = NORESM1-M	N = IPSL-CM5A-MR	L = inmcm4	3 = GISS-E2-H	R = MPI-ESM-MR
RCP45	E = CCSM4	A = ACCESS1-0	F = CESM1-BGC	H = GFDL-ESM2G	Q = MPI-ESM-LR
Goure					
RCP85	O = MIROC5	M = IPSL-CM5A-LR	1 = GFDL-CM3	F = CESM1-BGC	G = CSIRO-Mk3-6-0
RCP45	T = NorESM1-M	J = HadGEM2-CC	1 = GFDL-CM3	S = MRI-CGCM3	R = MPI-ESM-MR
Maine Soroa					
RCP85	O = MIROC5	Y = HadGEM2-AO	1 = GFDL-CM3	L = inmcm4	R = MPI-ESM-MR
RCP45	T = NorESM1-M	A = ACCESS1-0	F = CESM1-BGC	L = inmcm4	V = CMCC-CM
Diffa					
RCP85	F = CESM1-BGC	3 = GISS-E2-H	B = bcc-csm1-1	E = CCSM4	N = IPSL-CM5A-MR
RCP45	Z = IPSL-CM5B-LR	3 = GISS-E2-H	2 = GISS-E2-R	O = MIROC5	Q = MPI-ESM-LR

Tendance du modèle	Frais/Humide	Chaud/Humide	Intermédiaire	Frais/Sec	Chaud/Sec
NGuigmi					
RCP85	O = MIROC5	A = ACCESS1-0	B = BCC-CSM1-1	L = Inmcm4	R = MPI-ESM-MR
RCP45	3 = GISS-E2-H	J = HADGEM2-CC	M = IPSL-CM5A-LR	H = GFDL-ESM2G	R = MPI-ESM-MR
Bilma					
RCP85	F = CESM1-BGC	N = IPSL-CM5A-MR	3 = GISS-E2-H	X = CNRM-CM5	J = HadGEM2-CC
RCP45	S = MRI-CGCM3	N = IPSL-CM5A-MR	P = MIROC-ESM	X = CNRM-CM5	G = CSIRO-Mk3-6-0
Agadez					
RCP85	T = NORESM1-M	P = MIROC-ESM	1 = GFDL-CM3	H = GFDL-ESM2G	G = CSIRO-Mk3-6-0
RCP45	T = NORESM1-M	P = MIROC-ESM	N = IPSL-CM5A-MR	U = FGOALS-g2	G = CSIRO-Mk3-6-0

Annexe 2 : Rendements grains et rendements en biomasse aérienne simulés aux horizons 2039, 2069 et 2099 pour différentes cultures pluviales (mil 90 jours, mil photopériodique, sorgho 90 jours et maïs 90 jours), sur chacune des 15 stations synoptiques du Niger, et pour chacun des 5 modèles sélectionnés localement comme représentatifs de tendances d'évolution du climat sur la base du scénario global de réchauffement climatique RCP8.5.

Station	Cult/var	Modèle	Rendements simulés (kg.ha-1)						Ecartypes des rendements simulés (kg.ha-1)					
			2039		2069		2099		2039		2069		2099	
			BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Grains	BiomAer	Grains	BiomAer	Grains
Agadez			329	68	388	111	338	105	559	144	644	232	566	201
	Mil90		289	73	345	124	299	121	483	142	551	214	467	195
		1	338	78	435	155	471	172	464	122	593	233	616	242
		G	50	9	4	0	1	0	79	16	6	1	2	0
		H	296	62	99	27	50	19	546	118	245	63	119	44
		P	509	155	736	268	435	180	643	218	718	288	487	211
		T	151	32	184	71	296	135	246	63	288	122	416	196
	MilPP		329	26	422	54	403	67	536	47	733	115	644	118
		1	325	21	490	47	542	66	427	26	717	73	755	101
		G	49	4	3	0	1	0	66	7	4	0	2	0
		H	311	21	86	9	46	6	546	31	226	21	109	14
		P	661	59	952	144	561	102	768	80	1033	188	677	140
		T	153	12	205	20	483	96	243	19	325	31	692	145
	Mais90		919	194	513	146	461	123	1035	278	760	319	710	253
		1	832	175	541	115	456	74	1118	337	765	192	748	92
		G	790	195	37	14	79	8	386	203	44	19	86	9
		H	742	236	272	97	284	71	578	285	337	125	415	99
		P	1086	201	802	257	541	113	1424	315	997	503	800	161
		T	957	184	360	96	480	204	962	275	528	176	712	411
	Sorgho90		219	74	281	136	204	116	368	144	482	262	393	233
		1	234	71	257	102	229	101	377	146	469	249	519	279
		G	96	29	5	1	0	0	141	37	5	2	2	1
		H	246	118	160	70	99	51	366	186	271	129	220	130
		P	271	76	468	248	262	171	468	157	619	341	369	246
		T	189	60	157	73	216	125	321	121	314	168	403	234
Bilma			177	48	136	36	130	33	369	105	315	87	355	90
	Mil90		226	61	191	50	189	48	411	117	362	100	421	107
		3	374	106	269	74	377	94	646	183	536	148	652	162
		F	82	20	140	32	235	62	—	—	279	64	470	123
		J	34	3	106	23	1	0	—	—	183	40	1	0
		N	330	88	226	65	0	0	—	—	451	131	0	0
		X	14	0	0	0	0	0	—	—	—	—	—	—
	MilPP		2	0	1	0	0	0	—	—	0	0	0	0
		3	2	0	1	0	0	0	—	—	—	—	0	0
		F	—	—	0	0	0	0	—	—	—	—	0	0
		J	—	—	0	0	—	—	—	—	2	0	29	8

Station	Cult/var	Modèle	Rendements simulés (kg.ha-1)						Ecartypes des rendements simulés (kg.ha-1)					
			2039		2069		2099		2039		2069		2099	
			BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Grains	BiomAer	Grains	BiomAer	Grains
		N			1	0								
	Mais90	-	-	-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
		3	-	-	-	-	28	7	-	-	1	0	-	-
	Sorgho90	-	-	-	-	-	47	12	-	-	-	-	-	-
		3	5	1	-	-	0	0	-	-	-	-	-	-
		-	5	1	-	-	0	0	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Diffa			2757	1068	2499	1047	2192	962	2291	1192	2045	1112	1987	1081
	Mil90		1727	622	1515	598	1183	496	1200	417	987	368	891	341
		3	2352	837	2116	823	1687	682	1098	391	889	324	804	317
		B	1242	464	1182	465	591	251	1148	392	965	358	751	276
		E	1695	611	1347	547	1261	527	1201	421	908	343	877	329
		F	1605	573	1390	547	1402	584	1185	419	939	359	832	322
		N	1743	627	1541	607	973	433	1166	393	1021	372	822	313
	MilPP		2924	627	2780	680	2454	664	2005	727	1819	712	1738	667
		3	3788	804	3696	883	3070	703	1744	690	1545	672	1473	625
		B	2408	549	2243	548	1471	426	2038	729	1869	723	1805	653
		E	2884	637	2809	745	2934	913	2081	789	1853	781	1703	723
		F	2642	539	2498	573	2876	777	1946	696	1740	692	1626	688
		N	2881	606	2655	651	1902	494	2052	743	1837	680	1546	551
	Mais90		4433	2149	4116	2150	3799	2003	2976	1711	2564	1534	2571	1551
		3	5437	2730	5141	2743	4703	2417	2740	1757	2377	1598	2347	1554
		B	3635	1734	3349	1726	2101	1130	3036	1703	2564	1465	2230	1360
		E	4471	2174	4161	2198	4347	2370	3031	1718	2541	1478	2540	1563
		F	4124	1956	3785	1899	4292	2283	2929	1633	2326	1389	2407	1507
		N	4498	2152	4143	2183	3542	1807	3028	1690	2802	1625	2602	1466
	Sorgho90		1951	871	1585	762	1340	690	1490	689	1195	578	1017	511
		3	2209	1061	2022	1016	1748	924	1380	646	1182	557	1014	501
		B	1616	724	1481	672	750	383	1418	676	1210	605	868	452
		E	1828	810	1313	648	1350	675	1481	698	1075	506	951	448
		F	2054	866	1386	666	1569	792	1462	655	1071	510	948	463
		N	2046	893	1723	810	1279	675	1706	763	1352	650	1069	555
Dosso			4516	1761	3977	1654	3471	1527	2784	1346	2611	1333	2531	1353
	Mil90		3141	993	2507	863	1966	718	1073	225	918	218	931	245
		2	3191	1037	2518	891	2120	793	1079	223	1035	248	996	269
		J	3034	962	2206	777	1864	680	981	189	759	184	762	190
		M	3569	995	2489	829	1529	582	935	176	860	183	894	244
		S	3281	1052	3147	1014	2496	844	1038	217	763	151	910	192
		Z	2629	918	2174	805	1820	691	1158	289	855	234	840	242
	MilPP		6560	1731	5677	1581	4669	1377	1286	417	1231	377	1382	418
		2	6707	1757	5761	1601	5297	1579	1359	473	1425	486	1282	429
		J	6423	1656	5095	1361	4001	1021	1036	310	854	212	800	202
		M	6961	1667	5493	1497	3712	1200	1231	373	1248	370	1360	397
		S	6584	1730	6486	1747	5682	1619	1421	498	1123	349	1101	339

