



---

**CABINET DU PREMIER MINISTRE**

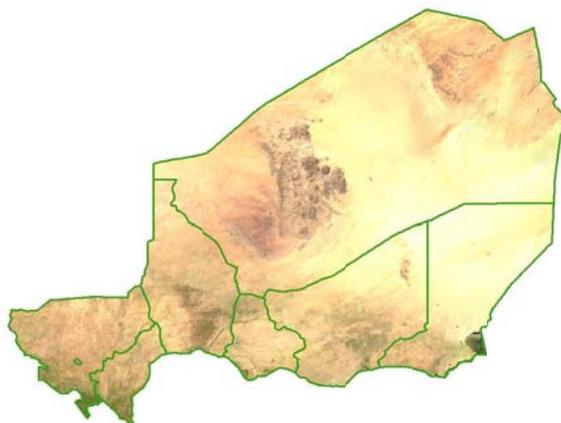
-----✂-----✂-----

Conseil National de l'Environnement pour un Développement Durable (CNEDD)

-----✂-----✂-----

Unité Nationale de Coordination du Projet AAP/Niger

-----✂-----✂-----



## SCÉNARIOS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE NIGER

Décembre 2011

Ibrah Seidou Sanda<sup>1</sup>

Seidou Ousmane<sup>2</sup>

Yahaya Nazoumou<sup>1</sup>

Moussa Mouhaimouni<sup>3</sup>

1. Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger

2. Université d'Ottawa, Canada

3. Direction de la Météorologie Nationale, Niger

## Table des matières

Table des matières	i
Liste des figures	iii
Liste des tables	vii
Liste des sigles et abréviations	viii
Résumé exécutif	1
I Introduction	2
II Données climatiques	3
II.1 Contrôle de qualité des données	5
II.1.1 Erreurs et données manquantes	5
II.1.2 Homogénéité des données	5
II.2 Détection de sauts et tendances dans les données	5
II.2.1 Précipitations annuelles	6
II.2.2 Températures maximales	6
II.2.3 Températures minimales	8
II.2.4 Humidités minimales et maximales	10
II.2.5 Vitesse du vent	10
II.2.6 Évapotranspiration potentielle	11
III Méthodologie de génération des scénarios	12
III.1 Définitions	12
III.1.1 Modèle Global de Climat	12
III.1.2 Modèle Régional de Climat	13
III.1.3 Réanalyses des données historiques	14
III.1.4 Mise à l'échelle	14
III.1.5 Scénarios d'émission	14
III.2 Etapes standard de développement de scénarios de changements climatiques	17
III.3 Choix du scénario de gaz à effets de serre	17
III.4 Sélection des modèles climatiques	17
III.5 Comparaison des sorties brutes des modèles avec les observations	17
III.6 Mise à l'échelle statistique des sorties de modèles régionaux	18
III.6.1 Principes de la mise à l'échelle par régression multiple	18
III.7 Calcul des paramètres du modèle de régression multiple étant donné une période de calibration et une période de validation.	20
III.7.1 Choix des périodes de calibration et de validation	21
III.7.2 Calcul des projections annuelles pour un MRC donné	22
III.7.3 Désagrégation des projections au pas de temps journalier	23
III.8 Exemple de calibration et de validation	23
IV Projections de précipitation et scénarios extrêmes	29

IV.1	Agadez	29
IV.2	Birni N’Konni	31
IV.3	Gaya	33
IV.4	Mainé Soroa	35
IV.5	Maradi	37
IV.6	Niamey	39
IV.7	Tahoua	41
IV.8	Tillabéry	43
IV.9	Zinder	45
V	Conclusion	47
	Recommandations	48
	Bibliographie	49
A	ANNEXE	52
A.1	Agadez	52
A.1.1	Agadez, scénario sec	52
A.1.2	Agadez, scénario humide	54
A.2	Birni N’Konni	56
A.2.1	Birni N’Konni, scénario sec	56
A.2.2	Birni N’Konni, scénario humide	58
A.3	Gaya	60
A.3.1	Gaya, scénario sec	60
A.3.2	Gaya, scénario humide	62
A.4	Mainé Soroa	64
A.4.1	Mainé Soroa, scénario sec	64
A.4.2	Mainé Soroa, scénario humide	66
A.5	Maradi	68
A.5.1	Maradi, scénario sec	68
A.5.2	Maradi, scénario humide	70
A.6	Niamey	72
A.6.1	Niamey, scénario sec	72
A.6.2	Niamey, scénario humide	74
A.7	Tahoua	76
A.7.1	Tahoua, scénario sec	76
A.7.2	Tahoua, scénario humide	78
A.8	Tillabéry	80
A.8.1	Tillabéry, scénario sec	80
A.8.2	Tillabéry, scénario humide	82
A.9	Zinder	84
A.9.1	Zinder, scénario sec	84
A.9.2	Zinder, scénario humide	86

## Liste des figures

II.1	Carte de localisation des stations synoptiques utilisées . . . . .	4
II.2	Précipitations annuelles observées . . . . .	6
II.3	Normal Homogeneity Test . . . . .	7
II.4	Normal Homogeneity Test . . . . .	8
II.5	Moyenne annuelle des températures maximales observées . . . . .	9
II.6	Moyenne annuelle des températures minimales observées . . . . .	9
II.7	Moyenne annuelle de l'humidité relative maximale observé . . . . .	10
II.8	Moyenne annuelle de l'humidité relative minimale observé . . . . .	10
II.9	Moyenne annuelle de la vitesse maximale du vent observée . . . . .	11
II.10	Moyenne annuelle de l'évapotranspiration calculée . . . . .	12
III.1	Canevas naratifs . . . . .	15
III.2	Précipitation observées et simulées par deux modèles à Niamey . . . . .	19
III.3	Points de grille NCEP . . . . .	20
III.4	Points de grille des MRC . . . . .	21
III.5	Processus d'estimation des paramètres du modèle de régression . . . . .	22
III.6	Performance de la calibration et de la validation, mois de Mai . . . . .	24
III.7	Performance de Calibration et de validation, mois de Juin . . . . .	25
III.8	Performance de Calibration et de validation, mois de Juillet . . . . .	25
III.9	Performance de Calibration et de validation, mois d'Aout . . . . .	26
III.10	Performance de Calibration et de validation, mois de Septembre . . . . .	27
III.11	Performance de Calibration et de validation, mois d'Octobre . . . . .	27
III.12	Performance du modèle sur toute l'année . . . . .	28
IV.1	Comparaison des précipitations totales projetée et observée à Agadez . . . . .	29
IV.2	Cumul pluviométrique moyen future à Agadez selon les modèles sélectionnés . . . . .	30
IV.3	Résumé des tendances à Agadez selon les deux scénarios . . . . .	30
IV.4	Comparaison des précipitations totales projetée et observée à Birni N'konni . . . . .	31
IV.5	Cumul pluviométrique moyen future à Konni selon les modèles sélectionnés . . . . .	32
IV.6	Résumé des tendances à Konni selon les deux scénarios . . . . .	32
IV.7	Comparaison des précipitations totales projetée et observée à Gaya . . . . .	33
IV.8	Cumul pluviométrique moyen future à Gaya selon les modèles sélectionnés . . . . .	34
IV.9	Résumé des tendances à Gaya selon les deux scénarios . . . . .	34
IV.10	Comparaison des précipitations totales projetée et observée à Mainé Soroa . . . . .	35
IV.11	Cumul pluviométrique moyen future à Mainé selon les modèles sélectionnés . . . . .	36
IV.12	Résumé des tendances à Mainé selon les deux scénarios . . . . .	36
IV.13	Comparaison des précipitations totales projetée et observée à Maradi . . . . .	37
IV.14	Cumul pluviométrique moyen future à Maradi selon les modèles sélectionnés . . . . .	38
IV.15	Résumé des tendances à Maradi selon les deux scénarios . . . . .	38

IV.16	Comparaison des précipitations totales projetée et observée à Niamey . . . . .	39
IV.17	Cumul pluviométrique moyen future à Niamey selon les modèles sélectionnés . . . . .	40
IV.18	Résumé des tendances à Niamey selon les deux scénarios . . . . .	40
IV.19	Comparaison des précipitations totales projetée et observée à Tahoua . . . . .	41
IV.20	Cumul pluviométrique moyen future à Tahoua selon les modèles sélectionnés . . . . .	42
IV.21	Résumé des tendances à Tahoua selon les deux scénarios . . . . .	42
IV.22	Comparaison des précipitations totales projetée et observée à Tillabéry . . . . .	43
IV.23	Cumul pluviométrique moyen future à Tillabéry selon les modèles sélectionnés . . . . .	44
IV.24	Résumé des tendances à Tillabéry selon les deux scénarios . . . . .	44
IV.25	Comparaison des précipitations totales projetée et observée à Zinder . . . . .	45
IV.26	Cumul pluviométrique moyen future à Zinder selon les modèles sélectionnés . . . . .	46
IV.27	Résumé des tendances à Agadez selon les deux scénarios . . . . .	46
A.1	Précipitation moyenne (mm/jour), Agadez, scénario sec . . . . .	52
A.2	Température maximale journalière (degré C), Agadez, scénario sec . . . . .	52
A.3	Température minimale journalière (degré C), Agadez, scénario sec . . . . .	53
A.4	Évapotranspiration (mm/jour), Agadez, scénario sec . . . . .	53
A.5	Précipitation moyenne (mm/jour), Agadez, scénario humide . . . . .	54
A.6	Température maximale journalière (degré C), Agadez, scénario humide . . . . .	54
A.7	Température minimale journalière (degré C), Agadez, scénario humide . . . . .	55
A.8	Évapotranspiration (mm/jour), Agadez, scénario humide . . . . .	55
A.9	Précipitation moyenne (mm/jour), Birni N’Konni, scénario sec . . . . .	56
A.10	Température maximale journalière (degré C), Birni N’Konni, scénario sec . . . . .	56
A.11	Température minimale journalière (degré C), Birni N’Konni, scénario sec . . . . .	57
A.12	Évapotranspiration (mm/jour), Birni N’Konni, scénario sec . . . . .	57
A.13	Précipitation moyenne (mm/jour), Birni N’Konni, scénario humide . . . . .	58
A.14	Température maximale journalière (degré C), Birni N’Konni, scénario humide . . . . .	58
A.15	Température minimale journalière (degré C), Birni N’Konni, scénario humide . . . . .	59
A.16	Évapotranspiration (mm/jour), Birni N’Konni, scénario humide . . . . .	59
A.17	Précipitation moyenne (mm/jour), Gaya, scénario sec . . . . .	60
A.18	Température maximale journalière (degré C), Gaya, scénario sec . . . . .	60
A.19	Température minimale journalière (degré C), Gaya, scénario sec . . . . .	61
A.20	Évapotranspiration (mm/jour), Gaya, scénario sec . . . . .	61
A.21	Précipitation moyenne (mm/jour), Gaya, scénario humide . . . . .	62
A.22	Température maximale journalière (degré C), Gaya, scénario humide . . . . .	62
A.23	Température minimale journalière (degré C), Gaya, scénario humide . . . . .	63
A.24	Évapotranspiration (mm/jour), Gaya, scénario humide . . . . .	63
A.25	Précipitation moyenne (mm/jour), Mainé Soroa, scénario sec . . . . .	64
A.26	Température maximale journalière (degré C), Mainé Soroa, scénario sec . . . . .	64

A.27	Température minimale journalière (degré C), Mainé Soroa, scénario sec	65
A.28	Évapotranspiration (mm/jour), Mainé Soroa, scénario sec	65
A.29	Précipitation moyenne (mm/jour), Mainé Soroa, scénario humide	66
A.30	Température maximale journalière (degré C), Mainé Soroa, scénario humide	66
A.31	Température minimale journalière (degré C), Mainé Soroa, scénario humide	67
A.32	Évapotranspiration (mm/jour), Mainé Soroa, scénario humide	67
A.33	Précipitation moyenne (mm/jour), Maradi, scénario sec	68
A.34	Température maximale journalière (degré C), Maradi, scénario sec	68
A.35	Température minimale journalière (degré C), Maradi, scénario sec	69
A.36	Évapotranspiration (mm/jour), Maradi, scénario sec	69
A.37	Précipitation moyenne (mm/jour), Maradi, scénario humide	70
A.38	Température maximale journalière (degré C), Maradi, scénario humide	70
A.39	Température minimale journalière (degré C), Maradi, scénario humide	71
A.40	Évapotranspiration (mm/jour), Maradi, scénario humide	71
A.41	Précipitation moyenne (mm/jour), Niamey, scénario sec	72
A.42	Température maximale journalière (degré C), Niamey, scénario sec	72
A.43	Température minimale journalière (degré C), Niamey, scénario sec	73
A.44	Évapotranspiration (mm/jour), Niamey, scénario sec	73
A.45	Précipitation moyenne (mm/jour), Niamey, scénario humide	74
A.46	Température maximale journalière (degré C), Niamey, scénario humide	74
A.47	Température minimale journalière (degré C), Niamey, scénario humide	75
A.48	Évapotranspiration (mm/jour), Niamey, scénario humide	75
A.49	Précipitation moyenne (mm/jour), Tahoua, scénario sec	76
A.50	Température maximale journalière (degré C), Tahoua, scénario sec	76
A.51	Température minimale journalière (degré C), Tahoua, scénario sec	77
A.52	Évapotranspiration (mm/jour), Tahoua, scénario sec	77
A.53	Précipitation moyenne (mm/jour), Tahoua, scénario humide	78
A.54	Température maximale journalière (degré C), Tahoua, scénario humide	78
A.55	Température minimale journalière (degré C), Tahoua, scénario humide	79
A.56	Évapotranspiration (mm/jour), Tahoua, scénario humide	79
A.57	Précipitation moyenne (mm/jour), Tillabéry, scénario sec	80
A.58	Température maximale journalière (degré C), Tillabéry, scénario sec	80
A.59	Température minimale journalière (degré C), Tillabéry, scénario sec	81
A.60	Évapotranspiration (mm/jour), Tillabéry, scénario sec	81
A.61	Précipitation moyenne (mm/jour), Tillabéry, scénario humide	82
A.62	Température maximale journalière (degré C), Tillabéry, scénario humide	82
A.63	Température minimale journalière (degré C), Tillabéry, scénario humide	83
A.64	Évapotranspiration (mm/jour), Maradi, scénario humide	83

A.65 Précipitation moyenne (mm/jour), Zinder, scénario sec . . . . .	84
A.66 Température maximale journalière (degré C), Zinder, scénario sec . . . . .	84
A.67 Température minimale journalière (degré C), Zinder, scénario sec . . . . .	85
A.68 Évapotranspiration (mm/jour), Zinder, scénario sec . . . . .	85
A.69 Précipitation moyenne (mm/jour), Zinder, scénario humide . . . . .	86
A.70 Température maximale journalière (degré C), Zinder, scénario humide . . . . .	86
A.71 Température minimale journalière (degré C), Zinder, scénario humide . . . . .	87
A.72 Évapotranspiration (mm/jour), Maradi, scénario humide . . . . .	87

## Liste des tables

II.1	Coordonnées géographiques des stations synoptiques utilisées . . . . .	3
II.2	Disponibilité des données de pluviométrie, température et vitesse du vent. . . . .	4
II.3	Disponibilité des données d'insolation, humidité et ETP. . . . .	5
III.1	Liste des combinaisons MGC/MRC utilisés dans l'étude . . . . .	18
III.2	Configuration des périodes de calibration et de validation, mois de Mai . . . . .	24
III.3	Configuration des périodes de calibration et de validation, mois de Juin . . . . .	24
III.4	Configuration des périodes de calibration et de validation, mois de Juillet . . . . .	25
III.5	Configuration des périodes de calibration et de validation, mois d'Aout . . . . .	26
III.6	Configuration des périodes de calibration et de validation, mois de Septembre . . . . .	26
III.7	Configuration des périodes de calibration et de validation, mois d'Octobre . . . . .	27
IV.1	Scénarios pluviométriques extrêmes pour Agadez . . . . .	29
IV.2	Scénarios pluviométriques extrêmes pour Konni . . . . .	31
IV.3	Scénarios pluviométriques extrêmes pour Gaya . . . . .	33
IV.4	Scénarios pluviométriques extrêmes pour Mainé Soroa . . . . .	35
IV.5	Scénarios pluviométriques extrêmes pour Maradi . . . . .	37
IV.6	Scénarios pluviométriques extrêmes pour Niamey . . . . .	39
IV.7	Scénarios pluviométriques extrêmes pour Tahoua . . . . .	41
IV.8	Scénarios pluviométriques extrêmes pour Tillabéry . . . . .	43
IV.9	Scénarios pluviométriques extrêmes pour Zinder . . . . .	45

## Liste des sigles et abréviations

- AMMA : Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine
- AR4 : 4<sup>e</sup> Rapport d'Évaluation du GIEC
- CNEDD : Conseil National de l'Environnement pour un Développement Durable
- DMN : Direction de la Météorologie Nationale
- ETP : Evapotranspiration potentielle
- FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
- GIEC : Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat
- INS : Institut National de la Statistique
- MGC : Modèle Global de Climat
- MRC : Modèle Régional de Climat
- NCEP : National Center for Environmental Prediction
- PAA : Programme Africain d'Adaptation
- PAA : Programme Africain d'Adaptation
- PRECIS : Providing Regional Climate for Impact Studies, UKMO
- RegCM : Regional Climate Model, ICTP, Trieste, Italie
- SCN : Seconde Communication Nationale du Niger sur les Changements Climatiques
- SNHT : Standard Normal Homogeneity Test
- SRES : Special Report on Emission Scenarios
- TMAX : Température maximale
- TMIN : Température minimale
- UKMO : Met Office, Hadley Centre
- UMAX : Humidité maximale
- UMIN : Humidité minimale

## Résumé

Ce rapport a été élaboré dans le cadre du Programme Africain d'Adaptation (PAA) et vise à développer des scénarios de changements climatiques pour le Niger, faire l'évaluation approfondie des risques de changement climatiques et leurs impacts sur les secteurs clés de l'économie (agriculture, élevage, foresterie, pêche, énergie, ressources en eau, santé et zones humides), évaluer les modèles climatiques existants, sortir des projections de précipitations et températures dans un horizon spatio-temporel adéquat et en ressortir les incertitudes. L'étude avait également pour objectif de faire une évaluation des besoins en informations et données importantes pour valider et adapter les sorties de ces différents modèles climatiques au Niger.

Cette première partie de l'étude présente d'abord le processus de génération des scénarios climatiques au niveau des neuf principales stations synoptiques du pays que sont Agadez, Birni n'Konni, Gaya, Mainé Soroa, Maradi, Niamey, Tahoua, Tillabéry, Zinder. Les données de ces neuf stations, sélectionnées sur la base de la disponibilité des données, ont été soigneusement contrôlées et corrigées. Les données d'observation corrigées et les sorties de onze modèles régionaux de climat ont servi à générer des scénarios de précipitations et de températures au niveau de chacune des stations.

Dans l'alternative du scénario humide il faut s'attendre à une augmentation moyenne des précipitations par rapport à la période de référence 1961-1990 allant de moins de 10% à Niamey jusqu'à près de 90% à Agadez. Dans l'autre alternative, celle du scénario sec, on anticipe une augmentation des précipitations allant de 25% Agadez jusqu'à de faible diminution de l'ordre de 10% à Niamey ou Tillabéry. Dans les deux alternatives les températures maximales et minimales seront à la hausse par rapport à la période de référence avec des augmentations moyennes allant de 0.5° à Tahoua (scénario sec) à plus de 2°C (scénario humide) à Maradi ou Agadez en 2050.

Ces résultats ne sont qu'une analyse sommaire des données produites et ne permettent d'avoir qu'un aperçu global des changements auxquels attendus. Les modèles sectoriels (agriculture, élevage, foresterie, pêche, énergie, ressources en eau, santé et zones humides) qui donneront plus de détails sur les impacts attendus dans chaque secteur et recommanderons les mesures d'adaptation appropriées.

## I Introduction

Le Niger, comme beaucoup de pays africains, est extrêmement sensible aux variations du climat en général, et de la pluviométrie en particulier (CNEDD, 2009). Les 15 millions d'habitants vivent essentiellement de l'agriculture pluviale, et la baisse observée des précipitations moyennes depuis les années 1970, combinée avec une grande variabilité inter annuelle et une démographie galopante, a entraîné plusieurs crises alimentaires nécessitant l'assistance de la communauté internationale. C'est le cas des années 1968, 1973, 1981, 1984, 1987, 1990, 2000, 2004 et 2009 (Biasutti and Giannini, 2006; DMN, 2009). Ces sécheresses, combinées aux actions anthropiques, conduisent à la désertification et à la dégradation des ressources naturelles. Cette dégradation continue des terres agricoles et pastorales par la sécheresse et la désertification a conduit à une série de mauvaises années, notamment sur le plan agropastoral, avec toutes les conséquences socioéconomiques qui en ont découlé.

Il devient de plus en plus évident que non seulement ce genre de sécheresses vont se reproduire régulièrement dans le futur, mais que leur ampleur et leur fréquence pourraient être exacerbées par les changements climatiques. Selon le 4ème Rapport d'évaluation du GIEC (AR4, Solomon et al. (2007)), les rendements des cultures pluviales dans certains pays africains pourraient diminuer de plus de 50% (Solomon et al., 2007). La baisse est déjà perceptible au Niger où les rendements du mil ont, à l'instar de la pluviométrie, été plus bas que la moyenne entre les années 1970 et 2000 (FAO Stats : faostat.fao.org). Le maintien d'une tendance à la baisse des rendements dans un pays où la population double tous les vingt ans présage de graves crises pour les années à venir. Les changements climatiques sont aussi susceptibles d'impacter la répartition temporelle et spatiale des ressources en eau, l'étendue des zones humides et la biodiversité, la consommation et la production d'énergie ainsi que la santé des populations (Tol et al., 1998).

Il est de ce fait urgent de mettre en œuvre des mesures d'adaptation adéquates sans quoi le développement socioéconomique du pays serait gravement compromis. Pour cela, il est très important de connaître l'impact, aussi bien de la variabilité climatique que celui des changements climatiques, sur les principaux secteurs socioéconomiques, afin de prendre les mesures adéquates pour faire face aux effets néfastes de ces phénomènes. Le présent rapport présente la première partie d'une étude ayant pour but de développer des scénarios de changements climatiques pour le Niger puis de faire l'évaluation approfondie des risques de changement climatiques et leurs impacts sur les secteurs clés de l'économie que sont l'agriculture, l'élevage, la foresterie, la pêche, l'énergie, les ressources en eau, la santé et les zones humides. L'étude a également pour objectif la mise en place d'un ensemble d'outils d'analyse et de planification à long terme pour gérer les incertitudes sur le développement économique et social du pays. En termes d'objectifs spécifiques, l'étude vise à sélectionner un modèle applicable au cas du Niger, développer un cadre méthodologique global, évaluer les modèles climatiques existants, sortir des projections de précipitations et températures dans un horizon spatio-temporel adéquat et en ressortir les incertitudes. L'étude vise également à faire une évaluation des besoins en informations et données importantes pour valider et adapter les sorties de ces différents modèles climatiques au Niger. Ce rapport présente la génération des scénarios climatiques secs et humides au niveau des neuf principales

stations synoptiques du pays (Agadez, Birni n’Konni, Gaya, Mainé Soroa, Maradi, Niamey, Tahoua, Tillabéry, Zinder). Ces neuf stations ont été sélectionnées sur la base de la qualité de leurs données et la disponibilité de séries d’observation suffisamment longues pour pouvoir valider les simulations des modèles climatiques.

Afin d’obtenir les scénarios de changements climatiques au niveau de ces neuf stations synoptiques, les données observées corrigées et les sorties mensuelles de onze modèles régionaux de climat issus de l’expérience climatique AMMA-ENSEMBLE (Hourdin et al. (2010a)) ont été mises statistiquement à l’échelle pour générer des scénarios mensuels de précipitations et de températures au niveau de chacune des stations synoptiques. Les scénarios mensuels ont ensuite été désagrégés au pas de temps journalier par la méthode des analogues historiques (Zorita and Von Storch, 1999; Matulla et al., 2008). Finalement, les scénarios le plus humide et le plus sec au niveau de chaque station synoptique ont été retenus pour être utilisés dans les études d’impacts sectoriels.

Le reste du rapport est organisé comme suit : le chapitre II présente les données climatiques disponibles au niveau des neuf stations climatiques ainsi que le contrôle de qualité des données au niveau de ces stations. Au chapitre III, on présente la méthodologie utilisée pour générer les scénarios de changement climatique. Le scénario sec et le scénario humide obtenus pour chacune des stations, sont présentés au chapitre IV. Une brève conclusion est fournie au chapitre V. Le rapport se termine par une série de recommandation visant à améliorer les prochaines études similaires, et à éviter un certains nombre de difficultés rencontrées.

## II Données climatiques

Pour entreprendre cette étude, les données journalières ont été obtenues à la Direction de la Météorologie Nationale (DMN). Il s’agit notamment de la pluviométrie, la température maximale (TMAX) la température minimale (TMIN), la vitesse du vent, la durée d’insolation, l’humidité maximale (UMAX), l’humidité minimale (UMIN) et l’évapotranspiration potentielle (ETP) pour neuf (9) stations du pays, à savoir Agadez, Birni N’Konni, Gaya, Mainé Soroa, Maradi, Niamey, Tahoua, Tillabéry et Zinder. Le choix de ces stations a été guidé par, non seulement leur résolution spatiale (synoptique), mais aussi par la disponibilité des données sur une période assez longue (1961-2010). Ces stations sont cartographiées sur la figure II.1, tandis que leurs coordonnées géographiques sont listées dans la table II.1.

NOM STATION	CODE STATION	LATITUDE	LONGITUDE
Agadez	320048	16.97	7.98
Birni N’Konni	320025	13.8	5.28
Gaya	320018	11.88	3.45
Mainé Soroa	320072	13.23	11.98
Maradi	320047	13.47	7.08
Niamey	320009	13.48	2.17
Tahoua	320023	14.9	5.30
Tillabéry	320004	14.2	1.45
Zinder	320062	13.78	8.98

TABLE II.1: Coordonnées géographiques des stations synoptiques utilisées

Ce sont les données pluviométriques qui sont les plus complètes sur la période considérée et pour toutes les stations. Une certaine discontinuité est observée pour les données de TMAX, TMIN, la vitesse du vent et la durée d'insolation surtout pour la station de GAYA qui ne commence ses observations qu'en 1970 pour tous ces paramètres. Les données de l'UMAX, l'UMIN et de l'ETP ne couvrent vraiment pas toute la période (tables II.2 et II.3).

STATION	PLUVIOMETRIE		TMAX		TMIN		VITESSE DU VENT	
	D	M	D	M	D	M	D	M
-								
Agadez	1961-2010	-	1961-2010	-	-	-	-	-
Birni N'Konni	1961-2010	-	1961-2010	-	-	-	-	-
Gaya	1961-2010	-	1970-2010	1961-1969	1970-2010	1961-1969	1970-1998	1961-1969
Mainé Soroa	1961-2010	-	1961-1998, 2000-2010	Oct-Déc 1999	Oct-Déc 1999	-	1961-1966, 1979-1997, 2000-2010	1967-1978, 1998-1999, Jan-Fév 2000
Maradi	1961-2010	-	1961-2010	-	-	-	1962-2010	1961
Niamey	1961-2010	-	1961-2010	-	-	-	-	-
Tahoua	1961-2010	-	1961-2010	-	-	-	-	-
Tillabéry	1961-2010	-	1961-2010	-	-	-	1961-1998	1998-2003
Zinder	1961-2010	-	1961-2010	-	-	-	-	-

D=disponible ; M=manquantes

TABLE II.2: Disponibilité des données de pluviométrie, température et vitesse du vent.

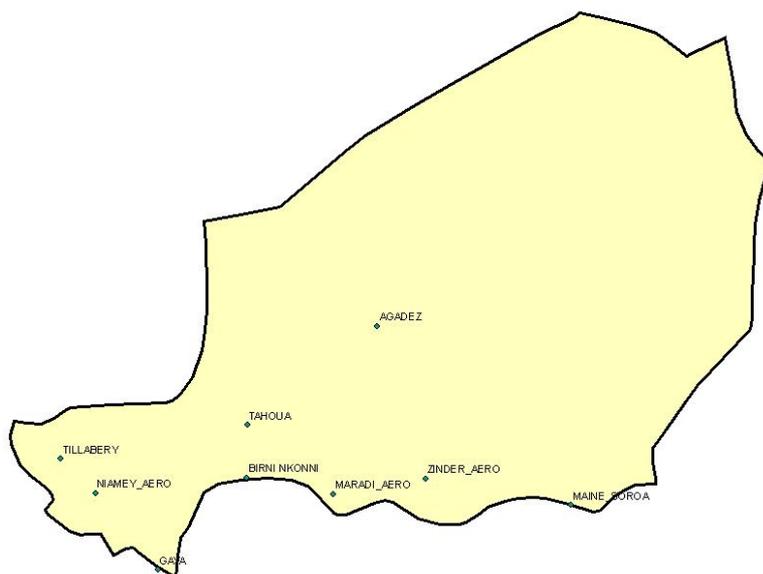


FIGURE II.1: Carte de localisation des stations synoptiques utilisées

STATION	INSOLATION		UMAX		UMIN		ETP	
	D	M	D	M	D	M	D	M
-								
Agadez	1961-2010	-	1990-2010	1961-1989	1990-2010	1961-1989	1977-2010	-
Birni N'Konni	1961-2010	-	1990-2010	1961-1989	1990-2010	1961-1989	-	M2002-2003, J2002
Gaya	1970-2010	1961-1969	1990-2010	1961-1989	1990-2010	1961-1989	-	M-D
Mainé Soroa	1961-2010	FD1999, JA-2002, O-2000	1990-2010	J2000, O1999, D1999, 1961-1989	1990-2010	J2000, )1999, D1999, 1961-1989	-	1998-1999, JF2000, JA2002
Maradi	1961-2010	-	1990-2010	1961-1989	1990-2010	1961-1989	-	J 2004
Niamey	1961-2010	-	1990-2010	1961-1989	1990-2010	1961-1989	1977-2010	-
Tahoua	1961-2010	-	1990-2010	1961-1989	1990-2010	1961-1989	1977-2010	F-D1999
Tillabéry	1961-2010	JAS2002	1990-2010	1961-89	1990-2010	1961-1989	-	-
Zinder	1961-2010	-	1990-2010	1961-1989	1990-2010	1961-1989	1977-2010	-

D=disponible ; M=manquantes ;

TABLE II.3: Disponibilité des données d'insolation, humidité et ETP.

## II.1 Contrôle de qualité des données

### II.1.1 Erreurs et données manquantes

Un contrôle méthodique a permis de détecter et corriger plusieurs erreurs et des données manquantes ont été décelées. Ce contrôle s'est appuyé d'une part sur la base de données climatologique actualisée et d'autre part sur les archives où sont stockés les documents originaux.

Les opérations de correction ont été conduites de la manière suivante :

- les documents de base ont été consultés au cas par cas en vue du remplacement par des données originales pour corriger les erreurs ou aberrations rencontrées.
- les données manquantes ont été complétées soit par la saisie directe au cas où les données sont disponibles dans les archives, soit par les moyennes journalières sur les trente (30) années les plus proches en cas de données non disponibles ;

### II.1.2 Homogénéité des données

Aucune des séries de données déplacement de station ou de changement d'appareillage de mesure n'a été documenté pour toutes les stations. On peut donc considérer que les observations sont homogènes sur toute la période et qu'elles ne seront pas à la base d'éventuelles ruptures de tendance ou de stationnarité qui seront constatées lors des différentes analyses.

## II.2 Détection de sauts et tendances dans les données

Afin de vérifier l'existence d'éventuels sauts de moyenne et d'éventuelles tendances linéaires dans les données, deux tests statistiques ont été appliqués aux données. Le *Standard Normal Homogeneity Test*, SNHT (Alexandersson and Moberg, 1997; Alexandersson, 1986) qui permet la détection de sauts de moyennes, et le test de *Mann-Kendall* (Hamed, 2008; Kendall, 1955; Sen, 1968) qui permet la dé-

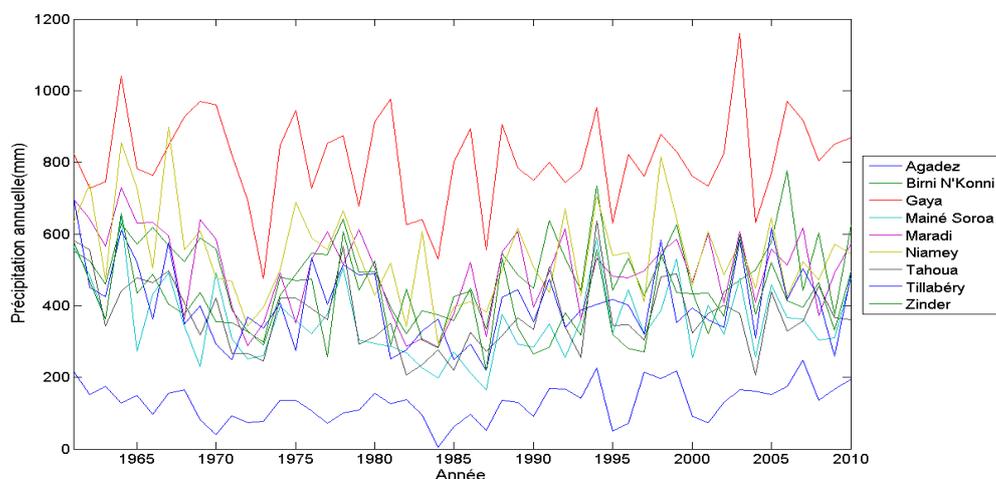


FIGURE II.2: Précipitations annuelles observées

tection de tendances linéaires dans les données. Ces deux tests ont été appliqués aux données moyennes annuelles et les résultats par variable sont résumés dans les sous-sections suivantes.

## II.2.1 Précipitations annuelles

### Standard Normal Homogeneity Test

Au niveau de confiance de 95%, le test permet de détecter une baisse de la moyenne des précipitations annuelles aux stations de Maradi, Niamey, Tahoua et Tillabéry. Aucun changement significatif n'est détecté aux autres stations pour la période 1961-2009. Toutes les stations présentent des déficits pluviométriques significatifs au début des années 1970, et entre 1980 et 1990, avec une certaine reprise des précipitations au-dessus de la moyenne entre 1990 et 2000.

### Test de Mann Kendall

Au niveau de confiance de 95%, aucune tendance linéaire ne peut être détectée dans les séries de précipitations annuelles de 1961 à 2009.

## II.2.2 Températures maximales

### Standard Normal Homogeneity Test

Des hausses de moyennes des températures sont détectées à toutes les stations sauf Niamey et Tahoua.

