

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة النقل
MINISTERE DES TRANSPORTS
معهد رصد مياه الأمطار للتكوين والأبحاث
INSTITUT HYDROMETEOROLOGIQUE DE FORMATION ET DE RECHERCHES
I. H. F. R - ORAN



*Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme
D'Ingénieur d'état de la Météorologie*

Thème :

Modélisation climatique sur le Bénin

Présenté Par :

M. Abdel-Aziz FADONUGBO

Encadré par :

M. Salah SAHABI-ABED

Soutenu le : Le 29 Juin 2016

Devant le jury :

Président : Dr. Belaid ABDERRAHMANI

**Examineurs : M. Ahmed BOUZID
M. Hakim ABANE**

Promotion: 2011-2016

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

-  *La mémoire de ma très chère mère et père qui toute au long de leur courte vie n'avaient jamais ménagé aucun effort pour mon éducation, ma réussite dans les études et qui n'avaient jamais cessé de m'épauler et de m'encourager jusqu'à leurs derniers jours sur cette terre. Pour la plus part des gens "vouloir c'est pouvoir", mais ces deux merveilleuses personnes qui étaient ma mère et mon père m'ont appris que "pouvoir c'est vouloir". Aujourd'hui je le suis et je serai éternellement très reconnaissant.*
-  *Mes frères et sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, d'inspiration, de courage et de générosité.*
-  *Mes professeurs de l'IHFR pour tous les efforts qu'ils ont consentis pour l'aboutissement de ma formation.*
-  *Tous les frères et sœurs de L'IHFR, pour toutes leurs bontés et leurs encouragements.*

Remerciements

A cœur vaillant rien n'est impossible ; A conscience tranquille tout est accessible.

Nulle œuvre n'est exaltante que celle réalisée avec le soutien moral et financier des personnes qui nous sont proches.

Je tiens à remercier et à exprimer ma plus profonde reconnaissance à :

- ✓ *Mon professeur de mémoire Mr Salah SAHABI-ABED Directeur du Centre Climatologique National à Office National de la Météorologie d'Algérie, pour tout son encouragement, sa patience et son soutien ;*
- ✓ *Mr Sid-Ahmed FELLAHI le Directeurs de l'IHFR et tous mes professeurs de L'IHFR, ainsi que le personelles administratives en particulier au sous-directeur Mr Aban Hakim, pour leur soutien*
- ✓ *Mes frères et sœurs : Rodrigue, Arouna, Silifath, Falilath, Rafiath, Fassassi, Alwasaou, Moussiliou, Moinath, Rodolpho et Pichérine qui m'ont assisté dans ces moments difficiles et m'ont servi d'exemple ;*
- ✓ *Mes Oncles : Osseni Rachidi, Daddi Latifou, Osseni Ismaël, Tidjani Souradji, Tidjani Inoussa, Bonifasse (paix à son âme), et mes tantes : Tidjani Zelia, Tidjani Aliman, qui m'ont soutenu moralement et financièrement ;*
- ✓ *Mes frères et sœurs, ami(e)s et compatriotes : Houndéladji Stéphanie Carine, Mr Armel, Martin, Dantonka Abdel Magide, Badamadji Viviane, et Traoré Ibrahima pour leurs soutiens et encouragement ;*
- ✓ *A toute ma famille d'accueil de l'IHFR je veux parler de la communauté des étudiants étrangers de l'IHFR, mes frères et mes sœurs qui ont été toujours là pour moi en cas de besoin toute au long de mon parcours ici à L'IHFR ;*
- ✓ *Mes camarades de lutte, Loupoupou Sara Joyce, Kiswendsida Hyacinthe, Alain Lounmouamou, Ngabol Freddie, Baikka, pour tous leurs soutiens et la solidarité dont ils ont fait preuve le long de notre formation ;*

Table des matières

Dédicaces

Remerciements

Résumé

Abstract

Liste des acronymes

Introduction.....7

Chapitre I : contexte et objectif de l'étude.....10

I.1. Contexte général de l'évolution du climat au Bénin.....10

I.1.1. les conditions atmosphériques générales.....10

I.1.2. les nuances climatiques.....11

I.2. Présentation du projet.....13

I.3. Objectif de l'étude.....15

Chapitre II Portrait du pays.....16

II.1. Traits physiques et politiques.....16

II.1.1. Trait physiques.....16

II.1.2. Trais politiques.....18

II.2. Traits démographiques et économiques.....19

II.2.1. Trait démographiques.....19

II.2.2. Traits économiques.....20

II.3. Changements climatiques au Bénin.....22

II.3.1. Le climat d'hier (1961-2000).....22

II.3.1.1. Variation des précipitations.....23

II.3.1.2. Variation des températures.....24

II.3.2 le climat future.....	27
II.3.2.1. Variation des précipitations.....	27
II.3.2.2. Variation des températures.....	28
II.3.3. Etat de l'art sur les Impacts des changements climatiques au Bénin.....	28
II.3.3.1. L'eau.....	28
II.3.3.2. L'agriculture.....	29
II.3.3.3. L'énergie.....	29
II.3.3.4. La santé.....	29
II.3.3.5. Les écosystèmes.....	30
II.3.3.6. Les zones côtières.....	30
Chapitre III : Notions fondamentales.....	31
III.1. Les anciens scénarios d'émissions anthropiques.....	31
III.1.1. Les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre.....	31
III.1.2. Le choix du scénario.....	39
III.2. Les nouveaux scénarios d'émission anthropique.....	40
III.3. Système, forçages et variabilités climatiques.....	45
III.3.1. Le système climatique.....	45
III.3.2. Forçages du système climatique.....	46
III.3.3. Variabilité du système climatique.....	48
III.4. La modélisation climatique-état de l'art.....	49
III.5. Les méthodes de descente d'échelle « Downscaling ».....	54
III.5.1. L'approche dynamique de descente d'échelle.....	57
III.5.2. L'approche statistique de descente d'échelle.....	57

Chapitre IV : Méthodologie et Données.....	59
IV.1. Approches suivies.....	59
IV.2. Descriptions des données utilisées dans le cadre de ce travail.....	60
IV.2.1. Les données d'observation météorologiques des stations du Bénin.....	60
IV.2.2. les Données relatives au modèle de circulation générale MCG utilisés.....	60
IV.2.3. Les données relatives au modèle climatique régionale MCR sous les scénarios RCPs utilisés.....	61
IV.3. Traitement des données.....	62
IV.4. Formalisme de présentation des résultats.....	63
Chapitre V : Outils et Résultats issus de la modélisation.....	65
V.1. Le test de Mann-Kendall.....	65
V.1.1. Principe du test de Mann-Kendall.....	65
V.2. L'outil de désagrégation statistique.....	66
V.3. Le logiciel SDSM « Statistical Downscaling Model ».....	68
V.4. Réduction d'échelle ou Downscaling par le logiciel SDSM5.2.....	69
Chapitre VI : Analyse des résultats des projections climatiques.....	72
VI.1. Analyse des résultats issus du test de Mann-Kendall sur les données du scénario RCP4.5.....	72
VI.1.1-Zone I : zone soudanienne (semi-aride).....	72
VI.1.2. Zone 2 : zone soudano guinéenne (subhumide sèche).....	81
VI.1.3 Zone 3 : zone guinéenne (subhumide humide).....	90
VI.2. Analyse comparative des résultats issus de la descente d'échelle, les sorties brutes du modèle et des données d'observations dans chaque zone	99
VI.2.1. Zone1 : Station de KANDI au nord du Bénin.....	99

VI.2.2. Zone2 : Station de SAVE au centre du Bénin.....	103
VI.2.3. Zone3 : Station de COTONOU au sud du Bénin.....	107
Conclusion générale.....	111
Référence.....	113
Mémoires.....	115
Sites internet.....	115
Liste des figures.....	116
Liste de tableaux.....	121
Annexes.....	123
Annexe 1 : quelques projection des GIEC lors AR5.....	123
Annexe 2 : quelques éléments de Downscaling	127

Résumé

Les scientifiques exerçant dans le domaine du climat sont tous unanimes sur la question de l'existence d'un réchauffement climatique perceptible depuis des décennies. Les études et les rapports élaborés par le groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ne cessent de le confirmer. Dans les derniers rapports sur les impacts des changements climatiques, L'Afrique se trouve parmi les continents les plus vulnérables. En particulier pour le Bénin, les impacts de ces changements se font ressentir sur tous l'écosystème du pays, dans toutes les activités économiques, principalement dans le secteur agricole qui est l'un de piliers de l'économie béninoise.

Ce projet de fin d'études consiste d'une part à faire des projections climatiques à l'horizon 2100 à travers les données issues du modèle climatique régional CanRCM4, simulées sous le scénario RCP4.5 et utilisé par le GIEC lors de son cinquième rapport d'évaluation AR5 dans l'étude de l'impact des changements climatiques, d'autre part à réaliser une descente d'échelle statistique par le modèle SDSM5.2, qui intègre des données d'observation et des données du nouveau scénario moyen d'émission anthropique RCP4.5 (stabilisation sans dépassement), issues des travaux de simulation du GIEC, par le modèle global CanESM2. Cette descente d'échelle statistique ou le downscaling en anglais permet de réajuster les valeurs simulées de quelques paramètres climatiques en calant les modèles sur la phase historique par rapport aux données observées en vue d'utiliser les simulations (projections) dans les études d'impacts du changement climatique sur les différents secteurs d'activités du Bénin (économiques, agronomiques, ressources en eau,...).

Most-clés : Modélisation climatique, changement climatique, Bénin, modèle de descente d'échelle statistique.

Abstract

All scientists working on the climate field all over the world since last decades are unanimous regarding the existence of the climate change and global warming. The last reports on climate change impacts, mentioned that Africa would be the most vulnerable continent. Especially for Benin, the impacts of these changes are already perceptible on the entire ecosystem of the country and in all economic activities, mainly in the agricultural sector, which is one of the pillars of the Beninese economy.

In this study we will present first, some climate projections at the 2100 horizon through some data obtained from the regional climate model “CanRCM4” simulated under the RCP4.5 scenario used by the IPCC in its fifth assessment report (AR5) aiming to evaluate the impact of climate change globally. On the other hand, a statistical downscaling was conducted by SDSM5.2 model, which integrates observed and simulated data through the new anthropogenic emissions medium scenario RCP4.5 (stabilization without overshoot) used by IPCC. The statistical downscaling approach used here allowed us to calibrate the modeled projected values of some climate parameters, in order to be used in the future on climate change impacts studies in different sectors of Benin’s activities (economic, agronomic, water resources...).

Keywords: climate modeling, climate change, Benin, statistical downscaling model.

Liste des acronymes

ACP: Groupe des Etats d'Afrique, des Caraïbes et du Pacifique

AGCM: Atmospheric Global Circulation Model

AR4: Quatrième Rapport d'Evaluation

AR5: Cinquième Rapport d'Evaluation

ASD: Automated Statistical Downscaling

BTP : Bâtiment et Travaux Publics

CanESM2 : Modèle du système terrestre de 2^e génération

CanRCM4 : modèle régional canadien du climat

CCCma: Centre Canadien de la Modélisation et de l'Analyse Climatique

CEAO: Communauté Economique de l'Afrique de l'Ouest

CEDEAO: Communauté Economique des Etats de l'Afrique de l'Ouest

CEE: Communauté Economique Européenne

CMIP: Coupled Model Intercomparison Project

DNM : Direction de la météorologie National

F.I.T: Front Intertropical

FAR: First Assessment Report

GCM : Global Circulation Model

GES : gaz à effet de serre

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat

IDH : indice de développement humain

INSAE : Institut National de la statistique et de l'analyse économique du Bénin

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

LAM : Limited Area Model

LARS-WR: Long Ashton Research Station-Weather Generator

MCCG4 : la quatrième génération du modèle couplé climatique global

MCGAO : modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan

MCR : Modèle Climatique Régional

MCS : Modèles climatiques simples

MSTCI : Modèles du système Terre de complexité intermédiaire

NAO: North Atlantic Oscillation

OCDE : Organisation de coopération et de développement économiques

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

ONU: Organisation des Nation Unies

PIB : Produit intérieur brut

PMRC : Programme mondial de recherche sur le climat

PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement

RCD : projection de l'information climatologique à l'échelle régionale

RCPs : Representative Concentration Pathways

SAR: Second Assessment Report

SDSM : Statistical Downscaling Model (modèle de réduction d'échelle statistique)

SRES : Special Report on Emissions Scenarios

TAR: Third Assessment Report

UA: Union Africaine

UEMOA : Union Economique et Monétaire Ouest Africaine

USD : Dollar des États-Unis

Introduction

De toute l'histoire du climat de notre planète, une grande partie a été la succession des périodes de changement climatique dues à des processus naturels bien avant que l'activité humaine pourrait y avoir joué un rôle. Ainsi la terre a vacillé entre les époques glaciales à inter-glaciales chaudes au cours de quelques dernière millions d'années. Depuis le milieu de XXe siècle l'activité humaine est devenu la principale cause des récents changements climatiques. Le réchauffement marqué de la planète observé actuellement a été à l'unanimité attribué aux effets de l'activité humaine sur le climat. Ceci étant, de nombreuses conférences se tiennent pour trouver les solutions adéquates afin de permettre à l'humanité de pouvoir s'adapter à cette nouvelle contrainte climatique sur les paramètres météorologiques.

Le réchauffement du système climatique est sans équivoque et depuis les années 1950, beaucoup de changements observés sont sans précédent depuis des décennies voire des millénaires. L'atmosphère et l'océan se sont réchauffés, la couverture de neige et de glace a diminué, le niveau des mers s'est élevé et les concentrations des gaz à effet de serre ont augmenté (GIEC, 2014).

L'augmentation des températures moyennes à la surface du globe pourrait atteindre 4.8°C à l'horizon 2100 par rapport à la période 1986-2005, dans le scénario le plus pessimiste, c'est-à-dire si les émissions de GES continuent à leur rythme actuel. Les autres scénarios estiment cette hausse entre 0.3°C et 3.1°C ; sans oublier qu'une hausse de 0.85°C en moyenne a été enregistrée entre 1880 et 2012. Au cours du sommet du Copenhague en 2009, les Etats se sont engagés à mettre en place des politiques de manière à éviter un réchauffement de plus de 2°C en 2050 par rapport aux niveaux préindustriels.

Le tableau qui suit présente la projection de température moyenne de la terre à l'horizon 2100 simulé par le GIEC à travers les quatre nouveaux scénarii.

	Scénario	2046–2065		2081–2100	
		moyenne	plage probable ^c	moyenne	plage probable ^d
Évolution de la température moyenne à la surface du globe (°C) ^a	RCP2,6	1,0	0,4 à 1,6	1,0	0,3 à 1,7
	RCP4,5	1,4	0,9 à 2,0	1,8	1,1 à 2,6
	RCP6,0	1,3	0,8 à 1,8	2,2	1,4 à 3,1
	RCP8,5	2,0	1,4 à 2,6	3,7	2,6 à 4,8

Tableau 1 : Projections des hausses de températures de la planète à l'horizon 2100. (Source : GIEC)

L'impact du changement climatique sur les paramètres et les phénomènes météorologiques extrêmes représente des risques considérables pour l'ensemble de population et de l'écosystème, vois même les secteurs d'activité économique de la république du Bénin. Le décalage des dates de campagne agricole dans le centre et le nord du Bénin, intensification des inondations dans le sud du pays, la baisse de production de certaines espèces agricoles dans le pays ces dernières années, prouve que l'adaptation aux nouvelles contraintes climatiques n'est plus une option mais une nécessité.

Pour permettre à nos décideurs politiques d'élaborer des stratégies d'adaptation solides, il est important de faire les études de projection climatique très poussées à travers des modèles puissants permettant d'évaluer l'évolution climatique à long terme à l'échelle locale et évaluer ses impacts sur les différents secteurs (économiques, écologiques, sociales,...). Dans cette étude intitulée « la modélisation climatique sur les Bénin », on utilisera les données projetées du climat par le modèle régional climatique canadien CanRCM4 sous le scénario RCP4.5 sur les différentes zones climatiques prédéfinies du Bénin (mises en évidence dans des études antérieures). On évaluera ainsi les tendances des paramètres climatiques pertinents comme la température maximale (Tmax), température minimale (Tmin) et les précipitations (RR) sur deux différentes périodes distinctes en comparaison avec la période standard de référence de l'OMM (1961-1990). Les deux périodes choisies matérialisent respectivement le mi-siècle (2021-2050) et la fin du siècle (2071-2100). De plus, à partir des données des stations météorologiques du Bénin et des données issues du modèle globale canadien du climat CanESM2 sous le même scénario RCP4.5 on fera un downscaling statistique (une descente d'échelle) à l'aide de l'outil

SDSM5.2 sur les différentes régions en vue d'évaluer les impacts potentiels du changement climatique actuels et dans le futur à des échelles spatiales plus fines.

Ce projet de fin d'étude est divisé en six chapitres. Le contexte et l'objectif de l'étude est bien illustré dans le premier chapitre ; le seconde chapitre par contre met l'accent sur le portrait du pays (la république du Bénin). Quand au troisième chapitre, il passe en revue les notions fondamentales de l'évolution des connaissances relatives aux changements climatiques, ainsi que sur l'évolution des modèles de modélisation climatique, la description des nouveaux scénarii d'émission anthropique et les méthodes de descente d'échelle « downscaling ». Le quatrième et les cinquièmes chapitres illustrent les méthodologies de travail, le traitement des données et les outils utilisés dans notre étude. Le sixième chapitre présente quant à lui les résultats obtenus de l'étude des tendances effectuée par le test de Mann-Kendall sur les données de simulation issues du modèle CanRCM4 sous le scénario RCP4.5 et les résultats issus de la descente d'échelle par l'outil statistique SDSM5.2 appliqué aux données sous le même scénario, ainsi que l'interprétation de ces résultats.

Chapitre I : contexte et objectif de l'étude

I.1. Contexte général de l'évolution du climat au Bénin

I.1.1. les conditions atmosphériques générales

De sa situation en latitude (entre 6°30' et 12°30' de latitude nord), le Bénin appartient au domaine des climats chauds et humides de la zone intertropicale.

Pour la zone intertropicale où se trouve le Bénin, le soleil passe apparemment deux fois par an au zénith, mais ses rayons ne sont jamais très éloignés de la verticale, c'est pourquoi les températures sont constamment élevées avec une moyenne de 25°C pour l'ensemble du pays. D'avril à novembre au sud et de juin à octobre au nord, souffle un vent humide venant de l'océan : c'est **l'alizé maritime** ou la **mousson**. De novembre à début mai dans le nord et de décembre à mars dans le sud souffle un vent sec venant du Sahara : c'est **l'alizé continental**. Ces deux masses d'air (**mousson** et **alizé continental**) se repoussent alternativement vers le nord et vers le sud. Leur zone de contact est appelée **Front Intertropical (F.I.T.)** ou Front de mousson dans notre région. Ce front est le siège de toutes les perturbations atmosphériques qui provoquent des précipitations. Compte tenu de l'allongement du Bénin en latitude, la saison pluvieuse s'établit progressivement du sud vers le nord. De même, la saison sèche débute plus tôt et dure plus longtemps au nord qu'au sud. En avril, des précipitations courtes et touffues (orages) se manifestent sur la côte. Ces précipitations orageuses progressent vers le nord tandis que les pluies deviennent continues dans le sud. En juillet, l'air maritime humide envahit tout le Bénin et est responsable des pluies continues. En août, **la mousson**, qui se stabilise, provoque moins de pluies dans le sud, bien que le ciel reste toujours nuageux : c'est la petite saison sèche, relativement fraîche. Dans le nord au contraire les précipitations atteignent leur maximum pendant cette période. Au mois d'octobre, les précipitations sont réduites à des orages dans le nord et le centre, tandis qu'au sud elles redeviennent abondantes ; c'est la petite saison humide, plus courte que la première. De novembre à mai dans le nord et de décembre à mars dans le sud s'installe la saison sèche. L'air maritime humide se retire et l'air continental sec envahit progressivement tout le pays. De décembre à février, cet air est particulièrement desséchant et peut se manifester quelques jours sur le littoral : c'est **l'harmattan**.

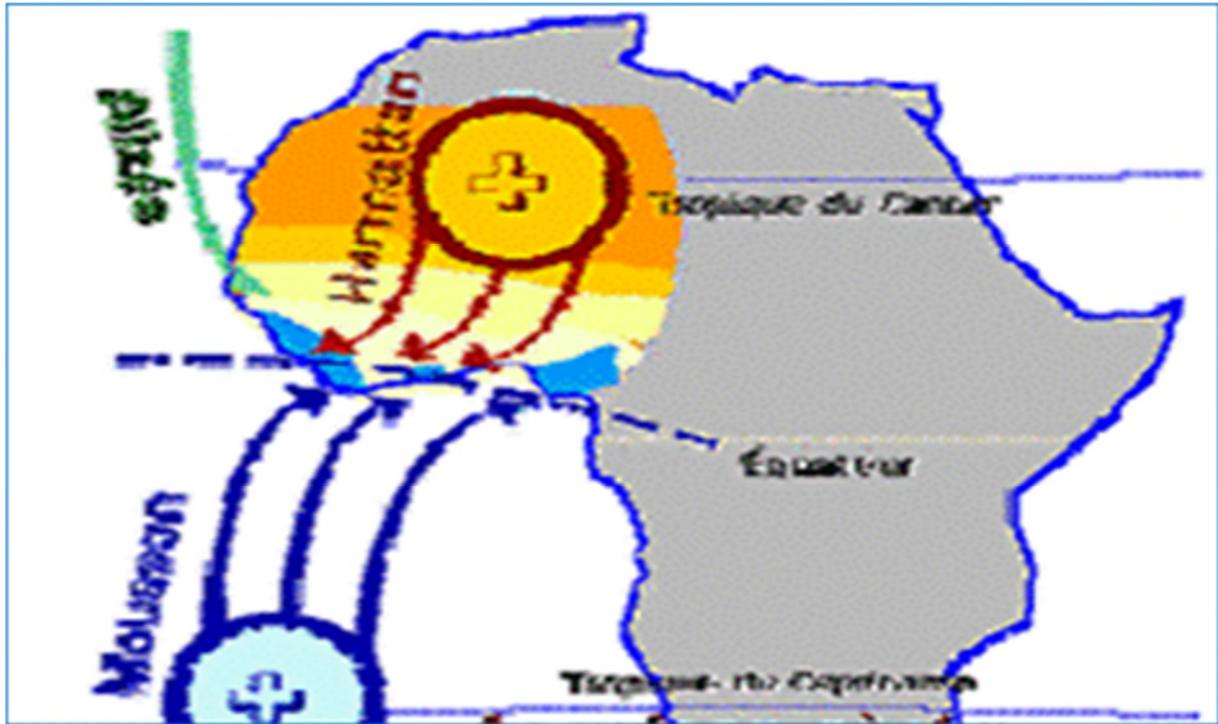


Figure I.1: Le flux de mousson africaine et harmattan. (Source, Nathalie Van Vyve, Travail de fin d'études 2005-2006)

I.1.2. les nuances climatiques

➤ Le climat bénénien (subéquatorial)

Ce climat règne au sud jusqu'à la latitude de Savè. Les températures sont élevées mais jamais excessives. Les maxima se situent en mars (26° C à Cotonou) et les minima en août (24° C). L'amplitude thermique annuelle (température moyenne du mois le plus chaud moins température moyenne du mois le moins chaud) est faible, inférieure à 5°C. Mais l'amplitude thermique journalière (différence entre les deux températures extrêmes enregistrées dans la journée est supérieure à 10°C. L'humidité relative est élevée (70 à 90 %) à cause de la proximité de l'océan. C'est un climat à quatre saisons :

- ✓ une grande saison de pluies d'avril à juillet,
- ✓ une petite saison sèche d'août à septembre,
- ✓ une petite saison pluvieuse d'octobre à novembre,
- ✓ une grande saison sèche de décembre à mars.

Le sud du pays connaît un climat subéquatorial bénénien, malgré sa position en latitude, parce que l'orientation de la côte par rapport aux vents humides et l'existence de courants marins froids le long du littoral font qu'il pleut moins dans cette région qu'en zone équatoriale typique.

➤ **Le climat des régions soudanien**

Il comprend deux nuances :

- Le climat sud soudanien : Il couvre la région au nord du domaine subéquatorial jusqu'à la latitude de Bembèrèkè. Les passages du soleil au zénith sont déjà plus rapprochés et la petite saison sèche est à peine sensible. Les températures sont plus élevées avec une amplitude thermique journalière pouvant atteindre 10°C, des minimums en août et des maximums en mars. Il y a deux saisons.
- Le climat nord soudanien : Les amplitudes thermiques journalières sont plus fortes, surtout pendant l'harmattan. L'année se partage en deux saisons bien tranchées (une saison sèche de novembre à début mai et une saison pluvieuse de mai à octobre).

En effet, dans cette région, le soleil ne passe qu'une fois au zénith. La mousson y arrive tardivement et s'en retire très tôt. Par contre, l'harmattan, et plus généralement l'air continental sec, y soufflent de novembre à mai apportant de fortes températures et la sécheresse, lesquelles sont plus marquées au-delà de la latitude de Kandi. Les minimums moyens thermiques se situent en août.

➤ **Le climat atacorien**

Il couvre le nord-ouest du Bénin (chaîne de l'Atakora). Les températures sont plus fraîches à cause de l'altitude, les orages sont plus en plus fréquents. Les moussons et aux influences orographiques, situent cette région parmi les plus arrosées du Bénin. Il pleut pratiquement d'avril à octobre à Natitingou qui enregistre plus de 1300mm. A Boukoumbé on enregistre aussi 1350mm par an.

I.2. Présentation du projet

Les besoins d'information sur l'évolution du climat à l'échelle régionale et locale constituent un grand sujet de débat. Cette information est cruciale pour évaluer les effets que ça soit positifs ou négatifs des changements climatiques sur les systèmes humains et naturels et pour mettre au point d'excellentes stratégies nationales d'adaptation et d'atténuation à ce sujet. Les utilisateurs finaux et les décideurs demandent toujours qu'on leur fournisse des projections régionales et locales fiables sur lesquelles ils appuient leurs choix. Jusqu'à présent, la plupart des données régionales proviennent de modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan (MCGAO) exploités grâce au Programme Mondial de Recherche sur le Climat (PMRC) depuis 30 ans (Busalacchi et Asrar, présent numéro du *Bulletin de l'OMM*). Ces modèles sont les outils les plus utiles pour comprendre les processus en jeu dans les réactions du système climatique aux forçages anthropiques, comme la hausse des concentrations de gaz à effet de serre, le changement d'affectation des terres et la modification de la charge en aérosols, les anomalies des saisons d'une région à une autre etc.. Ils ont aussi fourni des renseignements de première importance sur l'évolution du climat à l'échelle mondiale à sous-continentale (GIEC, 2014). Une meilleure représentation des processus qui se déroulent dans l'atmosphère et à la surface de la Terre ainsi que l'élargissement des capacités de calcul ont permis des améliorations certaines, notamment au cours de la dernière décennie, mais la plupart des modèles actuels offrent encore une résolution horizontale de quelques centaines de kilomètres (Meehl et al., 2007). Ils ne peuvent donc rendre compte des effets des forçages locaux (par exemple topographie complexe et caractéristiques de la surface) qui modulent le signal climatique aux échelles plus réduites.

En raison de leur faible pouvoir de résolution, les modèles globaux ne peuvent pas non plus décrire avec précision les phénomènes extrêmes, lesquels revêtent une importance primordiale pour les utilisateurs de l'information climatologique qui souhaitent évaluer les répercussions régionales et locales de la variabilité et de l'évolution du climat. Autrement dit, il existe un écart d'échelle spatiale entre les données climatologiques fournies par les Modèles de Circulation Générale couplés Atmosphère-Océan (MCGAO) et les renseignements nécessaires pour mesurer les impacts.

Diverses techniques de «régionalisation» ou de «réduction d'échelle» ont été mises au point afin d'affiner les informations fournies par les MCGAO et de combler cet écart sur le plan spatial (Giorgi et al. 2001). On a habituellement recours à deux grandes méthodes de réduction d'échelle, à savoir la méthode dynamique et la méthode statistique. Que ces outils soient dynamiques et statistiques, la projection de l'information climatologique à l'échelle régionale (RCD) constitue aujourd'hui une

méthode importante de recherche, de plus en plus utilisée pour étudier divers problèmes relatifs aux changements climatiques (Huntingford et Gash, 2005). La mise au point et l'utilisation des modèles RCD ont pris énormément d'ampleur au cours de la dernière décennie, comme l'atteste l'augmentation quasi exponentielle du nombre d'articles sur le sujet validés par les milieux scientifiques.

Toutefois on constate que ces modèles de la réduction d'échelle ne sont pas trop utilisés dans les cadres des études d'impacts climatiques régionales. Pour remédier à cela, le PMRC a mis sur pied l'Équipe spéciale sur la réduction d'échelle des prévisions climatologiques au niveau régional, dont les attributions sont les suivantes:

- Établir un cadre pour l'évaluation et l'amélioration éventuelle des techniques RCD servant à réduire l'échelle des projections climatiques globales;
- Favoriser la concertation des efforts déployés dans le monde pour améliorer l'information sur les changements climatiques régionaux fondée sur les techniques RCD avec plusieurs modèles haute résolution, information destinée aux travaux sur les impacts et l'adaptation et au cinquième Rapport d'évaluation du GIEC à titre d'exemple;
- Promouvoir les interactions et la communication entre les spécialistes des modèles climatiques globaux, les experts de la réduction d'échelle et les utilisateurs finaux afin de mieux soutenir les activités relatives aux impacts et à l'adaptation.

Ce mémoire de fin de formation s'inscrit dans le cadre de la valorisation des modèles climatiques de réduction d'échelle en particulier le SDSM «Statistical DownScaling Model ».

I.3. Objectif de l'étude

Limiter la hausse des températures à 2°C par rapport à l'ère préindustrielle, seuil au-delà duquel le réchauffement pourrait avoir des impacts dévastateurs, est encore possible (5^e rapport du GIEC sur l'évolution du climat). Pour ce fait, il est important d'avoir une idée bien précise sur l'évolution présente et future des climats régionaux de chaque pays.

Dans le cadre de ce projet d'études intitulé la modélisation climatique sur le Bénin, l'objectif est de simuler le climat du Bénin en évaluant son évolution dans le futur, sous les nouveaux scénarii d'émission anthropiques RCPs (Representative Concentration Pathways), afin de voir si leur augmentation se reflète à travers les tendances plus ou moins marquantes sur les variables climatiques analysées dans chaque zone climatique du Bénin. Les variables comme : Les précipitations (RR), la température maximale (TMAX) et la température minimale (TMIN), seront analysées à l'échelle annuelle et saisonnière sous le scénario RCP4.5. Pour rappel, ce scénario nouveau du GIEC figurait dans le 5^{ème} rapport d'évaluation et reste un scénario moyen équivalent à 650PPm.

A cet effet, l'utilisation de test de tendance de Mann-Kendall sur les données issues du modèle régional canadien du climat (CanRCM4) sur la période 1950-2100 permettra d'évaluer la signification et l'ampleur des tendances futures du climat

Une descente d'échelle statistique des données (prédicteurs) issues de la quatrième génération du modèle couplé climatique global (CanESM2/MCCG4) sur les périodes 1961-2005 et 2006-2100, a été réalisée à travers l'outil SDSM « Statistical DownScaling Model », dans le but de mieux évaluer le rapport entre les données observées et les sorties du modèle globale et de corriger ainsi l'évolution future du climat du Bénin sur la base de ces relations statistiques retrouvées.

Chapitre II Portrait du pays

II.1. Traits physiques et politiques

II.1.1. Trait physiques

La république du Bénin est située en Afrique de l'Ouest dans la zone intertropicale entre l'équateur et le tropique du Cancer précisément entre les parallèles 6°15' et 12°30' de latitude Nord et les méridiens 1° et 3°40' de longitude Est. Il s'étend de l'Océan Atlantique au fleuve Niger sur une longueur de 700 km; la largeur varie de 125 km (le long de la côte) à 325 km (à la latitude Tanguieta-Ségbana). D'une superficie de 114.763 km², le Bénin est limité au nord par le fleuve Niger qui le sépare de la République du Niger, au Nord-Ouest par le Burkina-Faso, à l'Ouest par le Togo, à l'Est par le Nigeria et au Sud par l'Océan Atlantique.



Figure II.1 : Carte du Bénin

Le relief du Bénin est peu accidenté et comprend :

- Une Région côtière, basse et sablonneuse limitée par des lagunes;
- Un Plateau d'argile ferrugineux ;
- Un Plateau silico-argileux, parsemé de quelques sous-bois;
- au Nord-Ouest, le Massif de l'Atacora (800 mètres);
- au Nord-est, les Plaines du Niger, silico-argileuses très fertiles.

Le réseau hydrographique se compose de nombreux cours d'eau qui prennent naissance, pour la plupart, dans le massif de l'Atacora et qui alimentent trois bassins : celui du Niger vers le Nord-Est, celui de la Volta vers le Nord-Ouest et le bassin côtier du Bénin vers le Sud. L'essentiel du bassin côtier est constitué de l'Ouémé, le plus grand fleuve du pays (510 km) et de ses affluents, dont les principaux sont l'Okpara et le Zou. Les cours d'eau du Bénin présentent un régime tropical avec une crue pendant la saison pluvieuse de juillet à octobre et l'étiage vers la fin du mois d'avril. La zone côtière est caractérisée par une succession de lacs et de lagunes séparés de la mer par un étroit cordon littoral. Elle s'étend sur 125 km de long, sur 4 km en moyenne de large.

De par sa situation dans la zone intertropicale, le Bénin présente un couvert végétal moins varié. On distingue deux types de végétation :

- la végétation dégradée du sud qui s'étend de la côte jusqu'à la latitude de Setto dans le Zou. Ici, on rencontre une mosaïque de cultures et de jachères avec par endroits des îlots de forêts, des savanes arborées arbustives. Les zones inondées portent des formations marécageuses comme des prairies aquatiques et des forêts marécageuses ainsi que des mangroves, là où prédominent les eaux saumâtres.
- la végétation des régions soudanaises au nord du bassin sédimentaire jusqu'à la latitude de Kandi avec une savane arborée dominée par le néré, le karité, le caécédrat, le baobab, le kapokier etc. Cette savane est coupée de réserves et de forêts classées. Sur les bordures soudano sahéliennes, on rencontre une savane arborée arbustive avec des épineux et des rôniers.

Le long des cours d'eau se développent également des forêts galeries et des plantations de teck, d'anacardiens, de manguiers etc.

II.1.2. Trais politiques

Indépendant depuis le 1^{er} août 1960 sous le nom du Dahomey, le pays a adopté son nom actuel en 1975. La crise politico-économique qu'a connu le Bénin en 1980 a débouché sur une profonde réforme politique et administrative caractérisée par l'adoption du libéralisme économique et d'une structure de type démocratique en 1990. Depuis le 11 Décembre 1990, le pays dispose d'une Constitution qui prévoit un régime présidentiel et une assemblée élue au suffrage universel. De plus, cette constitution garantit les droits de l'homme et la construction progressive d'un état de droit.

Sur le plan administratif, le Bénin compte 12 départements depuis le 15 janvier 1999, conformément à la loi N° 97-028 portant organisation de la République du Bénin. Ceux sont : l'Alibori, l'Atacora, l'Atlantique, le Borgou, les Collines, le Couffo, la Donga, le Littoral, le Mono, l'Ouémé, le Plateau, et le Zou. Ces départements sont divisés en 77 communes dont trois à statut particulier que sont : Cotonou, Porto-Novo et Parakou. Les 77 communes sont subdivisées en 546 arrondissements comportant 3743 villages et quartiers de ville, le village étant la plus petite unité administrative dans un arrondissement rural au même titre que le quartier de ville en milieu urbain. Un processus de décentralisation de l'administration, visant la prise en charge du développement communautaire par les communautés elles-mêmes est actuellement en cours.

Le Bénin est membre de plusieurs organisations internationales dont l'ONU, l'UA, la CEDEAO, la CEAO, la convention ACP/CEE et le Conseil de l'Entente.

II.2. Traits démographiques et économiques

II.2.1. Trait démographiques

La population évolue à un rythme soutenu. Le pays comptait 878 000 habitants en 1910 et 1 528 000 en 1950. Après l'indépendance, on en compte 2 106 000 en 1961, puis 3 331 210 en 1979 et 4 915 555 en 1992. Le recensement de 2002 dénombre 6 769 914 personnes. Selon une estimation de juillet 2015, le Bénin compte à cette date 10 448 647 habitants et se classe au 88^e rang mondial.

La population béninoise est jeune et à dominance féminine, majoritairement rurale, mais les citadins représentent déjà 44 % en 2015 et le taux annuel d'urbanisation était de 3,67 % entre 2010 et 2015.

Le Bénin est constitué d'un grand nombre d'ethnies, d'importance numérique variable et de répartition géographique inégale. Selon le recensement de 2002 (qui inclut les populations apparentées), les Fon sont les plus nombreux (39,2%), fortement localisés dans les départements du sud. Les Adja (15,2%) sont concentrés dans le Mono et le Couffo. Les Yoruba (12,3%) sont très présents dans les départements des Collines et du Plateau. Les Bariba (9,2%), les Peuls (7%), les Batammariba (6,1%) et les Dendi (2,5%) vivent plutôt dans le nord.

Le Bénin abritait plusieurs milliers de réfugiés, notamment en provenance du Togo, mais ce nombre a considérablement diminué depuis la mise en œuvre, avec

l'appui du HCR, d'une nouvelle stratégie d'intégration en 2013.

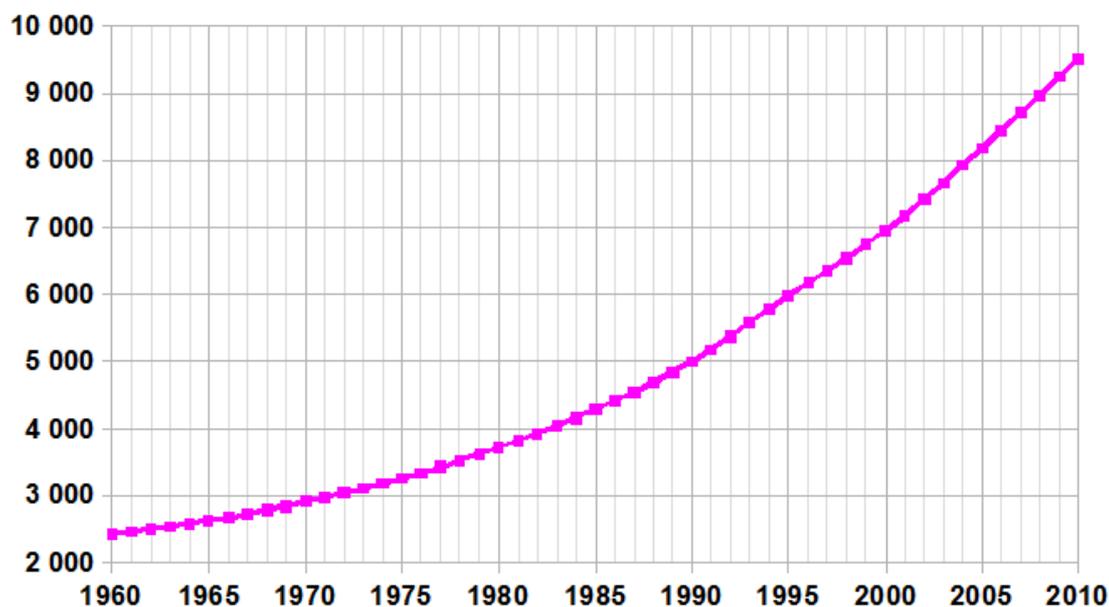


Figure II.2 : Évolution démographique (source : statistique de l'ONU)

II.2.2. Traits économiques

Le Bénin (10,1 millions d'habitants en 2012), appartient au groupe des pays les moins avancés, avec un PIB/hab. de 752 USD environs en 2012 (1583 \$ en parité de pouvoir d'achat).

Pays membre de la Zone franc, le Bénin représente un peu moins de 10% du PIB de l'UEMOA.

En termes d'indice de développement humain (IDH), il se classe au 166ème rang sur 187 du rapport PNUD 2012. Le Bénin est classé 151ème sur 185 du rapport « Doing business » 2014

L'économie du Bénin demeure celle d'une économie sous-développée.

La structure de l'économie béninoise est largement déterminée par sa position stratégique sur la côte ouest-africaine, à la porte du géant Nigérian : les opportunités de commerce formel ou informel avec le Nigéria et les opportunités de desserte des

pays enclavés de l'hinterland n'ont guère incité à la diversification de l'économie béninoise, et fait du Bénin un « État-entrepôt », selon l'expression du géographe John Igue.

En septembre 2013, l'inflation a été ramenée à 3,2% en variation moyenne (contre 6,2% en 2012), soit légèrement au-dessus du critère de convergence UEMOA de 3%.

Le secteur primaire représentait 32,2% du PIB en 2011. Alors que le pays dispose d'un potentiel agricole considérable, 20% seulement des terres arables sont exploitées. Les rendements agricoles présentent des marges considérables d'augmentation.

L'agriculture représente 37,1 % du PIB².

Le coton en particulier représentait 38,7 % des recettes d'exportations en 2013 (en hausse de 41,8% par rapport à 2012) malgré une forte régression due aux difficultés de gestion de la filière et à la baisse mondiale des cours. La culture de la noix de cajou s'est elle fortement développée entre 2010 et 2015 faisant du Bénin le 5e producteur mondial avec entre 120 000 et 180 000 tonnes de noix par an. La noix de cajou est aujourd'hui le deuxième produit agricole exporté après le coton, soit 7 % du PIB³. L'arachide fait également partie des principaux produits exportés.

Les trois plus grosses productions agricoles du Bénin en 2011 (cultivées pour la subsistance locale) étaient le manioc (3 645 000 tonnes), l'igname (2 734 000 tonnes) et le maïs (1 165 000 tonnes). Le Bénin produit aussi du cacao, des haricots, du riz, des ananas et d'autres tubercules divers.

Le secteur secondaire représentait 13,4% du PIB en 2011. Les principales industries sont la production de ciment et l'agro-alimentaire. Le BTP a également un poids élevé. Les industries manufacturières occupent une place très réduite

Le secteur tertiaire, directement et indirectement lié à l'activité portuaire, est particulièrement important. Il représente officiellement 54,4% du PIB 2011, mais plus en tenant compte du secteur informel. Il existe en effet une économie parallèle de grande ampleur, centrée sur les réexportations, notamment à destination du Nigeria.

Le secteur des services s'est développé rapidement, stimulé par la libéralisation économique et la réforme fiscale. L'adhésion à la zone de franc CFA offre une certaine

stabilité aussi bien que l'accès à l'appui économique français. 84% des exportations Béninoises sont issues de l'agriculture.

Les échanges commerciaux du Bénin ont fortement progressé en 2013, pour s'établir à 3,3 Mds€, soit une hausse de 48,7%. Les exportations ont atteint 478 M€ (+30,5%), contre 2,8 Mds€ (+52,4%) pour les importations. En conséquence la balance commerciale du Bénin, déficitaire depuis plus d'une dizaine d'année, s'est creusée davantage en 2013 pour atteindre un nouveau solde record de -2,3 Mds€. La hausse des importations s'explique pour l'essentiel par l'évolution des importations de céréales (riz) réexportées vers le Nigéria, et par l'explosion des importations de matériel de navigation maritime, induites par les recherches pétrolières. La hausse des exportations résulte en premier lieu de celles du coton et de cajou. On observe une hausse des échanges avec les États-Unis, l'Asie, et la CEDEAO, et un ralentissement des échanges avec l'Union Européenne.

Le Bénin vend ses produits principalement en Asie (Chine, Inde, Malaisie, Indonésie, Vietnam) et, en plus petite quantité, en France et aux Pays-Bas. Les États-Unis (29% en 2013 grâce au matériel pétrolier), la France et l'Inde (9% et 8,9%) sont les principales sources du Bénin pour ses importations. Le Bénin est également un membre de la communauté économique africaine occidentale CEAO

II.3. Le changement climatique au Bénin

II.3.1. Le climat d'hier (1961-2010)

Le climat du Bénin, tropical, chaud et humide, comporte de nombreuses nuances saisonnières et géographiques. Pendant la période 1971 – 2000, le nombre de jours de pluie est en moyenne de 140 jours dans la partie méridionale. Il n'est que de 80 dans l'extrême Nord du pays (Yabi & Afouda, 2011) . Durant la période 1961-2010, le nombre de jours de pluie a été en baisse constante tandis que les températures ont augmenté. Cette baisse est plus marquée au Nord qu'au Sud. L'analyse saisonnière fait apparaître des différences significatives durant la période antérieure à 1971. On observe ainsi un **raccourcissement de la petite saison des pluies** ce qui provoque un déficit pluviométrique. A l'exception du littoral, une **augmentation**

nette, de l'ordre de 1°C, des températures moyennes de l'air s'observent à partir de 1995.

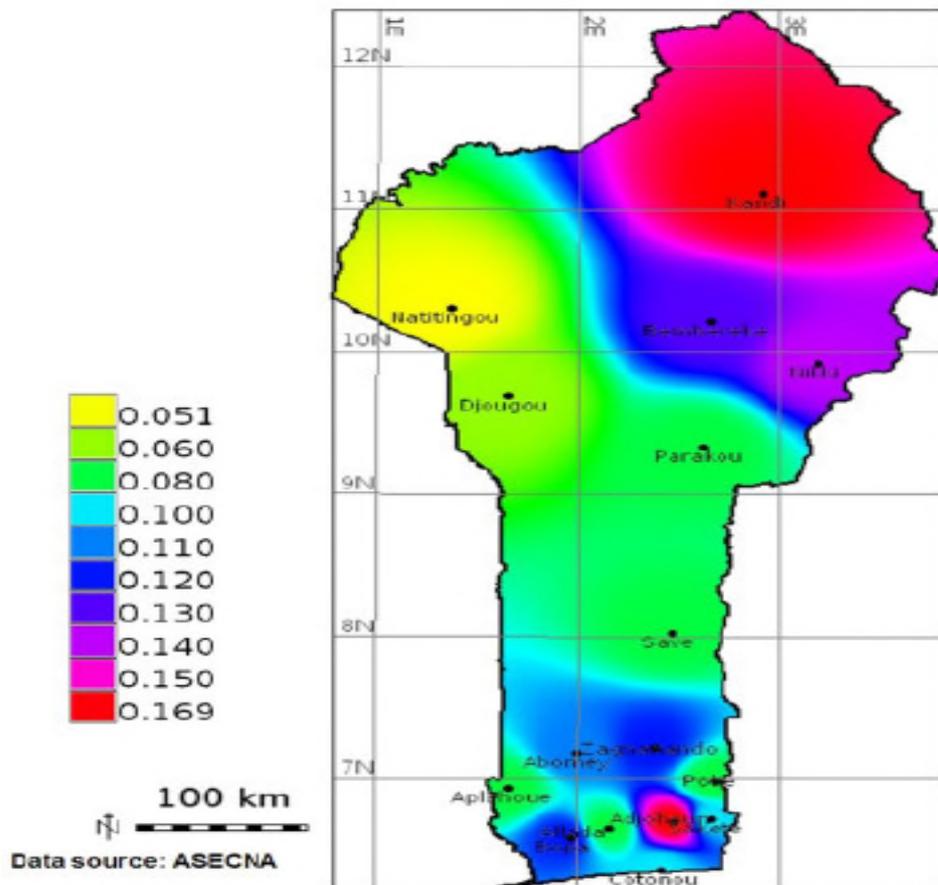


Figure II.3: fréquence d'année très sèche : faible pluviométrie (source : Yabi & Afouda, 2011)

NB : Les zones claires indiquent un nombre faible d'années où le déficit pluviométrique est supérieur ou égal à 30%. À l'inverse, une couleur foncée indique un faible nombre de ces années.