Station	Cult/var	Modèle	Rendements simulés (kg.ha-1)						Ecartypes des rendements simulés (kg.ha-1)					
			2039		2069		2099		2039		2069		2099	
			BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Grains	BiomAer	Grains	BiomAer	Grains
	Mais90	Z	6126	1848	5552	1699	4653	1467	1275	400	1059	301	1257	355
			6202	3260	6173	3369	6064	3374	3357	1784	2775	1517	2515	1414
		2	5830	3086	5574	2998	5662	3113	3610	1921	3002	1620	2954	1605
		J	6009	3192	6462	3572	6450	3641	3466	1870	2478	1426	2138	1258
		M	7248	3761	6335	3441	5526	3122	3056	1630	2633	1416	2528	1496
		S	6358	3300	6970	3803	7108	3904	3509	1848	2971	1583	2424	1361
	Sorgho90	Z	5565	2962	5523	3034	5576	3089	3065	1638	2654	1466	2214	1200
			2161	1059	1553	804	1186	639	1592	726	1216	572	946	467
		2	2280	1105	1557	792	1393	733	1696	771	1393	653	1203	587
		J	2132	1059	1376	727	1087	588	1518	704	900	435	814	414
M		2287	1109	1578	830	1102	611	1589	713	1109	533	846	421	
	S	2371	1146	2025	1023	1359	715	1751	798	1480	675	1045	503	
	Z	1734	875	1226	648	991	545	1405	654	1022	497	741	380	
Gaya		5358	1967	4386	1666	4018	1588	3163	1476	2868	1314	2844	1380	
	Mil90		3765	1093	2847	891	2329	755	1013	147	1136	220	1105	229
		3	3732	1067	3061	931	2721	834	934	123	1081	169	962	138
		A	3651	1064	2863	918	2421	787	949	120	922	150	948	151
		L	3635	1075	2540	828	1719	595	1206	223	1242	280	1176	317
		S	3818	1128	3222	1003	2822	865	991	130	974	146	1041	153
		V	3987	1130	2551	774	1962	695	988	100	1319	254	1016	234
	MilPP		8221	1848	7037	1686	6141	1520	1007	267	1064	285	1257	306
		3	8203	1811	7383	1669	6877	1509	903	234	908	260	825	232
		A	7665	1663	6511	1425	5430	1217	853	203	754	194	745	217
		L	8115	1977	6634	1815	5182	1564	1052	301	1132	278	1420	360
S		8338	1901	7703	1808	7095	1612	979	267	898	205	938	250	
	V	8784	1888	6955	1714	6119	1700	961	220	1133	299	1003	218	
Mais90		7263	3864	6158	3319	6432	3450	3312	1708	2867	1525	2739	1483	
	3	7340	3933	6970	3801	7055	3861	3349	1696	2621	1366	2387	1238	
	A	7012	3758	6908	3800	8026	4303	3475	1764	2332	1236	1899	1039	
	L	7088	3721	5162	2717	4522	2321	3337	1738	2947	1546	2641	1426	
	S	7559	4029	6445	3564	6823	3661	3278	1724	3026	1579	2746	1408	
	V	7317	3878	5304	2712	5732	3106	3308	1712	2984	1537	2690	1498	
Sorgho90		2184	1065	1503	767	1172	626	1615	721	1197	558	887	433	
	3	2205	1092	1680	858	1249	674	1468	663	1211	557	886	426	
	A	2186	1084	1295	694	1195	647	1478	668	990	472	771	369	
	L	2244	1068	1388	697	1108	582	1706	764	1251	586	966	482	
	S	2272	1095	1803	913	1390	732	1864	834	1362	623	968	458	
	V	2012	985	1351	672	919	496	1619	703	1133	533	816	412	
Gouré		3524	1279	4332	1754	2657	1178	2127	1160	2645	1418	2094	1134	
	Mil90		2625	909	2997	1025	1643	657	1166	354	1076	277	937	306
		1	2519	882	2810	1014	1579	634	1143	340	1006	230	820	244
		F	2533	870	3147	1108	1903	747	1165	357	913	217	916	269
		G	2139	749	2124	736	683	299	1286	452	1063	342	720	294
		M	3250	1083	3676	1135	1999	780	948	203	795	125	716	181
		O	2684	958	3226	1133	2051	827	1044	304	977	208	794	203

Station	Cult/var	Modèle	Rendements simulés (kg.ha-1)						Ecartypes des rendements simulés (kg.ha-1)					
			2039		2069		2099		2039		2069		2099	
			BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Grains	BiomAer	Grains	BiomAer	Grains
	MilPP		4109	842	5610	1374	3303	954	2022	725	1955	760	1800	668
		1	4029	791	5984	1563	3488	1005	2056	735	1628	762	1647	662
		F	3684	684	5630	1338	3738	1053	1920	659	1611	766	1643	659
		G	2982	488	3241	605	973	164	1906	570	1909	622	1020	224
		M	5454	1258	6747	1626	3641	1028	1651	690	958	394	1243	473
		O	4394	988	6446	1739	4598	1494	1801	750	1345	634	1024	434
	Mais90		4919	2271	6370	3454	4256	2346	2561	1737	3085	1751	2596	1577
		1	4568	2053	6609	3520	3877	2127	2265	1584	2658	1519	2060	1268
		F	4230	1840	6430	3437	4732	2594	2260	1567	2839	1663	2335	1338
		G	4095	1786	3911	2083	1542	805	2103	1484	2267	1394	1319	830
		M	6569	3261	8499	4651	6035	3277	2981	1928	2711	1459	2322	1768
		O	5135	2417	6398	3580	5066	2907	2439	1759	3201	1774	2444	1352
	Sorgho90		2444	1096	2351	1163	1402	753	1374	621	1434	647	1071	514
		1	2314	1037	1941	985	1053	580	1338	597	1325	612	681	355
		F	2325	1011	2559	1233	1511	793	1318	585	1178	514	1035	484
		G	2123	897	1571	814	559	335	1234	559	1001	485	433	248
		M	3001	1441	3302	1602	2033	1089	1529	645	1740	758	1337	597
		O	2459	1094	2382	1181	1690	885	1356	610	1268	583	980	472
Konni			3753	1495	3291	1438	2802	1299	2618	1273	2453	1240	2303	1234
	Mil90		2777	938	1947	742	1470	601	1141	264	981	275	816	262
		2	2799	963	2004	759	1666	667	1154	278	1054	283	929	303
		A	2819	934	1903	706	1424	565	1115	241	922	233	763	207
		Q	2833	960	2241	827	1430	590	1151	250	1039	270	844	281
		R	2615	890	1662	654	1322	568	1154	299	982	309	754	284
		T	2820	945	1927	764	1510	613	1191	258	867	260	791	227
	MilPP		5757	1449	4986	1497	3783	1195	1647	654	1449	552	1545	578
		2	5815	1472	5276	1564	3955	1127	1709	683	1482	567	1828	709
		A	6092	1562	4901	1433	3838	1230	1281	539	877	285	906	215
		Q	5618	1349	5270	1557	3174	960	1751	699	1421	590	1723	670
		R	5065	1185	4122	1223	3354	1116	1898	723	1874	723	1654	691
		T	6194	1678	5361	1706	4596	1541	1364	526	1090	396	1051	216
	Mais90		4933	2810	4999	2858	4927	2836	3204	1742	2856	1555	2658	1455
		2	5082	2920	5408	3073	4262	2373	3368	1833	2939	1570	2783	1542
		A	5562	3180	5299	3085	5990	3581	2866	1584	2492	1336	1993	943
		Q	5408	3079	5142	2928	4381	2534	3353	1795	2941	1568	2657	1421
		R	3935	2211	3953	2222	4386	2455	2952	1595	2730	1508	2648	1469
		T	4679	2658	5194	2984	5615	3237	3380	1821	3077	1698	2784	1491
	Sorgho90		1543	782	1230	656	1027	565	1401	643	1018	497	858	427
		2	1554	790	1335	716	1207	634	1524	704	1050	513	1080	520
		A	1494	773	717	418	618	376	1296	606	537	293	428	232
		Q	1597	806	1430	764	1043	574	1427	647	1054	518	781	402
		R	1536	769	1205	624	1104	607	1340	613	1060	517	878	452
		T	1534	773	1461	756	1160	636	1492	683	1147	547	904	445
Maradi			4225	1742	3502	1511	3232	1460	2968	1554	2633	1355	2526	1335
	Mil90		2748	939	2150	801	1767	701	1154	318	1048	288	895	265