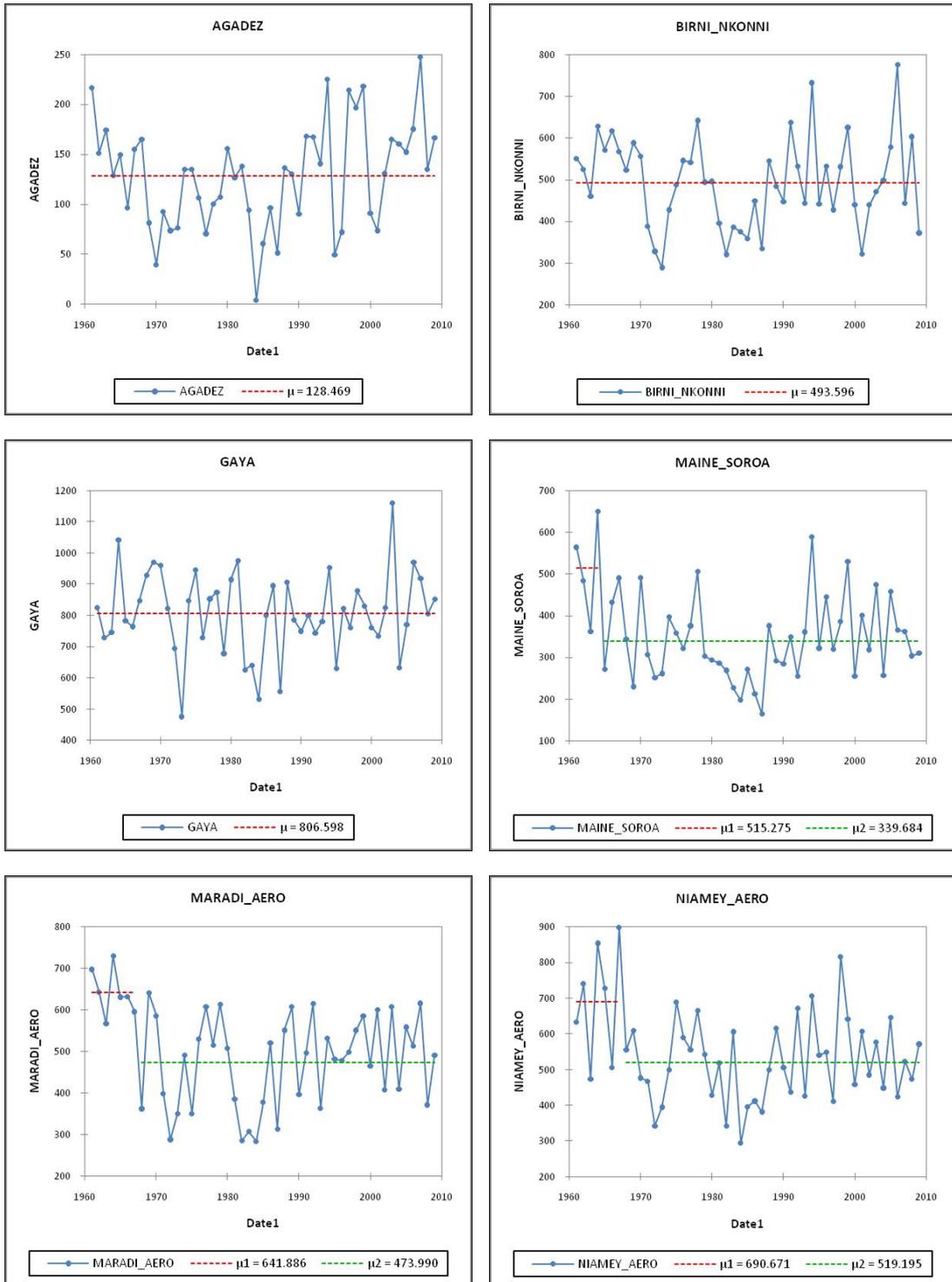


FIGURE II.3: Normal Homogeneity Test

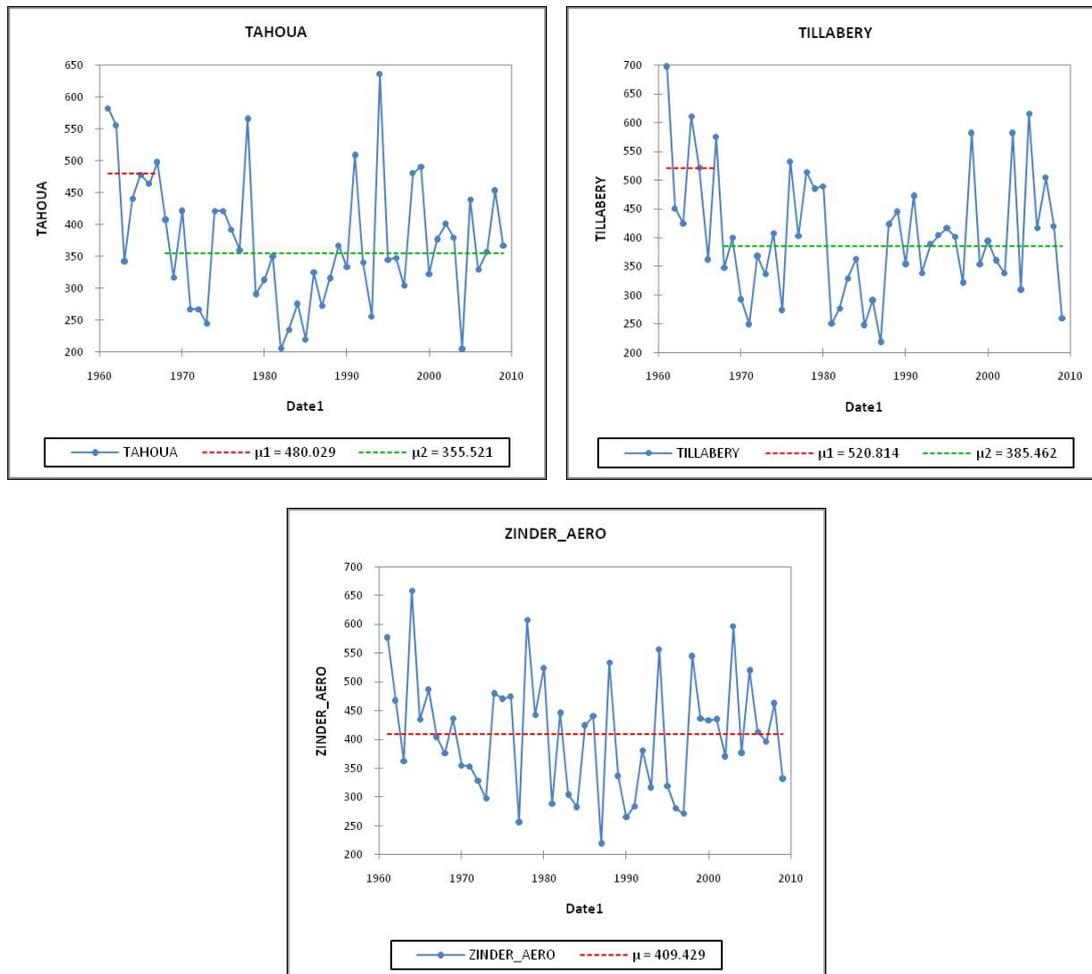


FIGURE II.4: Normal Homogeneity Test

### Test de tendance de Mann-Kendall

Des tendances à la hausse des températures maximales sont observées au niveau de toutes les stations sauf la station de Tahoua.

### II.2.3 Températures minimales

#### Standard Normal Homogeneity Test

Des hausses de moyennes des températures sont détectées à toutes les stations synoptiques.

### Test de tendance de Mann-Kendall

Des tendances à la hausse des températures maximales sont observées au niveau de toutes les stations synoptiques.

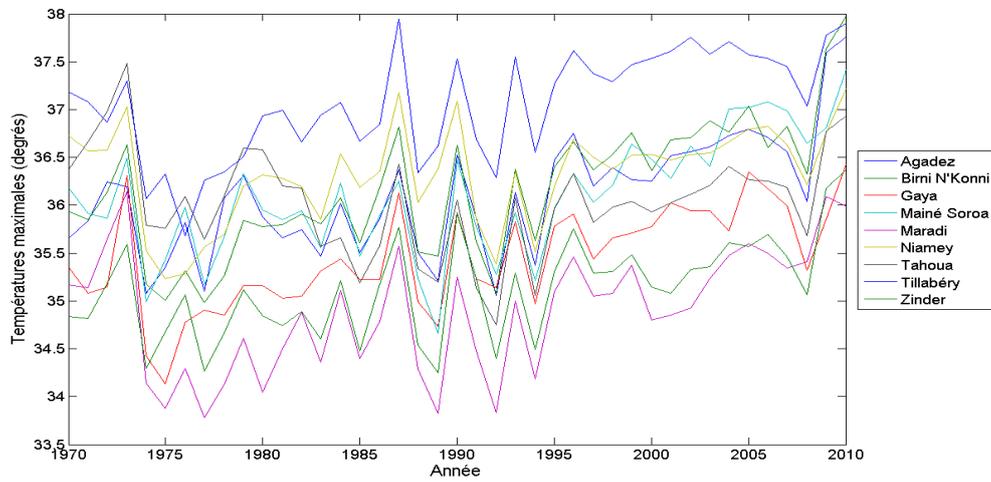


FIGURE II.5: Moyenne annuelle des températures maximales observées

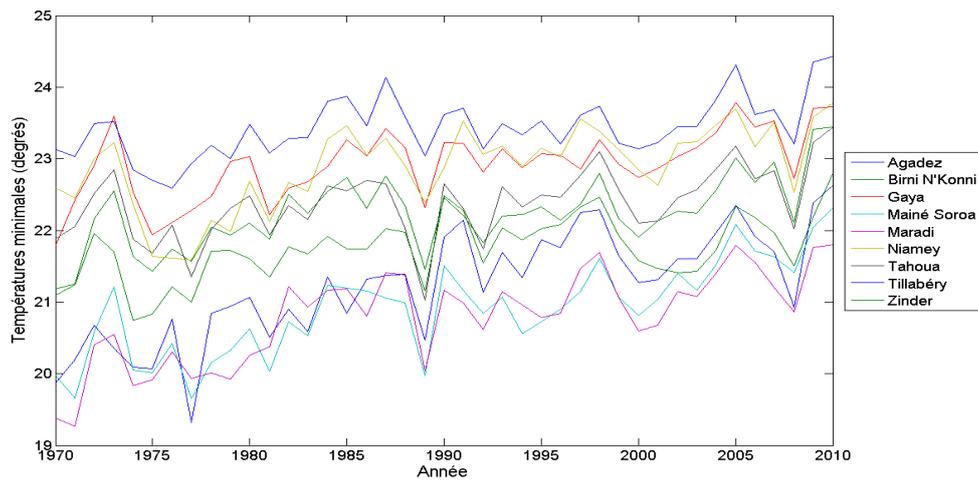


FIGURE II.6: Moyenne annuelle des températures minimales observées

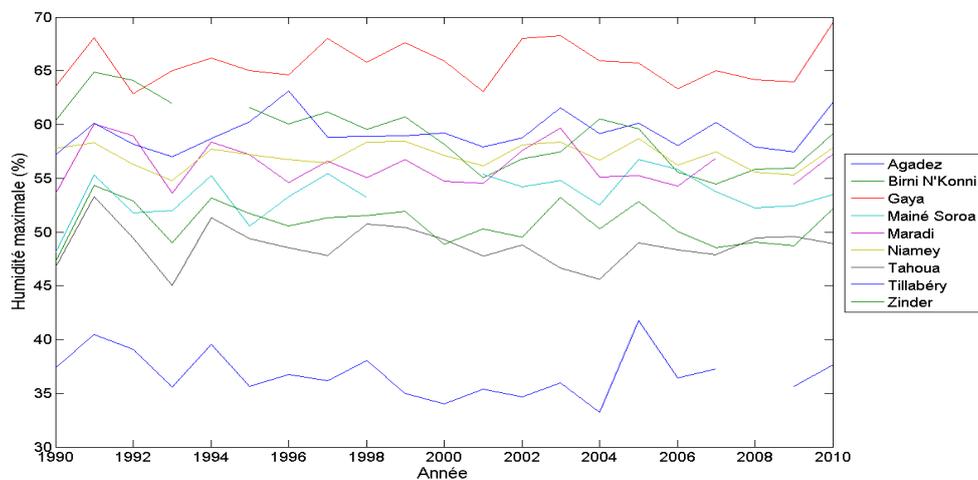


FIGURE II.7: Moyenne annuelle de l'humidité relative maximale observé

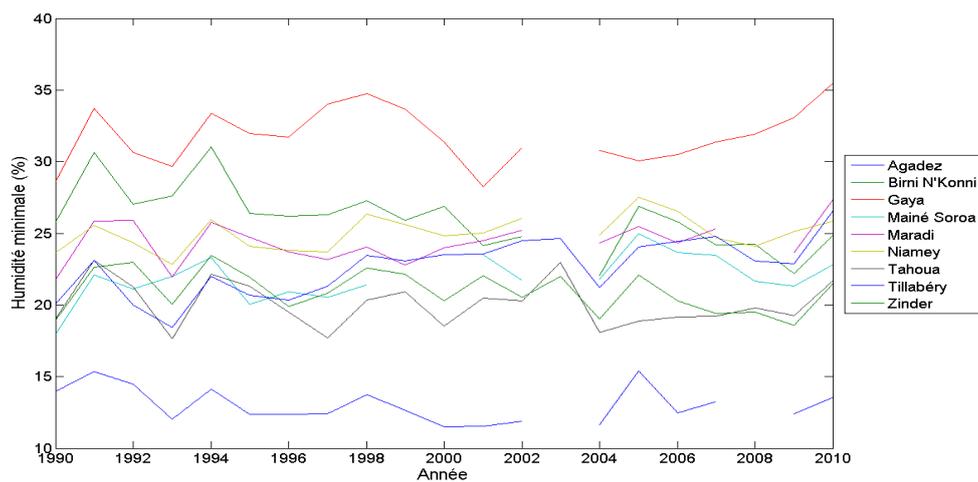


FIGURE II.8: Moyenne annuelle de l'humidité relative minimale observé

## II.2.4 Humidités minimales et maximales

Aucune tendance ni saut de moyenne ne sont détectables au niveau des valeurs d'humidité minimale et maximale qui sont essentiellement stables.

## II.2.5 Vitesse du vent

Selon de la station considérée, on détecte des tendances à la hausse ou à la baisse de la vitesse pouvant conduire jusqu'au doublement des vitesses moyennes entre 1970 et 2008 (Agadez) ou la division par 2 des valeurs moyennes entre 1970 et 2008 (Maradi). Quoique les métadonnées ne soient

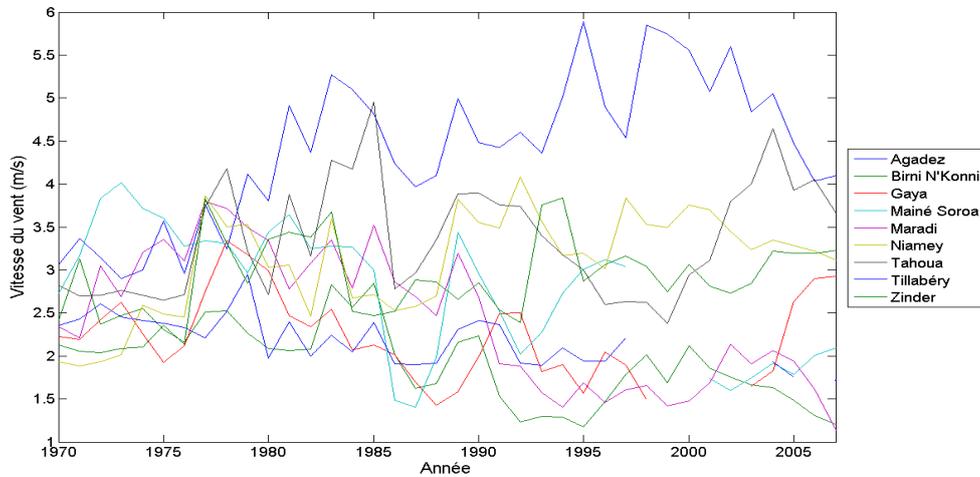


FIGURE II.9: Moyenne annuelle de la vitesse maximale du vent observée

pas disponibles, ceci suggère que les données du vent ne sont pas fiables et du même coup les valeurs d'évapotranspiration qui ont été calculées avec les valeurs du vent.

### II.2.6 Évapotranspiration potentielle

Les données d'évapotranspiration potentielle fournies par la Météorologie Nationale ont été calculées avec la formule de Penman (Allen et al., 1998; Smith et al., 1992) dont les données d'entrée sont les températures minimales et maximales, les humidités relatives maximales et minimales, l'insolexion et la vitesse du vent. Du fait de l'imprécision des vitesses de vent signalées plus haut, ces données contiennent des erreurs (on observe par exemple des tendances à la baisse au niveau de certaines stations alors que les températures sont clairement à la hausse). Pour les besoins de ces études, les valeurs d'ETP à chaque station ont été recalculées en utilisant la vitesse moyenne du vent à la station.

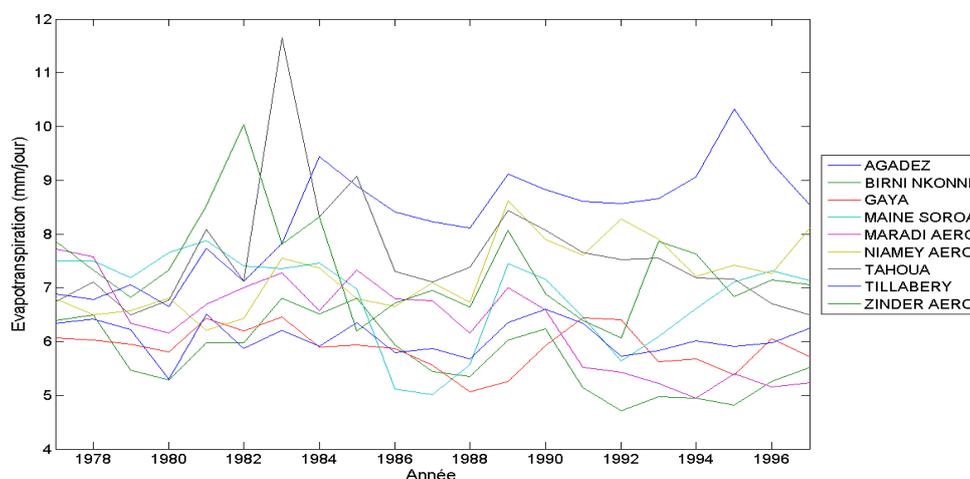


FIGURE II.10: Moyenne annuelle de l'évapotranspiration calculée

### III Méthodologie de génération des scénarios

Le développement de scénarios de changements climatiques implique l'utilisation d'une succession de modèles. Dans ce chapitre, nous allons d'abord brièvement présenter ces modèles avant de décrire comment ces modèles ont été utilisés dans cette étude.

#### III.1 Définitions

##### III.1.1 Modèle Global de Climat

Un modèle global de climat (MGC) est une représentation numérique de l'atmosphère terrestre. Il est basé sur des lois de conservation qui décrivent le transfert de la chaleur, de la quantité de mouvement, de la vapeur d'eau et des autres constituants par les mouvements atmosphériques. Ces mouvements sont essentiellement dus à la redistribution de l'énergie provenant du soleil. Ces processus sont décrits par des équations différentielles partielles dont on ne peut obtenir les solutions que numériquement.

La résolution spatiale des modèles globaux de climat sont suffisants pour décrire les caractéristiques à grande échelles du climat mais ne permettent pas d'exploiter les résultats à l'échelle régionale ou locale.

Les modèles globaux de climat font l'objet d'intenses recherches pour mieux comprendre l'origine des biais et évaluer leur capacité à simuler les climats présents et future. Plusieurs auteurs ont analysé la qualité des simulations, par ces modèles, de paramètres comme les précipitations (Dai, 2006; Phillips and Gleckler, 2006) l'une des plus importantes variables climatiques.

Leurs résultats montrent que même si les moyennes s'accordent avec les observations, il y a encore

des biais importants notamment sur la variabilité spatiale ou l'amplitude et la phase du cycle saisonnier. Ces déficiences qui sont à la base des biais sur les précipitations simulées pourraient également être à l'origine de la meilleure performance des moyennes multi-modèles.

Plus spécifiquement, en Afrique, les modèles globaux de climat ont du mal à simuler correctement la mousson. Ainsi les modèles couplés reproduisent mieux les précipitations sur le nord du Continent Américain que sur l'Afrique. Cela peut s'expliquer par le fait que le mécanisme de la mousson africaine n'est toujours pas bien compris, ou même par le faible nombre de stations d'observation dans la région. Malgré cela les études (Folland et al., 1986; Giannini et al., 2003; Hoerling et al., 2006; Lu and Delworth, 2005) ont montré que les modèles forcés avec les valeurs observées des températures de surface de la mer arrivent à reproduire assez correctement le climat du Sahel, notamment la tendance à la baisse des précipitations des années 50 aux années 1980.

Cook et Vizy (2006) ont analysé les simulations de 18 modèles du 4<sup>e</sup> rapport du GIEC et évalué leur capacité à reproduire les modes dominants de variabilité de la mousson africaine de 1949 à 2000. Il apparaît que la nouvelle génération de modèles couplés océan-atmosphère reproduit mieux la climatologie de précipitations sur l'Amérique du Nord et l'Europe que sur l'Afrique. Huit (8) des 18 modèles placent le maximum de précipitations JJAS trop au sud sur le Golf de Guinée. Seuls six (6) des dix (10) modèles restants arrivent à capturer plus ou moins bien la structure dipolaire des précipitations entre le Sahel et la côte guinéenne qui apparaît dans les observations (Janicot, 1992; Janowiak, 1988; Rowell et al., 1995).

Lau et al (2006) ont évalué la performance de 19 modèles couplés Océan-atmosphère du GIEC sur la région sahélienne des années 1970 aux années 1990. Ils concluent que seuls 8 des 19 modèles arrivent à reproduire raisonnablement la tendance observée à la baisse des précipitations au Sahel, mais qu'aucun n'arrive à simuler correctement ni le début et ni la fin de cette tendance à la sécheresse. Certains modèles simulent même un climat trop humide à des moments où l'on observe des périodes de sécheresse intense.

### **III.1.2 Modèle Régional de Climat**

Les modèles régionaux de climat (MRC) sont complémentaires de modèles globaux (Giorgi et al., 1993; Konare et al., 2008; Xue et al., 2008; Jones et al., 2004; Wilson et al., 2007). On utilise typiquement les modèles régionaux pour ajouter plus de détails aux simulations et aux analyses du climat, ou pour étudier certains processus beaucoup plus en détails que ne permettent les modèles globaux. De ce fait ils servent d'entrées aux études d'impacts ainsi qu'aux mesures d'adaptation à la variabilité et aux changements climatiques.

Malgré leurs limitations, les modèles globaux et régionaux constituent de puissants outils pour l'étude du climat et du changement climatique.

### III.1.3 Réanalyses des données historiques

En science de l'atmosphère une analyse est une représentation détaillée de l'état de l'atmosphère basée sur des observations. Une analyse rétrospective, ou *réanalyse*, est une méthode objective et quantitative de production d'analyse sur des périodes de temps suffisamment longues pour être utilisable dans les applications climatiques. L'objectif principal des efforts de réanalyse est de donner des longues séries de données précises et cohérentes sur l'état de l'atmosphère (Kalnay et al., 1996).

### III.1.4 Mise à l'échelle

Le système climatique est global. Il est caractérisé par un large éventail d'échelles spatiales et temporelles. Les modèles globaux peuvent effectivement permettre l'étude des caractéristiques du climat à grande échelle comme la circulation de l'atmosphère et de l'océan. Leur résolution spatiale ne descend guère en dessous de 100–200 km, ce qui ne permet pas l'étude de certains aspects importants du climat régional ou local comme les précipitations convectives.

Les deux principales méthodes de mise à l'échelle sont la méthode dynamique et la méthode statistique. La méthode dynamique utilise les modèles régionaux de climat comme RegCM (Giorgi et al., 1993; Konare et al., 2008; Xue et al., 2008) ou PRECIS (Jones et al., 2004; Wilson et al., 2007) qui sont basés sur les mêmes équations fondamentales décrivant les processus climatiques que dans les modèles globaux. La méthode statistique implique de trouver des relations statistiques robustes entre les variables à grande échelle comme la température de la surface de l'océan, et les variables locales comme la température ou les précipitations en un lieu donné (Hessami et al., 2007, 2008; Wilby and Dawson, 2004, 2007).

### III.1.5 Scénarios d'émission

En 1992 (Leggett et al., 1992), en 1996, puis en 2000 (Nakicenovic et al., 2000) le GIEC a produit des scénarios d'émission à utiliser pour forcer des modèles globaux de climat en vue d'élaborer des scénarios des changements climatiques et contribuer à l'évaluation des conséquences climatiques et environnementales des émissions futures de gaz à effet de serre, ainsi que des options de stratégies d'atténuation et d'adaptation. Ces scénarios comportent les informations les plus récentes sur les émissions, la restructuration économique dans le monde entier, les différents rythmes et tendances de l'évolution technologique et l'éventail des différentes voies du développement économique possibles. Les équipes qui élaborent ces scénarios représentent un large éventail de disciplines scientifiques, de contextes régionaux et d'organisations non gouvernementales.

L'ensemble de scénarios élaboré en 2000 (Nakicenovic et al., 2000) pour représenter les fourchettes des forces motrices et des émissions selon la documentation sur les scénarios, de manière à refléter la compréhension et la connaissance actuelles des incertitudes sous-jacentes. Aucun jugement n'est exprimé sur telle ou telle préférence pour un scénario et aucune probabilité ne leur est attribuée ; ils ne doivent pas non plus être interprétés comme des recommandations de politique générale. Les scénarios

sont basés sur une évaluation extensive des forces motrices et des émissions dans la documentation, sur d'autres approches de modélisation. Ainsi quatre canevas narratifs différents ont été élaborés pour décrire de manière cohérente les relations entre les forces motrices des émissions et leur évolution et ajouter un contexte pour la quantification des scénarios. Chaque canevas représente une évolution différente au plan démographique, social, économique, technologique et environnemental, qui peut être envisagée positivement par certains, et négativement par d'autres. Les scénarios couvrent un large éventail des principales forces motrices, démographiques, économiques et technologiques, des émissions de gaz à effet de serre et sont représentatifs de la documentation existante. Chacun représente une interprétation quantitative spécifique d'un des quatre canevas. Tous ceux qui ont le même canevas constituent une "famille".

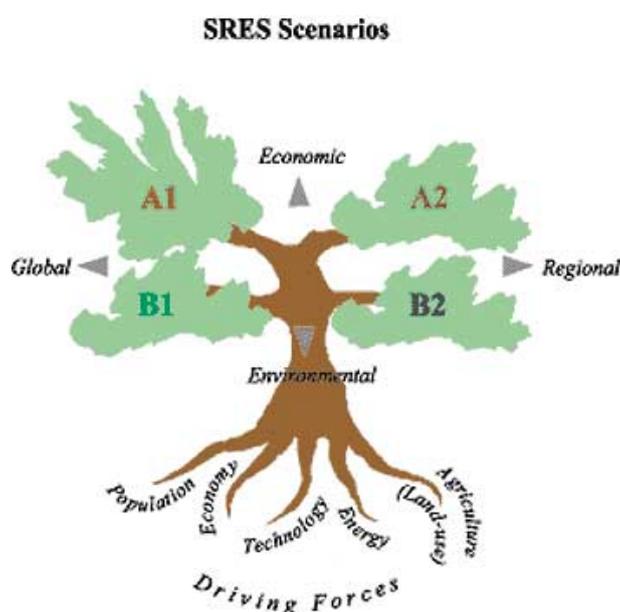


FIGURE III.1: Canevas naratifs

### Canevas A1

Le canevas et la famille de scénarios A1 se caractérise par :

- une croissance économique sera très rapide,
- une population mondiale atteignant un maximum au milieu du siècle puis déclinant,
- une introduction rapide de nouvelles technologies plus efficaces,
- une convergence entre régions,
- un renforcement des capacités et des interactions culturelles et sociales,
- une réduction substantielle des différences régionales dans le revenu par habitant.

La famille de scénarios A1 se subdivise en trois groupes selon les possibles évolutions technologiques dans le domaine énergétique. Ces trois groupes A1 se caractérisent par leur accent technolo-

gique : forte utilisation des combustibles fossiles (A1FI), utilisation de sources d'énergie autres que fossiles (A1T) et équilibre entre les sources (A1B).

### **Canevas A2**

Le canevas et la famille de scénarios A2 se caractérisent par :

- un monde très hétérogène,
- l'autosuffisance et la préservation des identités locales,
- l'accroissement continu de la population mondiale,
- l'orientation principalement régionale du développement économique,
- la croissance économique par habitant et l'évolution technologique plus fragmentées et plus lentes que dans les autres canevas.

### **Canevas B1**

Le canevas et la famille de scénarios B1 se caractérisent par :

- un monde convergent,
- la population mondiale atteignant un maximum au milieu du siècle puis déclinant (comme dans le canevas A1),
- le changement rapide vers une économie de services et d'information,
- l'introduction de technologies propres,
- l'utilisation efficiente des ressources,
- des solutions mondiales orientées vers une viabilité économique, sociale et environnementale, y compris une meilleure équité,
- aucune initiative supplémentaire pour gérer le climat.

### **Canevas B2**

Le canevas et la famille de scénarios B2 se caractérisent par :

- l'accent mis sur des solutions locales dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale,
- la population mondiale s'accroissant de manière continue (mais à un rythme plus faible que dans A2),
- le niveau intermédiaire de développement économique,
- l'évolution technologique moins rapide et plus diverse que dans les canevas B1 et A1.
- la protection de l'environnement et l'équité sociale,
- le développement axé sur des niveaux locaux et régionaux.

## **III.2 Etapes standard de développement de scénarios de changements climatiques**

Les étapes standard de développement de scénarios de changements climatiques pour une région du monde donnée sont les suivantes :

- Choix d'un ou plusieurs scénarios d'émission de Gaz à effets de serre
- Obtention des résultats de simulations d'un ou plusieurs modèles climatiques pour les scénarios sélectionnés auprès des grands centres mondiaux de modélisation du climat. Les modèles climatiques en question peuvent être des modèles de circulation générale (MGC) ou des modèles régionaux de climat (MRC).
- Mise à l'échelle des sorties des modèles climatiques avec une méthode dynamique (MGC) et/ou statistique (MGC ET MRC).
- Sélection des modèles qui offrent une bonne performance sur la région (i.e. dont les sorties mises à l'échelle correspondent raisonnablement avec les observations pour la période historique)
- Utilisation des projections des modèles sélectionnés comme scénarios validés de changements climatiques pour la région.

## **III.3 Choix du scénario de gaz à effets de serre**

Dans cette étude, nous avons choisi de travailler avec le scénario A1B (voir section [III.1.5](#) page 14). Étant donné que l'horizon pour de projection pour cette étude est 2050, il y'a très peu de différence entre le scénario A1B et les autres scénarios, qui ne se différencient significativement les uns des autres qu'après 2050.

## **III.4 Sélection des modèles climatiques**

Dans cette étude, nous avons utilisé les sorties mensuelles des modèles l'expérience AMMA ENSEMBLES sur la fenêtre sahélienne ([Hourdin et al., 2010b](#)). Cette expérience multi-institutionnelle visait la production de scénarios haute résolution (50 km) sur le Sahel en utilisant 11 combinaisons différentes de modèles de circulation générale et de modèles régionaux de climat.

## **III.5 Comparaison des sorties brutes des modèles avec les observations**

L'utilisation des modèles régionaux de climat est une méthode de mise à l'échelle qui permet d'accroître la résolution spatiale des sorties des modèles de circulation générale. Nous avons donc procédé à une comparaison des précipitations mensuelles des différents modèles de l'expérience -ENSEMBLE avec les observations de précipitations pour la période 1961-2010. Il s'est avéré que la répartition temporelle de leurs sorties brutes précipitation ne correspondaient pas aux observations sur les stations synoptiques du Niger. La figure [III.2](#) présente deux exemples de comparaisons entre les sorties brutes

Institution	Scénario	MGC	MRC	Résolution	Acronyme
KNMI	A1B	ECHAM5-r3	RACMO	50km	KNMI-RACMO2
DMI	A1B	ECHAM5-r3	HIRHAM	50km	DMI-HIRHAM5
SMHI	A1B	HadCM3Q0	RCA	50km	SMHIRCA
ICTP	A1B	ECHAM5-r3	RegCM	50km	ICTP-REGCM3
METNO	A1B	HadCM3Q0	HIRHAM	50km	METNOHIRHAM
UCLM	A1B	HadCM3Q0	PROMES	50km	UCLM PROMES
HC	A1B	HadCM3Q0	HadRM3P	50km	METO-HC HadRM3.0
GKSS	A1B	ECHAM5	CLM	50km	GKSS-CCLM4.8
INM	A1B	HadCM3Q0	RCA	50km	INMRCA3
MPI	A1B	ECHAM5-r3	REMO	50km	MPI-M-REMO

TABLE III.1: Liste des combinaisons MGC/MRC utilisés dans l'étude

de deux modèles régionaux (DMI-HIRHAM5/ECHAM5 et GKSS-CCLM4.8/ECHAM5) et les observations à la station de Niamey.

Les deux modèles surestiment considérablement les précipitations mensuelles aux mois de juillet, Aout et septembre. Leurs sorties brutes ne peuvent donc pas être utilisées telles-quelles. Une méthode de mise à l'échelle statistique au moyen des techniques de régression linéaire multiple a donc été mise en œuvre pour générer les projections mensuelles de chaque modèle pour la période 2011-2050.

### III.6 Mise à l'échelle statistique des sorties de modèles régionaux

La réduction d'échelle spatiale désigne les techniques utilisées pour obtenir des données climatiques à plus haute résolution à partir d'une sortie de MGC à résolution plus grossière. La réduction d'échelle spatiale repose sur des hypothèses de base, à savoir qu'il sera possible d'établir des relations significatives entre les climats locaux et à grande échelle (ce qui permet d'obtenir des données utiles à l'échelle du site uniquement à partir de données à grande échelle) et que ces relations demeureront valides dans les conditions climatiques futures. Ces relations peuvent être des régressions linéaires multiples, des régressions non linéaires ou toute autre fonction empirique reliant les sorties des MGC aux observations.

#### III.6.1 Principes de la mise à l'échelle par régression multiple

Pour une station donnée (ex. Niamey), une variable donnée (ex. précipitation), un modèle régional de climat donné (ex. DMI-HIRHAM5/ECHAM5), et un mois donné (ex. le mois de juillet), Cette méthode consiste à simuler la moyenne des observations du mois donné par la formule suivante :

$$\begin{cases} \hat{Y}_i^{NCEP} &= \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j P_{i,j}^{NCEP} & \text{Période d'observation} \\ \hat{Y}_i^{MGC} &= \beta_0 + \Delta + \sum_{j=1}^n \beta_j P_{i,j}^{MGC} & \text{Périodes d'observation et future} \end{cases} \quad (1)$$

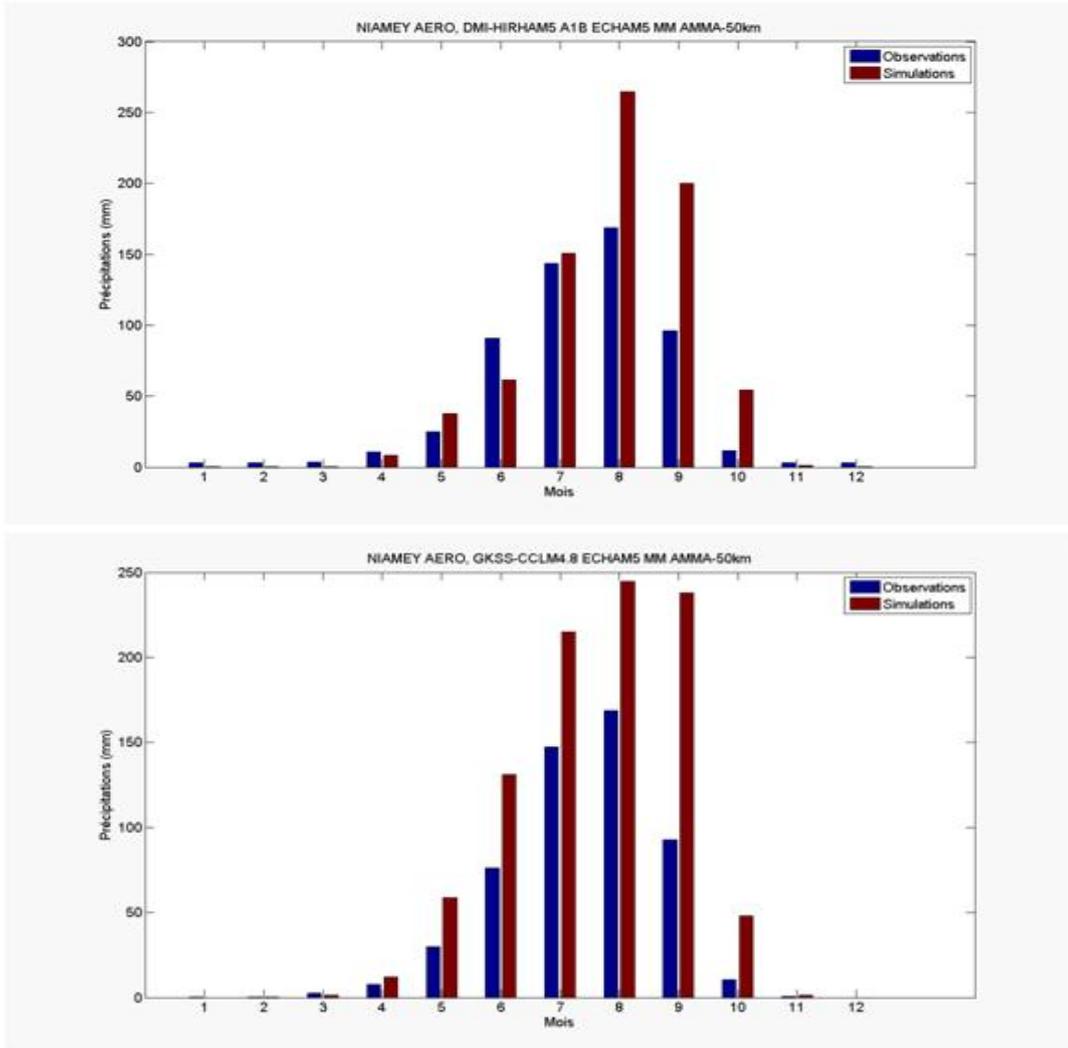


FIGURE III.2: Précipitation observées et simulées par deux modèles à Niamey

Où  $\hat{Y}_i^{NCEP}$  est l'estimation des observations mensuelles obtenue avec les prédicteurs,  $\hat{Y}_i^{MRC}$  est l'estimation des observations mensuelles obtenue avec les prédicteurs dérivés du MRC,  $P_{i,j}^{NCEP}$  représente le  $j^{ieme}$  prédicteur NCEP,  $P_{i,j}^{MRC}$  représente le  $j^{ieme}$  prédicteur dérivé des sorties du MRC choisi,  $\beta_{i,i=1,\dots,n}$  représente les coefficients de régression et  $\Delta$  représente le biais entre les simulations du modèle avec les prédicteurs GCM et les observations. Pour chacune des neuf stations synoptiques, les variables  $P_{i,j}^{NCEP}$  et  $P_{i,j}^{MRC}$  sont obtenues à partir du point de grille du MRC ou des réanalyses NCEP le plus proche de la station considérée. Les figures III.3 et III.4 montrent la localisation des points de grille utilisés.