II.3.1.1. Variation des précipitations

L'examen de la variabilité interannuelle des pluies enregistrées au cours de la période 1961-2010, révèle que sur l'ensemble du pays, de courtes périodes déficitaires alternent avec quelques années de courtes périodes excédentaires. À l'échelle annuelle, **la baisse des précipitations est comprise entre 11 et 28%**. Alors que la pluviométrie annuelle était de 1215 mm/an de 1961 à 1975, elle n'est que de 1090mm/an après 1975.

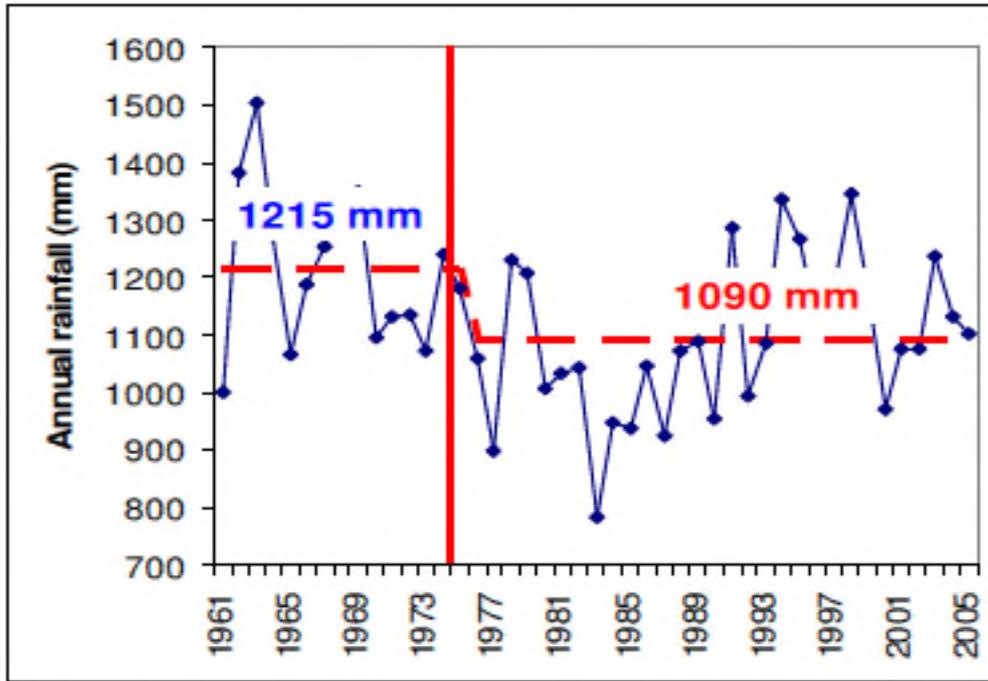


Figure II.4 : Pluviométrie annuelle du Bénin (en mm) 1961-2005 (source : Amoussou, 2010)

Au niveau de la **région septentrionale**, les années 1958, 1977 et 1983 accusent le plus fort déficit pluviométrique, marquant une sécheresse généralisée. Les années 1988 et 1998 enregistrent dans bon nombre de stations les plus forts excédents pluviométriques. Dans la **région méridionale**, les plus forts déficits ont été notés en 1977 et 1983 (années de sécheresse) tandis que les plus forts excédents pluviométriques remontent aux années 1988 et 1997. La baisse des précipitations est beaucoup plus perceptible dans la partie septentrionale que dans la partie méridionale, comme le montrent les relevés effectués à Natitingou et Kandi.

II.3.1.2. Variation des températures

Les écarts à la normale des moyennes de températures enregistrées au cours de la période 1951-2010 sont de l'ordre de -0,6 à + 0,8°C. Ils **ne permettent pas de dégager une tendance à la hausse ou à la baisse des températures**. Toutefois il faut noter qu'à l'exception du littoral, une augmentation nette, de l'ordre de 1°C, des températures moyennes de l'air s'observent à partir de 1995

Les **variations thermiques annuelles**, de l'ordre de 5 à 6°C dans la zone côtière, atteignent la fourchette de 9 à 10°C dans la région centrale. Au Nord, elles oscillent entre 12 et 14°C. Bien que ces amplitudes restent quasiment constantes durant la période 1981-2010, il faut noter que **dans le nord et le centre du pays**, les températures minimales moyennes ont connu une **hausse sensible** (de l'ordre de +0,5 à 1°C) dans le courant de la dernière décennie, et en particulier à partir de 2003 pour l'ensemble de ces régions.

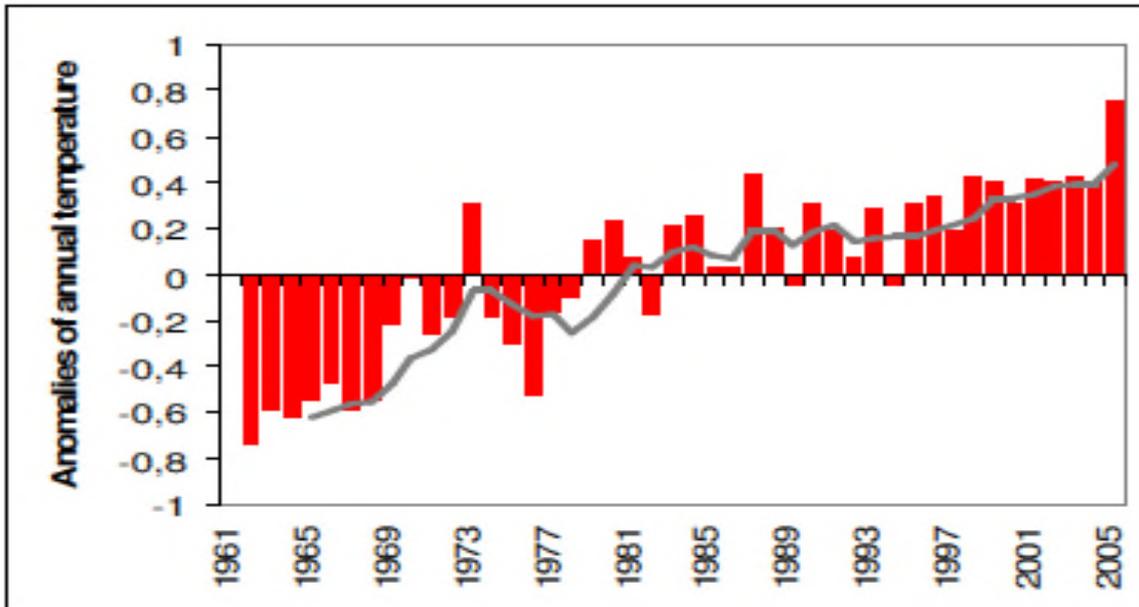


Figure II.5: synthèse de la variabilité spatio-temporelle des températures au Bénin (source : SMN Bénin, 2010)

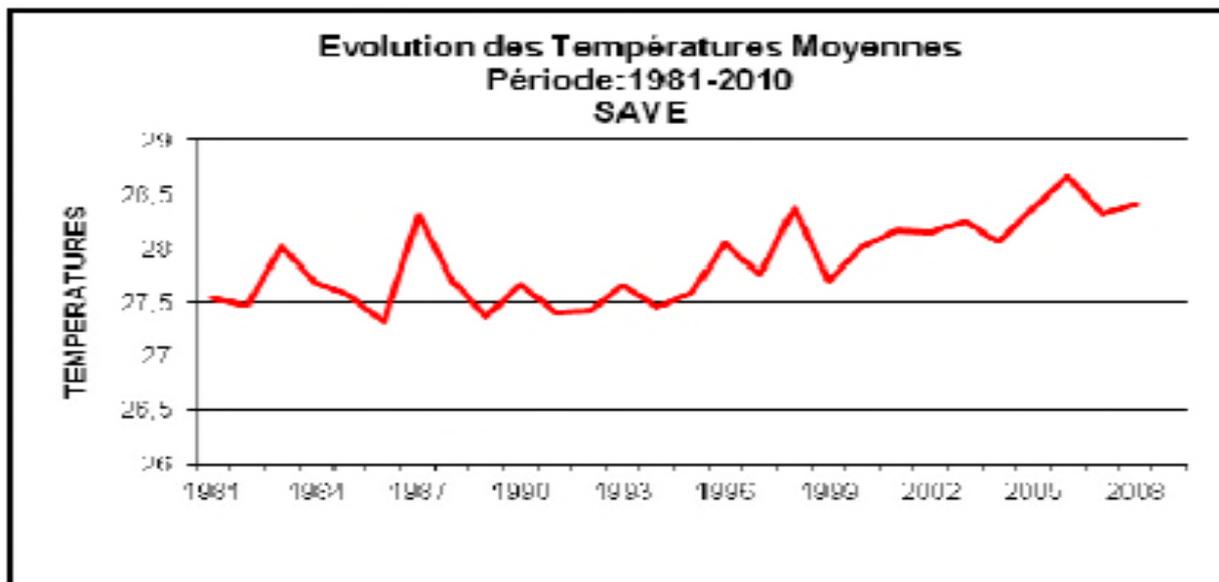


Figure II.6 : Evolution de température à SAVE (source : SMN Bénin, 2010)

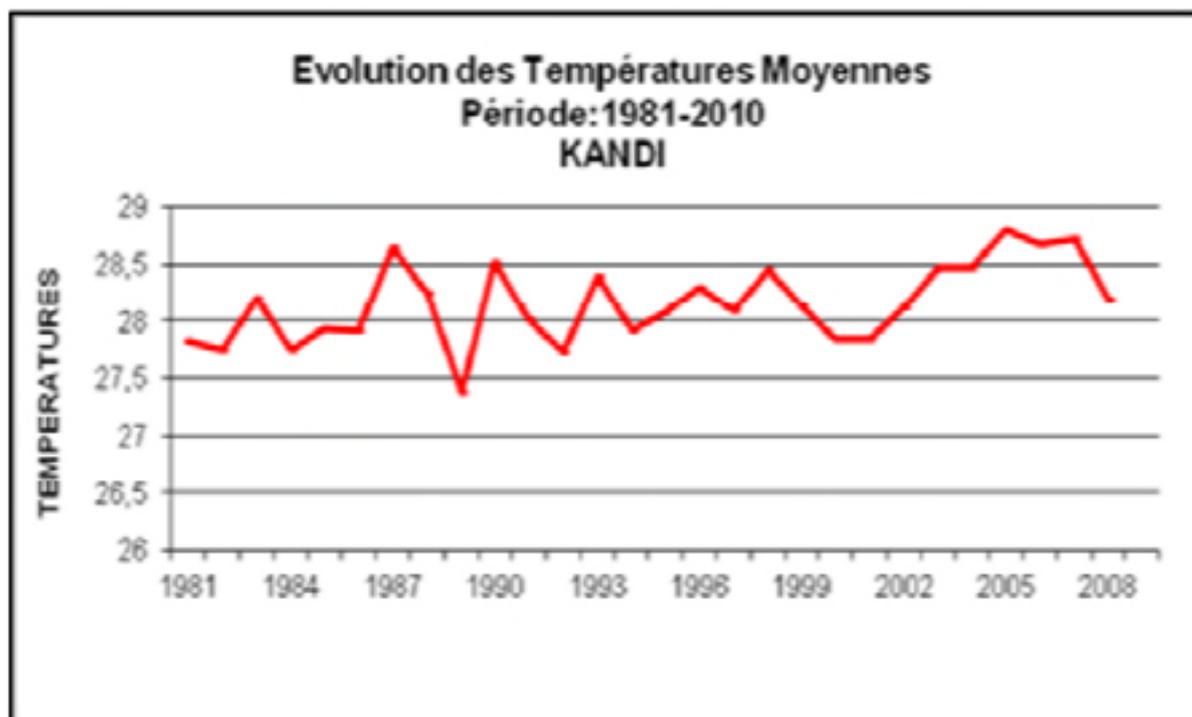


Figure II.7 : Evolution de température à KANDI (source : SMN Bénin, 2010)

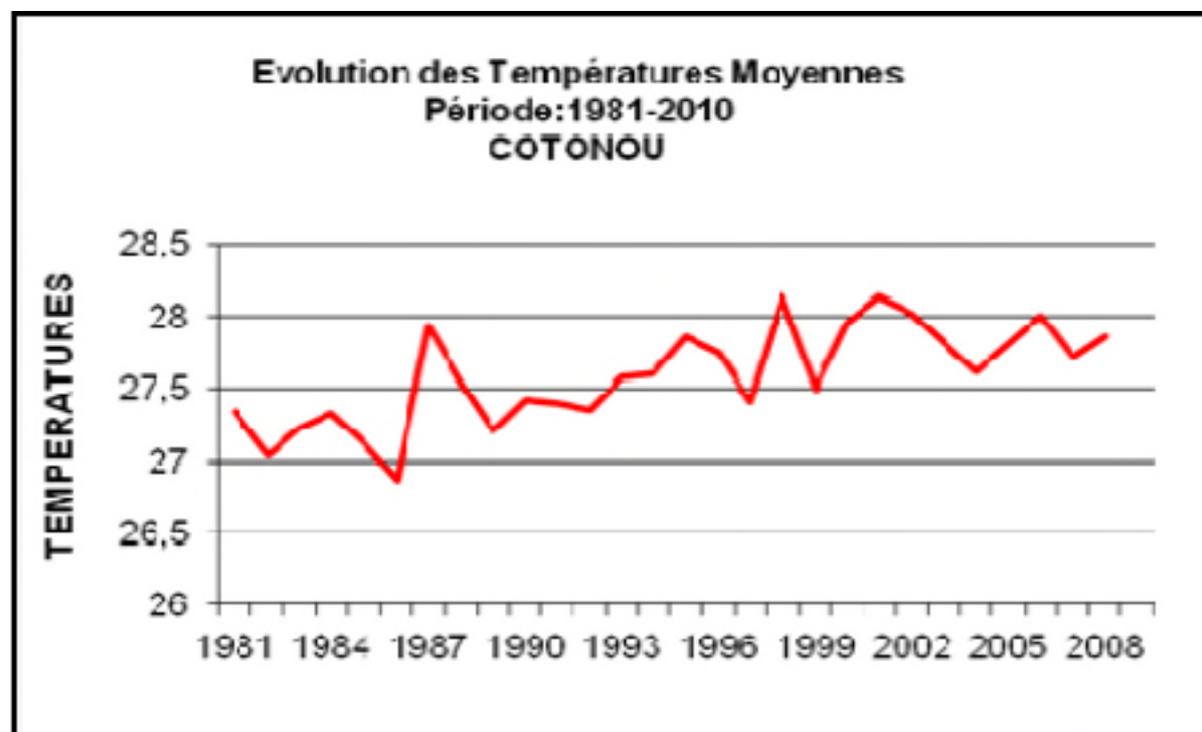


Figure II.8 : Evolution de température à Cotonou (source : SMN Bénin, 2010)

II.3.2 le climat future

Les dernières études de projection climatique menée par le GIEC et d'autres, permettant de décrire de façon probabiliste l'état futur du climat au Bénin, à travers différents modèles présentent des résultats un peu intrigants. Les impacts des changements climatiques seront différents sur chaque zone du territoire Béninois et sur chaque secteur d'activité. A l'horizon 2050, une hausse générale de température, comprise entre 0.9°C (Sud) et 1.1°C (Nord) est envisagée. Si la pluviométrie annuelle au Sud reste stable en moyenne, on attend que le Nord bénéficiera d'un accroissement des pluies périodiques compris entre 3.3% et 3.8%. À l'échelle saisonnière, une diminution des précipitations de mars à mai est envisageable, ce qui est synonyme d'accroissement de la durée de la saison sèche.

II.3.2.1. Variation des précipitations

D'après ces dernières études, on pourrait assister dans la région du Sud, jusqu'à l'horizon 2050 à une pluviométrie annuelle pratiquement stable, les variations qu'on pourrait observer tous les cinq ans ne dépasseront guère 0.2% avec un maximum dans le secteur Ouest et un minimum de -1% dans le secteur Est. Au Nord, un léger accroissement s'observerait, pouvant atteindre 3.3% au Nord-Ouest et 3.8% au Nord-est. Un léger accroissement serait observé également au centre du pays.

Notons que les écarts de précipitations se maintiendraient entre le Nord et le Sud, le Sud continuera à bénéficier trois fois plus de précipitations que le Nord. On observera aussi un décalage des dates de semis entre le Sud et le Nord, car à l'échelle saisonnière les précipitations de la période Mars-Avril-Mai au cours de laquelle les agriculteurs installent les cultures, seraient en diminution de 2% à 3% dans la première moitié du 21^{ème} siècle dans les deux sous-régions du Sud.

II.3.2.2. Variation des températures

La température pourrait augmenter régulièrement dans tout le pays. Le plus fort accroissement thermique à l'horizon 2050 serait de 1.1°C au Nord-ouest. La plus faible serait de 0.9°C dans la région Sud-ouest. Les différentes projections montrent que l'anomalie dépasserait 1°C à l'échelle annuelle à partir de 2050 et pourrait aller jusqu'à 3°C au Sud et 3.5°C dans au Nord à l'horizon 2100. Les anomalies thermiques des régions Sud, Centre et Nord du pays se différencient nettement à partir de l'année 2010.

II.3.3. Etat de l'art sur les Impacts des changements climatiques au Bénin

Les changements climatiques sont aujourd'hui reconnus comme l'une des principales menaces pour la survie des espèces et l'intégrité des écosystèmes partout dans le monde. La connaissance des propriétés spécifiques de ces changements, susceptibles d'avoir un impact sur les espèces ou leurs habitats, constitue un élément central des stratégies d'adaptation (Heller et al. 2009). Ces changements du climat constituent une question environnementale qui mérite une attention particulière en matière de planification dans beaucoup de secteur dans le monde particulièrement au Bénin.

II.3.3.1. L'eau

L'eau est le secteur le plus vulnérable au Bénin. Les effets des changements climatiques se feront ressentir sur le cycle de l'eau, limitant sa disponibilité, son accessibilité et son approvisionnement. La hausse des températures et la concentration des pluies auront un **impact négatif sur les ressources**. Ainsi, il faut s'attendre à des **modifications de la quantité et la qualité** de l'eau disponible ; à une augmentation du déficit hydrique et de l'évapotranspiration potentielle. Selon ces ressources disponibles et la variabilité des précipitations, le **stress hydrique** sera plus important pour certains départements que pour d'autres. La modification des ressources en eau impactera aussi l'agriculture, la santé, l'énergie et les écosystèmes au Bénin.

II.3.3.2. L'agriculture

Le GIEC prévoit une **baisse des rendements** agricoles en Afrique de l'Ouest, qui pourrait être **comprise entre 5 et 20 % au Bénin**. Cette baisse ne sera pas uniforme à travers le territoire. On peut s'attendre à un impact positif sur différentes régions et certaines cultures. L'igname et le manioc, **variétés plus résistantes à la variabilité climatique**, sont à recommander. La variabilité climatique et notamment la diminution des précipitations de mars à mai fait peser un risque important sur la sécurité alimentaire du pays. On peut s'attendre à une accentuation du décalage des dates de semis entre le Sud et le Nord. Si la perception des changements climatiques est réelle au sein des communautés rurales, tous ne disposent pas des capacités d'adaptation suffisantes.

II.3.3.3. L'énergie

L'électricité du Bénin, d'origine **hydraulique** (Barrages d'Akossombo, Ghana et de Nougbo, Togo) est vulnérable aux périodes prolongées de sécheresse. Réduire la dépendance énergétique du Bénin est dès lors une nécessité, de même que le développement de sources d'énergies propres et/ou renouvelables. Le Bénin dispose d'un **potentiel important pour produire de l'énergie propre**. Tandis que la partie méridionale dispose d'un capital en énergie éolienne et marémotrice, la partie septentrionale possède un fort potentiel en énergie solaire. Enfin, 35 sites potentiels ont été identifiés au Bénin pour l'installation de centrales hydrauliques.

II.3.3.4. La santé

La prévalence des **maladies infectieuses liées aux vecteurs** (paludisme, trypanosomias, fièvres) et **liées à l'eau** (choléra, dysenterie) pourrait augmenter. Si les maladies à vecteur peuvent reculer dans les régions devenues plus arides, leur prévalence devrait augmenter dans les régions plus humides. Concernant les maladies liées à l'eau, on sait qu'une augmentation de la température augmente la charge en microbes et en bactéries des nappes aquifères et des réservoirs superficiels. Les autres secteurs font également peser un risque important sur la santé des populations : le secteur agricole via les périodes de malnutrition; la baisse de la

biodiversité via les ressources halieutiques, source importante de protéines pour les populations.

II.3.3.5. Les écosystèmes

La vie étant liée à la stabilité des conditions d'existence, les changements du climat représentent une menace pour la biodiversité. Tandis que la variabilité climatique fait peser le risque d'une **baisse de la biodiversité** dans le temps et dans l'espace, les événements extrêmes et la montée du niveau de l'océan pourront entraîner la **migration et l'extinction de certaines espèces** animales et végétales. Au Bénin, la **question de l'exploitation forestière** est cruciale. Le déboisement en cours au Bénin modifie le climat et la pluviosité locale. La disparition de certaines forêts, comme celle des Trois Rivières pousse à une prise en charge politique rapide du problème.

II.3.3.6. Les zones côtières

Le dernier rapport du GIEC fait de **l'Afrique de l'Ouest l'une des cinq régions qui pourraient être gravement affectées** par la montée des eaux d'ici à 2080. Le Bénin fait parti des pays directement exposés à l'élévation du niveau de la mer. L'enjeu est la perte d'une portion du territoire béninois qui représente 10,6% de la surface du pays, et où vivent 3 662 000 béninois (INSAE, 2003). La vulnérabilité des côtes béninoise à l'élévation du niveau de la mer vient s'ajouter à deux problèmes importants : l'érosion, qui touche déjà le littoral et les inondations récurrentes, liées à la situation géographique de Cotonou.

Chapitre III : Notions fondamentales

III.1. Les anciens scénarios d'émissions anthropiques

Dans le rapport spécial sur les scénarios d'émissions (**Special Report on Emissions Scenarios — SRES**) du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC), quatre ébauches de scénario sont définies pour donner une description cohérente des rapports entre les forces qui déterminent ces émissions et leur évolution en ajoutant un contexte pour la quantification des scénarios. Ces scénarios sont ceux utilisés jusqu'à son 5^{ème} rapport pour faire des projections climatiques.

Ces scénarios d'émissions futures représentent une base importante pour toute prédiction des changements climatiques futurs, puisque les modèles du climat ont besoin des émissions futures comme données d'entrée. Les scénarios sont en effet des hypothèses d'évolution des émissions en gaz à effet de serre qui vont engendrer différents climats futurs possibles.

Les émissions futures de gaz à effet de serre proviennent de systèmes dynamiques très complexes déterminés par des forces motrices telles que la croissance démographique, le développement socio-économique et l'évolution technologique. Leur évolution future est incontestablement incertaine. Les scénarios sont des images diverses du déroulement possible du futur et ils constituent un outil approprié pour analyser comment des forces motrices peuvent influencer sur les émissions futures.

III.1.1. Les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre

a. Les scénarios du SRES

Les émissions globales de gaz à effet de serre (GES) ont cru depuis l'époque préindustrielle, avec une augmentation de 70% entre 1970 et 2004. Selon leur origine et la vitesse d'évolution de chaque force motrice on trouve quatre types d'émissions anthropiques :

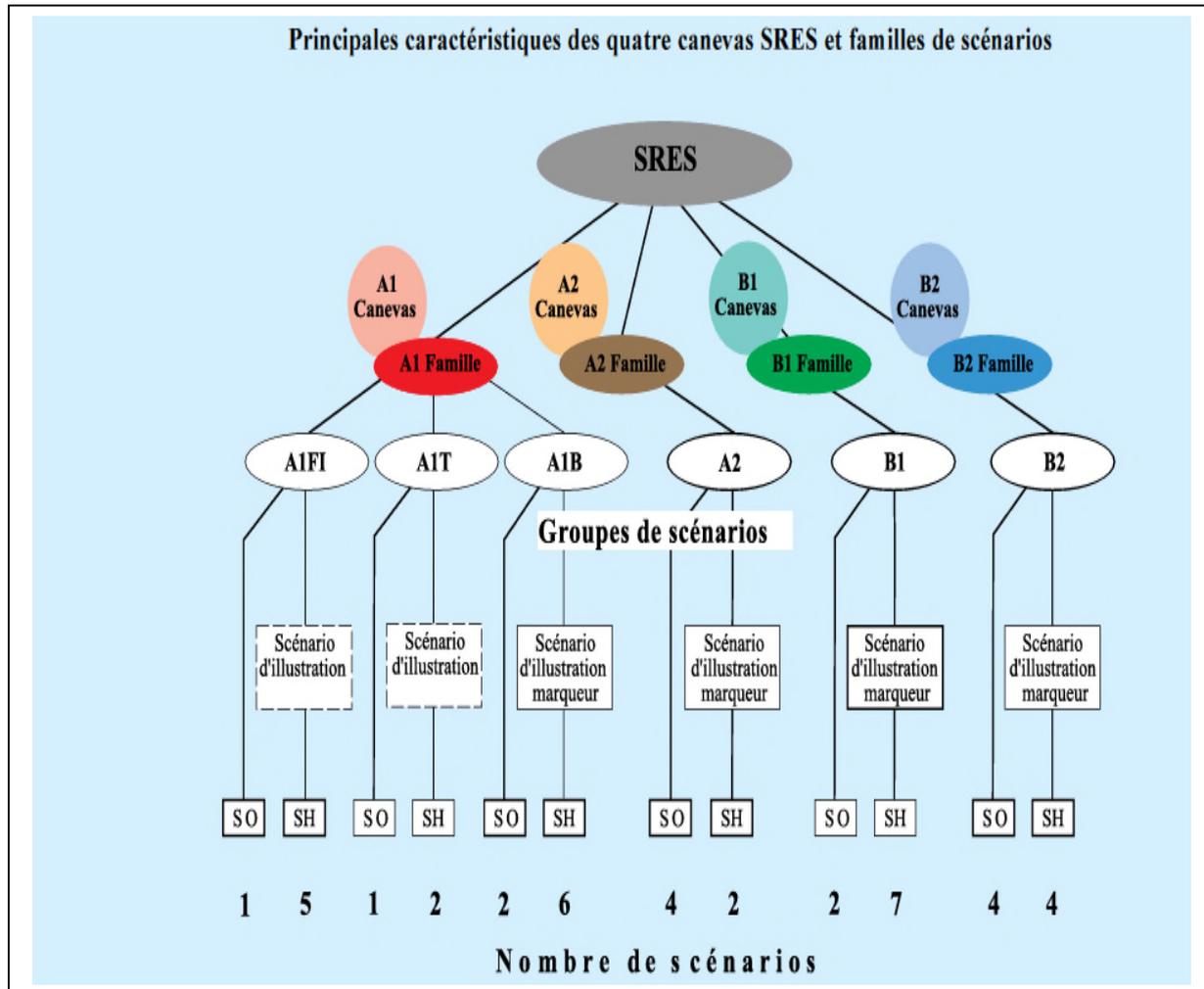


Figure III.1 : principale caractéristiques des quatre canevas SRES et familles de scénarios

❖ La famille des scénarios A1 :

Ce canevas décrit un monde futur dans lequel la croissance économique sera très rapide, la population mondiale atteindra un maximum au milieu du siècle pour décliner ensuite et de nouvelles technologies plus efficaces seront introduites rapidement.

Les trois groupes A1 décrivent des directions possibles de l'évolution technologique dans le système énergétique :

- A1FI, accentue sur une forte intensité de combustibles fossiles
- A1T, accentue sur les sources d'énergie autres que fossiles
- A1B, accentue sur l'équilibre entre les sources

❖ Le scénario A2 :

Ce canevas décrit un mode très hétérogène, illustrée comme ci.

- Un accroissement continu de la population mondiale;
- Le développement économique à une orientation principalement régionale;
- La croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont plus lentes que dans les autres scénarios.

❖ Le scénario B1 :

Il décrit un monde convergent avec :

- La population mondiale culminant au milieu du siècle et déclinant ensuite;
- Un changement rapide dans les structures économiques vers une économie de services et d'information, avec l'introduction de technologies propres et l'utilisation des ressources de manière efficiente.

❖ Le scénario B2 :

Ce scénario décrit un monde où l'accent est mis sur des solutions locales dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale.

- La population mondiale s'accroît de manière continue mais à un rythme plus faible que dans A2;
- Il y a des niveaux intermédiaires de développement économique et l'évolution technologique est moins rapide et plus diverse que dans les scénarios B1 et A1.

Les scénarios sont également orientés vers la protection de l'environnement et l'équité sociale, mais ils sont axés sur des niveaux locaux et régionaux.

Illustration des fourchettes des émissions totales de CO₂ pour les six groupes de scénarios qui constituent les quatre familles (les trois familles A2, B1 et B2 plus trois groupes de la famille A1: A1FI, A1T et A1B).

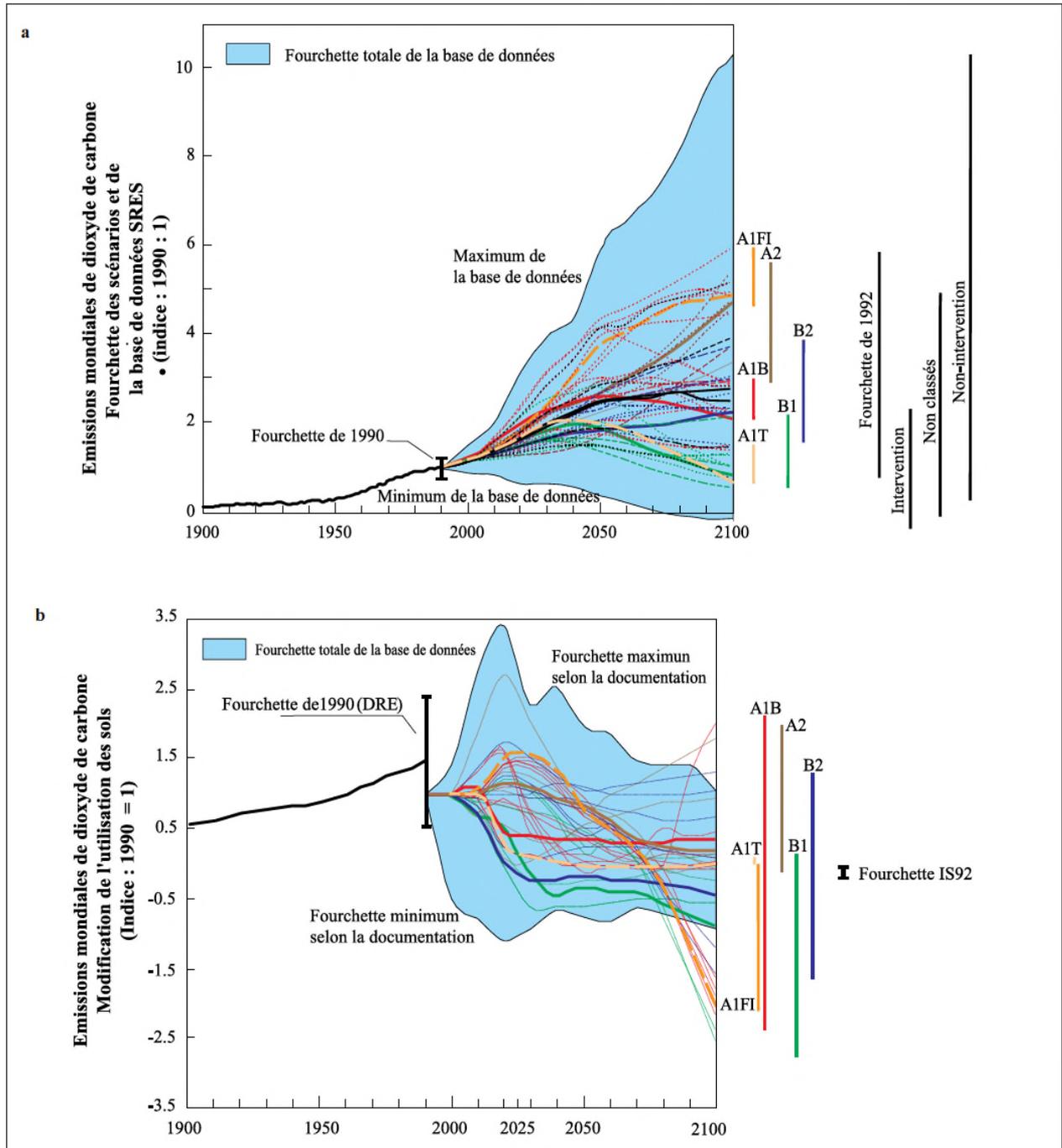


Figure III.2: Les émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie et à l'industrie. (GIEC, 2000).

Les émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie et à l'industrie (figure 2a) et à la modification de l'utilisation des sols (figure b) entre 1900 et 1990, et pour les 40 scénarios du SRES entre 1990 et 2100, sont indiquées en indices (1990 = 1). Les sentiers temporels en pointillés correspondent à des scénarios individuels SRES, et la

zone bleutée à la fourchette de scénarios d'après la documentation reflétée dans la base de données SRES. Les scénarios sont classés en six groupes découlant des quatre familles de scénarios. Six scénarios d'illustration sont mis en évidence. Les barres verticales colorées indiquent la fourchette des émissions en 2100. Les quatre barres noires à droite de la figure a) indiquent la fourchette d'émissions en 2100 pour les scénarios IS92 et trois fourchettes de scénarios tirées de la documentation reflétée dans la base de données SRES. Ces trois dernières fourchettes font apparaître les scénarios qui incluent certaines initiatives climatiques supplémentaires (désignés comme scénarios d'"intervention"), ceux qui n'en comportent pas ("non intervention") et ceux qui ne peuvent entrer dans aucune de ces catégories ("non classés"). Cette classification est basée sur une évaluation subjective des scénarios dans la base de données, et n'a été possible que pour les émissions de CO₂ de l'énergie et de l'industrie.

Illustration de l'évolution de CO₂

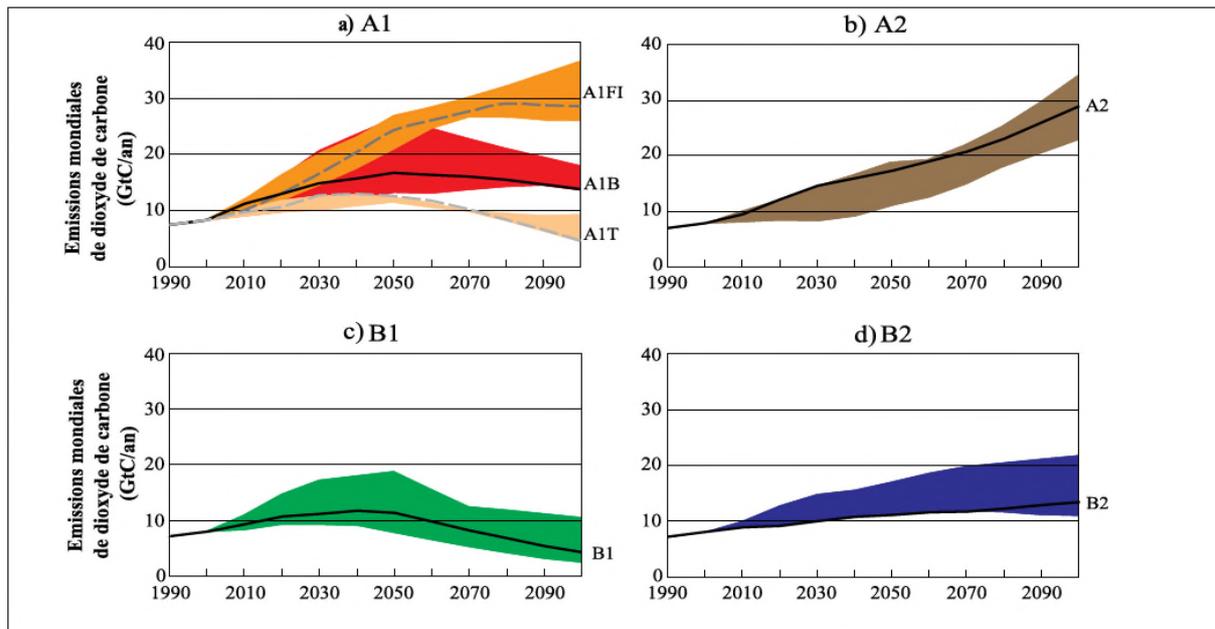


Figure III.3 : Emissions mondiales annuelles totales de CO₂ de toutes les sources (énergie, industrie et modification de l'utilisation des sols) entre 1990 et 2100, en gigatonnes de carbone (GtC/an) pour les familles et six groupes de scénarios. Les 40 scénarios SRES sont présentés dans les quatre familles (A1, A2, B1 et B2) et dans six groupes de scénarios: A1FI à forte intensité de combustibles fossiles (comprenant les scénarios à forte intensité de charbon et les scénarios à forte intensité de pétrole et de gaz), A1T à prédominance de combustibles non fossiles, A1B en équilibre dans la figure 3a), A2 dans la figure 3b), B1 dans la figure 3c) et B2 dans la figure 3d). Chaque bande colorée représente la fourchette des scénarios harmonisés et non harmonisés

dans chaque groupe. Pour chacun des six groupes de scénarios un scénario d'illustration est fourni, y compris les quatre scénarios d'illustration marqueurs (A1, A2, B1, B2, en traits pleins) et deux scénarios d'illustration pour A1FI et A1T (pointillés).

Famille		A1			A2	B1	B2
Groupe de scénarios	1990	A1FI	A1B	A1T	A2	B1	B2
Population (en milliards)	5,3						
2020		7,6	7,5	7,6	8,2	7,6	7,6
2050		8,7	8,7	8,7	11,3	8,7	9,3
2100		7,1	7,1	7,0	15,1	7,0	10,4
PIB mondial (10 ¹² dollars E.-U. 1990/an)	21						
2020		53	56	57	41	53	51
2050		164	181	187	82	136	110
2100		525	529	550	243	328	235
Dioxyde de carbone, combustibles fossiles (GtC/an)	6,0						
2020		11,2	12,1	10,0	11,0	10,0	9,0
2050		23,1	16,0	12,3	16,5	11,7	11,2
2100		30,3	13,1	4,3	28,9	5,2	13,8
Dioxyde de soufre (MtS/an)	70,9						
2020		87	100	60	100	75	61
2050		81	64	40	105	69	56
2100		40	28	20	60	25	48
Méthane, (MtCH ₄ /an)	310						
2020		416	421	415	424	377	384
2050		630	452	500	598	359	505
2100		735	289	274	889	236	597
CFC/HFC/HCFC, (MtC equiv./an) ^b	1672						
2020		337	337	337	292	291	299
2050		566	566	566	312	338	346
2100		614	614	614	753	299	649

Figure III.4: Aperçu des principales forces motrices en 1990, 2020, 2050 et 2100 sur l'ensemble des scénarios SRES. L'évolution technologique n'est pas quantifiée. (GIEC, 2000)

b. Les scénarios IS92

En 1992, le GIEC a présenté un ensemble de six scénarios d'émissions qui ont servi à établir les projections climatiques de son deuxième Rapport d'évaluation. Ces scénarios d'émissions ont été appelés scénarios IS92. Dans le rapport spécial du GIEC consacré aux scénarios d'émissions (Nakićenovic et al. 2000)....

IS92a et IS92b : Ces scénarios donnent, quant aux émissions, des estimations modérées par comparaison avec celles des autres scénarios IS92. La différence majeure entre IS92a et IS92b est que le scénario IS92b tient compte des éléments d'information dont on disposait en 1992 sur les engagements pris par quelques-uns des pays de l'OCDE de stabiliser les émissions de CO₂ .

IS92c : Il repose sur l'hypothèse des croissances démographique et économique les plus faibles, et de fortes contraintes en ce qui concerne les approvisionnements en combustibles fossiles. Il produit donc les valeurs les plus faibles et il est le seul à montrer une tendance à la baisse des émissions.

IS92d : Suppose la même croissance démographique faible que le scénario IS92c, mais une croissance économique plus forte et présente donc les valeurs les plus faibles après le scénario IS92c.

IS92e : Ce scénario suppose une croissance démographique modérée, une forte croissance économique et une abondance de combustibles fossiles. Il présente en conséquence les estimations les plus élevées quant aux émissions futures.

IS92f : Ce scénario suppose la croissance démographique la plus forte, mais une croissance économique basse. Les valeurs obtenues sont les plus élevées après celles du scénario IS92e.

Quelques résultats obtenus à partir de ces scénarios

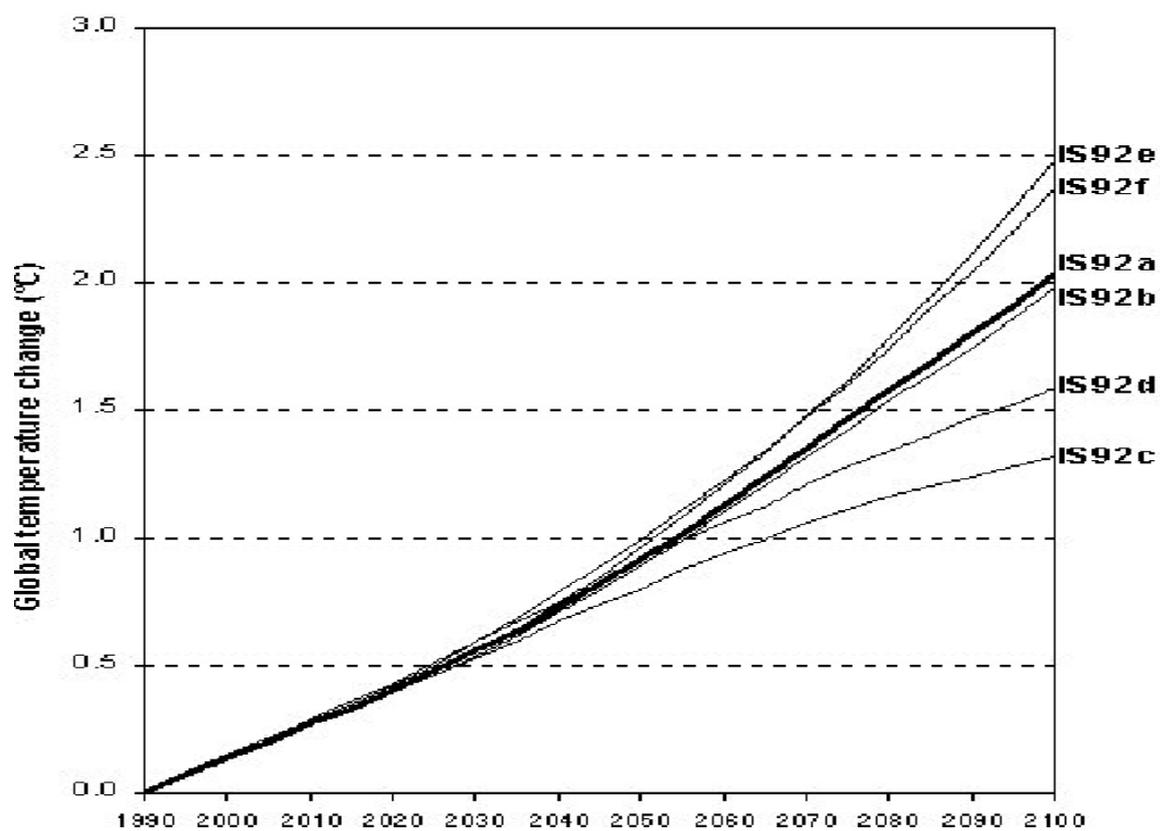


Figure III.5 : Illustration de l'évolution de la température moyenne globale selon les scénarios IS92.
 (Source : [http://www.cics.uvic.ca/scenarios/index.cgi?More Info Emissions](http://www.cics.uvic.ca/scenarios/index.cgi?More+Info+Emissions))

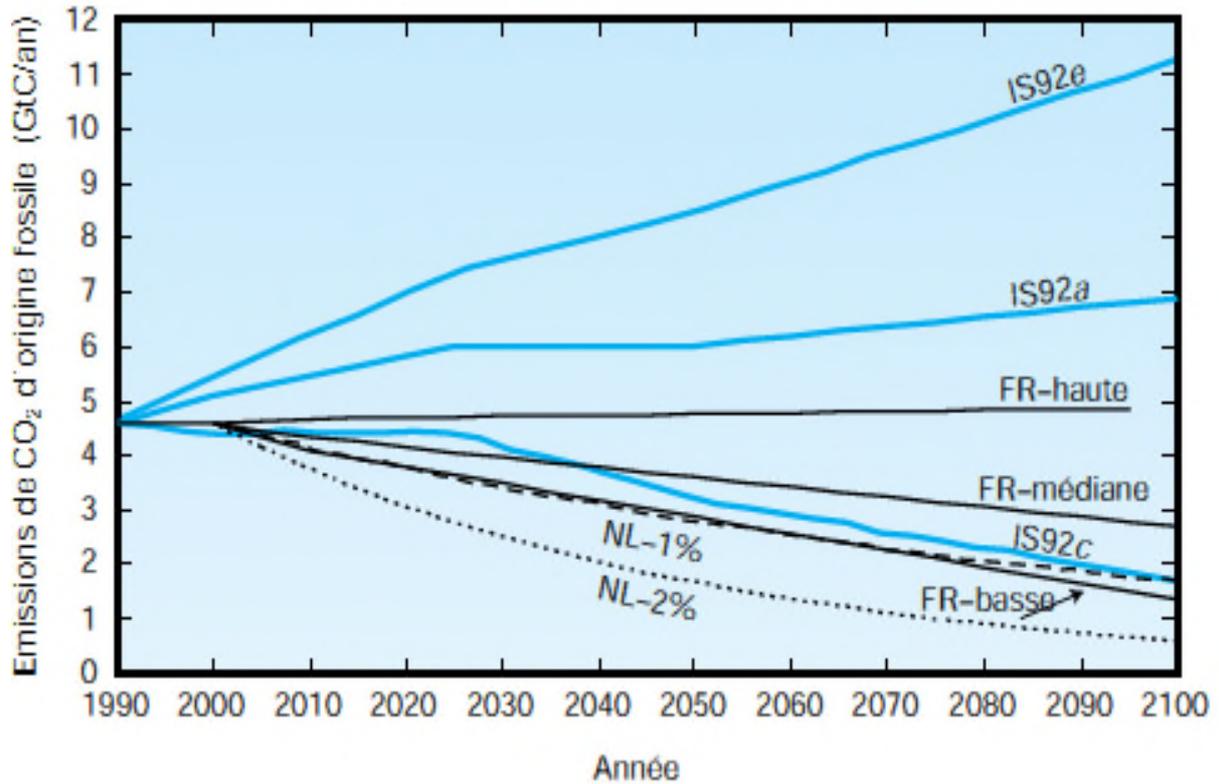


Figure III.6 : Emissions de CO₂ d'origine fossile (GtC/an) dans les pays NL-2% FR basse NL-1% IS92 IS92 IS92e c a figurant à l'Annexe I, selon les propositions FR et NL de limitation des émissions, par comparaison avec celles obtenues selon les scénarios IS92a, c et e. Les valeurs FR basse, FR-médiane et Fr haute sont obtenues à partir de différents cas de figure fondés sur des émissions par habitant. NL-1% et NL-2% représentent respectivement des réductions de 1 et 2 % par an après l'an 2000 des émissions cumulées de CO₂.

