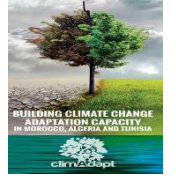




الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عبد الحميد بن باديس

UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS MOSTAGANEM

كلية العلوم الدقيقة والإعلام الآلي

FACULTE DES SCIENCES EXACTES ET DE L'INFORMATIQUE

قسم الكيمياء

DEPARTEMENT DE CHIMIE

Mémoire

*Pour L'obtention Du Diplôme De Master
Option : Adaptation Au Changement Climatique
Et Gestion Des Risques Naturels*

Thème :

**Projection du climat futur sur l'Algérie,
par les modèles climatiques
CNRM-CM et MPI-ESM**

Présenté par :

- Mr. FORLOUL Sedik
- Mr. BOUZID Ahmed

Devant le jury:

Mr. KADI Sid El Mahi Lamine	Professeur	Président
Mr. ABSAR Belkacem	Docteur	Examineur
Mr. BENMEKKI Houari	Professeur	Encadreur

Année universitaire : 2015 - 2016

Résumé :

La modélisation du climat de l'Afrique du Nord durant le 21^{ème} siècle a été effectuée dans l'optique d'évaluer les impacts du changement climatique au moyen de l'évolution des précipitations et des températures, et de permettre aux décideurs de prendre des mesures d'adaptation et d'atténuation afin de réduire la vulnérabilité de cette région face aux effets néfastes provoqués par ce phénomène.

Le continent africain présente un risque accru de vulnérabilité aux perturbations induites par les changements climatiques. En outre, ainsi que l'illustre le 4^{ème} et le 5^{ème} rapport d'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), les capacités du continent en matière d'adaptation demeurent faibles. Aujourd'hui il est sans équivoque que des changements climatiques dus au moins en partie aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre sont en cours, et qu'ils se traduisent par une hausse globale des températures.

L'analyse des observations météorologiques du 20^{ème} siècle montre une nette tendance à un réchauffement global. Cette tendance largement visible, avec une accélération nette du réchauffement à partir des années 1980.

Dans ce travail nous allons analyser le comportement du climat futur à travers des indicateurs climatiques de surface à savoir (T2mean, T2max, T2min et les précipitations annuelles) simulées entre 1995 et 2100 par deux modèles climatiques européens, CNRM-CM5 de Météo France et le modèle MPI-ESM-LR (Earth system model of Max Planck Institute for Meteorology/Allemagne). En analysant l'évolution temporelle, les projections de différents scénarios ainsi que les anomalies.

Sommaire

Résumé	1
Liste des figures	2
Liste des tableaux	8
Introduction	9
Chapitre I : Le changement climatique à l'échelle planétaire	11
I.1 Le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat)	12
I.1.1 Objectifs	12
I.1.2 Organisation	12
I.1.3 Activités	13
I.1.4 Les rapports d'évaluation	14
I.1.4.1 Le premier rapport d'évaluation (en 1990)	14
I.1.4.2 Deuxième Rapport d'évaluation « Changements climatiques 1995 »	14
I.1.4.3 Troisième Rapport d'évaluation « Bilan 2001 des changements climatiques »	14
I.1.4.4 Quatrième Rapport d'évaluation « Changements Climatiques 2007 »	14
I.1.4.5 Cinquième Rapport d'évaluation « Changements Climatiques 2014 »	15
I.1.5 Crédibilité et critiques du GIEC	16
I.2 Définition du changement climatique	17
I.3 Le changement climatique à l'échelle planétaire	17
I.3.1 Les températures	19
I.3.2 Les précipitations	22
Chapitre II : Le changement climatique en Algérie	24
II.1 L'Algérie géographique	25
II.2 L'observation météorologique	28
II.3 L'Algérie climatique	28
II.3.1 Température	30
II.3.2 Précipitations	30
II.4 Evolution climatique	30
II.5 L'Algérie bioclimatique	34
II.5.1 Les domaines bioclimatiques	34
II.5.1.1 Le domaine humide et subhumide	35
II.5.1.2 Le domaine semi-aride	35
II.5.1.3 Le domaine aride ou steppique	35
II.5.1.4 Le domaine désertique	36
Chapitre III : Le système climatique	37
III.1 Définition du système climatique	38
III.1.1 Les propriétés du système climatiques	40
III.1.2 Les éléments du système climatique	40
III.1.2.1 L'atmosphère	40

III.1.2.2 L'océan	41
III.1.2.3 La biosphère	42
III.1.2.4 La cryosphère	43
III.2 Quelques mécanismes physiques du système climatique	44
III.2.1 Effet de serre	44
III.2.1.1 L'effet de serre	44
III.2.1.2 Principe	44
III.2.1.3 Effet de serre additionnel	45
III.2.2 La sensibilité climatique	47
III.2.3 Rétroaction	47
III.2.4 Forçage radiatif	49
III.2.5 Aérosols	50
III.2.6 Le cycle de carbone	51
III.2.7 Nuages	52
III.3 Changements observés dans le système climatique	53
III.3.1 L'atmosphère	53
III.3.2 L'océan	56
III.3.3 La cryosphère	57
III.3.4 Le niveau des mers	60
III.3.5 Le cycle du carbone et autres cycles biogéochimiques	61
Chapitre IV : Les modèles climatiques	63
IV.1 Les modèles climatiques	64
IV.1.1 Définition	64
IV.1.2 Types de modèles climatiques	65
IV.2 Principe des modèles climatiques	65
IV.3 Evolution (maillage) des modèles climatiques globaux au cours du temps	66
IV.4 Hiérarchie des modèles climatiques	67
IV.5 Evolution du degré de complexité des modèles depuis leurs débuts	69
IV.6 Caractéristiques des modèles	70
IV.7 Les différents scénarios utilisés par les modèles climatiques	71
IV.7.1 Les scénarios « SRES » (Special Report on Emissions Scenarios)	72
IV.7.2 Les scénarios « RCP » (Representative Concentration Pathway)	75
IV.8 Les incertitudes liées aux modèles climatiques	77
Chapitre V : Projection climatique des températures et des précipitations en Algérie, selon AR4, en utilisant le logiciel « MAGICC ».	79
V.1 Définition du logiciel MAGICC	80
V.2 Description du logiciel MAGICC	80
V.3 Description de SCENGEN (SCENario GENerator)	83
V.4 Comparaisons des modèles	85
V.5 Approche du travail et analyse des projections climatiques	86
V.5.1 Application	86
V.5.2 Utilisation du logiciel SCENGEN	87
V.6 Résultats et commentaires	93

Chapitre VI : Projection climatique des températures et des précipitations en Algérie, selon AR5, en utilisant le logiciel « SimCLIM2013».	94
VI.1 Définition du logiciel SimCLIM	95
VI.2 Principales caractéristiques de SimCLIM	96
VI.2.1 Unicité	96
VI.2.2 L'intégration	96
VI.2.3 Pistes multiples et les analyses de sensibilité	96
VI.2.4 Facilement de mis à jour	97
VI.2.5 Une partie du processus de prise de décision	97
VI.3 Comparaisons des modèles	99
VI.4 Approche du travail et analyse des projections climatiques	100
VI.4.1 Application	100
VI.4.2 Utilisation du logiciel SimCLIM2013	100
VI.5 Résultats et commentaires	133
Conclusion générale et perspectives	146
Annexes	151
Bibliographie	160

Introduction :

Selon le GIEC, le changement climatique se définit comme une variation statistiquement significative de l'état moyen du climat ou de sa variabilité, persistant pendant de longues périodes (plus de 30 ans). Le changement climatique peut être dû à des processus internes naturels, à des forçages externes, ou à des changements anthropiques persistants de la composition de l'atmosphère ou de l'affectation des terres ».

Le Groupe Intergouvernemental sur le Changement Climatique (GIEC) a confirmé dans son 4^{ème} rapport (AR4 en 2007) que l'augmentation de concentration des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère résultait de l'activité humaine, notamment de la consommation et la production d'énergie, et qu'en conséquence, les températures devraient sensiblement augmenter au cours des prochaines années.