Avant l'application du modèle de régression multiple,  $P_{i,j}^{NCEP}$  et  $P_{i,j}^{MRC}$  sont standardisés de façon à avoir la même moyenne et le même écart type sur la partie de période historique pour laquelle les prédicteurs du MRC et les prédicteurs NCEP sont tous disponibles.

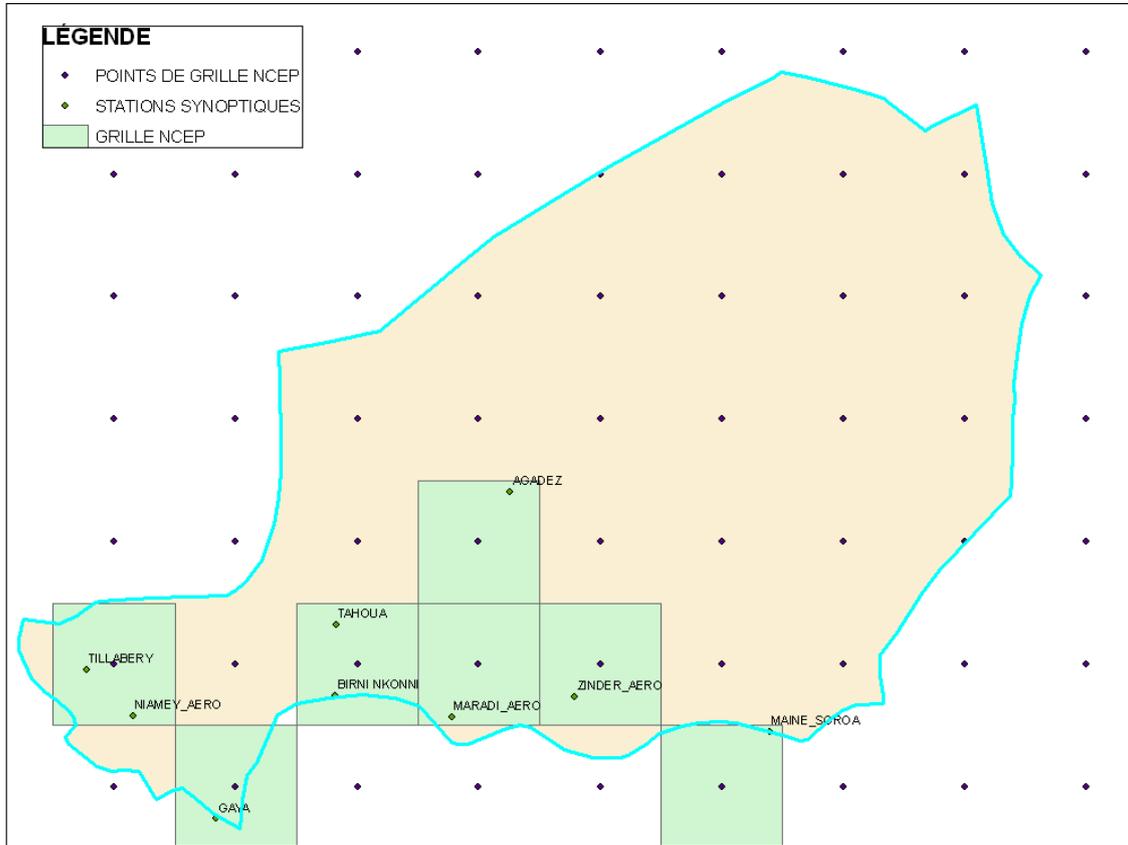


FIGURE III.3: Points de grille NCEP

### III.7 Calcul des paramètres du modèle de régression multiple étant donné une période de calibration et une période de validation.

L'estimation des paramètres de l'équation (1) commence par le choix d'une période de calibration et d'une période de validation pour lesquelles les observations de la variable sélectionnée sont disponibles. Les prédicteurs à inclure dans l'équation (1) ainsi que les coefficients de régressions sont calculés par régression *STEPWISE* à partir de tous les prédicteurs NCEP disponibles sur la période de calibration. Une fois les coefficients  $\beta_{i,i=1,\dots,n}$  calculés, le modèle calibré est simulé avec les prédicteurs calculés à partir des MRC. La valeur du biais  $\Delta$  est calculée sur la période de calibration avec la formule suivante :

$$\Delta = \text{Moyenne} \left( O_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^n \beta_j P_{i,j}^{MGC} \right) \quad (2)$$

Une fois  $\Delta$  obtenue,  $\hat{Y}_i^{MRC}$  et  $\hat{Y}_i^{NCEP}$  sont calculées sur la période de validation avec l'équation (1) et les tests suivants sont effectués :

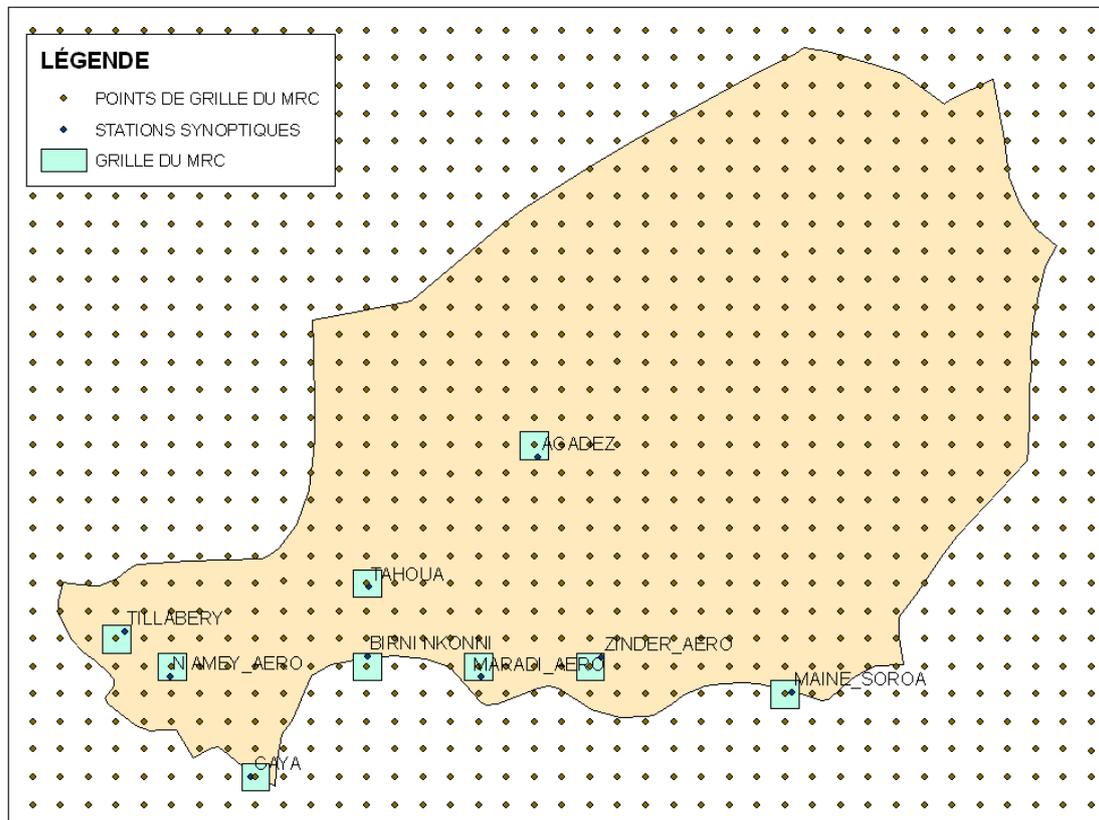


FIGURE III.4: Points de grille des MRC

1. Le test de *STUDENT* à deux échantillons est utilisé pour vérifier si la moyenne de  $\hat{Y}_i^{MRC}$  est significativement différente de la moyenne des observations au niveau de confiance 95% sur la période de validation.
2. Le test F est utilisé pour vérifier si la variance de  $\hat{Y}_i^{MRC}$  est significativement différente de la variance des observations sur la période de validation.

Si l'un des deux tests est positif, le modèle de mise à l'échelle statistique pour cette variable à la station considérée avec ce MRC. Dans le cas où tous les deux tests sont négatifs le modèle est considéré comme acceptable. Le processus complet est illustré à la figure III.5.

### III.7.1 Choix des périodes de calibration et de validation

Du fait de la faible longueur des observations de certaines des variables climatiques, les paramètres de l'équation 1 se sont révélés très sensibles au choix de la période de validation et de calibration. Afin de minimiser le biais introduit par ce choix, la procédure a été modifiée comme suit :

1. Les données sont subdivisées en cinq parties égales.

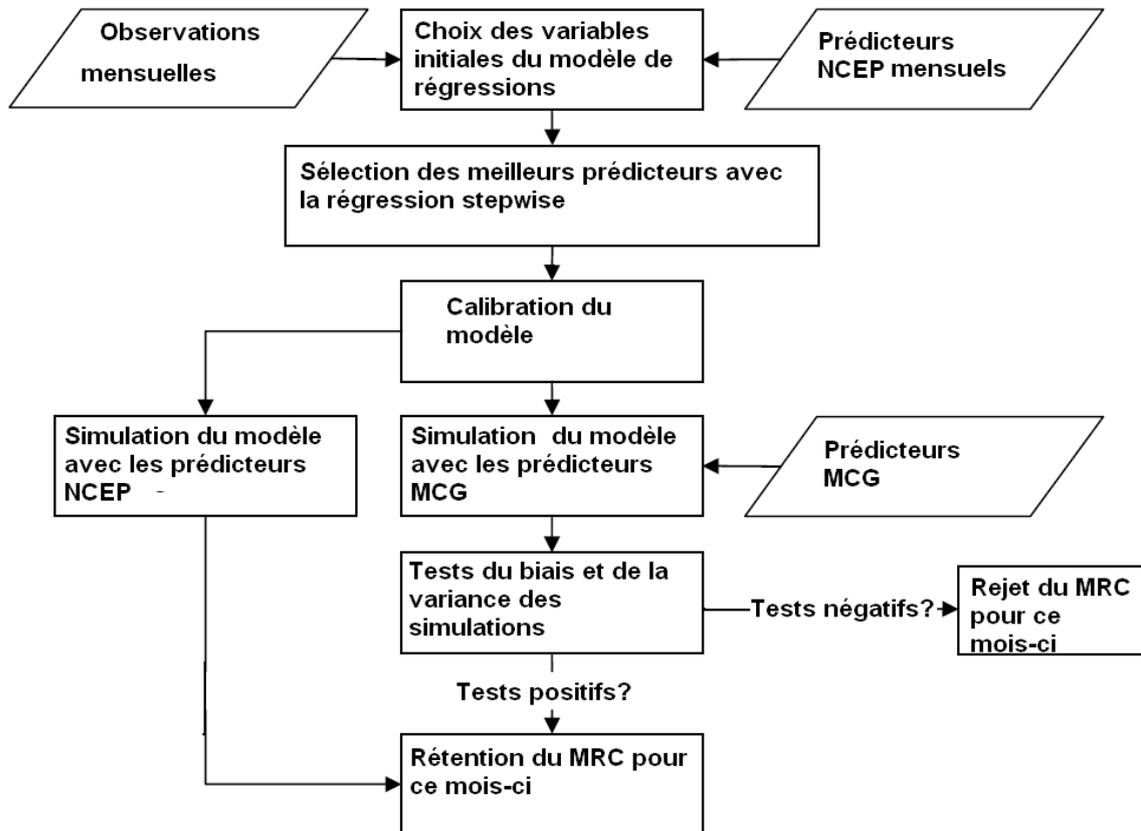


FIGURE III.5: Processus d'estimation des paramètres du modèle de régression

2. Les paramètres de l'équation (1) sont calculées en utilisation successivement chacune des cinq parties comme période de validation, et l'ensemble des quatre autres parties comme période de validation. L'erreur quadratique moyenne sur la période de validation  $RMSE_{i,i \leq 5}$  est calculée si le modèle de mise à l'échelle passe les tests de validation décrits à la section précédente.
3. La projection finale est la moyenne pondérée des projections des modèles ayant passé les tests de validation. La pondération de la projection  $i$  est égale à  $\frac{1/EQM_i}{\sum_j 1/EQM_j}$  où  $j$  parcourt les modèles qui ont passé le test de validation.

### III.7.2 Calcul des projections annuelles pour un MRC donné

La méthode développée donne jusqu'à 12 modèles mensuels de mise à l'échelle par modèle régional de climat. Dans le cas des précipitations, Il peut arriver qu'un modèle mensuel valide de mise à l'échelle soit obtenu pour certains mois de l'année pour un MRC donné, et non pour les autres. Lorsque la précipitation historique totale des mois ayant un modèle valide est supérieure à 85% de la précipitation historique totale de la station, le MRC est retenu et la projection de précipitation annuelle du MRC est obtenue en multipliant la précipitation historique moyenne par le ratio d'augmentation calculé pour les

mois ayant un modèle de désagrégation d'échelle valide.

### **III.7.3 Désagrégation des projections au pas de temps journalier**

La méthode des analogues historiques (Zorita and Von Storch, 1999; Matulla et al., 2008) a été utilisée pour générer les projections au pas de temps journalier. Pour chaque année de la période future, la procédure comporte trois étapes.

1. Identifier dans les données historiques l'année pour laquelle la répartition mensuelle de la variable considérée est la plus proche de la répartition mensuelle projetée pour la même variable
2. Multiplier les observations de l'année sélectionnée par une constante de façon à ce que la moyenne annuelle de cette année la soit égale à la moyenne annuelle projetée par la variable considérée.
3. Utiliser les valeurs obtenues au point précédent comme projections des valeurs journalières.

### **III.8 Exemple de calibration et de validation**

On présente ici le processus de calibration et de validation pour le modèle DMI-HIRHAM5 à la station de Niamey. Il s'agit du modèle qui a abouti au scénario le plus humide pour cette station. Pour chacun des mois Mai, Juin, Juillet, Aout, Septembre et Octobre, présente des figures sur lesquelles on compare la moyenne des observations avec celles des simulations avec les données NCEP et les données du MRC (Figures III.6, III.7, III.8, III.9, III.10, III.11 et III.12). La comparaison est faite pour la période de calibration (panneau supérieur de la figure), de validation (panneau central) et finalement pour toute la période des observations (panneau du bas). Comme pour chacun des mois, cinq combinaisons de l'ensemble de calibration et de validation ont été considérés, les panneaux supérieurs en central de chacune des figures présentent plusieurs groupes de trois bars. Seules les combinaisons pour lesquelles le modèle de mise à l'échelle a passé les tests décrits précédemment sont présentées. De ce fait, le nombre de configurations pour un mois donné peut être n'importe quel nombre entre 1 et 5. Les années correspondant à la période de calibration et de validation pour chacune des configurations retenues sont listées dans les tables, juste après les figures (Tables 4.2, 4.5, 4.4, 4.6 et 4.7). La figure 4.10 récapitule les résultats (moyenne des observations, des simulations avec les données NCEP et des simulations les données du MRC sur toute la période d'observations) pour l'ensemble de l'année.

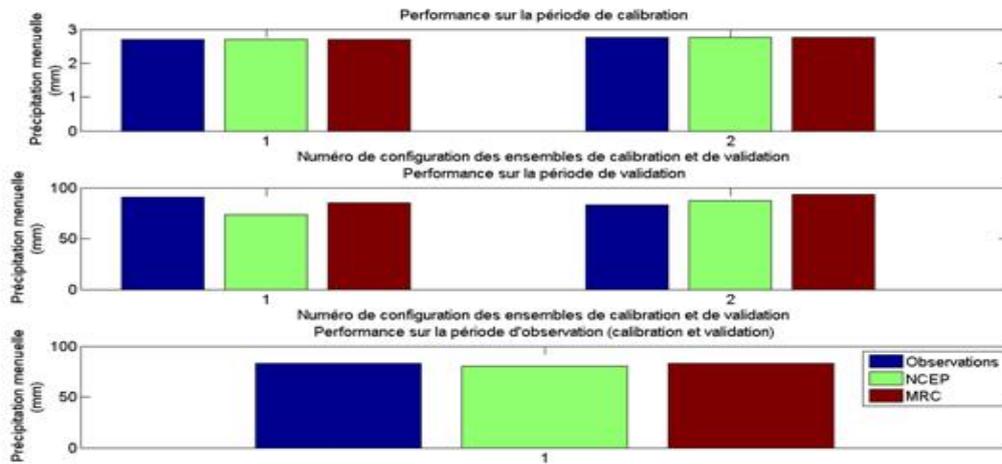


FIGURE III.6: Performance de la calibration et de la validation, mois de Mai

Configuration	Période de calibration	Période de validation
1	1990 ; 1991 ; 1992 ; 1993 ; 2000 ; 2001 ; 2002 ; 2003 ; 2004 ; 2005 ; 2006 ; 2007 ; 2008 ; 2009	1994 ; 1995 ; 1996 ; 1997 ; 1998 ; 1999
2	1990 ; 1991 ; 1992 ; 1993 ; 1994 ; 1995 ; 1996 ; 1997 ; 1998 ; 2005 ; 2006 ; 2007 ; 2008 ; 2009	1999 ; 2000 ; 2001 ; 2002 ; 2003 ; 2004
3	1990 ; 1991 ; 1992 ; 1993 ; 1994 ; 1995 ; 1996 ; 1997 ; 1998 ; 1999 ; 2000 ; 2001 ; 2002 ; 2003	2004 ; 2005 ; 2006 ; 2007 ; 2008 ; 2009

TABLE III.2: Configuration des périodes de calibration et de validation, mois de Mai

Configuration	Période de calibration	Période de validation
1	1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009	1990, 1991, 1992, 1993, 1994
2	1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009	1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004

TABLE III.3: Configuration des périodes de calibration et de validation, mois de Juin

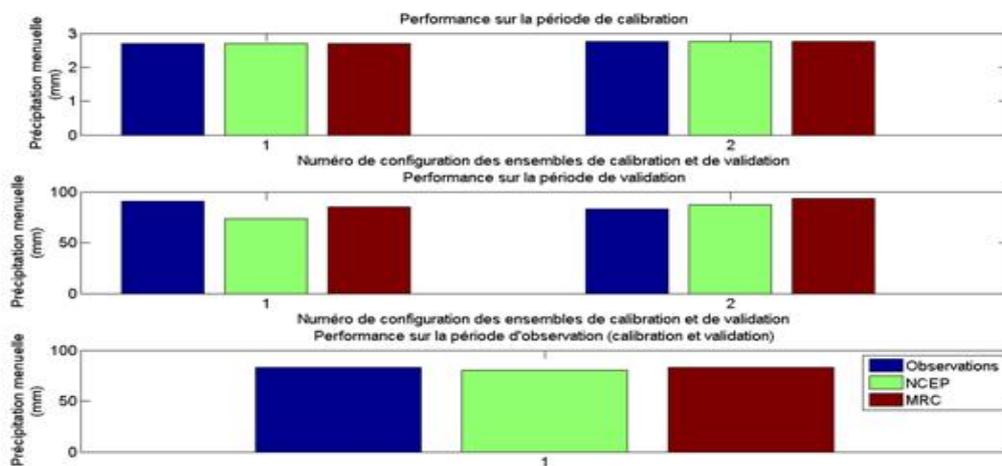


FIGURE III.7: Performance de Calibration et de validation, mois de Juin

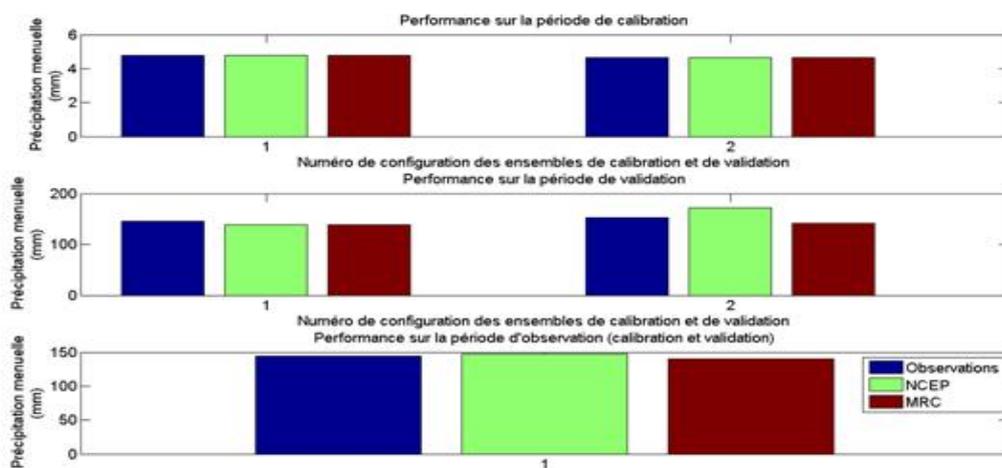


FIGURE III.8: Performance de Calibration et de validation, mois de Juillet

Configuration	Période de calibration	Période de validation
1	1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009	1990, 1991, 1992, 1993, 1994
2	1990, 1991, 1992, 1993, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009	1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999

TABLE III.4: Configuration des périodes de calibration et de validation, mois de Juillet

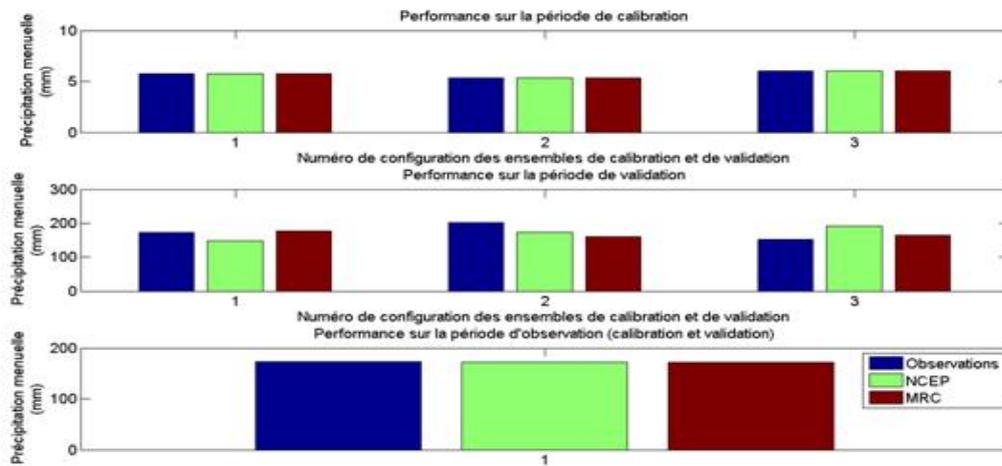


FIGURE III.9: Performance de Calibration et de validation, mois d'Aout

Configuration	Période de calibration	Période de validation
1	1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009	1990, 1991, 1992, 1993, 1994
2	1990, 1991, 1992, 1993, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009	1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999
3	1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009	1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004

TABLE III.5: Configuration des périodes de calibration et de validation, mois d'Aout

Configuration	Période de calibration	Période de validation
1	1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009	1990, 1991, 1992, 1993, 1994
2	1990, 1991, 1992, 1993, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009	1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999
3	1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009	1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004
4	1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003	2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009

TABLE III.6: Configuration des périodes de calibration et de validation, mois de Septembre

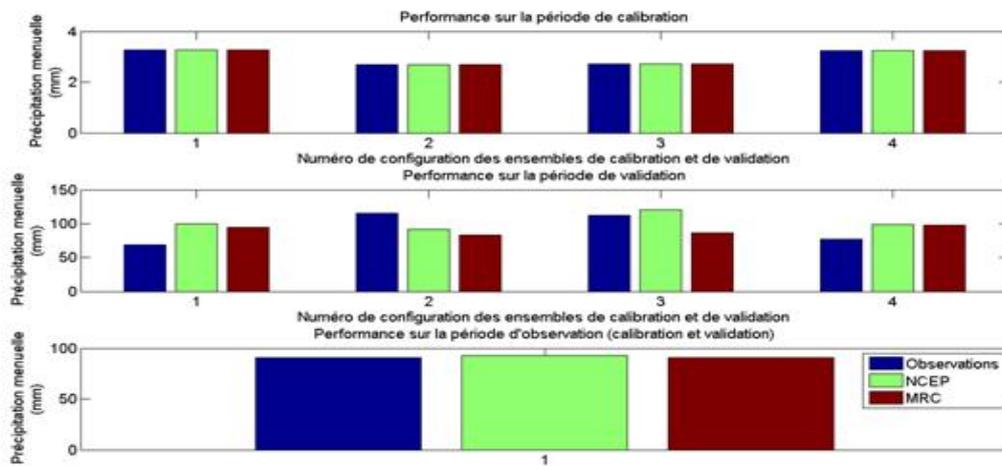


FIGURE III.10: Performance de Calibration et de validation, mois de Septembre

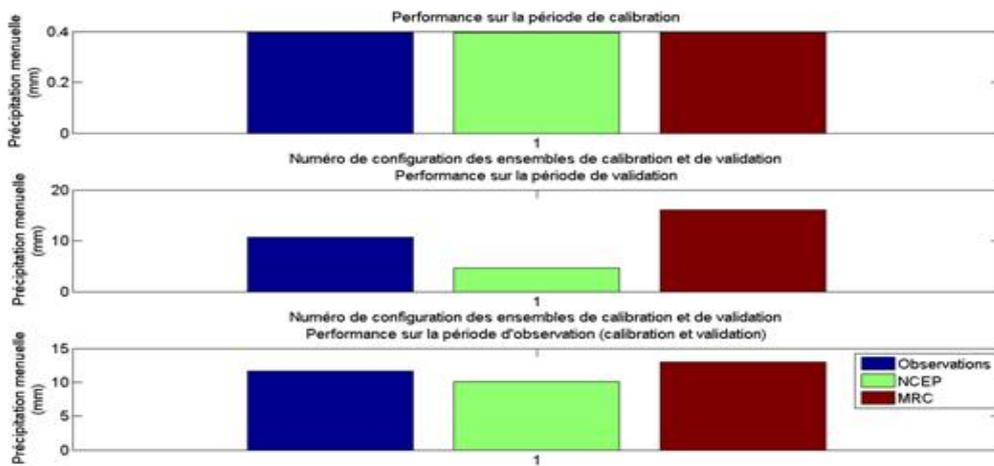


FIGURE III.11: Performance de Calibration et de validation, mois d'Octobre

Configuration	Période de calibration	Période de validation
1	1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009	1990, 1991, 1992, 1993, 1994

TABLE III.7: Configuration des périodes de calibration et de validation, mois d'Octobre

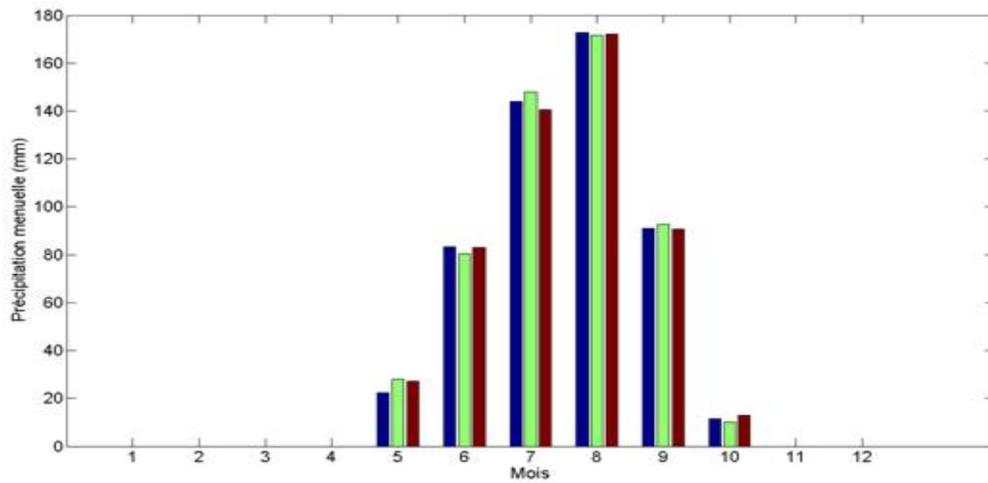


FIGURE III.12: Performance du modèle sur toute l'année

---

## IV Projections de précipitation et scénarios extrêmes

Il n'est pas possible de faire une analyse exhaustive de ces scénarios permettant de répondre aux besoins des huit secteurs d'impact qui vont utiliser le résultat de cette étude. Chaque secteur a ses paramètres et besoins d'analyse spécifiques. On peut cependant en faire une analyse sommaire. Des analyses plus poussées peuvent être faites sur la bases des sorties journalières, mensuelles et annuelles produites pour chaque station.

### IV.1 Agadez

A la station d'Agadez 6 modèles ont passé les tests décrits à la section III.7 (figure III.7), donnant ainsi 6 scénarios possibles (figures IV.1 et IV.2). Parmi ces 6 scénarios, et pour la période de 2011-2050 le scénario le plus humide projette une augmentation des précipitations de 89% (resp. 39%, table IV.1) par rapport à la période de référence 1961-1990 (resp 1991-2010). Le scénario le plus sec projette une augmentation de 24% (resp. une diminution de 11%) par rapport à la période de référence 1961-1990 (resp. 1991-2010, table IV.1).

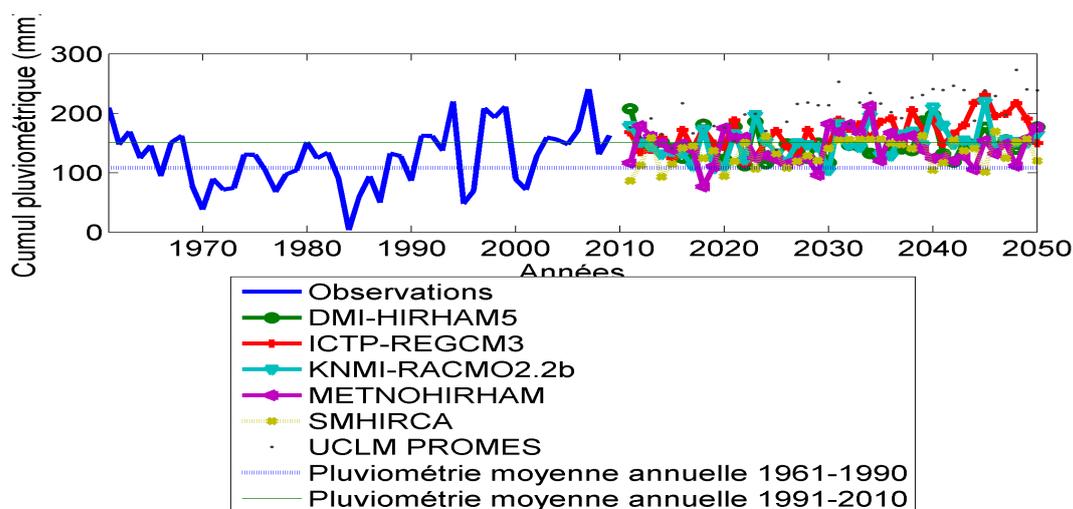


FIGURE IV.1: Comparaison des précipitations totales projetée et observée à Agadez

Scénario	Modèle	Cumul pluvio.	Variation / 1961-1990	Variation / 1991-2010
Scen. humide	UCLM PROMES	206	+89%	+38%
Scen. sec	SMHIRCA	143	+24%	-11%

TABLE IV.1: Scénarios pluviométriques extrêmes pour Agadez

Une analyse sommaire de tendance peut être faite en prenant les indices décennaux moyens de précipitation et de température projetés suivant les deux scénarios (figure IV.3). Le scénario humide

projette une tendance régulière à la hausse des précipitations jusqu'en 2050. Le scénario sec projette aussi une augmentation sensible par rapport à la période de référence 1961-1990 sans qu'aucune tendance claire ne puisse être dégagée. Selon les deux scénarios les températures moyennes auront une nette tendance à la hausse atteignant entre  $+1.5^{\circ}\text{C}$  et  $+2^{\circ}\text{C}$  en 2050. Cette tendance à la hausse est plus prononcée pour le scénario le plus humide.

Pour plus de détail, il faut se référer aux figures de la section A.1 (p. 52 en annexe de ce rapport et aux fichiers EXCEL des projections au pas de temps journalier.

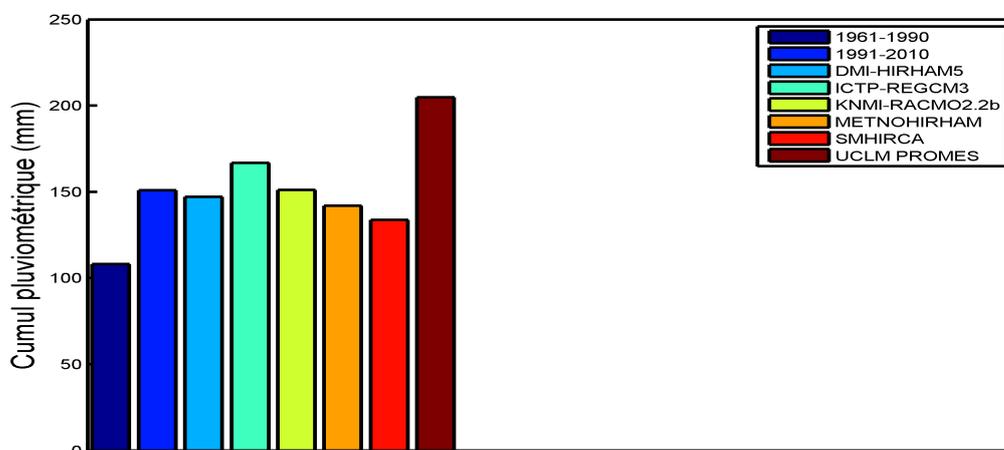


FIGURE IV.2: Cumul pluviométrique moyen future à Agadez selon les modèles sélectionnés

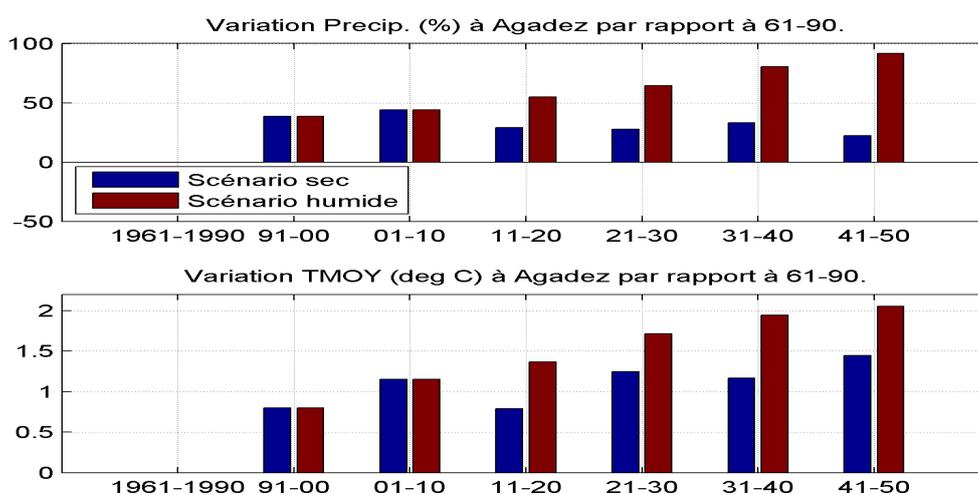


FIGURE IV.3: Résumé des tendances à Agadez selon les deux scénarios

## IV.2 Birni N’Konni

A la station de Birni N’Konni 4 modèles ont passé les tests décrits à la section III.7, donnant ainsi 4 scénarios possibles (figures IV.4 et IV.5). Pour la période de 2011-2050 le scénario le plus humide projette une augmentation des précipitations de 25% (resp. 16%, table IV.2) par rapport à la période de référence 1961-1990 (resp 1991-2010). Le scénario le plus sec projette une augmentation de 16% (resp. 7%) par rapport à la période de référence 1961-1990 (resp. 1991-2010, table IV.2).

L’analyse sommaire de tendance des indices décennaux moyens de précipitation et de température projetés suivant les deux scénarios (figure IV.6) ne fait pas apparaître une grande différence entre les deux scénarios. Ils projettent une légère tendance à la hausse des précipitations jusqu’en 2050. Les températures moyennes auront une nette tendance à la hausse pour atteindre une hausse d’environ +1.5°C en 2050.

Pour plus de détail, voir les figures de la section A.2, page 56 en annexe de ce rapport et les fichiers EXCEL des projections au pas de temps journalier.