Station	Cult/var	Modèle	Rendements simulés (kg.ha-1)						Ecartypes des rendements simulés (kg.ha-1)					
			2039		2069		2099		2039		2069		2099	
			BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Grains	BiomAer	Grains	BiomAer	Grains
		B	2894	961	2299	827	1807	701	1217	349	1188	317	1037	323
		D	2601	899	2054	774	1828	701	1032	263	879	216	877	230
		F	3006	1006	2351	876	1992	769	1132	283	985	264	908	237
		O	2862	992	2270	842	1880	759	1045	264	1022	260	757	207
		R	2377	836	1779	688	1327	574	1282	396	1099	342	774	279
	MilPP		5559	1491	5027	1477	4451	1391	2015	836	1748	690	1597	603
		B	5567	1435	4906	1343	3975	1120	2144	869	2031	783	1917	735
		D	5731	1609	5004	1507	4430	1358	1747	725	1372	491	1315	449
		F	5750	1486	5318	1556	4979	1528	1946	826	1621	698	1405	524
		O	6083	1729	5624	1700	5202	1715	1687	763	1432	625	991	386
	Mais90	R	4665	1198	4283	1280	3669	1234	2319	935	1989	773	1730	686
			6489	3516	5383	3015	5461	3078	3657	1971	3210	1766	2949	1623
		B	6568	3558	5608	3104	5289	2939	3921	2109	3548	1941	3137	1696
		D	6637	3598	5576	3088	5498	3075	3518	1886	3192	1685	2913	1533
		F	6971	3780	5639	3199	5538	3137	3503	1896	3191	1782	2906	1596
		O	7065	3850	5652	3215	6393	3627	3764	2001	3098	1728	2965	1636
	Sorgho90	R	5205	2797	4437	2472	4588	2610	3489	1898	3029	1689	2710	1584
			2104	1020	1447	749	1250	671	1720	790	1188	578	998	495
		B	2551	1196	1596	809	1251	669	1932	878	1308	625	1035	512
		D	1848	927	1549	809	1355	727	1478	699	1152	571	1049	508
		F	2334	1129	1545	795	1268	671	1745	798	1211	593	1023	500
		O	2109	1033	1413	739	1492	793	1785	814	1200	589	1003	508
		R	1678	816	1133	595	882	496	1585	739	1072	514	822	425
Magaria			4948	1921	4476	1858	4089	1779	3098	1550	2870	1496	2738	1451
	Mil90		3588	1202	2869	1031	2387	905	972	230	1016	247	923	244
		D	3361	1143	2589	955	2311	887	958	206	962	236	852	230
		F	3774	1235	3112	1099	2667	982	987	227	1029	237	974	236
		H	3795	1255	3041	1068	2294	846	895	213	1007	254	1020	283
		O	3602	1222	2982	1067	2543	962	970	213	1034	230	869	212
		R	3409	1153	2624	968	2119	846	1025	276	990	256	844	235
	MilPP		6684	1638	6035	1621	5410	1583	1897	830	1745	740	1622	663
		D	6907	1793	6036	1796	5320	1617	1728	730	1322	459	1303	478
		F	6731	1568	6239	1600	6012	1694	1995	886	1823	844	1514	642
		H	6729	1580	5772	1437	4711	1209	1865	855	1965	843	2036	812
		O	7095	1875	6749	1897	6218	1957	1627	737	1414	590	962	349
	Mais90	R	5959	1374	5379	1375	4788	1436	2147	885	1901	786	1575	716
			6503	3448	6560	3579	6510	3570	4232	2179	3642	1934	3256	1764
		D	6441	3446	6545	3550	6100	3336	4322	2225	3635	1928	3251	1757
		F	6645	3502	6710	3665	6979	3844	4267	2225	4008	2123	3490	1836
		H	6797	3590	6575	3554	5707	3065	4039	2076	3501	1848	2997	1628
		O	6779	3653	6975	3861	7384	4098	4603	2354	3861	2052	3313	1757
	Sorgho90	R	5853	3050	5997	3264	6380	3506	4112	2095	3331	1779	3136	1758
			3018	1397	2440	1201	2049	1058	2244	969	1477	694	1135	543
		D	2869	1356	2548	1275	1688	904	2221	977	1290	603	907	444
		F	3265	1501	2638	1259	2187	1105	2248	966	1785	840	1248	595

Station	Cult/var	Modèle	Rendements simulés (kg.ha-1)						Ecartypes des rendements simulés (kg.ha-1)					
			2039		2069		2099		2039		2069		2099	
			BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Grains	BiomAer	Grains	BiomAer	Grains
		H	3241	1495	2392	1152	1996	1008	2306	974	1545	716	1274	613
		O	3038	1410	2323	1168	2582	1313	2386	1027	1463	687	1067	503
		R	2679	1222	2297	1153	1793	957	2146	933	1313	633	974	475
	Mainé Soroa		2983	1185	2464	1097	2080	996	2109	1084	1878	991	1885	1017
	Mil90		2020	752	1473	620	1084	490	1032	386	841	304	751	294
		1	2050	753	1612	662	1296	565	1035	372	796	296	626	237
		L	1800	625	1068	465	444	224	1034	394	693	270	413	192
		O	2560	951	2121	847	1929	819	893	314	919	286	617	197
		R	1361	510	1198	498	862	407	1018	404	837	323	606	265
		Y	2330	921	1363	626	889	433	771	247	508	179	536	202
	MilPP		3725	897	3577	1050	3110	1052	2125	872	1901	809	1798	733
		1	3705	828	3626	970	3290	981	2154	823	1893	833	1566	732
		L	3063	657	2667	790	1457	536	2094	795	1789	732	1425	580
		O	4539	1106	4549	1285	4834	1593	1805	869	1668	777	993	574
		R	2377	503	2533	678	2127	672	1976	704	1868	699	1642	675
		Y	4941	1391	4512	1529	3840	1476	1566	906	1274	720	975	431
	Maïs90		4172	2132	3428	2042	3174	1963	2505	1461	2006	1248	2230	1376
		1	4250	2109	3576	2038	3300	1830	2366	1377	2059	1238	2417	1432
		L	3729	1813	2853	1739	1720	1143	2287	1335	1738	1116	1377	964
		O	4554	2280	3821	2218	4264	2638	2410	1423	2032	1290	2356	1468
		R	2894	1508	2638	1548	2555	1522	2121	1250	1722	1084	1888	1205
		Y	5433	2950	4225	2652	3858	2566	2717	1574	2114	1270	2049	1150
	Sorgho90		1994	954	1311	654	888	475	1447	660	1130	537	896	438
		1	1987	956	1508	740	1010	527	1501	677	1209	583	855	421
		L	1909	890	1047	530	451	266	1397	640	958	466	440	246
		O	2308	1087	1851	897	1583	802	1567	694	1419	668	1182	576
		R	1459	708	1062	522	762	410	1284	636	935	453	776	392
		Y	2289	1119	1084	577	554	330	1396	609	879	414	513	248
	Nguigmi		964	351	1136	457	1283	531	1296	564	1416	683	1562	733
	Mil90		633	232	697	295	721	319	893	339	782	324	784	329
		A	1205	468	1157	475	1173	536	1125	433	767	309	555	227
		B	767	250	482	207	309	133	950	351	590	263	502	212
		L	539	188	221	116	107	57	774	292	318	158	205	107
		O	101	62	1297	532	1684	722	66	45	873	364	610	202
		R	474	164	299	132	284	127	744	288	539	235	476	209
	MilPP		971	190	1413	331	1634	473	1375	347	1647	508	1779	648
		A	1965	371	2384	564	2718	762	1828	526	1698	577	1408	654
		B	924	116	872	172	691	196	1303	259	1133	328	1145	397
		L	776	130	662	177	317	109	1234	298	1065	373	684	285
		O	461	229	2582	626	3741	1112	365	193	1870	657	1251	709
		R	636	99	514	105	459	118	1150	281	976	241	870	295
	Maïs90		1693	732	1740	871	2047	985	1610	858	1764	1052	2002	1117
		A	2822	1384	3011	1457	3252	1305	2258	1345	2120	1366	1769	1188
		B	1538	488	1310	648	981	619	1500	569	1275	801	1283	796
		L	1385	514	1123	647	756	495	1406	626	1198	776	921	628