Les projections des changements au sein du système climatique sont réalisées à l'aide d'une hiérarchie de modèles climatiques qui comprend des modèles climatiques simples, des modèles de complexité intermédiaire, des modèles climatiques détaillés et des modèles de système Terre. Ces modèles simulent les changements à partir d'un ensemble de scénarios de forçages anthropiques. Dans la perspective de l'élaboration du 5^{ème} rapport d'évaluation (AR5) du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat créé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale OMM) publié en 2013 ; Un nouvel ensemble de scénarios, les profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP, pour : Representative Concentration Pathways) de gaz à effet de serre (GES), d'ozone et de précurseurs des aérosols, a été utilisé pour les nouvelles simulations de modèles climatiques réalisées dans le cadre de la cinquième phase du Projet de comparaison de modèles couplés (CMIP5 ,pour : Coupled Model Intercomparison Project) du Programme mondial de recherche sur le climat. Dans tous les RCP, les concentrations atmosphériques du CO₂ sont plus élevées en 2100 qu'actuellement, en raison d'une poursuite de l'augmentation du cumul des émissions de CO₂ dans l'atmosphère au cours du XXI^e siècle. Ces scénarios, peuvent correspondre à des efforts plus ou moins grands de réduction des émissions de GES au niveau mondial.

L'objectif de ce présent mémoire est de simuler le climat futur et voir si l'amplitude du forçage climatique se traduisait par des tendances plus ou moins marquées sur les variables climatiques

analysées en l'Algérie, à travers les paramètres de surface à savoir la température moyenne (Tmean) , maximale (Tmax), minimale (Tmin), et les précipitations annuelles (RR).

Ces indicateurs sont calculés à partir des simulations globales qui ont été produites pour la période 1995 – 2100, selon les deux scénarios RCP 2.6 et RCP 6.0.

Liste des figures

Figure I.1. Organigramme du GIEC.

Figure I.2. Panorama chronologique du GIEC.

Figure I.3. (Graphique supérieur) Moyenne annuelle mondiale des températures relevées (Points noirs) avec ajustements simples par rapport aux données.

Figure I.4. Représentation géospatiale la plus importante (en haut) de l'Indice de sévérité des sécheresses, développé par Palmer (PDSI), sur une base mensuelle, pour les années 1900-2002. Le PDSI est le principal indice des sécheresses.

Figure II.1. Coupe topographique de l'Algérie (Source : Organisation Mondial de la Météorologie OMM).

Figure II.2. Evolution des températures moyennes annuelles de l'Algérie (1901-2000) (Djellouli, 2008).

Figure II.3. Evolution des totaux annuels de précipitations de l'Algérie (1901-2000) (Djellouli, 2008).

Figure II.4. Evolution de la température moyenne annuelle à Oran en °C (1926-2006) (Tabet-Aoul, 2008).

Figure II.5. Evolution des précipitations moyennes annuelles à Oran en mm (1926-2006) (Tabet-Aoul, 2008).

Figure II.6. Les principaux domaines bioclimatiques de l'Algérie (Source : OMM).

Figure III.1. Les différents échanges entre éléments du système climatiques.

Figure III.2. La circulation générale atmosphérique.

Figure III.3. Circulation thermohaline plusieurs centaines à un millier d'années.

Figure III.4. La couverture végétale de la Terre.

Figure III.6. La distribution de l'énergie solaire.

Figure III.7. Influence de la contribution humaine sur l'élévation de la température.

Figure III.8. Résumé des principaux éléments du forçage radiatif du changement climatique.

Figure III.9. Le cycle global du carbone.

Figure III.10. Anomalies observées de températures moyennes en surface, combinant les terres émergées et les océans, de 1850 à 2012, ainsi que la carte de l'évolution des températures en surface observée entre 1901 et 2012, dérivée des tendances

de températures déterminées par régression linéaire d'un ensemble de données (courbe orange dans la partie a).

Figure III.11. Cartes des changements observés de précipitations entre 1901 et 2010, et entre 1951 et 2010.

Figure III.12. Différents indicateurs observés des évolutions du climat du globe.

Figure III.13. Différents indicateurs observés décrivant les changements affectant le cycle du carbone global.

Figure IV.1. Principe d'un modèle climatique.

Figure IV.2. L'évolution des modèles climatiques globaux dans le temps.

Figure IV.3. Comparaison de différents modèles climatiques et de leurs composantes du point de vue de la représentativité (axe vertical) et de la complexité (axe horizontal).

Figure IV.4. Évolution du degré de complexité des modèles climatiques depuis 1970.

Figure IV.5. Etapes de l'évaluation intégrée des modifications des concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols, du changement climatique et de l'élévation du niveau de la mer, à l'aide de modèles climat simples.

Figure IV.6. Scénarios d'émissions utilisées pour les projections climatiques la première série de scénarios sont regroupés sous l'appellation "scénarios A1".

Figure IV.7. Projections des émissions des gaz à effet de serre et de la température de la terre jusqu'en 2100.

Figure IV.8. Les quatre RCP, évolution du forçage radiatif et comparaison avec les SRES (d'après S. Planton).

Figure V.1. Organigramme du logiciel MAGICC et SCENGEN.

Figure V.3. Evolution de la température moyenne annuelle de surface de 1990 à 2050 simulé par le modèle CNRM-CM3 avec prise en compte des aérosols de la région 1. La température varie entre 1 à 3°C avec une prédominance aux alentours de 2 à 2.5°C.

Figure V.4. Evolution de la température moyenne annuelle de surface de 1990 à 2050 simulé par le modèle CNRM sans prise en compte des aérosols de la région 1. La température varie entre 1 à 2°C avec une prédominance de 1 à 1.5.

Figure V.5. Evolution de la température moyenne annuelle de 1990 à 2050 simulé par le modèle IPSL avec prise en compte des aérosols. La température varie entre 1 à 3°C avec des valeurs plus élevées sur les continents que sur la méditerranée.

Figure V.6. Evolution de la température moyenne annuelle de 1990 à 2050 simulé par le modèle IPSL sans prise en compte des aérosols. La température varie entre 1 et

1.5°C avec des températures plus basse sur la méditerranée que sur les continents.

Figure V.7. Evolution de la précipitation moyenne annuelle de 1990 à 2050 simulé par le modèle CNRM-CM3 avec prise en compte des aérosols.

Figure V.8. Evolution de la précipitation moyenne annuelle de 1990 à 2050 simulé par le modèle CNRM-CM3 sans prise en compte des aérosols.

Figure V.9. Evolution de la précipitation moyenne annuelle de 1990 à 2050 simulé par le modèle CNRM-CM3 avec prise en compte des aérosols.

Figure VI.1. Organigramme du logiciel SIMCLIM 2013.

Figure VI.2. Projections climatiques de Tmean annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

Figure VI.3. Projections climatiques de Tmean annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

Figure VI.4. Projections climatiques de Tmin annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

Figure VI.5. Projections climatiques de Tmin annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

Figure VI.6. Projections climatiques de Tmax annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

Figure VI.7. Projections climatiques de Tmax annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

Figure VI.8. Projections climatiques de RR annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

Figure VI.9. Projections climatiques de RR annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

- Figure VI.10.** Projections climatiques de Tmean annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.
- Figure VI.11.** Projections climatiques de Tmean annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.
- Figure VI.12.** Projections climatiques de Tmin annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.
- Figure VI.13.** Projections climatiques de Tmin annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.
- Figure VI.14.** Projections climatiques de Tmax annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.
- Figure VI.15.** Projections climatiques de Tmax annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.
- Figure VI.16.** Projections climatiques de RR annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.
- Figure VI.17.** Projections climatiques de RR annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.
- Figure VI.18.** Projections climatiques de Tmean annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.
- Figure VI.19.** Projections climatiques de Tmean annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.
- Figure VI.20.** Projections climatiques de Tmin annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.
- Figure VI.21.** Projections climatiques de Tmin annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.
- Figure VI.22.** Projections climatiques de Tmax annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le

modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

Figure VI.23. Projections climatiques de Tmax annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

Figure VI.24. Projections climatiques de RR annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

Figure VI.25. Projections climatiques de RR annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

Figure VI.26. Projections climatiques de Tmean annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

Figure VI.27. Projections climatiques de Tmean annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

Figure VI.28. Projections climatiques de Tmin annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

Figure VI.29. Projections climatiques de Tmin annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

Figure VI.30. Projections climatiques de Tmax annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

Figure VI.31. Projections climatiques de Tmax annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

Figure VI.32. Projections climatiques de RR annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

Figure VI.33. Projections climatiques de RR annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

- Figure VI.34.** Evolution climatique de Tmean annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6.
- Figure VI.35.** Evolution climatique de Tmin annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6.
- Figure VI.36.** Evolution climatique de Tmax annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6.
- Figure VI.37.** Evolution climatique de RR annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6.
- Figure VI.38.** Evolution climatique de Tmean annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0.
- Figure VI.39.** Evolution climatique de Tmin annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0.
- Figure VI.40.** Evolution climatique de Tmax annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0.
- Figure VI.41.** Evolution climatique de RR annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0.
- Figure VI.42.** Evolution climatique de Tmean annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6.
- Figure VI.43.** Evolution climatique de Tmin annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6.
- Figure VI.44.** Evolution climatique de Tmax annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6.
- Figure VI.45.** Evolution climatique de RR annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6.
- Figure VI.46.** Evolution climatique de Tmean annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0.
- Figure VI.47.** Evolution climatique de Tmin annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0.
- Figure VI.48.** Evolution climatique de Tmax annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0.
- Figure VI.49.** Evolution climatique de RR annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0.