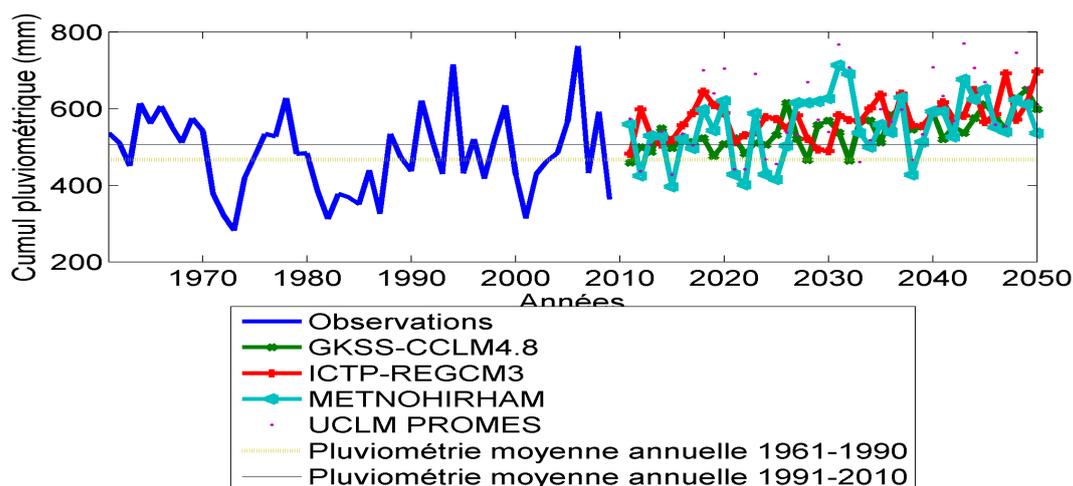


FIGURE IV.4: Comparaison des précipitations totales projetée et observée à Birni N’konni

Scénario	Modèle	Cumul pluvio.	Variation / 1961-1990	Variation / 1991-2010
Scen. humide	UCLM PROMES	581	+25%	+16%
Scen. sec	GKSS-CCLM4.8	541	+16%	+7%

TABLE IV.2: Scénarios pluviométriques extrêmes pour Konni

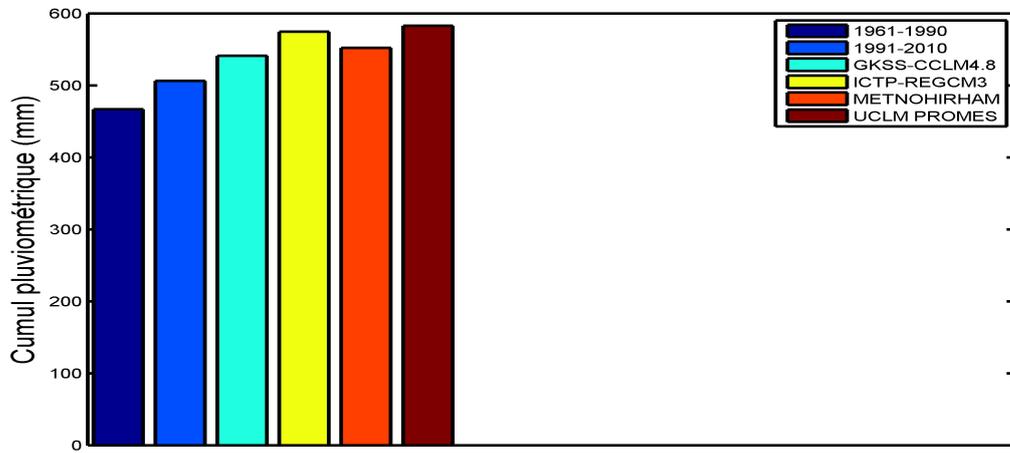


FIGURE IV.5: Cumul pluviométrique moyen future à Konni selon les modèles sélectionnés

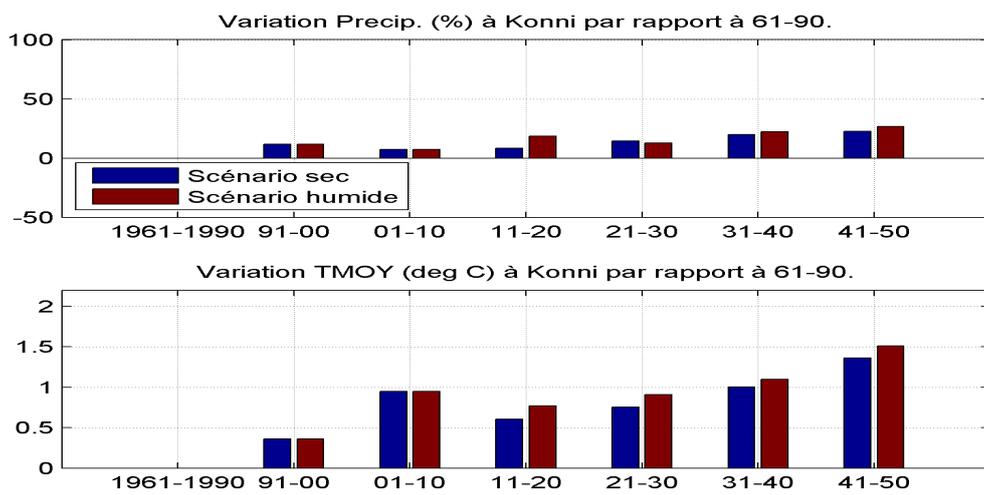


FIGURE IV.6: Résumé des tendances à Konni selon les deux scénarios

### IV.3 Gaya

A la station de Gaya 5 modèles ont passé les tests décrits à la section III.7, donnant ainsi 5 scénarios possibles (figures IV.7 et IV.8). Le scénario le plus humide projetée, pour la période de 2011-2050, une augmentation moyenne des précipitations de 14% (resp. 11%, table IV.3) par rapport à la période de référence 1961-1990 (resp. 1991-2010). Le scénario le plus sec projetée une diminution de 4% (resp. 7%) par rapport à la période de référence 1961-1990 (resp. 1991-2010, table IV.3).

L'analyse des indices décennaux moyens de précipitation et de température projetés suivant les deux scénarios (figure IV.9) montre qu'il n'est pas prévu de variation significative des précipitations dans le cas du scénario sec. Il y cependant une très légère tendance à la hausse des précipitations dans l'alternative du scénario humide. Les températures moyennes auront une nette tendance à la hausse pour atteindre une hausse d'environ +1.2°C en 2050.

Pour plus de détail, il faut se référer aux figures de la section A.3, page 60 en annexe de ce rapport et aux fichiers EXCEL des projections au pas de temps journalier.

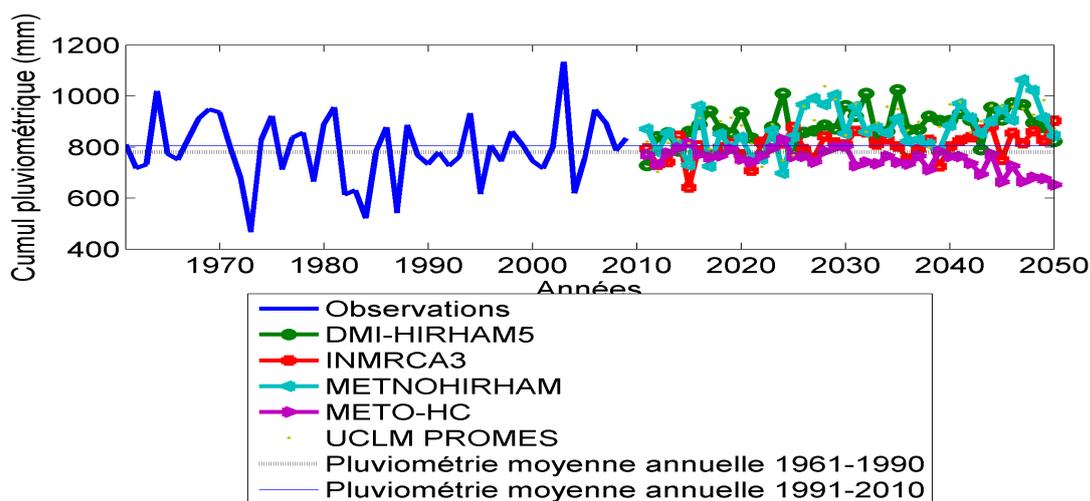


FIGURE IV.7: Comparaison des précipitations totales projetée et observée à Gaya

Scénario	Modèle	Cumul pluvio.	Variation / 1961-1990	Variation / 1991-2010
Scen. Humide	UCLM PROMES	887	+14%	+11%
Scen. Sec	METO-HC HadRM3P	751	-3.8%	-6.7%

TABLE IV.3: Scénarios pluviométriques extrêmes pour Gaya

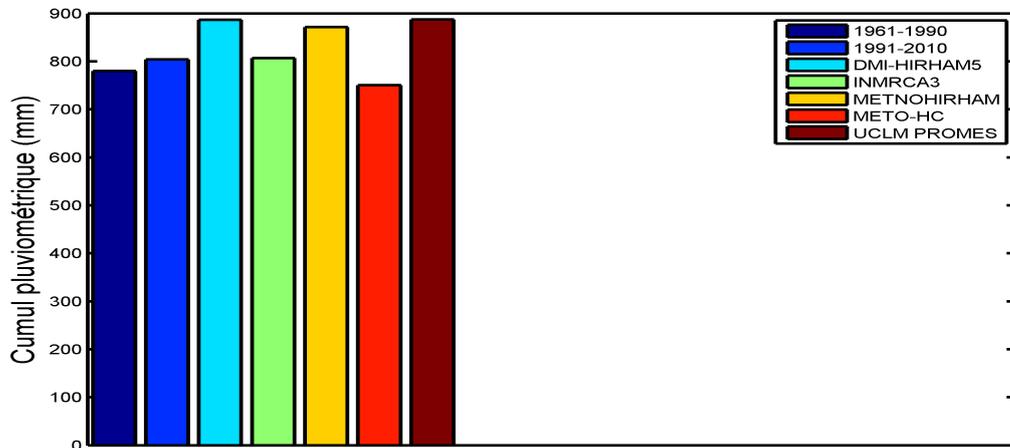


FIGURE IV.8: Cumul pluviométrique moyen future à Gaya selon les modèles sélectionnés

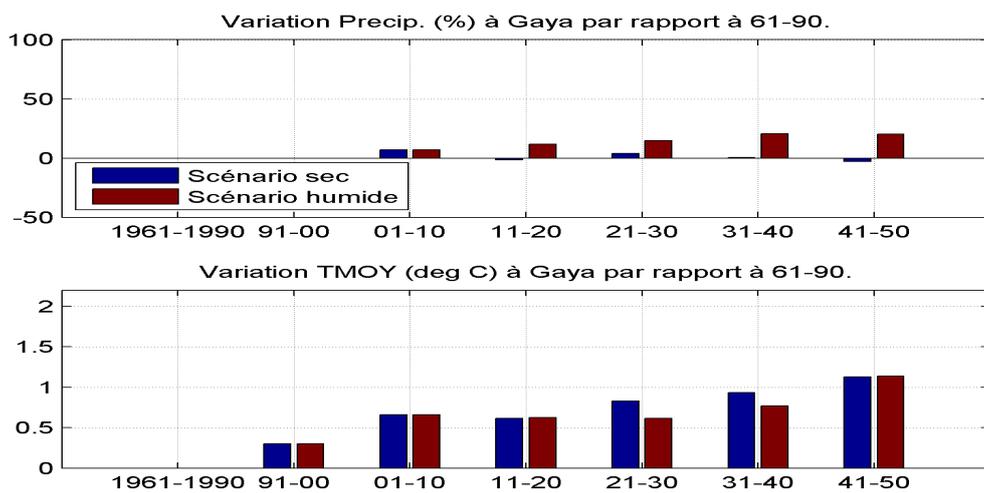


FIGURE IV.9: Résumé des tendances à Gaya selon les deux scénarios

## IV.4 Mainé Soroa

A la station de Mainé seuls 2 modèles ont passé les tests décrits à la section III.7, donnant ainsi 2 scénarios possibles (figures IV.10 et IV.11).

Pour la période de 2011-2050 le scénario le plus humide projette une augmentation des précipitations de 20% (resp. 11%, table IV.4) par rapport à la période de référence 1961-1990 (resp 1991-2010). Le scénario le plus sec projette une diminution de 5% (resp. 12%) par rapport à la période de référence 1961-1990 (resp. 1991-2010, table IV.4).

L'analyse sommaire de tendance des indices décennaux moyens de précipitation et de température projetés suivant les deux scénarios (figure IV.12) ne fait pas apparaître un changement significatif des précipitations. Ils projettent une légère tendance à la hausse des précipitations jusqu'en 2050. Les températures moyennes auront une tendance à la hausse pour atteindre une hausse d'environ +1.5°C en 2050.

Pour plus de détail, il faut se référer aux figures de la section A.4, page 64 en annexe de ce rapport et aux fichiers EXCEL des projections au pas de temps journalier.

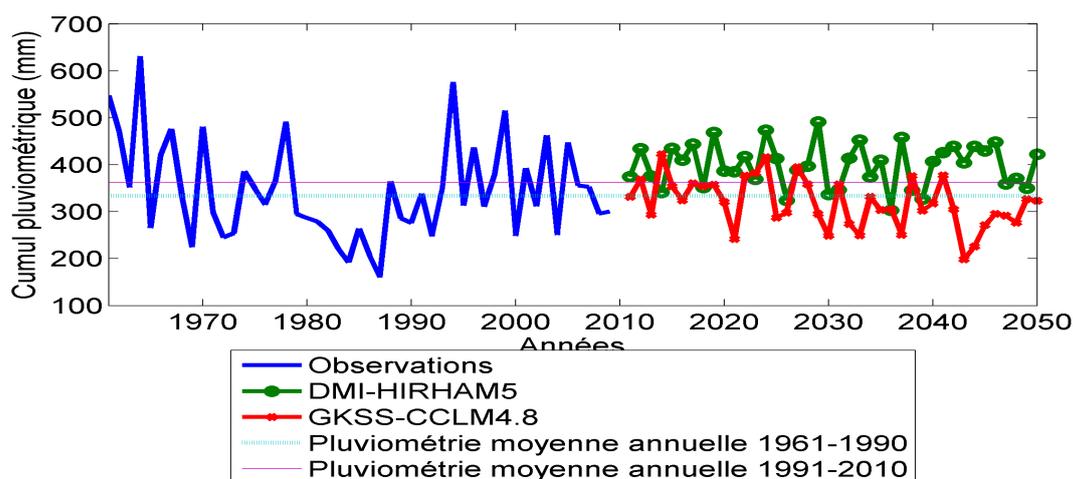


FIGURE IV.10: Comparaison des précipitations totales projetée et observée à Mainé Soroa

Scénario	Modèle	Cumul pluvio.	Variation / 1961-1990	Variation / 1991-2010
Scen. Humide	DMI-HIRHAM5	400	+20%	+11%
Scen. Sec	GKSS-CCLM4.8	319	-4.5%	-12%

TABLE IV.4: Scénarios pluviométriques extrêmes pour Mainé Soroa

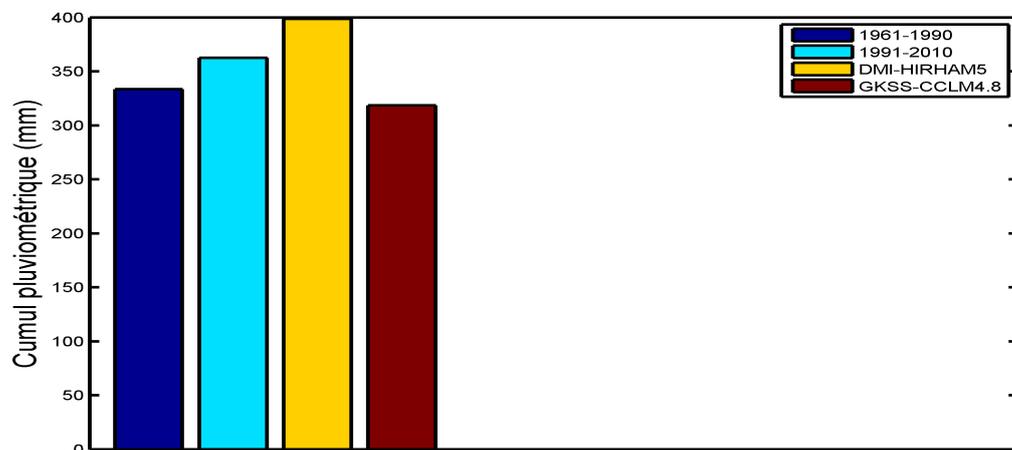


FIGURE IV.11: Cumul pluviométrique moyen future à Mainé selon les modèles sélectionnés

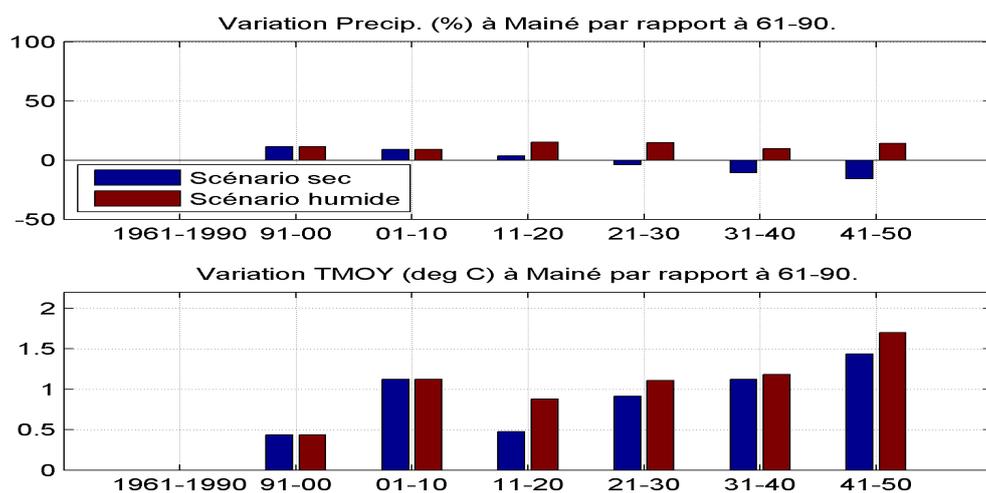


FIGURE IV.12: Résumé des tendances à Mainé selon les deux scénarios

## IV.5 Maradi

A la station de Maradi 7 modèles ont passé les tests décrits à la section III.7, donnant ainsi 7 scénarios possibles (figures IV.13 et IV.14). Pour la période de 2011-2050 le scénario le plus humide projette une augmentation des précipitations de 41% (resp. 38%, table IV.5) par rapport à la période de référence 1961-1990 (resp 1991-2010). Le scénario le plus sec projette une diminution de 6% (resp. 9%) par rapport à la période de référence 1961-1990 (resp. 1991-2010, table IV.5).

L'analyse des indices décennaux moyens de précipitation et de température projetés suivant les deux scénarios (figure IV.15) montre qu'il n'est pas prévu de variation significative des précipitations dans le cas du scénario sec. Il y cependant une très légère tendance à la hausse des précipitations dans l'alternative du scénario humide. Les températures moyennes seront à la hausse pour atteindre environ de +1.2°C à plus de 2°C en 2050.

Pour plus de détail, il faut se référer aux figures de la section A.5, page 68 en annexe de ce rapport et aux fichiers EXCEL des projections au pas de temps journalier.

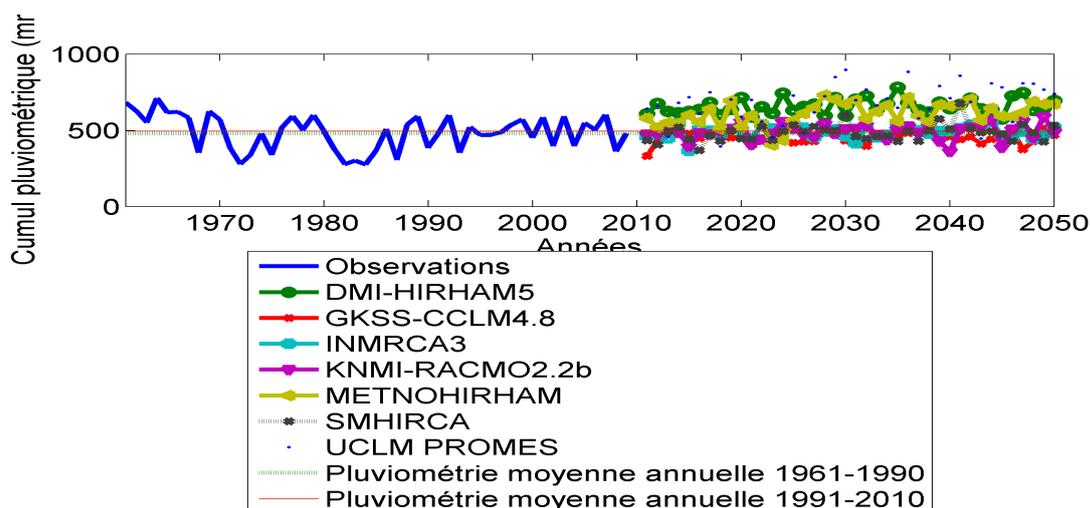


FIGURE IV.13: Comparaison des précipitations totales projetée et observée à Maradi

Scénario	Modèle	Cumul pluvio.	Variation / 1961-1990	Variation / 1991-2010
Scen. Humide	UCLM PROMES	677	+41%	+38%
Scen. Sec	GKSS-CCLM4.8	453	-6%	-8.9%

TABLE IV.5: Scénarios pluviométriques extrêmes pour Maradi

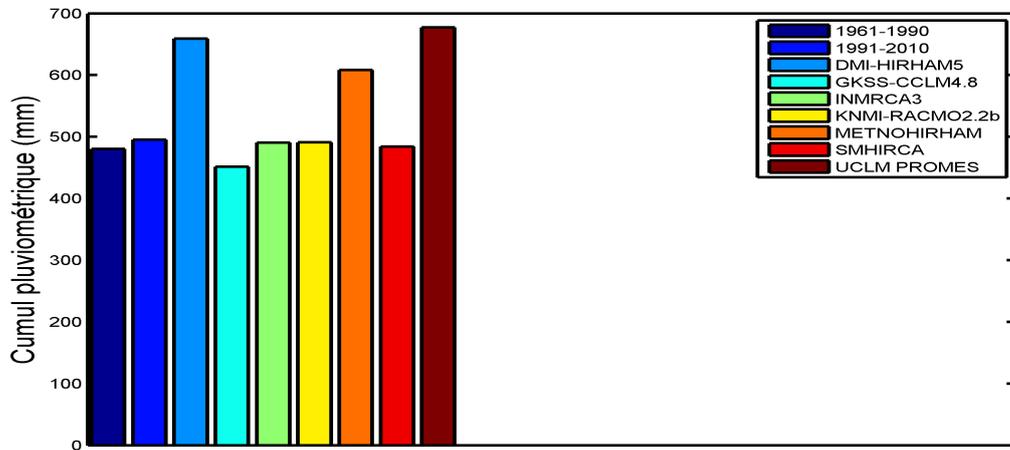


FIGURE IV.14: Cumul pluviométrique moyen future à Maradi selon les modèles sélectionnés

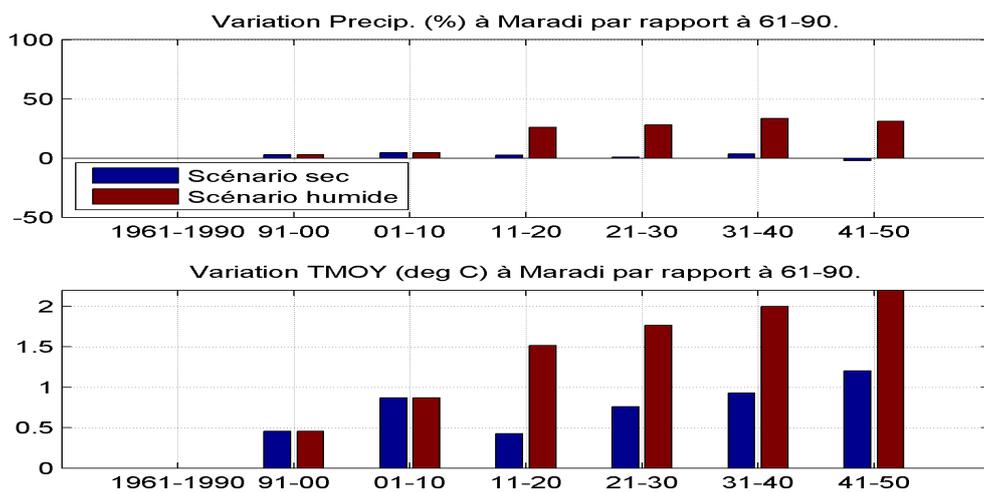


FIGURE IV.15: Résumé des tendances à Maradi selon les deux scénarios

## IV.6 Niamey

A la station de Niamey 4 modèles ont passé les tests décrits à la section III.7, donnant ainsi 4 scénarios possibles (figures IV.16 et IV.17). Pour la période de 2011-2050 le scénario le plus humide projette une augmentation des précipitations de 10% (resp. 9%, table IV.6) par rapport à la période de référence 1961-1990 (resp 1991-2010). Le scénario le plus sec projette une diminution de 8% (resp. 9%) par rapport à la période de référence 1961-1990 (resp. 1991-2010, table IV.6).

L'analyse des indices décennaux moyens de précipitation et de température projetés suivant les deux scénarios (figure IV.18) montre qu'il n'est pas prévu de variation significative des précipitations à part une très légère tendance à la baisse dans l'alternative du scénario sec. Les températures moyennes auront une nette tendance à la hausse pour atteindre une hausse d'environ +1.1°C en 2050.

L'analyse sommaire de tendance des indices décennaux moyens de précipitation et de température projetés suivant les deux scénarios (figure IV.18) ne fait pas apparaître une grande différence entre les deux scénarios. Ils projettent une légère tendance à la hausse des précipitations jusqu'en 2050. Les températures moyennes auront une nette tendance à la hausse pour atteindre une hausse d'environ 1.5°C en 2050.

Pour plus de détail, il faut se référer aux figures de la section A.6, page 72 en annexe de ce rapport et aux fichiers EXCEL des projections au pas de temps journalier.

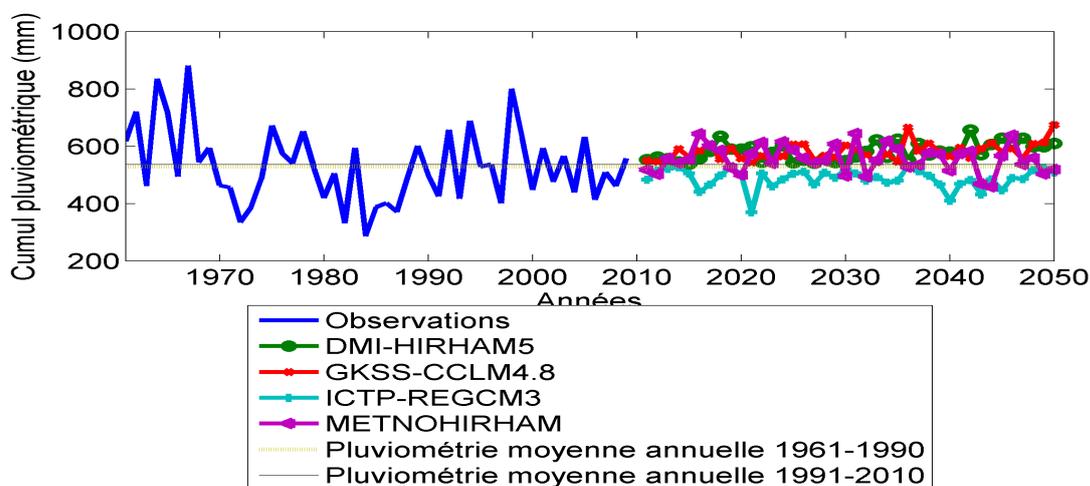


FIGURE IV.16: Comparaison des précipitations totales projetée et observée à Niamey

Scénario	Modèle	Cumul pluvio.	Variation / 1961-1990	Variation / 1991-2010
Scen. Humide	DMI-HIRHAM5	582	+10%	+8.9%
Scen. Sec	ICTP-REGCM3	497	-7.7%	-9.1%

TABLE IV.6: Scénarios pluviométriques extrêmes pour Niamey

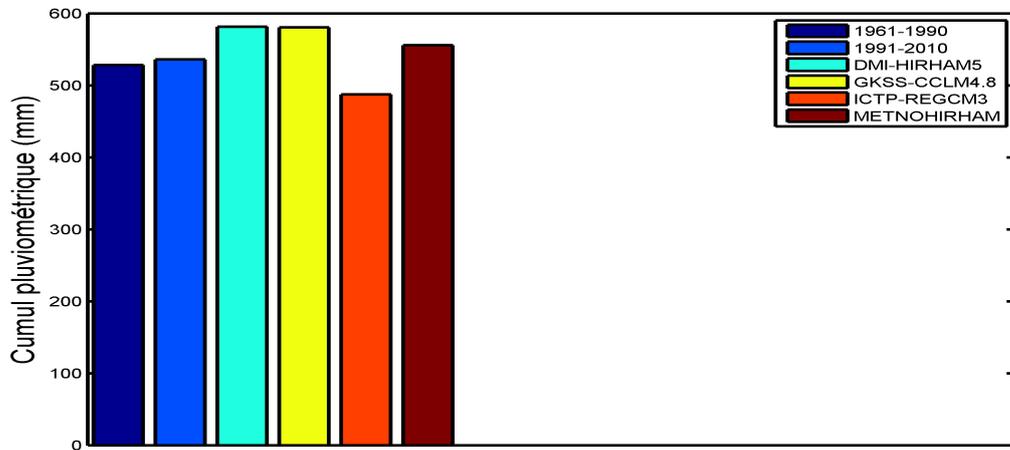


FIGURE IV.17: Cumul pluviométrique moyen future à Niamey selon les modèles sélectionnés

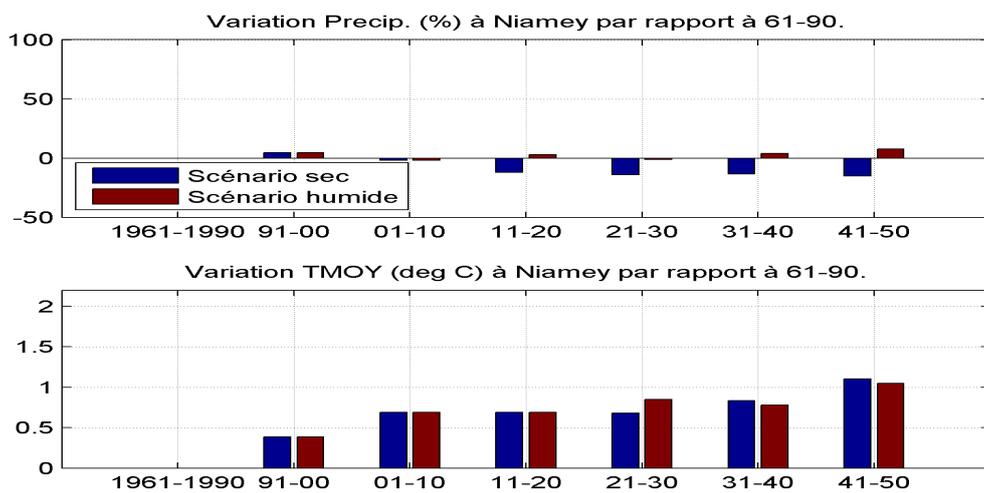


FIGURE IV.18: Résumé des tendances à Niamey selon les deux scénarios

## IV.7 Tahoua

A la station de Tahoua 5 modèles ont passé les tests décrits à la section III.7, donnant ainsi 5 scénarios possibles (figures IV.19 et IV.20).

Pour la période de 2011-2050 le scénario le plus humide projette une augmentation des précipitations de 8% (resp. 2%, table IV.6) par rapport à la période de référence 1961-1990 (resp 1991-2010). Le scénario le plus sec projette une augmentation de 2% (resp. une diminution de 4%) par rapport à la période de référence 1961-1990 (resp. 1991-2010, table IV.6).

L'analyse sommaire de tendance des indices décennaux moyens de précipitation et de température projetés suivant les deux scénarios (figure IV.21) ne fait pas apparaître un changement significatif des précipitations par rapport à la période de référence. Il faut cependant à une hausse des températures moyennes allant de +0.5°C à +1°C en 2050.

Pour plus de détail, il faut se référer aux figures de la section A.7, page 76 en annexe de ce rapport et aux fichiers EXCEL des projections au pas de temps journalier.

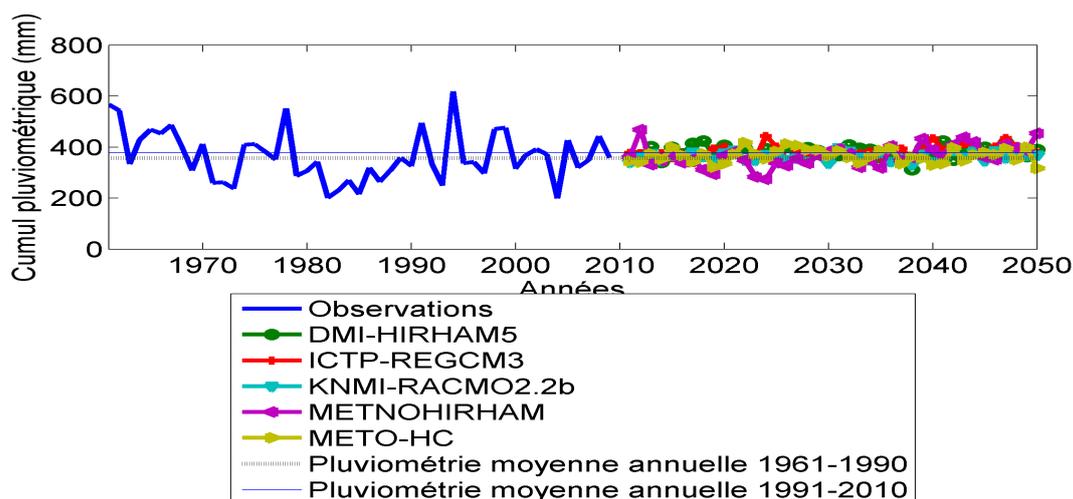


FIGURE IV.19: Comparaison des précipitations totales projetée et observée à Tahoua

Scénario	Modèle	Cumul pluvio.	Variation / 1961-1990	Variation / 1991-2010
Scen. Humide	ICTP-REGCM3	401	+7.5%	+2.4%
Scen. Sec	KNMI-RACMO2.2b	362	+1.7%	-3.8%

TABLE IV.7: Scénarios pluviométriques extrêmes pour Tahoua

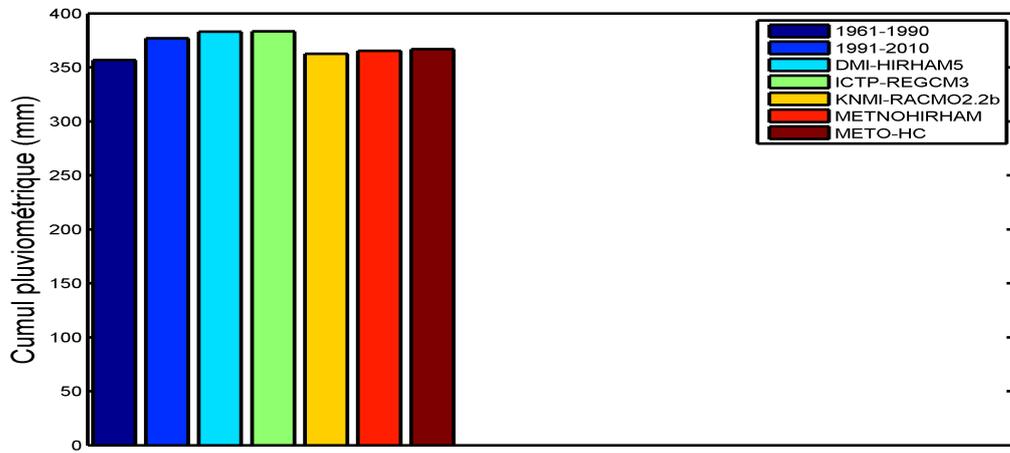


FIGURE IV.20: Cumul pluviométrique moyen future à Tahoua selon les modèles sélectionnés

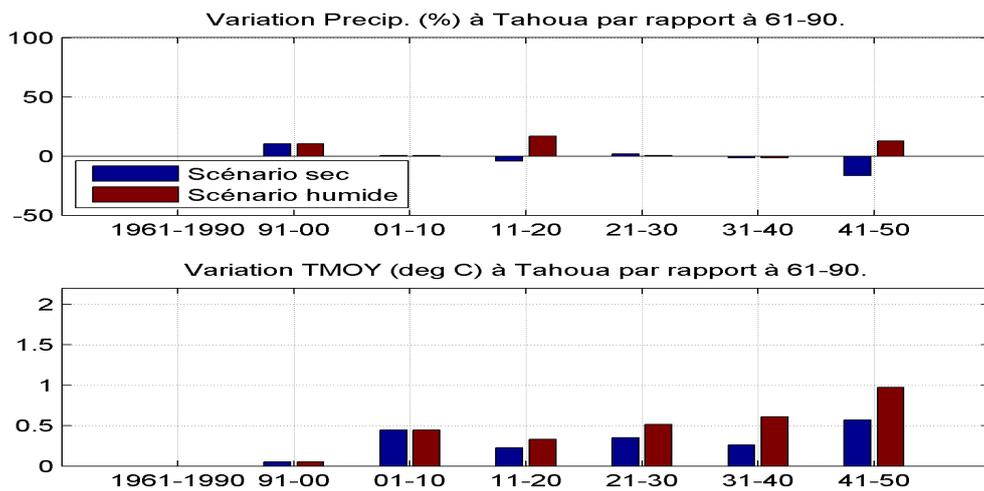


FIGURE IV.21: Résumé des tendances à Tahoua selon les deux scénarios

## IV.8 Tillabéry

A la station de Tillabéry 6 modèles ont passé les tests décrits à la section III.7, donnant ainsi 6 scénarios possibles (figures IV.22 et IV.23). Pour la période de 2011-2050 le scénario le plus humide projette une augmentation des précipitations de 73% (resp. 67%, table IV.8) par rapport à la période de référence 1961-1990 (resp 1991-2010). Le scénario le plus sec projette une augmentation de 4% (resp. pas de variation) par rapport à la période de référence 1961-1990 (resp. 1991-2010, table IV.8).