Station	Cult/var	Modèle	Rendements simulés (kg.ha-1)						Ecartypes des rendements simulés (kg.ha-1)					
			2039		2069		2099		2039		2069		2099	
			BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Grains	BiomAer	Grains	BiomAer	Grains
	Sorgho90	O	1343	753	2399	1181	3164	1640	666	468	1960	1205	2332	1365
		R	1294	488	806	395	1068	471	1249	591	938	541	1246	616
			618	282	646	323	711	382	908	406	802	386	806	402
		A	943	453	1002	517	1015	563	1053	491	643	325	571	286
		B	797	319	521	261	309	178	1033	426	736	368	550	296
		L	653	305	252	145	131	83	919	428	392	222	187	119
		O	105	66	988	456	1156	591	84	60	1110	495	1044	494
	R	507	230	377	192	393	209	828	368	664	343	645	332	
Niamey			3043	1224	3016	1333	2439	1158	2102	1052	2152	1116	1953	1069
	Mil90		2311	825	1847	717	1320	540	1096	308	935	285	851	277
		2	2611	909	1971	746	1595	633	1105	311	1052	325	938	293
		A	2250	807	1416	585	1023	449	953	264	728	237	605	215
		D	2174	794	2045	775	1201	491	1145	340	1015	286	1011	330
		T	2476	882	2331	860	1232	513	995	260	762	201	770	243
	MilPP	Z	2046	733	1474	621	1551	614	1234	342	778	279	781	260
			4281	1029	4239	1260	3171	1019	1671	622	1511	564	1402	485
		2	4286	858	3937	961	3498	967	1731	646	1609	636	1438	568
		A	4494	1190	3724	1184	2686	914	1530	509	1154	334	1100	280
		D	3985	950	4918	1522	2654	888	1726	657	1435	510	1574	587
	Maïs90	T	4715	1228	5094	1501	3527	1267	1523	580	1154	484	1156	251
		Z	3927	920	3522	1134	3490	1058	1798	651	1511	613	1460	548
			4245	2373	4708	2689	4371	2574	2424	1354	2355	1294	2046	1143
		2	4440	2501	3982	2291	4186	2395	2522	1432	2159	1166	2109	1131
		A	3978	2244	4251	2430	4214	2621	2215	1227	2064	1135	1704	994
	Sorgho90	D	4456	2470	4681	2638	3392	2022	2463	1400	2560	1382	2095	1236
		T	4646	2624	5885	3309	5432	3197	2782	1555	2400	1258	1994	1048
Z		3703	2025	4738	2776	4598	2615	2112	1115	2246	1348	1880	1036	
		1334	668	1249	655	897	504	1192	540	999	471	730	372	
2		1639	807	1119	573	1045	572	1357	605	1028	469	828	407	
A		984	517	827	467	675	404	1001	454	705	363	515	280	
D		1366	682	1452	752	872	487	1107	516	1058	496	710	386	
T	1522	763	1535	793	1042	583	1391	625	1219	564	869	430		
	Z	1161	571	1322	696	851	474	999	452	787	386	651	332	
Tahoua			1895	739	1569	712	1495	748	1734	828	1616	811	1615	892
	Mil90		1458	543	954	417	734	340	1030	375	789	310	644	263
		2	1250	465	720	316	476	211	1050	373	697	279	567	237
		A	1476	560	862	400	587	305	993	365	523	211	374	156
		Q	1403	499	1037	446	370	182	1075	386	799	318	476	216
	MilPP	U	1623	617	1637	679	1415	621	1023	383	831	309	646	210
		W	1539	575	512	242	825	380	1036	373	595	249	554	238
			2501	539	2222	646	1918	666	1770	607	1683	615	1618	619
		2	2031	380	1552	371	940	254	1710	540	1517	522	1294	463
		A	3162	900	2872	1032	2178	892	1844	677	1539	608	1174	472
		Q	2082	364	2207	584	856	276	1688	515	1633	556	1208	461
		U	2622	522	3181	849	3787	1304	1711	586	1592	618	1112	467

Station	Cult/var	Modèle	Rendements simulés (kg.ha-1)						Ecartypes des rendements simulés (kg.ha-1)					
			2039		2069		2099		2039		2069		2099	
			BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Grains	BiomAer	Grains	BiomAer	Grains
	Mais90	W	2606	532	1297	393	1794	592	1756	586	1394	515	1357	532
			2819	1497	2520	1481	2822	1699	2036	1107	1906	1074	1886	1165
		2	2474	1277	1871	1046	1593	896	1984	1030	1518	888	1305	757
		A	2902	1602	2931	1780	3459	2248	2274	1258	1701	965	1789	1057
		Q	2811	1483	2424	1439	1601	966	1915	1071	1966	1123	1247	788
	Sorgho90	U	3056	1624	3610	2075	4380	2624	2079	1133	2169	1169	1630	889
		W	2852	1499	1766	1064	3039	1736	1998	1067	1566	861	1746	1202
			803	378	582	303	510	290	1061	480	835	399	622	317
		2	763	341	467	237	393	206	1120	489	699	334	559	276
		A	687	365	349	213	266	182	872	422	371	191	258	162
	Q	831	393	581	291	287	165	1101	504	899	417	451	235	
	U	892	408	1127	578	969	525	1151	530	1132	541	827	407	
	W	841	384	385	199	627	368	1094	480	672	318	597	303	
	Tillabery	2636	1157	2345	1103	2178	1078	2167	1113	2001	1054	1935	1095	
	Mil90		1793	692	1344	553	1011	454	993	325	906	290	713	246
		A	1600	619	1017	435	694	333	954	302	756	245	529	197
		O	1791	728	1536	640	1283	561	880	274	832	238	639	201
		Q	1887	697	1665	634	863	394	1104	369	1095	328	765	289
		W	1820	686	1139	492	909	433	1061	362	800	290	605	238
	MilPP	X	1869	728	1361	562	1307	546	989	319	899	298	816	224
			3577	992	3209	1020	2707	963	1863	649	1741	609	1575	597
		A	3379	966	2752	948	1958	728	1885	606	1583	506	1285	450
		O	4400	1439	4179	1426	4024	1510	1508	601	1412	548	968	310
		Q	3114	687	3387	958	1722	507	1905	522	1820	573	1395	496
Mais90	W	3310	849	2696	871	2464	926	1976	627	1728	642	1428	610	
	X	3682	1017	3030	897	3369	1145	1846	666	1800	620	1508	544	
		3951	2301	3753	2266	4042	2373	2733	1502	2424	1347	2258	1402	
	A	3465	2069	3511	2192	3620	2386	2483	1396	2169	1240	2001	1155	
	O	5034	2867	4023	2429	5286	3262	2988	1651	2780	1533	2541	1446	
	Sorgho90	Q	3706	2160	4388	2595	2840	1452	2522	1382	2559	1385	1534	985
		W	3984	2260	3676	2180	4179	2077	2735	1466	2282	1312	2106	1470
		X	3565	2150	3168	1936	4163	2582	2779	1555	2248	1231	2326	1297
			1222	644	1058	566	992	560	1260	603	961	473	740	380
		A	922	503	728	423	682	419	1114	548	709	374	560	310
	Zinder	O	1701	874	1220	632	1262	691	1300	603	1076	518	765	382
		Q	1002	539	948	517	839	478	1233	596	889	449	648	338
		W	1361	716	1237	659	1246	694	1294	619	974	474	785	409
		X	1124	589	1168	604	920	514	1270	606	1075	528	774	391
			3290	1305	2831	1242	2289	1105	2326	1209	2278	1187	2085	1163
	Mil90		2269	800	1694	653	1151	489	1191	360	1121	339	944	321
		3	2470	875	1881	723	1517	618	1023	322	1088	341	937	310
		L	2034	735	1104	469	475	228	1181	386	829	282	573	212
		N	2862	946	2725	935	1837	713	1265	323	1093	270	1096	333
		R	1717	607	1258	501	1041	473	1267	413	1105	368	818	314
		T	2262	839	1502	638	885	413	929	255	663	201	565	178

Station	Cult/var	Modèle	Rendements simulés (kg.ha-1)						Ecartypes des rendements simulés (kg.ha-1)					
			2039		2069		2099		2039		2069		2099	
			BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Rdt Grains	BiomAer	Grains	BiomAer	Grains	BiomAer	Grains
	MilPP		3713	794	3393	917	2608	811	2051	725	1905	680	1651	585
		3	3911	844	3299	780	2986	796	1948	754	1880	691	1720	669
		L	3251	651	2663	800	1398	519	1949	703	1740	631	1275	433
		N	4543	912	4492	1025	3192	769	2128	709	1919	633	1801	569
		R	2707	549	2582	694	2376	754	2019	675	1930	746	1663	684
		T	4154	1014	3931	1286	3087	1217	1779	727	1368	553	1048	261
	Mais90		5033	2627	4693	2608	4251	2494	2798	1528	2724	1471	2459	1433
		3	5773	3013	4646	2533	4454	2464	2725	1493	2481	1363	2292	1326
		L	5110	2649	3712	2130	2456	1545	2618	1466	2179	1191	1581	916
		N	4109	2189	6185	3347	5790	3261	2931	1552	3198	1704	2830	1736
		R	4337	2113	3212	1769	3360	2018	2702	1480	2117	1202	2154	1367
		T	5838	3172	5711	3264	5196	3182	2718	1439	2418	1229	1751	894
	Sorgho90		2147	998	1542	789	1144	626	1640	714	1326	617	1102	547
		3	2315	1090	1580	795	1300	693	1651	698	1232	583	989	500
		L	2144	1000	997	544	354	219	1502	661	874	443	323	184
		N	2102	967	2374	1170	2095	1110	1972	853	1783	778	1516	718
		R	1815	792	1055	541	933	523	1412	618	922	465	763	402
		T	2357	1143	1701	895	1038	585	1659	716	1192	555	780	382

Annexe 3. Rendements grains et rendements en biomasse aérienne simulés aux horizons 2039, 2069 et 2099 pour différentes cultures pluviales (mil 90 jours, mil photopériodique, sorgho 90 jours et maïs 90 jours), sur chacune des 15 stations synoptiques du Niger, et pour chacun des 5 modèles sélectionnés localement comme représentatifs de tendances d'évolution du climat sur la base du scénario global de réchauffement climatique RCP4.5.