III.1.2. Le choix du scénario

Lors des anciens simulations du climat futur on se base généralement sur deux scénarios d'émission anthropique, il s'agit de :

- Le scénario B2, plutôt optimiste
- Le scénario A2, plutôt pessimiste

Illustration des scénarios A2 et B2 par rapport aux autres scénarios :

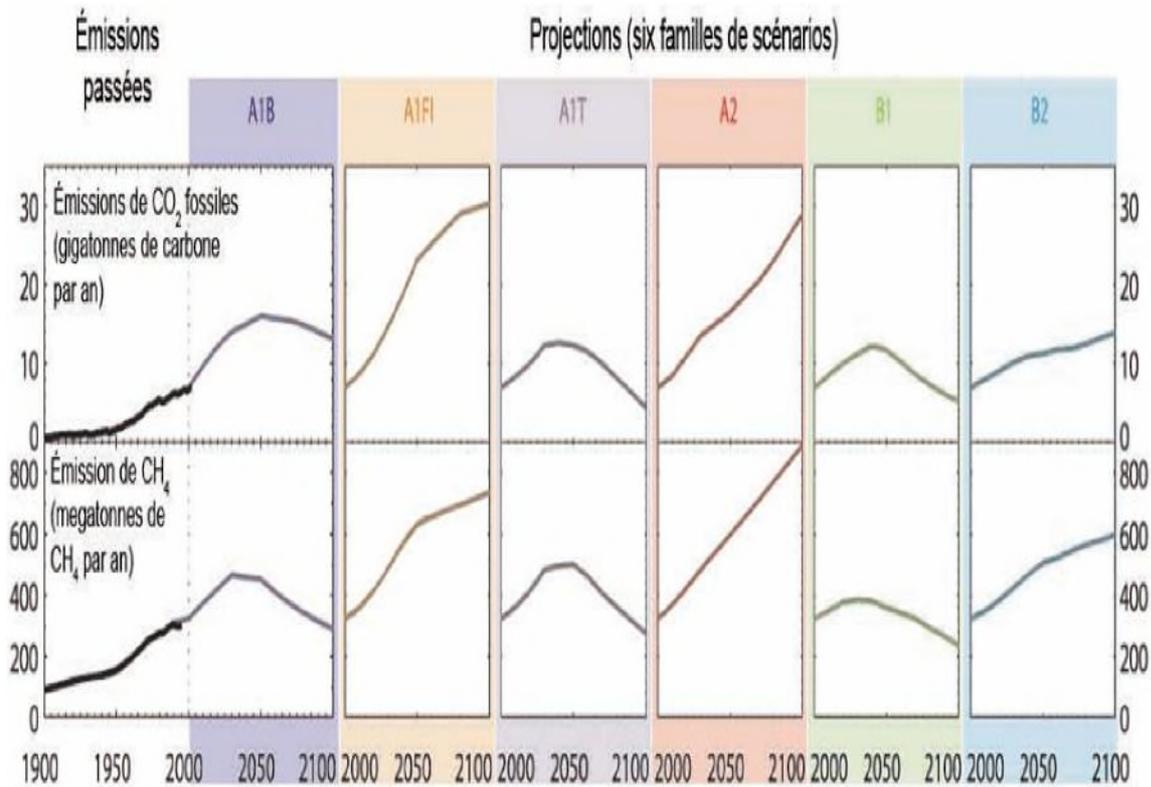


Figure III.7 : Les émissions mondiales de gaz à effet de serre (CO₂ et CH₄). (Jean Jouzel, 2011)

III.2. Les nouveaux scénarios d'émission anthropique (RCPs)

Dans les précédents exercices de simulation CMIP (Coupled Model Intercomparison Project), la construction des scénarios se faisait de manière linéaire : les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre étaient d'abord établis à partir d'hypothèses sur les évolutions démographiques, sociales, économiques et technologiques à l'échelle du globe. Les projections climatiques étaient en ces moments des réponses des modèles numériques à ces scénarios d'émissions.

Une nouvelle approche d'élaboration des scénarios a été retenue par les groupes de travail internationaux dans le cadre de CMIP5. Les modélisateurs du climat et les économistes ont travaillé en parallèle, les premiers pour effectuer des projections climatiques, les seconds pour élaborer des scénarios socio-économiques, à partir de « trajectoires » d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre (les RCPs pour « Representative Concentration Pathways »). Ces trajectoires proviennent des résultats des recherches les plus récentes menées à partir de modèles intégrant les évolutions socio-économiques et climatiques sous une forme relativement simplifiée.

Ces nouveaux scénarios explorent toutes les possibilités d'évolutions technologiques et socio-économiques permettent de rendre compte de ces RCPs, notamment ceux qui prennent en compte des politiques climatiques permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre. L'hypothèse qui n'avait été explorée lors des précédents exercices. En outre, les simulations réalisées à partir des scénarios RCP pourront être réinterprétées en termes socio-économiques lors des travaux des économistes.

Les scénarios RCP (pour *Representative Concentration Pathway*) sont quatre scénarios relatifs à l'évolution de la concentration en gaz à effet de serre au cours du XXI^e siècle, établis par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour son cinquième rapport, AR5 (*IPCC Fifth Assessment Report* (en)).

Un scénario RCP permet de modéliser le climat futur. Dans l'AR5, sur la base de quatre hypothèses différentes concernant la quantité de gaz à effet de serre qui sera émise dans les années à venir (période 2000-2100), chaque scénario RCP donne une variante jugée probable du climat qui résultera du niveau d'émission choisi comme hypothèse de travail. Les quatre scénarios sont nommés d'après la gamme de forçage radiatif ainsi obtenue pour l'année 2100 :

- Le scénario RCP2.6 correspond à un forçage de +2,6 W/m²,
- Le scénario RCP4.5 correspond à +4,5 W/m², et de même pour les scénarios RCP6 et RCP8.5.

La possibilité de traduire les scénarios RCPs en termes de modification du bilan radiatif de la planète, permet de les comparer avec les anciens scénarios d'émission dit SRES pour « Special Report on Emission scenarios », (Nakićenović et Swart, 2000) figurant dans les deux derniers rapports du GIEC (2001 et 2007). Parmi les quatre (4) scénarios RCP retenus, trois (3) d'entre eux donnent lieu à des trajectoires d'évolution de concentrations de gaz à effet de serre comparables à celles utilisées pour les deux derniers rapports du GIEC du point de vue de la perturbation du bilan radiatif de la terre (tableau et figure). Le scénario le plus élevé (RCP8.5) est toutefois un peu plus sévère que l'ancien scénario A2. Le scénario le plus bas (RCP2.6) n'a, quant à lui, pas d'équivalent parmi les anciens scénarios. Il correspond à de très faibles émissions de gaz à effet de serre qui ne peuvent être obtenues que par l'application de politiques climatiques exigeantes.

Tableau III.1 : Principales caractéristiques des quatre scénarios RCP.

(Main characteristics of the four RCP scenarios)

Nom	Changement du bilan radiatif (forçage radiatif)	Concentration (en partie par million)	Trajectoire
RCP8.5	>8,5Wm ⁻² en 2100	>1370 eq- CO ₂ * en 2100	croissante
RCP6.0	~6Wm ⁻² au niveau de stabilisation après 2100	~850 eq- CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP4.5	~4,5Wm ⁻² au niveau de stabilisation après 2100	~660 eq- CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP2.6	Pic à ~3Wm ⁻² avant 2100 puis déclin	Pic ~490 eq-CO ₂ avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

*eq-Co2 est une abréviation pour équivalent Co2. Il s'agit de la concentration de Co2 équivalente à la totalité des gaz à effet de serre en termes de forçage radiatif.

À chacun de ces RCPs correspondent une trajectoire d'évolution des émissions et concentrations de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone ou Co2 , méthane ou CH4 , protoxyde d'azote ou n2 o...), ainsi qu'une trajectoire d'évolution de l'occupation des sols.

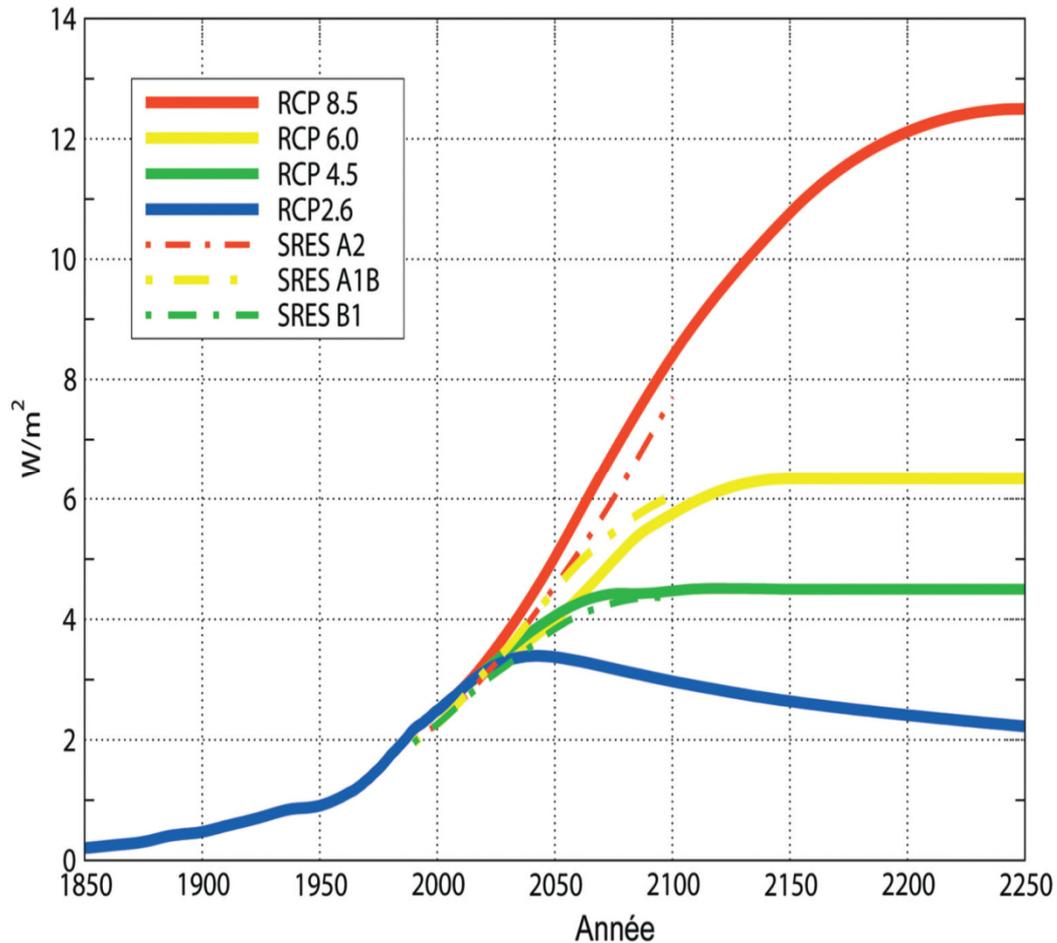


Figure III.8 : Changement du bilan radiatif de la terre au sommet de l’atmosphère, ou « forçage radiatif » (en Wm^{-2}) induit par les activités humaines. après 2006, les traits continus représentent les nouveaux scénarios dits « Representative Concentration Pathways » et les traits pointillés les scénarios SRES (GIEC, 2007).

« *Change in the earth’s radiation budget at the top of the atmospheres, or “radiative forcing” (in Wm^{-2}) induced by anthropogenic activities. after 2006, the continuous lines represent the so-called “Representative Concentration Pathways” new scenarios and the dashed lines the SRES scenarios (IPCC, 2007) ».*

L’évolution de la température moyenne à la surface de la terre, par rapport à la période 1901-2000 a été simulée à partir du modèle du CNRM-CER-FACS ou de L’IPSL, sous les scénarios RCPs.

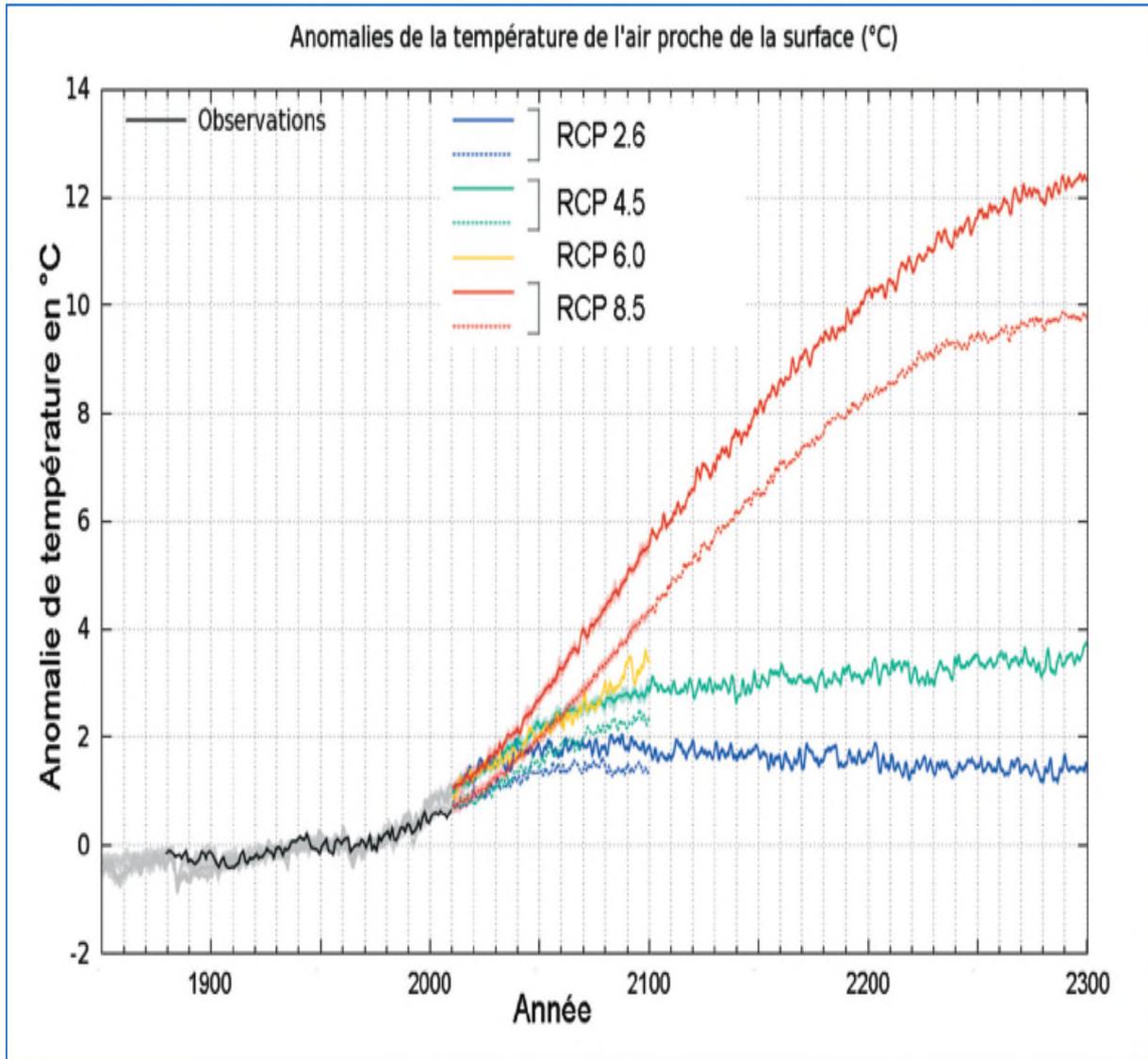


Figure III.9 : Évolution de la température moyenne à la surface de la Terre (en °C) par rapport à la période 1901-2000 à partir des observations (courbe noire) et à partir des simulations des modèles du CnRM-CERFaCS (traits pointillés colorés) ou de l'IPSL (traits pleins colorés), et pour les différents scénarios RCP.

« Global near surface temperature change (in °C) relative to the period 1901-2000 from observations (black curve) and from the CnRM-CERFaCS (colored dashed lines) or IPSL (colored solid lines) model simulations, and for the different RCP scenarios ».

Quelques projections réalisées par le GIEC sous les scénarii RCPs lors AR5 se trouvent dans l'annexe1.

III.3. Système, forçages et variabilités climatiques

L'étude des changements climatiques requiert dans un premier temps de définir le système climatique, et tout ce qui peuvent être des fluctuations du climat en l'absence de tout changement.

III.3.1. Le système climatique

L'ensemble terre-atmosphère qui évolue perpétuellement sous l'effet de processus internes et de contraintes externes, d'origine naturelle ou humaine. Bien que les bases physiques du système climatique sont bien connue et largement comprises ; les modèles de climat tendent à simuler au mieux son fonctionnement.

Le système climatique terrestre est une machine thermique alimentée en énergie par le soleil (1400 Wm^{-2}) au sommet de l'atmosphère. Parmi les éléments importants, citons l'atmosphère, les surfaces continentales, l'hydrosphère (océans, lacs, rivières, nappes d'eau souterraines...), la cryosphère (glaces terrestres ou marine, manteau neigeux), la biosphère (tous les organismes vivants dans l'air, sur terre et dans les océans) et les façons dont ils interagissent. Ces propriétés physiques peuvent être classées en :

- ❖ Propriétés thermiques (température de l'air, de l'eau, ...)
- ❖ Propriétés cinématiques (vents, courants océaniques, mouvements verticaux, ...)
- ❖ Propriétés aqueuses (humidité atmosphérique, contenu en eau liquide ou glace des nuages, nébulosité, contenu en eau du sol, de la neige, ...)
- ❖ Propriétés statistiques (densité, pression d l'atmosphère et de l'océan, composition de l'air (sec), ...).

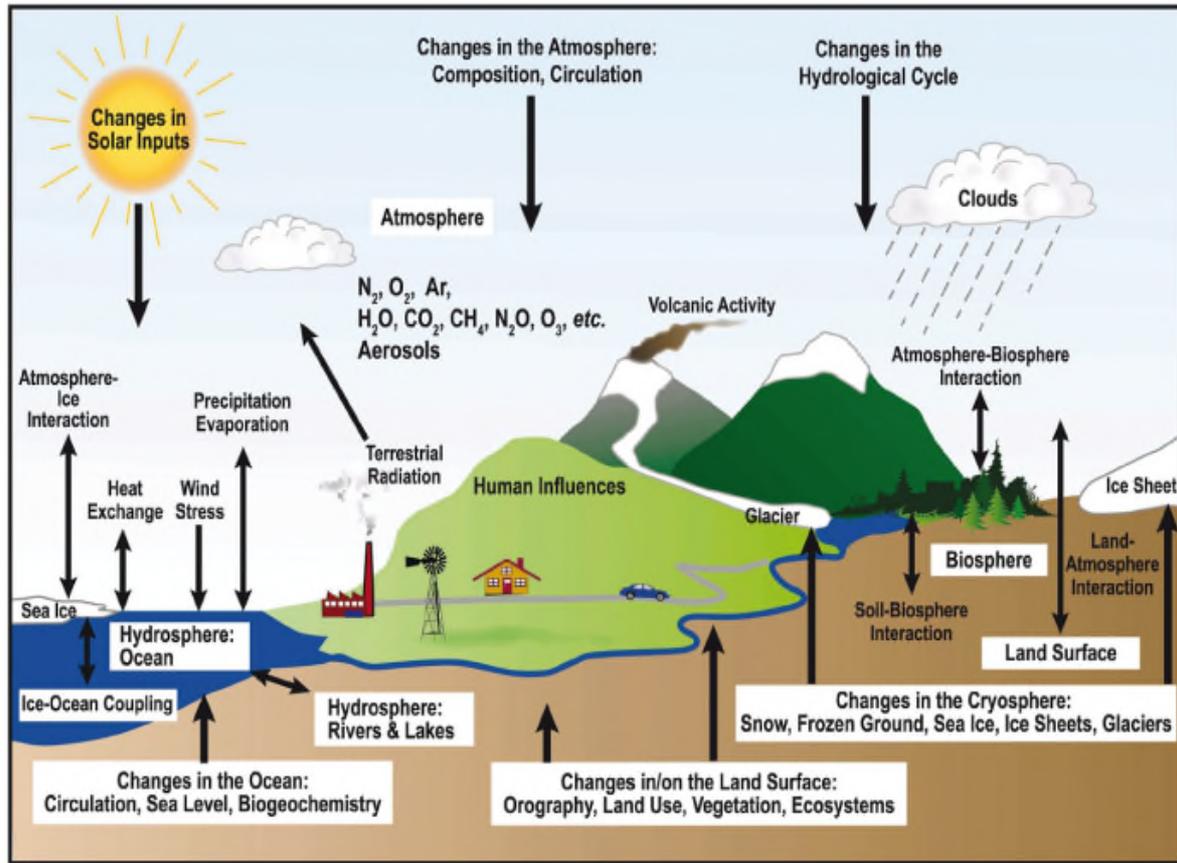


Figure III.10 : panorama des composantes du système climatique, leurs processus et leurs interactions. (TECLIM : critique climatique)

Les variables, représentatives des différentes propriétés, sont interconnectées par les lois dynamiques et différents processus physiques ; par exemple, précipitation, évaporation, rayonnement, advection, convection et diffusion turbulente.

III.3.2. Forçages du système climatique

La lumière du soleil est la seule source d'énergie apportée au système climatique. Le système climatique échange ainsi de l'énergie avec l'espace sous forme radiative (rayonnement solaire et terrestre). Le soleil représente avec son flux lumineux un moteur qui met en mouvement les enveloppes fluides comme l'atmosphère. Le système climatique est en quasi-équilibre et par conséquent, toute perturbation introduite par une variation des paramètres externes (forçage orbital ou solaire) ou des paramètres radiatifs internes (gaz à effet de serre) peuvent entraîner un changement climatique.

L'être humain est aussi une composante importante du système climatique terrestre ; de part ces activités qui contribuent au réchauffement planétaire et en l'accéléralant par la libération massive de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère. Toutefois il existe d'autres facteurs de forçage qui ne sont pas dus à l'influence humaine, tels que des variations dans le rayonnement solaire et l'activité volcanique ainsi que des fluctuations dans l'axe de la terre et dans son orbite autour du soleil. Il s'agit d'événements exogènes, en partie responsables des changements qui se sont produits entre les périodes glaciaires et les périodes interglaciaires. Ces changements surviennent sur une plus longue période de temps (des dizaines de milliers d'années ou plus) et doivent être clairement différenciés du changement climatique d'origine anthropique.

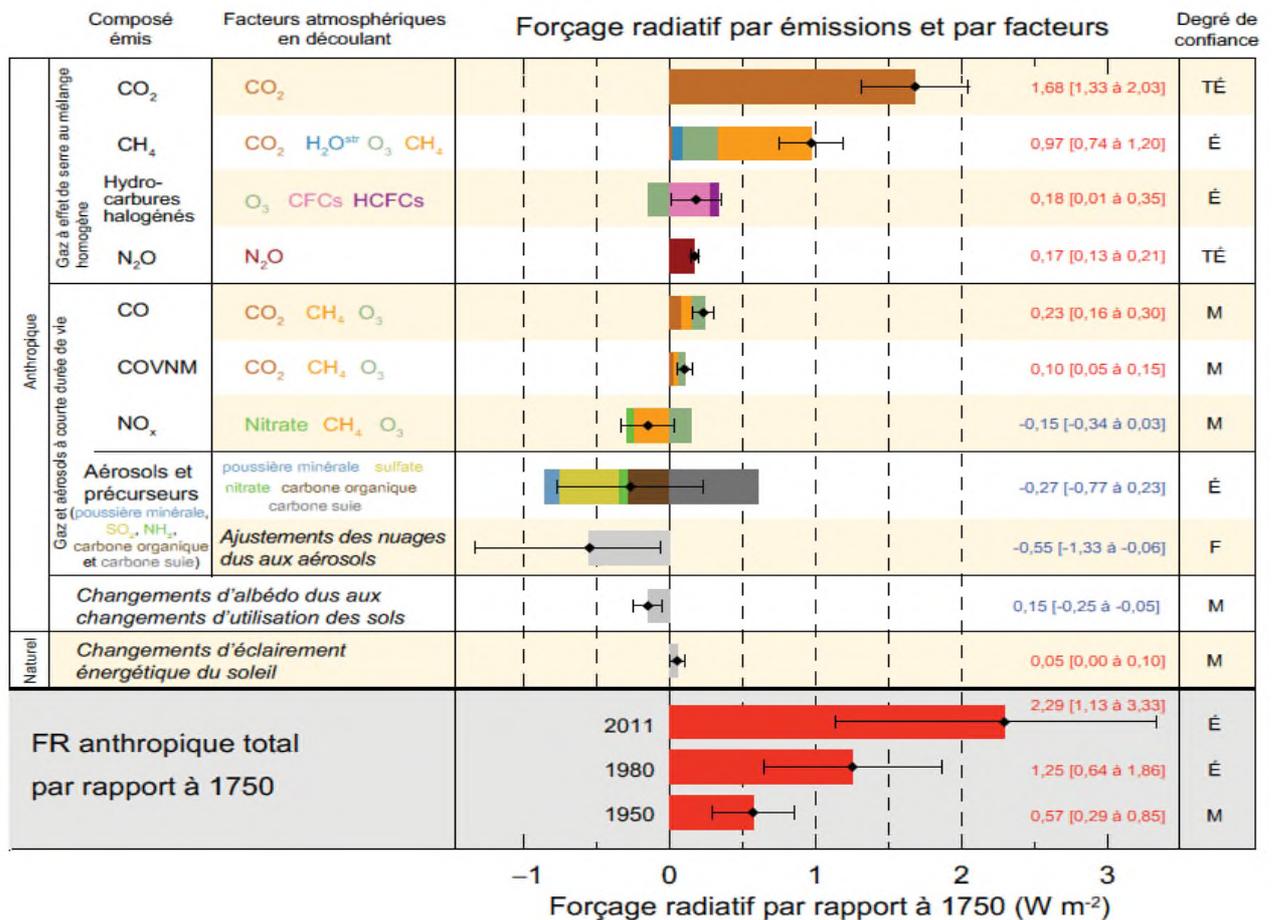


Figure III.11: forçages radiatifs de type naturel et anthropique sur le climat (GIEC, 2013).

Le forçage radiatif est ici exprimé en Wm⁻². Un forçage positif induit un réchauffement du système climatique ; négatif, il induit un refroidissement.

III.3.3. Variabilité du système climatique

Les experts du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) s'accordent sur la réalité d'un réchauffement global causé par les émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Cependant, il est encore bien souvent délicat de faire la part, à l'échelle régionale, entre le changement climatique en cours et la variabilité interne du climat. Lorsque se produisent des événements extrêmes (canicules, sécheresses ou fortes pluies, tempêtes ou cyclones), il est ainsi coutumier d'entendre qu'il est abusif et/ou prématuré de les imputer au changement climatique.

Le climat varie naturellement sur une grande plage d'échelles de temps. La variabilité interne résulte, d'une part, des interactions entre les sous-systèmes, du système climatique et, d'autre part, du caractère fondamentalement instable de certaines composantes (atmosphère et océan). Cette partie illustre cette variabilité au travers de plusieurs exemples couvrant la diversité d'échelles : cycles glaciaires-interglaciaires, variabilité solaire, El Niño, la variabilité nord-atlantique (NAO) et les variations de CO₂.

D'une part, la « North Atlantic Oscillation » (NAO) est une fluctuation atmosphérique qui affecte le climat de l'Europe à de nombreuses échelles de temps. Elle correspond à une modulation du contraste de pression en surface entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande, et donc des vents d'ouest sur l'Europe. Indépendamment du cycle saisonnier, on observe des alternances de périodes à faible et à fort gradient qui s'accompagnent de fortes variations de température et de précipitations.

III.4. La modélisation climatique-état de l'art

Le premier objectif du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) est d'évaluer l'information scientifique et socio-économique sur le changement climatique, ses impacts et les différentes options pour l'atténuer ou s'y adapter. Comprendre ou prévoir le comportement du climat et donc les variations et changements climatiques, nécessite la considération du système climatique dans sa globalité et la prise en compte à la fois de ces échanges radiatifs et des processus, multiples et complexes, qui interconnectent les différents éléments et variables du système. La modélisation climatique est actuellement le seul moyen permettant de répondre à ce besoin d'une façon relativement complète et satisfaisante.

Un modèle climatique est la représentation numérique de la planète et des interactions entre ses différents réservoirs qui modulent le climat : l'atmosphère, l'océan et les surfaces continentales, ainsi que les processus physiques complexes et intimement liés qui déterminent les conditions météorologiques et le climat.

Le système climatique : sa modélisation

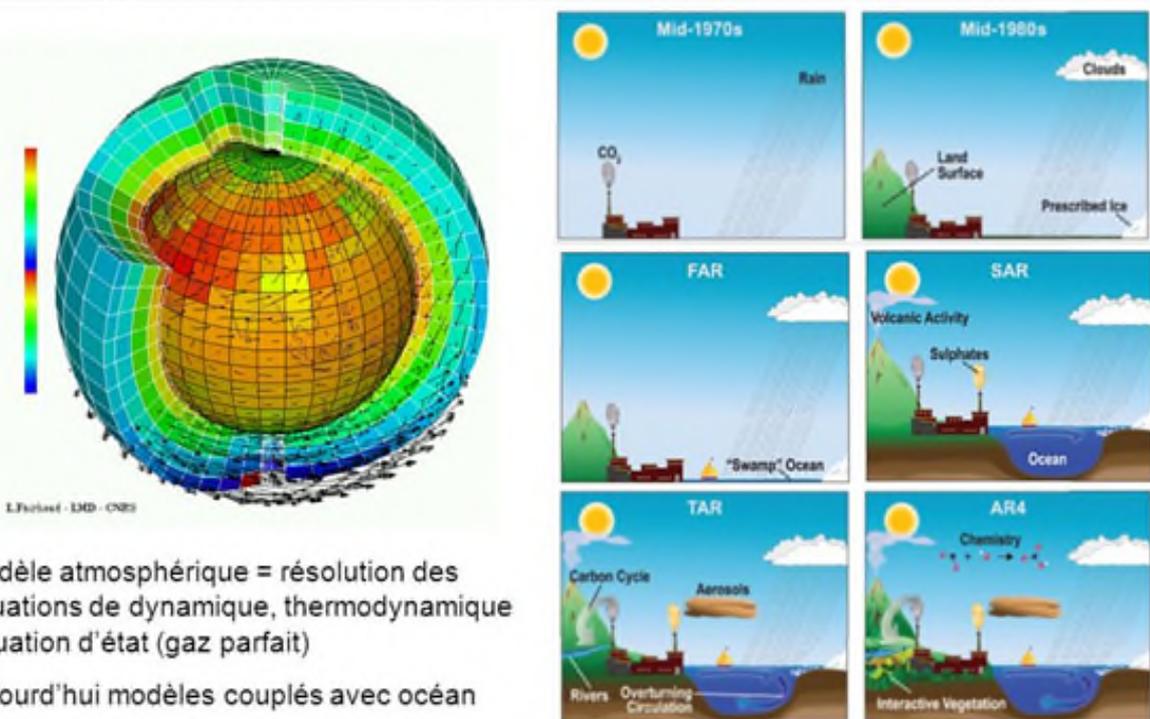


Figure III.12 : Evolution du degré de complexité des modèles. (Source : GIEC 2007, 4^{ème} rapport d'évaluation).

Dans la décennie 1970, les modèles étaient purement atmosphériques, avec prise en compte des précipitations et de la composition de l'atmosphère. Dans les années 1980 on a vu arriver l'occupation de la surface, les nuages, et la glace de mer (non couplée). Au moment du premier rapport d'évaluation du GIEC (FAR pour First Assessment Report), l'océan a été rajouté, mais sans représentation de la circulation à grande échelle. Au moment du 2^e rapport d'évaluation (SAR pour Second Assessment Report ; 1995) les modèles ont "accueilli" les aérosols, le volcanisme et la circulation horizontale de l'océan. Au moment du 3^e rapport d'évaluation (TAR pour Third Assessment Report ; 2001) ces outils représentaient aussi la circulation océanique profonde, le début du cycle du carbone, les rivières. Enfin les modèles utilisés pour l'AR4 (pour 4th Assessment Report, publié en 2007) comprennent pour certains la chimie atmosphérique (c'est-à-dire les processus qui permettent de représenter l'augmentation - ou la diminution - d'une espèce chimique A dans l'atmosphère à partir de la variation d'espèces B + C), et une végétation réagissant de manière dynamique aux conditions climatiques régionales.

Ce qui est remarquable, dans tout cela, est que cette complexification progressive des outils utilisés n'a pas invalidé les conclusions des modèles des années 1970, à savoir que nos émissions allaient modifier le climat, en augmentant notamment la température moyenne de quelques degrés si nous doublons la concentration du CO₂ en un siècle.

Evolution de la résolution (ou du maillage, c'est pareil) des modèles climatiques globaux au cours du temps : avant le premier rapport d'évaluation du GIEC (FAR), c'est-à-dire dans la décennie 1980, la taille de la maille était typiquement de 500 km de côté. Certains modèles dits régionaux utilisaient des mailles plus petites - de l'ordre de 50 km - au-dessus d'une région particulière mais alors les mailles pour le reste du monde pouvaient mesurer jusqu'à 1000 km de côté. Au moment du 2^e rapport d'évaluation (SAR 1995) la taille de la maille avait été divisée par 2, et 10 ans plus tard (au moment de l'AR4 en 2007) elle a encore été divisée par 2 par rapport à la décennie 1980.

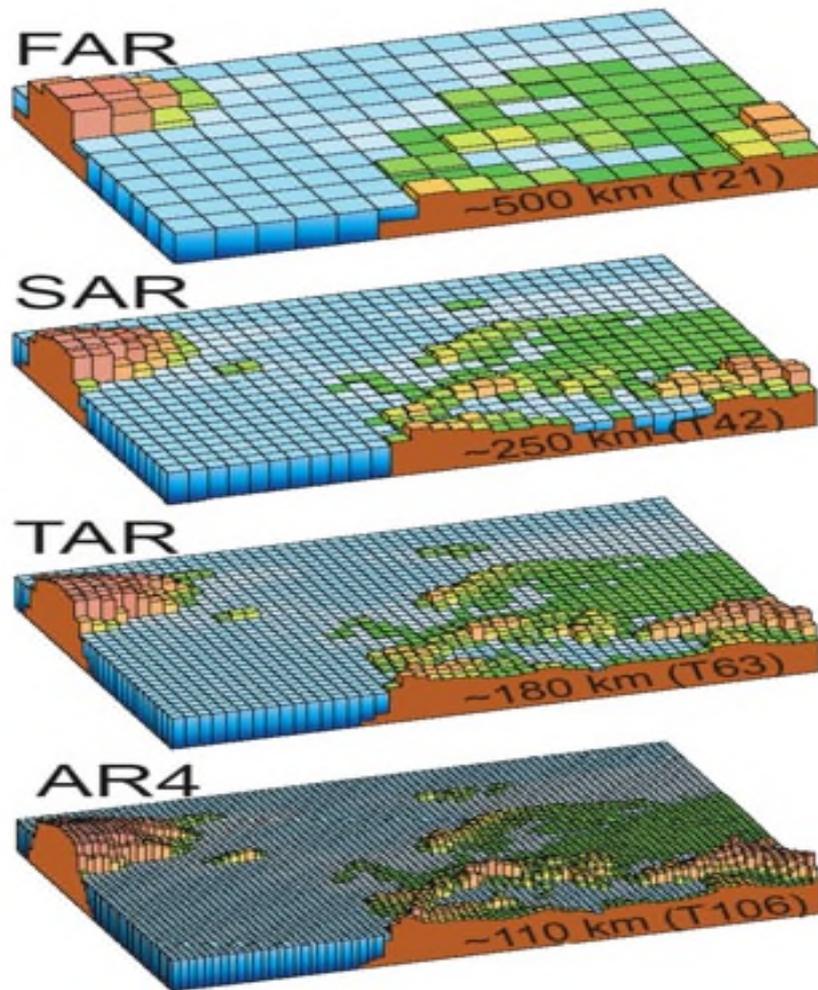


Figure III.13 : Evaluation de la résolution (maillage) des modèles climatiques globaux (Source : GIEC 2007)

Pour le 5ème exercice du GIEC, 33 modèles (17 centres de modélisation) fourniront des scénarios climatiques à l'échelle globale. Par rapport au 4ème exercice, la résolution horizontale et verticale des modèles est augmentée d'un facteur 2 environ (c.f. tableau 1). Pour ce nouvel exercice, on note un nombre croissant de modèles considérant un cycle du carbone complet et/ou avec de la chimie des aérosols interactive.

	GIEC 4		GIEC 5	
	Résolution horizontale	Nombre de niveaux	Résolution horizontale	Nombre de niveaux
Atmosphère	1.4° à 4°	12 à 56	0.7° à 4°	18 à 95
Océan	1° à 2.5°	16 à 47	0.5° à 2°	20 à 80

Tableau III.2 : résolution des différents modèles utilisés par le GIEC lors de son 4^{ème} et 5^{ème} rapports.

Enfin, en termes de régionalisation des scénarios climatiques, les données issues des simulations des modèles climatiques globaux couplés océan-atmosphère du GIEC-5 alimenteront le projet CORDEX (Coordinated Regional Downscaling Experiment) qui devrait livrer plus d'une vingtaine de scénarios « haute-résolution » (50 km ou moins) couvrant un certain nombre de régions du globe dont une grande région d'Afrique incluant la zone COI.

❖ Un petit glossaire

Les modèles sont désignés avec des sigles différents, selon la manière dont ils sont construits et ce qu'ils prennent en compte :

- GCM signifie "Global Circulation Model", et donc en Français "Modèle de Circulation Globale". Il s'agit d'un modèle global, à larges mailles, pour donner des tendances de long terme sur de larges zones.
- AGCM signifie "Atmospheric Global Circulation Model". Il s'agit d'une catégorie particulière de GCM, qui ne prend en compte que l'atmosphère. Cela ne donne des prédictions valables que tant que les autres composantes (sols, océans, glaces) ne bougent pas, et en pratique il s'agit des modèles utilisés pour les prévisions météo.
- AOGCM signifie "Atmospheric Oceanic Global Circulation Model". Il s'agit d'une autre catégorie de GCM, qui prend en compte l'atmosphère et l'océan.

On voit parfois aussi "Atmospheric Oceanic Global Coupled Model", car dans ces modèles non seulement l'océan est pris en compte, mais aussi les interactions entre l'océan et l'atmosphère. Ce sont ces modèles qui sont utilisés en climatologie.

- Modèle Climatique Régional (MCR) : Il s'agit d'un modèle qui calcule le climat pour une région donnée suivant le même principe que les AOGCM;
- Modèles du système Terre de complexité intermédiaire (MSTCI) : sont des modèles climatiques qui prennent en compte souvent davantage de composantes et de facteurs d'influence, par exemple le cycle du carbone.
- Modèles climatiques simples (MCS) : Les modèles climatiques simples ne décrivent que grossièrement les processus qui se déroulent dans l'atmosphère et l'océan et servent à simuler certaines propriétés du système climatique ou des processus spécifiques. (U.Neu et al. 2011)

Les modèles climatiques (couplés océan-atmosphère) utilisés aujourd'hui, prennent en compte dans leur simulation du climat plusieurs éléments dont :

- ✚ Les échanges d'énergie, en particulier sous forme de rayonnement électromagnétique, entre la terre, l'océan, l'atmosphère et l'espace ;
- ✚ Les transferts radiatifs dans l'atmosphère, c'est-à-dire la manière dont le rayonnement solaire et celui émis par la terre traversent l'atmosphère ou sont absorbés par les divers gaz à effet de serre contenus dans cette dernière ;
- ✚ La circulation de l'air dans l'atmosphère, et donc les transports d'eau associés,
- ✚ La circulation océanique, et les interactions entre océan et l'atmosphère,
- ✚ La formation et la fonte de la glace de mer,
- ✚ Les nuages,
- ✚ Les échanges de carbone entre l'atmosphère et la planète.

Un modèle climatique est composé de programmes informatiques simulant ces processus sur un maillage qui divise l'atmosphère, les océans et les couches supérieures du sol en un nombre très important de cases tridimensionnelles. Les processus à l'origine des conditions météorologiques sont recréés dans chacune de ces cases, puis intégrés pour produire une image globale.

III.5. Les méthodes de descente d'échelle « Downscaling »

L'outil premier pour étudier l'évolution du climat sous forçage anthropique est le MCGOA, couplant à l'heure actuelle le plus souvent un modèle d'atmosphère, de sol, d'océan et de banquise. Ce type de système, très complexe et coûteux en temps de calcul ne peut actuellement tourner qu'à des résolutions spatiales limitées. Alors qu'à l'heure actuelle, la résolution typique de la composante atmosphérique d'un MCGOA est de l'ordre de 110 km, les modèles d'impact nécessitent la plupart du temps des informations climatiques d'entrée à une échelle spatiale très fine, souvent inférieure à la dizaine de kilomètres, des informations ponctuelles pouvant même s'avérer parfois nécessaires.

Les études d'impact nécessitent généralement de disposer de données climatiques simulées à une échelle plus fine que la résolution actuelle des modèles de grande échelle des simulations climatiques (de l'ordre de 300 à 50 km) ou mettent en jeu des phénomènes à seuil, pour lesquels les biais des modèles sont rédhibitoires. Les méthodes de descente d'échelle permettent de descendre à des échelles plus fines de l'ordre de la dizaine de kilomètre (cf. figure ci-dessous).

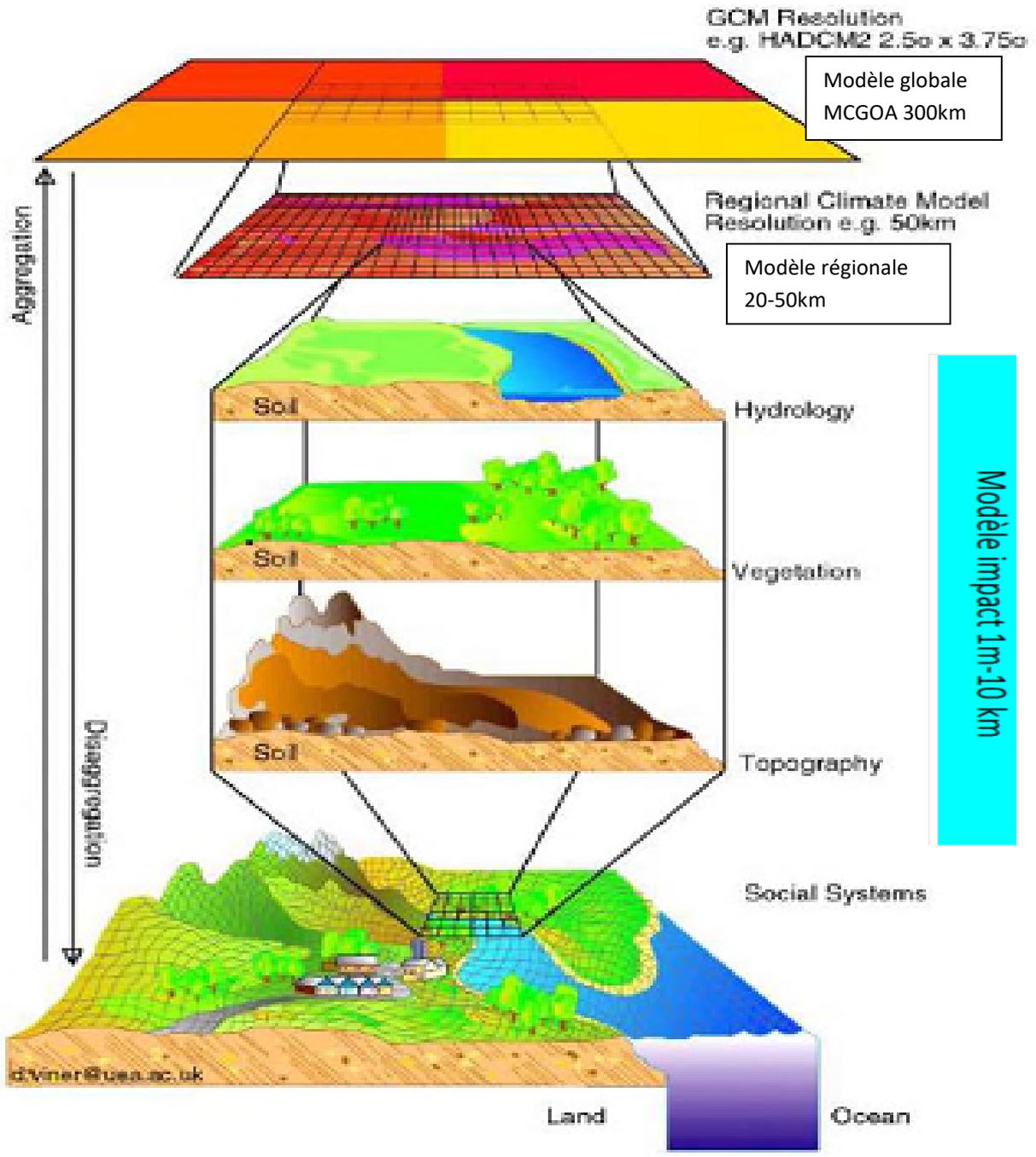


Figure III.14 : Représentation conceptuelle de la désagrégation spatiale. (Source: CRU)

Pour certaines études d'impact, le changement climatique est demandé pour des points précis correspondant aux emplacements des stations de mesure. Or, les points de grille d'un modèle représentent des valeurs moyennes sur la maille, d'où des différences parfois importantes avec les valeurs ponctuelles mesurées. Il est alors nécessaire de procéder à des descentes d'échelle, en particulier pour étudier les extrêmes de précipitations et pour les régions à topographie complexe.