Liste des tableaux

Tableau VI.1. Principales caractéristiques des quatre grandes familles de scénarios SRES.

Tableau IV.2. Caractéristiques principales des RCP (Moss et al, Nature 2010).

Tableau V.1. Les modèles climatiques de SCENGEN.

Tableau V.2. Caractéristiques générales des modèles climatiques CNRM-CM3 et IPSL-CM4.

Tableau V.3. Variables et paramètres utilisés dans MAGICC.

Tableau V.4. Variables et échelle de SCENGEN.

Tableau V.5. Variation de la température globale en fonction de l'année choisi et du scénario considéré.

Tableau V.6. Évolution de la température moyenne annuelle et de la précipitation moyenne annuelle simulée entre 1990 à 2050 par les modèles CNRM et IPSL suivant les différents scénarios.

Tableau V.7. Récapitulatif des résultats du scénario A1 simulé sur la région d'étude considéré.

Tableau VI.1. Les modèles climatiques de SimCLIM2013.

Tableau VI.2. Caractéristiques générales des modèles climatiques CNRM-CM5 et MPI-ESM-LR.

CHAPITRE I

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE A L'ECHELLE PLANETAIRE

Chapitre I : Le changement climatique à l'échelle planétaire	11
I.1 Le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat)	12
I.1.1 Objectifs	12
I.1.2 Organisation	12
I.1.3 Activités	13
I.1.4 Les rapports d'évaluation	14
I.1.4.1 Le premier rapport d'évaluation (en 1990)	14
I.1.4.2 Deuxième Rapport d'évaluation « Changements climatiques 1995 »	14
I.1.4.3 Troisième Rapport d'évaluation « Bilan 2001 des changements climatiques »	14
I.1.4.4 Quatrième Rapport d'évaluation « Changements Climatiques 2007 »	14
I.1.4.5 Cinquième Rapport d'évaluation « Changements Climatiques 2014 »	15
I.1.5 Crédibilité et critiques du GIEC	16
I.2 Définition du changement climatique	17
I.3 Le changement climatique à l'échelle planétaire	17
I.3.1 Les températures	19
I.3.2 Les précipitations	22

I.1 Le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) :

Le GIEC, en Anglais *IPCC* (Intergovernmental Panel on Climate Change) : est l'organe international chargé d'analyser scientifiquement les changements climatiques. Il a été créé en novembre 1988, à la demande du G7 (aujourd'hui G20), par deux organismes de l'ONU : l'organisation météorologique mondiale (OMM) et le programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) en vue de fournir aux responsables politiques des évaluations scientifiques périodiques concernant les changements climatiques, leurs incidences et les risques futurs et de leur présenter des stratégies d'adaptation et d'atténuation..

Le Prix Nobel de la paix lui a été attribué en 2007 conjointement avec Al Gore, ancien vice-président américain.

I.1.1 Objectifs :

Le GIEC a pour mandat d'évaluer, sans parti pris et de manière méthodique, claire et objective, les informations scientifiques, techniques et socio-économiques disponibles en rapport avec la question du changement climatique d'origine humaine. Le GIEC travaille à rendre compte des différents points de vue et des incertitudes, tout en dégagant clairement les éléments qui relèvent d'un consensus de la communauté scientifique.

Le GIEC n'est donc pas un organisme de recherche, mais un lieu d'expertise visant à synthétiser des travaux menés dans les laboratoires du monde entier.

I.1.2 Organisation :

Le GIEC est organisé en trois groupes de travail :

- Groupe I : Il étudie les principes physiques du changement climatique ;
- Groupe II : Il étudie les impacts, la vulnérabilité et l'adaptation au changement climatique ;
- Groupe III : Il étudie les moyens d'atténuer le changement climatique.

Un rapport spécial a été publié sur les scénarios d'émission (SRES : Special Report on Emission Scenarios), qui a été la base de certaines simulations dans les travaux des groupes de travail.

S'y ajoute une équipe spéciale pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, qui a produit des guides méthodologiques pour ces inventaires.

Chaque groupe de travail (et l'équipe spéciale) a deux co-présidents, l'un représentant les pays développés, l'autre les pays en voie de développement.

Le professeur Rajendra Pachauri est président du GIEC depuis 2002.

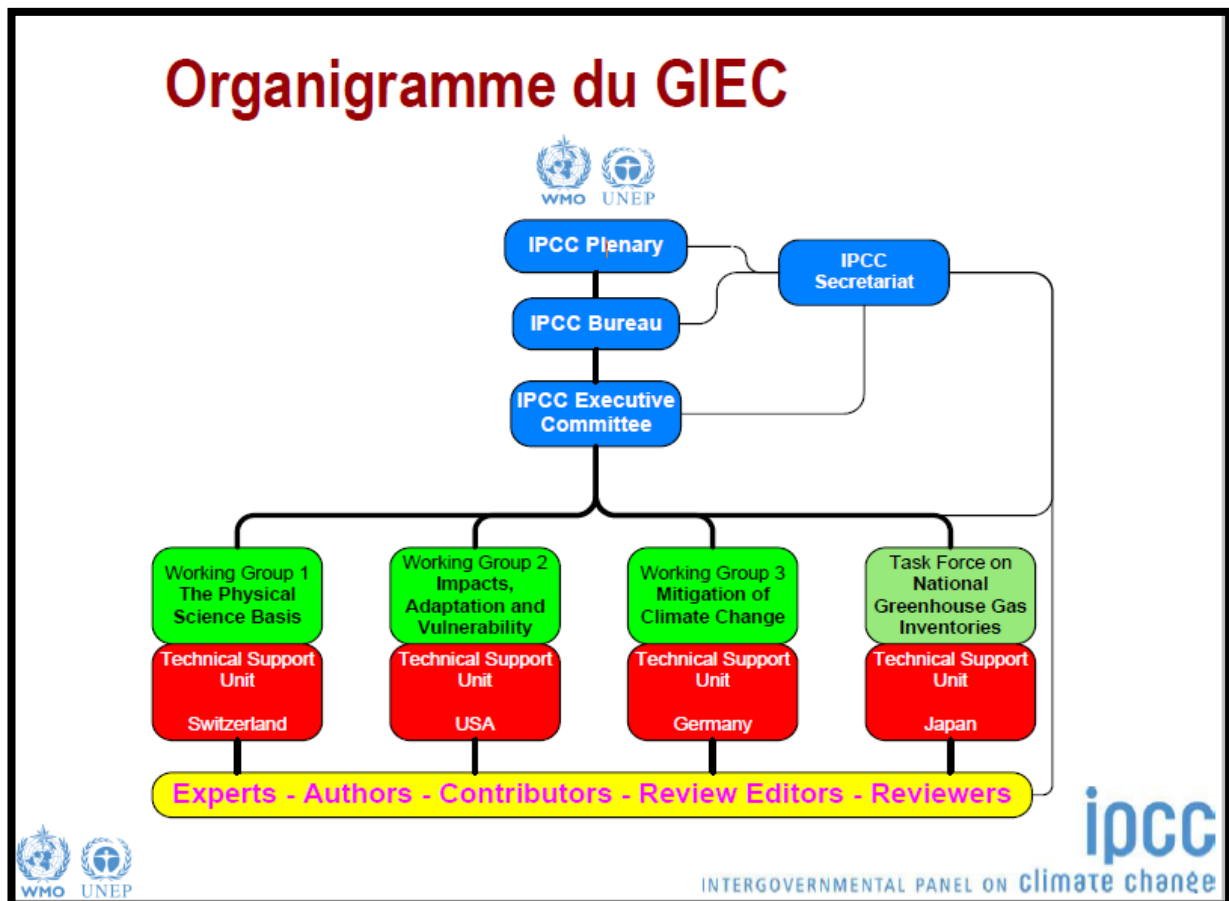


Figure I.1. Organigramme du GIEC

I.1.3 Activités :

Le GIEC tient une séance plénière annuelle associant des centaines de représentants des gouvernements et des associations participantes. Chaque pays membre dispose d'une voix (les petits pays ont donc autant de pouvoir que les grands). L'assemblée y établit le champ des rapports à produire et valide les rapports établis.