L'analyse sommaire de tendance des indices décennaux moyens de précipitation et de température projetés suivant les deux scénarios (figure IV.24) montre qu'on doit s'attendre une nette tendance à la hausse des précipitations jusqu'en 2050 dans les cas du scénario humide. Le scénario sec ne montre pas de changements significatif des moyennes des précipitations par rapport à la période de référence. Les températures moyennes auront une nette tendance à la hausse pour atteindre une hausse d'environ +1.5°C en 2050.

Pour plus de détail, il faut se référer aux figures de la section A.8, page 80 en annexe de ce rapport et aux fichiers EXCEL des projections au pas de temps journalier.

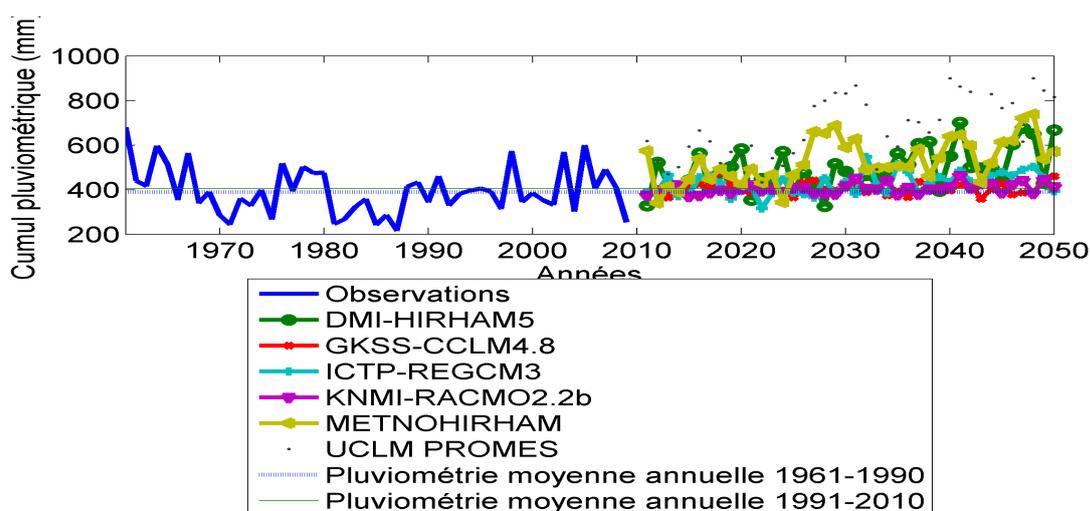


FIGURE IV.22: Comparaison des précipitations totales projetée et observée à Tillabéry

Scénario	Modèle	Cumul pluvio.	Variation / 1961-1990	Variation / 1991-2010
Scen. Humide	UCLM PROMES	678	+73%	+67%
Scen. Sec	KNMI-RACMO2.2b	405	+4%	-0.07%

TABLE IV.8: Scénarios pluviométriques extrêmes pour Tillabéry

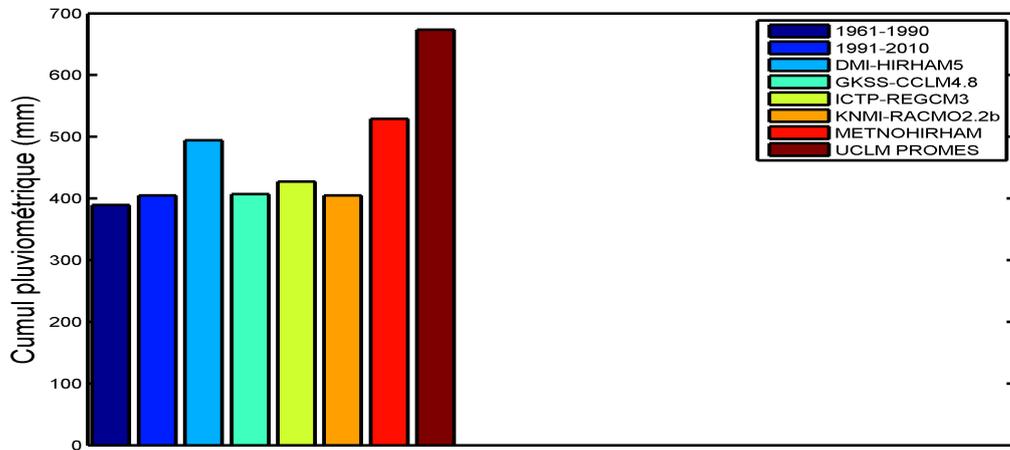


FIGURE IV.23: Cumul pluviométrique moyen future à Tillabéry selon les modèles sélectionnés

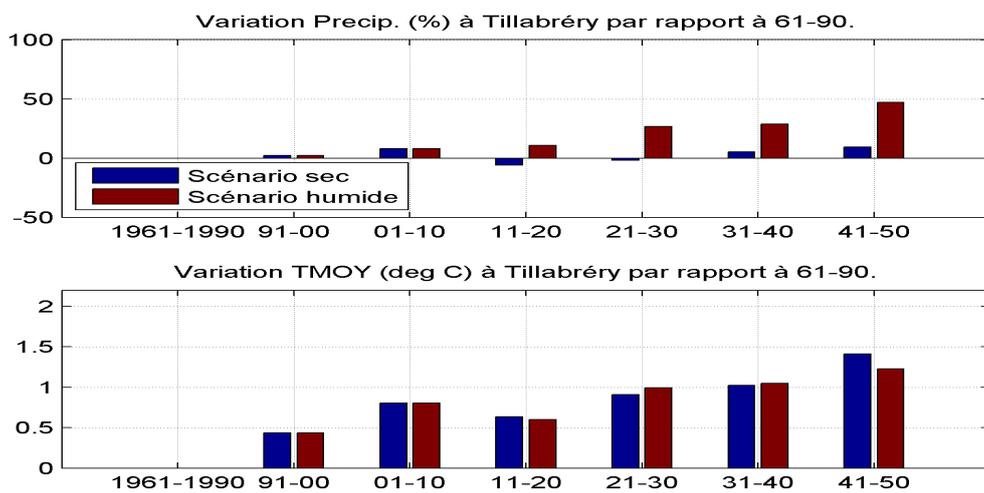


FIGURE IV.24: Résumé des tendances à Tillabéry selon les deux scénarios

## IV.9 Zinder

A la station de Zinder 9 modèles ont passé les tests décrits à la section III.7, donnant ainsi 9 scénarios possibles (figures IV.25 et IV.26). Pour la période de 2011-2050 le scénario le plus humide projette une augmentation des précipitations de 25% (resp. 28%, table IV.9) par rapport à la période de référence 1961-1990 (resp 1991-2010). Le scénario le plus sec projette une diminution de 7% (resp. 6%) par rapport à la période de référence 1961-1990 (resp. 1991-2010, table IV.9).

L'analyse des indices décennaux moyens de précipitation et de température projetés suivant les deux scénarios (figure IV.27) ne fait apparaître aucune tendance dans les moyennes de précipitations. Ils projettent une légère tendance à la hausse des précipitations jusqu'en 2050. Les températures moyennes auront une nette tendance à la hausse pour atteindre une hausse d'environ +1.5°C en 2050.

Pour plus de détail, il faut se référer aux figures de la section A.9, page 84 en annexe de ce rapport et aux fichiers EXCEL des projections au pas de temps journalier.

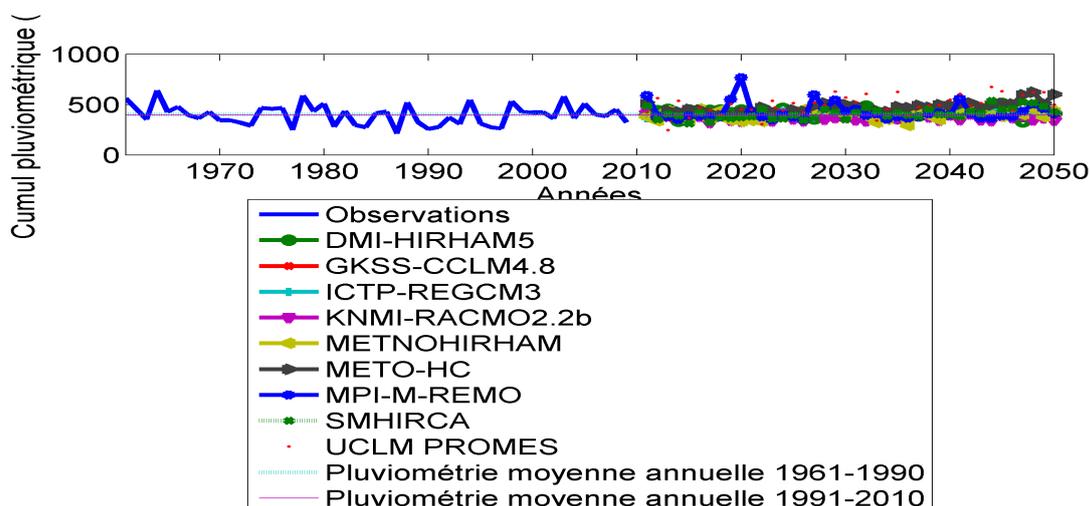


FIGURE IV.25: Comparaison des précipitations totales projetée et observée à Zinder

Scénario	Modèle	Cumul pluvio.	Variation / 1961-1990	Variation / 1991-2010
Scen. Humide	UCLM PROMES	498	+25%	+28%
Scen. Sec	KNMI-RACMO2.2b	371	-7.3%	-6.4%

TABLE IV.9: Scénarios pluviométriques extrêmes pour Zinder

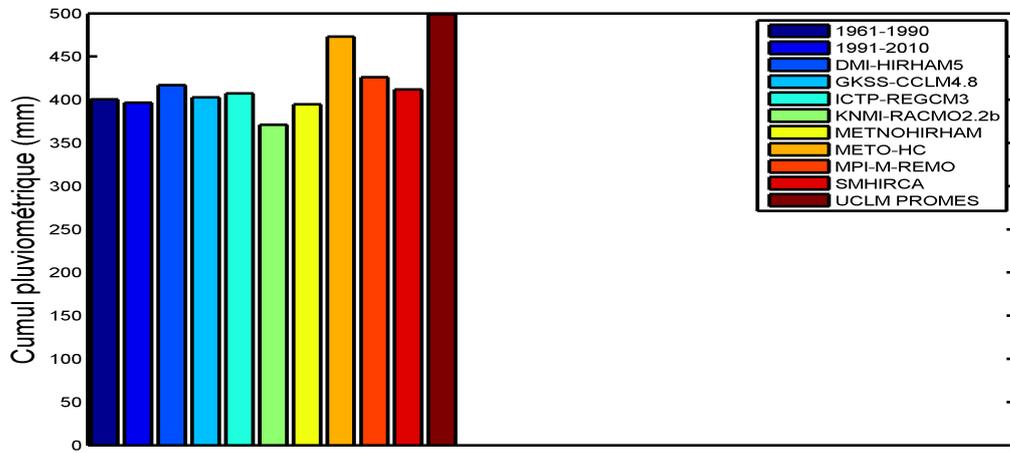


FIGURE IV.26: Cumul pluviométrique moyen future à Zinder selon les modèles sélectionnés

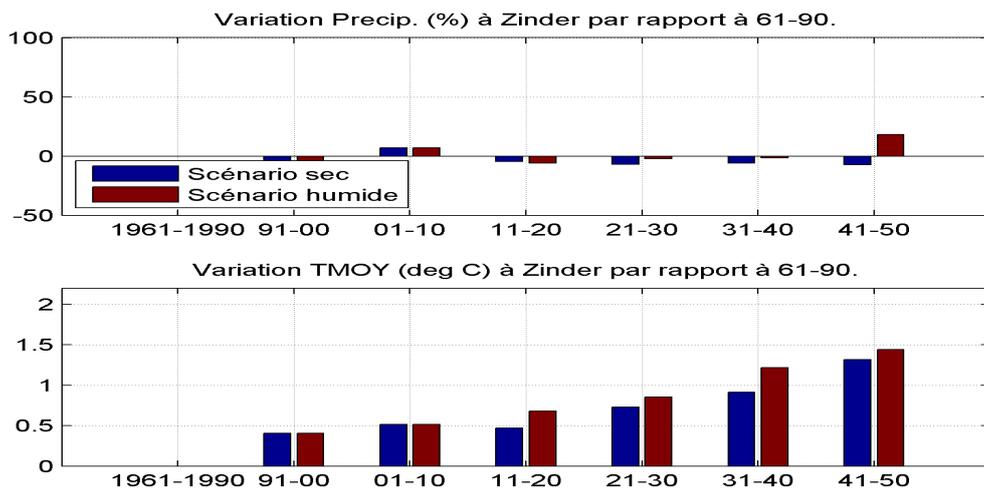


FIGURE IV.27: Résumé des tendances à Agadez selon les deux scénarios

## V Conclusion

Cette étude s'inscrit dans le cadre du Programme Africain d'Adaptation (PAA) et a pour but de développer des scénarios de changements climatiques pour le Niger puis de faire l'évaluation approfondie des risques de changement climatiques et leurs impacts sur les secteurs clés de l'économie que sont l'agriculture, l'élevage, la foresterie, la pêche, l'énergie, les ressources en eau, la santé et les zones humides. Il vise également à évaluer les modèles climatiques existants, sortir des projections de précipitations et températures dans un horizon spatio-temporel adéquat et en ressortir les incertitudes. L'étude a aussi pour objectif de faire une évaluation des besoins en informations et données importantes pour valider et adapter les sorties de ces différents modèles climatiques au Niger.

Ce rapport, issu de la première partie de l'étude, a présenté Le processus de génération des scénarios climatiques secs et humides au niveau des neuf principales stations synoptiques du pays (Agadez, Birni n'Konni, Gaya, Mainé Soroa, Maradi, Niamey, Tahoua, Tillabéry, Zinder). Ces neuf stations ont été sélectionnées sur la base de la disponibilité et de la qualité de leurs données. Les données ont été minutieusement contrôlées et corrigées.

Après un exposé de la méthodologie utilisée, ainsi qu'un rappel rapide des la terminologie utilisée, les données observées et les sorties mensuelles de onze modèles régionaux de climat issus de l'expérience climatique AMMA-ENSEMBLE ont été mises statistiquement à l'échelle pour générer des scénarios mensuels de précipitations et de températures au niveau de chacune des stations. Les scénarios mensuels ont ensuite été désagrégés au pas de temps journalier par la méthode des analogues historiques. Les scénarios le plus humide et le plus sec au niveau de chaque station synoptique ont été retenus pour être utilisés dans les études d'impacts sectoriels.

Le scénario humide projette une augmentation moyenne des précipitations par rapport à la période de référence 1961-1990 allant de moins de 10% à Niamey jusqu'à près de 90% à Agadez. Le scénario sec projette une augmentation des précipitations allant de 25% Agadez jusqu'à de faible diminution de l'ordre de 10% à Niamey ou Tillabéry par exemple. Les températures maximales et minimales seront à la hausse par rapport à la période de référence avec des augmentation moyennes allant de 0.5° à Tahoua (scénario sec) à plus de 2°C à (scénario humide) à Maradi et Agadez en 2050.

Il faut rappeler qu'il s'agit ici d'une analyse sommaire des résultats de la désagrégation statistiques ne permettant d'avoir qu'un aperçu global des changements auxquels il faut s'attendre. Les modèles sectoriels qui utiliseront les résultats détaillés de cette étude donneront plus de détails sur les impacts éventuels dans chaque secteur et les mesures d'adaptation adéquates à prendre.

## Difficultés et recommandations

Plusieurs difficultés ont été rencontrées au cours de la réalisation de ces études. La plupart de ces difficultés ont déjà été soulignées au cours de la préparation de la Seconde Communication Nationale du Niger sur les Changements Climatiques (CNEDD, 2009).

La première difficulté qui concerne tous les secteurs d'étude est l'insuffisance, l'absence ou la difficulté d'accès aux données statistiques. Par exemples les données météorologiques utilisées dans cette études ne concernent que 9 stations et ne comportent pas de métadonnées (historique des stations, des instruments, etc.). Les métadonnées permettent un meilleur contrôle de qualité.

La seconde difficulté la durée du temps consacrée aux études. Bien que les nombreuses difficultés généralement rencontrées rallonge significativement le temps réels consacré aux études, cela constitue un handicap puisque les méthodologies proposées sont basées sur la durée initiale prévue.

On peut formuler les recommandations suivantes en vue d'améliorer les prochaines études :

1. Améliorer la qualité des données météorologiques par l'archivage des métadonnées.
2. Mettre en place une équipe pluridisciplinaire permanente constituée d'experts des différents domaines et d'universitaires (CNEDD, 2009).
3. Soutenir la recherche et la formation sur toutes les questions des changements climatiques et d'adaptation dont l'importance n'est plus à démontrer. Ce soutien pourra se traduire par exemple par le financement d'équipes de recherche, de mémoires ou de thèses abordant les principaux sujet de préoccupation du CNEDD. Cette synergie avec le monde universitaire sera le gage de travaux de qualité.
4. Capitaliser l'ensemble des études déjà réalisées au CNEDD pour assurer leur cohérence et aussi éviter les duplications inutiles.
5. Intégrer la collecte des données nécessaires à l'inventaire dans le travail classique des services de l'état (CNEDD, 2009).
6. Mettre en place une banque de données régulièrement mise à jour au CNEDD (CNEDD, 2009).
7. Définir, de concert avec l'INS et les autres services similaires, les types de données à collecter (CNEDD, 2009).
8. Mener une campagne de sensibilisation de proximité sur l'importance de la collecte de données (CNEDD, 2009).

## Bibliographie

- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of climatology*, 6(6) :661–675.
- Alexandersson, H. and Moberg, A. (1997). Homogenization of swedish temperature data. part i : Homogeneity test for linear trends. *International Journal of Climatology*, 17(1) :25–34.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M., et al. (1998). Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-fao irrigation and drainage paper 56. *FAO, Rome*, 300 :6541.
- Biasutti, M. and Giannini, A. (2006). Robust sahel drying in response to late 20th century forcings. *Geophys. Res. Lett*, 33(10.1029).
- CNEDD (2009). Seconde communication nationale du niger sur les changements climatiques.
- Cook, K. H. and Vizy, E. K. (2006). Coupled model simulations of the west african monsoon system : Twentieth-and Twenty-First-Century simulations. *Journal of Climate*, 19 :3681–3703.
- Dai, A. (2006). Precipitation characteristics in eighteen coupled climate models. *Journal of Climate*, 19(18) :4605–4630.
- DMN (2009). Actualisation des caractéristiques climatiques générales du niger.
- Folland, C. K., Palmer, T. N., and Parker, D. (1986). Sahel rainfall and worldwide sea temperature. *Nature*, 320 :602– 687.
- Giannini, A., Saravanan, R., and Chang, P. (2003). Oceanic forcing of sahel rainfall on interannual to interdecadal time scales. *Science*, 302(5647) :1027.
- Giorgi, F., Marinucci, M. R., Bates, G. T., and De Canio, G. (1993). Development of a Second-Generation regional climate model (RegCM2). part II : convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Monthly Weather Review*, 121(10) :2814–2832.
- Hamed, K. (2008). Trend detection in hydrologic data : The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, 349(3-4) :350–363.
- Hessami, M., Gachon, P., Ouarda, T., and St-Hilaire, A. (2007). ASD user’s guide.
- Hessami, M., Gachon, P., Ouarda, T., and St-Hilaire, A. (2008). Automated regression-based statistical downscaling tool. *Environmental Modelling & Software*, 23(6) :813–834.
- Hoerling, M., Hurrell, J., and Eischeid, J. (2006). Detection and attribution of 20th century northern and southern african monsoon change journal of climate. *Journal of Climate*, 19(16) :3989–4008.

- Hourdin, F., Musat, I., Guichard, F., Ruti, P., Favot, F., Filiberti, M., Pham, M., Grandpeix, J., Polcher, J., Marquet, P., et al. (2010a). AMMA-model intercomparison project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(1) :95–104.
- Hourdin, F., Musat, I., Guichard, F., Ruti, P., Favot, F., Filiberti, M., Pham, M., Grandpeix, J., Polcher, J., Marquet, P., et al. (2010b). AMMA-model intercomparison project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(1) :95–104.
- Janicot, S. (1992). Spatiotemporal variability of west african rainfall. part II : associated surface and airmass characteristics. *Journal of Climate*, 5(5) :499–511.
- Janowiak, J. (1988). An investigation of interannual rainfall variability in africa. *Journal of Climate*, 1(3) :240–255.
- Jones, R., Noguer, M., Hassell, D., Hudson, D., Wilson, S., Jenkins, G., and Mitchell, J. (2004). *Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS*. Met Office Hadley Centre.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., et al. (1996). The ncep/ncar 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3) :437–471.
- Kendall, M. G. (1955). *Rank Correlation Methods*. Hafner Publishing Co., New York.
- Konare, A., Zakey, A., Solmon, F., Giorgi, F., Rauscher, S., Ibrah, S., and Bi, X. (2008). A regional climate modeling study of the effect of desert dust on the west african monsoon. *Journal of Geophysical Research*, 113(D12) :D12206.
- Lau, W. K. and Kim, K. (2006). Modeling the effects of sahara dust on the climate and water cycle of the tropical Atlantic/Caribbean region. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 32 :02.
- Leggett, J., Pepper, W., Swart, R., Edmonds, J., Meira Filho, L., Mintzer, I., and Wang, M. (1992). *Emissions scenarios for the IPCC : an update*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Lu, J. and Delworth, T. L. (2005). Oceanic forcing of the late 20th century sahel drought. *Geophys. Res. Lett.*, 32(22) :1–5.
- Matulla, C., Zhang, X., Wang, X., Wang, J., Zorita, E., Wagner, S., and von Storch, H. (2008). Influence of similarity measures on the performance of the analog method for downscaling daily precipitation. *Climate Dynamics*, 30(2) :133–144.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grubler, A., Jung, T., Kram, T., et al. (2000). Special report on emissions scenarios : a special report of working group iii of the intergovernmental panel on climate change. Technical report, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA (US), Environmental Molecular Sciences Laboratory (US).

- Phillips, T. and Gleckler, P. (2006). Evaluation of continental precipitation in 20th century climate simulations : The utility of multimodel statistics. *Water Resources Research*, 42(3) :W03202.
- Rowell, D., Folland, C., Maskell, K., and Ward, M. (1995). Variability of summer rainfall over tropical north africa (1906-92) : Observations and modelling. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 121(523).
- Sen, P. (1968). Estimates of the regression coefficient based on kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, pages 1379–1389.
- Smith, M., Allen, R., Monteith, J., Perrier, A., Pereira, L., and Segeren, A. (1992). Expert consultation on revision of fao methodologies for crop water requirements. *Land and Water Development Division, Food and Agriculture Organisation, Rome*.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M., and Miller, H. (2007). *IPCC, 2007 : Climate change 2007 : The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York : Cambridge University Press.
- Tol, R., Fankhauser, S., and Smith, J. (1998). The scope for adaptation to climate change : what can we learn from the impact literature ? *Global Environmental Change*, 8(2) :109–123.
- Wilby, R. and Dawson, C. (2004). Using SDSM version 3.1 a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *User manual*.
- Wilby, R. and Dawson, C. (2007). *SDSM 4.1 a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. User Manual. London, UK*.
- Wilson, S., Hassell, D., Hein, D., Jones, R., and Taylor, R. (2007). Installing and using the hadley centre regional climate modelling system, PRECIS.
- Xue, Y., Lau, K., Cook, H., Rowell, P., Boone, A., Feng, J., Konare, A., Bruecher, T., De Sales, F., Dirmeyer, P., et al. (2008). The west african monsoon modeling and evaluation project (WAMME) and its first model intercomparison experiment.
- Zorita, E. and Von Storch, H. (1999). The analog method as a simple statistical downscaling technique : Comparison with more complicated methods. *Journal of climate*, 12(8) :2474–2489.

## A ANNEXE

### A.1 Agadez

#### A.1.1 Agadez, scénario sec

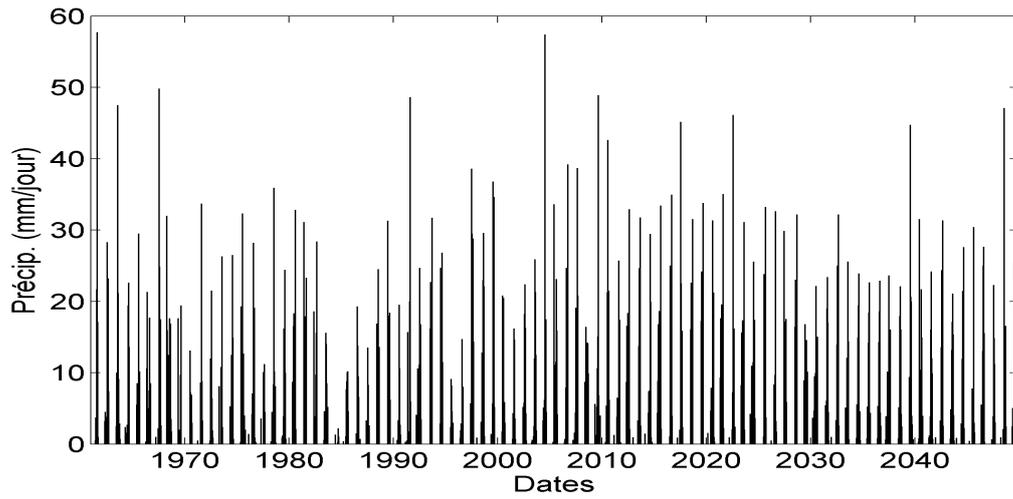


FIGURE A.1: Précipitation moyenne (mm/jour), Agadez, scénario sec

---

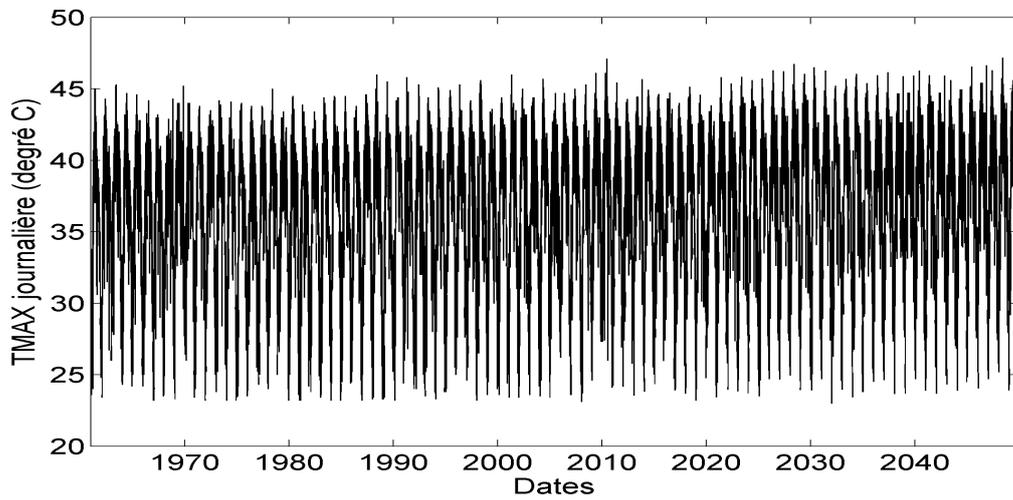


FIGURE A.2: Température maximale journalière (degré C), Agadez, scénario sec

---

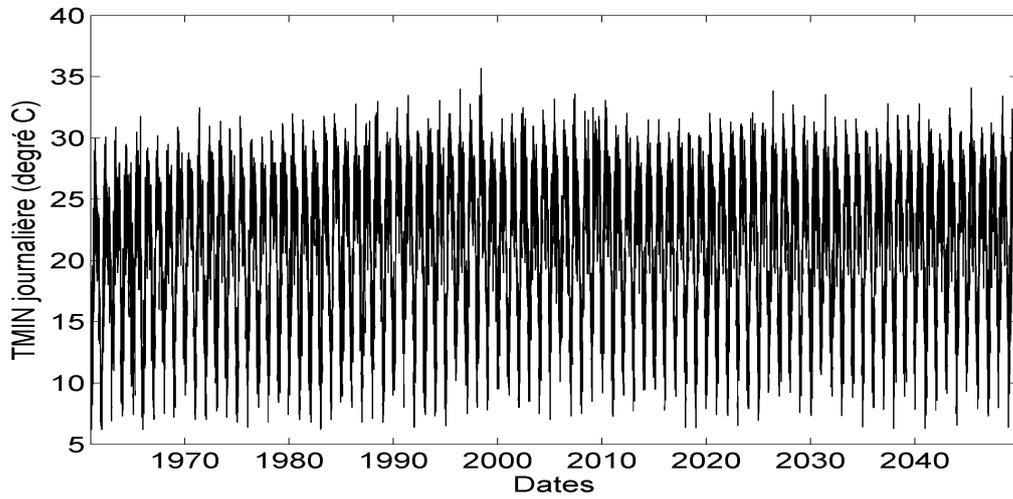


FIGURE A.3: Température minimale journalière (degré C), Agadez, scénario sec

---

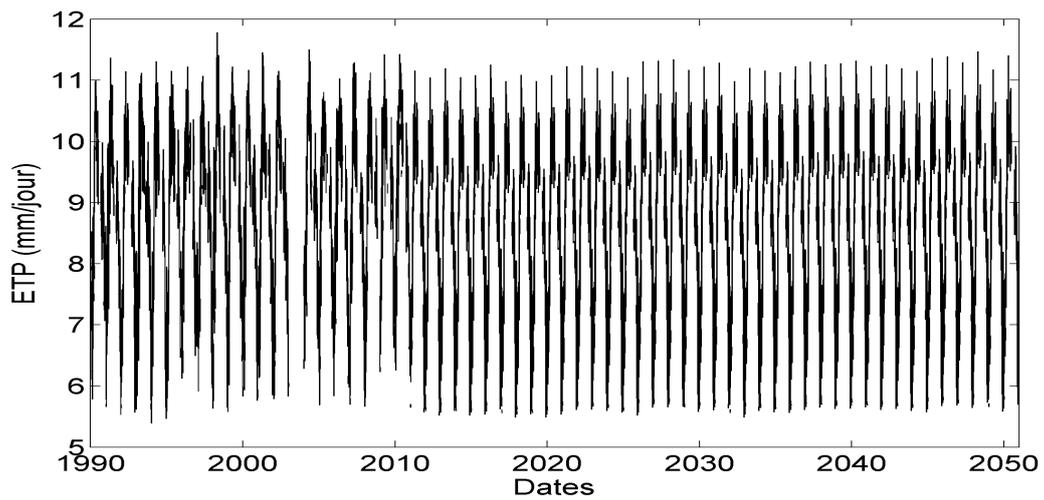


FIGURE A.4: Evapotranspiration (mm/jour), Agadez, scénario sec

---

### A.1.2 Agadez, scénario humide

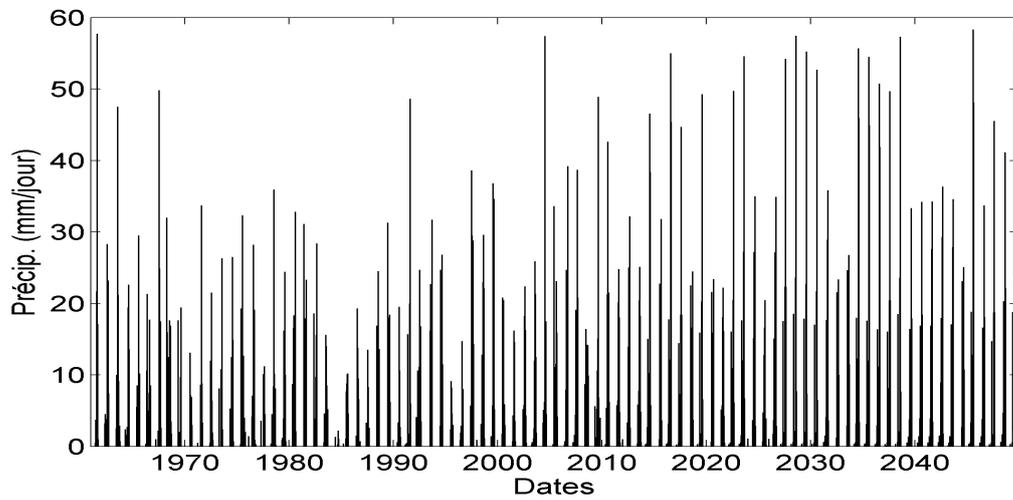


FIGURE A.5: Précipitation moyenne (mm/jour), Agadez, scénario humide

---

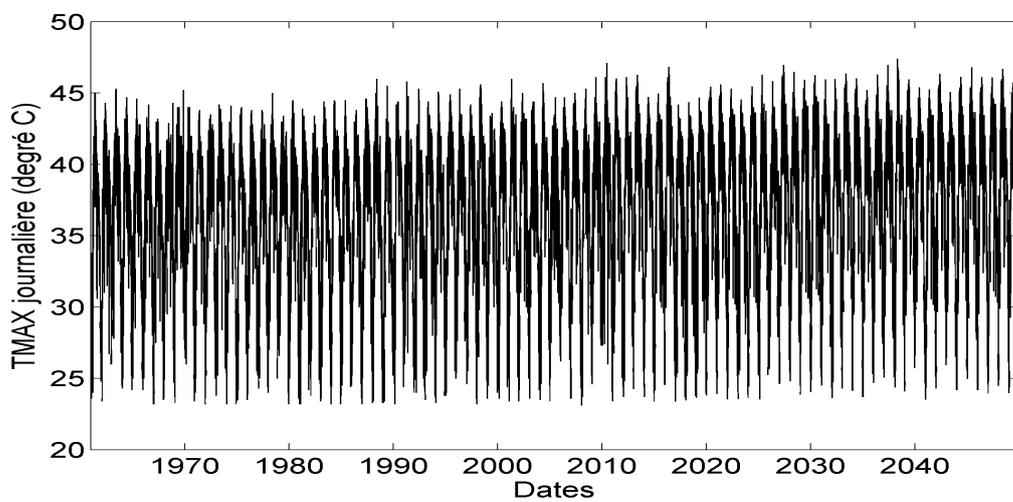


FIGURE A.6: Température maximale journalière (degré C), Agadez, scénario humide

---

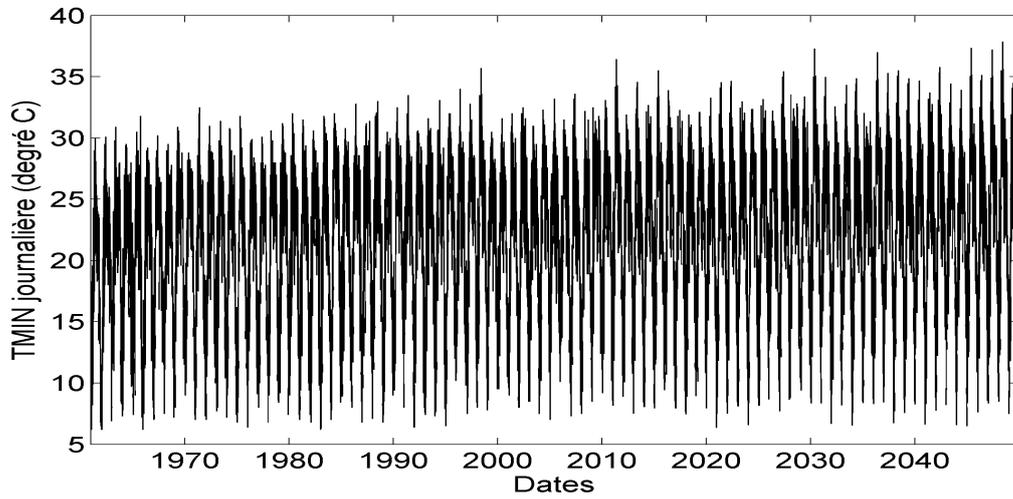


FIGURE A.7: Température minimale journalière (degré C), Agadez, scénario humide

---

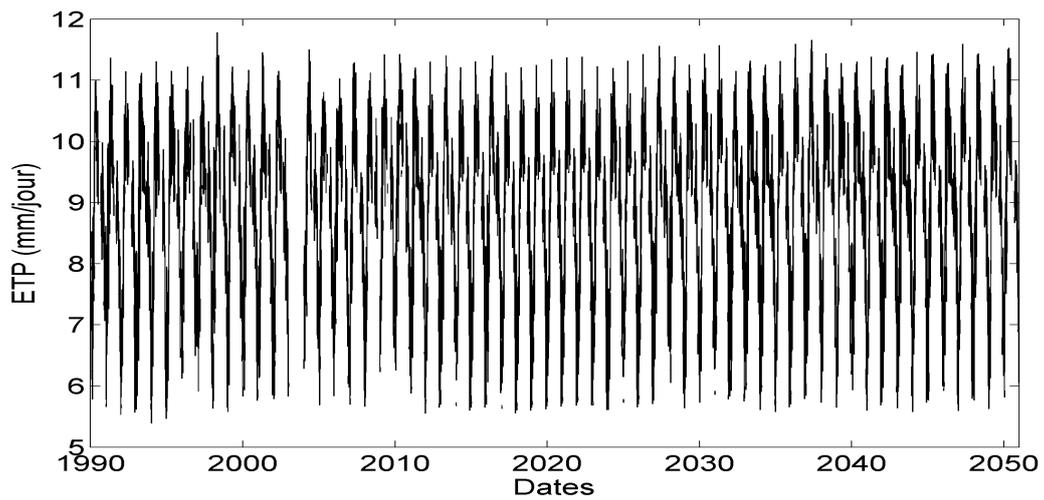


FIGURE A.8: Evapotranspiration (mm/jour), Agadez, scénario humide

---

## A.2 Birni N’Konni

### A.2.1 Birni N’Konni, scénario sec

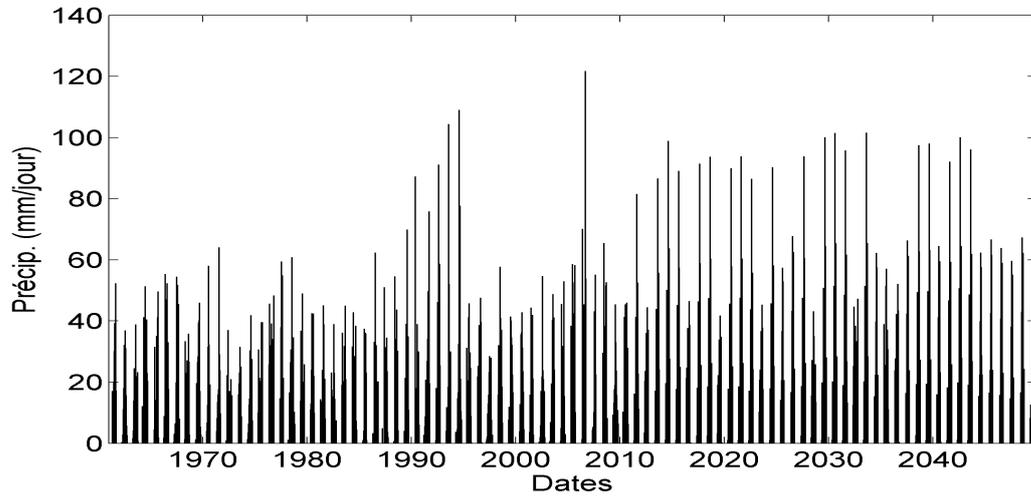


FIGURE A.9: Précipitation moyenne (mm/jour), Birni N’Konni, scénario sec

---

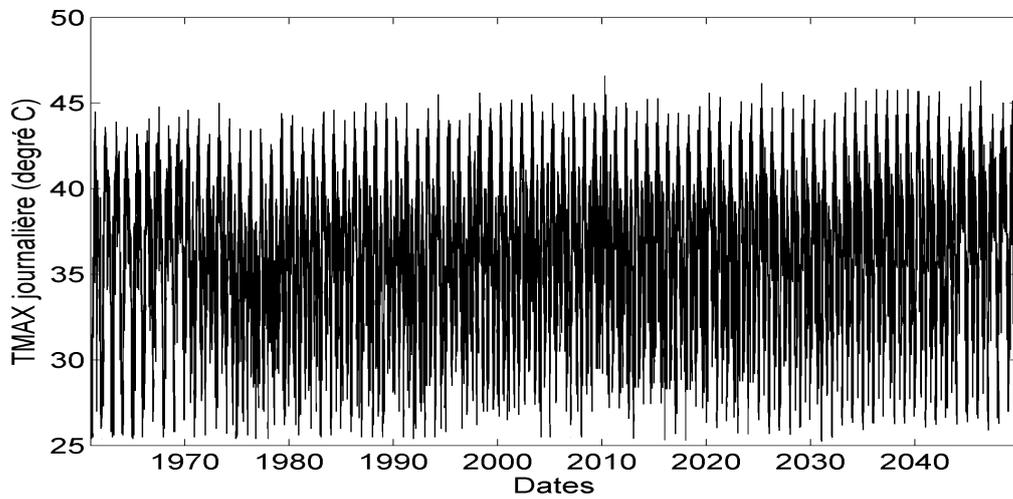


FIGURE A.10: Température maximale journalière (degré C), Birni N’Konni, scénario sec