La technique de descente d'échelle n'a un sens que s'il existe un **lien entre la grande échelle et la petite échelle**. La technique de descente d'échelle doit :

- refléter les processus sous-maille
- prendre en compte les processus physiques
- apporter plus qu'une simple interpolation linéaire

Les méthodes de descente d'échelle conduisent à une augmentation artificielle de la résolution. Un calcul d'incertitude est nécessaire pour déterminer la confiance que l'on peut accorder aux résultats, ce calcul peut se faire sur la période « climat présent ». Les études d'impact doivent en particulier reposer sur plusieurs simulations (scénarios/modèles/méthodes de descente d'échelle) pour évaluer les incertitudes.

Deux approches existent en matière de méthodes de descente d'échelle :

- **l'approche dynamique** qui consiste à résoudre explicitement la physique et la dynamique du système climatique régional ;
- **l'approche statistique** qui repose sur la recherche d'une relation statistique entre les variables locales et les prédicteurs modèles.

Ces deux approches peuvent être utilisées de façon indépendante ou combinée (méthodes statistico-dynamiques). L'approche dynamique est souvent plus coûteuse en temps de calcul. L'approche statistique quant à elle nécessite de trouver une méthode adaptée au type d'impact que l'on souhaite étudier (paramètres, domaine, ...) et de disposer de données historiques sur une période suffisamment longue (10-20 ans). Mettre en œuvre deux méthodes de descente d'échelle pour un même problème est un moyen de quantifier une partie de l'incertitude.

III.5.1. L'approche dynamique de descente d'échelle

Les méthodes de descente d'échelle dynamique consistent à utiliser un modèle atmosphérique à maille variable, ou un modèle à aire limitée forcé par un modèle de grande échelle (MCG). Il existe 3 méthodes distinctes pour faire de la régionalisation climatique par une approche dynamique :

- ❖ La première méthode consiste à utiliser un modèle de circulation générale (GCM) à très haute résolution, et couvrant l'ensemble du globe.
- ❖ La deuxième solution est l'utilisation de modèles globaux dont la grille peut être basculée et étirée pour renforcer la résolution spatiale dans la zone que l'on veut étudier
- ❖ La troisième solution est l'utilisation de modèles à aire limitée (LAM: Limited Area Model en anglais). Ces modèles couvrent seulement une partie du globe, l'Afrique par exemple, et sont forcés à leurs bords par des modèles de plus faible résolution (GCM, réanalyses, ...).

III.5.2. L'approche statistique de descente d'échelle

Les méthodes de descente d'échelle statistique reposent sur la détermination de relations quantitatives entre les variables de grande échelle et les variables locales de surface. Elles sont basées sur le fait que le climat régional dépend de deux facteurs : le climat de grande échelle et les caractéristiques locales ou régionales telles que la topographie, l'indice terre/mer, le type de surface, la couverture du sol... Les méthodes statistiques permettent de mettre en évidence des relations physiquement interprétables entre les champs de grande échelle et les conditions climatiques de surface mais présentent parfois l'inconvénient d'une mauvaise représentation de la variance observée ou des phénomènes extrêmes. L'information locale ou régionale est obtenue à partir d'un modèle statistique qui relie les variables de grande échelle (prédicteurs) aux variables locales ou régionales (prédictant). Il existe un grand nombre de méthodes que l'on peut combiner entre elles : régression linéaire multiple, analyse de corrélation canonique, réseau de neurones artificiels, modèles multivariés auto-régressifs, échantillonnage conditionnel et autres méthodes basées sur les analogues, méthodes basées sur un indice de circulation potentielle de précipitations

et de circulations-types critiques, générateur de séries conditionnel, correction à l'échelle locale et descente d'échelle dynamique. Les méthodes statistiques reposent sur trois hypothèses implicites, qui s'appliquent également partiellement à l'approche dynamique :

-(H1) : Les prédictors sont des variables appropriées pour le problème étudié (climat régional/local) et sont simulés de façon réaliste par les modèles climatiques.

-(H2) : Le modèle statistique reste valable pour le climat perturbé (hypothèse de stationnarité). Cette hypothèse forte ne peut être vérifiée ou invalidée formellement. Idéalement, les données observées devraient couvrir une large palette de conditions climatiques incluant les modifications futures des prédictors climatiques.

-(H3) : Les prédictors climatiques doivent être représentatifs du signal du changement climatique.

Les méthodes statistiques ont pour avantage d'être en générale peu coûteuses en temps de calcul et d'être capables d'apporter une information localisée (ponctuelle) sur un ou plusieurs sites. La principale faiblesse est liée au fait que l'hypothèse de stationnarité (H2) ne peut être vérifiée (on suppose que les relations calculées sur le climat présent restent valides pour le climat futur). Une autre contrainte de l'approche statistique est de disposer de données homogènes sur la période observée pour permettre le calage du modèle statistique.

Il existe 3 grandes catégories de méthodes statistiques que l'on peut combiner entre elles :

- classification par type de temps
- modèle de régression
- Générateur de séries

Chapitre IV : Méthodologie et Donnée

IV.1. Approches suivies

Pour mener à bien ce projet de modélisation climatique sur le Bénin il est un portant de passer par les différentes étapes qui suivent :

1. Préparation et traitement des données d'observation des paramètres météorologiques à savoir, les données de précipitations, ainsi que les données de températures maximales et minimales quotidiennes sur la période 1961-2014
2. Téléchargement et Préparation des données issues du modèle climatique globale MCG et du modèle régional du climat MRC, de chaque paramètre sur la période 1950-2100.
3. Délimitation des zones climatiques du Bénin suivit de l'extraction des données des chaque paramètre sur les domaines délimitées
4. Mise en forme de l'ensemble des fichiers extraits par période pour chaque paramètre et de chacune des zones en un seul fichier de 1950-2100, sous un format tabulaire suivant : Year, Month, paramètre.
5. Choix des scénarios des profils représentatifs d'évolution de concentration (RCPs): Elle consiste à établir les données d'entrée pour le modèle de modélisation du climat.
6. Application du test de tendance de Mann-Kendall pour évaluer les tendances annuelles et saisonnières et leurs degrés de signification pour chaque paramètre à partir des données issues du modèle climatique régional sous le scénario RCP4.5.
7. Etape de désagrégation des scénarii climatiques globaux générés : elle consiste à appliquer les méthodes de descente d'échelle (Downscaling) sur les scénarii climatiques globaux, permettant de produire les paramètres climatiques à l'échelle locale.

IV.2. Descriptions des données utilisées dans le cadre de ce travail

Les données utilisées dans le cadre de cette étude reposent sur les séries quotidiennes de précipitation, de température moyenne, maximale et minimale observées dans les différentes stations synoptique du Bénin, ainsi que les données mensuelles projetées par le modèle régionale canadien sous les scénarii RCP4.5 et cadré sur le Bénin.

IV.2.1. Les données d'observation météorologiques des stations du Bénin

Des séries de données quotidiennes observées sur la période 1961-2005 de trois (3) stations synoptiques (KANDI, SAVE, et COTONOU), couvrant les trois zones climatiques du Bénin et en provenance de la direction de la Météorologie du Benin ont été utilisées à savoir :

- ✓ Les données quotidiennes des précipitations RR (mm)
- ✓ Les données quotidiennes de température maximale TMAX (°C)
- ✓ Les Données quotidiennes de température minimale TMIN (°C)

La station de KANDI se trouve dans la Zone1 (soudanien), la station de SAVE dans la Zone2 (soudano-guinéen), et la dernière station celle de Cotonou se trouve dans la zone3 (guinéen).

IV.2.2. les Données relatives au modèle de circulation générale MCG utilisé

L'étude de l'impact du changement climatique, requiert les données de projection future des paramètres météorologiques sur la zone concernée. Ainsi, les données issues des simulations d'un modèle de circulation générale (MCG) sont utilisées après une réduction d'échelle dans l'évaluation future du climat sur la zone. Les MCG sont disponibles sur les sites de nombreuses organisations scientifiques et institutions de recherche et académiques impliqués dans les études des changements climatique à savoir, le RCSCC (Réseau Canadien des Scénarios du Changement Climatique) et le CCMAC (Centre Canadien de la Modélisation et de l'Analyse Climatique). Un outil de

réduction d'échelle statistique a été appliqué pour réduire la résolution du MCG, il s'agit de l'outil SDSM5.2 utilisé dans le cadre de ce projet.

Le modèle SDSM exige les données climatiques (prédicteurs) préparées à partir de simulation des MCGs en tant que base pour la désagrégation d'échelle du climat local. Pour ce projet, les prédicteurs ont été téléchargés à partir du modèle couplé de quatrième génération du climat du globe CanESM2 disponible sur le site CCCma.

Les données téléchargées sont les suivants : re-analyse NCEP et les données des scénarii RCP4.5 et RCP8.5, portant la nomination BOX_010X_38Y.zip.

IV.2.3. Les données relatives au modèle climatique régionale MRC sous les scénarios RCPs utilisés

Afin de mieux étudier les impacts des changements climatiques à l'échelle régionale, beaucoup de modèles à aire limitée (MRC) ont été développés à l'intérieur des MCG, permettant de simuler le climat sur un domaine limité. Ces modèles régionaux du climat simulent le climat sous plusieurs scénarios.

Les données de MRC utilisées dans cette étude proviennent du modèle régional canadien du climat « CanRCM4 », et simulées sous le scénario RCP4.5. Ces données sont d'analyses et de projections climatiques.

Pour ce projet on a téléchargé les données historiques à partir de « AFR-44 CCCma-CanESM2 historical », c'est-à-dire les données de la région Africaine, avec une résolution horizontale de 0.44° (environ 50km), de 1950 à 2005 nommés par exemple : (pr_AFR-44_CCCma-CanESM2_historical_r1i1p1_CCCma-CanRCM4_r2_mon_195001-195012.nc). Ainsi que les données de projection à partir de « AFR-44 CCCma-CanESM2 rcp45 », qui sont les profils représentatifs d'évolution de concentration RCP4.5, de 2006 à 2100 nommés (pr_ARF-44_CCCma-CanESM2_rcp45_r1i1p1_CCCma-CanRCM4_r2_mon_200601-201012.nc). Les données téléchargées sont :

- ✓ Données historiques et de projection de précipitations mensuelles ;
- ✓ Données historiques et de projection de température maximale mensuelle ;
- ✓ Données historiques et de projection de température minimale mensuelle ;

IV.3. Traitement des données

Les données d'observation de 1961 à 2005 envoyées par la Direction nationale de météorologie du Bénin (DNM-Bénin), sous format texte ont été transformées en format csv et traitées et mise en forme sous le logiciel R, pour être adaptées au exigence du modèle SDSM5.2 en tant que prédictants. Ces fichiers de données d'observation sont organisés sous forme de lignes, c'est-à-dire que chaque ligne contient des données quotidiennes pour un mois de chaque année. Ces données doivent être converties en une seule colonne (c'est-à-dire les valeurs des données seulement) pour être compatibles avec SDSM. Il faut en exclure les renseignements sur la date. On examine les données quotidiennes observées à propos de l'exemple de Blogsville pour s'assurer qu'on comprenne bien la structure du fichier nécessaire. On reformate les données à l'aide d'un langage de programmation comme le logiciel R utilisé pour ce projet, FORTRAN, ou d'un tableur comme Microsoft Excel. Lorsque les données sont bien formatées, on doit s'assurer que SDSM reconnaît le format ou le code utilisé pour identifier les valeurs manquantes dans l'ensemble de données. Pour ce faire, il suffit d'entrer le code exact dans la fenêtre **d'identification des données manquantes** sur l'écran des **réglages**. Le script exécuter sous R pour cette opération sera présenté dans l'annexe.

En ce qui concerne les données issues du modèle régional canadien du climat, après les avoir téléchargées sur domaine Africain, il y a lieu de les extraire suivant chaque zone climatique du Bénin. L'extraction a été faite grâce à un programme exécuté sous R, l'extraction s'est déroulée suivant ces étapes :

- ✚ 1^{re} étape : rendre lisibles des fichiers à extension « .nc » (format NETCDF), à l'aide du logiciel (PANOPLY)
- ✚ 2^{ème} étape : délimitation des différentes zones climatiques du Bénin à savoir :
 - ✓ Zone1 : climat soudanien (entre 9.68 et 12.32 de latitude nord et les longitudes 0.45 et 4.4)
 - ✓ Zone2 : climat soudano-guinéen (entre 7.48 et 9.68 de latitude nord et de même longitude)
 - ✓ Zone3 : climat guinéen (entre 6.16 et 7.48 de latitude nord)
- ✚ 3^{ème} étape : établissement du script d'extraction sous le logiciel R et exécution du script pour chaque paramètre téléchargé et sur chaque zone.

- 4^{ème} étape : Enregistrement des données extraites sous le format (.CSV) lisible sous Excel

Les fichiers extraits en format CSV par période (195001-195012 jusqu'à 209001-210012), pour chaque paramètre ont été fusionnés, afin qu'on obtient un seul fichier par paramètre (exemple : pr_195001-210012_zone.csv) pour chaque zone. Ceci facilite la tâche pour exécuter un autre script sous R pour calculer les cumuls annuels et saisonniers pour la précipitation et les moyennes annuelles et saisonnières pour les températures.

IV.4. Formalisme de présentation des résultats

Il y a lieu ici d'analyser pour l'ensemble des modèles climatiques, les changements projetés sur différentes périodes pour chaque zone climatique.

Pour chaque région on dispose de :

- Une évolution annuelle et saisonnière de l'indice climatique (Tmax, Tmin, et RR) représentée sous forme graphique.
- A la fin, un tableau illustrant les statistiques des tendances des principaux paramètres simulés sur différentes échelles temporelles (annuelle et saisonnière (NDJF, MJJA)) ainsi que les valeurs moyennes de chaque paramètre a été dressé.

Le résultat fourni par le modèle qui illustre une tendance significative que pourrait subir une variable donnée pendant la période d'intérêt est un résultat non optionnel puisqu'il est la réponse fournie par le modèle à la question la plus importante, à savoir l'impact du forçage sur l'évolution future de la variable (croissance, décroissance ou sans effet).

- Une analyse de tendance de type Mann-Kendall a été réalisée pour chacune des séries.
- Les résultats de ces analyses de tendance ont été classés selon des tendances statistiquement significatives par un signe placé au côté droit du chiffre à savoir (***) : significative à 99.9 % ; ** : significative à 99% ; * : significative à 95% ;

+ : significative à 90% ; pas de signe : inférieure à 90%) détectées ou non pour chacune des séries.

- Ainsi on définit par : un signe placé au côté gauche du chiffre à savoir ('+' : si une tendance positive est détectée; et '-' : si une tendance négative est observée.). Si la valeur est nulle cela signifie qu'aucune tendance significative n'est détectée.

Chapitre V : Outils de la modélisation

V.1. Le test de Mann-Kendall

V.1.1. Principe du test de Mann-Kendall

Le test de Mann-Kendall sert à déterminer avec un test non paramétrique si une tendance est identifiable dans une série temporelle qui comprend éventuellement une composante saisonnière.

Pour une série temporelle on calcule pour chaque élément de la série le nombre d'éléments qui le précède et qui lui sont supérieurs et en suite on fait la somme de ces nombres. Le sens de la tendance de cette série dépend fortement de la somme calculée. La statistique du test est calculée avec une valeur critique, pour un niveau de confiance donné. La comparaison des valeurs de la série au rang qu'elles occupent, et en même temps avec la valeur critique pour un niveau de confiance donné permet de déterminer la date et le début de la tendance.

Si l'on considère un élément X_i on peut calculer le nombre n_i d'éléments Y_j qui le précède ($i > j$) tel que : $Y_i > Y_j$ et $t = \sum n_i$.

L'hypothèse nulle de ce test est qu'il y a pas de tendance. Mais les trois hypothèses alternatives de tendance négative, non nulle ou positive peuvent être choisies.

La loi de distribution sous l'hypothèse nulle est asymptotiquement une loi normale :

Sa moyenne est $E(t) = \frac{n(n-1)}{4}$

Et de variance $var(t) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72}$

Le test n'est correct que sous sa forme bilatérale.

Soit $|u(t)| = \frac{t - E(t)}{\sqrt{var(t)}}$

Alors $\alpha_1 = P(|u| > |u(t)|)$

Soit H_0 : pas de tendance

H_1 : existence d'une tendance

Si $\alpha_1 > \alpha_2$: H_0 est acceptée

Si $\alpha_1 < \alpha_0$: on rejette H_0

Le test de Mann-Kendall s'appuie également sur le tau de Kendall mesurant l'association entre deux échantillons et lui-même basé sur les rangs à l'intérieur des échantillons.

V.1.2. Test de tendance de Mann-Kendall

Dans le cas particulier du test de tendance, la première série est un indicateur temporel croissant généré automatiquement et pour lequel les rangs sont naturellement toujours croissants, ce qui simplifie les calculs.

Pour le calcul de la p-value de ce test, XLSTAT permet de calculer, comme dans le cas du tau de Kendall, un test exact s'il n'y a pas d'ex-æquo dans les rangs des séries et si les tailles d'échantillon sont inférieures à 50. Dans le cas où calcul exact n'est pas possible, une approximation normale est utilisée, pour laquelle une correction de continuité est optionnelle mais recommandée.

XLSTAT permet de prendre en compte et de supprimer l'effet éventuel d'autocorrélations dans la série. La pente de Sen est calculée le cas échéant.

V.2. L'outil de désagrégation statistique

Les outils de désagréations statistiques sont utilisés pour estimer les réponses régionales au changement global du climat. Ils sont fondés sur une hypothèse forte, celle de la conservation des liens physiques entre les variables locales climatiques à prévoir et la circulation atmosphérique à grande échelle, entre le climat présent et le climat perturbé.

On dispose aujourd'hui de trois (3) logiciels de désagrégation statistique les plus utilisés sont :

❖ **LARS-WR : Long Ashton Research Station-Weather Generator**

Cet outil est un générateur stochastique permettant de produire des séries chronologiques et météorologiques pour une zone donnée en se basant sur les caractéristiques statistiques des séries chronologiques observées. Il permet d'analyser les données d'observation pour déterminer leurs caractéristiques statistiques afin d'identifier les différences statistiquement significatives existant entre ces données, ce qui aboutit en fin à la génération des données météorologiques synthétiques.

❖ **SDSM: Statistical DownScaling Model**

C'est un logiciel hybride entre un générateur stochastique de données et une méthode de régression linéaire multiple qui facilite le développement rapide de multiples scénarii de changement climatique dans un seul site pour les variables météorologiques quotidiennes dans des conditions de forçages climatiques actuels et futurs.

❖ **ASD: Automated Statistical Downscaling**

Ce logiciel de réduction d'échelle statistique automatique est une interface graphique conviviale utilisée pour réduire les données de sortie du MCG en variables régionales ou locales. Le modèle ASD nécessite le logiciel MATLAB pour être exécutable. Un système automatisé de régression basé sur un modèle statistique de réduction d'échelle, inspiré par le modèle SDSM a été développé dans l'environnement MATLAB.

Ces outils contiennent trois méthodes statistiques de désagrégation :

- ✓ Les générateurs du temps (weather generators) : donnent l'occurrence des journées humides par exemple.
- ✓ Fonctions de transfert (transfer functions) : l'objectif est de trouver une relation directe entre les paramètres de l'échelle spatiale du MCGAO et ceux de la sous-échelle.
- ✓ Types de temps (weather typing) : le but est d'identifier un nombre de types de temps (weather patterns) qui se produisent le plus fréquemment (durée des périodes humides et sèches, probabilités des journées humides-sèches,...etc).

V1.3. Le logiciel SDSM « Statistical Downscaling Model »



Figure V.1 : L'écran de démarrage du logiciel SDSM5.2.

Le modèle de réduction d'échelle statistique SDSM est un outil d'aide à la décision conçu à l'origine par le Dr Robert Wilby et le Dr Christian Dawson au R.U, afin d'évaluer le répercutions des changements climatiques régionaux au moyen d'une technique robuste de réduction d'échelle statistique.

L'importance de la technique SDSM est qu'elle permet de produire des séries quotidiennes des paramètres météorologiques (précipitation, température, etc.) pour un ensemble de période allant à 2100, en se basant sur les entrées principales comme : les données quotidiennes d'observations (les données climatiques locales à propos de la zone d'étude pour le prédicand), données climatiques à grande échelle (ré-analyse) NCEP, et les données issues de simulation future de climat des MCG selon un scénario donné (variables prédicteurs). Cependant, la production de ces séries quotidiennes n'est possible que pour les zones où les observations sont disponibles, homogènes et fiables.

Le choix de SDSM a été fait pour ce projet d'études en se basant sur les critères suivantes :

- ✓ L'outil SDSM utilise deux méthodes de désagrégation statistique : le générateur stochastique et la régression linéaire multiple ;
- ✓ Facile à utiliser grâce à son interface simple, et en comparaison avec ASD qui utilise les mêmes méthodes de désagrégation statistique que le SDSM, mais étant donné que ASD exige l'utilisation simultanée du logiciel MATLAB rendre son utilisation plus délicate que SDSM ;
- ✓ L'utilisation très fréquente de SDSM dans ce type d'étude donne des résultats toujours satisfaisants.

Pour cette étude, la quantité des données à traiter nécessite des moyens de calcul assez puissants et des développements scientifiques importants.

V.4. Réduction d'échelle ou Downscaling par le logiciel SDSM5.2

Parmi tous les étapes de réduction d'échelle par SDSM quatre (4) sont très importants il s'agit de :

- ❖ Le contrôle de la qualité des données (Quality control). Généralement, les données provenant de stations météorologiques ne sont ni complètes et ni dépourvues d'incertitudes. Le module « **Quality Control** » permet de traiter les problèmes mentionnés ci-dessus en aidant à identifier les erreurs dans les données, détection et estimation des données manquantes et de déterminer les valeurs aberrantes. Il y a également une composante de transformation de données qui est exécutée par la fonction « **Transform** ». Grâce à celui-ci, les données peuvent être modifiées par un certain nombre de fonctions telles que logarithmiques, puissance, inverse,... etc.
- ❖ **Screen Variables** permet de sélectionner les variables prédictives. Le module Screen Variables permet un choix statistique rigoureux des prédictives en se basant sur la corrélation entre prédictives et prédictives

- ❖ Le calibrage du modèle (Model calibrate) consiste à calculer les paramètres de l'équation de régression multiple entre prédicand et prédicteurs à l'aide d'un algorithme d'optimisation. Dans cette opération la structure du modèle est choisie entre trois types : mensuel, saisonnier ou annuel. Un choix est aussi fait entre un modèle inconditionnel et un modèle conditionnel. Si le modèle est inconditionnel, un lien direct est assuré entre le prédicand et les prédicteurs. Si le modèle est conditionnel, un processus intermédiaire existe entre le prédicand et les prédicteurs (par exemple : précipitations dépendent de l'occurrence des jours humides qui dépend à son tour de l'humidité et de la pression atmosphérique).
- ❖ La génération des scénarios de changements climatiques (Scenario Generator) permet la génération des scénarios de changements climatiques à haute résolution à partir des scénarii du GCM. Après le calibrage du modèle statistique de réduction d'échelle SDSM, les scénarios de changement climatiques RCP4.5 de grande échelle CanESM2 sont utilisés comme des inputs pour produire un ensemble de séries quotidiennes pour le climat futur sur la période allant à 2100, à l'échelle de la station météorologique. Cette opération de génération des scénarios des changements climatiques se fait séparément pour chaque scénario et pour chaque paramètre météorologique (températures, précipitations, évaporation).

L'organigramme suivant représente les opérations nécessaires pour la projection des scénarii de changement climatiques à haute résolution (à l'échelle locale)

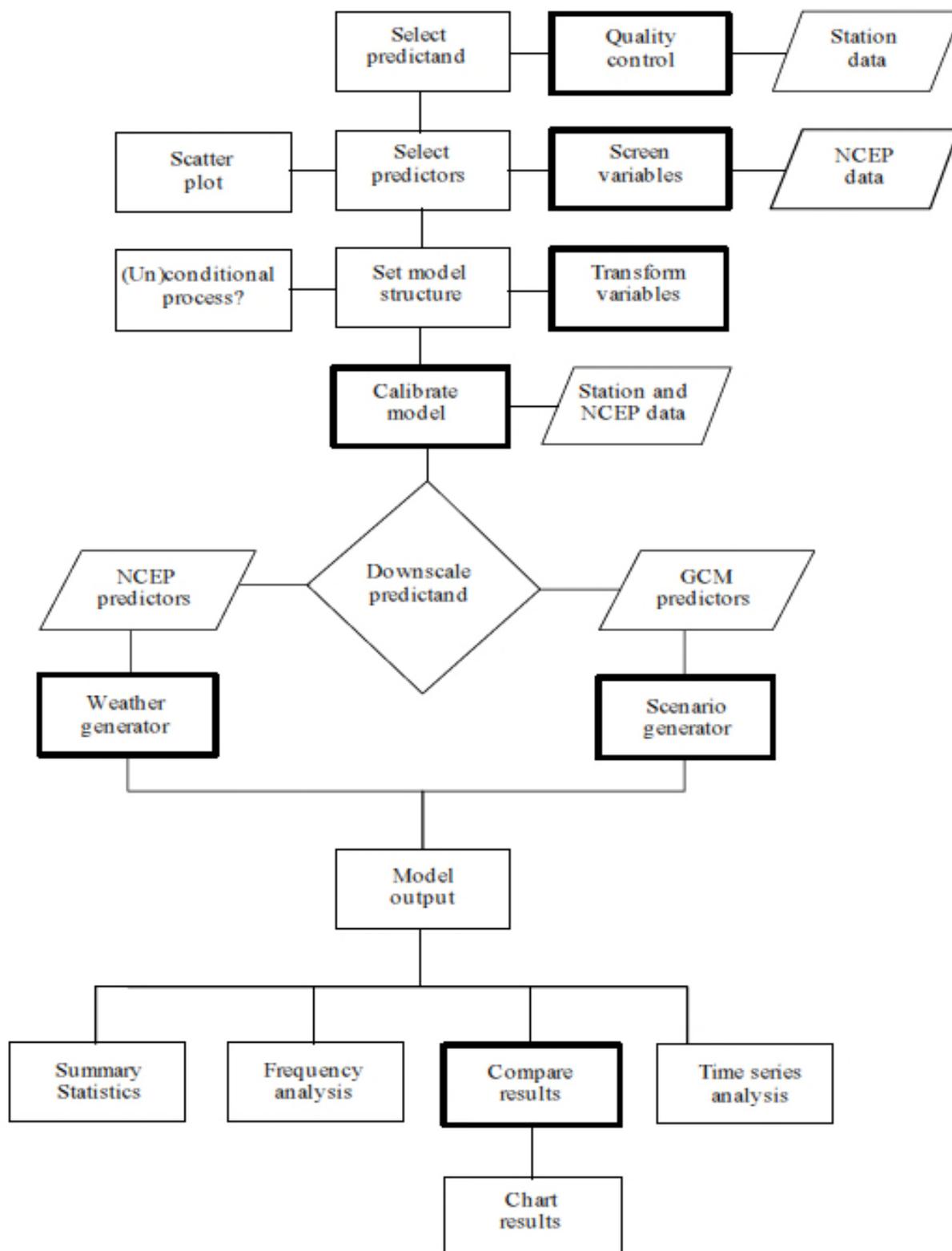


Figure V.2: SDSM Version 5.2 générateur des scénarii climatique (source : SDSM Guide)

Chapitre VI : Analyse des résultats des projections climatiques

VI.1. Analyse des résultats issus du test de Mann-Kendall sur les données du scénario RCP4.5

VI.1.1-Zone I : zone soudanienne (semi-aride)

- ❖ Tendence des séries projetées des précipitations

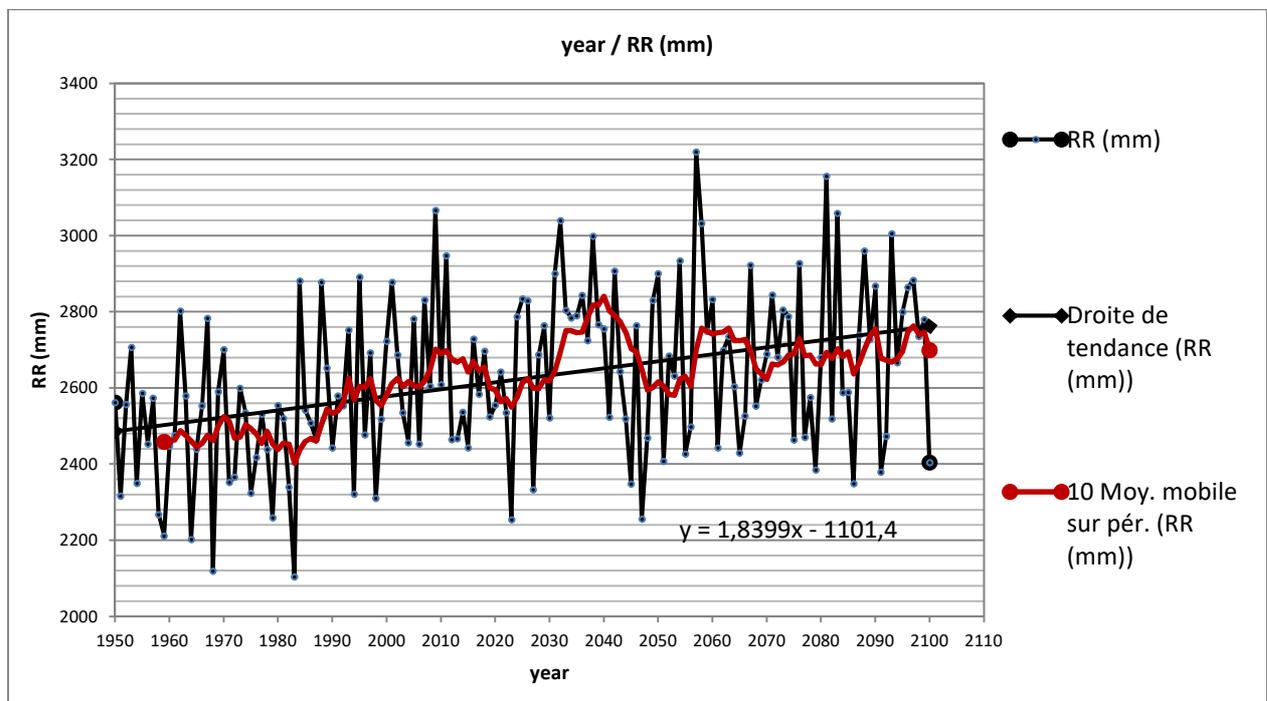


Figure VI.1: Tendence annuelle de précipitation (RR), zone soudanienne (semi-aride)

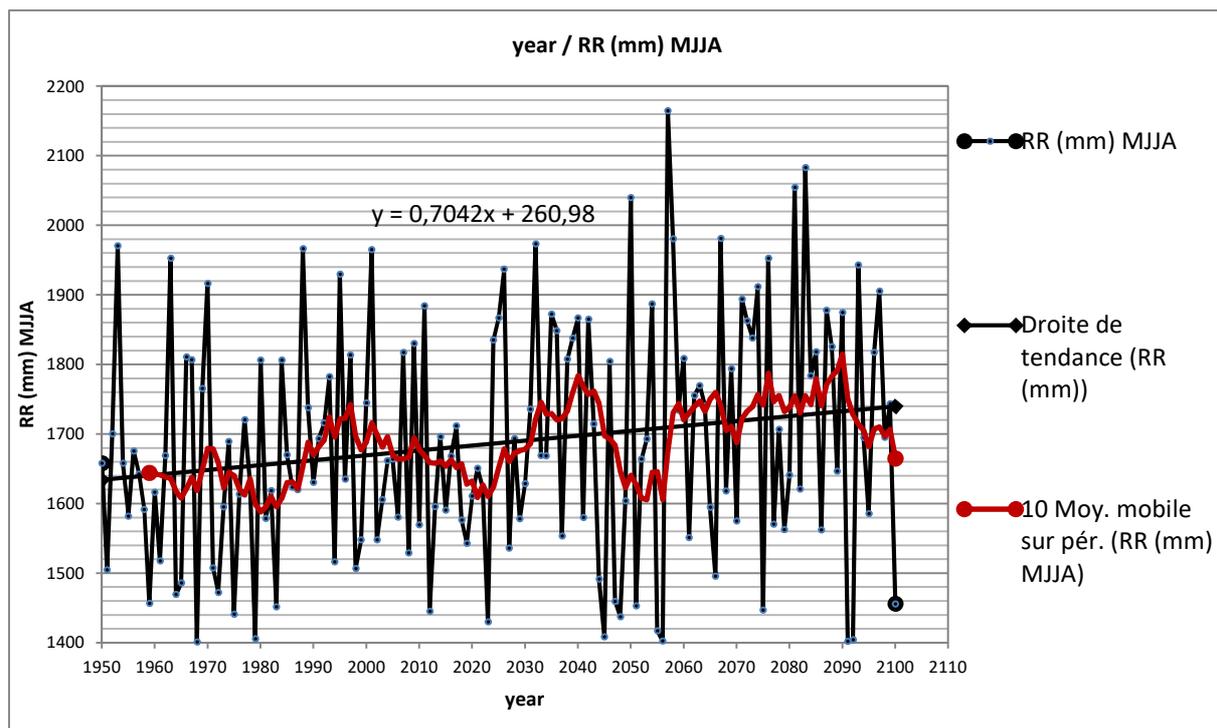


Figure VI.2: Tendence saisonnière (MJJA) de précipitation (RR), zone soudanienne (semi-aride)

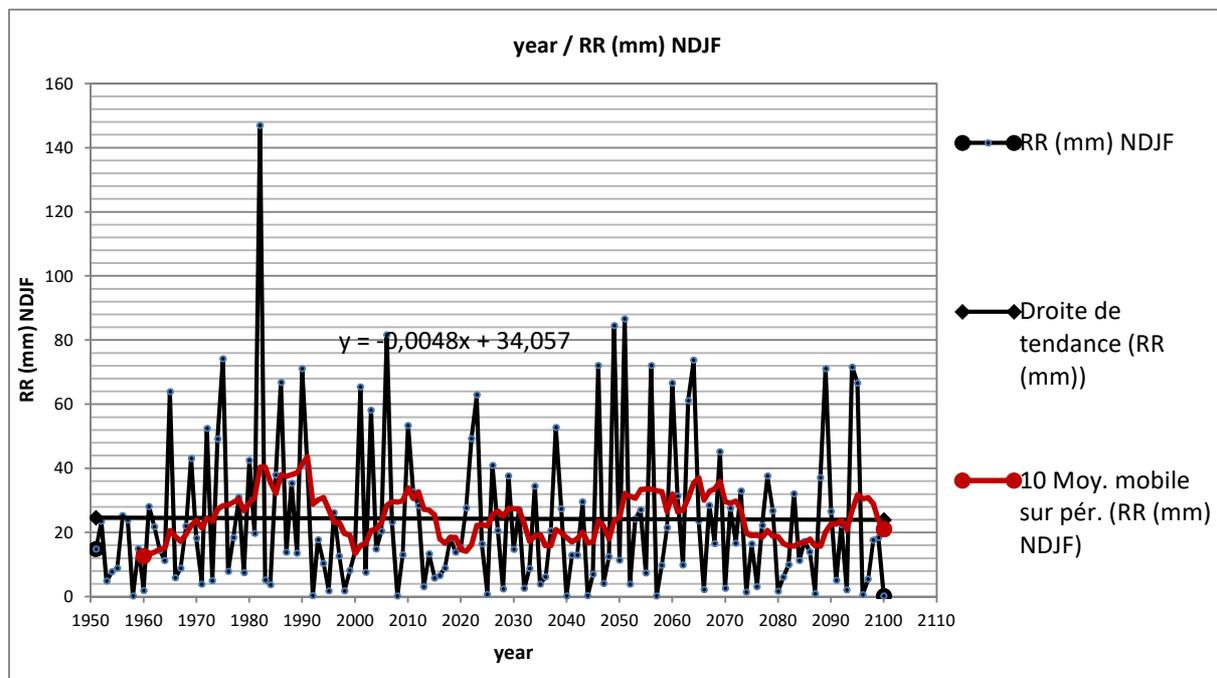


Figure VI.3 : Tendence saisonnière RR (NDJF), zone soudanienne (semi-aride)

❖ Tendence des séries projetées des températures maximales

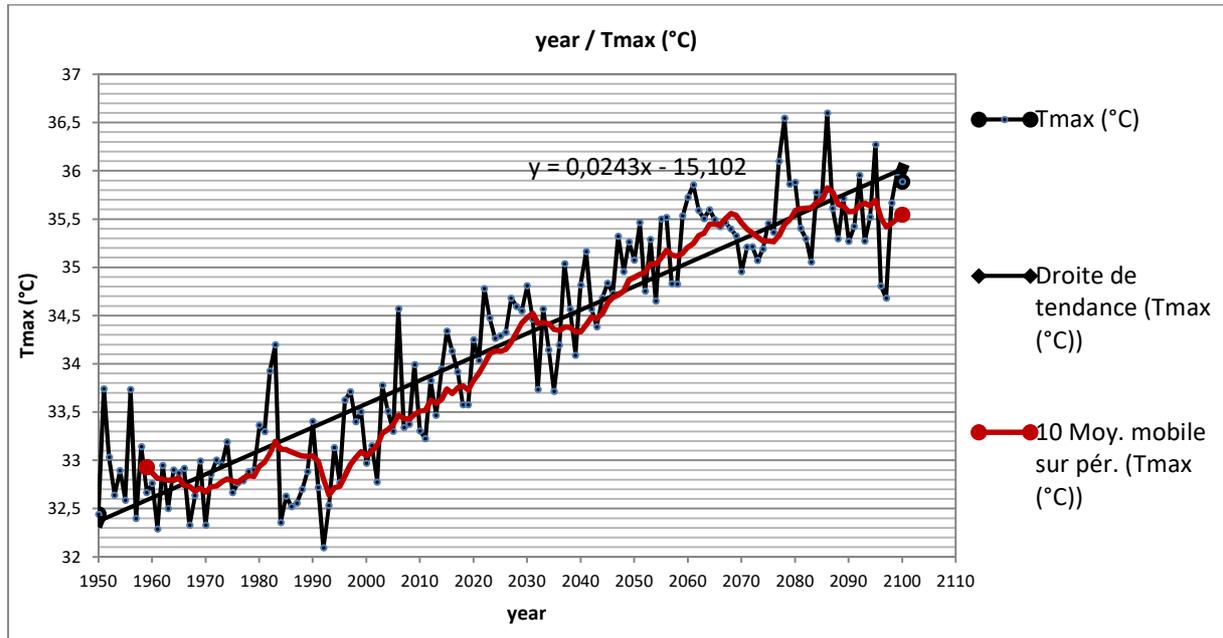


Figure VI.4 : tendance annuelle de température maximale dans la zone soudanienne (semi-aride)

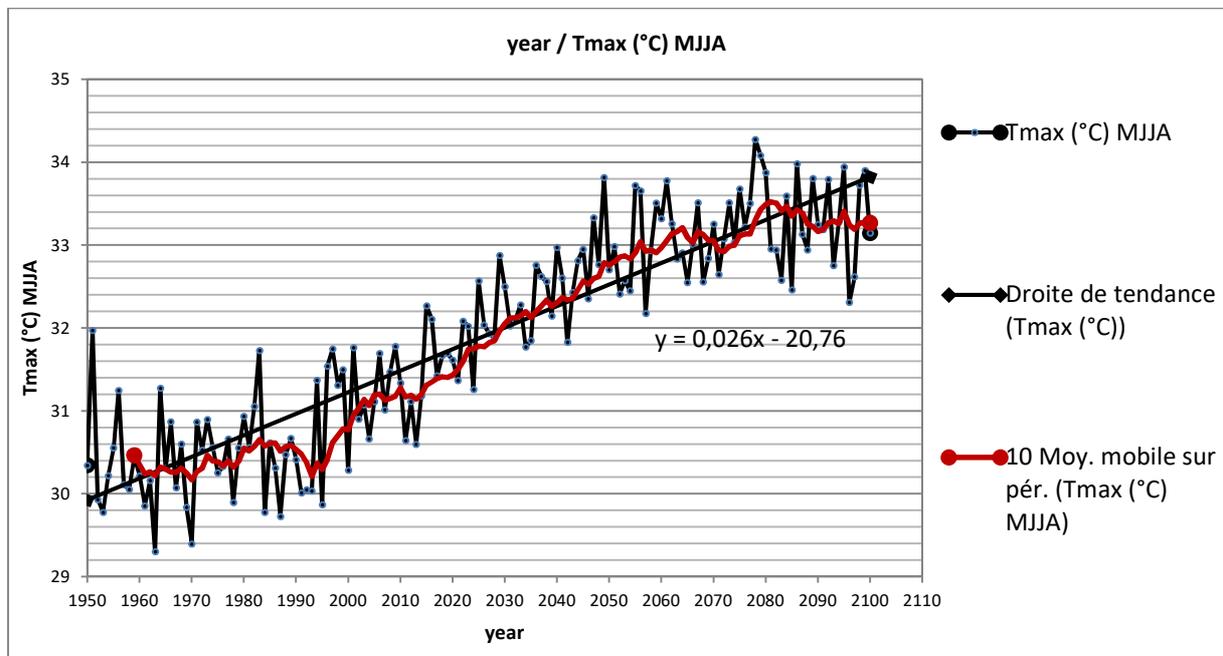


Figure VI.5: Tendence saisonnière (MJJA) de la température maximale de la zone soudanienne (semi-aride)

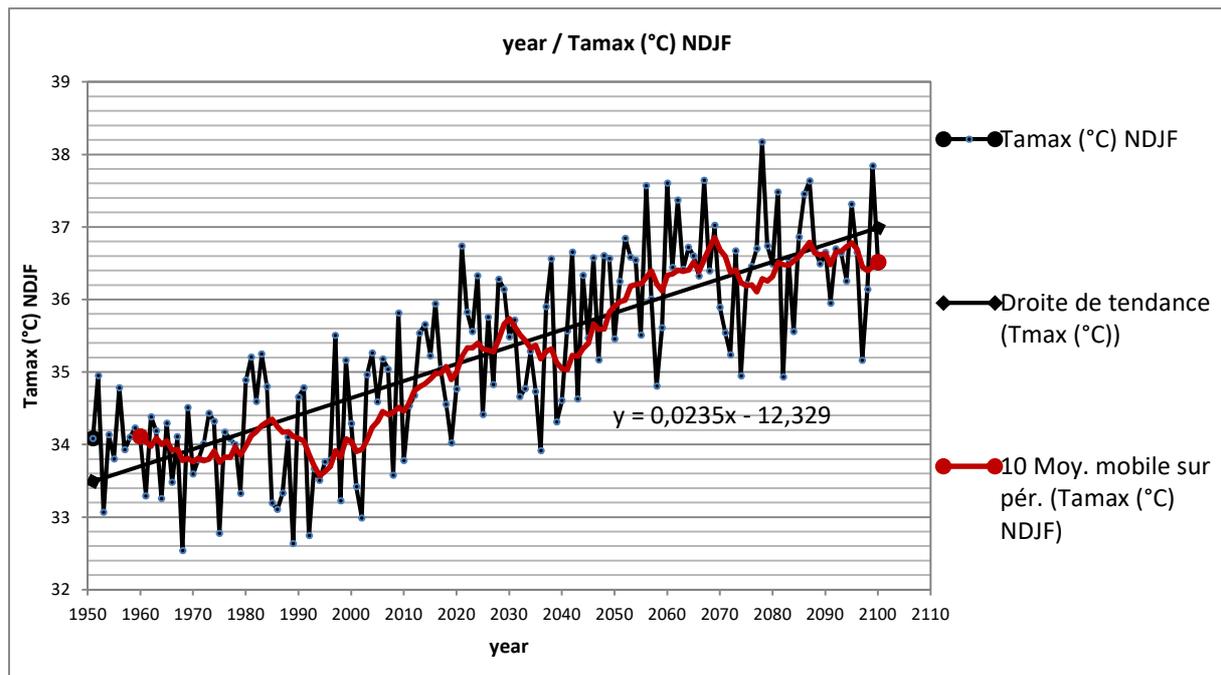


Figure VI.6 : Tendence saisonnière (NDJF) de la température maximale de la zone soudanienne (semi-aride)

❖ Tendence des séries projetées des températures minimales

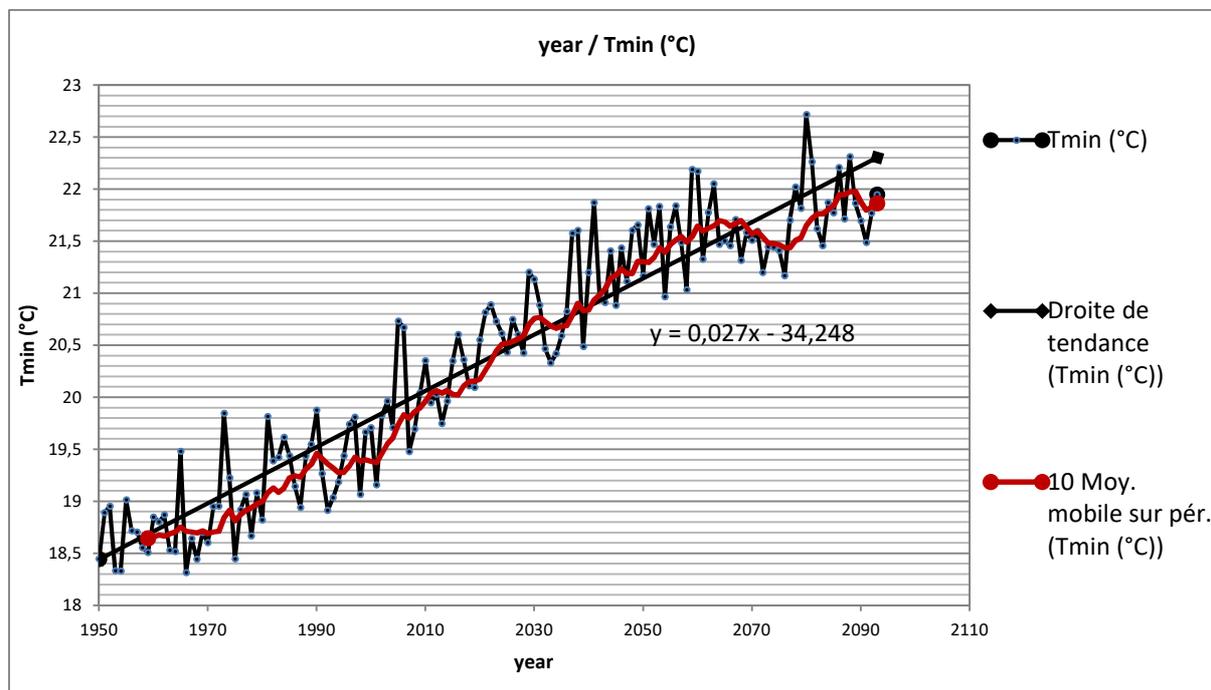


Figure VI.7 : Tendence annuelle de la température minimale de la zone soudanienne (semi-aride)