Le GIEC réunit également des ateliers d'experts sur les différentes questions touchant au changement climatique.

Ses activités sont principalement la production de rapports (rapport d'évaluation, rapports spéciaux), de directives méthodologiques et de documents techniques.

I.1.4 Les rapports d'évaluation :

Cinq (5) rapports ont été rédigés :

I.1.4.1 Le premier rapport d'évaluation (en 1990) :

Il confirmait les informations scientifiques à l'origine des préoccupations sur le changement climatique. Il a incité l'ONU à établir une Convention cadre sur les changements climatiques adoptée en 1992 et entrée en vigueur en mars 1994.

En 1992, le GIEC a produit un rapport supplémentaire destiné aux négociateurs de la Convention-cadre sur les changements climatiques du Sommet de la Terre de Rio de Janeiro, la même année. La principale conclusion de ce rapport est que les travaux scientifiques publiés depuis 1992 ne changeaient pas fondamentalement la compréhension de l'effet de serre et n'appelaient pas à remettre en cause les conclusions du précédent rapport.

I.1.4.2 Deuxième Rapport d'évaluation « Changements climatiques 1995 » :

Le rapport confirme l'influence des activités humaines sur les changements climatiques et prévoit un réchauffement moyen de 1 à 3, 5 degrés d'ici à 2100 ainsi qu'une augmentation du niveau de la mer de 15 à 95 centimètres.

Ce rapport a fourni les bases de négociation du protocole de Kyoto.

I.1.4.3 Troisième Rapport d'évaluation « Bilan 2001 des changements climatiques » :

Il comprend les trois rapports des groupes de travail et un rapport de synthèse sur les questions scientifiques directement liées aux politiques à suivre.

I.1.4.4 Quatrième Rapport d'évaluation « Changements Climatiques 2007 » :

Le quatrième rapport d'évaluation (AR4) a été publié le 16 novembre 2007. Il compile les travaux de chacun des Groupes de travail, présentés lors de trois sessions échelonnées au cours de l'année :

- Le rapport du Groupe de travail I sur les bases scientifiques des changements climatiques, présenté à Paris le 1er février 2007.

- Le rapport du Groupe de travail II sur les conséquences, l'adaptation et la vulnérabilité aux changements climatiques, présenté à Bruxelles le 5 avril 2007.
- Le rapport du Groupe de travail III sur l'atténuation des changements climatiques, présenté à Bangkok le 3 mai 2007.
- Le *Rapport de synthèse* (RSY) des précédents, rédigé sous la direction de Rajendra K. Pachauri, Président du GIEC, et publié avec la version finale de l'AR4.

Chacune de ces quatre parties est accompagnée d'un *Résumé à l'intention des décideurs* (Summary for Policy-Makers, SPM) qui récapitule, dans un format condensé, les conclusions du groupe de travail pour des non-experts, et en particulier les décideurs politiques. L'AR4 a servi ainsi de base aux négociations de la Conférence de Copenhague de 2009.

Il préconise que la réduction des gaz à effet de serre peut s'opérer sur des secteurs très variés de l'économie et de l'environnement. Les scientifiques du Giec ont fait la synthèse des différentes études présentant des scénarii d'émissions, classés par gamme d'augmentation de température à l'équilibre. En particulier, pour la catégorie de hausse de température comprise entre 2 et 2,4 degrés, cette synthèse montre que, d'après la grande majorité des études, le pic d'émissions mondiales se situe avant 2015. Pour infléchir sur le long terme la tendance au réchauffement et atteindre une stabilisation des taux de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, il est ensuite nécessaire de diminuer fortement les émissions (dans la gamme de -50 à -85% en 2050 par rapport à l'an 2000, pour une température à l'équilibre de 2 à 2,4°C plus élevée qu'aujourd'hui).

I.1.4.5 Cinquième Rapport d'évaluation « Changements Climatiques 2014 » :

Le GIEC travaille actuellement à la préparation de ce 5ème rapport d'évaluation des connaissances sur le climat. Il a fixé à 2013 la parution du premier volet (physique de l'atmosphère) et à 2014 celle des deux autres volets de l'ouvrage, consacrés respectivement aux impacts du changement climatique et au coût de la lutte contre le réchauffement planétaire. Quatre schémas « Représentatifs » des évolutions possibles des concentrations de gaz à effet de serre « Représentative Concentration Pathways » seront publiés avant fin 2008. Ils seront utilisés pour établir d'ici à fin 2010 de nouveaux scénarios d'émissions à trois horizons, 2035, 2100 et 2300.

I.1.5 Crédibilité et critiques du GIEC :

Les publications officielles du GIEC ont pour objet de proposer une synthèse des connaissances scientifiques. Ces synthèses incluent les publications qui font l'unanimité et celles qui sont contestées par des scientifiques. Ces rapports sont le fruit d'un long débat qui aboutit à un consensus : l'approbation de la version finale du rapport par tous les scientifiques et tous les gouvernements faisant partie du GIEC (la quasi-totalité des pays du monde sont représentés et ont signé l'approbation de la version finale, y compris les USA).

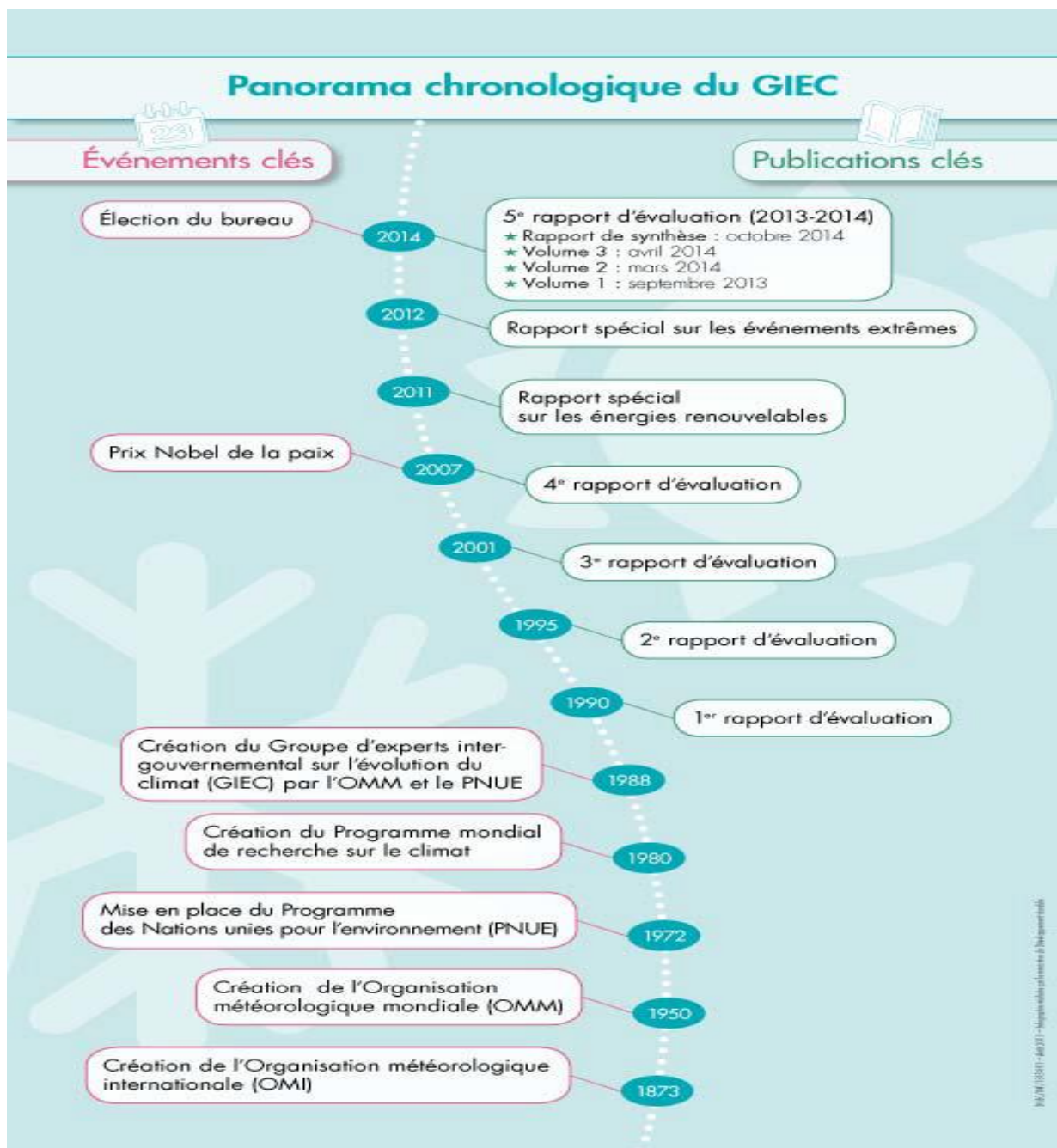


Figure I.2. Panorama chronologique du GIEC

I.2 Définition du changement climatique :

Selon le GIEC, le changement climatique s'entend d'une variation de l'état du climat que l'on peut déceler (par exemple au moyen de tests statistiques) par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus. Il se rapporte à tout changement du climat dans le temps, qu'il soit dû à la variabilité naturelle ou à l'activité humaine. Cette définition diffère de celle figurant dans la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), selon laquelle les changements climatiques désignent des changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables.