Station	Cult/var	Modèle	Rendements simulés						Ecartypes des rendements simulés					
			2039		2069		2099		2039		2069		2099	
			BiomAer	Grains	BiomAer	Grains	BiomAer	Grains	BiomAer	Grains	BiomAer	Grains	BiomAer	Grains
Agadez			238	49	343	71	373	117	489	131	639	156	638	261
	Mil90		183	47	293	81	278	100	410	126	536	170	501	196
		G	62	11	9	1	5	0	98	21	16	3	8	1
		N	79	12	128	36	63	20	147	25	191	62	83	36
		P	514	151	707	221	785	288	701	221	792	272	718	286
		T	70	12	369	79	188	74	135	26	509	117	291	127
		U	75	13	41	7	69	15	121	24	61	11	103	23
	MilIPP		208	15	339	30	388	58	452	30	633	62	749	140
		G	64	6	7	1	5	0	90	8	12	2	6	0
		N	83	7	142	14	67	9	139	12	198	19	92	13
		P	529	36	890	84	1089	172	729	47	957	101	1091	225
		T	71	6	319	20	233	26	126	11	454	26	361	43
		U	84	7	35	3	61	6	119	10	52	5	93	9
	Mais90		879	175	904	178	591	198	890	231	1215	280	760	415
		G	707	181	239	81	48	16	317	179	200	85	51	21
		N	1085	223	613	153	419	79	643	238	814	266	515	114
		P	929	159	1373	249	955	381	1409	315	1717	390	989	618
		T	750	151	975	159	410	111	711	222	1324	277	551	206
		U	942	202	759	178	437	110	522	203	466	174	460	160
	Sorgho90		176	58	238	74	283	143	350	150	400	146	463	258
		G	97	31	18	4	5	1	142	36	25	9	5	3
		N	144	45	157	62	86	36	239	87	254	118	154	87
		P	293	100	438	132	565	306	556	252	550	208	619	349
		T	130	44	245	69	169	78	240	93	390	129	311	163
		U	134	41	107	34	142	48	182	56	130	48	204	83
Bilma			46	9	154	42	171	52	74	15	392	111	414	129
	Mil90		56	11	230	64	285	88	80	17	469	133	531	165
		G	6	0	4	0	–	–	–	–	–	–	–	–
		N	62	14	46	5	–	–	–	–	–	–	–	–
		P	149	37	268	80	251	79	–	–	535	160	501	157
		S	54	9	390	104	319	98	104	19	673	179	636	196
		X	16	0	7	0	–	–	–	–	–	–	–	–
	MilIPP		4	0	1	0	2	0	–	–	0	0	1	0
		P	4	0	1	0	1	0	–	–	–	–	–	–
		S	0	0	1	0	2	0	–	–	–	–	–	–
	Mais90		–	–	–	–	34	9	–	–	2	0	29	8
		P	–	–	–	–	28	7	–	–	2	0	38	10

		Rendements simulés						Ecartypes des rendements simulés					
		2039		2069		2099		2039		2069		2099	
Sorgho90	S	–	–	–	–	47	12	–	–	–	–	–	–
	P	6	1	2	0	0	0	–	–	–	–	–	–
	S	0	0	2	0	0	0	–	–	–	–	–	–
Diffa		2833	1060	2400	929	2499	1018	2321	1182	2206	1123	2140	1122
Mil90		1903	654	1551	557	1561	608	1329	452	1242	440	1070	393
	2	1509	523	1257	457	1284	481	1214	424	1132	403	1017	388
	3	2368	846	2249	824	1868	754	1135	406	975	341	884	323
	O	2030	730	1788	686	1700	714	1237	436	1085	400	889	335
	Q	1422	503	781	295	961	392	1173	425	993	366	897	349
	Z	2184	668	1680	521	1994	696	1638	496	1498	497	1305	446
MilPP		3015	589	2564	534	2847	667	2128	673	2048	643	1990	726
	2	2377	474	2035	409	2047	426	2017	692	1896	600	1859	618
	3	3893	852	3881	882	3520	892	1722	691	1516	652	1556	687
	O	3333	680	3205	723	3704	1002	2030	701	1986	723	1837	781
	Q	2198	392	1374	302	1861	427	1915	555	1752	533	1788	594
Maïs90	Z	3248	541	2317	348	3101	590	2521	655	2149	505	2215	772
		4434	2131	3829	1868	3989	2055	2957	1693	2901	1669	2757	1602
	2	3806	1810	3316	1601	3315	1638	2869	1599	2789	1574	2454	1430
	3	5557	2818	5389	2767	4790	2572	2800	1766	2424	1643	2421	1570
	O	4897	2391	4379	2216	4646	2453	2824	1634	3018	1703	2931	1676
Sorgho90	Q	3472	1612	2210	1056	2653	1388	2731	1520	2380	1349	2458	1366
	Z	4436	2026	3850	1701	4542	2223	3240	1761	2994	1632	2959	1699
		1981	862	1656	755	1599	743	1546	708	1429	672	1283	601
	2	1659	703	1392	646	1243	556	1386	642	1253	623	1110	521
	3	2491	1146	2137	1065	1750	886	1468	683	1222	584	1084	524
	O	2166	973	2043	954	1885	883	1554	702	1469	681	1382	661
	Q	1506	643	846	383	1183	550	1364	638	1027	508	1097	541
Z	2082	844	1862	725	1936	840	1809	791	1736	757	1549	674	
Dosso		4605	1834	4177	1700	3879	1614	2885	1406	2815	1364	2659	1277
Mil90		3116	1023	2707	916	2429	854	1114	243	1157	267	1139	291
	C	3157	1005	2835	933	2434	854	1080	221	1054	222	1009	218
	D	3093	1016	2503	864	2572	882	1077	241	1180	280	1032	253
	E	3254	1062	3182	1024	2835	969	1127	237	1059	214	1075	237
	S	3310	1078	2974	996	2930	992	1059	225	1015	210	861	178
MilPP	W	2765	953	2041	761	1373	573	1208	281	1180	318	1038	346
		6742	1858	6259	1789	5832	1717	1349	445	1381	421	1559	446
	C	7010	1909	6641	1843	6326	1834	1282	420	1217	380	1161	351
	D	6709	1845	6078	1832	5891	1676	1332	396	1311	387	1362	396
	E	6755	1813	6775	1835	6311	1802	1437	492	1234	381	1351	429
Maïs90	S	6617	1748	6332	1728	6345	1776	1362	474	1369	459	1173	380
	W	6619	1973	5472	1705	4288	1496	1375	431	1446	491	1687	581
		6381	3395	5884	3167	5588	3041	3378	1826	3361	1820	2994	1620
	C	6152	3254	5566	2970	5339	2917	3495	1895	3343	1814	3103	1669
	D	6058	3192	6297	3365	5686	3067	3368	1800	3334	1814	2558	1403
Sorgho90	E	6775	3586	6666	3582	5939	3187	3486	1892	3388	1836	3208	1715
	S	6742	3625	6086	3293	6602	3581	3239	1729	3523	1901	2996	1607
	W	6177	3321	4805	2625	4374	2454	3447	1886	3107	1689	2790	1581
		2181	1062	1858	930	1665	845	1752	797	1560	724	1376	640