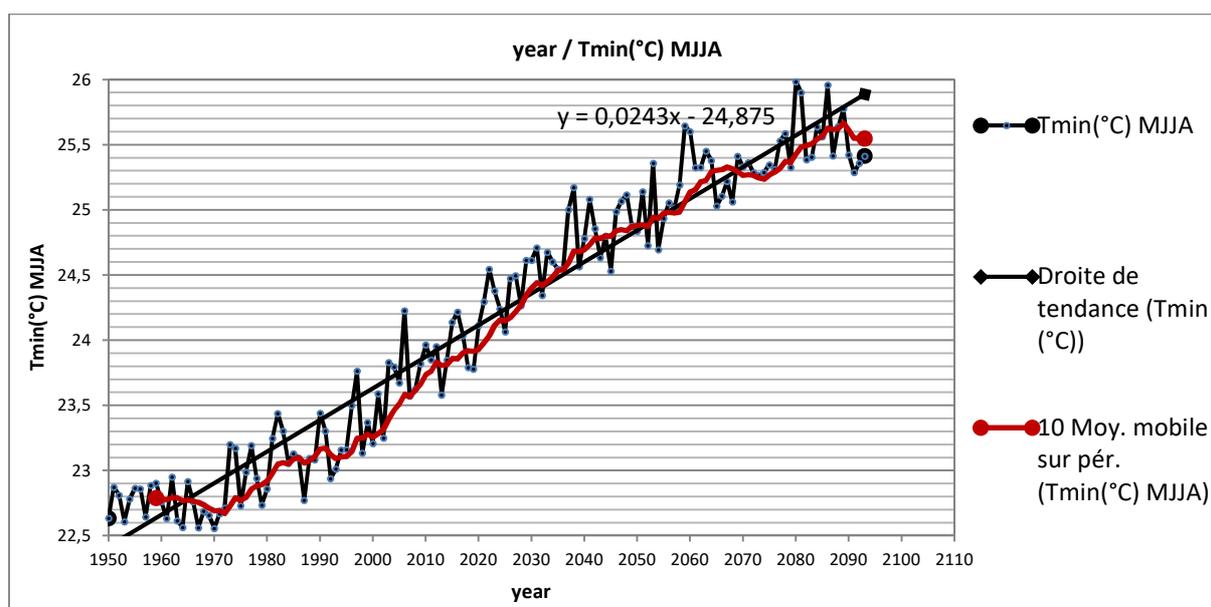


Figure VI.8 : Tendence saisonnière (MJJA) de la température minimale de la zone soudanienne (semi-aride)

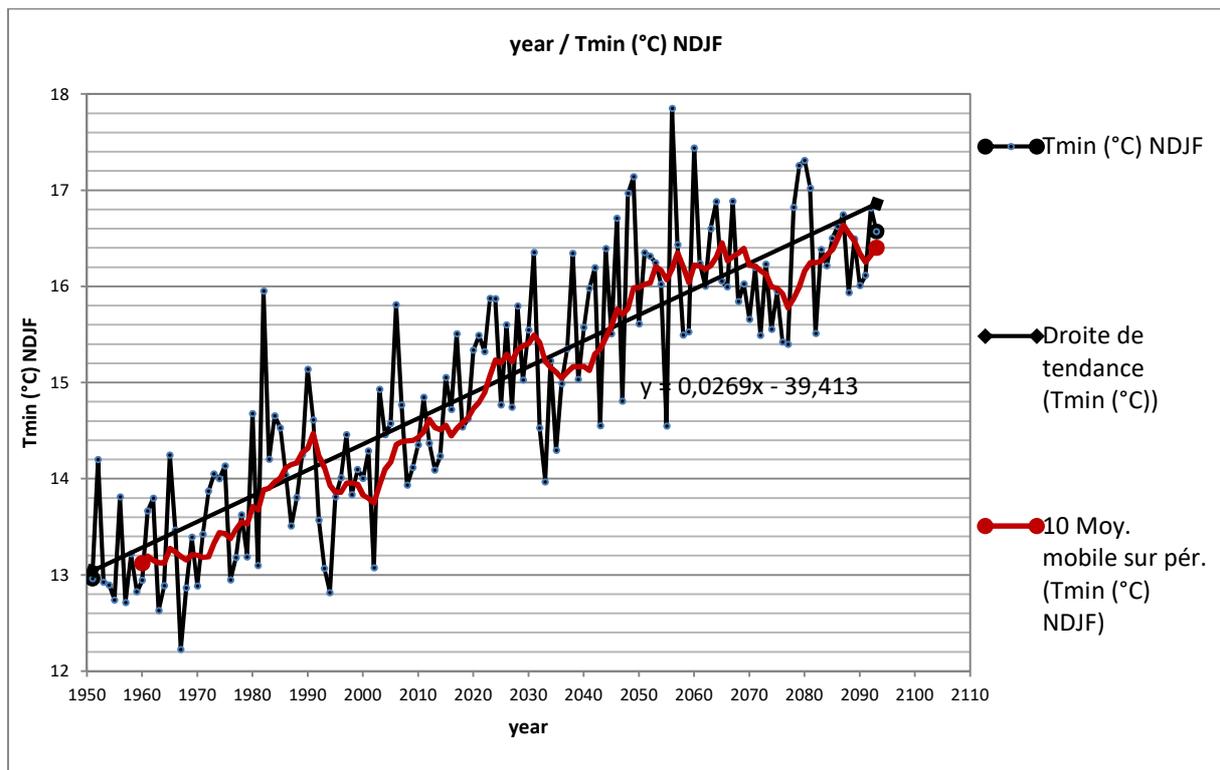


Figure VI.9 : Tendence saisonnière (NDJF) de la température minimale de la zone soudanienne (semi-aride)

a-Tendance des principaux paramètres projetés

Le tableau suivant illustre les statistiques des tendances des principaux paramètres simulés sur différentes échelles temporelles climatiques ainsi que les valeurs moyennes de chaque paramètre pour la période 2021-2050 relatives à 1961-1990 :

variable	Climat présent (1961-1990)	Mi-siècle (2021-2050)	Long-terme (2021-2050)- (1961-1990)
RR_year (mm) Tend (mm/décennie)	2498.99±196.76 +14.09	2692.19±210.64 -0.04	193.2±210.64 -0.05
RR_MJJA (mm) Tend (mm/décennie)	1646.19±159.36 +15.41	1700.74±173.53 -12.73	54.56±173.53 -12.74
RR_NDJF (mm) Tend (mm/décennie)	31.56±30.68 +7.35	23.58±22.38 -0.84	-7.98±22.39 -0.85
Tmax_year (mm) Tend (mm/décennie)	32.88±0.44 +0.14	34.57±0.41 +0.24***	1.69±0.41 +0.24***
Tmax_MJJA (mm) Tend (mm/décennie)	30.42±0.54 +0.12	32.38±0.56 +0.41***	1.96±0.56 +0.42***
Tmax_NDJF (mm) Tend (mm/décennie)	33.95±0.73 +0.08	35.56±0.82 +0.06***	1.61±0.83 +0.07***
Tmin_year (mm) Tend (mm/décennie)	19.05±0.45 +0.32	20.98±0.43 +0.27***	1.92±0.44 +0.28***
Tmin_MJJA (mm) Tend (mm/décennie)	22.93±0.27 +0.20	24.66±0.28 +0.24***	1.73±0.27 +0.24***
Tmin_NDJF (mm) Tend (mm/décennie)	13.75±0.79 +0.47	15.52±0.78 +0.29***	177±0.78 +0.30***

Tableau VI.1 : Valeurs moyennes et tendances de quelques paramètres climatiques simulés par le modèle régional Canadien sur le nord du Bénin (zone soudanienne) basées sur les moyennes pour les périodes du climat présent 1961-1990 et le mi-siècle 2021-2050. Les changements moyens à long-terme entre les périodes 1961-1990 et 2021-2050 sont également présentés. Les intervalles de variation sont représentés en valeurs d'écart-types entre les estimations du modèle. * : tendance est significative 99.9%**

Le tableau suivant illustre les statistiques des tendances des principaux paramètres simulés sur différentes échelles temporelles climatiques ainsi que les valeurs moyennes de chaque paramètre pour la période 2071-2100 relatives à 1961-1990

variable	Climat présent (1961-1990)	fin-siècle (2071-2100)	Long-terme (2071-2100)- (1961-1990)
RR_year (mm) Tend (mm/décennie)	2498.99±196.76 +14.09	2705.87±215.47 +5.70	206.79±215.48 +5.71
RR_MJJA (mm) Tend (mm/décennie)	1646.19±159.36 +15.41	1739.52±186.98 -45.72	93.33±186.99 -45.72
RR_NDJF (mm) Tend (mm/décennie)	31.56±30.68 +7.35	20.85±20.17 +1.61	-11.03±20.18 +1.62
Tmax_year (mm) Tend (mm/décennie)	32.88±0.44 +0.14	35.57±0.45 +0.04***	2.69±0.46 +0.04***
Tmax_MJJA (mm) Tend (mm/décennie)	30.42±0.54 +0.12	33.31±0.52 -0.02***	2.89±0.53 -0.02***
Tmax_NDJF (mm) Tend (mm/décennie)	33.95±0.73 +0.08	36.49±0.82 +0.19***	2.54±0.83 +0.20***
Tmin_year (mm) Tend (mm/décennie)	19.05±0.45 +0.32	21.76±0.37 +0.2***	2.71±0.37 +0.2***
Tmin_MJJA (mm) Tend (mm/décennie)	22.93±0.27 +0.20	25.50±0.22 +0.07***	2.57±0.22 +0.08***
Tmin_NDJF (mm) Tend (mm/décennie)	13.75±0.79 +0.47	16.29±0.57 +0.27***	2.54±0.58 +0.28***

Tableau VI.2 : Valeurs moyennes et tendances de quelques paramètres climatiques simulés par le modèle régional Canadien sur le nord du Bénin (zone soudanienne) basées sur les moyennes pour les périodes du climat présent 1961-1990 et le mi-siècle 2071-2100. Les changements moyens à long-terme entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100 sont également présentés. Les intervalles de variation sont représentés en valeurs d'écart-types entre les estimations du modèle. * : tendance est significative 99.9%**

b- Analyse de projection climatique des paramètres (RR, Tmax et Tmin)

Les données simulées par le modèle CanRCM4 sous le scénario RCP4.5, à l'échelle annuelle et saisonnière présentent un intervalle de variation très important. Cependant, l'analyse à l'échelle des normales climatiques, montre que par rapport à la moyenne donnée par le modèle, les écart-types des températures (minimales et maximales) sont compris entre 0.27°C et 0.79°C pour la période 1961-1990 ; 0.28°C à 0.82°C pour la période 2021-2050 ; 0.22°C à 0.82°C pour la période 2071-2100 (Tableau VI.1 et VI.2, figure VI.4 à VI.9) ; 0.27°C à 0.83°C pour la différence (2021-2050)-(1961-1990) et de 0.22°C à 0.83°C pour la différence (2071-2100)-(1961-1990). Les écart-types des précipitations et pour les mêmes périodes seront respectivement compris entre 30.68 à 196.76 mm; 22.38 à 210.64 mm; 20.17 à 215.47 mm; 22.39 à 210.64mm et 20.18 à 215.48 mm.

A l'échelle annuelle, on prévoit une hausse des températures maximales de l'ordre de +1.7°C entre 2021 à 2050 et 2.6°C entre 2071-2100 par rapport à 1961-1990, et de +1.9°C et 2.7°C pour les températures minimales et pour les mêmes périodes. À l'échelle saisonnière, on attend une augmentation de l'ordre de 1.9°C et 2.9°C respectivement pour les périodes 2021-2050 et 2071-2100 par rapport à la période 1961-1990 pour la saison MJJA ; concernant la saison NDJF, il est prévu un accroissement de l'ordre de +1.6°C entre 2021 à 2050 et 2.5°C entre 2071-2100 par rapport à 1961-1990 pour les températures maximales. Pour les températures minimales et pour les mêmes périodes, une augmentation de 1.7°C et 2.6°C est prévue pour la saison MJJA, ainsi de 1.7°C et 2.5°C pour la saison NDJF. Pour les précipitations, on s'attend qu'il y ait une augmentation non significative à l'échelle annuelle et de saison MJJA. Il est prévu une augmentation moyenne de l'ordre de 3.5% et 3.9% sur les quantités annuelles respectivement pour le période 2021-2050, 2071-2100 comparativement à la quantité recueillie entre 1961 et 1990. Les précipitations de la saison MJJA qui demeure la plus pluvieuse pour cette zone vont connaître un accroissement de 1.6% pour la période 2021-2050 et 2.7% pour la période 2071-2100 par rapport à la normale climatologique. Toutes les tendances thermiques sont significatives au niveau $P=0.01$ (c'est-à-dire 99.99%).

Les projections de ce modèle sur cette région, mettent en évidence et globalement une augmentation des températures maximales et minimales pour les

périodes 2021-2050 et 2071-2100 par rapport à la période 1961-1990 ; ainsi qu'une légère augmentation des précipitations annuelles dans la région.

VI.1.2. Zone 2 : zone soudano guinéenne (subhumide sèche)

❖ Tendances des séries projetées des précipitations

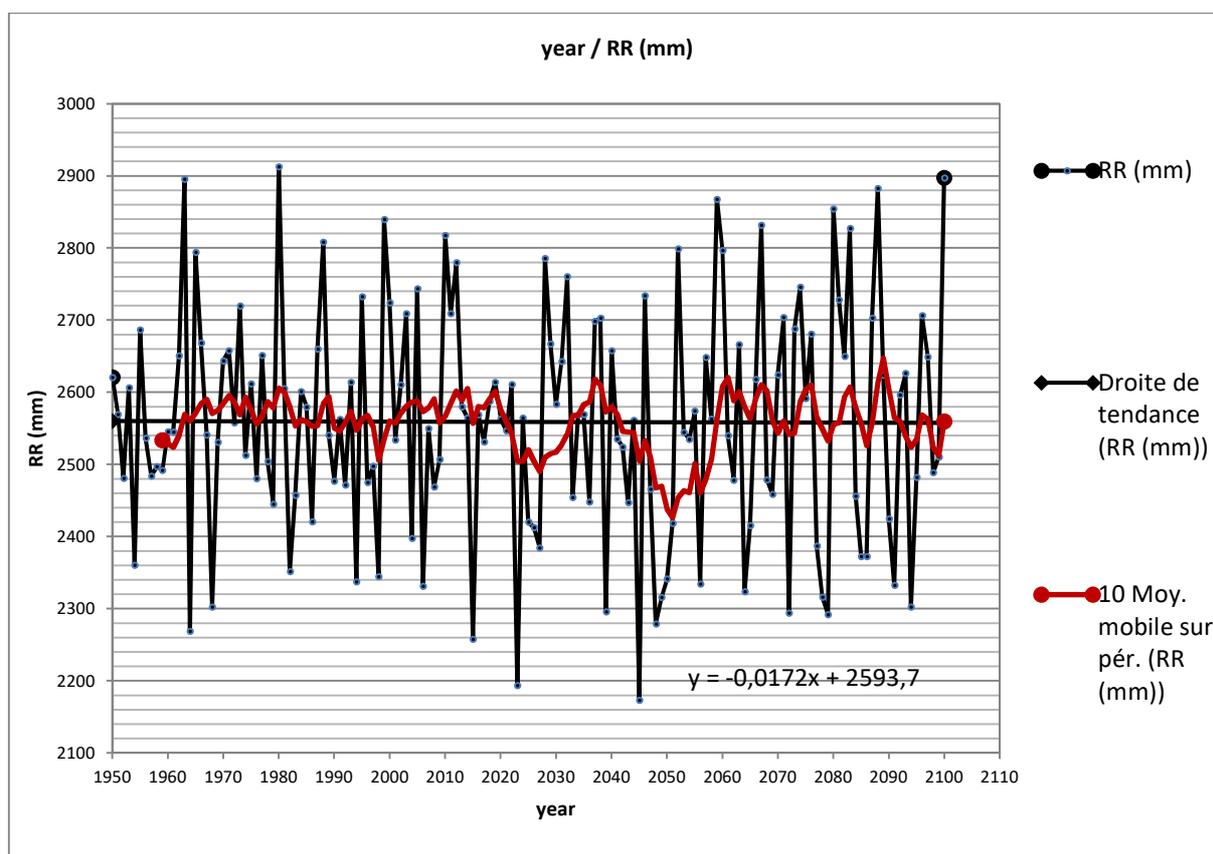


Figure VI.10 : Tendances annuelles RR, zone soudano guinéenne (subhumide sèche)

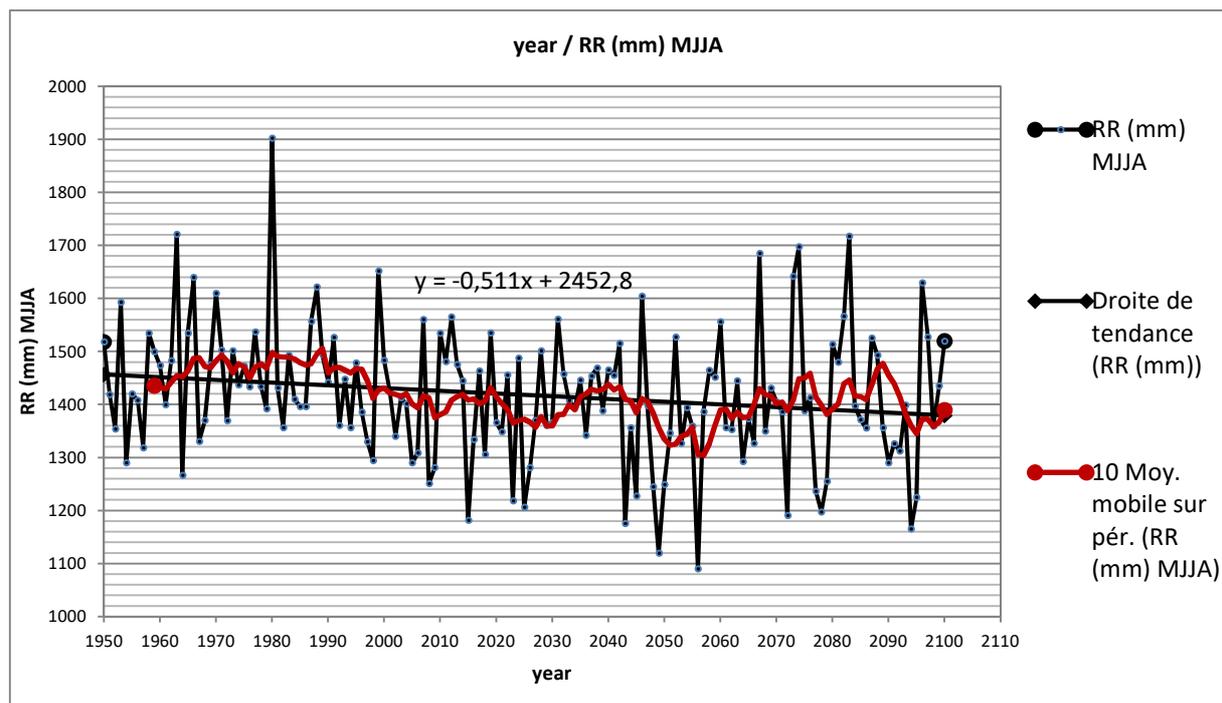


Figure VI.11 : Tendence saisonnière RR (MJJA), zone soudano guinéenne (subhumide sèche)

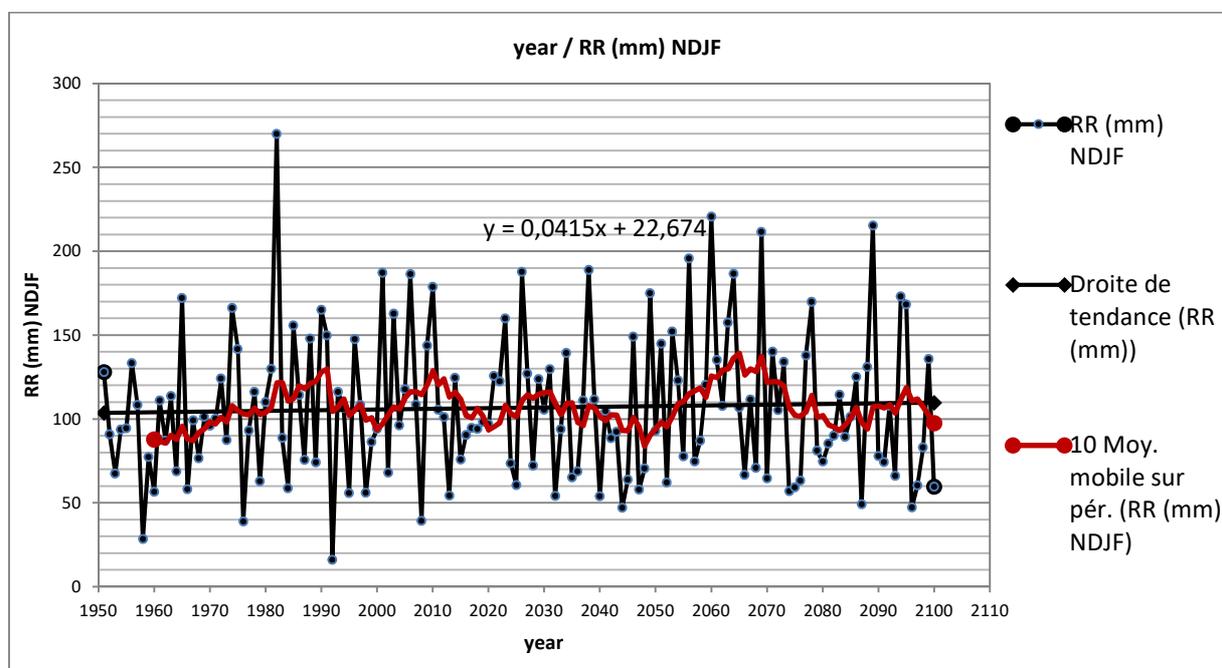


Figure VI.12 : Tendence saisonnière RR (NDJF), zone soudano guinéenne (subhumide sèche)

❖ Tendence des séries projetées des températures maximales

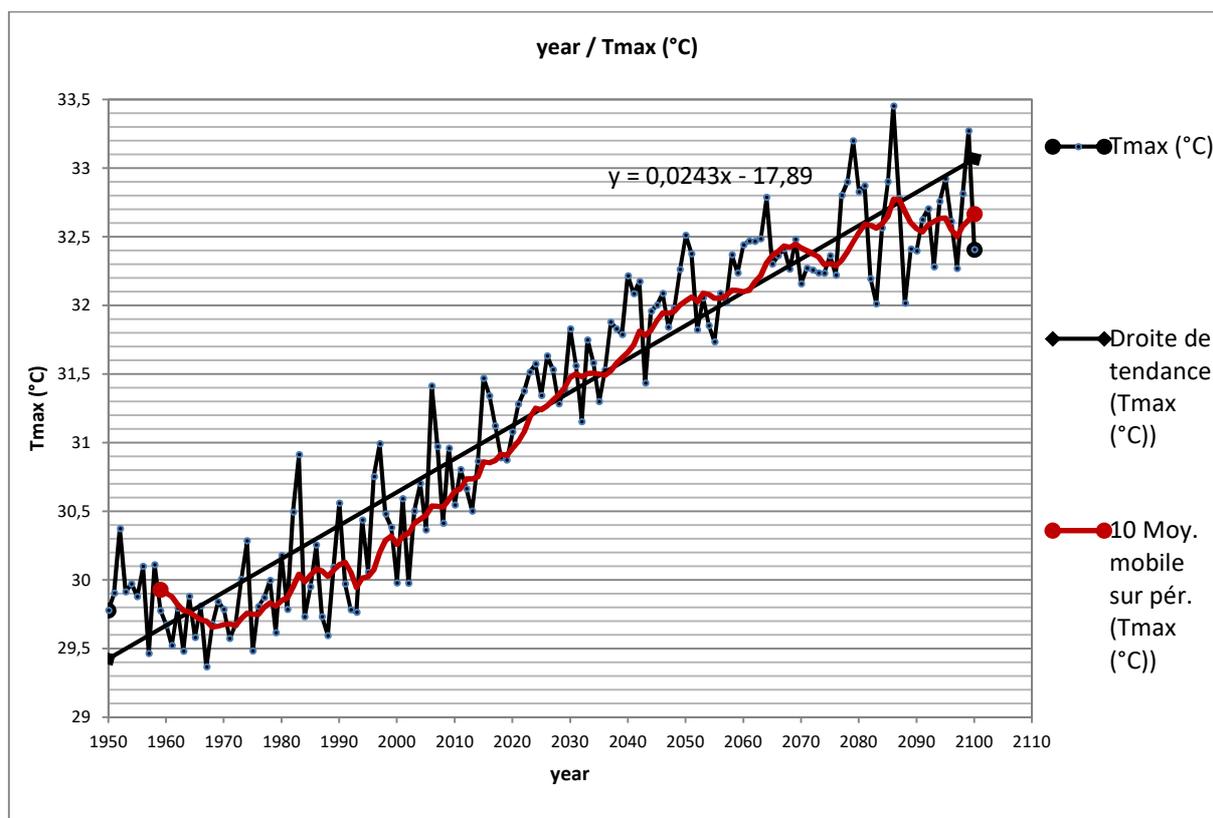


Figure VI.13 : Tendence annuelle Tmax, zone soudano guinéenne (subhumide sèche)

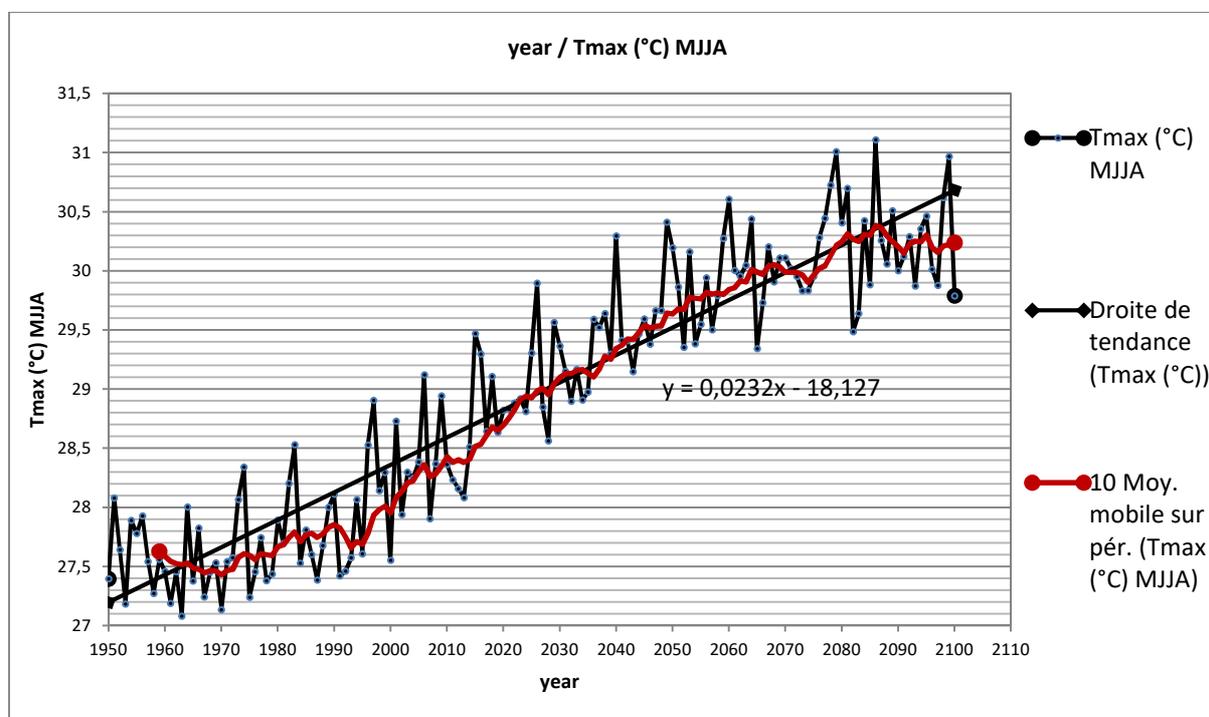


Figure VI.14 : Tendence saisonnière (MJJA) Tmax, zone soudano guinéenne (subhumide sèche)

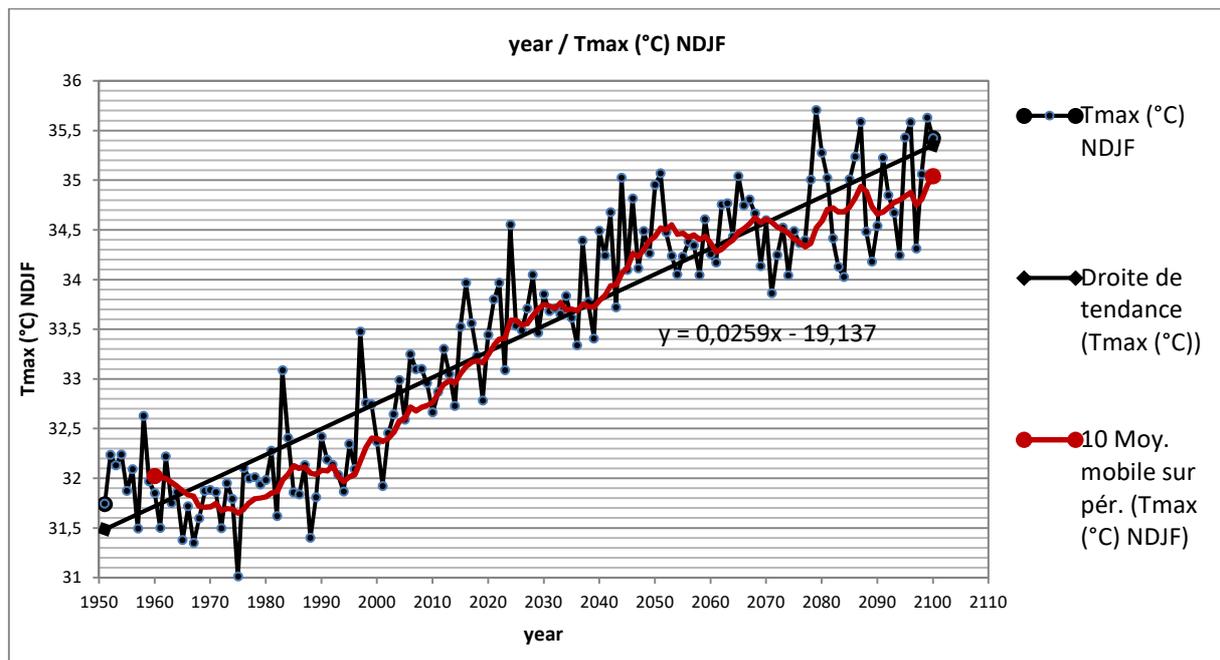


Figure VI.15 : Tendence saisonnière (NDJF) Tmax, zone soudano guinéenne (subhumide sèche)

❖ Tendence des séries projetées des températures minimales

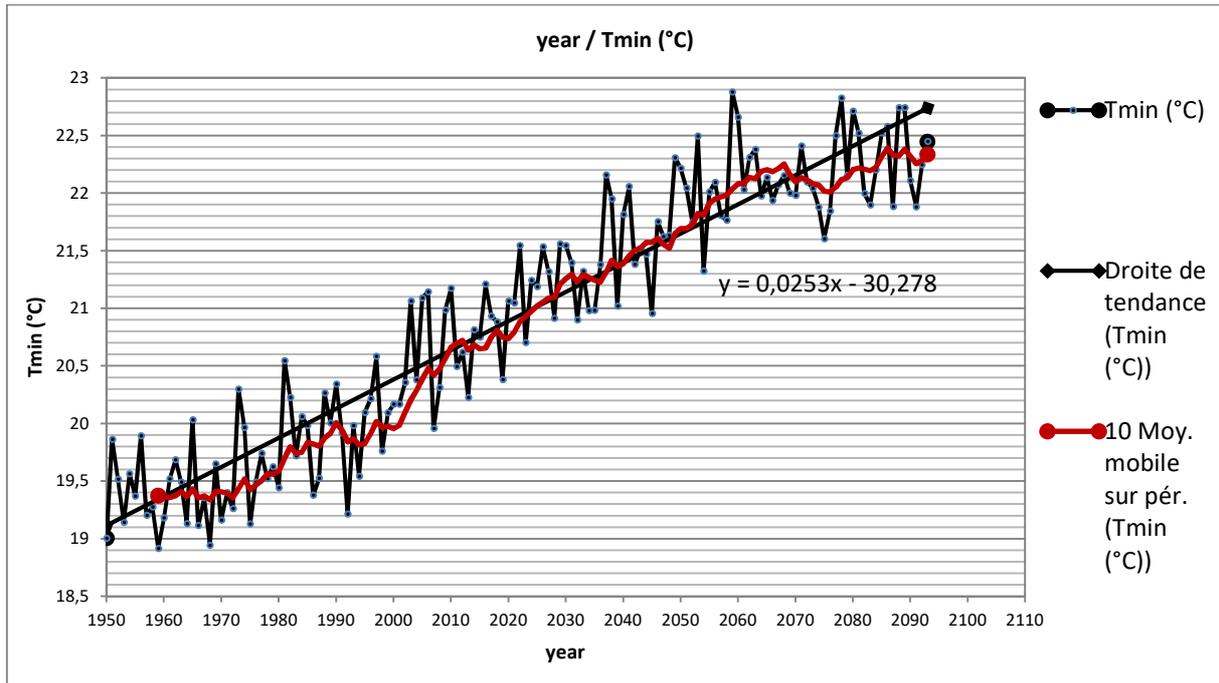


Figure VI.16 : Tendence annuelle Tmin, zone soudano guinéenne (subhumide sèche)

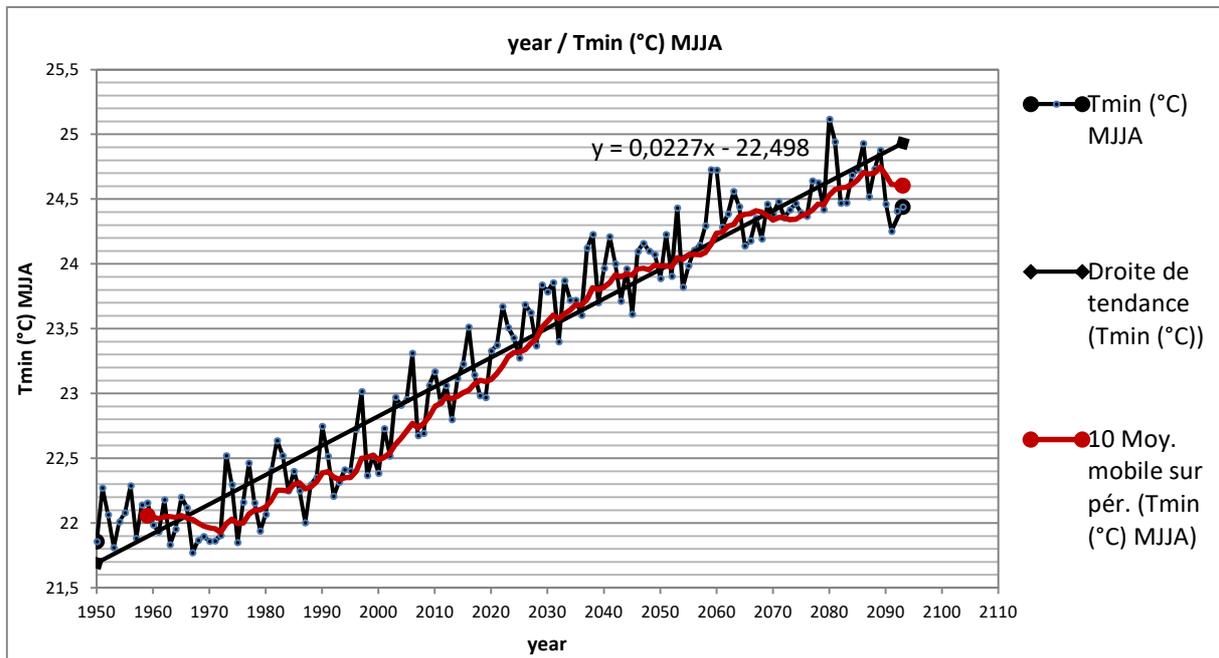


Figure VI.17 : Tendence saisonnière (MJJA) Tmin, zone soudano guinéenne (subhumide sèche)

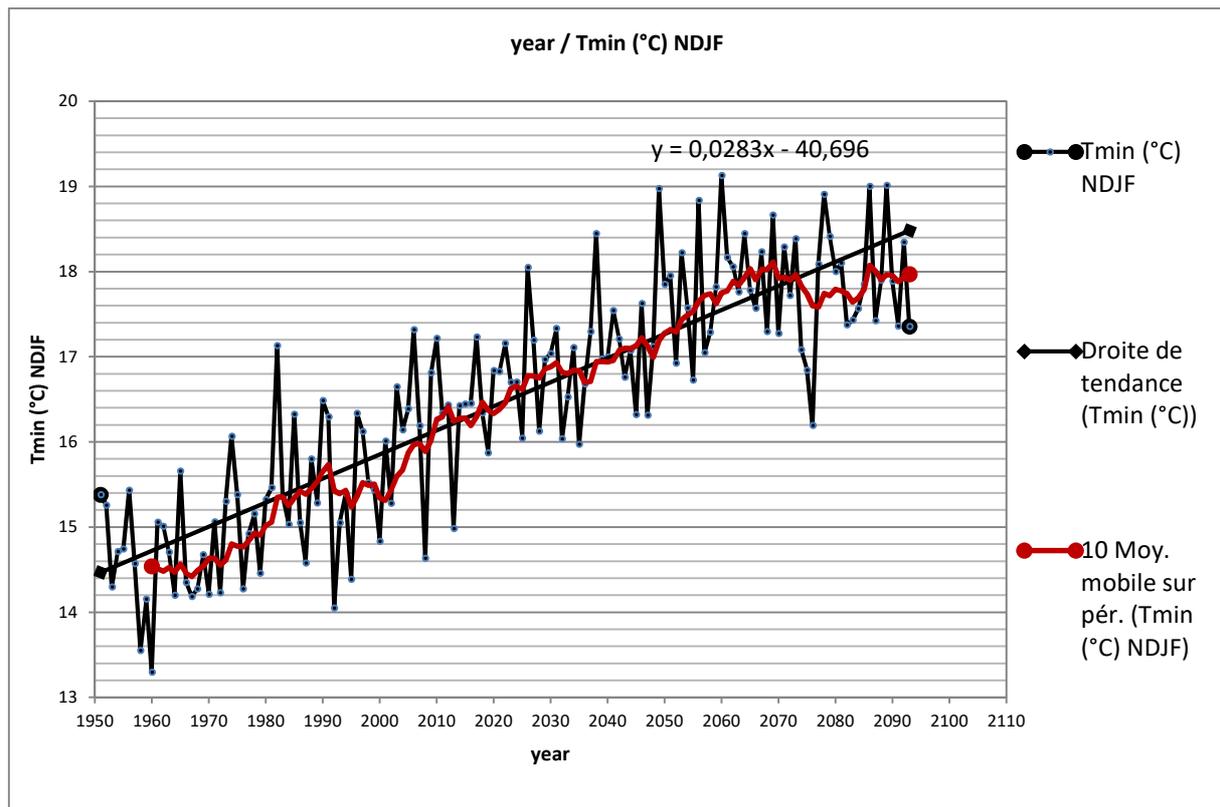


Figure VI.18 : Tendence saisonnière (NDJF) tmin, zone soudano guinéenne (subhumide sèche)

a-Tendance des principaux paramètres projetés

Le tableau suivant illustre les statistiques des tendances des principaux paramètres simulés sur différentes échelles temporelles climatiques ainsi que les valeurs moyennes de chaque paramètre pour la période 2021-2050 relatives à 1961-1990:

Variable	Climat présent (1961-1990)	Mi-siècle (2021-2050)	Long-terme (2021-2050)- (1961-1990)
RR_year (mm) Tend (mm/décennie)	2580.17±153.87 -14.15	2511.52±164.12 -40.23	-68.34±164.12 -40.24
RR_MJJA (mm) Tend (mm/décennie)	1480.32±126.37 +3.49	1377.61±118.79 -20.24	-102.70±118.79 -20.25
RR_NDJF (mm) Tend (mm/décennie)	110.08±45.86 +9.81	103.81±40.87 -8.95	-6.27±40.87 -8.96
Tmax_year (mm) Tend (mm/décennie)	29.88±0.35 +0.20	31.72±0.34 +0.29***	1.84±0.34 +0.30***
Tmax_MJJA (mm) Tend (mm/décennie)	27.65±0.36 +0.18	29.36±0.46 +0.33**	1.71±0.46 +0.35**
Tmax_NDJF (mm) Tend (mm/décennie)	31.87±0.39 +0.16	33.99±0.50 +0.32*	2.12±0.50 +0.33*
Tmin_year (mm) Tend (mm/décennie)	19.67±0.42 +0.24	21.45±0.42 +0.25*	1.78±0.42 +0.25*
Tmin_MJJA (mm) Tend (mm/décennie)	22.16±0.26 +0.18	23.79±0.27 +0.21***	1.63±0.27 +0.22***
Tmin_NDJF (mm) Tend (mm/décennie)	15.10±0.74 +0.41	17.03±0.70 +0.24	1.93±0.69 +0.25

Tableau VI.3 : Valeurs moyennes et tendances de quelques paramètres climatiques simulés par le modèle régional Canadien sur le centre du Bénin (zone soudano-guinéenne) basées sur les moyennes pour les périodes du climat présent 1961-1990 et le mi-siècle 2021-2050. Les changements moyens à long-terme entre les périodes 1961-1990 et 2021-2050 sont également présentés. Les intervalles de variation sont représentés en valeurs d'écart-types entre les estimations du modèle. * : tendance significative à 95% ; ** : tendance significative à 99% ; * : tendance significative à 99.9%**

Le tableau suivant illustre les statistiques des tendances des principaux paramètres simulés sur différentes échelles temporelles climatiques ainsi que les valeurs moyennes de chaque paramètre pour la période 2071-2100 relatives à 1961-1990:

variable	Climat présent (1961-1990)	fin-siècle (2071-2100)	Long-terme (2071-2100)- (1961-1990)
RR_year (mm) Tend (mm/décennie)	2580.17±153.87 -14.15	2573.18±187.27 +5.38	-6.99±187.27 +5.39
RR_MJJA (mm) Tend (mm/décennie)	1480.32±126.37 +3.49	1412.44±149.64 -5.46	-67.88±149.65 -5.47
RR_NDJF (mm) Tend (mm/décennie)	110.08±45.86 +9.81	102.49±42.66 -1.73	-7.58±42.67 -1.74
Tmax_year (mm) Tend (mm/décennie)	29.88±0.35 +0.20	32.59±0.37 +0.1	2.71±0.37 +0.1
Tmax_MJJA (mm) Tend (mm/décennie)	27.65±0.36 +0.18	30.23±0.41 +0.05	2.58±0.41 +0.05
Tmax_NDJF (mm) Tend (mm/décennie)	31.87±0.39 +0.16	34.76±0.55 +0.28***	2.89±0.55 +0.28***
Tmin_year (mm) Tend (mm/décennie)	19.67±0.42 +0.24	22.26±0.35 +0.10	2.59±0.35 +0.11
Tmin_MJJA (mm) Tend (mm/décennie)	22.16±0.26 +0.18	24.58±0.22 +0.04	2.41±0.22 +0.04
Tmin_NDJF (mm) Tend (mm/décennie)	15.10±0.74 +0.41	17.85±0.69 +0.12	2.75±0.69 +0.12

Tableau VI.4 : Valeurs moyennes et tendances de quelques paramètres climatiques simulés par le modèle régional Canadien sur le centre du Bénin (zone soudano-guinéenne) basées sur les moyennes pour les périodes du climat présent 1961-1990 et le mi-siècle 2071-2100. Les changements moyens à long-terme entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100 sont également présentés. Les intervalles de variation sont représentés en valeurs d'écart-types entre les estimations du modèle. * : tendance significative à 99.9%**

b- Analyse de projection climatique des paramètres (RR, Tmax et Tmin)

Les données simulées par le modèle CanRCM4 sous le scénario RCP4.5, à l'échelle annuelle et saisonnière présentent un intervalle de variation très important. Cependant, l'analyse à l'échelle des normales climatiques, montre que par rapport à la moyenne donnée par le modèle, les écart-types des températures (minimales et maximales) sont compris entre 0.26°C et 0.74°C pour la période 1961-1990 ; 0.27°C à 0.70°C pour la période 2021-2050 ; 0.22°C à 0.69°C pour la période 2071-2100 ; 0.27°C à 0.69°C pour la différence (2021-2050)-(1961-1990) et de 0.22°C à 0.69°C pour la différence (2071-2100)-(1961-1990). Les écart-types des précipitations et pour les mêmes périodes seront respectivement compris entre 45.86 à 153.87 mm; 40.87 à 164.12 mm; 42.66 à 187.27 mm; 40.87 à 164.12 mm et 42.67 à 187.27 mm.

En effet et en moyenne, à l'échelle annuelle, les températures maximales sont prévues d'accroître d'environ +1.8°C entre 2021 à 2050 et 2.7°C entre 2071-2100 par rapport à 1961-1990, et de +1.8°C et 2.6°C pour les températures minimales et pour les mêmes périodes. À l'échelle saisonnière, on s'attend à une augmentation de l'ordre de 1.7°C et 2.6°C respectivement pour les périodes 2021-2050 et 2071-2100 par rapport à la période 1961-1990 pour la saison MJJA ; en ce qui concerne la saison NDJF, il est prévu un accroissement de l'ordre de +2.1°C entre 2021 à 2050 et 2.9°C entre 2071-2100 par rapport à 1961-1990 pour les températures maximales. Pour les températures minimales et pour les mêmes périodes, une augmentation de 1.6°C et 2.4°C est prévue pour la saison MJJA, ainsi de 1.9°C et 2.7°C pour la saison NDJF. Pour les précipitations, on s'attend qu'il y ait une diminution non significative à l'échelle annuelle et de saison MJJA. Il est prévu par le modèle une diminution moyenne de l'ordre de 1.3% et 0.1% sur les quantités annuelles respectivement pour la période 2021-2050, 2071-2100 comparativement à la quantité recueillie entre 1961 et 1990. Les précipitations de la saison MJJA considérée comme la saison pluvieuse vont connaître un abaissement de 3.6% pour la période 2021-2050 et 2.3% pour la période 2071-2100 par rapport à la normale climatique. Toutes les tendances thermiques sont significatives au niveau $P=0.01$ (c'est-à-dire 99.99%).