---

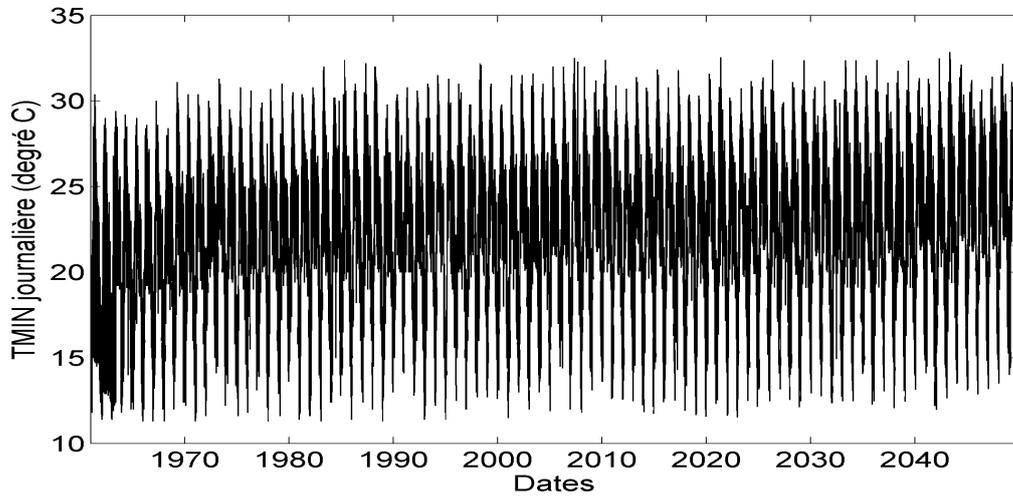


FIGURE A.11: Température minimale journalière (degré C), Birni N'Konni, scénario sec

---

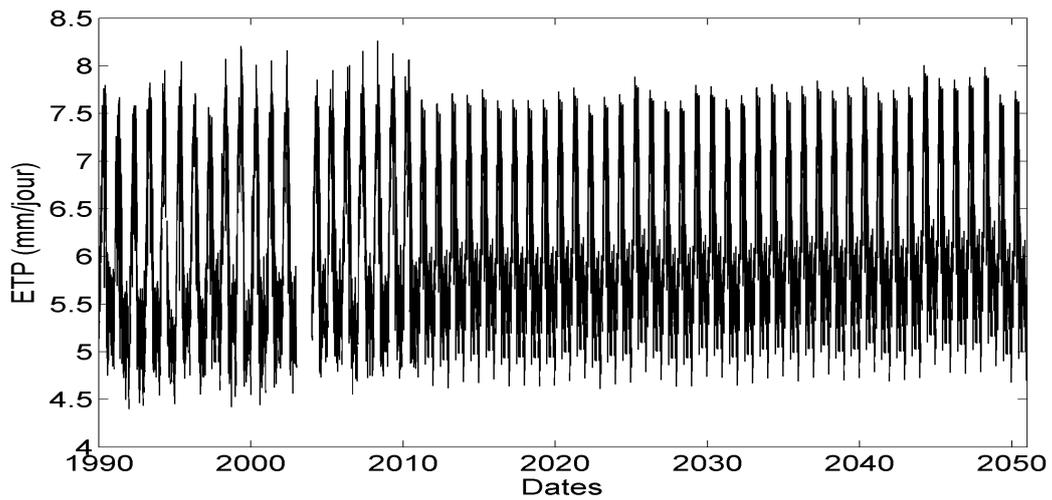


FIGURE A.12: Évapotranspiration (mm/jour), Birni N'Konni, scénario sec

---

## A.2.2 Birni N’Konni, scénario humide

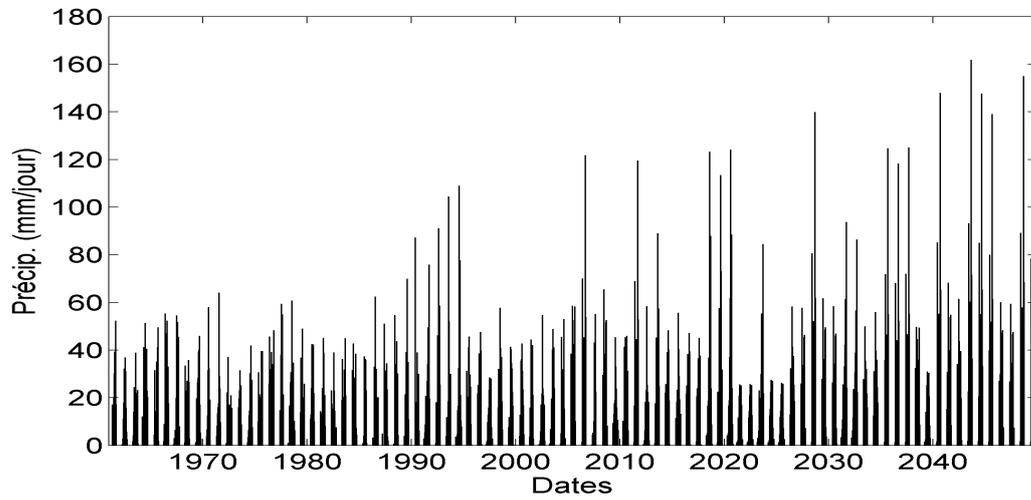


FIGURE A.13: Précipitation moyenne (mm/jour), Birni N’Konni, scénario humide

---

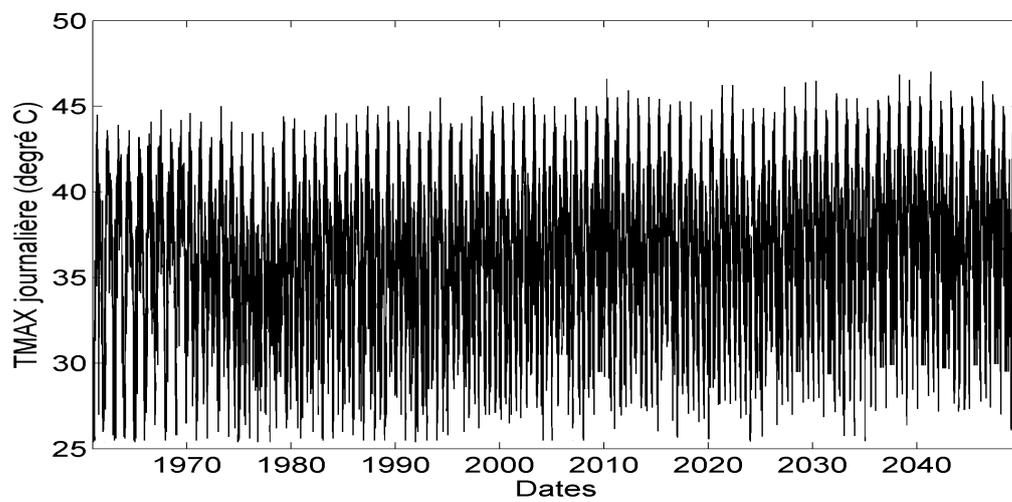


FIGURE A.14: Température maximale journalière (degré C), Birni N’Konni, scénario humide

---

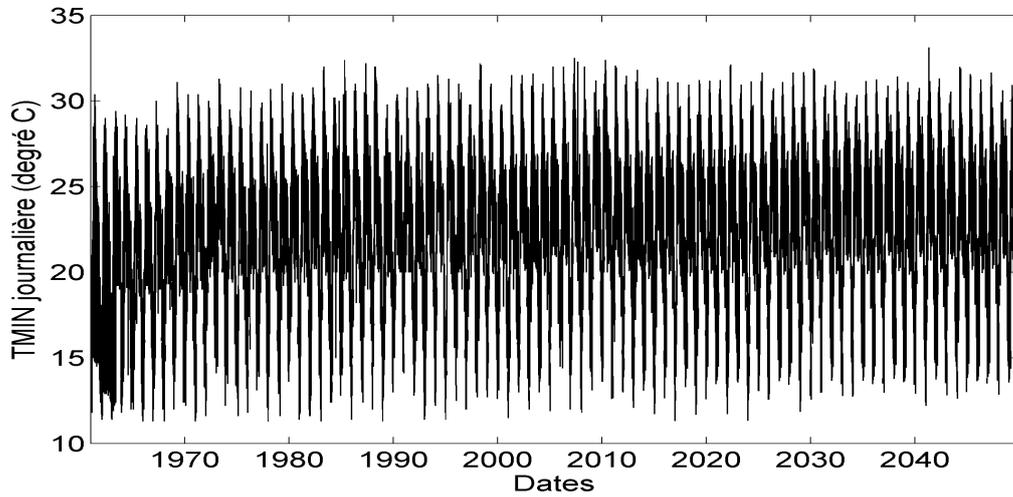


FIGURE A.15: Température minimale journalière (degré C), Birni N'Konni, scénario humide

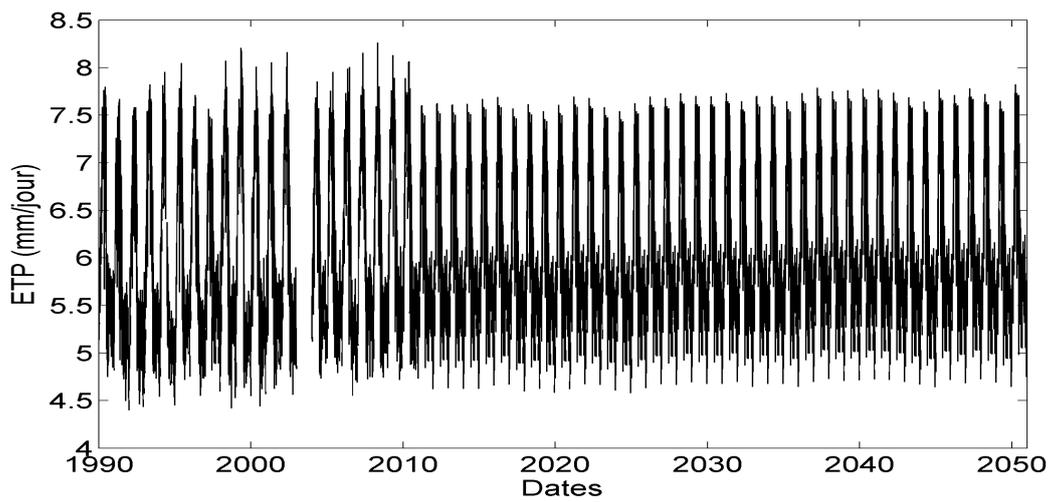


FIGURE A.16: Évapotranspiration (mm/jour), Birni N'Konni, scénario humide

## A.3 Gaya

### A.3.1 Gaya, scénario sec

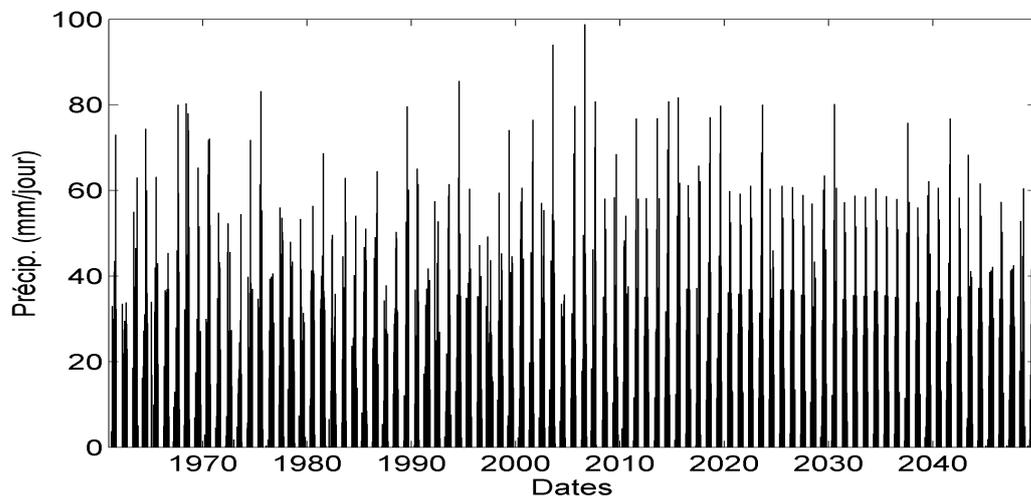


FIGURE A.17: Précipitation moyenne (mm/jour), Gaya, scénario sec

---

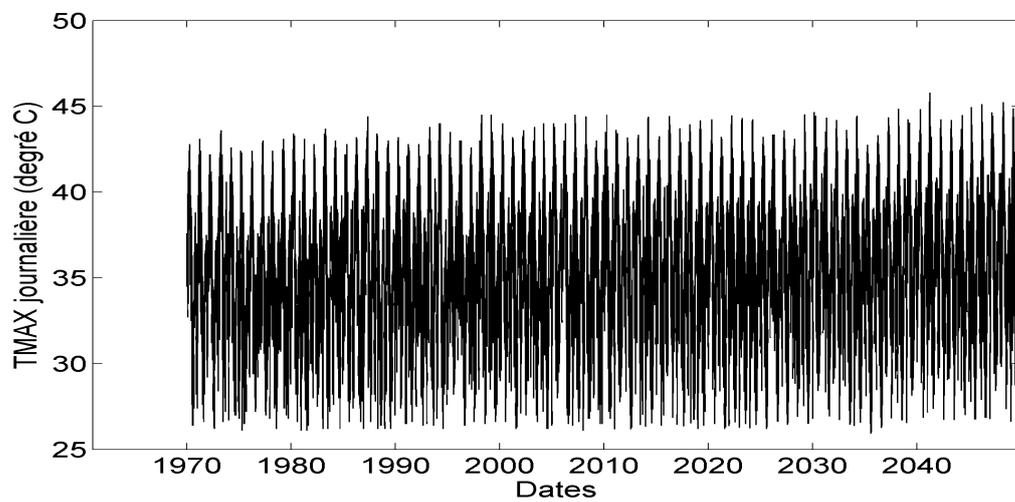


FIGURE A.18: Température maximale journalière (degré C), Gaya, scénario sec

---

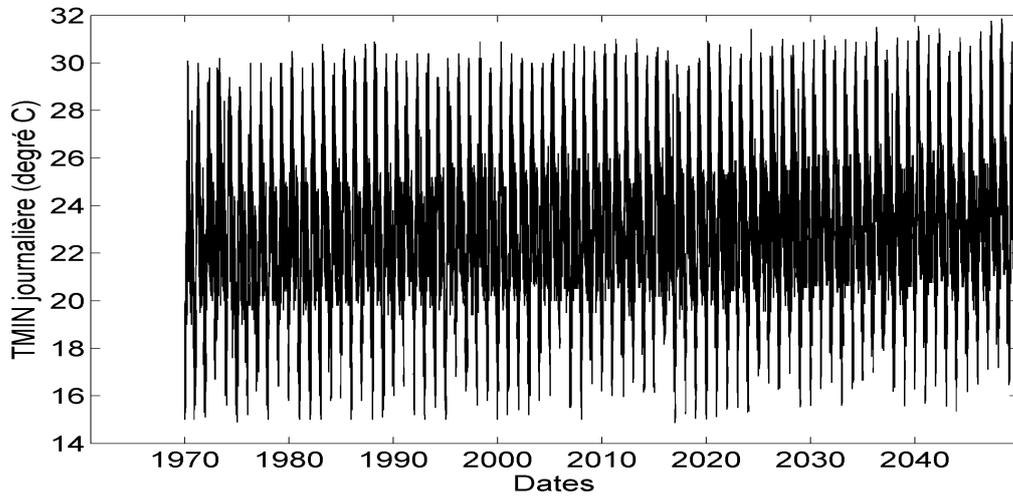


FIGURE A.19: Température minimale journalière (degré C), Gaya, scénario sec

---

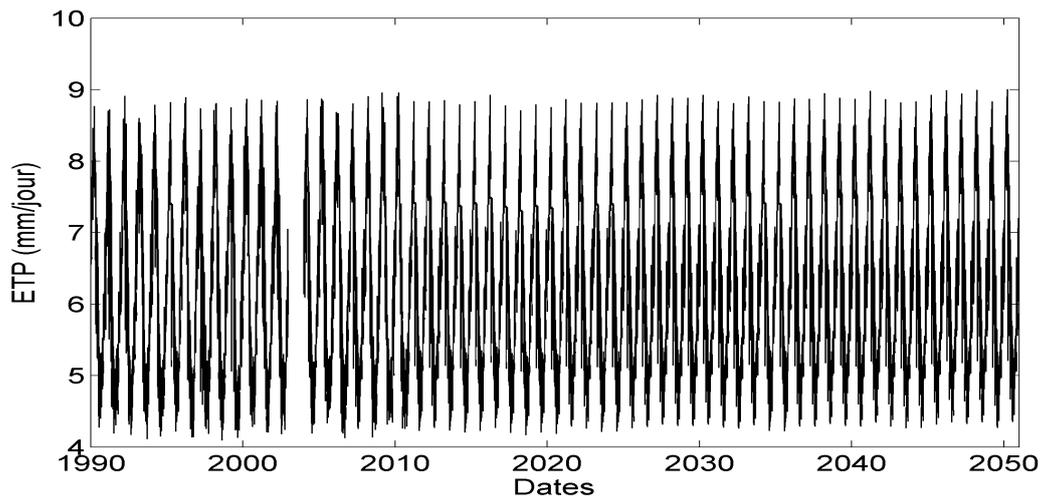


FIGURE A.20: Évapotranspiration (mm/jour), Gaya, scénario sec

---

### A.3.2 Gaya, scénario humide

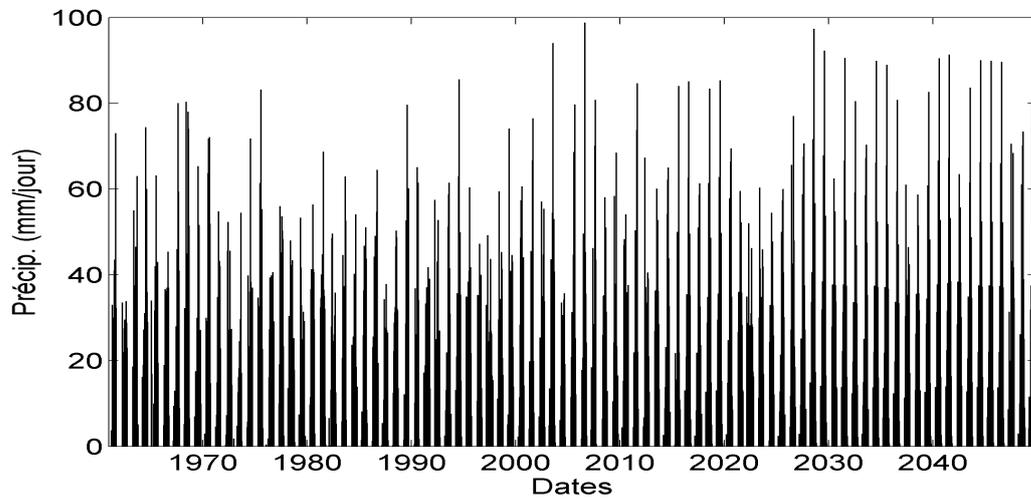


FIGURE A.21: Précipitation moyenne (mm/jour), Gaya, scénario humide

---

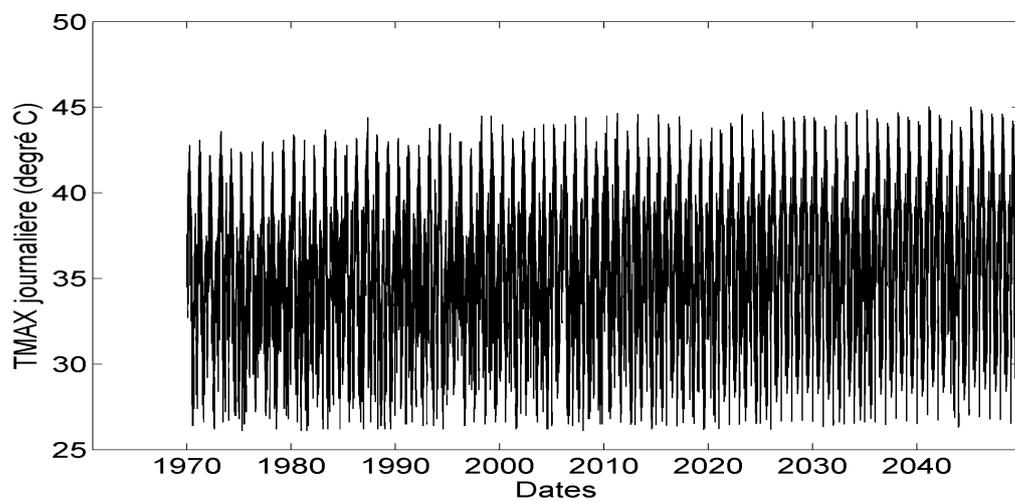


FIGURE A.22: Température maximale journalière (degré C), Gaya, scénario humide

---

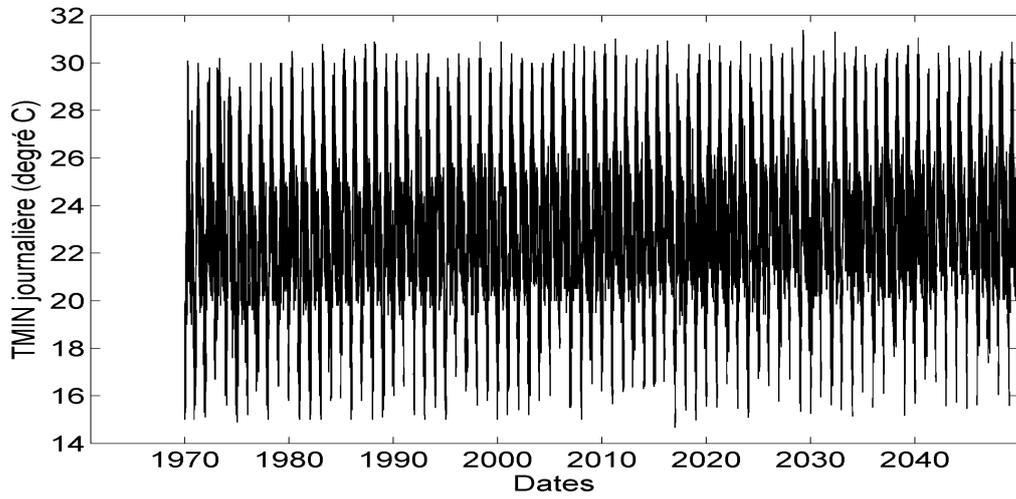


FIGURE A.23: Température minimale journalière (degré C), Gaya, scénario humide

---

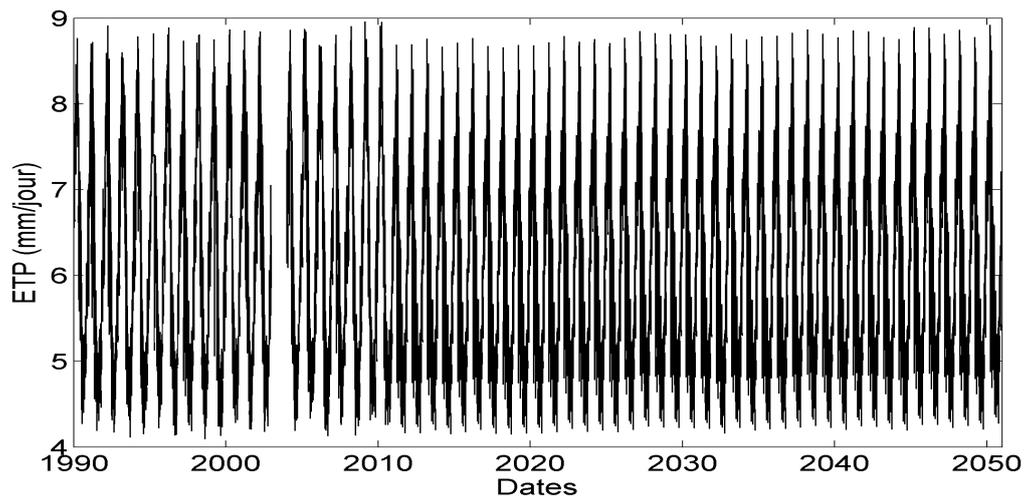


FIGURE A.24: Évapotranspiration (mm/jour), Gaya, scénario humide

---

## A.4 Mainé Soroa

### A.4.1 Mainé Soroa, scénario sec

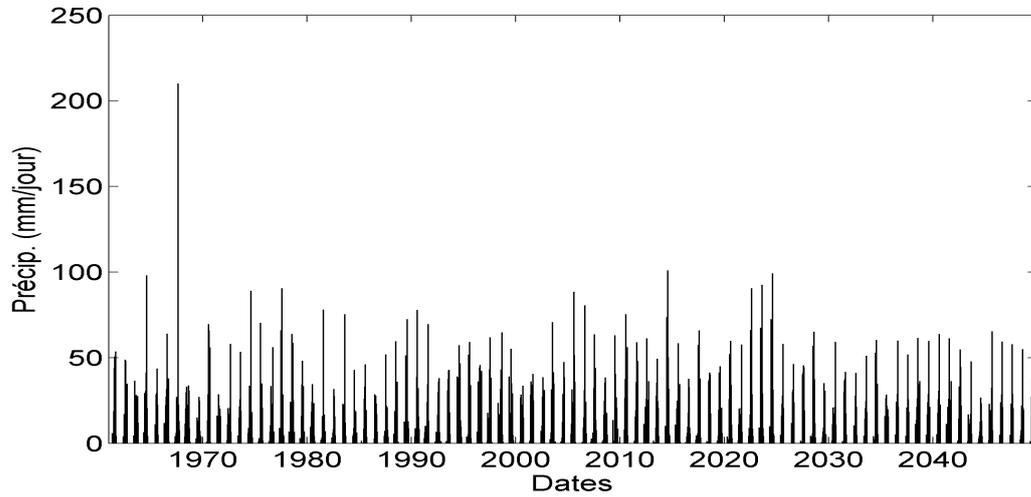


FIGURE A.25: Précipitation moyenne (mm/jour), Mainé Soroa, scénario sec

---

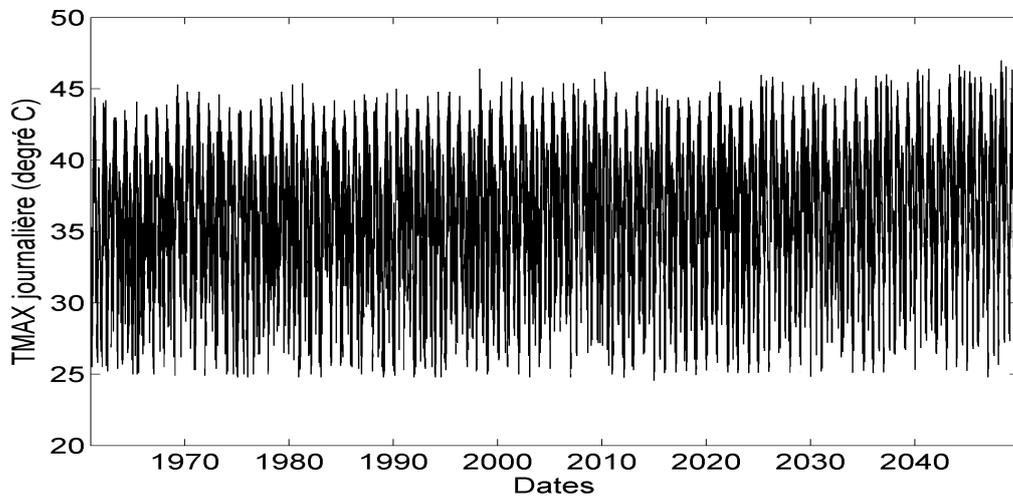


FIGURE A.26: Température maximale journalière (degré C), Mainé Soroa, scénario sec

---

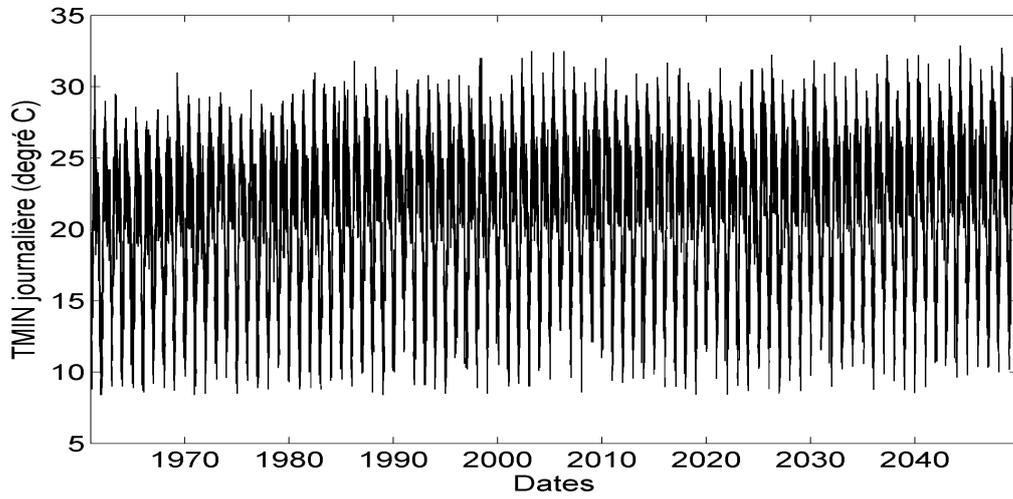


FIGURE A.27: Température minimale journalière (degré C), Mainé Soroa, scénario sec

---

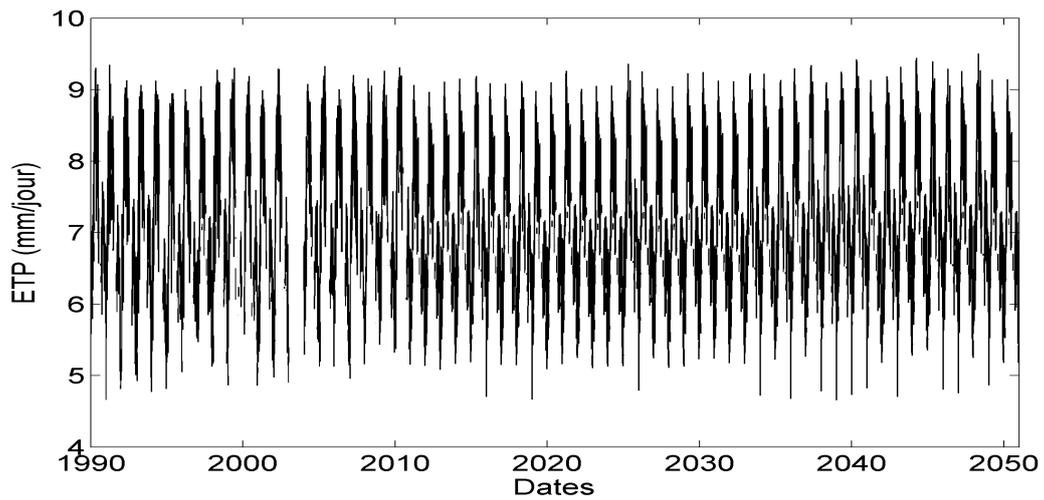


FIGURE A.28: Évapotranspiration (mm/jour), Mainé Soroa, scénario sec

---

#### A.4.2 Mainé Soroa, scénario humide

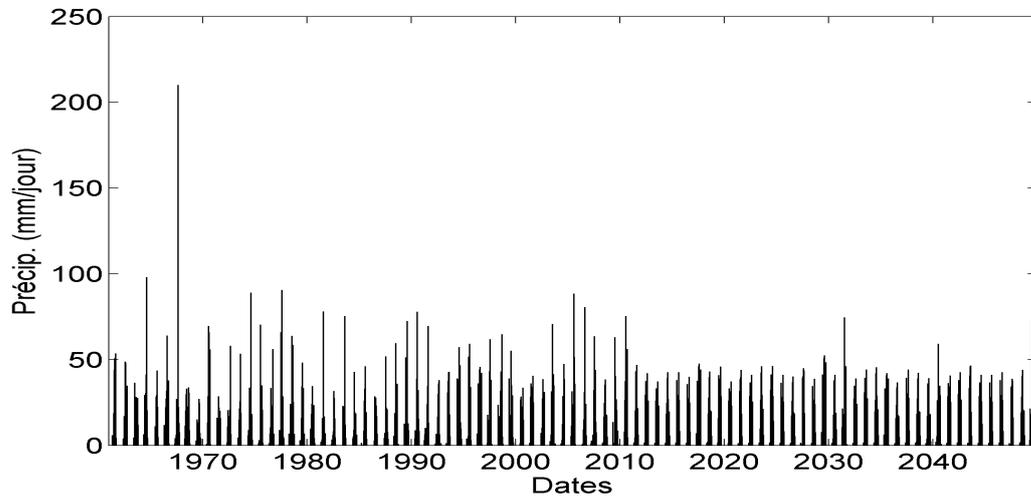


FIGURE A.29: Précipitation moyenne (mm/jour), Mainé Soroa, scénario humide

---

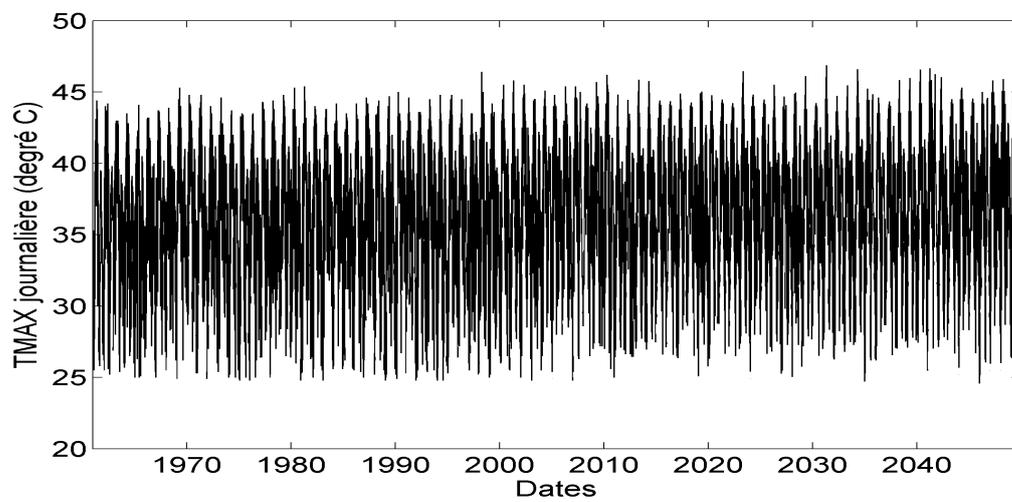


FIGURE A.30: Température maximale journalière (degré C), Mainé Soroa, scénario humide