		Rendements simulés						Ecartypes des rendements simulés					
		2039		2069		2099		2039		2069		2099	
	C	2119	1033	1697	861	1443	746	1717	784	1420	671	1273	604
	D	1905	947	1831	927	1519	784	1578	725	1459	685	1152	542
	E	2570	1220	2080	1025	1905	951	1960	873	1709	789	1640	748
	S	2310	1119	2206	1085	2166	1084	1771	809	1695	772	1514	689
	W	2002	989	1477	752	1291	658	1749	808	1481	695	1123	536
Gaya		5373	1999	4845	1837	4559	1759	3096	1498	3009	1424	2977	1390
	Mil90	3739	1083	3187	967	2910	909	990	146	1116	196	1248	255
	1	3731	1091	2811	875	3170	986	1064	159	1181	223	1118	189
	3	3818	1077	3550	1013	3331	984	949	123	977	136	995	122
	I	3809	1091	3740	1076	3484	1025	896	116	1039	160	1104	189
	J	3809	1091	3082	964	2831	899	896	116	916	125	1078	182
	W	3527	1067	2754	907	1736	650	1151	206	1148	244	1163	344
	MilPP	8062	1815	7464	1759	7134	1738	931	262	1063	276	1336	314
	1	8476	1933	7300	1811	7752	1832	922	215	1000	239	939	257
	3	8263	1830	7830	1692	7675	1669	904	243	898	259	882	269
	I	7676	1647	8278	1870	8012	1856	775	195	926	245	1037	317
	J	7676	1647	6713	1546	6388	1490	775	195	736	197	802	227
	W	8220	2017	7198	1874	5841	1843	1013	238	1044	296	1410	335
	Mais90	7443	4000	6842	3677	6449	3504	3154	1632	3082	1620	3087	1632
	1	7066	3729	6579	3450	6215	3389	3610	1846	3103	1641	2899	1529
	3	7401	3991	7502	4028	7282	3929	3276	1658	3076	1565	2698	1368
	I	8149	4393	7533	4029	6684	3538	2800	1442	3291	1709	3381	1764
	J	8149	4393	6989	3809	7085	3870	2800	1442	2907	1510	2776	1453
	W	6450	3494	5609	3071	4976	2793	3069	1642	2791	1557	3255	1836
	Sorgho90	2249	1097	1888	943	1744	885	1620	735	1424	658	1334	620
	1	2129	1042	1571	786	1686	852	1584	719	1241	587	1446	672
	3	2319	1142	2169	1082	1857	941	1455	660	1392	636	1300	595
	I	2411	1175	2297	1118	2135	1050	1703	775	1710	777	1489	683
	J	2411	1175	1720	884	1725	893	1703	775	1197	562	1188	567
	W	1975	952	1680	845	1317	691	1704	763	1466	679	1165	558
Gouré		3649	1407	4616	1827	3112	1340	2164	1197	2599	1443	2166	1145
	Mil90	2573	906	2987	1022	1922	746	1086	320	997	254	1000	297
	1	2552	879	3202	1083	1906	738	1185	365	895	223	980	309
	J	2328	903	2425	915	1483	627	779	181	697	162	730	201
	R	2301	798	2638	856	1799	666	1318	433	1156	343	1251	396
	S	3275	1080	3813	1229	2745	1003	839	236	804	147	756	172
	T	2411	870	2858	1027	1676	694	962	269	779	170	729	198
	MilPP	4360	1004	5734	1462	4049	1140	1927	779	1716	750	1718	698
	1	4052	824	5856	1407	3733	969	2091	791	1763	830	1882	743
	J	5304	1669	6032	1874	4159	1390	1151	502	933	445	1317	573
	R	3378	604	4058	744	3093	702	2045	683	2102	719	2034	722
	S	4901	979	6578	1524	4862	1210	1789	731	1281	645	1446	664
	T	4166	942	6145	1759	4396	1430	1906	759	1073	512	1330	522
	Mais90	5297	2622	6752	3428	4890	2664	2451	1639	3057	1925	2394	1403
	1	4745	2194	6700	3358	4256	2175	2270	1573	2974	1833	2260	1338
	J	6234	3486	7120	3966	4650	2777	2226	1371	2535	1611	1957	1147
	R	4126	1825	4215	1757	3314	1657	2217	1483	2332	1434	1989	1216
	S	6280	3084	8269	4014	6548	3461	2562	1647	3229	2115	2262	1277
	T	5102	2523	7373	3989	5682	3251	2362	1636	2709	1643	2211	1250

		Rendements simulés						Ecartypes des rendements simulés					
		2039		2069		2099		2039		2069		2099	
Sorgho90		2365	1095	3017	1417	1586	809	1359	600	1695	742	1161	535
	1	2390	1059	2932	1397	1480	759	1386	630	1471	677	1017	494
	J	1872	979	2365	1207	1036	578	1054	474	1145	534	755	370
	R	2060	882	2015	922	1290	650	1312	580	1254	610	837	406
	S	3179	1436	4604	2016	2506	1208	1441	624	1913	798	1476	647
	T	2324	1119	3170	1542	1618	850	1272	561	1387	620	1070	505
Konni		4038	1605	3685	1564	3492	1480	2788	1336	2649	1333	2621	1276
Mil90		2940	965	2377	850	2157	755	1216	249	1117	277	1272	285
	A	2823	955	2099	790	1747	668	1064	220	967	245	964	262
	T	2856	956	2264	851	2068	800	1156	250	971	263	902	255
	W	2456	879	1778	711	1319	578	1138	290	918	312	643	259
	X	2625	940	2393	877	1783	718	1059	277	1011	268	902	286
	Z	3942	1092	3351	1021	3867	1009	1139	151	1101	202	1123	158
MilIPP		6201	1620	5487	1581	5309	1527	1567	591	1516	588	1837	568
	A	6039	1591	5318	1600	5018	1547	1253	533	1198	461	949	264
	T	6147	1661	5824	1800	5649	1806	1406	524	1124	444	1048	379
	W	5698	1603	4511	1383	3537	1139	1713	687	1743	707	1840	750
	X	5787	1611	5408	1527	4910	1550	1708	698	1674	663	1638	680
	Z	7332	1636	6375	1594	7429	1591	1188	519	1147	576	1000	419
Maïs90		5361	3013	5403	3072	5106	2913	3383	1802	3153	1693	2994	1625
	A	5596	3233	4867	2857	5037	2994	2877	1591	2781	1554	2491	1396
	T	5123	2858	5524	3150	5354	3092	3399	1796	3369	1804	3169	1702
	W	4732	2666	4778	2734	3993	2251	3345	1764	2922	1595	2669	1487
	X	4952	2786	4759	2705	4459	2559	3444	1840	3225	1728	2851	1563
	Z	6404	3519	7089	3915	6686	3668	3750	1974	2986	1568	3185	1686
Sorgho90		1649	824	1474	753	1399	725	1559	707	1355	629	1225	570
	A	1319	701	971	533	905	515	1188	571	930	466	621	324
	T	1589	802	1755	873	1699	862	1522	695	1535	696	1274	592
	W	1638	799	1314	662	1268	654	1582	682	1405	632	1132	531
	X	1865	905	1381	698	1225	644	1750	780	1295	594	1053	501
	Z	1835	915	1947	998	1896	948	1729	808	1393	660	1630	742
Maradi		4157	1707	3934	1669	3565	1543	2805	1457	2831	1491	2584	1335
Mil90		2789	958	2449	871	2187	813	1110	285	1072	295	1072	288
	B	2843	939	2870	973	2588	922	1310	374	1149	304	1095	291
	H	3116	1049	2824	961	2705	960	1065	270	1073	320	1057	281
	K	2574	947	1962	756	1413	597	776	167	823	217	684	196
	Q	2876	960	2475	867	2366	859	1216	314	1140	342	1052	279
	T	2536	895	2111	799	1866	726	1075	253	872	223	897	228
MilIPP		5671	1504	5326	1496	5167	1530	1909	795	1765	720	1669	655
	B	5404	1349	5641	1473	5450	1499	2291	906	1925	771	1856	761
	H	5868	1507	5508	1452	5528	1504	1907	811	1949	802	1879	801
	K	5686	1611	5065	1545	4489	1531	1512	718	1475	609	1282	469
	Q	5596	1410	5020	1315	5120	1407	2173	855	2076	853	1903	762
	T	5801	1642	5397	1695	5249	1711	1636	672	1302	495	1165	353
Maïs90		6190	3398	6228	3444	5492	3101	3346	1811	3388	1838	2948	1643
	B	6218	3350	6860	3739	5961	3300	3840	2063	3876	2098	3233	1825
	H	7074	3842	6535	3572	5713	3189	3497	1908	3591	1947	3013	1698
	K	5909	3343	5733	3282	5030	2952	2668	1460	2641	1481	2487	1406
	Q	5793	3165	5745	3144	4963	2779	3342	1807	3590	1954	2868	1602