I.3 Le changement climatique à l'échelle planétaire :

Dans son quatrième Rapport d'évaluation, le GIEC, organisme coparrainé par l'OMM, expose les changements attendus, notamment une hausse de la fréquence et de l'intensité des crues, périodes de sécheresse, fortes tempêtes, vagues de chaleur et tempêtes de poussière, qui menacent la santé, hygiène, l'approvisionnement énergétique, les ressources en eau, la sécurité alimentaire etc. (GIEC, 2007).

Cette perception du climat futur repose sur les constats suivants :

- Les onze dernières années (1995-2006) figurent parmi les plus chaudes depuis qu'on dispose d'enregistrements de la température de surface (depuis 1850). La nouvelle valeur de la vitesse moyenne du réchauffement des cent dernières années (1906-2005) est de 0.74°C au lieu de 0.6°C . Il est aussi établi que l'année 1998 est l'année la plus chaude ($0,59^{\circ}\text{C}$ au-dessus de la normale 1961-1990).
- La teneur moyenne de l'atmosphère en vapeur d'eau a augmenté depuis au moins les années 1980 tant au-dessus des terres émergées et des océans que dans la haute troposphère. L'accroissement est dans l'ensemble cohérent avec le supplément de vapeur d'eau qu'un air chaud peut contenir.
- La fréquence des fortes précipitations a augmenté dans la plupart des zones terrestres, en cohérence avec le réchauffement et les accroissements observés de vapeur d'eau atmosphérique.
- Les observations effectuées depuis 1961 montrent que la température moyenne des océans a augmenté jusqu'à des profondeurs d'au moins 3000 m, et que les océans absorbaient plus de 80 % de la chaleur ajoutée au système climatique. Un tel

réchauffement entraîne la dilatation de l'eau de mer, contribuant à la montée du niveau des mers. En effet, le niveau global moyen de la mer s'est élevé à une vitesse moyenne de 1.8 [1.3 -2.3] mm/an, entre 1961 et 2003. Cette vitesse a été supérieure entre 1993 et 2003, soit environ 3.1 [2.4 -3.8] mm/an. L'élévation totale au XX^{ème} siècle est estimée à 0.17 [0.12-0.22].

- Des changements largement répandus des températures extrêmes ont été observés au cours des 50 dernières années. Les journées froides, les nuits froides et le gel sont devenus moins fréquents, tandis que les journées chaudes, les nuits chaudes et les vagues de chaleur sont devenues plus fréquentes.

Le pourcentage de la superficie de la planète où sévissent des conditions très sèches ou très humides quoique hautement variable, semble avoir augmenté depuis la fin des années 1970. Les précipitations connaissent des variations à différentes échelles de temps, on note une faible tendance à l'augmentation des précipitations dans hémisphère Sud et à l'échelon mondial.

A l'échelle régionale, de nombreuses études montrent des changements des régimes de précipitations, ce qui est une indication du changement de la circulation atmosphérique à une plus grande échelle.

Elles nous apprennent, entre autres, que le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord font partie désormais des premières régions affectées par les changements climatiques, d'autant plus qu'elles sont arides ou semi-arides.

Il faut remarquer qu'on ne pouvait pas, il y a seulement dix ans, être aussi franc et aussi tranché dans la description des changements climatiques et de la hausse des températures. (Najib Saab, 2009).

Ainsi, à l'échelle du Maghreb, le climat a connu un changement brutal à partir de 1973, date qui a coïncidé avec la sécheresse du Sahel (M.Tabet Aoul, 2011). Depuis 1973, on constate :

- Une occurrence plus grande des sécheresses : une année sur trois ;
- Une intensification des inondations : 1990 en Tunisie, 2001 en Algérie et en 2002 au Maroc ;
- Un nombre croissant de vagues de chaleurs en toutes saisons ;
- Des feux de forêts (perte annuelle de 25000 ha/an en Algérie et au Maroc ;
- Une élévation du niveau de la mer.

La période 1975-2004 a connu quelques années avec une pluviométrie excessive, concentrée sur de très courtes périodes de l'année. Les fortes précipitations qui se produisent en quelques

jours seulement en régions arides sont à l'origine de catastrophes naturelles telles que les inondations (janvier 1990 en Tunisie, novembre 2001 en Algérie et novembre 2002 au Maroc).

Ces inondations ont occasionné d'importants dégâts sur les infrastructures et l'habitat et réduit notablement l'activité économique et sociale : les dégâts liés à l'inondation d'Alger en novembre 2001 sont estimés à près d'un milliard de dollars et à plus d'un millier de morts. Le réchauffement entraîne l'élévation du niveau de la mer en raison de la dilatation thermique des mers et de la fonte de la glace terrestre. Les mesures fournies par les marégraphes, montre que l'élévation moyenne annuelle était de 1 à 2 mm au cours du vingtième siècle. D'après les informations fournies par quelques stations Européennes disposant de données pratiquement continues sur le niveau de la mer sur 200 ans, confirment son élévation au cours du dernier siècle (Bouregba et al, 2009).

I.3.1 Les températures :

Les relevés des températures depuis les 157 dernières années montrent une hausse générale des températures de surface accompagnée d'importants contrastes régionaux. Pour ce qui est de la moyenne dans le monde, le siècle passé a subi un réchauffement qui s'est effectué en deux étapes : entre les années 1910 et les années 1940 : hausse d'environ 0,35°C ; et hausse plus significative, d'environ 0,55°C, depuis les années 1970. La vitesse du réchauffement s'est considérablement accrue pendant les 25 dernières années, et sur les 12 dernières années, on compte 11 des 12 années les plus chaudes jamais enregistrées. Des observations à l'échelle planétaire, effectuées à la surface de la terre depuis la fin des années 1950, prouvent que la troposphère (jusqu'à une altitude de 10 km environ) s'est réchauffée un peu plus vite que la surface, tandis que la stratosphère (10-30 km) s'est sensiblement refroidie depuis 1979. Ceci correspond aux prévisions physiques et aux résultats fournis par la plupart des modèles. Le réchauffement planétaire est confirmé par le réchauffement des océans, l'élévation du niveau de la mer, la fonte des glaciers, le recul des glaces de mer dans l'Arctique et celui du manteau neigeux dans l'hémisphère Nord.

En termes de moyenne planétaire, les températures de surface ont subi une hausse d'environ 0,74°C au cours des cent dernières années (de 1906 à 2005 ; voir figure 1). Cependant, le réchauffement ne s'est pas produit uniformément, ni également selon les saisons et les régions. Il y a eu peu de changements entre 1850 et 1915, hormis quelques pointes dues à des variations naturelles, qui pourraient néanmoins également être dues à la médiocrité de l'échantillonnage. On note une hausse des températures (0,35°C) par rapport à la moyenne

planétaire entre les années 1910 et les années 1940, suivie d'un léger refroidissement ($0,1^{\circ}\text{C}$), puis un réchauffement rapide ($0,55^{\circ}\text{C}$) jusque vers la fin de 2006 (figure I.3.). Les années les plus chaudes de la série ont été 1998 et 2005 (statistiquement indiscernables), et 11 des 12 années les plus chaudes ont survécu au cours des 12 dernières années (de 1995 à 2006). Le réchauffement, en particulier depuis les années 1970, a été généralement plus fort sur terre que sur mer. Le réchauffement saisonnier a été légèrement plus fort en hiver. Les villes et les zones urbaines subissent un réchauffement supplémentaire (on parle souvent d'effet d'îlot de chaleur urbaine), mais ce réchauffement est très localisé, et on tient compte de ses effets en excluant un maximum de sites affectés des données sur la température mondiale et en admettant une marge d'erreur plus grande (ligne gris clair de la figure).