Les projections climatiques issues de ce modèle sur cette région du centre, montrent une augmentation des températures maximales et minimales entre les périodes 2021-2050 et 2071-2100 par rapport à la période 1961-1990 ; ainsi qu'une légère diminution des précipitations annuelles dans la zone.

VI.1.3 Zone 3 : zone guinéenne (subhumide humide)

❖ Tendence des séries projetées des précipitations

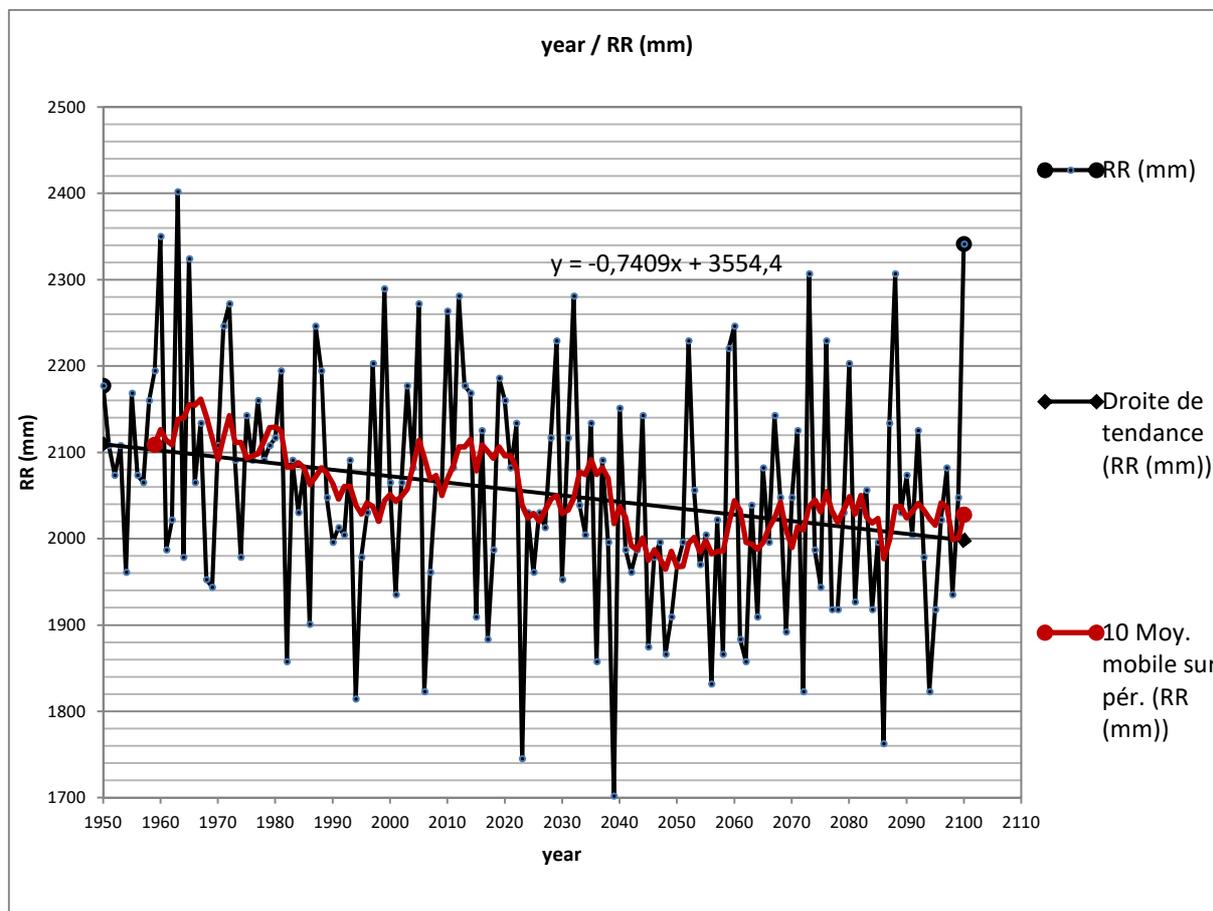


Figure VI.19 : Tendence annuelle RR, zone guinéenne (subhumide humide)

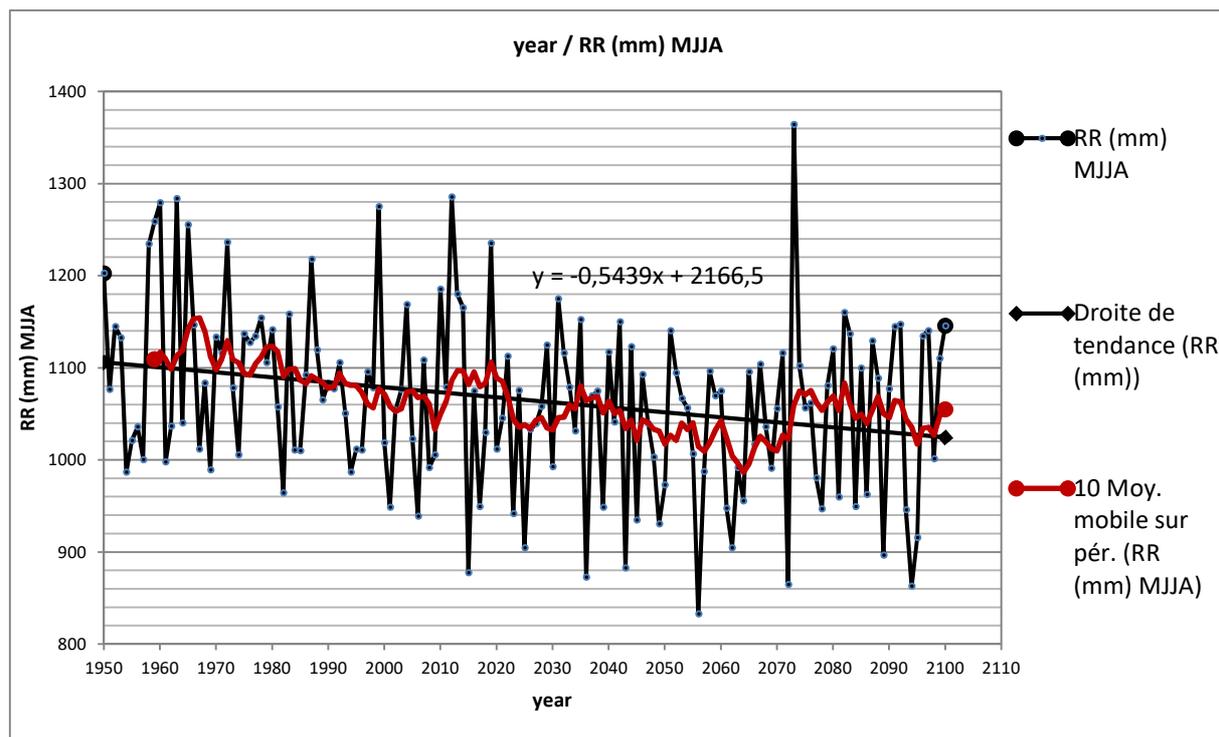


Figure VI.20 : Tendence saisonnière (MJJA) RR, zone guinéenne (subhumide humide)

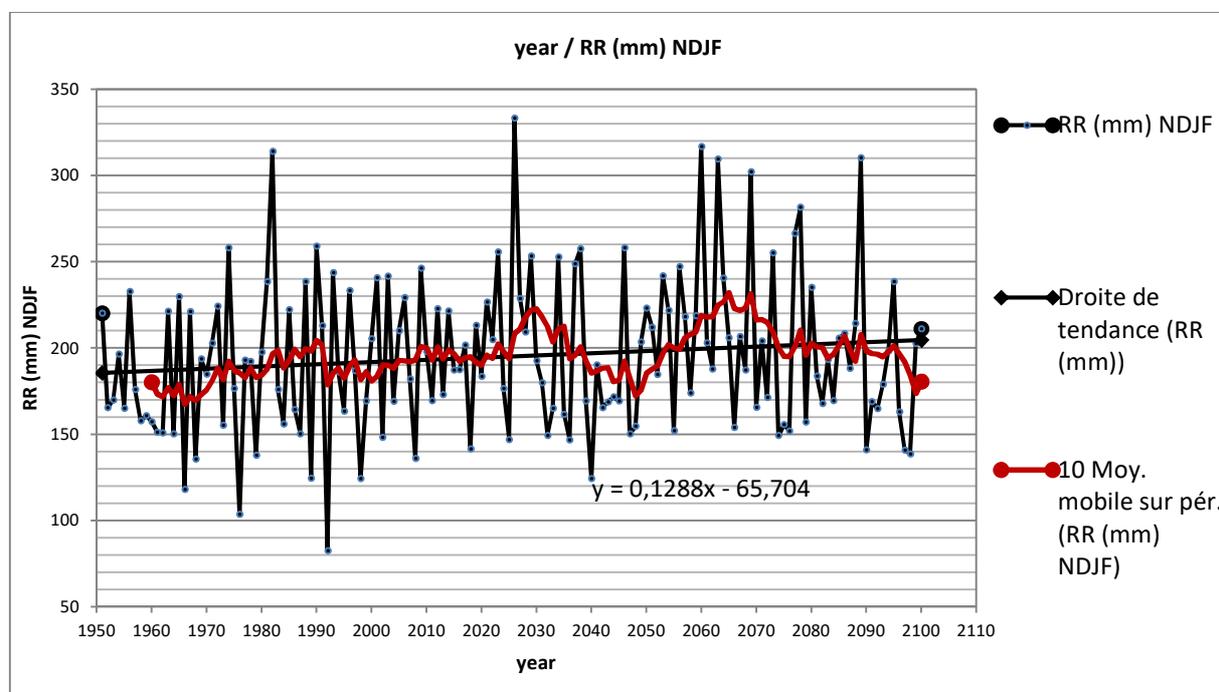


Figure VI.21 : Tendence saisonnière (NDJF) RR, zone guinéenne (subhumide humide)

❖ Tendence des séries projetées des températures maximales

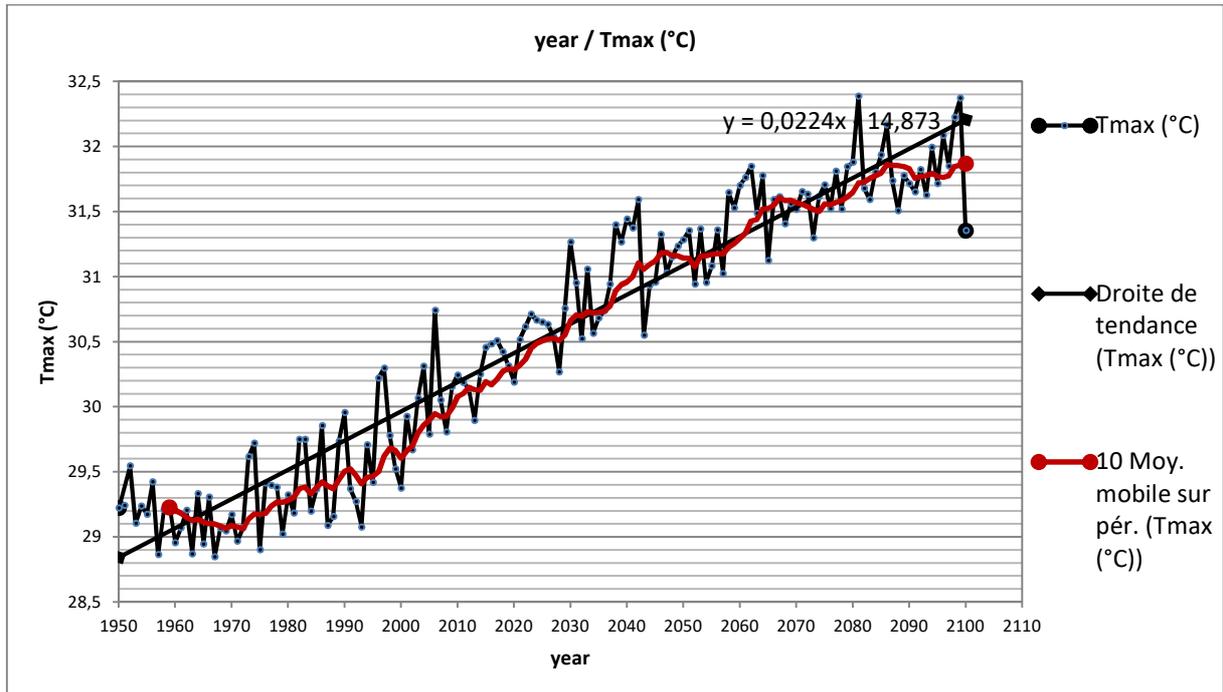


Figure VI.22 : Tendence annuelle Tmax, zone guinéenne (subhumide humide)

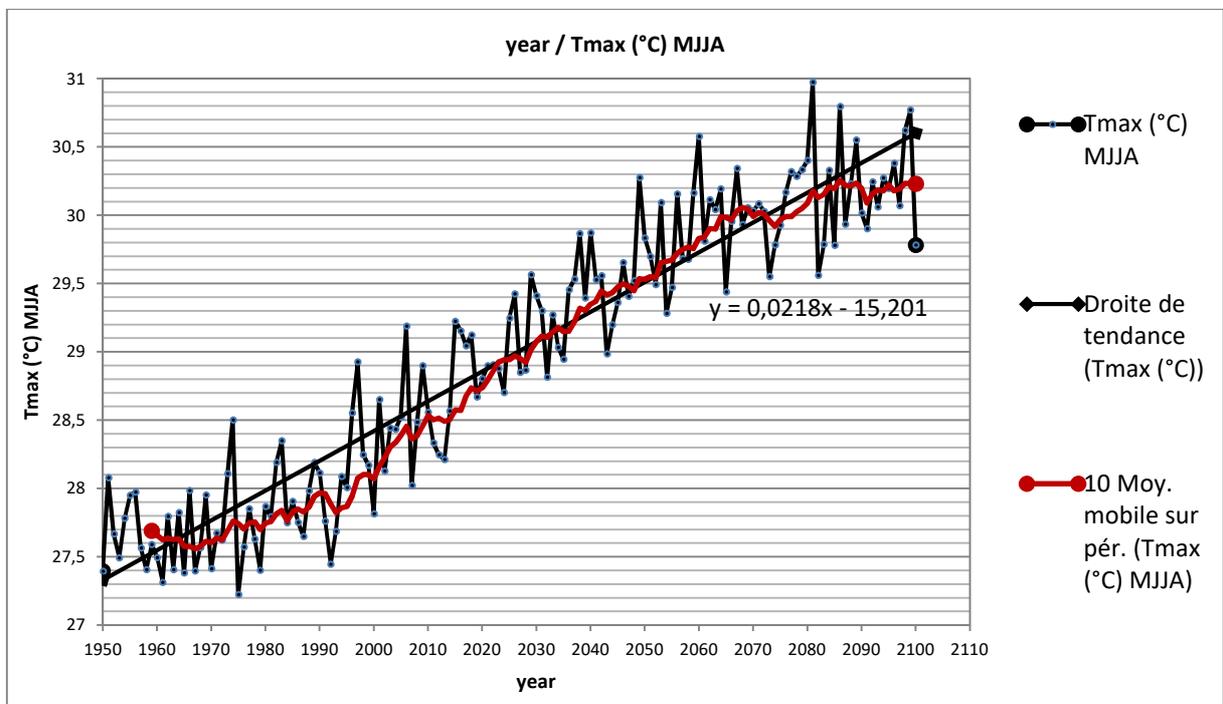


Figure VI.23 : Tendence saisonnière (MJJA) Tmax, zone guinéenne (subhumide humide)

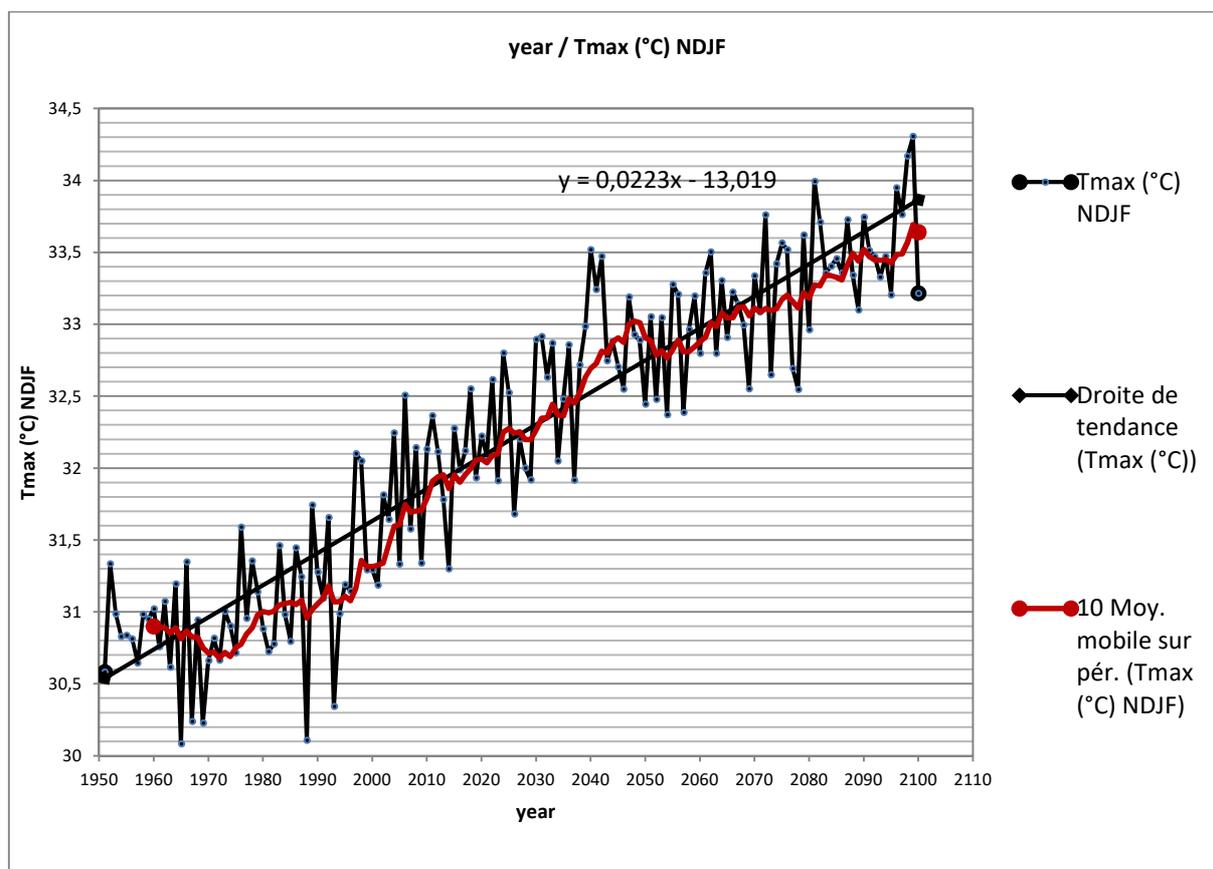


Figure VI.24 : Tendence saisonnière (NDJF) Tmax, zone guinéenne (subhumide humide)

❖ Tendence des séries projetées des températures minimales

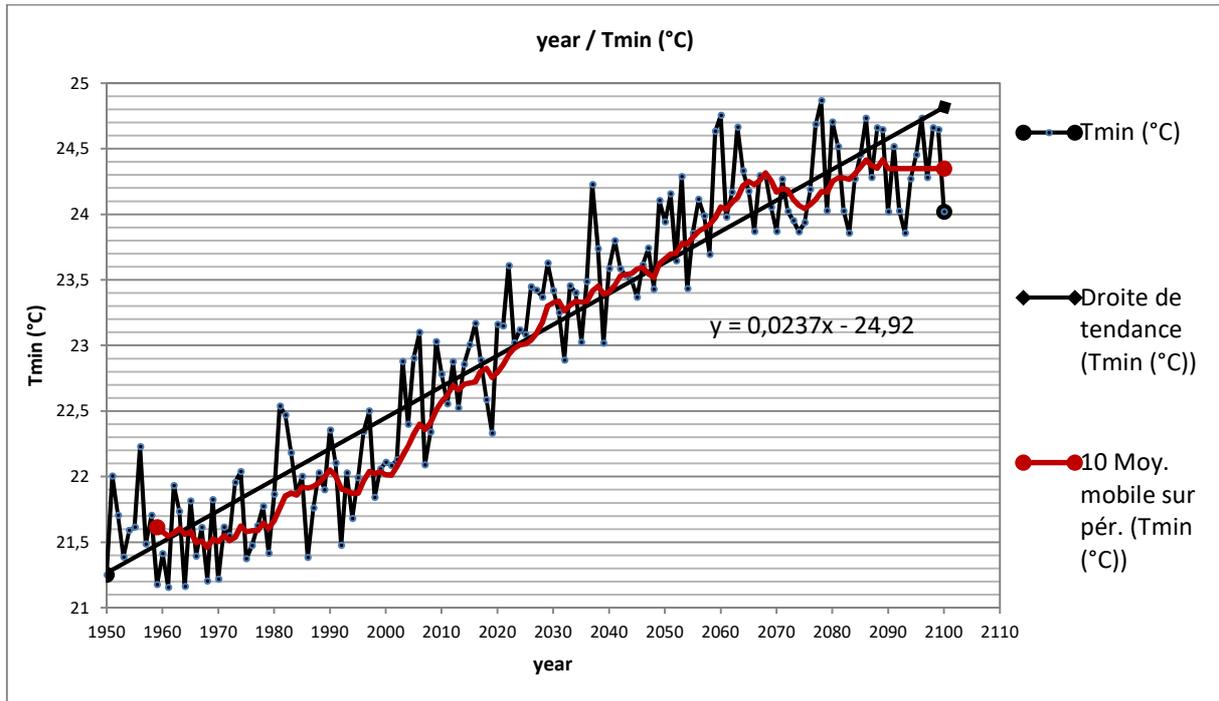


Figure VI.25 : Tendence annuelle Tmin, zone guinéenne (subhumide humide)

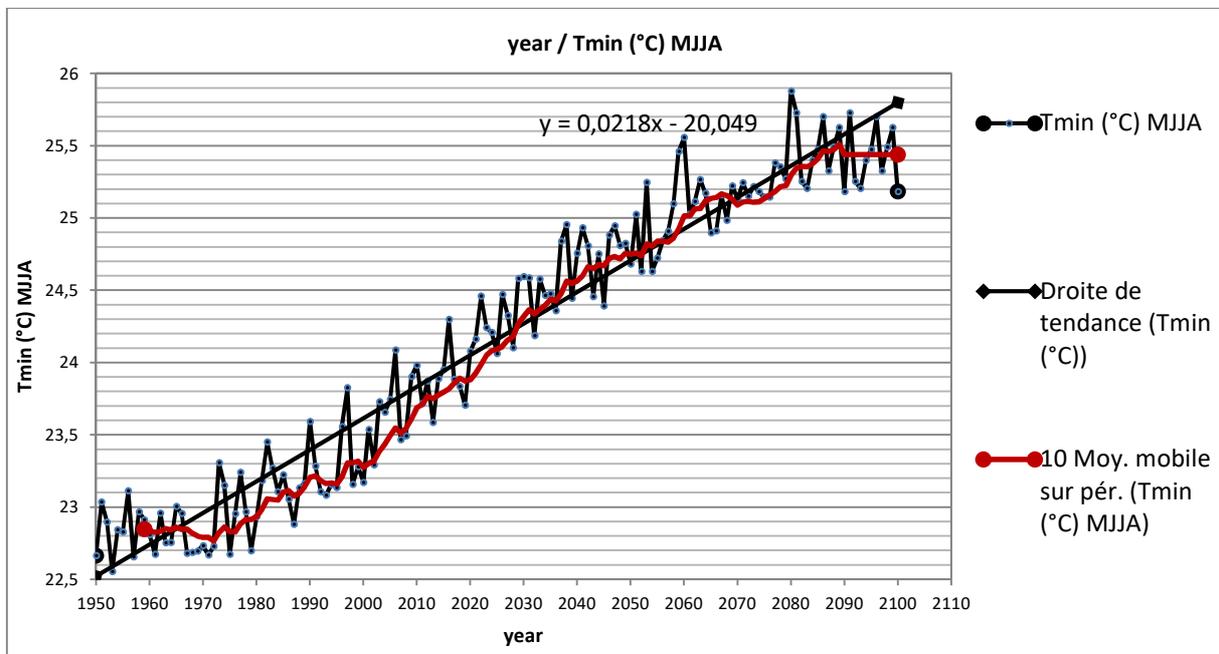


Figure VI.26 : Tendence saisonnière (MJJA) Tmin, zone guinéenne (subhumide humide)

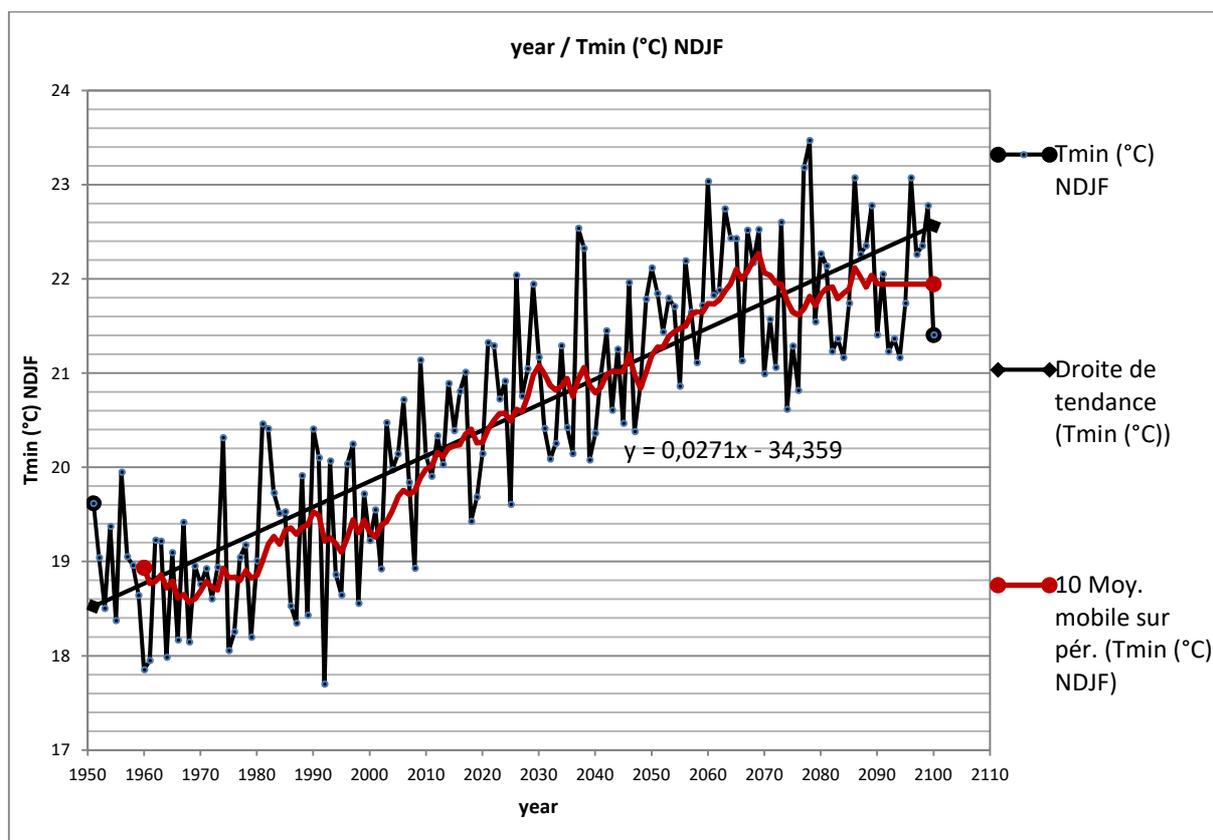


Figure VI.27 : Tendence saisonnière (NDJF) Tmin, zone guinéenne (subhumide humide)

a-Tendance des principaux paramètres projetés

Le tableau suivant illustre les statistiques des tendances des principaux paramètres simulés sur différentes échelles temporelles climatiques ainsi que les valeurs moyennes de chaque paramètre pour la période 2021-2050 relatives à 1961-1990:

variable	Climat présent (1961-1990)	Mi-siècle (2021-2050)	Long-terme (2021-2050)- (1961-1990)
RR_year (mm) Tend (mm/décennie)	2095.20±124.75 -18.51	2011.39±128.02 -36.7	-83.81±128.02 -36.71
RR_MJJA (mm) Tend (mm/décennie)	1099.87±81.26 -6.15	1037.92±83.54 -14.40	-61.95±83.54 -14.41
RR_NDJF (mm) Tend (mm/décennie)	188.1±48.28 +9.72	197.98±47.26 -14.95	9.88±47.26 -14.95
Tmax_year (mm) Tend (mm/décennie)	29.29±0.31 +0.20	30.92±0.35 +0.25***	1.63±0.35 -0.26***
Tmax_MJJA (mm) Tend (mm/décennie)	27.77±0.32 +0.16	29.32±0.37 +0.28***	1.55±0.38 +0.28***
Tmax_NDJF (mm) Tend (mm/décennie)	30.93±0.42 +0.17	32.62±0.47 +0.28***	1.69±0.48 +0.28***
Tmin_year (mm) Tend (mm/décennie)	21.74±0.37 +0.22	23.46±0.32 +0.19+	1.73±0.32 +0.19+
Tmin_MJJA (mm) Tend (mm/décennie)	22.98±0.26 +0.18	24.55±0.27 +0.21***	1.57±0.28 +0.22***
Tmin_NDJF (mm) Tend (mm/décennie)	19.03±0.76 +0.33	21.02±0.75 +0.12	1.99±0.75 +0.12

Tableau VI.5 : Valeurs moyennes et tendances de quelques paramètres climatiques simulés par le modèle régional Canadien sur le sud du Bénin (zone guinéenne) basées sur les moyennes pour les périodes du climat présent 1961-1990 et le mi-siècle 2021-2050. Les changements moyens à long-terme entre les périodes 1961-1990 et 2021-2050 sont également présentés. Les intervalles de variation sont représentés en valeurs d'écart-types entre les estimations du modèle. * : tendance significative à 99.9%**

Le tableau suivant illustre les statistiques des tendances des principaux paramètres simulés sur différentes échelles temporelles climatiques ainsi que les valeurs moyennes de chaque paramètre pour la période 2071-2100 relatives à 1961-1990:

variable	Climat présent (1961-1990)	fin-siècle (2071-2100)	Long-terme (2071-2100)- (1961-1990)
RR_year (mm) Tend (mm/décennie)	2095.20±124.75 -18.51	2033.57±143.24 +4.94	-61.63±143.24 +5.00
RR_MJJA (mm) Tend (mm/décennie)	1099.87±81.26 -6.15	1056.84±110.33 -7.48	-42.99±110.34 -7.49
RR_NDJF (mm) Tend (mm/décennie)	188.1±48.28 +9.72	193.91±43.55 -6.23	5.81±43.56 -6.24
Tmax_year (mm) Tend (mm/décennie)	29.29±0.31 +0.20	31.78±0.26 +0.10	2.49±0.27 +0.11
Tmax_MJJA (mm) Tend (mm/décennie)	27.77±0.32 +0.16	30.17±0.35 +0.09	2.40±0.35 +0.1
Tmax_NDJF (mm) Tend (mm/décennie)	30.93±0.42 +0.17	33.45±0.41 +0.2**	2.52±0.41 +0.2**
Tmin_year (mm) Tend (mm/décennie)	21.74±0.37 +0.22	24.32±0.31 +0.08	2.58±0.32 +0.09
Tmin_MJJA (mm) Tend (mm/décennie)	22.98±0.26 +0.18	25.39±0.21 +0.08	2.41±0.21 +0.08
Tmin_NDJF (mm) Tend (mm/décennie)	19.03±0.76 +0.33	21.91±0.76 +0.15	2.88±0.77 +0.15

Tableau VI.6 : Valeurs moyennes et tendances de quelques paramètres climatiques simulés par le modèle régional Canadien sur le sud du Bénin (zone guinéenne) basées sur les moyennes pour les périodes du climat présent 1961-1990 et le mi-siècle 2071-2100. Les changements moyens à long-terme entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100 sont également présentés. Les intervalles de variation sont représentés en valeurs d'écart-types entre les estimations du modèle. * : tendance significative à 99.9%**

b- Analyse de projection climatique des paramètres (RR, Tmax et Tmin)

Les données simulées par le modèle CanRCM4 sous le scénario RCP4.5, à l'échelle annuelle et saisonnière présentent un intervalle de variation très important. Cependant, l'analyse à l'échelle des normales climatiques, montre que par rapport à la moyenne donnée par le modèle, les écart-types des températures (minimales et maximales) sont compris entre 0.26°C et 0.76°C pour la période 1961-1990 ; 0.27°C à 0.75°C pour la période 2021-2050 ; 0.21°C à 0.76°C pour la période 2071-2100 ; 0.28°C à 0.75°C pour la différence (2021-2050)-(1961-1990) et de 0.21°C à 0.77°C pour la différence (2071-2100)-(1961-1990). Les écart-types des précipitations et pour les mêmes périodes seront respectivement compris entre 48.28 à 124.75 mm; 47.26 à 128.02 mm; 43.55 à 143.24 mm; 47.26 à 128.02 mm et 43.56 à 143.24 mm.

En effet et à l'échelle de l'année, les températures maximales sont prévues d'accroître d'environ $+1.6^{\circ}\text{C}$ entre 2021 à 2050 et 2.5°C entre 2071-2100 par rapport à 1961-1990, et de $+1.7^{\circ}\text{C}$ et 2.6°C pour les températures minimales et pour les mêmes périodes. À l'échelle saisonnière, on attend une augmentation de l'ordre de 1.6°C et 2.4°C respectivement pour les périodes 2021-2050 et 2071-2100 par rapport à la période 1961-1990 pour la saison MJJA ; en ce qui concerne la saison NDJF, il est prévu un accroissement de l'ordre de $+1.7^{\circ}\text{C}$ entre 2021 à 2050 et 2.5°C entre 2071-2100 par rapport à 1961-1990 pour les température maximales. Pour les températures minimales et pour les mêmes périodes, une augmentation de 1.6°C et 2.4°C est prévue pour la saison MJJA, ainsi de 2°C et 2.9°C pour la saison NDJF. Pour les précipitations, on s'attend qu'il y ait une diminution non significative à l'échelle annuelle et de saison MJJA. Il est prévu une diminution moyenne de l'ordre de 2% et 1.5% sur les quantités annuelles respectivement pour le période 2021-2050, 2071-2100 comparativement à la quantité recueillie entre 1961 et 1990. Les précipitations de la saison MJJA considérée comme la saison la plus pluvieuse vont connaître un abaissement de 2.8% pour la période 2021-2050 et 2% pour la période 2071-2100 par rapport à la normale climatique. Toutes les tendances thermiques sont significatives au niveau $P=0.01$ (c'est-à-dire 99.99%).

Selon les différentes projections issues du modèle sur cette zone, on montre une augmentation des températures maximales et minimales entre les périodes 2021-2050 et 2071-2100 par rapport à la période 1961-1990 ; ainsi qu'une légère diminution des précipitations annuelles dans la zone.

VI.2. Analyse comparative des résultats issus de la descente d'échelle, les sorties du modèle et des données d'observations dans chaque zone

VI.2.1. Zone1 : Station de KANDI au nord du Bénin

❖ Précipitation

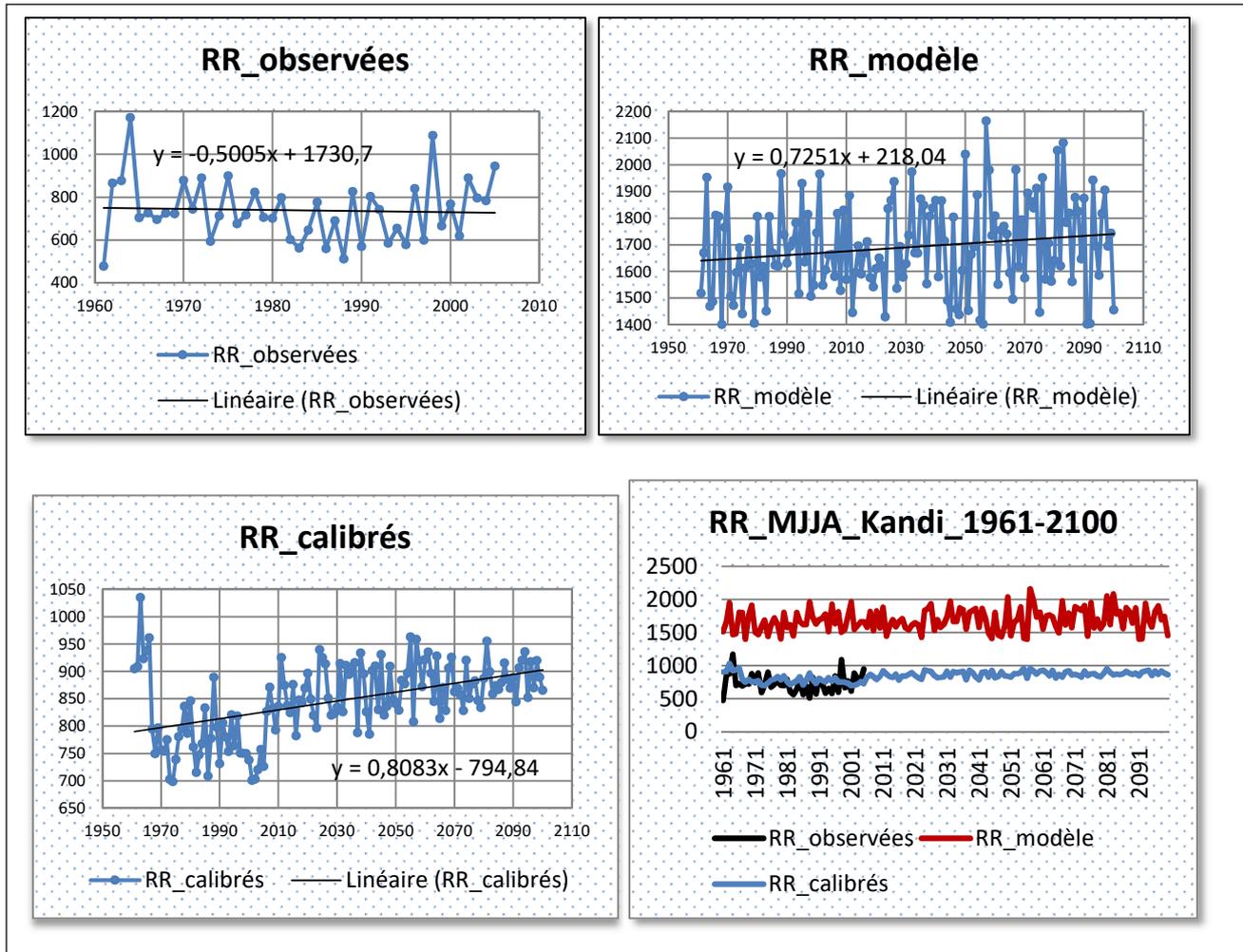


Figure VI.28 : Tendence saisonnière comparative de la précipitation des données issues de l'observation de la sortie brute du modèle régional et de la descente d'échelle statistique sur la station de KANDI situé dans la Zone soudanienne

❖ Température maximale

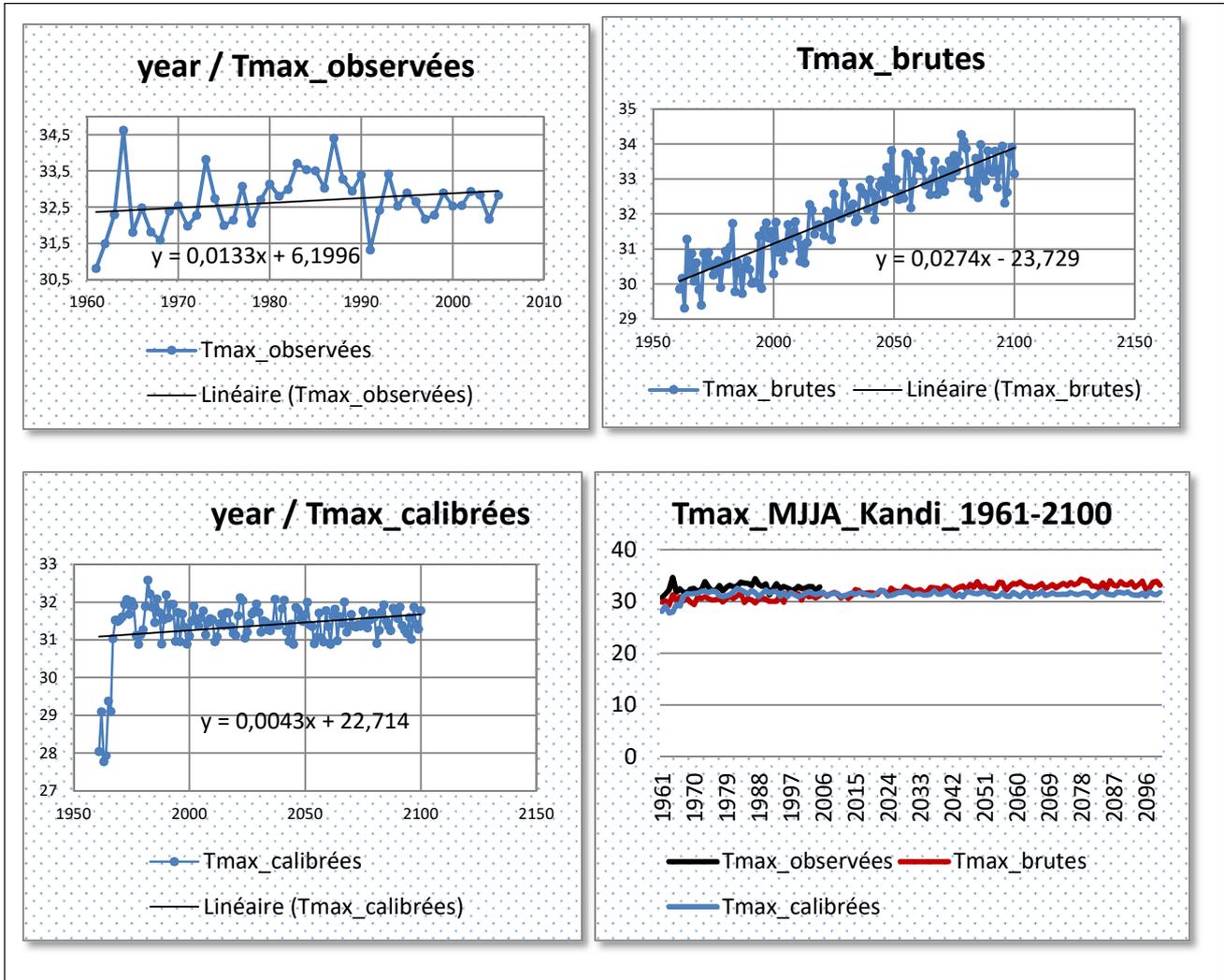


Figure VI.29 : Tendence saisonnière comparative de la température maximale des données issues de l’observation de la sortie brute du modèle régional et de la descente d’échelle statistique sur la station de KANDI situé dans la Zone soudanienne

❖ Température minimale

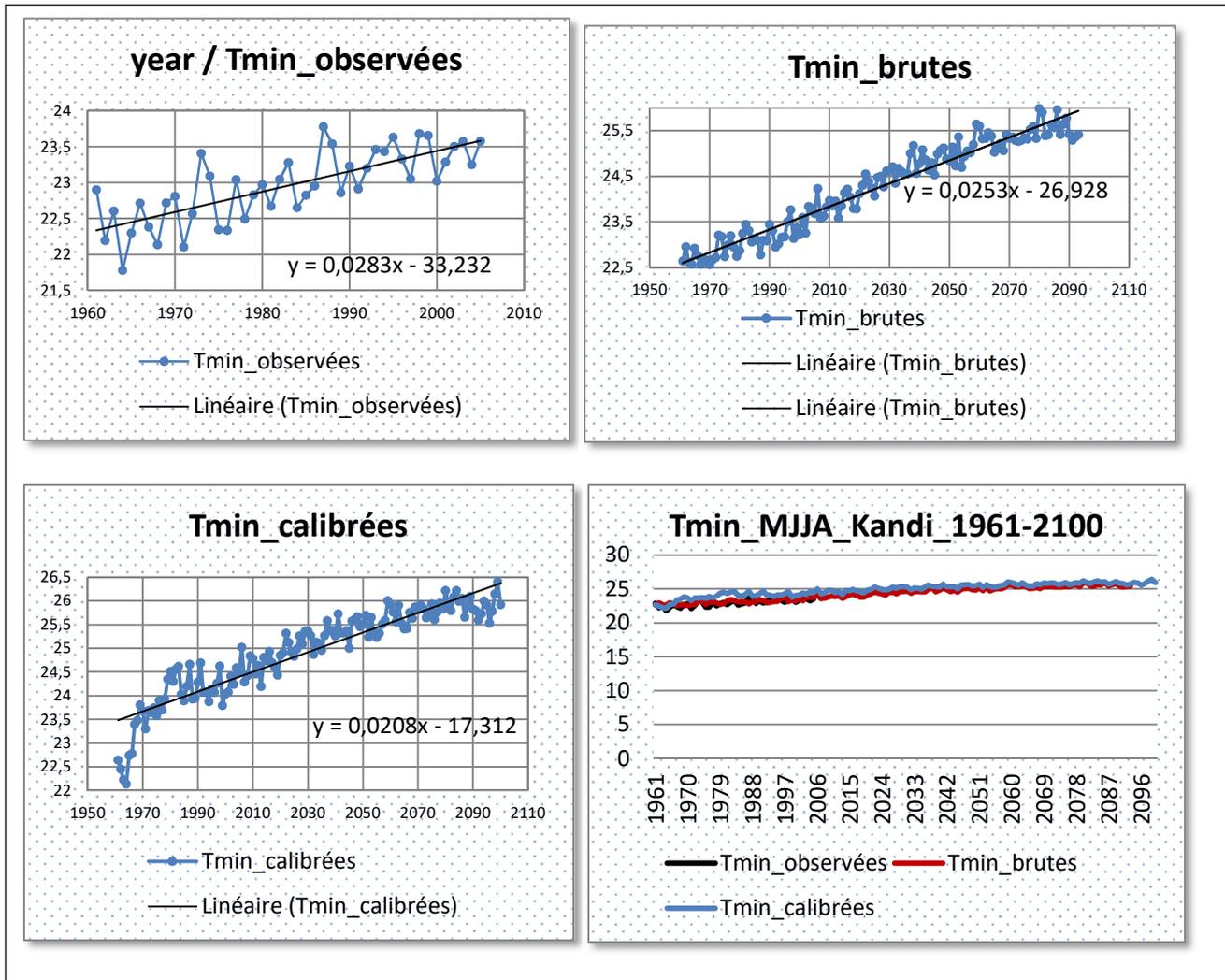


Figure VI.30 : tendance saisonnière comparative de la température minimale des données issues de l’observation de la sortie brute du modèle régional et de la descente d’échelle statistique sur la station de KANDI situé dans la Zone soudanienne

a-Analyse comparative des données simulées par rapport aux données réellement observées à la station de KANDI

L'analyse de la tendance de données simulées par le modèle régional CanRCM et celles provenant de la descente d'échelle réalisé par le modèle SDSM, montrent tous une tendance à la hausse des précipitations de la saison MJJA à l'horizon 2100 comme prévu précédemment dans la zone où se trouve la station de KANDI.