		Rendements simulés						Ecartypes des rendements simulés					
		2039		2069		2099		2039		2069		2099	
Sorgho90	T	5955	3290	6266	3481	5793	3284	3332	1808	3184	1706	3131	1697
		1980	970	1732	866	1415	730	1557	713	1453	683	1147	554
	B	2420	1123	2348	1129	1619	817	1920	864	1731	799	1347	639
	H	2375	1152	1951	971	1593	792	1637	754	1495	704	1265	598
	K	1528	784	1028	556	930	527	1170	546	790	395	691	365
	Q	1577	801	1583	788	1190	619	1341	631	1448	692	1036	513
	T	1999	992	1748	884	1740	894	1475	690	1383	661	1142	563
Magaria		5034	1947	4702	1853	4556	1863	3030	1549	2981	1504	2876	1478
Mil90		3701	1210	3386	1143	3017	1067	976	235	984	235	1102	267
	B	3553	1144	3723	1202	3411	1150	1150	335	976	1150	1049	246
	H	3876	1262	3641	1209	3540	1194	858	184	938	219	974	220
	K	3533	1205	2893	1046	2289	900	819	136	853	182	809	211
	Q	3768	1211	3163	1076	2703	985	1037	248	1023	294	1140	304
MilIPP	T	3774	1228	3508	1180	3144	1108	998	224	927	201	1061	240
		6698	1580	6433	1593	6186	1621	1989	847	1846	791	1825	777
	B	6073	1358	6535	1507	6496	1585	2380	914	1895	819	1848	827
	H	6800	1566	6634	1589	6521	1553	1849	839	1931	856	1938	859
	K	7108	1848	6397	1787	5898	1828	1358	656	1283	596	1036	436
Maïs90	Q	6550	1472	5625	1292	5297	1337	2118	897	2120	829	2058	856
	T	6956	1656	6973	1790	6719	1802	2051	875	1734	768	1791	769
		6763	3615	6371	3438	6351	3472	3929	2050	3910	2030	3729	1968
	B	6433	3368	6151	3235	6211	3328	4069	2083	4165	2128	4148	2165
	H	7049	3748	6706	3572	6422	3489	3879	1985	4041	2056	3584	1849
Sorgho90	K	7183	3962	6718	3822	6605	3805	3626	1911	3170	1707	3142	1699
	Q	6453	3459	5526	2944	5652	3072	4029	2151	3875	2024	3390	1848
	T	6698	3537	6753	3619	6867	3664	4216	2187	4307	2213	4369	2265
		2975	1383	2619	1238	2668	1294	2168	932	2032	893	1703	777
	B	2791	1265	3006	1372	3022	1441	2302	1004	2246	971	1847	826
Mainé Soroa	H	3242	1486	3009	1393	2828	1313	2259	943	2195	945	2042	920
	K	2644	1286	1920	981	2112	1104	1866	832	1423	669	1126	548
	Q	2969	1392	2111	1012	2293	1142	2124	920	1651	778	1426	698
	T	3231	1487	3050	1432	3086	1469	2332	989	2305	1002	1790	816
		2815	1072	2564	1032	2475	1081	2028	1020	1929	977	1899	1027
Mil90		1985	708	1662	644	1528	625	1080	401	946	348	851	320
	A	2401	912	1635	706	1368	627	818	253	520	181	484	160
	F	1832	620	1891	680	1857	715	1081	408	1049	381	887	336
	L	1842	622	1482	551	1353	539	1193	451	980	372	959	381
	T	1618	572	2146	825	1811	726	1059	413	931	309	857	308
MilIPP	V	2234	813	1154	457	1248	517	1087	363	894	356	845	332
		3386	752	3340	852	3361	927	2139	808	1986	805	1902	812
	A	4545	1103	4322	1263	4665	1613	1778	797	1181	651	1119	606
	F	2967	633	3200	696	3259	737	2043	763	2020	762	1726	722
	L	2836	542	2646	596	2566	585	2186	750	2004	736	1929	712
Maïs90	T	2645	553	4234	1098	3806	1042	2067	733	1860	882	1863	857
	V	3938	932	2299	607	2511	658	2081	881	1959	781	1943	723
		3943	1924	3670	1867	3593	2089	2403	1403	2239	1348	2142	1317
	A	4761	2339	3821	1764	4911	3004	2578	1540	2026	1385	2099	1220
	F	3584	1679	3773	1825	3451	1886	2221	1301	2213	1297	1954	1167
	L	3644	1733	3231	1672	2616	1405	2377	1376	2132	1251	1789	1073

		Rendements simulés						Ecartypes des rendements simulés					
		2039		2069		2099		2039		2069		2099	
Sorgho90	T	3220	1580	4660	2493	4122	2443	2154	1251	2527	1487	2301	1415
	V	4504	2290	2776	1549	2838	1697	2449	1427	1920	1162	1767	1100
		1930	899	1589	776	1367	669	1380	625	1231	568	1155	541
	A	1969	957	1330	668	1124	611	1123	492	691	332	824	389
	F	1954	870	1811	847	1604	736	1367	620	1365	615	1246	602
	L	1970	899	1584	783	1215	584	1467	688	1193	586	1087	504
	T	1638	762	2098	1014	1820	861	1319	597	1502	676	1445	677
V	2111	1000	1113	563	1054	543	1621	721	1070	497	944	453	
Nguigmi		1579	535	1223	413	1091	443	1680	707	1397	562	1339	649
Mil90		1128	408	870	328	667	281	1090	419	936	363	777	320
	3	2233	802	1671	602	1381	563	960	391	936	381	791	327
	H	598	190	622	219	441	174	886	312	910	326	756	304
MilIPP	J	1383	573	790	355	518	258	785	336	647	293	446	213
	M	889	296	897	338	577	236	1018	371	925	361	736	304
	R	499	166	344	115	403	169	801	293	700	266	690	282
Mais90		1790	361	1376	261	1292	303	1909	584	1575	449	1521	475
	3	3252	601	2406	421	2398	529	1763	635	1653	542	1617	570
	H	694	84	845	134	564	82	1108	206	1259	290	1014	172
	J	3107	836	1804	443	1838	574	1943	786	1677	581	1608	576
	M	1177	178	1313	222	976	198	1495	366	1464	387	1316	377
	R	610	81	415	62	641	119	1080	206	916	188	1102	308
Sorgho90		2371	939	1917	735	1720	869	2046	1031	1711	809	1655	978
	3	3746	1329	2693	853	2743	1262	2277	1260	1796	820	2084	1276
	H	1414	566	1380	545	966	521	1320	621	1534	670	1016	634
	J	3383	1673	2301	1096	2244	1242	2015	1131	1596	1005	1660	1062
	M	1888	606	2075	807	1567	740	1677	691	1834	787	1412	813
	R	1123	394	883	265	952	522	1214	540	1105	324	1069	663
Niamey		1081	461	788	357	641	315	1157	515	925	426	800	385
	3	2038	805	1332	544	1102	514	1371	662	985	474	932	444
	H	617	264	585	256	485	212	982	421	1045	447	772	350
	J	1177	589	668	363	435	256	811	393	565	300	418	235
	M	960	384	917	435	620	311	1072	455	1022	491	842	413
	R	530	227	378	156	452	221	819	361	618	269	760	384
Niamey		3372	1374	3081	1308	2952	1309	2218	1135	2162	1132	2146	1119
Mil90		2526	899	2113	785	1773	690	1034	285	979	284	984	309
	2	2553	900	2302	833	1983	741	1107	314	1008	279	1070	321
	A	2291	829	1860	714	1554	625	934	261	864	248	797	248
MilIPP	O	2631	925	2189	811	1998	763	1063	280	987	278	1015	310
	S	2785	959	2487	894	2155	814	1051	275	903	256	910	263
	W	2369	884	1724	673	1174	506	996	292	979	316	812	311
		4648	1163	4217	1136	4075	1213	1584	628	1564	607	1606	594
	2	4201	878	4269	1007	3952	980	1711	676	1588	626	1576	619
	A	4531	1225	4144	1217	4068	1272	1453	517	1316	466	1252	403
Mais90	O	4971	1304	4734	1418	4616	1417	1571	610	1552	567	1510	564
	S	4958	1206	4521	1114	4813	1445	1601	652	1489	639	1377	543
	W	4580	1203	3418	922	2927	951	1542	627	1626	629	1665	652
		4743	2649	4645	2615	4656	2649	2634	1449	2543	1430	2352	1318
	2	4351	2429	4444	2517	4298	2415	2612	1469	2406	1328	2325	1254
A	4111	2319	4382	2469	4475	2567	2335	1297	2645	1508	2037	1113	

		Rendements simulés						Ecartypes des rendements simulés					
		2039		2069		2099		2039		2069		2099	
Sorgho90	O	5230	2869	4773	2700	5138	2905	2934	1607	2621	1462	2542	1436
	S	5081	2842	5088	2788	5544	3114	2632	1404	2881	1612	2474	1336
	W	4940	2788	4537	2602	3823	2244	2615	1452	2215	1288	2078	1318
		1573	786	1348	694	1295	679	1319	589	1087	500	1038	489
	2	1552	763	1295	654	1408	725	1339	596	1205	538	1077	491
	A	1263	640	1066	568	852	476	1147	523	926	434	760	386
	O	1761	884	1440	734	1443	739	1351	604	1060	493	1088	500
	S	1740	848	1592	812	1691	868	1495	643	1229	556	1267	585
	W	1550	796	1346	702	1075	581	1266	583	985	471	730	380
Tahoua		1927	757	1731	716	1648	725	1721	835	1621	800	1632	805
Mil90		1489	555	1216	476	1058	442	1010	368	909	336	808	298
	A	1508	587	1033	446	955	446	941	346	669	269	526	201
	F	1357	484	1320	503	1210	477	1035	368	975	360	871	336
	T	1693	634	1502	606	1396	589	1030	389	823	304	738	279
	W	1279	513	828	348	495	229	921	358	835	330	573	250
	Z	1609	556	1397	478	1236	471	1118	383	1074	376	967	299
		2535	540	2233	514	2349	654	1741	602	1674	573	1734	635
	MilPP												
	A	3171	884	2398	637	3311	1172	1799	669	1570	580	1508	585
F	2041	359	2196	435	2106	435	1685	538	1703	581	1652	558	
T	2723	540	3003	797	3012	884	1748	601	1651	614	1601	607	
W	2308	480	1455	330	1077	302	1667	575	1538	485	1373	478	
Z	2434	438	2111	369	2237	477	1695	513	1629	489	1683	524	
Mais90		2804	1520	2701	1494	2537	1463	2055	1129	1889	1050	1920	1080
A	2938	1662	2660	1532	3070	1848	2205	1215	1460	898	1822	1061	
F	2546	1315	2643	1394	2482	1343	1975	1043	1957	1056	1777	999	
T	3239	1744	3403	1914	3250	1860	2093	1192	2107	1167	2210	1156	
W	2425	1290	2065	1144	1353	812	1914	1028	1653	879	1258	723	
Z	2871	1587	2732	1486	2530	1453	2104	1150	2060	1130	1925	1111	
	878	414	775	380	642	339	1089	487	987	452	833	402	
Sorgho90													
A	704	360	551	296	450	271	861	375	641	305	492	264	
F	804	361	753	341	838	417	1125	498	1080	475	1030	486	
T	1022	473	1172	589	992	513	1287	573	1163	543	1075	501	
W	849	383	543	256	397	209	1088	487	879	392	613	307	
Z	1010	494	856	420	528	282	1080	497	1010	460	664	336	
Tillabery		2544	1097	2548	1148	2188	1009	2100	1049	2104	1103	1955	1028
Mil90		1772	672	1563	615	1271	515	1064	333	965	313	963	303
	B	1907	699	1783	677	1761	644	1162	364	1043	347	1202	344
	I	1843	678	1840	684	957	391	1187	384	1124	365	965	334
	J	1756	665	1384	563	1261	523	1051	292	858	262	859	260
	N	1589	628	1288	524	1048	452	994	338	896	307	816	279
	T	1764	691	1519	629	1329	566	948	292	802	255	760	235
		3533	953	3358	979	2933	873	1922	619	1826	620	1835	627
	MilPP												
	B	3597	903	3564	1004	3441	833	2046	611	1895	617	2000	574
I	3238	761	3191	749	1665	370	2051	589	1961	557	1481	434	
J	3875	1130	3323	1043	3299	1089	1782	580	1748	600	1671	553	
N	3139	843	2801	832	2496	794	1902	621	1846	636	1730	612	
T	3815	1128	3911	1269	3762	1279	1823	638	1581	591	1528	577	
Mais90		3676	2150	4010	2338	3511	2097	2575	1421	2592	1452	2391	1375
B	3550	2069	4154	2411	3720	2212	2445	1330	2842	1609	2325	1261	