Depuis 1901, quelques régions se sont refroidies, en particulier le nord de l'Atlantique Nord au sud du Groenland. Pendant cette période, le réchauffement maximal a touché les régions continentales d'Asie et les zones boréales de l'Amérique du Nord. Néanmoins, comme ce sont des régions à forte variabilité interannuelle, le signal le plus clair du réchauffement a été donné dans certaines régions de moyennes et basses latitudes, en particulier dans les zones océaniques tropicales. La carte du monde de gauche, en bas de la figure 1, représente la courbe des températures depuis 1979, et illustre, par les couleurs dans l'océan Pacifique, les zones de réchauffement et de refroidissement imputables au phénomène El Niño.

Pour ce qui est des observations à l'échelle planétaire depuis la fin des années 1950, les versions les plus récentes de tous les ensembles de données disponibles indiquent que la troposphère s'est réchauffée plus rapidement que la surface, tandis que la stratosphère s'est notablement refroidie depuis 1979. Ceci correspond aux projections physiques et aux résultats de la plupart des simulations, démontrant le rôle de l'augmentation des gaz à effet de serre dans le réchauffement troposphérique et le refroidissement stratosphérique ; l'appauvrissement en ozone contribue aussi considérablement au refroidissement stratosphérique.

L'appauvrissement en ozone contribue aussi considérablement au refroidissement stratosphérique.

La hausse observée des températures en surface entraîne logiquement le raccourcissement des périodes de gel des lacs et des rivières. Par ailleurs, la masse et l'étendue glaciaires ont considérablement diminué dans le monde entier au cours du XXe siècle ; la fonte de la calotte glaciaire du Groenland est devenue flagrante ; l'enneigement a diminué dans de nombreuses régions de l'hémisphère Nord ; l'épaisseur et l'étendue des glaces de mer ont diminué dans l'Arctique en toutes saisons, en particulier au printemps et en été ; les océans se réchauffent et

le niveau de la mer monte du fait de la dilatation thermique des océans et de la fonte des glaces continentales.

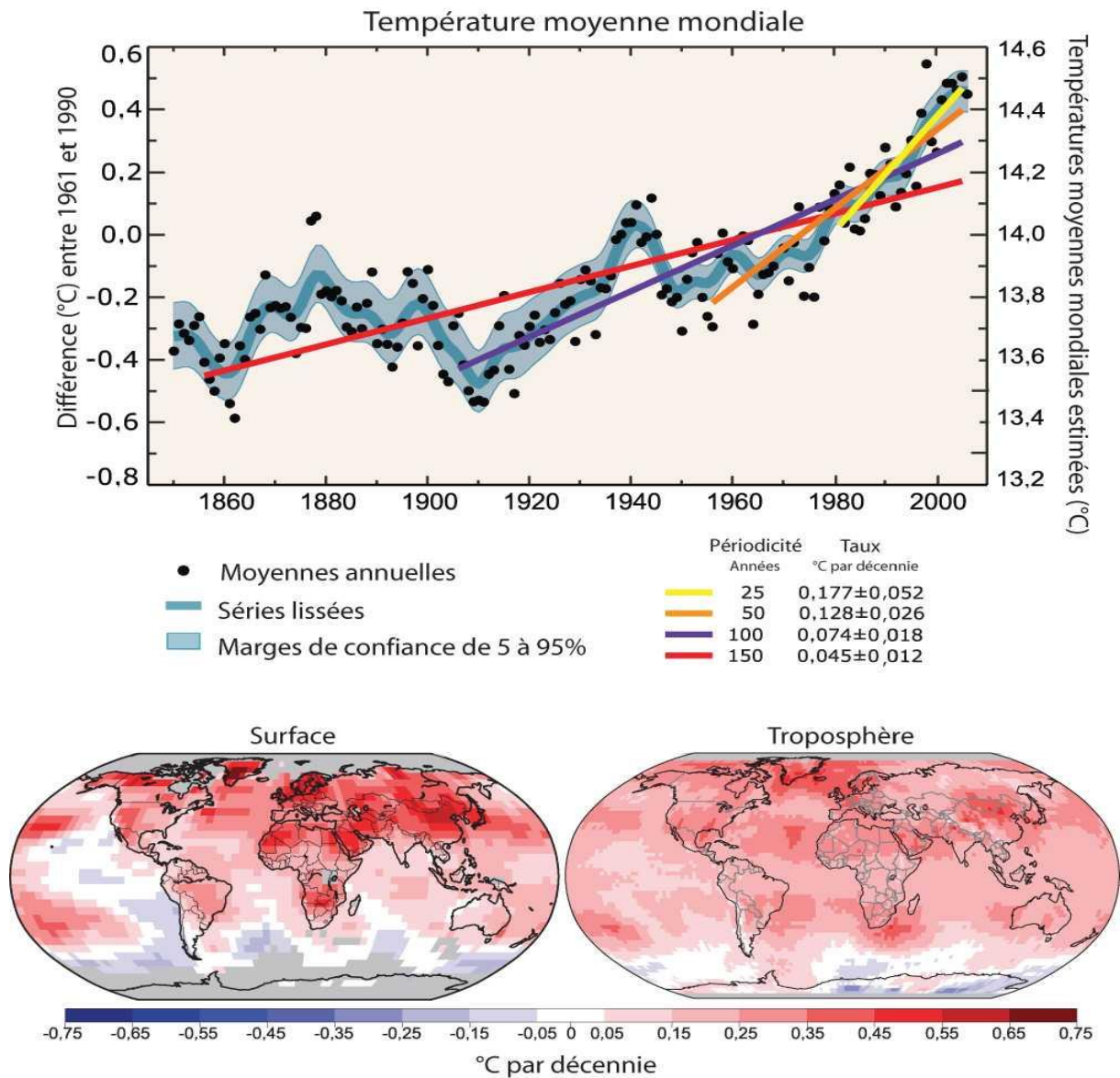


Figure I.3. (Graphique supérieur) Moyenne annuelle mondiale des températures relevées (points noirs) avec ajustements simples par rapport aux données. L'axe vertical de gauche indique les anomalies par rapport aux moyennes des années 1961-1990, l'axe vertical de droite indique la température réelle estimée (en °C). Les ajustements des tendances linéaires indiquent les 25 (en jaune), 50 (en orange), 100 (en violet) et 150 (en rouge) dernières années, et correspondent aux périodes 1981-2005, 1956-2005, 1906-2005 et 1856-2005, respectivement.

I.3.2 Les précipitations :

Les observations indiquent des changements se produisant dans l'amplitude, l'intensité, la fréquence et le type de précipitations. La variabilité naturelle de ces aspects des précipitations est généralement forte ; El Nino, ainsi que les modifications de la circulation atmosphérique typique, telle l'Oscillation nord-atlantique, ont une influence considérable. Entre 1900 et 2005, des tendances prononcées de longue durée ont été observées quant aux niveaux des précipitations dans certaines régions : considérablement plus élevés dans les zones orientales de l'Amérique du Nord et du Sud, au nord de l'Europe et en Asie du centrale et septentrionale, mais moindres au Sahel, dans l'Afrique australe, dans les régions méditerranéennes et en Asie du sud. Dans les régions nordiques, les précipitations arrivent de plus en plus souvent sous forme de pluie plutôt que de neige. Une hausse des événements de fortes précipitations a été observée à travers le monde entier, même dans des régions où, dans l'ensemble, elles ont décliné. Ces changements sont liés à l'augmentation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère résultant du réchauffement des océans, en particulier à de basses latitudes. Certaines régions voient également s'intensifier les sécheresses et les inondations.

Les précipitations sont un terme général pour désigner la pluie, la neige et les autres aspects sous lesquels l'eau tombe des nuages, sous forme solide ou liquide. Les précipitations sont intermittentes et leur caractère dépend en grande partie de la température et des conditions météorologiques. Comme les cartes des précipitations sont souvent ponctuelles, les tendances générales des précipitations sont indiquées par l'indice de sévérité des sécheresses développé par Palmer (PDSI) (voir figure I.4.) qui mesure l'humidité des sols à partir des précipitations et des estimations brutes des changements dans le processus d'évaporation.

Dans les continents nordiques, les précipitations hivernales sont cependant liées à des températures plus élevées, puisque la capacité de l'atmosphère à retenir l'eau s'accroît dans des conditions de réchauffement. Néanmoins, dans ces régions où le niveau des précipitations a quelque peu augmenté, des températures plus élevées (FAQ 3.1) ont favorisé l'assèchement, rendant les changements dans les précipitations moins facilement décelables à la figure I.4..