De même, en ce qui concerne les températures maximales et minimales, les deux modèles prévoient également une hausse tendancielle de ces deux extrêmes pour la même station dans la même période de l'année à l'horizon 2100.

Par ailleurs, l'analyse comparative des données réellement observé dans cette station par rapport aux données brutes issues du modèle régional et des données calibrées à la même période de 1961-2005, fait paraître un décalage moins important entre les données observées et celles calibrées par rapport à l'écart entre les données de sortie du modèle régional et celles observées. Ce qui permet d'affirmer qu'une descente d'échelle statistique est mieux adaptée qu'un modèle climatique régional pour faire les études des projections climatiques des paramètres météorologiques comme la précipitation, la température maximale et minimale dans l'évaluation locale des changements climatiques dans cette zone du nord du Bénin. De plus pour bien apprécier les impacts locaux des changements climatiques sur l'ensemble des paramètres météorologiques il est indéniable qu'on fasse une descente d'échelle sur chacun des paramètres vue que les sorties brutes du modèle régional ne donnent pas trop d'importance aux valeurs des paramètres mais plutôt à leurs tendances.

Quelques résultats de la descente d'échelle sur la station de KANDI se trouvent dans l'annexe

VI.2.2. Zone2 : Station de SAVE au centre du Bénin

❖ Précipitation MJJA

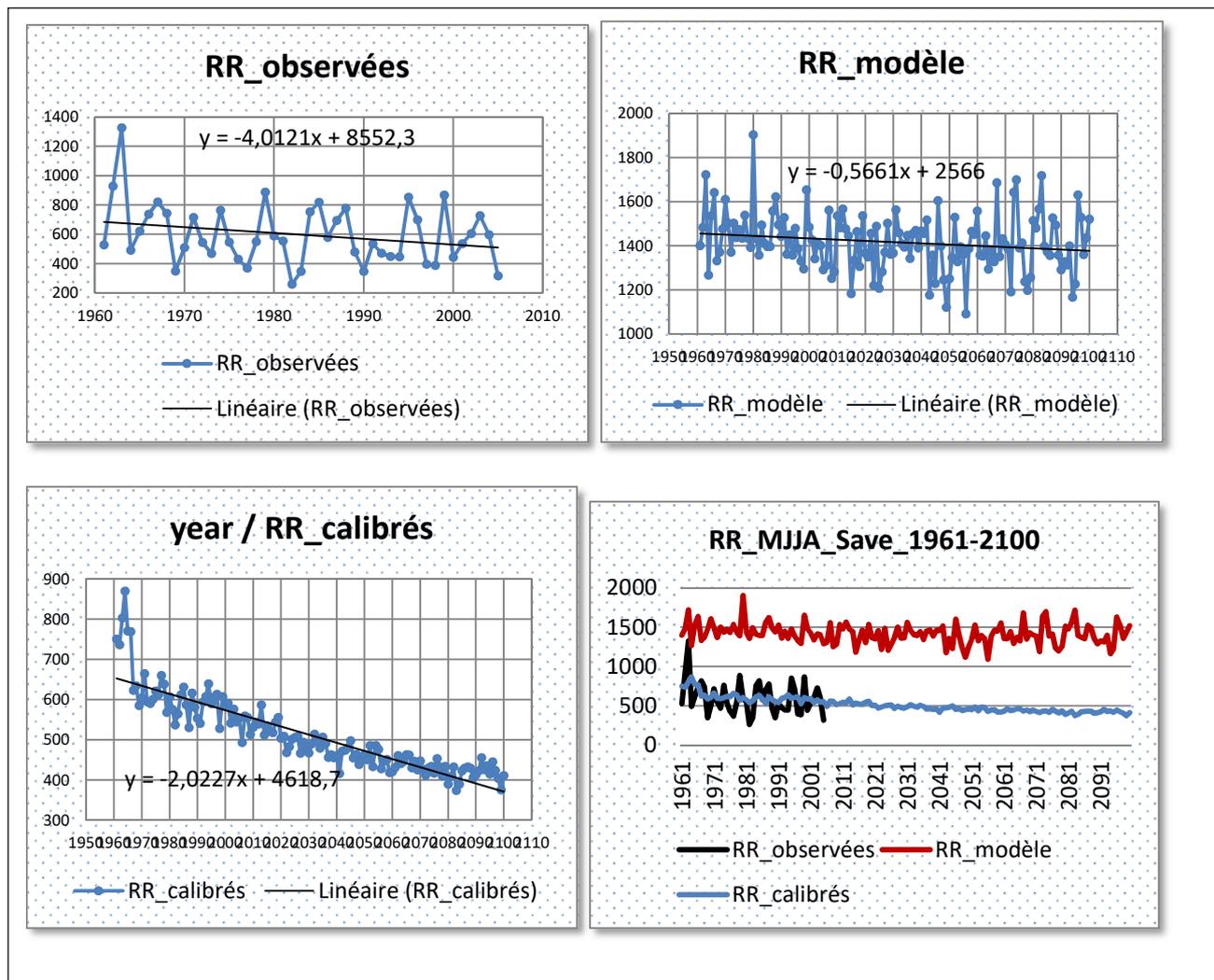


Figure VI.31: Tendence saisonnière comparative de la précipitation des données issues de l'observation de la sortie brute du modèle régional et de la descente d'échelle statistique sur la station de SAVE située dans la Zone soudano-guinéenne

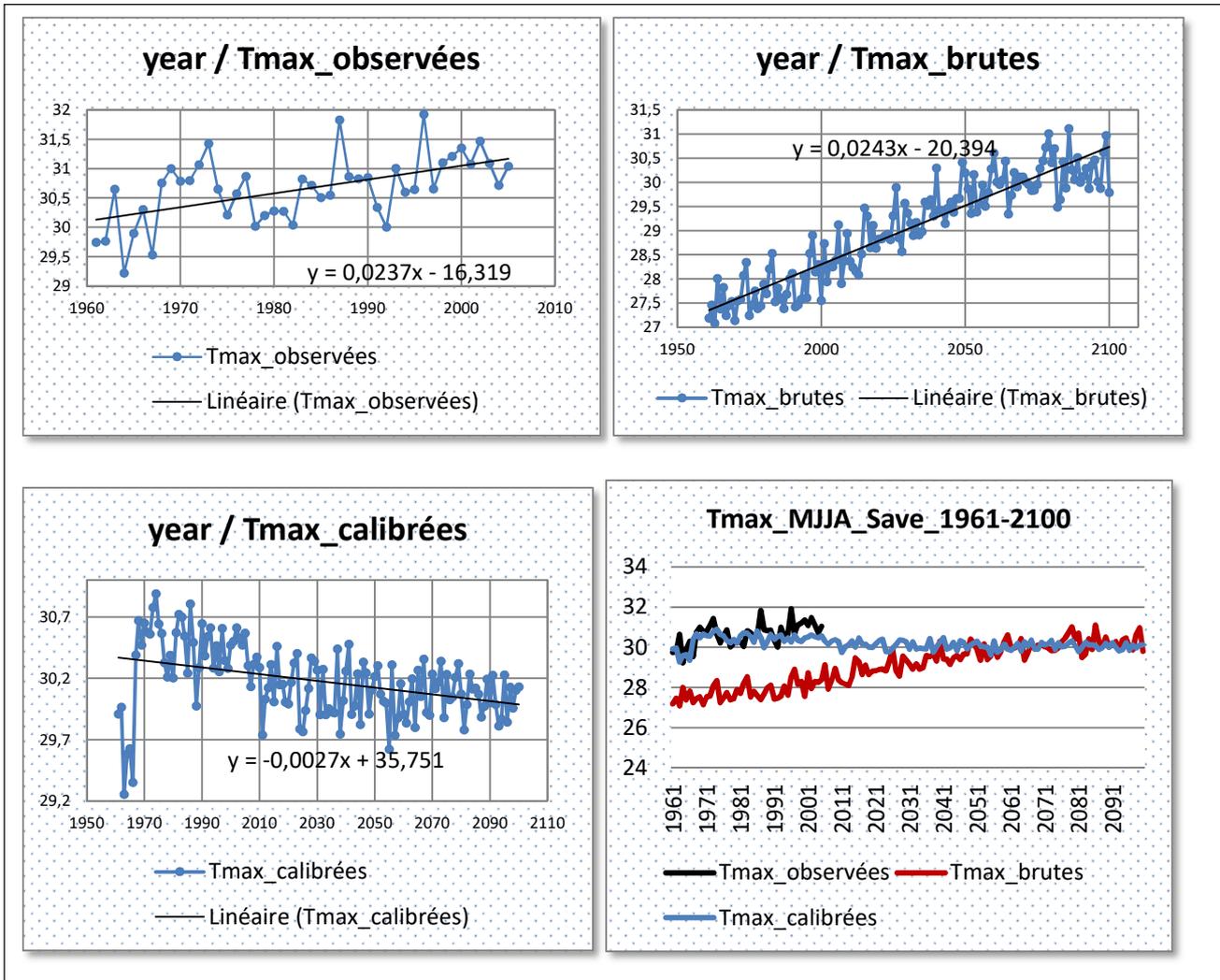
Température maximal MJJA :

Figure VI.32 : Tendence saisonnière comparative de la température maximale des données issues de l'observation de la sortie brute du modèle régional et de la descente d'échelle statistique sur la station de SAVE situé dans la Zone soudano-guinéenne

Température minimale MJJA :

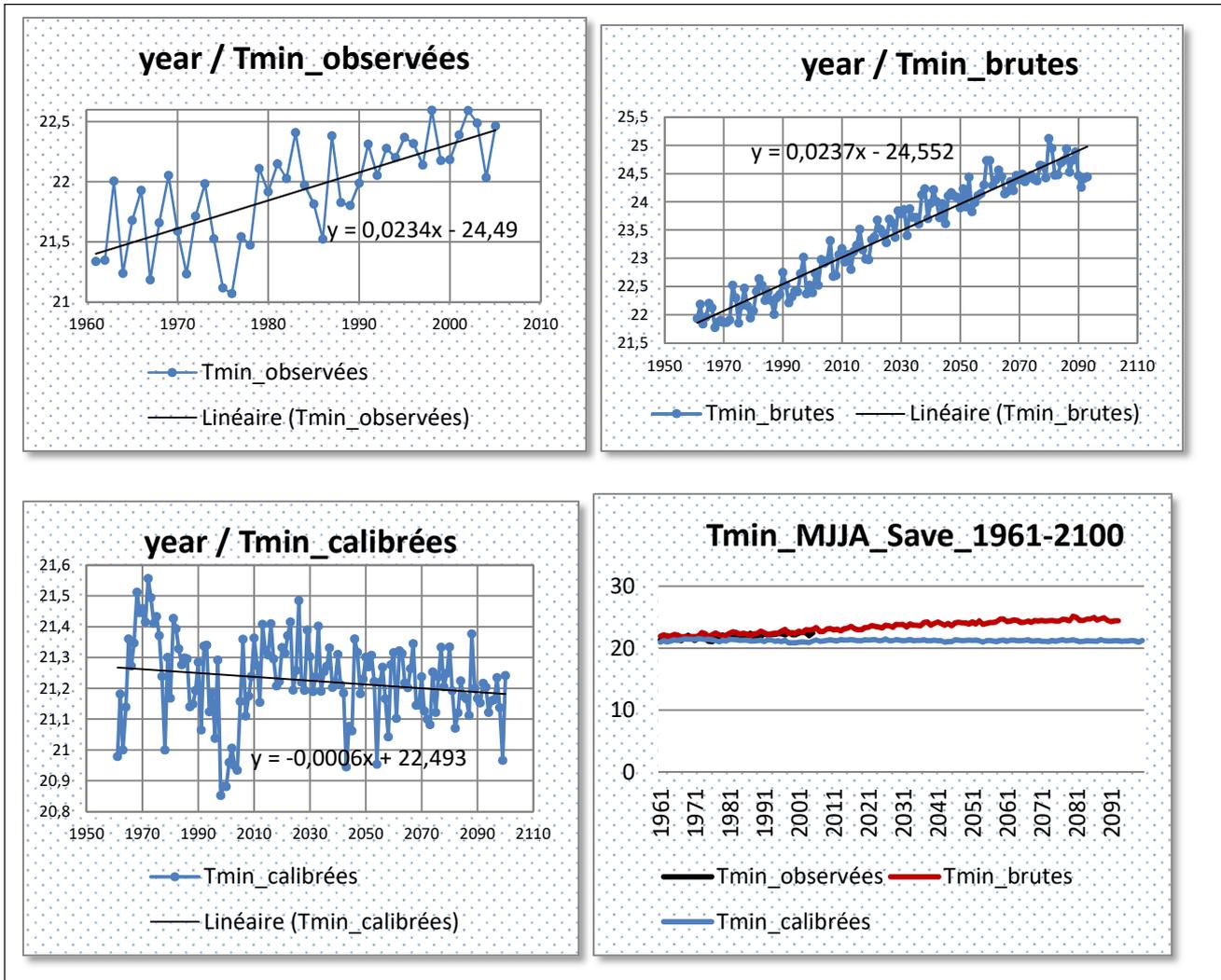


Figure VI.33: Tendence saisonnière comparative de la température des données issues de l'observation de la sortie brute du modèle régional et de la descente d'échelle statistique sur la station de SAVE situé dans la Zone soudano-guinéenne

a-Analyse comparative des données simulées par rapport aux données réellement observées à la station de SAVE

L'analyse de la tendance des données simulées par le modèle régional CanRCM et celles provenant de la descente d'échelle réalisée par le modèle SDSM, montre une tendance à la baisse des précipitations de la saison MJJA à l'horizon 2100 sur la station de SAVE de la zone soudano-guinéenne.

Autre part, en ce qui concerne les températures maximales et minimales, les deux modèles divergent ; le modèle régional CanRCM4 envisage une tendance à la hausse de ces deux extrêmes à l'horizon 2100, tandis que la sortie du modèle calibré prédit une légère tendance à la baisse pour les températures maximales et minimales à la station de SAVE pour la même saison MJJA à l'horizon 2100.

Néanmoins, il n'existe pas un décalage remarquable entre les données calibrées et les données observées dans cette station, bien que la courbe de sortie brute du modèle régional soit totalement confondue avec celle issue de l'observation, au regard de l'analyse comparative de la période 1961-2005. En dépit de cela, la descente d'échelle statistique reste toujours un moyen très fiable dans l'étude de l'impact régional des changements climatiques sur les paramètres météorologiques.

Quelques résultats de la descente d'échelle sur la station de SAVE se trouvent dans l'annexe.

VI.2.3. Zone3 : Station de COTONOU au sud du Bénin

❖ Précipitation MJJA

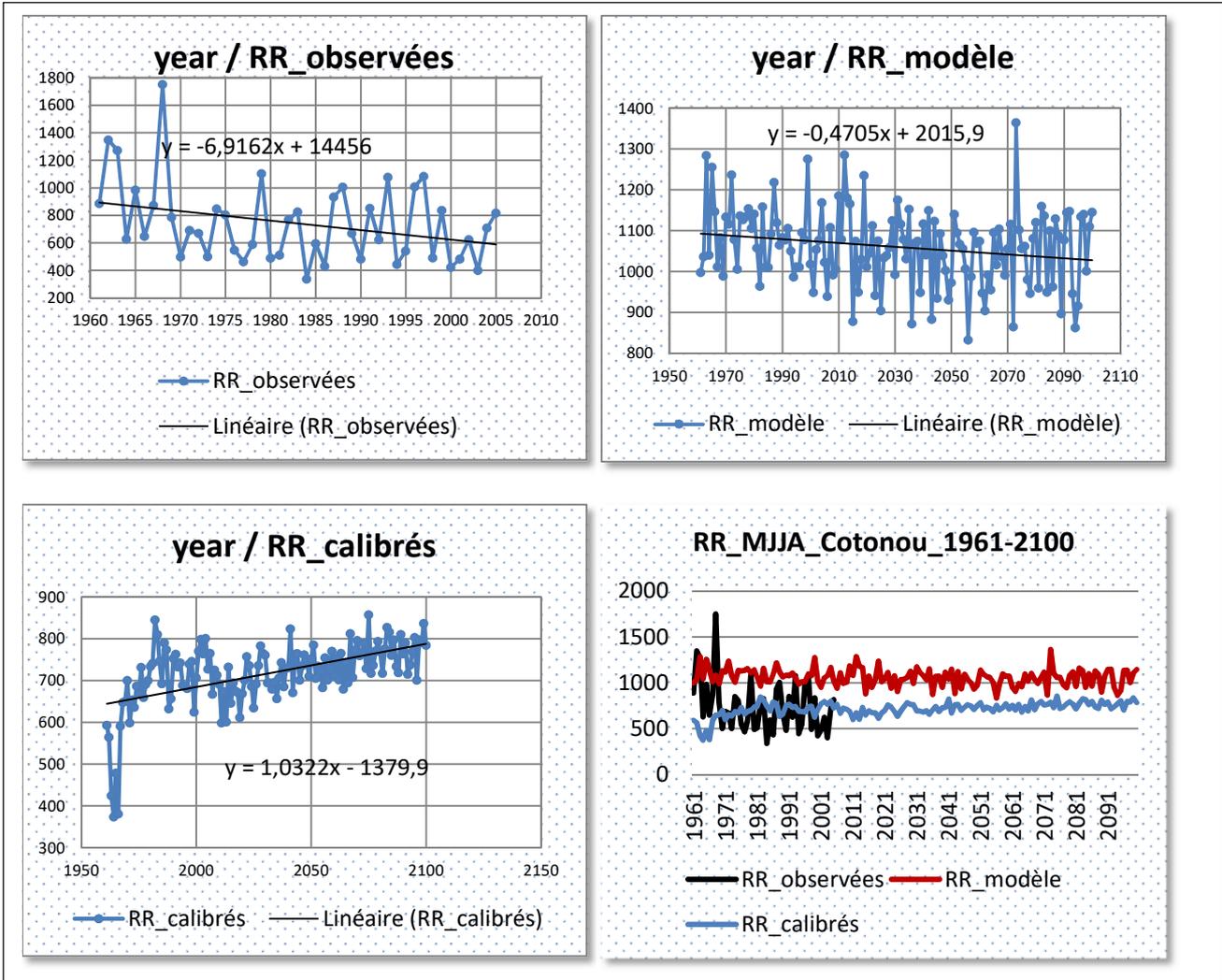


Figure VI.34 : Tendence saisonnière comparative de la précipitation des données issues de l’observation de la sortie brute du modèle régional et de la descente d’échelle statistique sur la station de COTONOU situé dans la Zone guinéenne

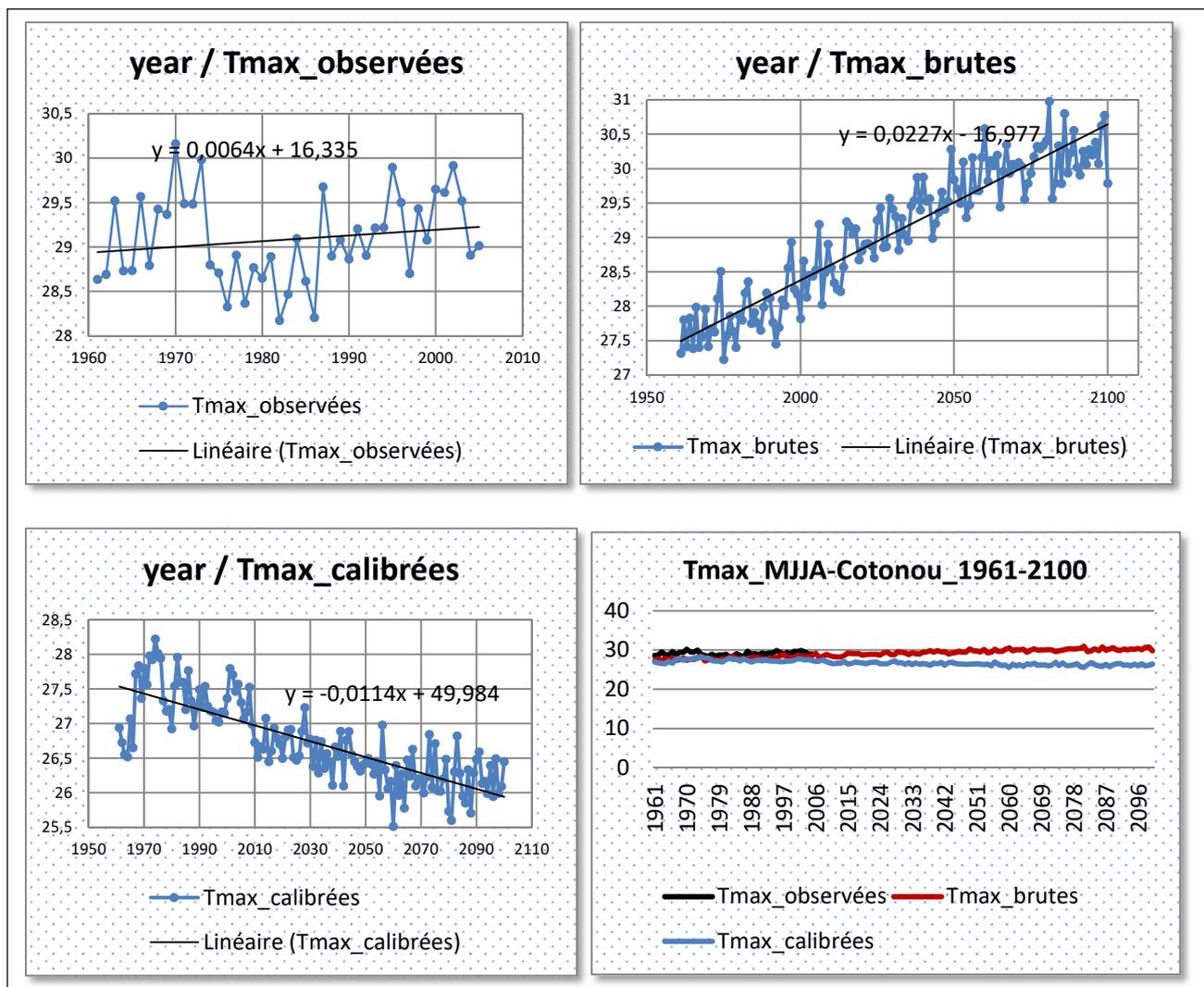
❖ **Température maximale MJJA**

Figure VI.35 : Tendances saisonnières comparatives de la température maximale des données issues de l'observation de la sortie brute du modèle régional et de la descente d'échelle statistique sur la station de COTONOU situé dans la Zone guinéenne

Température Minimale MJJA

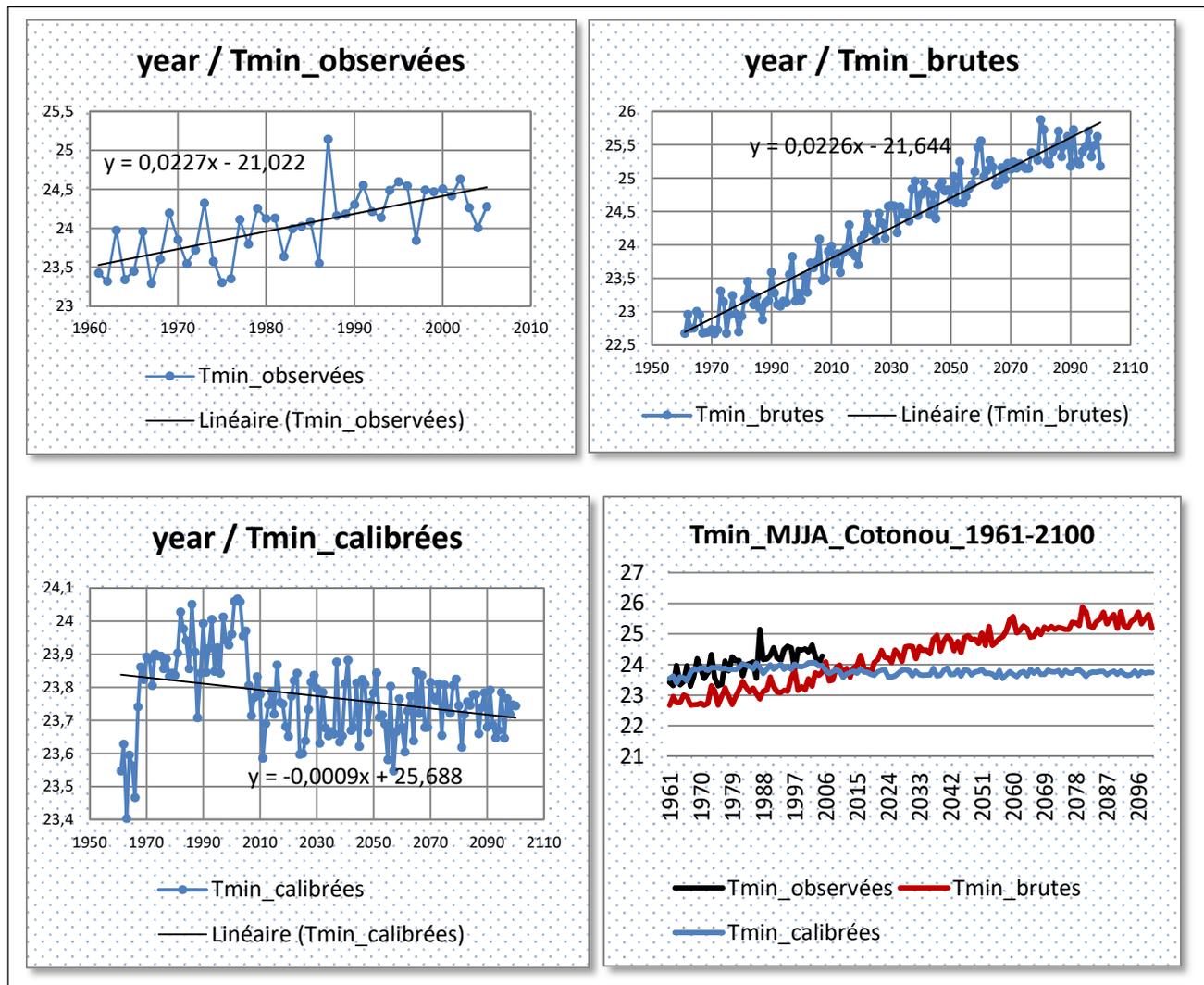


Figure VI.36 : Tendence saisonnière comparative de la température minimale des données issues de l'observation de la sortie brute du modèle régional et de la descente d'échelle statistique sur la station de COTONOU situé dans la Zone guinéenne

a-Analyse comparative des données simulées par rapport aux données réellement observées à la station de COTONOU

Les données simulées par le modèle régional et le modèle de descente d'échelle SDSM5.2 sous le scénario RCP4.5, à l'échelle de la saison MJJA divergent en termes de tendances pour l'ensemble des paramètres à savoir : les précipitations, les températures minimales et maximales en ce qui concerne la région de COTONOU qui se trouve à l'orée de l'océan atlantique.

Pour les précipitations, le modèle régional prédit une légère diminution à l'horizon 2100, alors que la descente d'échelle montre une légère tendance à la hausse de ce paramètre au même horizon, mais avec les valeurs plus proche des valeurs réellement observées dans cette station, en comparant la période commune (1961-2005).

Par contre, pour les températures maximales et minimales, le modèle CanRCM4, annonce une tendance à la hausse des ces extrêmes à l'horizon 2100, pendant que l'analyse les données issues de la descente d'échelle indique une baisse considérable des températures maximales et une légère baisse des températures minimales. Cela étant en analysant la période commune de ces modèles à l'observation il n'existe presque pas un écart entre les valeurs observées et les valeurs issues de la descente d'échelle.

En dépit de toutes ces divergences, les valeurs de la descente d'échelle restent très proches des valeurs observées à la station de COTONOU dans la période 1961-2005, on en déduit alors que la descente d'échelle reste un moyen efficace pour les études d'impacts des changements climatiques dans ces régions, comme dans les autres régions du Bénin.

Quelques résultats de la descente d'échelle sur la station de COTONOU se trouvent dans l'annexe

Conclusion générale

L'étude de vulnérabilité et d'adaptation, renseigne sur la magnitude des incidences socio-économiques et environnementales des changements climatiques. Ces études sont pour la plus part menées à travers les modèles de circulation générale et certain modèles régionaux jusqu'à présent au Bénin. Ce qui ne permettait pas jusque-là d'avoir une idée bien précise sur les valeurs réelles des paramètres projetés et aux différents horizons pour l'évaluation de leurs tendances. Pour anticiper et prendre des mesures d'adaptation adéquates pour lutter contre les effets négatifs du changement climatique au Bénin, comme les inondations au sud du pays et la baisse de production agricole et la disparition de certaines espèces agricole sur l'ensemble de territoire du Bénin, les décideurs politiques et les dirigeants ne sont pas en possession des informations très précises sur l'évolution des changements climatique dans chaque localité du pays.

Dans cette étude, l'ensemble de territoire du Bénin à été divisé en trois zones climatiques selon les études préalablement réalisées sur ce pays. Pour chaque zone les projections futures à l'horizon 2100, ont été conduites selon le scénario moyen des émissions des gaz à effet de serre (RCP4.5) issues du modèle canadien CanRCM4. Les changements sont évalués par rapport à la normale climatique 1961-1990 (référence de l'OMM), comparativement respectivement aux périodes 2021-2050 et 2075-2100. Une analyse de tendance (Mann-Kendall) a été réalisée pour chacune des séries projetées où l'on a effectué une évaluation du signe et taux ainsi que la signification de cette tendance.

Les résultats obtenus en appliquant le test de tendance de Mann-Kendall sur chacune des séries des données de projection de précipitation, de température maximale et minimale, nous conduisent à conclure que :

- A l'échelle annuelle et saisonnière dans la zone1 (soudanienne), les précipitations vont connaitre une légère augmentation entre 1.6% et 3.9% en moyenne dans les deux périodes 2021-2050 et 2075-2100 par rapport à la période 1961-1990. Les températures maximales et minimales vont également s'accroître légèrement avec une moyenne comprise entre 0.75°C et 1.7°C sur les mêmes échelles dans cette région du nord Bénin.

- Par contre dans la zone2 (soudano-guinéenne), les précipitations annuelle et saisonnière vont diminuer en moyenne entre 2.3% et 3.6% à l'horizon 2021-2050 et 2075-2100. Les températures maximale et minimale vont continuer à croître avec un degré plus élevé, en moyenne entre 1.7°C et 2.6°C, sur les mêmes intervalles de temps, dans le centre du pays.
- Les précipitations au sud dans la zone guinéenne zone3 vont également connaître une baisse allant de 1.5% à 2.8% sur les périodes 2021-2050 et 2075-2100 par rapport à la période 1961-1990. Toutefois, les deux extrêmes de températures continueront à accroître progressivement dans un intervalle compris entre 1°C et 2.9°C en moyenne, à l'échelle annuelle et saisonnière.

L'utilisation de l'outil SDSM permettant d'effectuer une descente d'échelles, avait permis de dégager des résultats plutôt satisfaisants sur l'allure et les tendances des paramètres choisis pour cette opération, sur chacune des stations et dans chaque zone. Bien qu'il y ait une divergence entre ce dernier avec les données brutes dans certaines stations pour les températures, il en demeure pas moins que les résultats obtenus sont très proches des données réellement observées dans chacune des stations pour la période commune 1961-2005.

Cette étude a permis de mettre en évidence les premiers résultats des simulations à l'horizon 2100 de quelques paramètres climatiques au moyen d'un modèle régional, il en demeure par conséquent vital d'extrapoler cela à d'autres simulations d'autres modèles régionaux pour confronter ces résultats. Il serait également judicieux de procéder à l'évaluation des impacts dans le cas d'un scénario extrême (cas de RCP8.5). L'ensemble de ces études peuvent s'étaler sur d'autres secteurs à savoir, les ressources en eau, l'agriculture,...etc.

Pour conclure, les modèles de descentes d'échelle en particulier le modèle SDSM, restent en outre des outils puissants dans les études d'impacts locaux des changements climatiques sur les différents secteurs d'activités. Pour les projections futures des changements climatiques, l'outil de désagrégation SDSM permet de quantifier la réaction du milieu local vis-à-vis de ces changements, ce qui permettra aux décideurs d'élaborer les stratégies d'adaptation locales adéquates pour faire face aux impacts négatifs de ces changements climatiques. Cela permettra également de bien fixer les niveaux de tolérance pour atténuer les conséquences des effets de ces changements climatiques actuelles et futures.

Référence

- ❖ Pr Jean-Pascal van Ypersele : Modélisation climatique et projections du climat futur. UCL-ASTR(Université catholique de Louvain, Institut d'astronomie et de géophysique G. Lemaître) Toile: www.climate.be Courriel: vanyp@climate.be Chaire Francqui, cours n°4, ULB, 20-3-2008 ;
- ❖ Lydiane Julien & al. : Le climat Au Bénin. Travail de recherche présenté à Caroline Labbé, École Cœur Soleil, année 2010 ;
- ❖ Pascale Braconnot et Olivier Marti, simuler pour comprendre : la modélisation du climat, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement. CEA-CNRS, Direction des sciences de la matière, Saclay, CLEFS CEA - N° 47 - HIVER 2002-2003 ;
- ❖ Saraf Vidya R. and Regulwar D.G. & al.: evaluating potential impact of climate change on hydrological variables in upper godavari river sub basin, india using swat. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress 28 June – 3 July, 2015, The Hague, the Netherlands ;
- ❖ Michel Boko, Frédéric Kosmowski, Expédit W. Vissin & al. : Les Enjeux du Changement, Climatique au Bénin. Dans le cadre du programme pour le dialogue politique en Afrique de l'ouest (**Konrad-Adenauer-Stiftung**), Toile : www.kas.de/westafrika, année 2012 ;
- ❖ convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques : Programme d'Action National d'Adaptation aux Changements Climatiques du Bénin (pana-Bénin). Ministère de l'environnement et de la protection de la nature (MEPN) république du Bénin, Cotonou, septembre 2007 ;
- ❖ Jesús Fernández & al.: Downscaling climate information. Meteorology Group Universidad de Cantabria, Dept. Matemática Aplicada y CC Comp, Jesus.Fernandez@unican.es, BC3 Sumer School 2015, on the road to Paris;
- ❖ Fredrik Wetterhall & al. , statistical downscaling of precipitation from large-scale atmospheric circulation comparaison of methods and climatregions. UPPSALA university, 2005;
- ❖ Pedro Miguel de Almeida Garrett Graça Lopes & al.: assessment of climate change statistical downscaling methods Application and comparison of two statistical

methods to a single site in Lisbon. Universidade nova de lisboa Faculdade de ciências e tecnologia, Departamento de ciências e engenharia do ambiente, Lisboa, 2008

- ❖ Abdel-karim CHERKAoui & al. : Désagrégation statistique des données via l’outil SDSM pour la projection des changements climatiques futurs dans la haute MOULOYA, Projet de Fin d’Etude, Université Hassan II Mohammedia-Casablanca, Faculté des sciences et techniques Mohammedia, département génie des procédés et de l’environnement, année 2012 ;
- ❖ Robert L. Wilby^{1,2} and Christian W. Dawson : User Manual SDSM4.2, August 2007 ;
- ❖ GIEC : The new IPCC climate scenarios (Les nouveaux scénarios climatiques), Juin 2013 ;
- ❖ GIEC : Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse
- ❖ Mathieu Vrac : Modélisations statistiques à différentes échelle climatiques et environnementales, 30 mars 2012
- ❖ Direction de l’environnement du Bénin : Communication Nationale Initiale du Bénin sur les changements Climatiques, Décembre 2001
- ❖ Hounkponou K.S, Bokonon-Ganta E., Nouatin G., Gnangassi C&G. Ahounou & al. : changements climatique au Bénin : vulnérabilité et stratégies d’adaptation. Avril 2008 ;
- ❖ Guillaume Dueyme, Philippe Gachon, Seidou Ousmane, Seidou Sanda Ibrah et al., Projet IRIACC-FACE, Catalogue de données : Modèles régionaux du climat, Fenêtre Amérique du Nord et Afrique, version du 14 juillet 2014 ;

Mémoires:

- ❖ Bennekrella Mohammed : simulation du climat futur au nord de l'Algérie par les modèles climatiques MPI et Echam5 sous le scénario A1B, mémoire de fin d'étude 2014
- ❖ Application du downscaling d'un certain nombre de paramètres météorologique sur la région de Mostaganem (application aux précipitations)

Sites internet:

- ❖ www.circeproject.eu
- ❖ menaceclimatique.free.fr
- ❖ www.ipcc.ch
- ❖ [ftp.zmaf.de/outgoing/elizalde/CIRCE](ftp://zmaf.de/outgoing/elizalde/CIRCE)
- ❖ <http://www.mpimet.mpg.de>
- ❖ <http://www.ipcc-data.org>
- ❖ <http://www.aquimed.cirad.fr>
- ❖ <http://www.estis.net/sites/toubenin/default.asp>
- ❖ http://www.wmo.int/pages/publication/bulletin_fr/archives/58_3_fr/58_3_giorgi_fr.html

Liste de figures

Figure I.1: Le flux de mousson africaine et harmattan. (Source, Nathalie Van Vyve, Travail de fin d'études 2005-2006.....	11
Figure II.1 : Carte du Bénin.....	16
Figure II.2 : Évolution démographique (source : statistique de l'ONU).....	20
Figure II.3: fréquence d'année très sèche: faible pluviométrie (source : Yabi & Afouda, 2011).....	23
Figure II.4 : Pluviométrie annuelle du Bénin (en mm) 1961-2005 (source : Amoussou, 2010).....	24
Figure II.5: synthèse de la variabilité spatio-temporelle des températures au Bénin (source : SMN Bénin, 2010).....	25
Figure II.6 : Evolution de température à SAVE (source : SMN Bénin, 2010).....	25
Figure II.7 : Evolution de température à KANDI (source : SMN Bénin, 2010).....	26
Figure II.8 : Evolution de température à Cotonou (source : SMN Bénin, 2010).....	26
Figure III.1 : principale caractéristiques des quatre canevas SRES et familles de scénarios.....	32
Figure III.2: Les émissions mondiales de CO ₂ liées à l'énergie et à l'industrie. (GIEC, 2000).....	34
Figure III.3 : Emissions mondiales annuelles totales de CO ₂ de toutes les sources entre 1990 et 2100 (source : GIEC).....	35
Figure III.4: Aperçu des principales forces motrices en 1990, 2020, 2050 et 2100 sur l'ensemble des scénarios SRES. L'évolution technologique n'est pas quantifiée. (GIEC, 2000).....	36
Figure III.5 : Illustration de l'évolution de la température moyenne globale selon les scénarios IS92. (Source : http://www.cics.uvic.ca/scenarios/index.cgi?More Info Emissions).....	37

Figure III.6 : Emissions de CO ₂ d'origine fossile (GtC/an) dans les pays NL–2% FR basse NL–1% IS92 IS92 IS92e c a figurant à l'Annexe I, selon les propositions FR et NL de limitation des émissions, par comparaison avec celles obtenues selon les scénarios IS92a, c et e.....	39
Figure III.7 : Les émissions mondiales de gaz à effet de serre (CO ₂ et CH ₄). (Jean Jouzel, 2011).....	40
Figure III.8 : Changement du bilan radiatif de la terre au sommet de l'atmosphère, ou « forçage radiatif » (en Wm ⁻²) induit par les activités humaines. après 2006, les traits continus représentent les nouveaux scénarios dits « Representative Concentration Pathways » et les traits pointillés les scénarios SRES (GIEC, 2007).....	43
Figure III.9 : Évolution de la température moyenne à la surface de la Terre (en °C) par rapport à la période 1901-2000 à partir des observations (courbe noire) et à partir des simulations des modèles du CnRM-CERFaCS (traits pointillés colorés) ou de l'IPSL (traits pleins colorés), et pour les différents scénarios RCP.....	44
Figure III.10 : panorama des composantes du système climatique, leurs processus et leurs interactions. (TECLIM : critique climatique).....	46
Figure III.11: forçages radiatifs de type naturel et anthropique sur le climat.....	47
Figure III.12 : Evolution du degré de complexité des modèles. (Source : GIEC 2007, 4 ^{ème} rapport d'évaluation).....	49
Figure III.13 : Evaluation de la résolution (maillage) des modèles climatiques globaux (Source : GIEC 2007).....	51
Figure III.14 : Représentation conceptuelle de la désagrégation spatiale. (Source: CRU).....	55
Figure V.1 : L'écran de démarrage du logiciel SDSM5.2.....	68
Figure V.2: SDSM Version 5.2 générateur des scénarii climatique (source : SDSM Guide).....	71
Figure VI.1: Tendence annuelle de précipitation (RR), zone soudanienne (semi-aride).....	72
Figure VI.2: Tendence saisonnière (MJJA) de précipitation (RR), zone soudanienne (semi-aride).....	73
Figure VI.3 : Tendence saisonnière RR (NDJF), zone soudanienne (semi-aride)....	73

Figure VI.4 : tendance annuelle de température maximale dans la zone soudanienne (semi-aride).....	74
Figure VI.5: Tendance saisonnière (MJJA) de la température maximale de la zone soudanienne (semi-aride).....	74
Figure VI.6 : Tendance saisonnière (NDJF) de la température maximale de la zone soudanienne (semi-aride).....	75
Figure VI.7 : Tendance annuelle de la température minimale de la zone soudanienne (semi-aride).....	76
Figure VI.8 : Tendance saisonnière (MJJA) de la température minimale de la zone soudanienne (semi-aride).....	76
Figure VI.9 : Tendance saisonnière (NDJF) de la température minimale de la zone soudanienne (semi-aride).....	77
Figure VI.10 : Tendance annuelle RR, zone soudano guinéenne (subhumide sèche)	81
Figure VI.11 : Tendance saisonnière RR (MJJA), zone soudano guinéenne (subhumide sèche).....	82
Figure VI.12 : Tendance saisonnière RR (NDJF), zone soudano guinéenne (subhumide sèche).....	82
Figure VI.13 : Tendance annuelle Tmax, zone soudano guinéenne (subhumide sèche)	83
Figure VI.14 : Tendance saisonnière (MJJA) Tmax, zone soudano guinéenne (subhumide sèche).....	93
Figure VI.15 : Tendance saisonnière (NDJF) Tmax, zone soudano guinéenne (subhumide sèche).....	94
Figure VI.16 : Tendance annuelle Tmin, zone soudano guinéenne (subhumide sèche).....	85
Figure VI.17 : Tendance saisonnière (MJJA) Tmin, zone soudano guinéenne (subhumide sèche).....	85
Figure VI.18 : Tendance saisonnière (NDJF) Tmin, zone soudano guinéenne (subhumide sèche).....	86
Figure VI.19 : Tendance annuelle RR, zone guinéenne (subhumide humide)	90

Figure VI.20 : Tendance saisonnière (MJJA) RR, zone guinéenne (subhumide humide).....	91
Figure VI.21 : Tendance saisonnière (NDJF) RR, zone guinéenne (subhumide humide).....	91
Figure VI.22 : Tendance annuelle Tmax, zone guinéenne (subhumide humide).....	92
Figure VI.23 : Tendance saisonnière (MJJA) Tmax, zone guinéenne (subhumide humide).....	92
Figure VI.24 : Tendance saisonnière (NDJF) Tmax, zone guinéenne (subhumide humide).....	93
Figure VI.25 : Tendance annuelle Tmin, zone guinéenne (subhumide humide).....	94
Figure VI.26 : Tendance saisonnière (MJJA) Tmin, zone guinéenne (subhumide humide).....	94
Figure VI.27 : Tendance saisonnière (NDJF) Tmin, zone guinéenne (subhumide humide)	95
Figure VI.28 : Tendance saisonnière comparative de la précipitation des données issues de l'observation de la sortie brute du modèle régional et de la descente d'échelle statistique sur la station de KANDI situé dans la Zone soudanienne.....	99
Figure VI.29 : Tendance saisonnière comparative de la température maximale des données issues de l'observation de la sortie brute du modèle régional et de la descente d'échelle statistique sur la station de KANDI situé dans la Zone soudanienne.....	100
Figure VI.30 : tendance saisonnière comparative de la température minimale des données issues de l'observation de la sortie brute du modèle régional et de la descente d'échelle statistique sur la station de KANDI situé dans la Zone soudanienne.....	101
Figure VI.31 : Tendance saisonnière comparative de la précipitation des données issues de l'observation de la sortie brute du modèle régional et de la descente d'échelle statistique sur la station de SAVE située dans la Zone soudano-guinéenne.....	103
Figure VI.32 : Tendance saisonnière comparative de la température maximale des données issues de l'observation de la sortie brute du modèle régional et de la descente d'échelle statistique sur la station de SAVE situé dans la Zone soudano-guinéenne.....	104

Figure VI.33: Tendance saisonnière comparative de la précipitation des données issues de l'observation de la sortie brute du modèle régional et de la descente d'échelle statistique sur la station de SAVE situé dans la Zone soudano-guinéenne.....105

Figure VI.34 : Tendance saisonnière comparative de la précipitation des données issues de l'observation de la sortie brute du modèle régional et de la descente d'échelle statistique sur la station de COTONOU situé dans la Zone guinéenne...107

Figure VI.35 : Tendance saisonnière comparative de la température maximale des données issues de l'observation de la sortie brute du modèle régional et de la descente d'échelle statistique sur la station de COTONOU situé dans la Zone guinéenne....108

Figure VI.36 : Tendance saisonnière comparative de la température minimale des données issues de l'observation de la sortie brute du modèle régional et de la descente d'échelle statistique sur la station de COTONOU situé dans la Zone guinéenne.....109