		Rendements simulés						Ecartypes des rendements simulés					
		2039		2069		2099		2039		2069		2099	
Sorgho90	I	3332	1934	3587	2119	2247	1328	2396	1313	2448	1368	1810	1095
	J	4004	2372	4060	2429	3938	2432	2822	1548	2588	1458	2375	1341
	N	3518	2024	3824	2128	3495	1986	2507	1380	2336	1274	2147	1289
	T	3978	2353	4423	2604	4114	2501	2776	1549	2803	1557	2853	1591
		1193	613	1261	661	1022	547	1244	596	1166	565	899	452
	B	1212	610	1404	740	1065	562	1258	594	1208	587	955	476
	I	1120	570	1246	642	833	410	1287	623	1334	625	872	419
	J	1041	557	962	525	903	502	1167	569	1045	525	821	418
	N	1206	606	1266	650	1106	603	1228	585	1108	541	873	443
T	1386	720	1424	748	1196	652	1328	631	1132	548	972	487	
Zinder		3560	1392	3330	1351	3203	1356	2384	1271	2331	1253	2338	1252
Mil90		2503	864	2180	788	2001	750	1175	372	1150	354	1128	349
	A	2591	962	1819	757	1312	596	803	228	630	158	574	187
	E	2524	880	2451	866	2365	864	1189	363	1097	310	1082	309
	F	2418	803	2375	824	2121	790	1336	428	1236	381	1115	363
	H	2737	907	2475	847	2337	806	1175	380	1235	394	1263	407
MilPP	Q	2244	767	1778	644	1871	692	1313	419	1276	433	1189	388
		3866	795	3620	800	3782	969	2039	760	1911	715	1872	763
	A	5049	1379	4177	1166	4789	1762	1705	792	1389	685	1036	458
	E	4012	854	4037	904	4240	1074	2096	787	1923	734	1927	729
	F	3329	553	3601	715	3460	755	1949	625	1981	707	1836	684
Mais90	H	3737	628	3612	695	3390	619	1981	653	1980	697	1992	641
	Q	3205	558	2672	517	3033	636	2022	631	1963	614	1939	648
		5558	2862	5463	2851	5342	2881	2778	1531	2623	1484	2573	1436
	A	6416	3477	5912	3305	6011	3509	2755	1433	1857	1120	2093	1135
	E	5804	2975	6348	3258	5756	3098	2979	1587	2802	1574	2878	1510
Sorgho90	F	5235	2643	5553	2877	5187	2723	2529	1444	2704	1521	2711	1476
	H	5650	2848	5463	2791	5247	2714	2730	1531	2674	1499	2613	1483
	Q	4686	2367	4039	2022	4509	2363	2752	1526	2538	1385	2401	1359
		2313	1048	2058	965	1685	824	1668	707	1535	656	1364	620
	A	1917	966	1569	827	952	539	1554	691	997	453	753	377
	E	2642	1200	2688	1236	2077	1002	1830	766	1787	745	1557	716
	F	2439	1055	2162	1006	1923	928	1701	713	1553	670	1487	663
	H	2486	1119	2342	1049	1968	908	1703	713	1683	711	1477	664
	Q	2081	898	1527	706	1505	744	1533	652	1270	563	1128	546

Annexe 4. Production simulée de biomasse herbacée à l'horizon 2050 dans chacune des 15 stations synoptiques du Niger pour 5 tendances des projections climatiques désagrégées (RCP 4.5 et RCP 8.5)

RCP 8.5	Pluviométrie moyenne (mm) observée (1981-2010) et simulée (2040-2069)						Biomasse herbacée simulée (kg MS/ha)					
Station	1981-2010	Cool/Wet	Cool/Dry	Middle	Hot/Wet	Hot/Dry	Référence	Cool/Wet	Cool/Dry	Middle	Hot/Wet	Hot/Dry
Agadez	135,83	203,75	171,15	252,64	374,89	103,23	1175	1106	1526	1212	1570	1342
Diffa	278,91	312,38	133,28	126,14	166,42	194,68	1436	1313	1810	1488	1916	1598
Dosso	532,33	654,77	505,71	590,89	670,74	569,59	2146	2062	2659	2171	2797	2400
Gaya	756,39	877,41	665,62	779,08	998,43	763,95	1284	1212	1659	1298	1780	1458
Gouré	308,83	423,10	339,71	358,24	503,39	240,89	1371	1271	1750	1414	1888	1544
Konni	470,54	578,76	470,54	531,71	611,70	437,60	2678	2576	3223	2715	3283	2955
Magaria	522,67	674,24	554,03	506,99	695,15	512,22	1208	1117	1602	1245	1686	1359
Maine Soroa	329,35	461,09	339,23	382,05	523,67	329,35	1273	1161	1618	1318	1716	1426
Maradi	468,57	609,14	515,43	449,83	623,20	426,40	1362	1221	1742	1393	1810	1486
Nguimi	186,68	321,09	203,48	214,68	360,29	184,81	1441	1322	1818	1500	1924	1611
Niamey	493,62	592,34	498,56	582,47	621,96	468,94	2550	2478	3092	2567	3231	2829
Tahoua	342,91	449,21	329,19	387,49	507,51	322,34	1298	1227	1681	1322	1786	1480
Tillabéri	373,90	534,68	396,33	441,20	467,38	385,12	1097	1014	1449	1106	1472	1221
Zinder	389,21	447,59	377,53	412,56	482,62	323,04	1208	1117	1602	1245	1686	1359

RCP 4.5	Pluviométrie moyenne (mm) observée (1981-2010) et simulée (2040-2069)						Biomasse herbacée simulée (kg MS/ha)					
Station	1981-2010	Cool/Wet	Cool/Dry	Middle	Hot/Wet	Hot/Dry	Référence	Cool/Wet	Cool/Dry	Middle	Hot/Wet	Hot/Dry
Agadez	135,83	210,54	304,26	188,80	205,10	118,17	1175	1447	1345	1067	1174	1334
Diffa	278,91	270,54	437,89	270,54	334,69	228,71	1436	1756	1664	1293	1422	1609
Dosso	532,33	590,89	596,21	553,62	537,65	489,74	2146	2542	2498	1986	2152	2388
Gaya	756,39	832,03	877,41	801,77	748,83	695,88	1284	1579	1484	1168	1284	1458
Gouré	308,83	426,19	478,69	342,80	438,54	253,24	1371	1681	1605	1241	1364	1546
Konni	470,54	583,47	531,71	503,48	484,66	437,60	2678	3111	2949	2492	2678	2945
Magaria	522,67	606,30	674,24	548,80	554,03	496,54	1208	1489	1420	1089	1201	1365
Maine Soroa	329,35	411,69	510,49	349,11	316,18	306,30	1273	1564	1480	1145	1261	1431
Maradi	468,57	609,14	548,23	492,00	492,00	454,51	1362	1614	1553	1239	1357	1486
Nguimi	186,68	321,09	203,48	214,68	360,29	184,81	1441	1322	1818	1500	1924	1611
Niamey	493,62	592,34	498,56	582,47	621,96	468,94	2550	2478	3092	2567	3231	2829
Tahoua	342,91	449,21	329,19	387,49	507,51	322,34	1298	1227	1681	1322	1786	1480
Tillabéri	373,90	534,68	396,33	441,20	467,38	385,12	1097	1014	1449	1106	1472	1221
Zinder	389,21	447,59	377,53	412,56	482,62	323,04	1208	1117	1602	1245	1686	1359