Des changements locaux et régionaux dans le caractère des précipitations dépendent aussi en grande partie de la structure de la circulation atmosphérique déterminée par El Nino, l'Oscillation nord-atlantique (ONA : mesure de la force des vents d'ouest dans l'Atlantique nord en saison hivernale) et d'autres canaux de variabilité. Certains changements observés

dans la circulation sont liés au changement climatique. Un écart dans la trajectoire d'un ouragan rendra certaines régions plus humides, et en asséchera d'autres, souvent voisines, rendant les changements d'autant plus complexes. Par exemple, dans le secteur européen, une ONA plus positive dans les années 1990 a entraîné des conditions plus humides dans le nord de l'Europe et des conditions plus sèches dans le pourtour méditerranéen et en Afrique du Nord (figure I.4.). La sécheresse prolongée au Sahel (voir figure I.4.), intense de la fin des années 1960 à la fin des années 1980, persiste encore, bien qu'elle ait perdu en intensité ; elle résulte de changements dans la circulation atmosphérique qui ont entraîné des changements dans la structure thermique de la surface des mers tropicales de l'océan Pacifique, de l'océan Indien et de l'océan Atlantique. La sécheresse s'est étendue à presque toute l'Afrique et devient moins rare dans les régions tropicales et subtropicales.

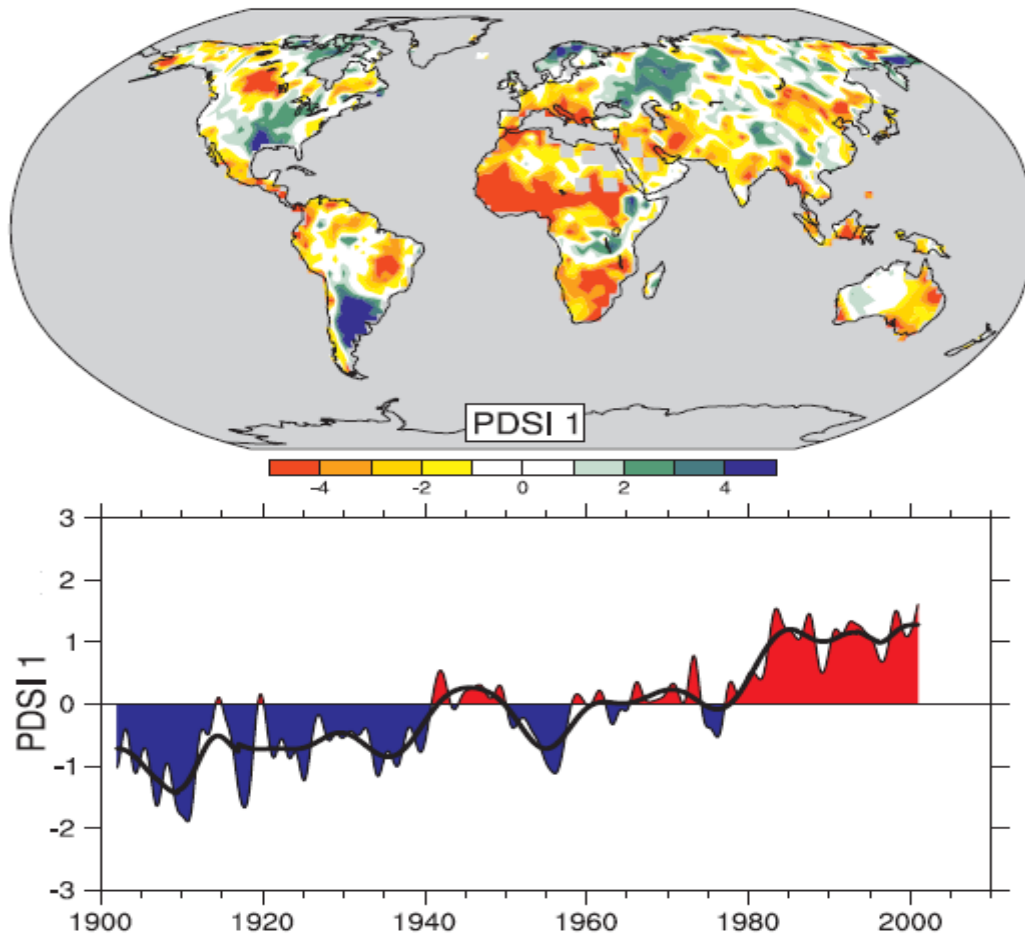


Figure I.4. Représentation géospatiale la plus importante (en haut) de l'Indice de sévérité des sécheresses, développé par Palmer (PDSI), sur une base mensuelle, pour les années 1900-2002. Le PDSI est le principal indice des sécheresses.

CHAPITRE II

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE EN ALGERIE

Chapitre II : Le changement climatique en Algérie	24
II.1 L'Algérie géographique	25
II.2 L'observation météorologique	28
II.3 L'Algérie climatique	28
II.3.1 Température	30
II.3.2 Précipitations	30
II.4 Evolution climatique	30
II.5 L'Algérie bioclimatique	34
II.5.1 Les domaines bioclimatiques	34
II.5.1.1 Le domaine humide et subhumide	35
II.5.1.2 Le domaine semi-aride	35
II.5.1.3 Le domaine aride ou steppique	35
II.5.1.4 Le domaine désertique	36

II.1 L'Algérie géographique :

L'Algérie est située sur la côte nord de l'Afrique, entre le 18^{ème} et le 37^{ème} degré de latitude nord, le 9^{ème} degré de longitude ouest et le 12^{ème} degré de longitude est, l'Algérie (République algérienne démocratique et populaire, en abrégée : RADP) est bordée à l'Est par la Tunisie, au Sud Est par la Libye, au Sud par le Niger et le Mali, au Sud-ouest par la Mauritanie et à l'Ouest par le Sahara Occidental et le Maroc, sa frontière maritime méditerranéenne est de 1200 km.

Par sa superficie de 2.381.741 km² c'est le premier pays du continent africain. Les quatre cinquièmes du territoire sont occupés par le Sahara tandis que la frange côtière du nord du pays (le Tell) abrite 80% de la population. Celle-ci s'élève à environ 35,6 millions d'habitants (2010).

Le Nord de l'Algérie est divisé en cinq régions distinctes : la frange côtière cultivable, les plaines et la chaîne du Tell au nord ; les hauts plateaux plus au sud et l'Atlas saharien.

La région de la chaîne du Tell est sujette à des tremblements de terre fréquents et meurtriers. Elle se compose essentiellement d'un plateau central limité au nord et au sud par une suite de chaînes ou de massifs de montagnes, élevés comme deux puissants rebords au-dessus du sol du plateau.

La figure ci-après, présente une coupe topographique du Nord au Sud de l'Algérie.

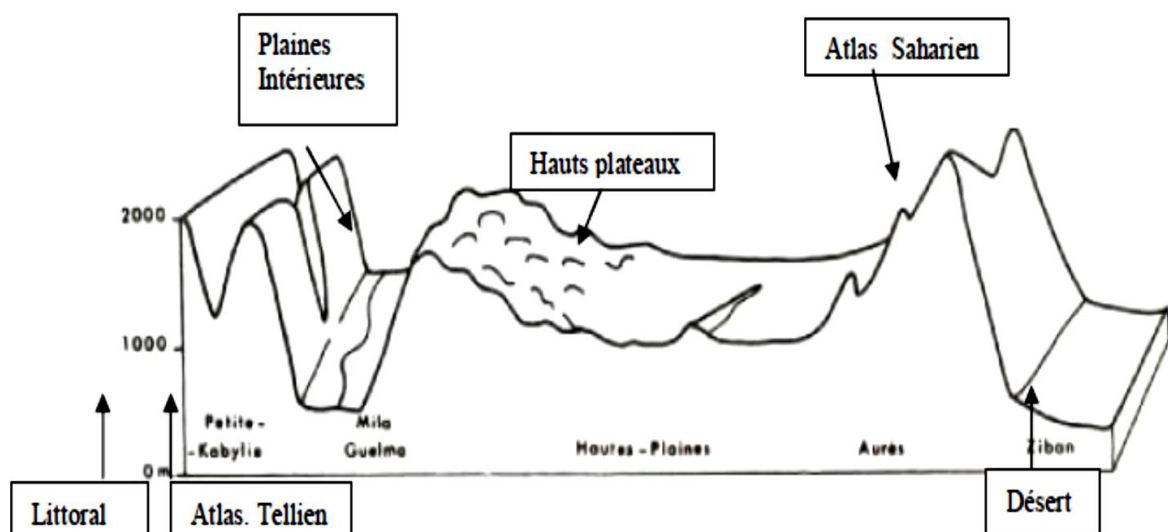


Figure II.1. Coupe topographique de l'Algérie

(Source : organisation mondiale de la météorologie OMM).