---

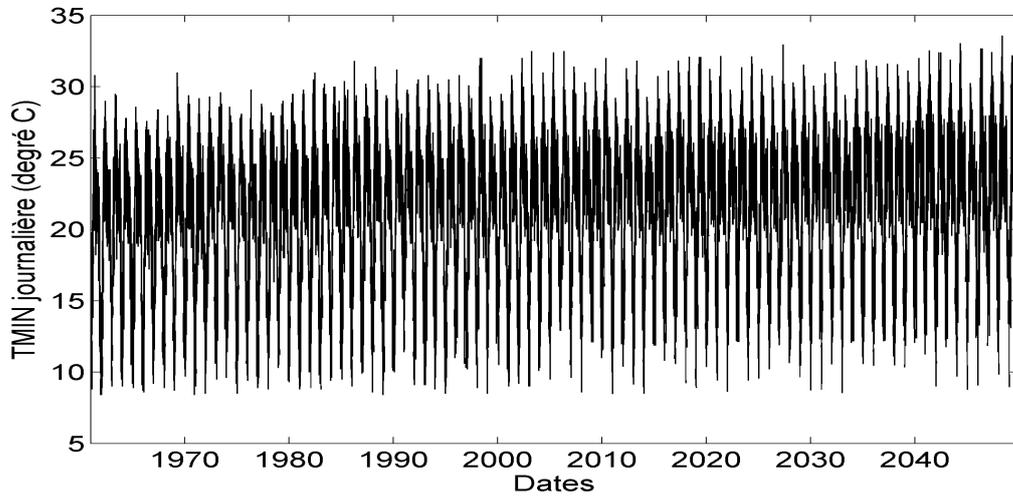


FIGURE A.31: Température minimale journalière (degré C), Mainé Soroa, scénario humide