Liste des tableaux

Tableau 1 : Projections des hausses de températures de la planète à l'horizon 2100. (Source : GIEC).....	8
Tableau III.1 : Principales caractéristiques des quatre scénarios RCP. (Main characteristics of the four RCP scenarios).....	42
Tableau III.2 : résolution des différents modèles utilisés par le GIEC lors de son 4 ^{ème} et 5 ^{ème} rapports.....	52
Tableau VI.1 : Valeurs moyennes et tendances de quelques paramètres climatiques simulés par le modèle régional Canadien sur le nord du Bénin (zone soudanienne) basées sur les moyennes pour les périodes du climat présent 1961-1990 et le mi-siècle 2021-2050. Les changements moyens à long-terme entre les périodes 1961-1990 et 2021-2050 sont également présentés. Les intervalles de variation sont représentés en valeurs d'écart-types entre les estimations du modèle. *** : tendance est significative 99.9%.....	78
Tableau VI.2 : Valeurs moyennes et tendances de quelques paramètres climatiques simulés par le modèle régional Canadien sur le nord du Bénin (zone soudanienne) basées sur les moyennes pour les périodes du climat présent 1961-1990 et le mi-siècle 2071-2100. Les changements moyens à long-terme entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100 sont également présentés. Les intervalles de variation sont représentés en valeurs d'écart-types entre les estimations du modèle. *** : tendance est significative 99.9%.....	79
Tableau VI.3 : Valeurs moyennes et tendances de quelques paramètres climatiques simulés par le modèle régional Canadien sur le centre du Bénin (zone soudano-guinéenne) basées sur les moyennes pour les périodes du climat présent 1961-1990 et le mi-siècle 2021-2050. Les changements moyens à long-terme entre les périodes 1961-1990 et 2021-2050 sont également présentés. Les intervalles de variation sont représentés en valeurs d'écart-types entre les estimations du modèle. * : tendance significative à 95% ; ** : tendance significative à 99% ; *** : tendance significative à 99.9%.....	87

Tableau VI.4 : Valeurs moyennes et tendances de quelques paramètres climatiques simulés par le modèle régional Canadien sur le centre du Bénin (zone soudano-guinéenne) basées sur les moyennes pour les périodes du climat présent 1961-1990 et le mi-siècle 2071-2100. Les changements moyens à long-terme entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100 sont également présentés. Les intervalles de variation sont représentés en valeurs d'écart-types entre les estimations du modèle. *** : tendance significative à 99.9%.....88

Tableau VI.5. Valeurs moyennes et tendances de quelques paramètres climatiques simulés par le modèle régional Canadien sur le sud du Bénin (zone guinéenne) basées sur les moyennes pour les périodes du climat présent 1961-1990 et le mi-siècle 2021-2050. Les changements moyens à long-terme entre les périodes 1961-1990 et 2021-2050 sont également présentés. Les intervalles de variation sont représentés en valeurs d'écart-types entre les estimations du modèle. *** : tendance significative à 99.9%.....96

Tableau VI.6: Valeurs moyennes et tendances de quelques paramètres climatiques simulés par le modèle régional Canadien sur le sud du Bénin (zone guinéenne) basées sur les moyennes pour les périodes du climat présent 1961-1990 et le mi-siècle 2071-2100. Les changements moyens à long-terme entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100 sont également présentés. Les intervalles de variation sont représentés en valeurs d'écart-types entre les estimations du modèle. *** : tendance significative à 99.9%.....97

Annexes

Annexe 1 : quelques projection des GIEC lors AR5

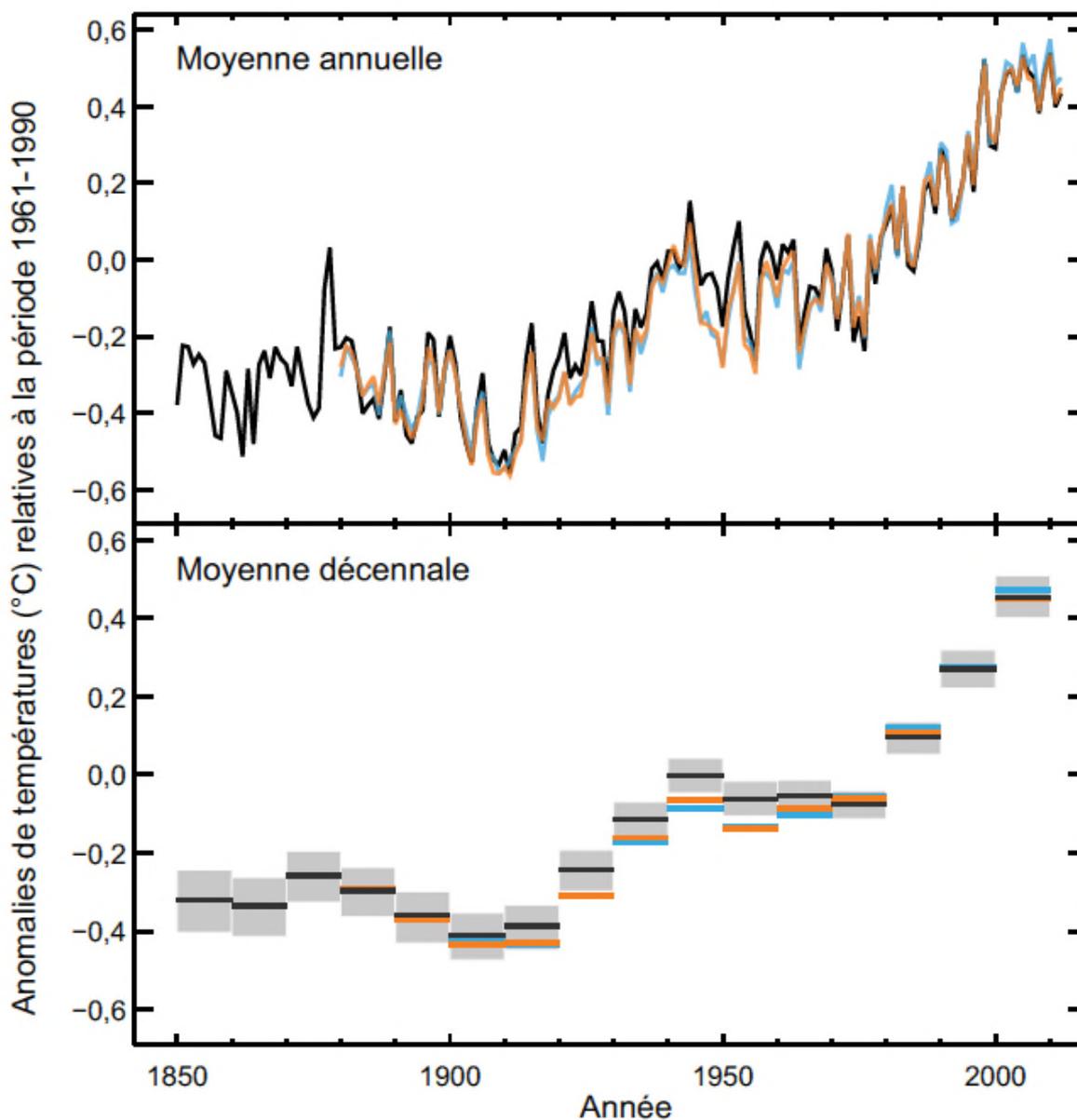


Figure A.1.1 : Anomalies observées de températures moyennes en surface, combinant les terres émergées et les océans, de 1850 à 2012 (source : GIEC-2013, résumé à l'intention des décideurs)

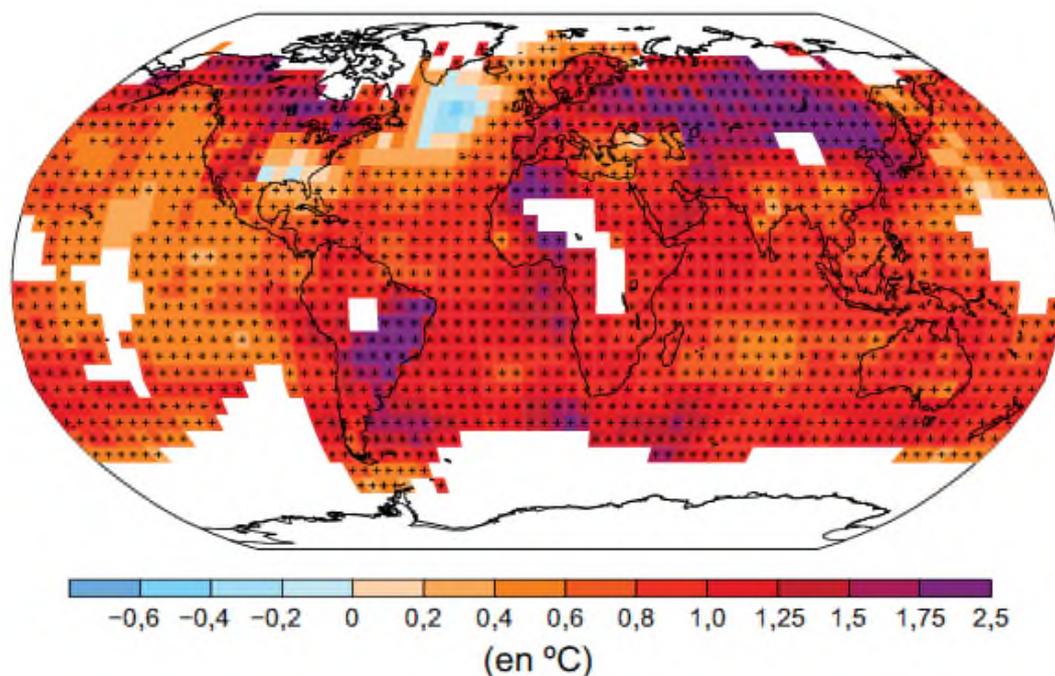


Figure A.1.2 : Évolution de la température en surface observée entre 1901 et 2012 (source : GIEC-2013, résumé à l'intention des décideurs)

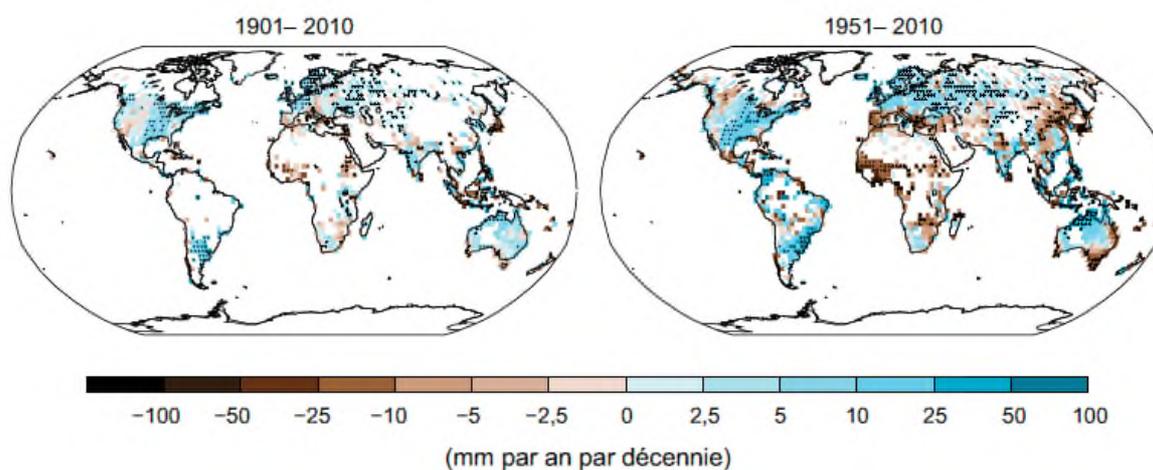


Figure A.1.3: Changements observés concernant les précipitations annuelles sur les terres émergées (source : GIEC-2013, résumé à l'intention des décideurs)

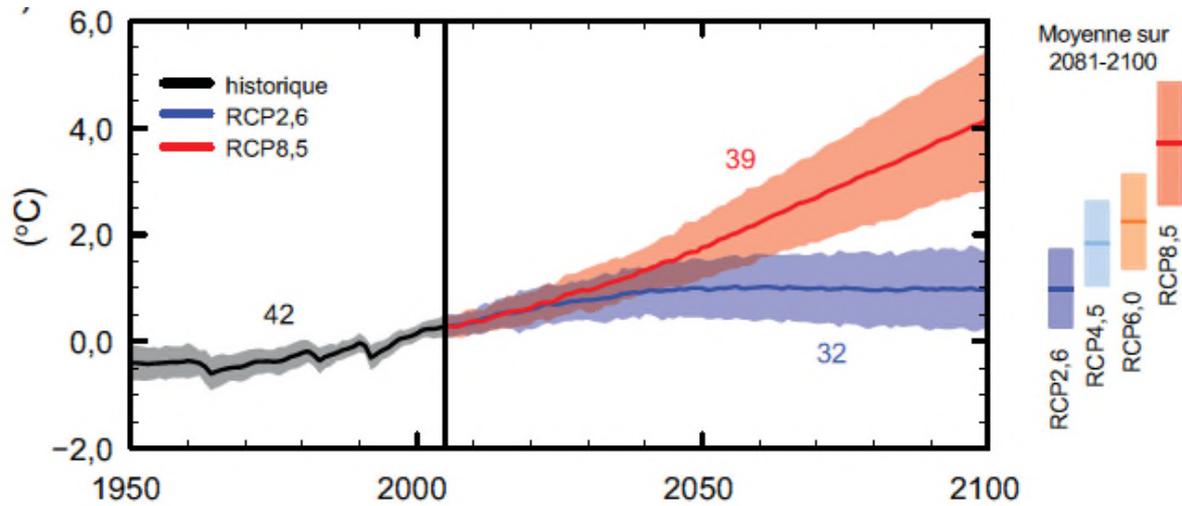


Figure A1.4 : Évolution de la température moyenne à la surface du globe (GIEC-2013)

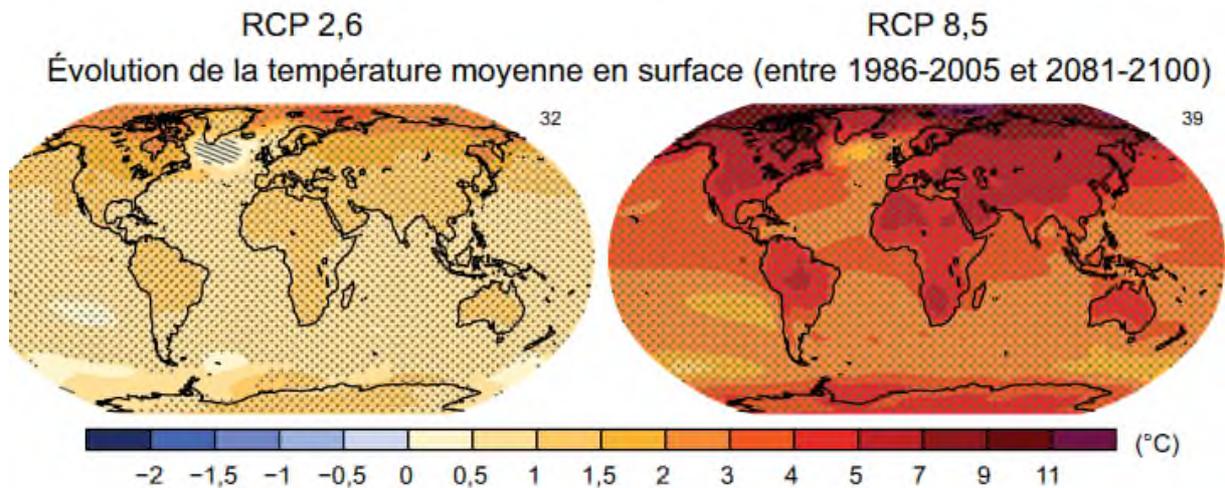


Figure A1.5 : Évolution de la température moyenne en surface (entre 1986-2005 et 2081-2100), GIEC-2013

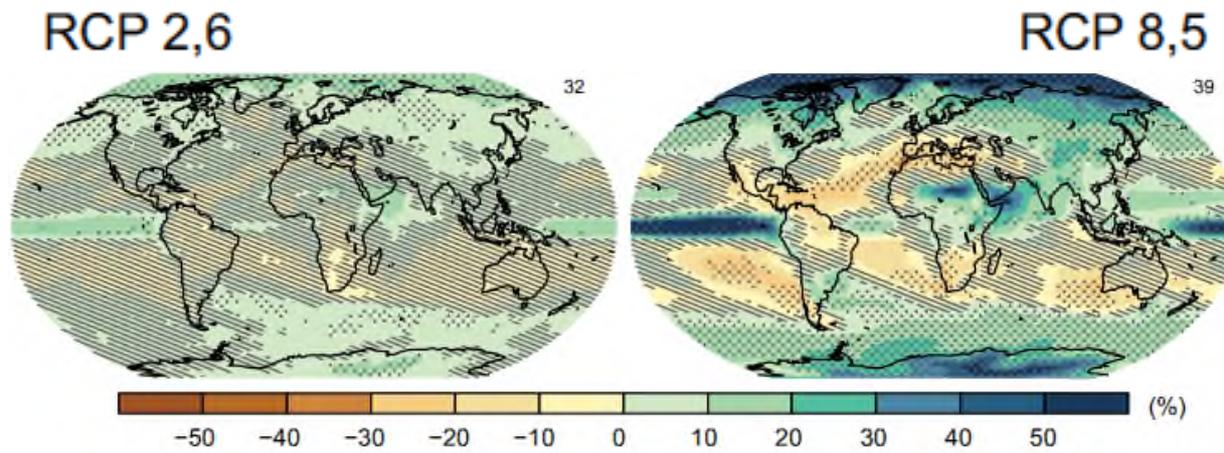


Figure A1.6 : Évolution des précipitations moyennes (entre 1986-2005 et 2081-2100), GIEC-2013

Annexe 2 : quelques éléments de Downscaling

Tableau des prédicteurs utilisé pour chaque paramètre dans la réalisation de Downscaling

Variables prédictant	Notation et description des variables prédicteurs
Précipitation	Prcp : précipitation quotidienne simulé sous le scénario rcp
	P500 : hauteur géopotentielle à 500hpa
	S500 : humidité spécifique à une hauteur de 500hpa
	S850 : humidité spécifique à une hauteur de 850hpa
	Shum : humidité spécifique près de la surface
	P_u : composante zonale de vitesse
	P_v : composante méridienne de vitesse
Température	Temp : température à 2m du sol
	Mslp : pression au niveau moyen de la mer
	P_u : composante zonale de vitesse
	P_v : composante méridienne de vitesse
	S850 : humidité spécifique à une hauteur de 850hpa
	S500 : humidité spécifique à une hauteur de 500hpa
	Shum : humidité spécifique près de la surface
	P_f : vitesse d'écoulement géostrophique

Tableau A2.1 : les prédictants et prédicteurs utilisé lors de l'étude

Equations des modèles de downscaling (MJJA)

➤ Précipitations :

RR_Cotonou

$$RR = 6,37475791079902 - 1,06295675804968 * shum + 0,661961010877386 * p500 - 0,24873245540192 * s500 - 2,26824116800114 * p1_u + 1,31471833554965 * p8_u + 0,351109000808376 * precp$$

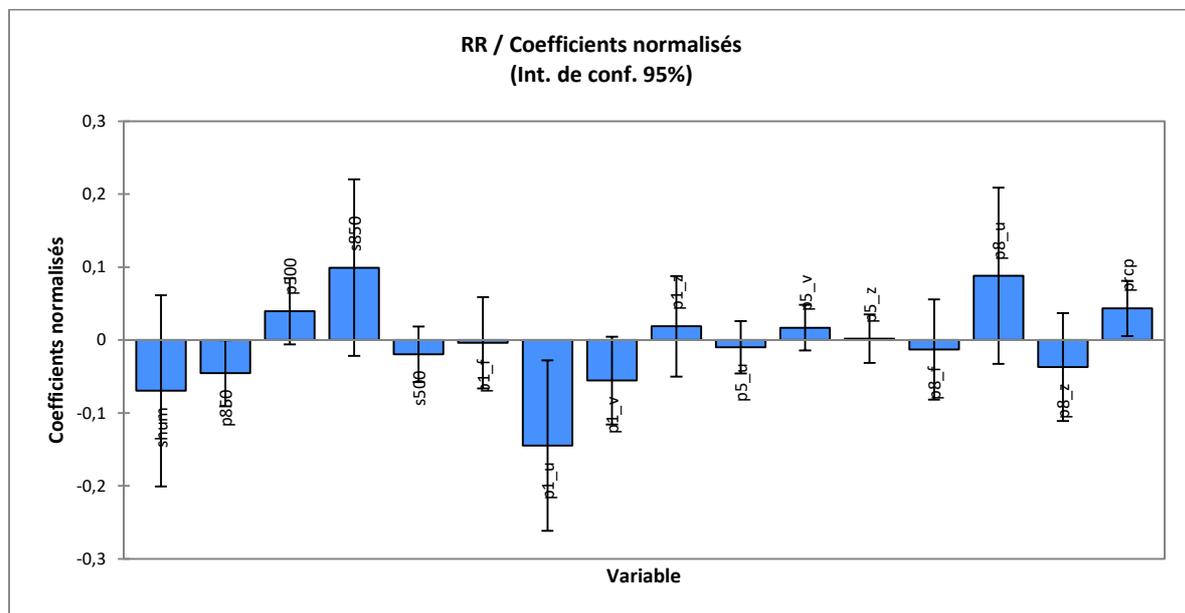


Figure A2.1 : RR observée coefficients normalisés (degré de confiance 95%) à la station de Cotonou

RR_Kandi

$$RR = 4,41263038574083 + 2,57227461851509 * shum - 1,95964086444983 * s850 - 1,20540351321032 * p1_u - 1,66017893385896 * p5_u + 1,8152551580602 * p8_u - 0,084179750067198 * prcp$$

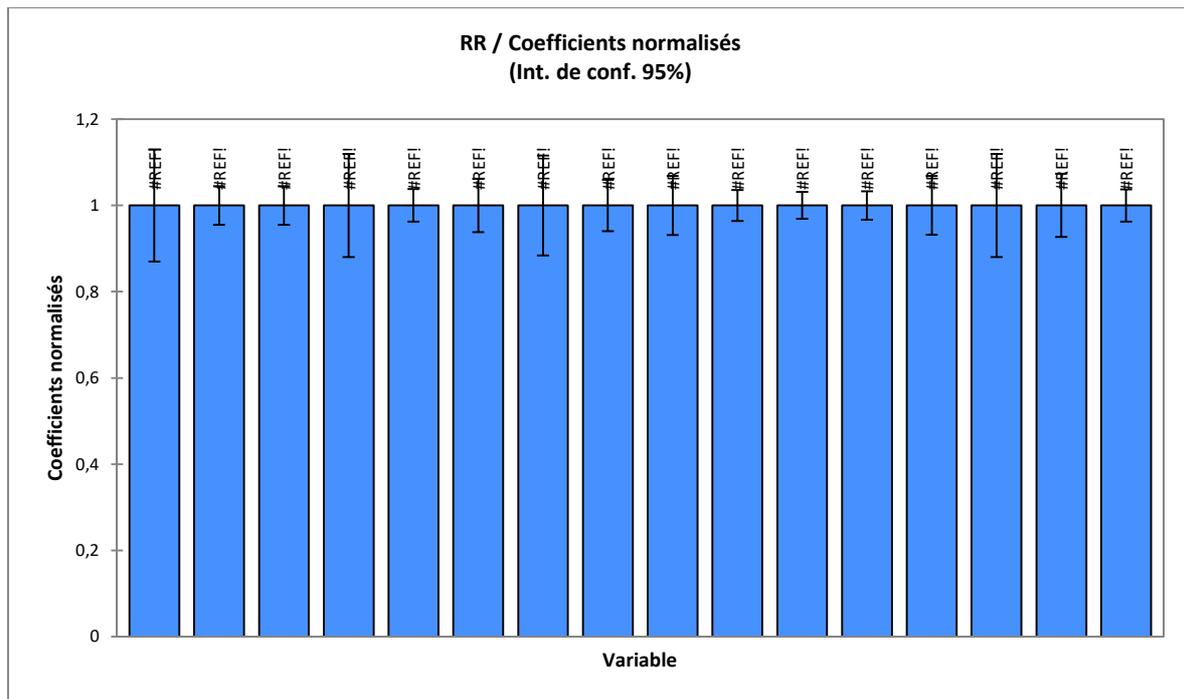


Figure A2.2 : RR observée coefficients normalisés (degré de confiance 95%) à la station de Kandi

RR_Save

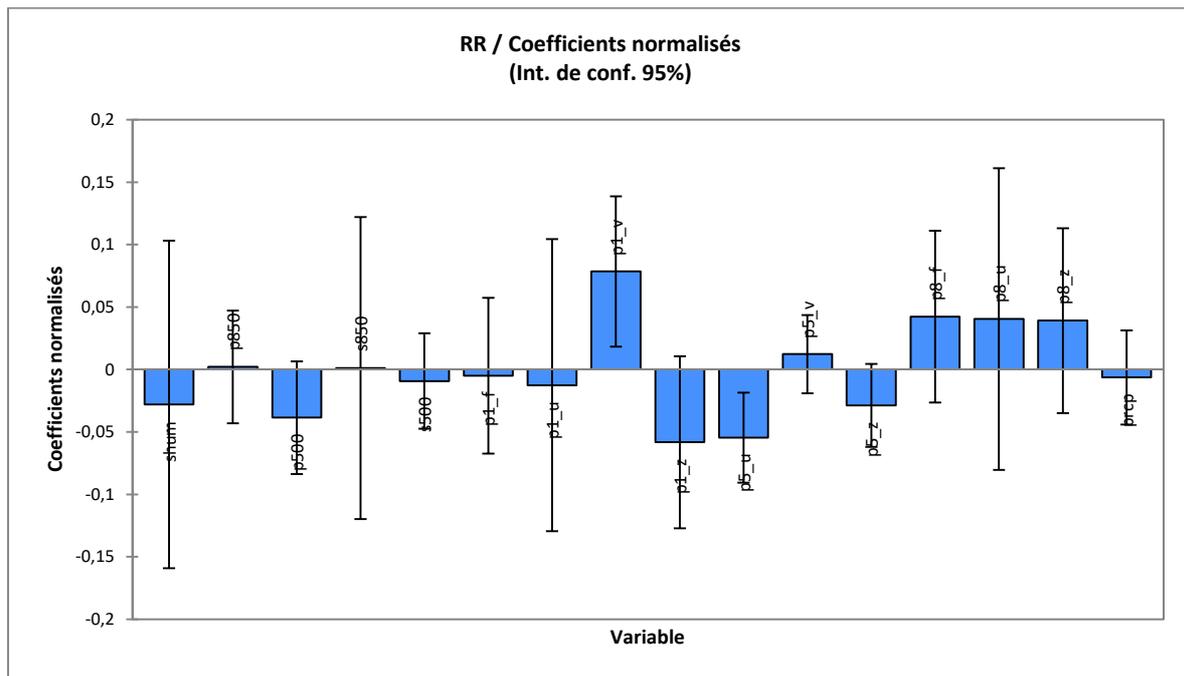
$$RR = 4,62504288799934 - 0,31026444683264 * shum - 0,470209123649771 * p500 + 0,012678851363769 * s850 + 0,883250543437879 * p1_v + 0,43651775914462 * p8_u - 0,0375202385762748 * prcp$$


Figure A2.3 : RR observée coefficients normalisés (degré de confiance 95%) à la station de S

Tmax_Cotonou

$$T_{max} = 29,6930544525585 - 0,343654518256346 * shum - 0,37591328949694 * s500 + 0,187011615657864 * p1_u + 0,566350523365839 * p8_f - 0,766037454334693 * p8_u - 0,97820788603542 * temp$$

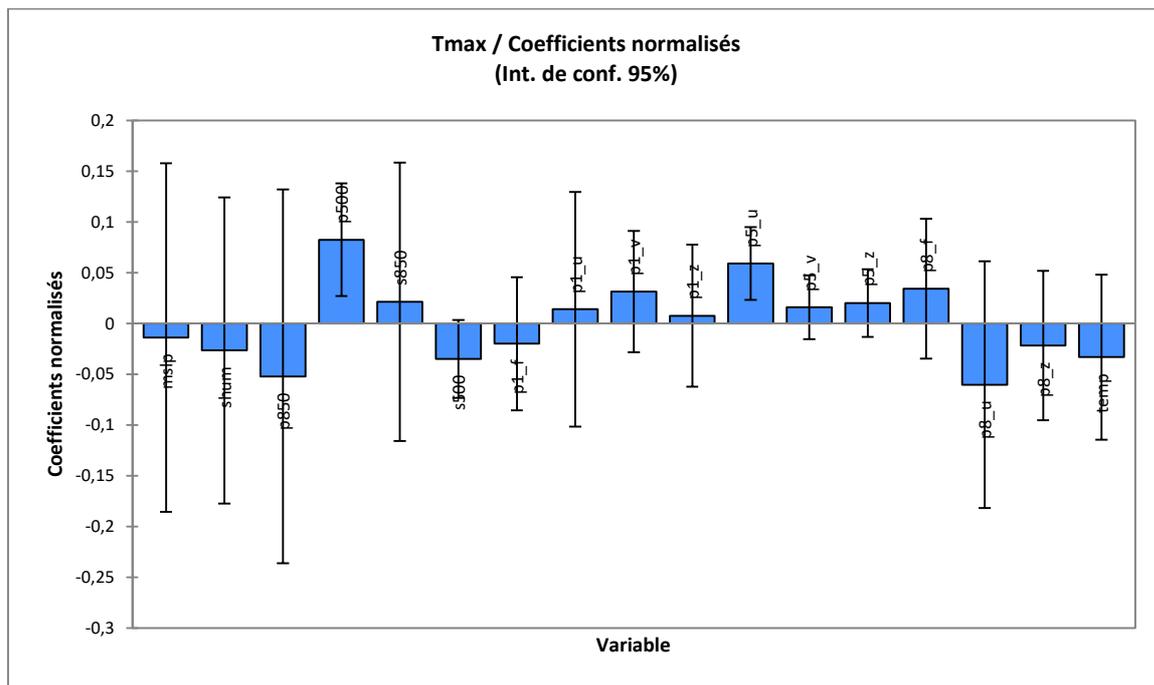


Figure A2.4 : Tmax observée coefficients normalisés (degré de confiance 95%) à la station de Cotonou

Tmax_Kandi

$$T_{max} = 33,0451536026152 + 0,345153650115413 * shum - 0,804183512809041 * s500 - 0,67088393230531 * p1_v + 1,43992392222136 * p5_u - 1,05899668273867 * p8_u + 1,55107740968946 * temp$$

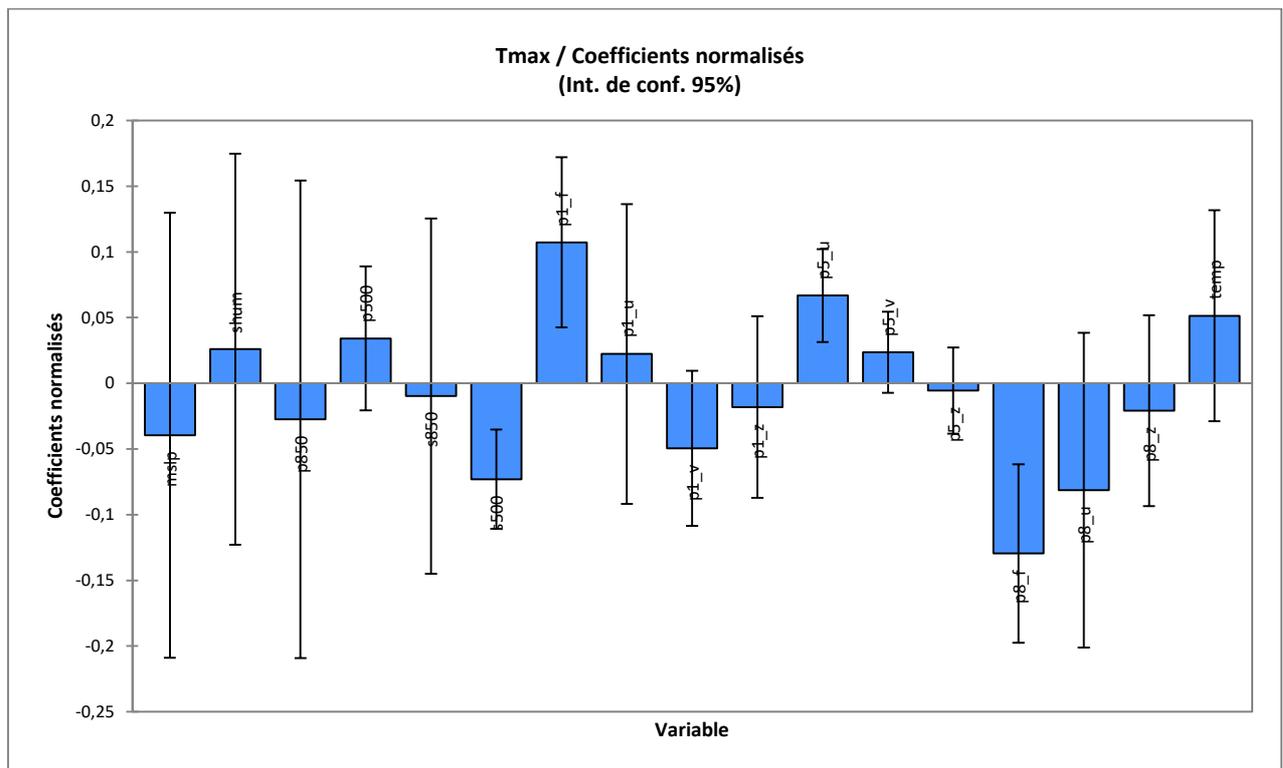


Figure A2.5 : Tmax observée coefficients normalisés (degré de confiance 95%) à la station de Kandi

Tmax_Save

$$T_{max} = 31,6838415612189 - 0,966289526512685 * shum + 0,766221188198269 * s850 - 0,369880021353208 * p1_u + 0,793874520820105 * p5_u - 0,321035770223459 * p8_u + 9,51382583913745E-02 * temp$$

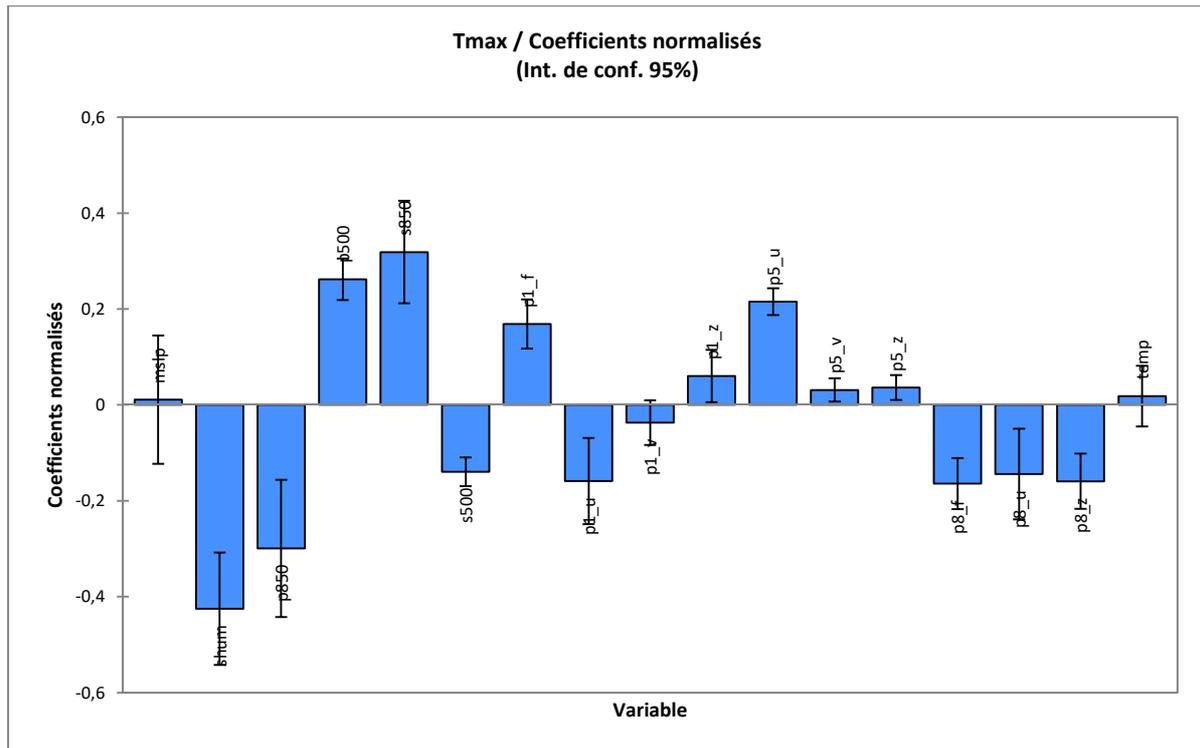


Figure A2.6 : Tmax observée coefficients normalisés (degré de confiance 95%) à la station de Save

Tmin_Cotonou

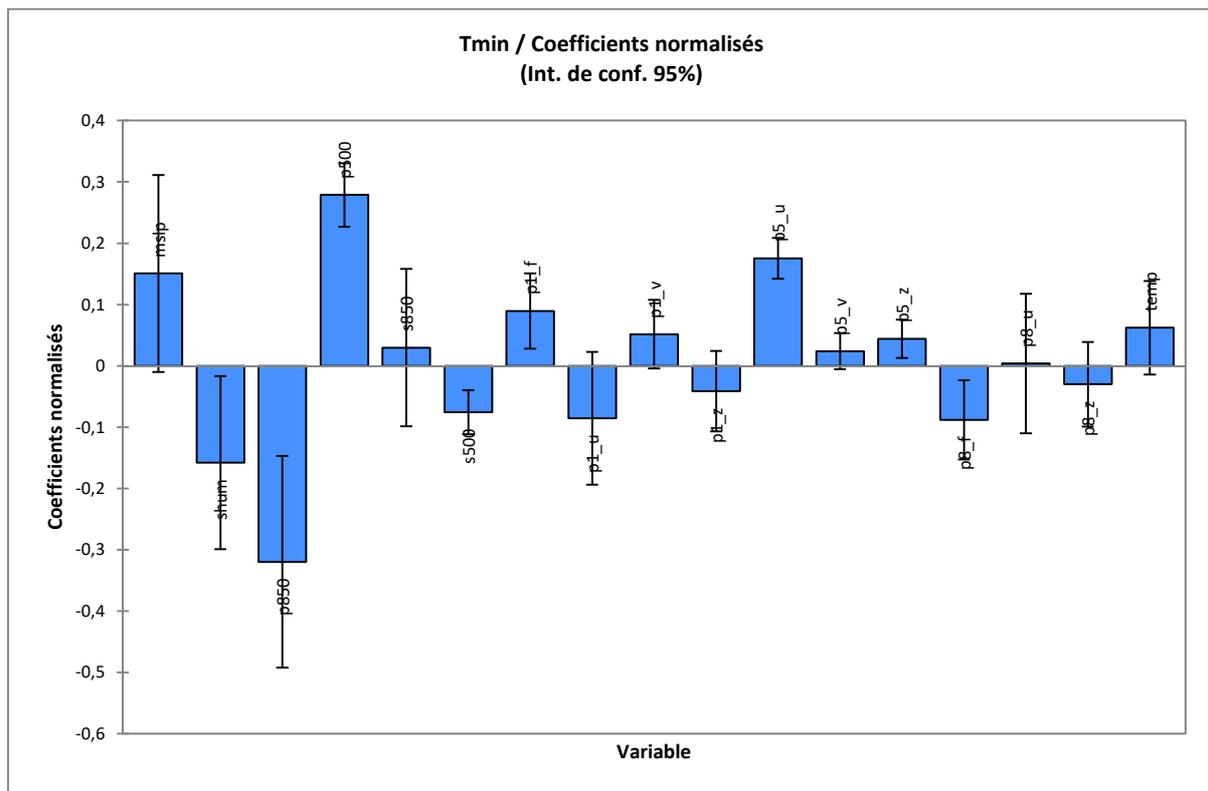
$$T_{min} = 24,1570476038701 - 0,207003279560498 * shum + 4,12343708242131E-02 * s850 - 0,115223163571853 * p1_u + 0,37283157284645 * p5_u + 4,93397360380628E-03 * n8_u + 0,185095429016253 * temp$$


Figure A2.1 :Tmin observée coefficients normalisés (degré de confiance 95%) à la station de Cotonou

Tmin_Kandi

$$Tmin = 23,6050038180943 - 0,816668338340475 * shum + 0,684124911459227 * p500 + 0,688276565442904 * s850 - 0,210178759847283 * p1_u - 0,23428007764115 * p8_u + 5,90080493922475E-02 * temp$$

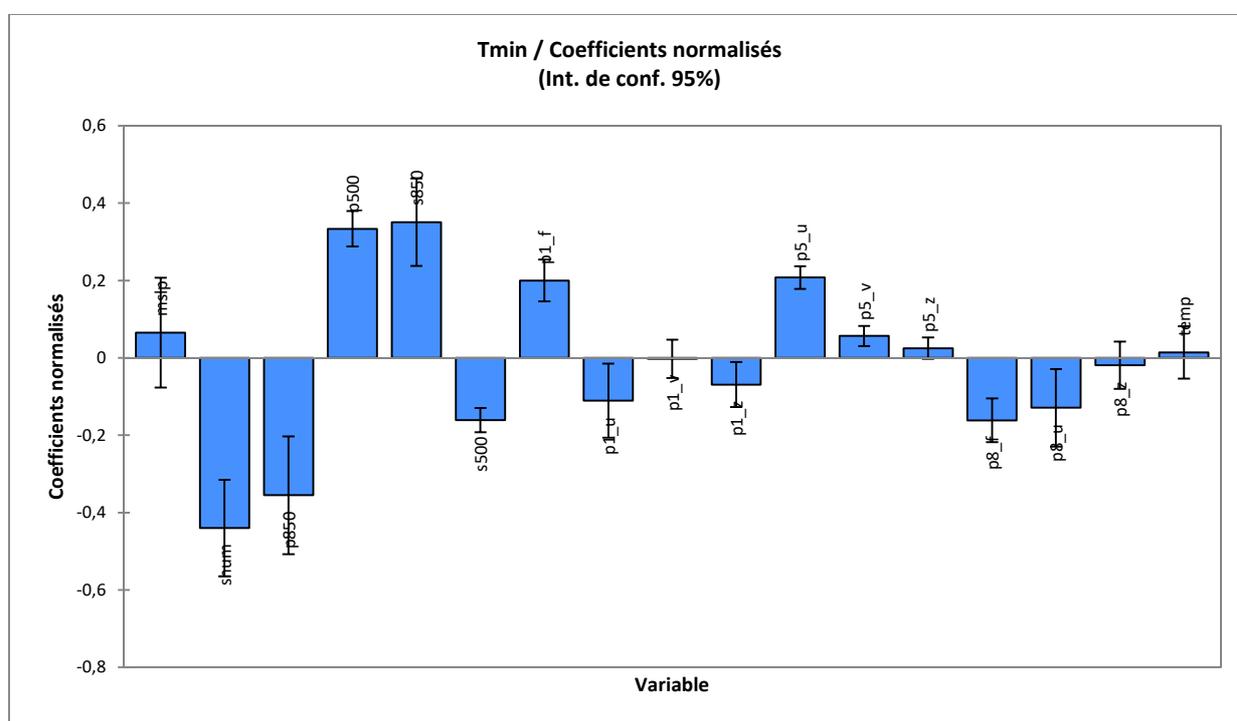


Figure A2.1 : Tmin observée coefficients normalisés (degré de confiance 95%) à la station de Kandi

Tmin_Save

$$T_{min} = 22,0252714182655 + 0,328677897454576 * shum - 0,255479530795522 * s500 + 6,3379085203106E-03 * p1_u + 0,453596618584288 * p5_u - 0,384167802455686 * p8_u - 9,09065152833551E-02 * temp$$

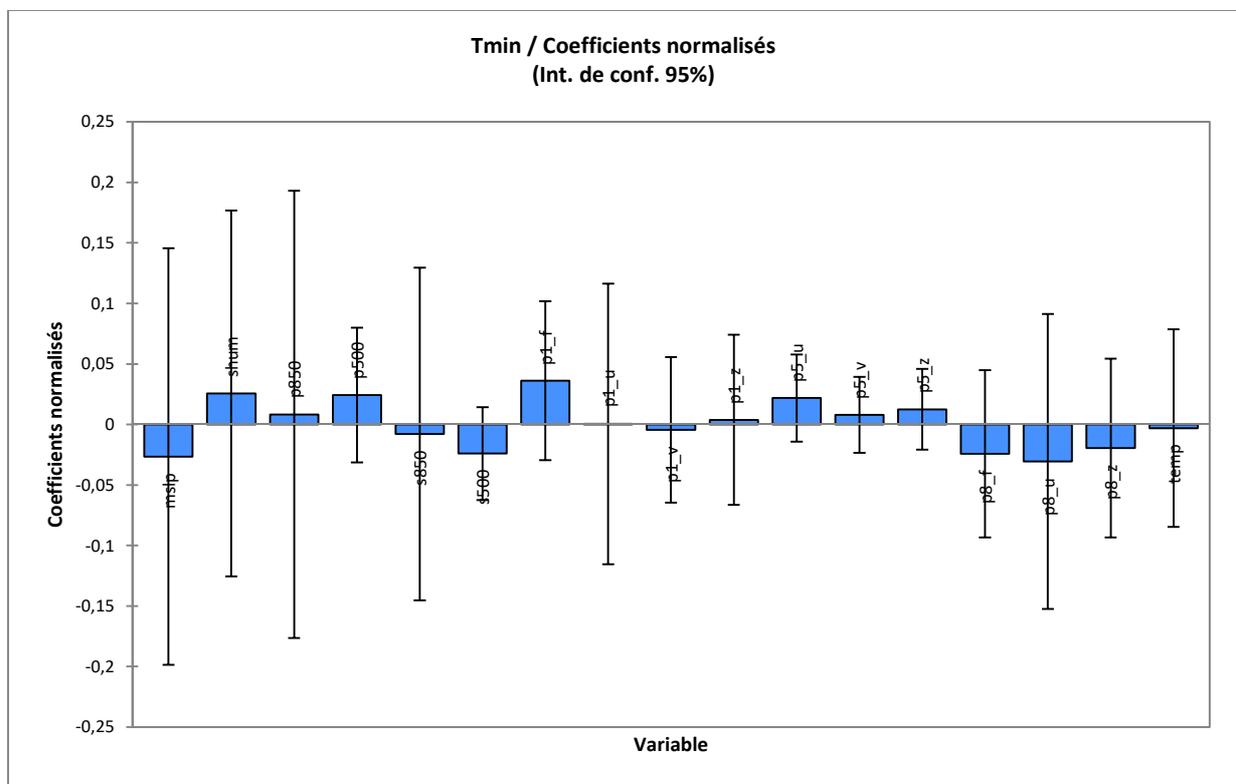


Figure A2.1 : Tmin observée coefficients normalisés (degré de confiance 95%) à la station de Save