---

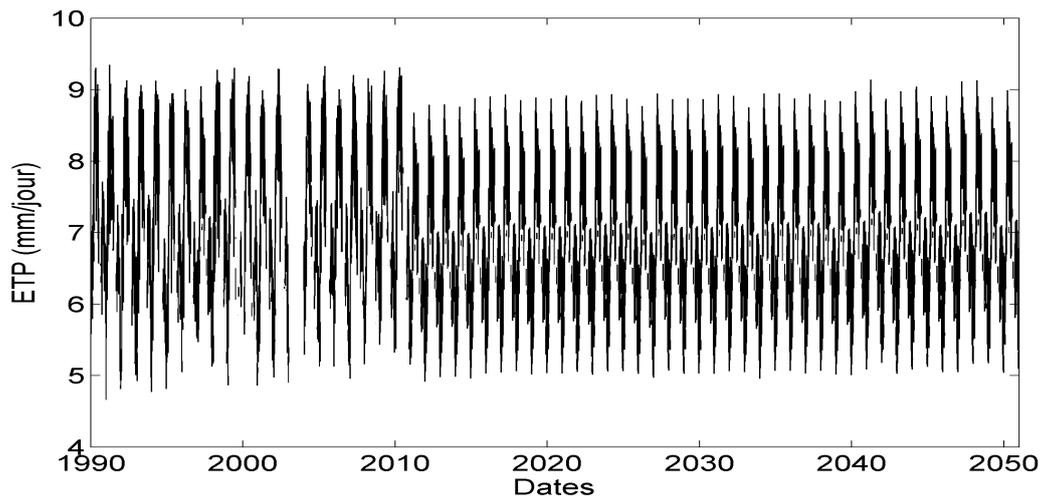


FIGURE A.32: Évapotranspiration (mm/jour), Mainé Soroa, scénario humide

---

## A.5 Maradi

### A.5.1 Maradi, scénario sec

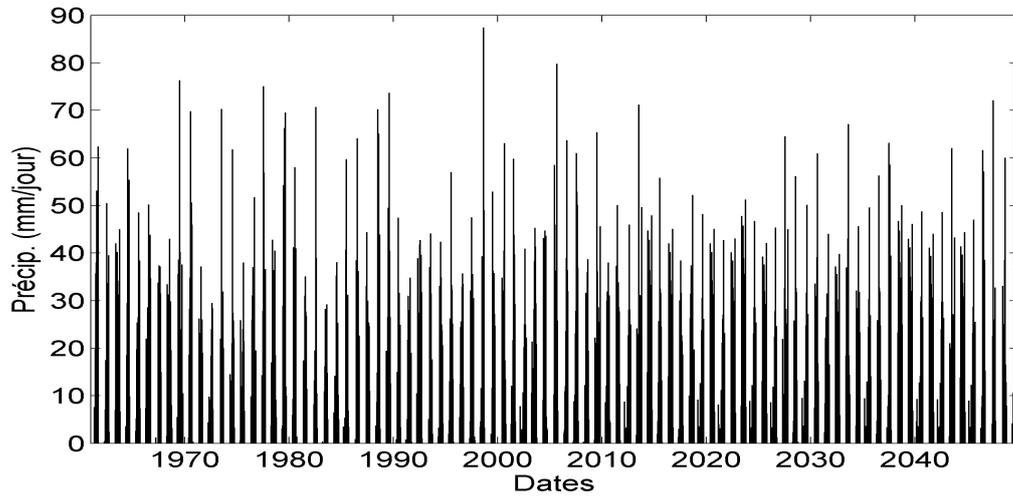


FIGURE A.33: Précipitation moyenne (mm/jour), Maradi, scénario sec

---

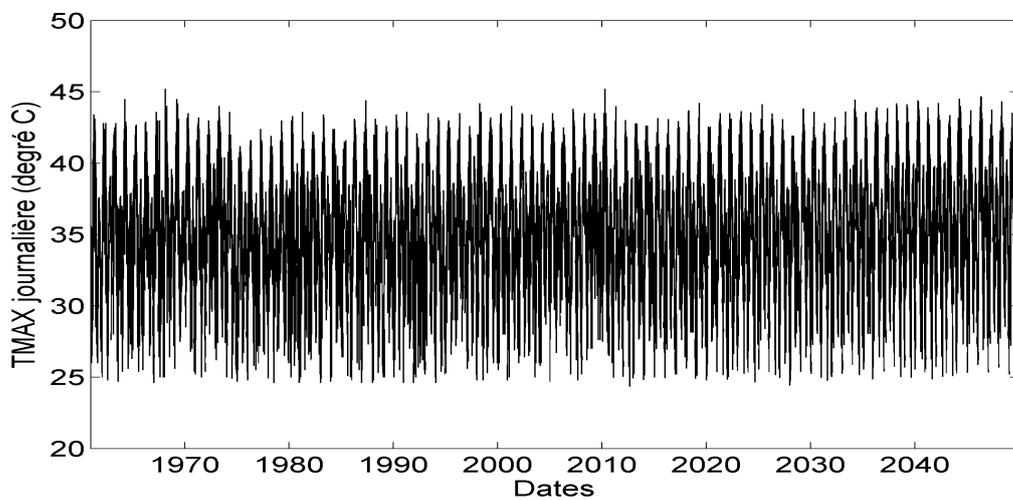


FIGURE A.34: Température maximale journalière (degré C), Maradi, scénario sec

---

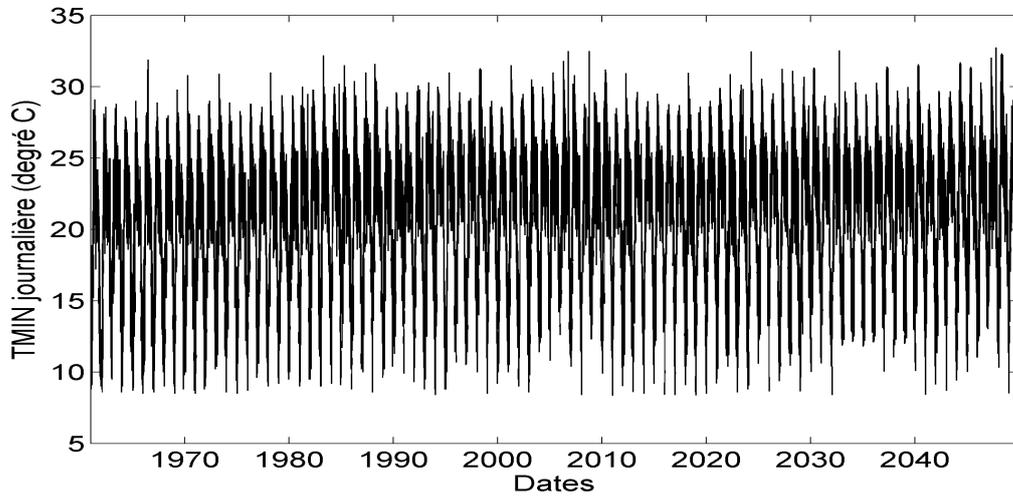


FIGURE A.35: Température minimale journalière (degré C), Maradi, scénario sec

---

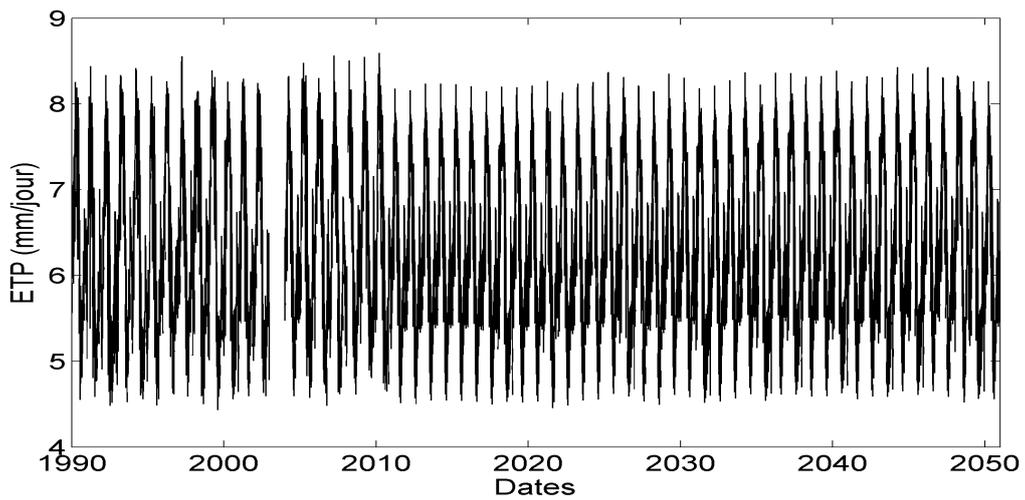


FIGURE A.36: Évapotranspiration (mm/jour), Maradi, scénario sec

---

### A.5.2 Maradi, scénario humide

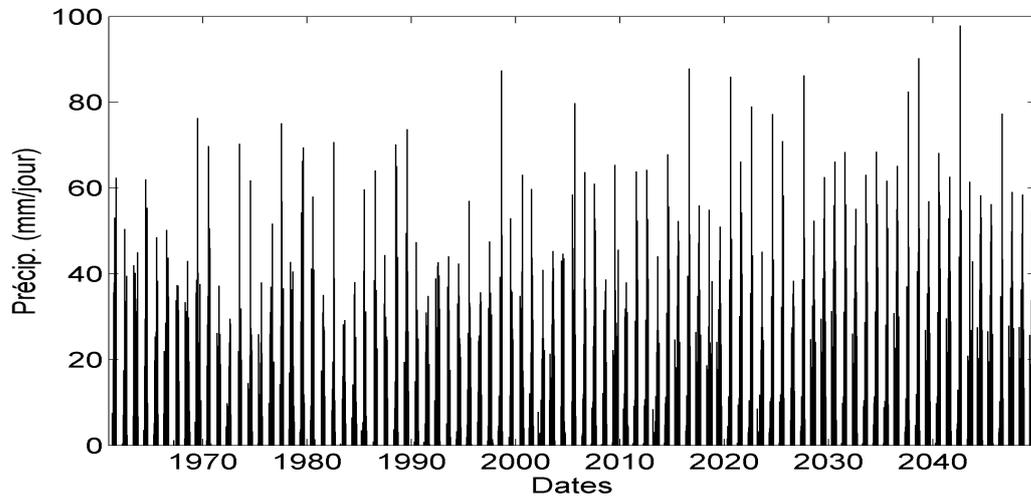


FIGURE A.37: Précipitation moyenne (mm/jour), Maradi, scénario humide

---

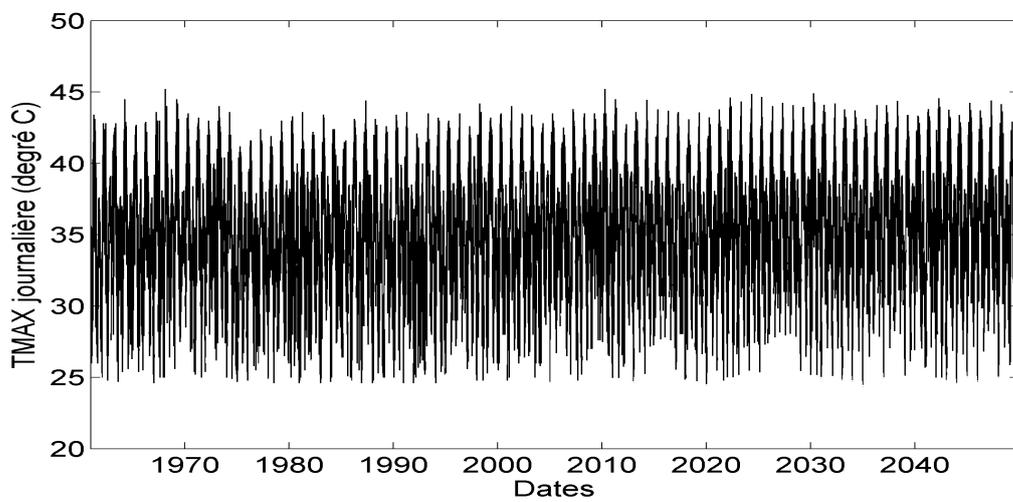


FIGURE A.38: Température maximale journalière (degré C), Maradi, scénario humide

---

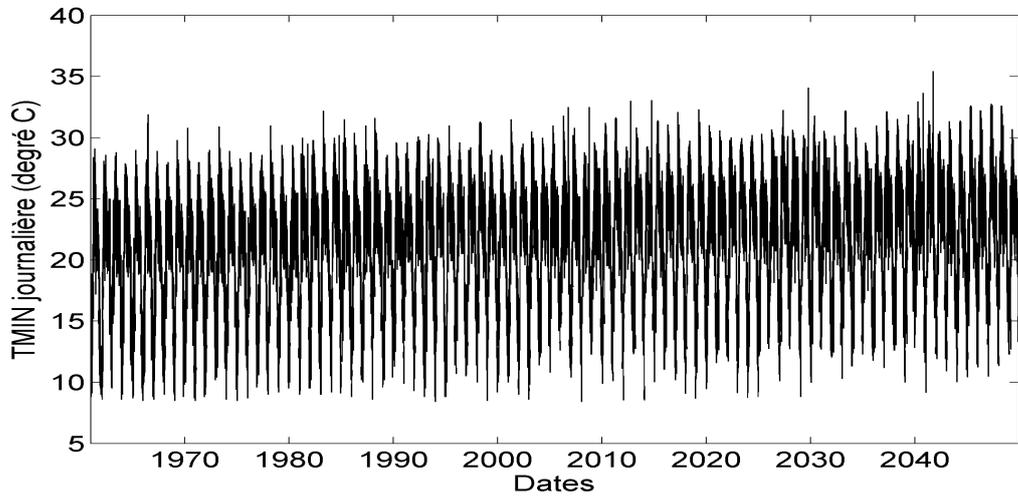


FIGURE A.39: Température minimale journalière (degré C), Maradi, scénario humide

---

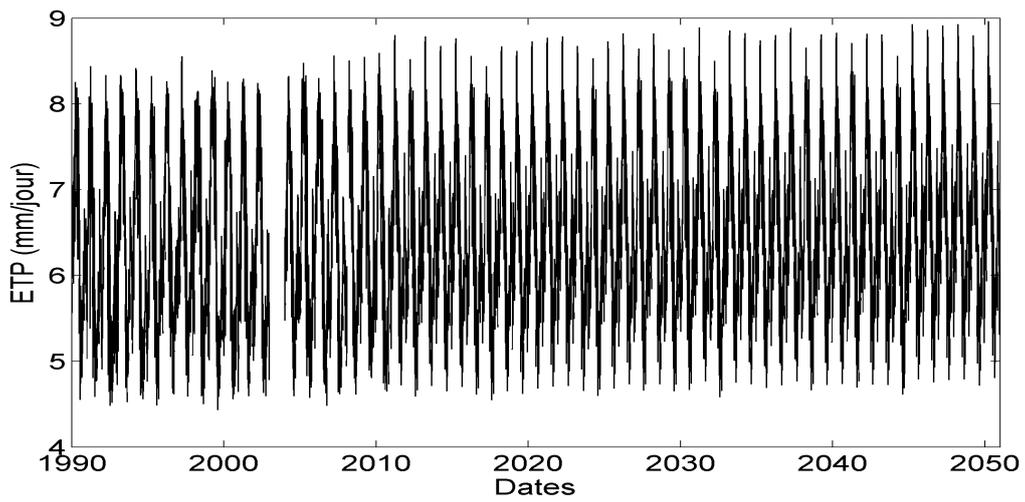


FIGURE A.40: Évapotranspiration (mm/jour), Maradi, scénario humide

---

## A.6 Niamey

### A.6.1 Niamey, scénario sec

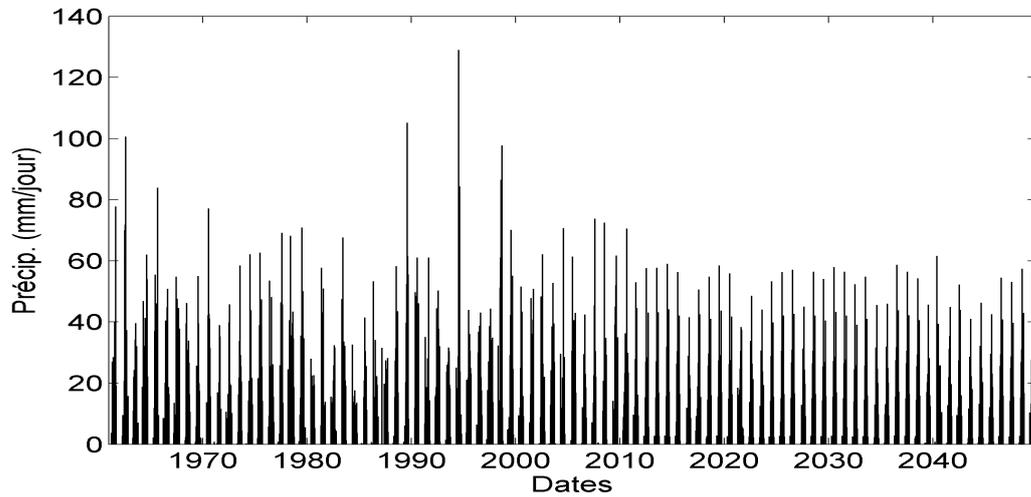


FIGURE A.41: Précipitation moyenne (mm/jour), Niamey, scénario sec

---

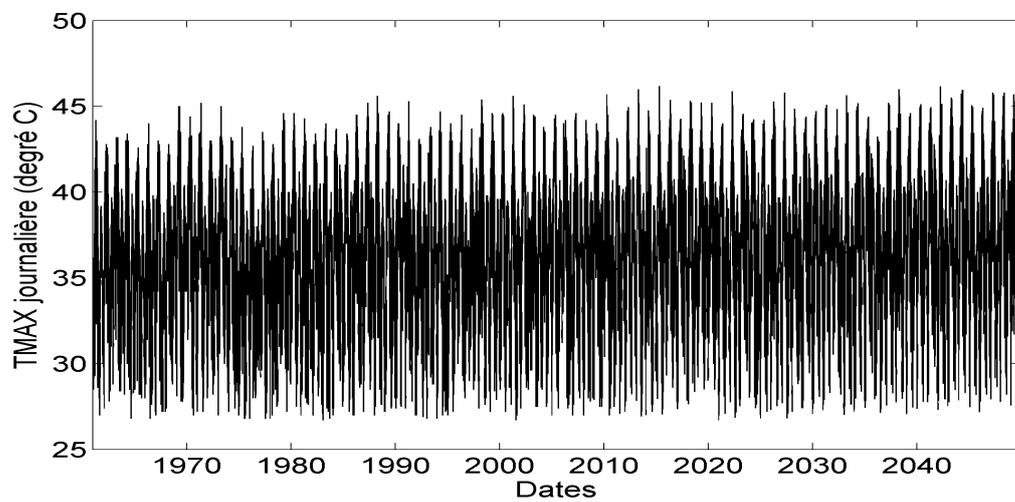


FIGURE A.42: Température maximale journalière (degré C), Niamey, scénario sec

---

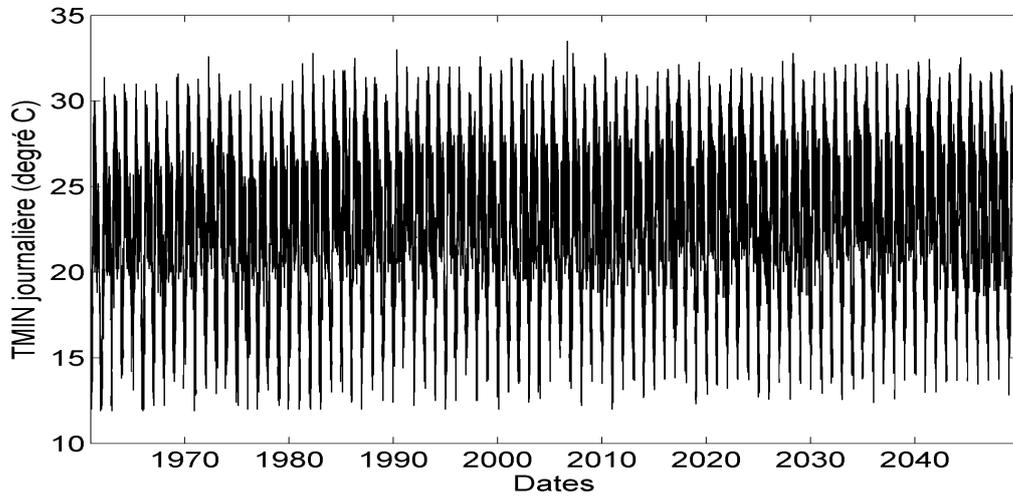


FIGURE A.43: Température minimale journalière (degré C), Niamey, scénario sec

---

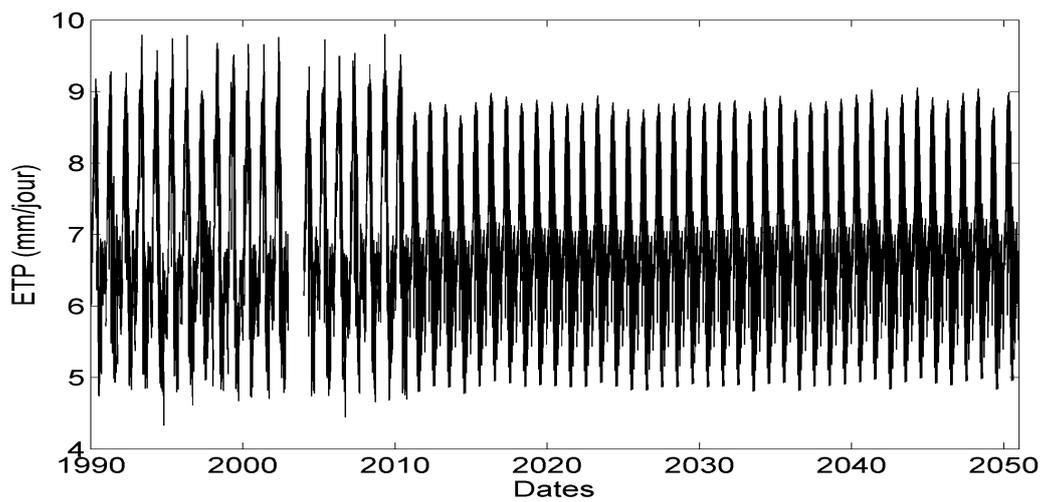


FIGURE A.44: Évapotranspiration (mm/jour), Niamey, scénario sec

---

## A.6.2 Niamey, scénario humide

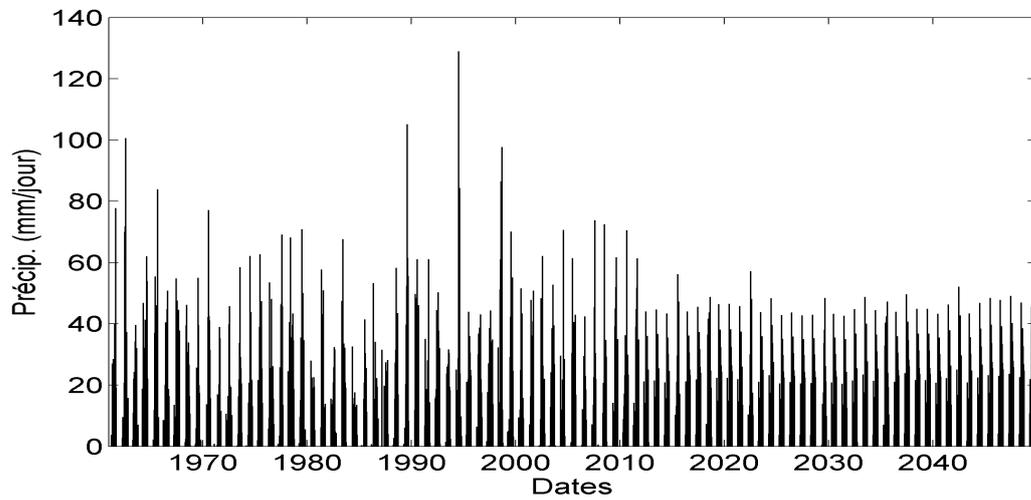


FIGURE A.45: Précipitation moyenne (mm/jour), Niamey, scénario humide

---

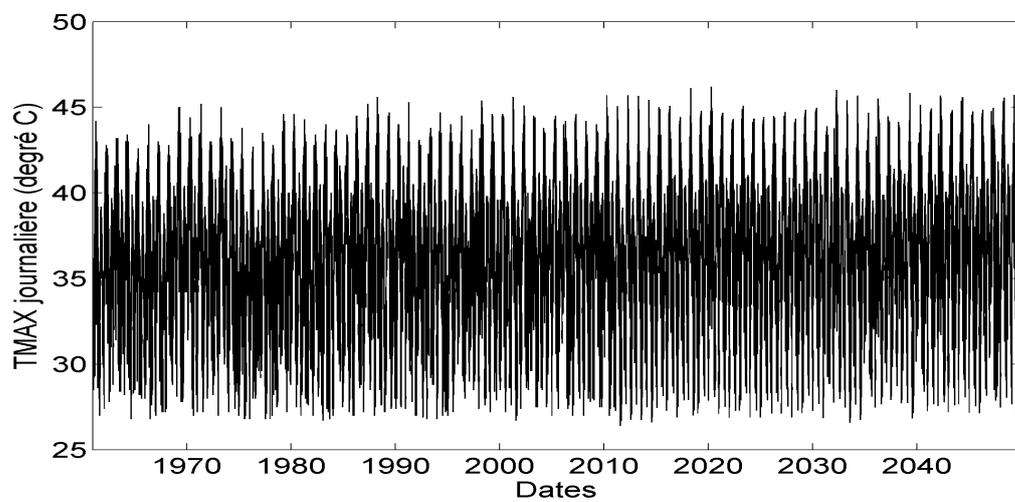


FIGURE A.46: Température maximale journalière (degré C), Niamey, scénario humide

---

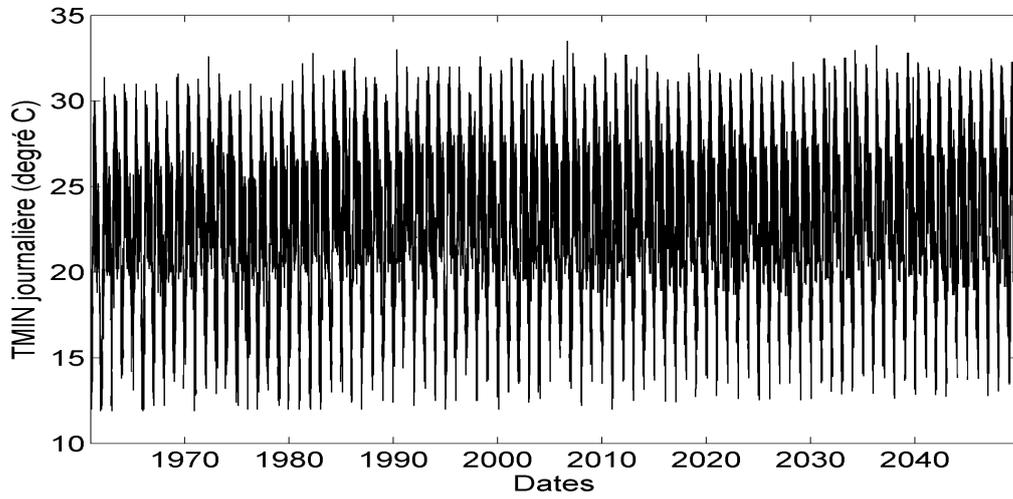


FIGURE A.47: Température minimale journalière (degré C), Niamey, scénario humide

---

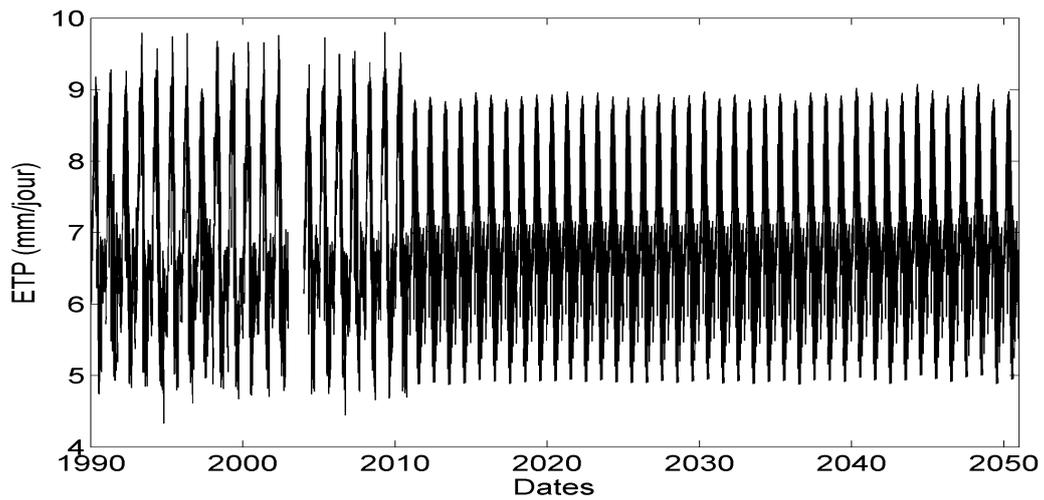


FIGURE A.48: Évapotranspiration (mm/jour), Niamey, scénario humide

---

## A.7 Tahoua

### A.7.1 Tahoua, scénario sec

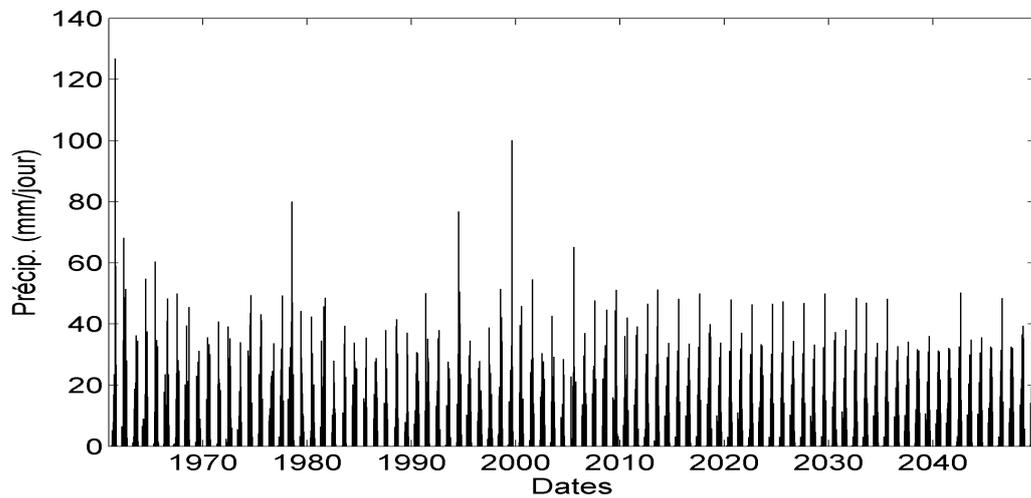


FIGURE A.49: Précipitation moyenne (mm/jour), Tahoua, scénario sec

---

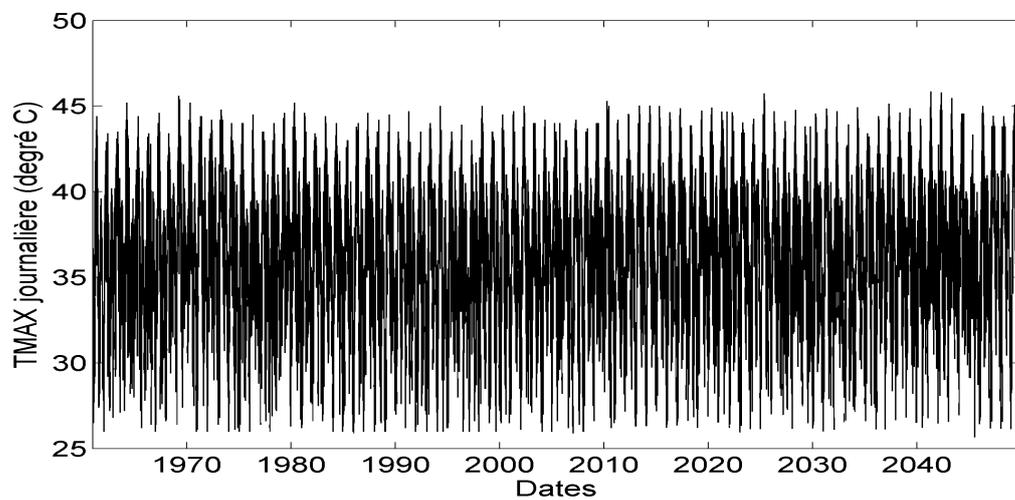


FIGURE A.50: Température maximale journalière (degré C), Tahoua, scénario sec

---

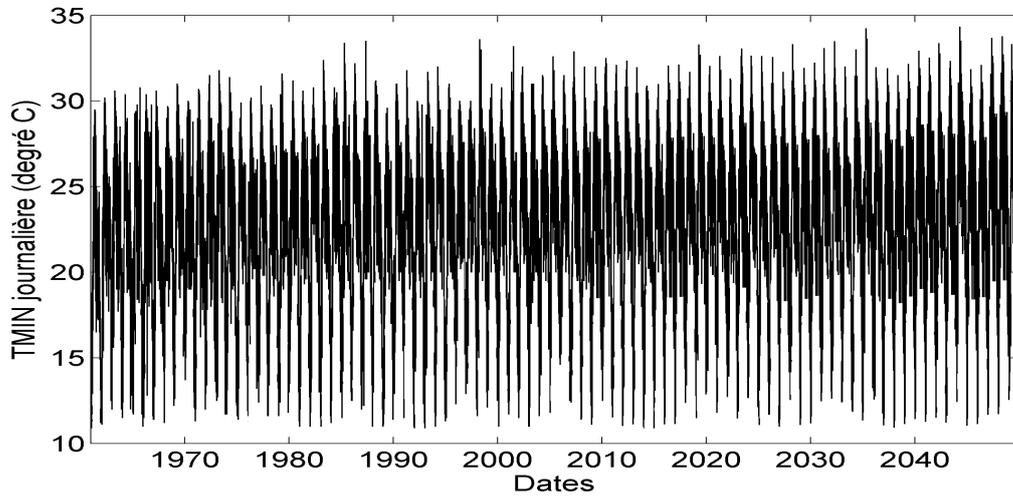


FIGURE A.51: Température minimale journalière (degré C), Tahoua, scénario sec

---

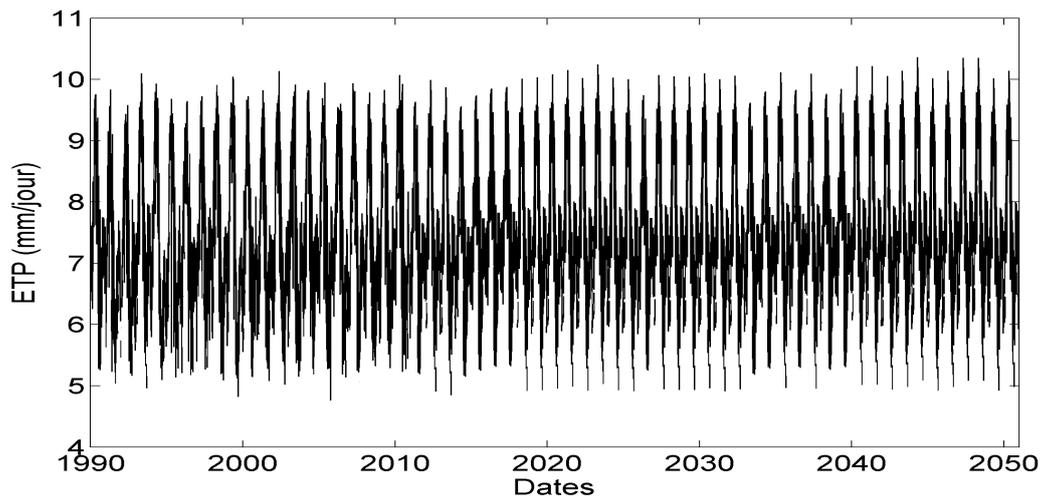


FIGURE A.52: Évapotranspiration (mm/jour), Tahoua, scénario sec

---

### A.7.2 Tahoua, scénario humide

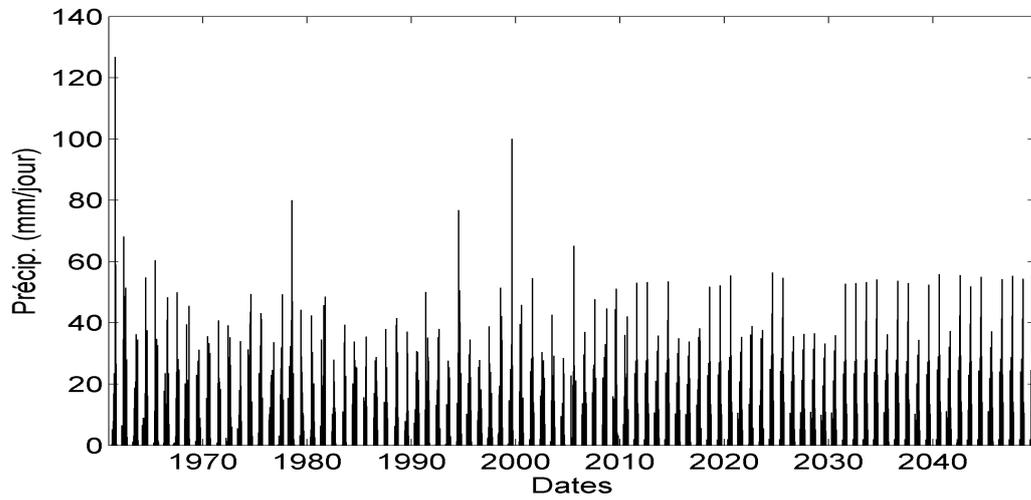


FIGURE A.53: Précipitation moyenne (mm/jour), Tahoua, scénario humide

---

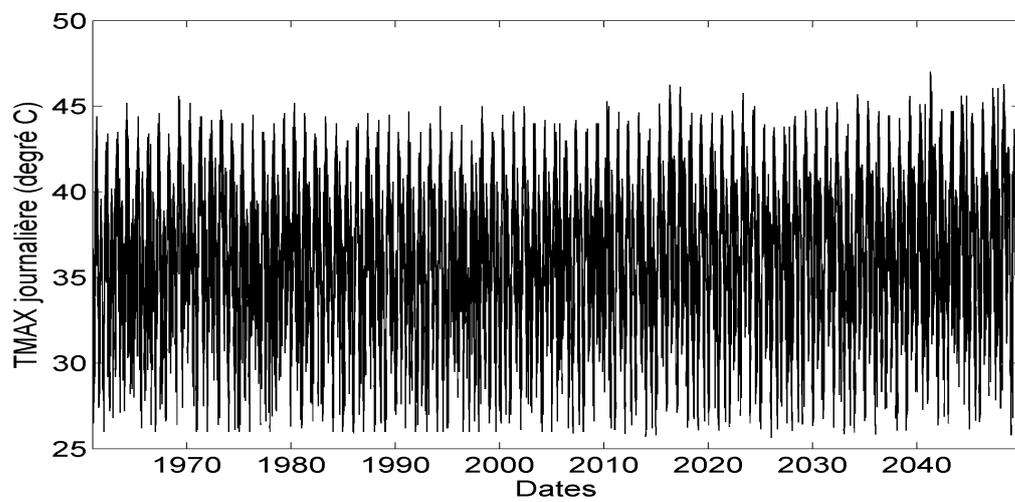


FIGURE A.54: Température maximale journalière (degré C), Tahoua, scénario humide

---

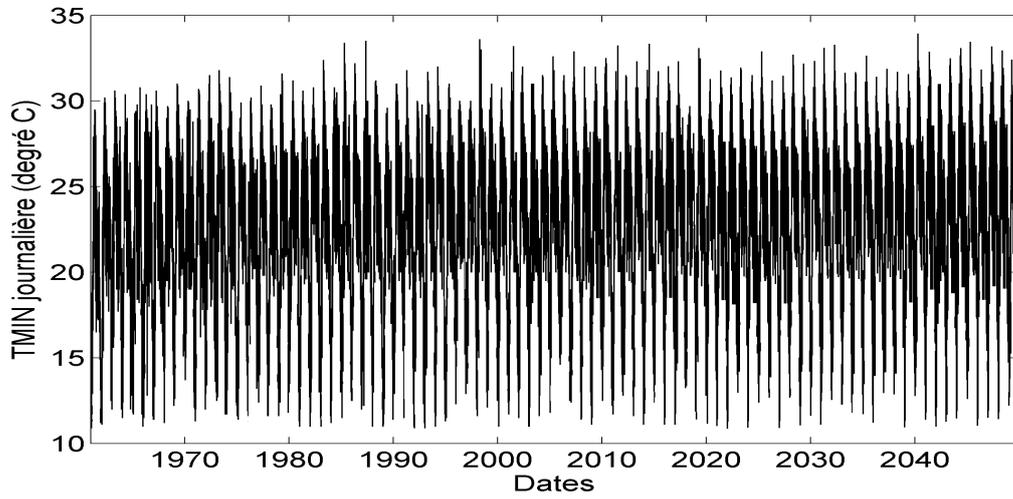


FIGURE A.55: Température minimale journalière (degré C), Tahoua, scénario humide

---

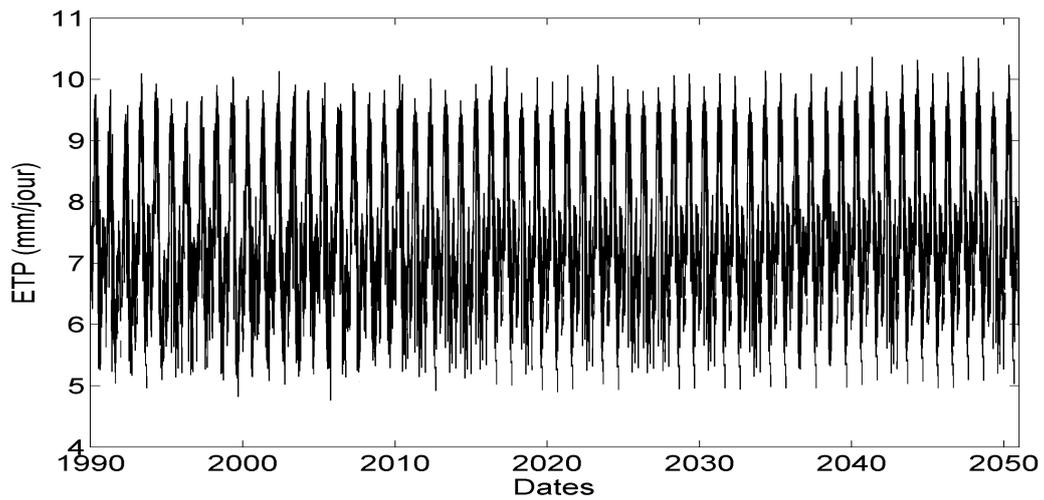


FIGURE A.56: Évapotranspiration (mm/jour), Tahoua, scénario humide

---

## A.8 Tillabéry

### A.8.1 Tillabéry, scénario sec

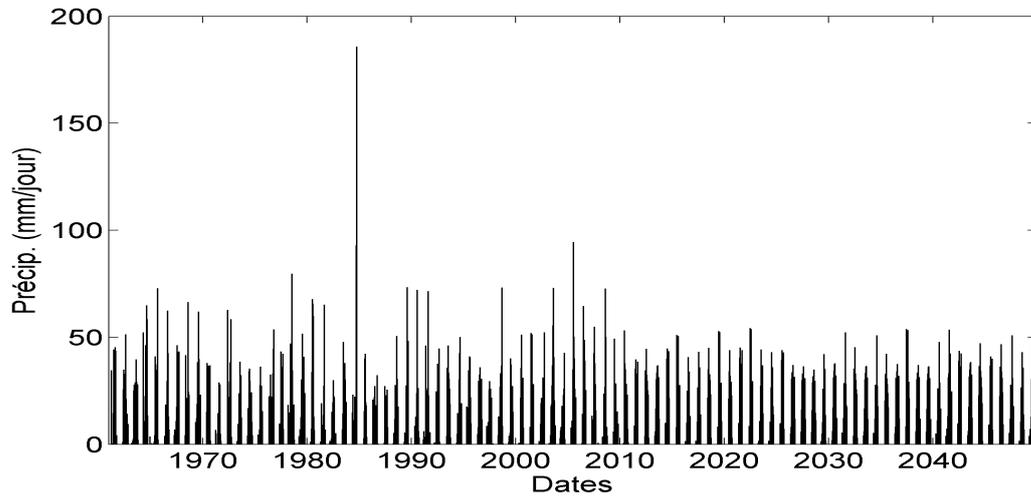


FIGURE A.57: Précipitation moyenne (mm/jour), Tillabéry, scénario sec

---

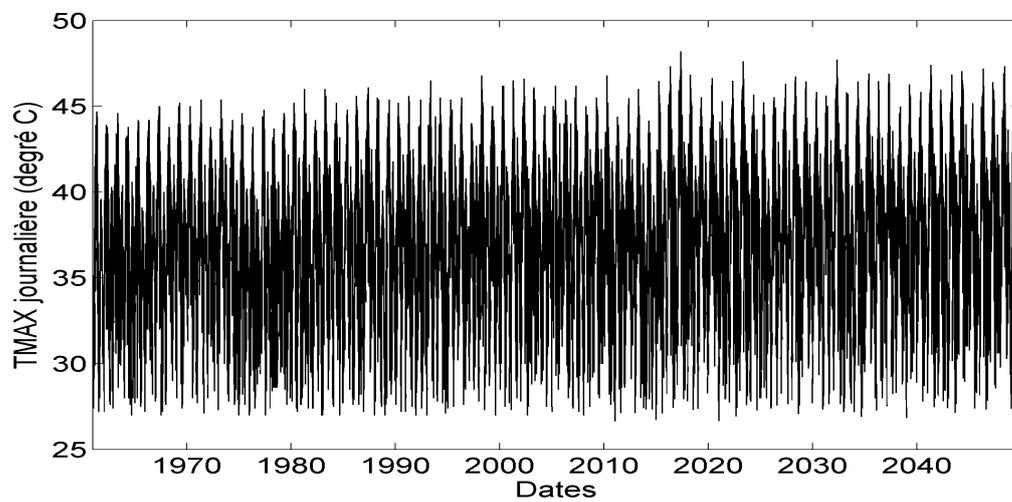


FIGURE A.58: Température maximale journalière (degré C), Tillabéry, scénario sec

---

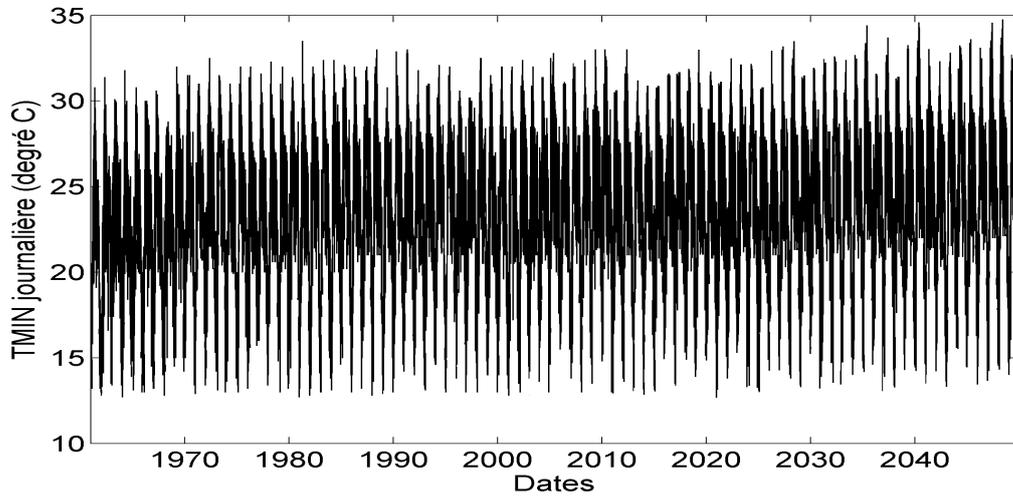


FIGURE A.59: Température minimale journalière (degré C), Tillabéry, scénario sec

---

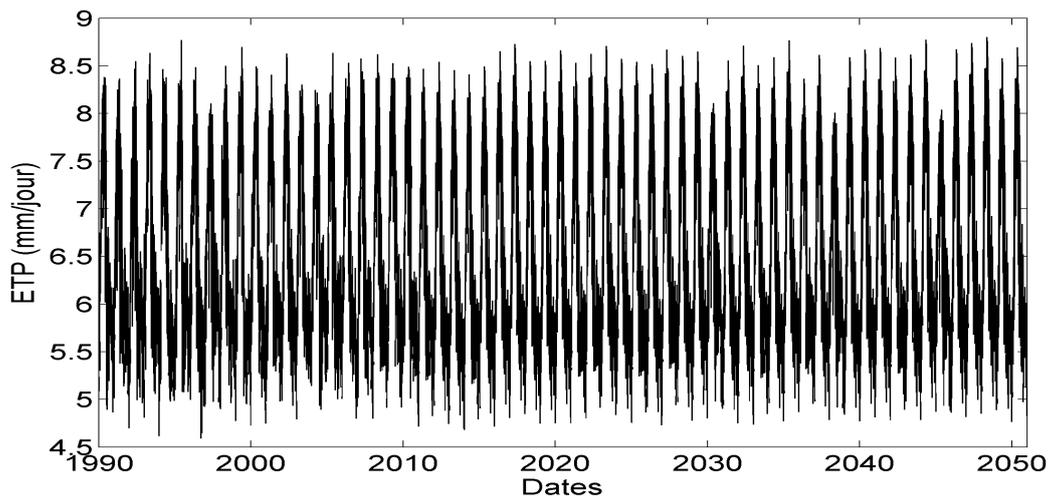


FIGURE A.60: Évapotranspiration (mm/jour), Tillabéry, scénario sec

---

### A.8.2 Tillabéry, scénario humide

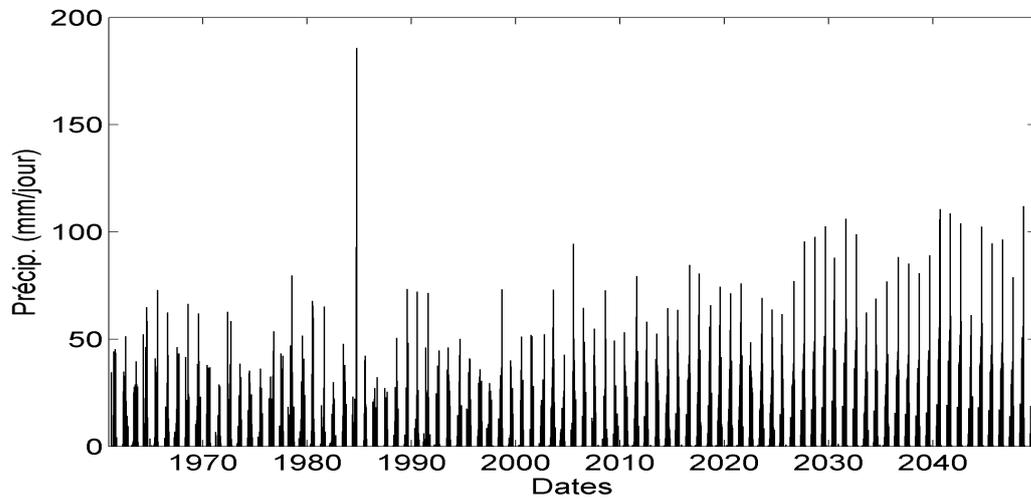


FIGURE A.61: Précipitation moyenne (mm/jour), Tillabéry, scénario humide

---

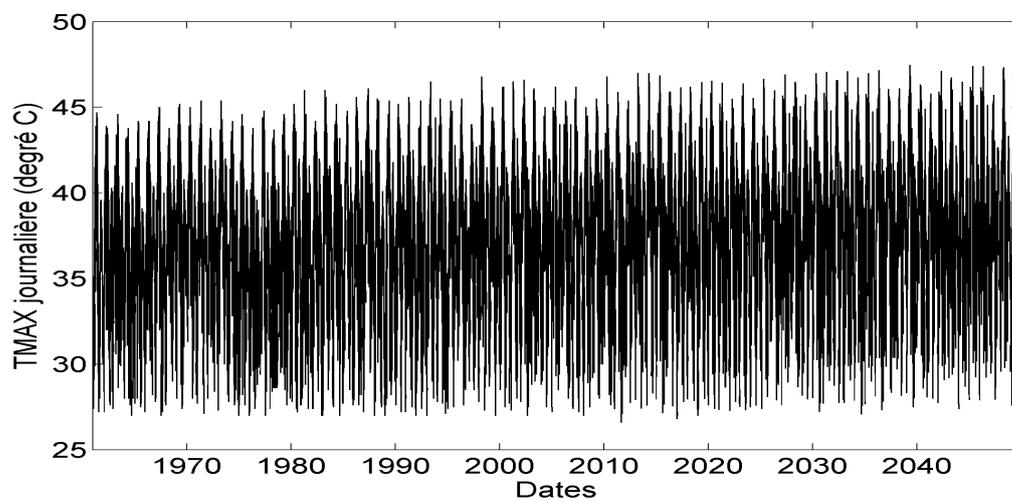


FIGURE A.62: Température maximale journalière (degré C), Tillabéry, scénario humide

---

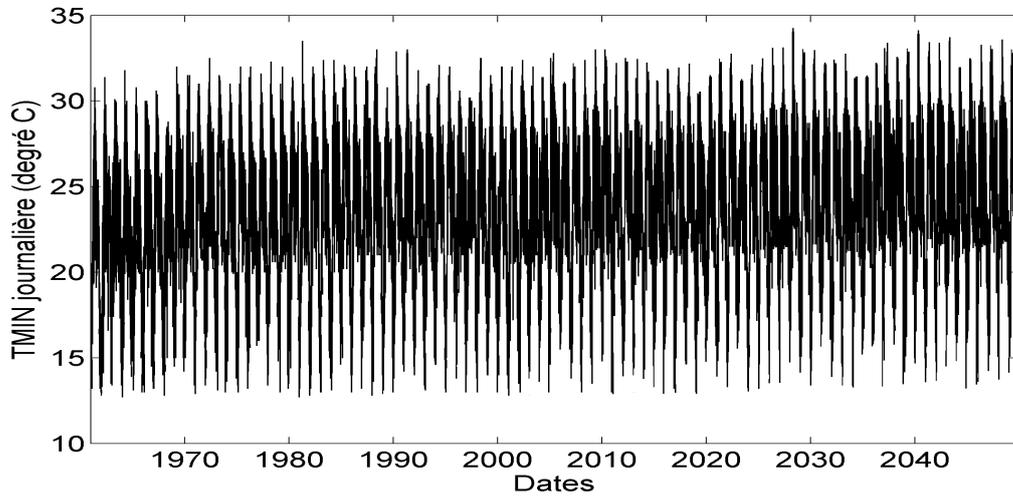


FIGURE A.63: Température minimale journalière (degré C), Tillabéry, scénario humide

---

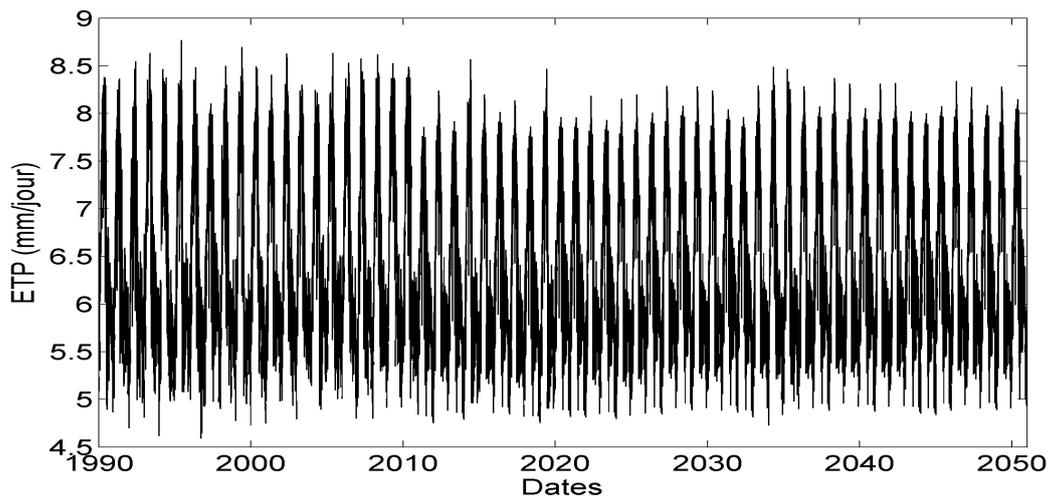


FIGURE A.64: Évapotranspiration (mm/jour), Maradi, scénario humide

---

## A.9 Zinder

### A.9.1 Zinder, scénario sec

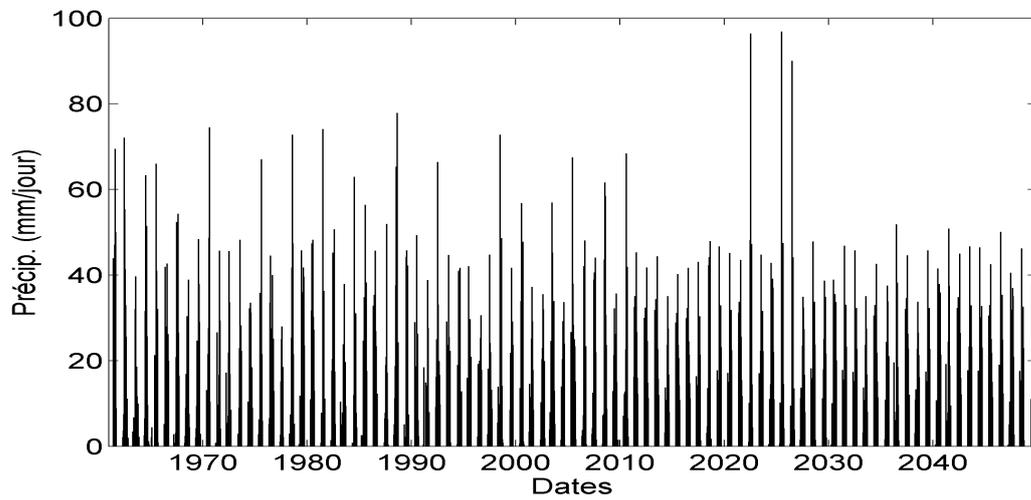


FIGURE A.65: Précipitation moyenne (mm/jour), Zinder, scénario sec

---

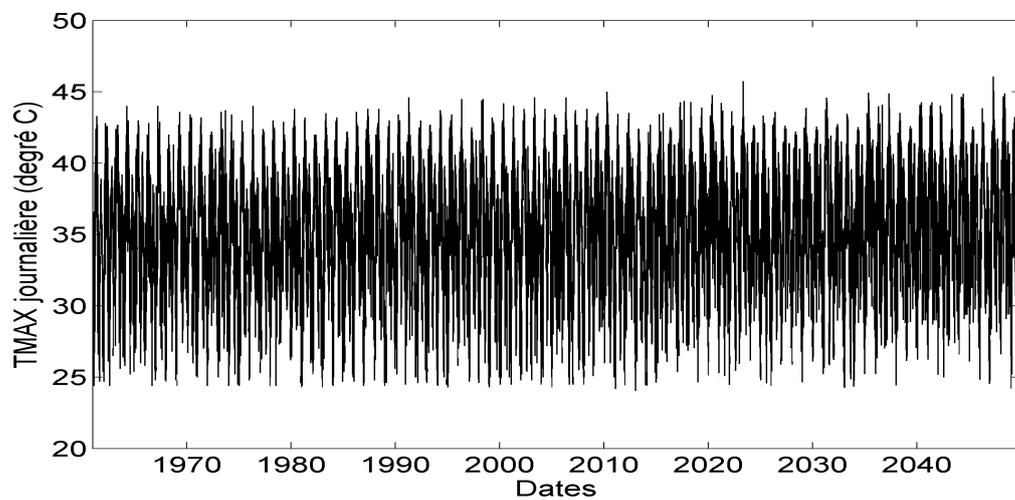


FIGURE A.66: Température maximale journalière (degré C), Zinder, scénario sec

---

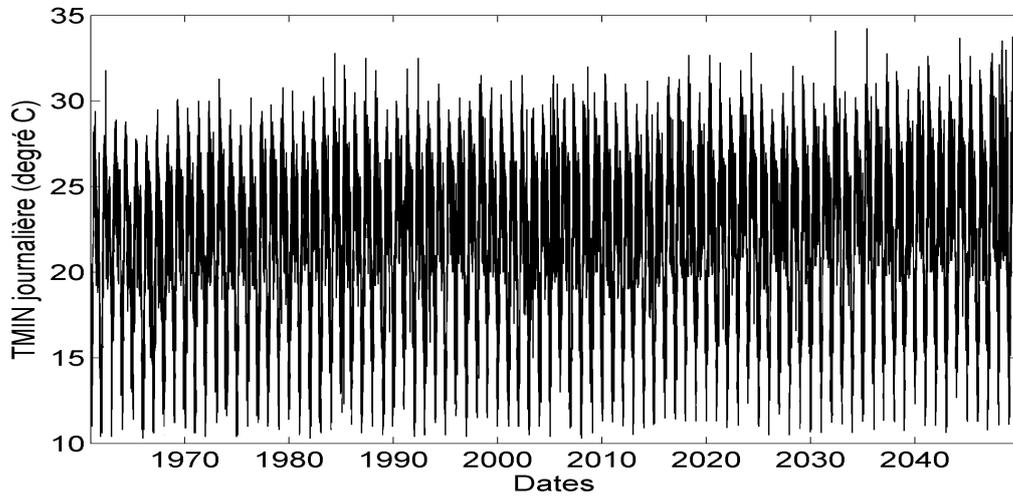


FIGURE A.67: Température minimale journalière (degré C), Zinder, scénario sec

---

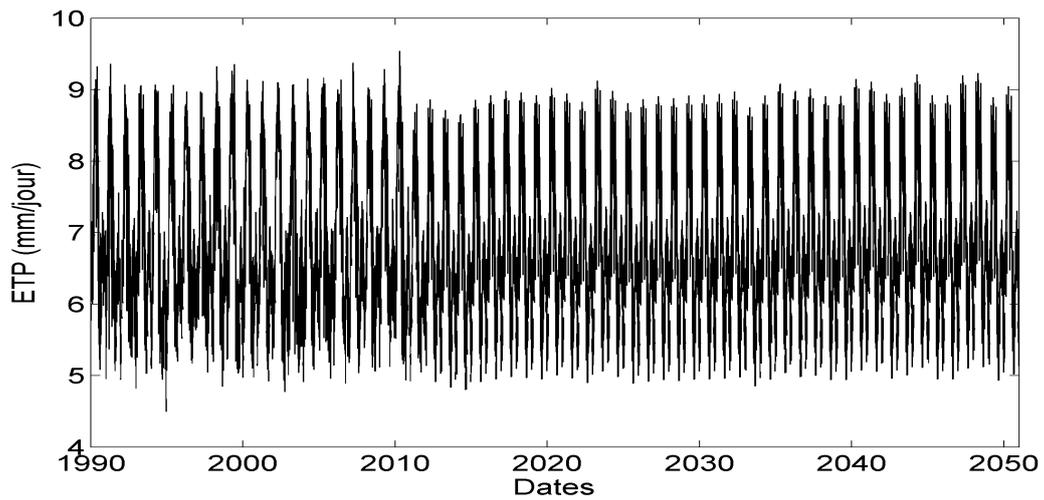


FIGURE A.68: Évapotranspiration (mm/jour), Zinder, scénario sec

---

### A.9.2 Zinder, scénario humide

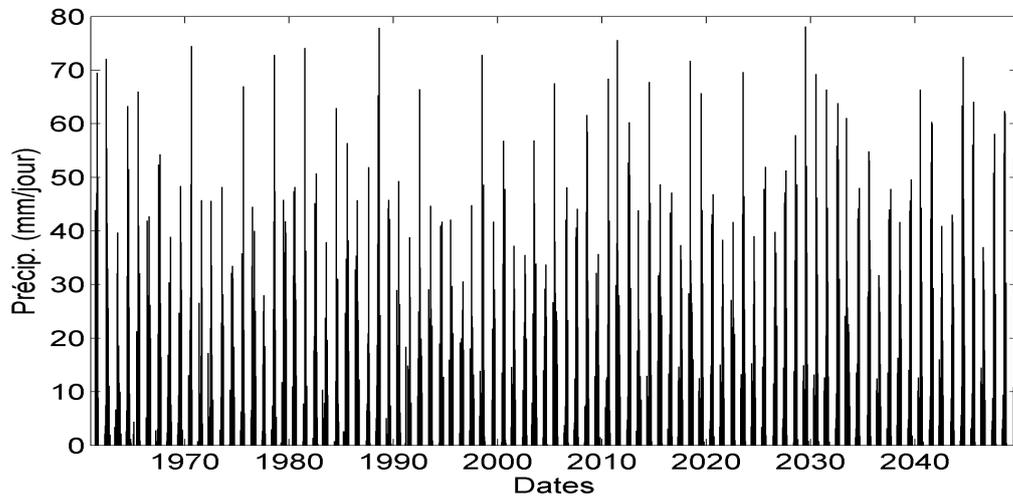


FIGURE A.69: Précipitation moyenne (mm/jour), Zinder, scénario humide

---

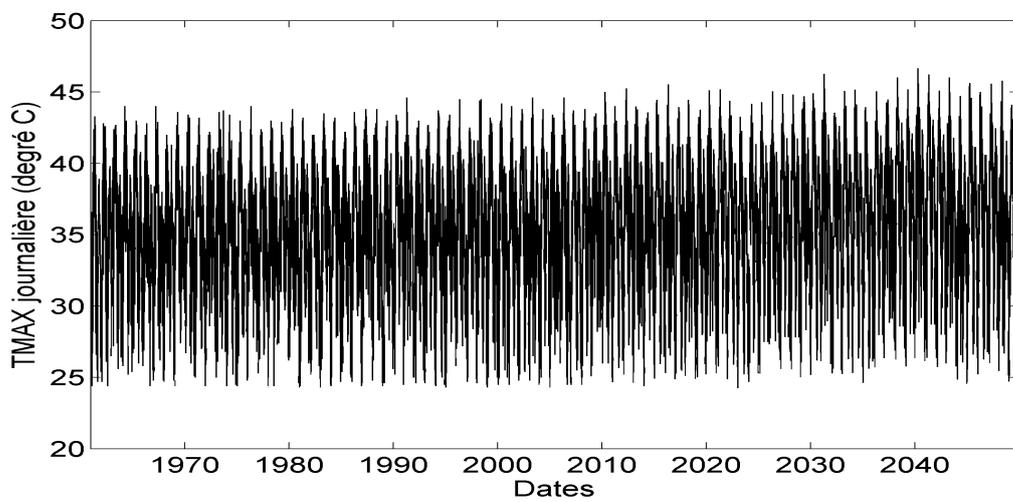


FIGURE A.70: Température maximale journalière (degré C), Zinder, scénario humide

---

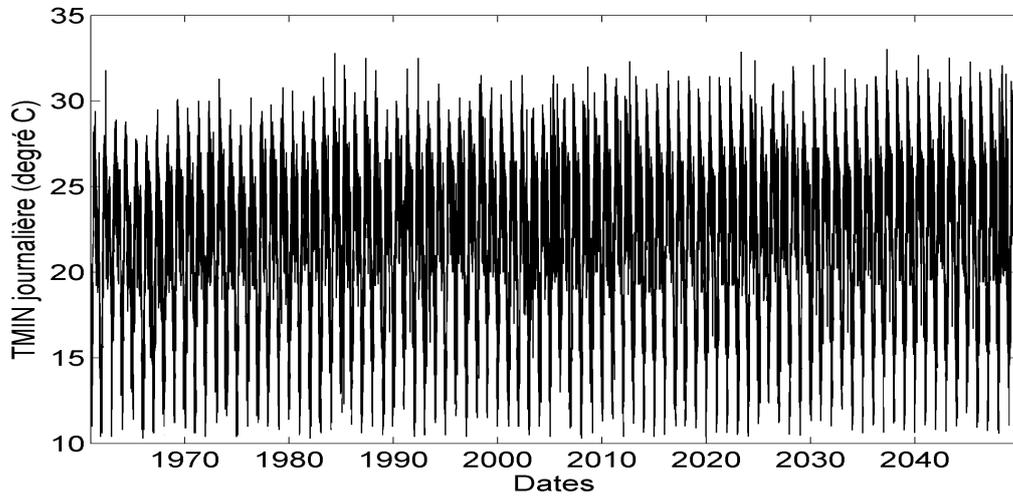


FIGURE A.71: Température minimale journalière (degré C), Zinder, scénario humide

---

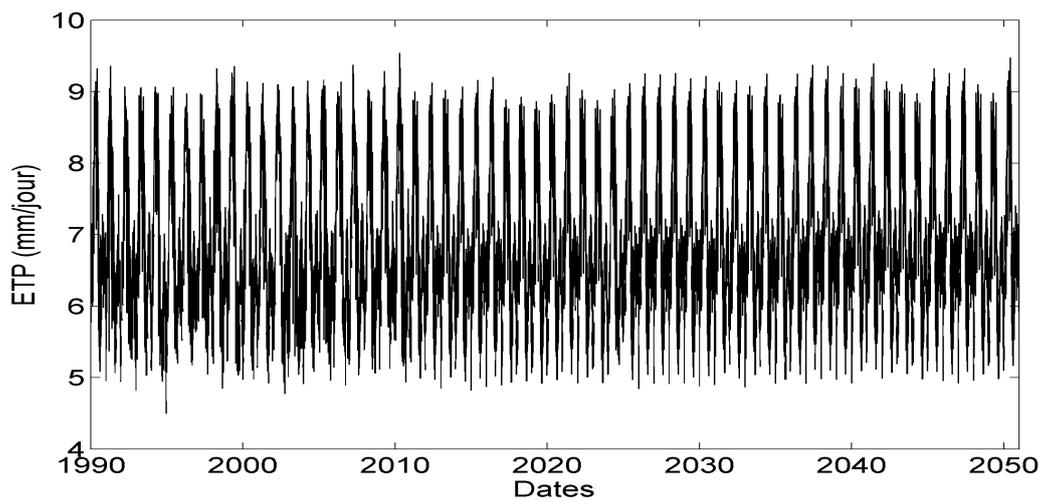


FIGURE A.72: Évapotranspiration (mm/jour), Maradi, scénario humide

---