Ces rebords sont aussi généralement parallèles à la côte méditerranéenne et partagent toute cette partie du pays en trois grandes bandes longitudinales, à savoir :

- Le Tell ou Atlas Tellien, formant la pente septentrionale du plateau, inclinée vers la Méditerranée et toute recouverte de massifs de montagnes de hauteurs très inégales.
- La région des hauts-plateaux ou des steppes, sorte d'immense gouttière dont le thalweg général, également dirigé du Sud-ouest au Nord-est est jalonné par une suite de lacs salés nommés chott ou sebkha qui n'ont d'eau que pendant l'hiver et dont la surface, complètement à sec l'été, se recouvre d'une couche éblouissante de sel.
- L'Atlas Saharien, et la pente Sud du plateau, inclinée vers le Sahara, et ayant à ses pieds les nombreuses oasis naturelles ou créées de main d'homme qui sont les seuls lieux habités et habitables de ces parages.

Au sud, la région du Sahara est formée de grandes cuvettes, de plateaux et de montagnes. Certaines cuvettes contiennent des étendues de sable qu'on appelle des ergs. Au sud du désert, on trouve des massifs volcaniques fortement érodés. Dans le Hoggar, le mont Tahat culmine à 2918 mètres.

Le Maghreb a été identifié comme une zone particulièrement vulnérable face aux risques liés au changement climatique. L'exode rural conjugué à l'urbanisation intense sur la côte méditerranéenne durant les dernières décennies ont augmenté la vulnérabilité des populations concernées tout en accentuant les facteurs qui contribuent aux changements climatiques.

Deuxième plus grand pays d'Afrique, situé au Sud de la Méditerranée, l'Algérie se compose d'ensembles géographiques contrastés et subit au plan climatique une double influence des systèmes tempérés et tropicaux. Sa situation particulière l'expose à une grande vulnérabilité aux impacts du changement climatique global. Le climat a varié au cours du 20ème siècle et le signal du changement climatique apparaît dans les ruptures des séries pluviométriques. Les scénarios climatiques pour le siècle actuel indiquent un risque de réduction des pluies pouvant atteindre 20%. Malgré les incertitudes qui subsistent, ces projections risquent d'affecter des secteurs stratégiques, tels que l'agriculture. Le risque climatique s'ajoute à d'autres facteurs de vulnérabilité liés au mode de développement économique et social dans un environnement naturel fragile et parfois à la limite d'une dégradation avancée. L'Algérie a ratifié la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) en 1994

et le Protocole de Kyoto en 2005. Elle a élaboré sa Communication Nationale en 2001, incluant le Plan National d'Action pour les Changements Climatiques (PNA-ACC). Les actions engagées depuis 1996 se sont traduites sur le plan réglementaire et institutionnel par des dispositions juridiques liées à divers domaines (tels que le climat, les ressources en eau, l'énergie) ainsi que la mise en œuvre d'institutions dédiées au climat (Agence Nationale des Changements Climatiques). La prise en compte progressive de la dimension des changements climatiques nécessite des actions fortes de renforcement des capacités dans les domaines scientifiques, économiques et éducatifs. En Algérie, l'accès au marché du carbone demeure limité et sera sous-tendu à l'avenir par le potentiel offert dans le domaine de l'énergie (tel que la maîtrise de l'énergie, la séquestration du CO₂, les énergies renouvelables). Les stratégies futures doivent s'appuyer sur une plus grande intégration de la problématique des changements climatiques à travers une approche pluridisciplinaire et multisectorielle, incluant la nécessité de l'intégration régionale au Maghreb.

En Algérie, pays dont la plus grande partie est désertique, les changements climatiques constituent une préoccupation majeure. En effet, de par sa position géographique, l'Algérie est exposée aux effets négatifs des changements climatiques et des émissions des gaz à effet de serre, notamment les inondations, la sécheresse et les températures élevées.

D'après des études réalisées par l'ONM sur l'évolution des températures, elles ont révélé que celles-ci sont en hausse depuis 1990, date du début des émissions à effet de serre.

Concernant la pluviométrie en Algérie, l'étude fait ressortir un recul de 12% pour la période 1990-2005 en comparaison avec 1961-1990, causant une sécheresse à grande échelle au moment même où d'autres régions enregistrent des inondations dont celle de Bab El Oued en 2001 et dans la ville d'El Taref en 2012.

L'évolution des températures en Algérie montre une hausse sur l'ensemble du territoire au cours des saisons d'hiver et d'automne et une hausse nette des températures minimales et maximales dans toutes les stations de l'Algérie du Nord et se prolonge jusqu'à nos jours. Durant ces 20 dernières années, les températures maximales ont augmenté plus que les minimales. Quant aux précipitations, pour les mêmes périodes l'examen montre qu'en automne et en hiver, il y a diminution des pluies sur le Nord, et en printemps dans l'Est du pays.

On peut donc conclure qu'entre les périodes 1931-1960 et 1961-1990 :

- La hausse de température a été de l'ordre de 0,5°C ;
- La pluviométrie a baissé en moyenne de 10% ;

- Le déficit hydrique sera plus important à l'Ouest qu'au Centre et qu'à l'Est du pays (MATE, 2003).

II.2 L'observation météorologique :

Héritant d'un système d'observation météorologique colonial essentiellement orienté vers des besoins aéronautiques, l'Algérie a développé depuis les années 1970 un ambitieux programme de réseaux d'observation et de collecte des données. Le pays dispose actuellement d'un réseau incluant 76 stations météorologiques principales, 22 stations automatiques à transmission en temps réel, 178 stations automatiques à collecte mensuelle, 200 postes climatologiques et 3 centres de recherche et d'observations spéciales. Dans le domaine du suivi climatique, une station de Veille de l'Atmosphère Globale (VAG) est opérationnelle à l'Assekrem (Hoggar). Au plan institutionnel, ces actions ont été appuyées par la création en 1970 de l'Institut Hydrométéorologique de Formation et de Recherche (IHFR) qui est un établissement régional pour la formation des météorologistes de la région africaine. A ce titre, il est homologué comme centre régional de formation de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Après diverses mutations, le service météorologique a fait l'objet de la création d'un Office National de la Météorologie (ONM) en 1975 qui est chargé de centraliser l'ensemble des fonctions météorologiques et climatiques. Enfin, il faut noter l'existence de divers réseaux relevant des secteurs de l'hydraulique et de l'agriculture.

II.3 L'Algérie climatique :

Le bassin Méditerranéen (BM) est une région fortement hétérogène où les activités naturelles et anthropogéniques interagissent de manières complexes avec les variabilités climatiques, sur différentes échelles spatiotemporelles.

L'Algérie se situe sous un climat de transition, entre la zone tempérée et la zone tropicale, cette position la met sous l'influence directe du climat méditerranéen au Nord et du climat désertique au Sud.

Le rythme saisonnier est simple :

- En été, l'Algérie est soumise à l'influence des hautes pressions subtropicales qui, eu égard à sa latitude, donne des temps très chauds, très secs et tempérés, mais seulement, aux bords de mer.
- En hiver, le retrait des hautes pressions vers des latitudes plus basses livre la région à la circulation zonale d'Ouest : le temps est plus frais et plus humide.

Cette circulation d'Ouest envahit le bassin méditerranéen, mais, en réalité, seules quelques perturbations atlantiques arrivent jusqu'au bassin méditerranéen, à cause des reliefs qui entravent l'écoulement de l'air. Les deux tiers des perturbations activant dans la région sont d'origine locale.

Elles sont dues à des circulations d'air polaire froid qui atteignent la Méditerranée et y provoquent, au contact de ses eaux chaudes, une cyclogenèse active. Cet air froid qui touche le bassin méditerranéen progresse lentement vers le sud en saison froide. Ainsi, s'expliquent la diminution progressive des pluies vers le sud et l'allongement de la saison sèche.

Le régime des vents est peu uniforme, il varie d'une région à une autre et contribue à accroître l'évaporation, déjà, très vive. Si l'hiver, saison humide, le nord de l'Algérie a un bilan hydrique, généralement, favorable. En été, le déficit est total, il est, souvent, nécessaire de recourir à l'irrigation pour les cultures de printemps et d'été.

➤ Au nord, les précipitations diminuent du nord au sud et d'est en ouest. Sur la bande littorale, le climat est tempéré, avec des hivers pluvieux ou très pluvieux, avec des moyennes pluviométriques annuelles pouvant atteindre plus de 1500 mm dans la région de Jijel et Bejaia. Cette variation dans le nord dépend de la latitude, de l'altitude, de la continentalité et du relief. En outre, une dissymétrie très nette existe entre les versants, ceux qui sont exposés au nord sont les mieux arrosés et ceux qui le sont au sud sont les plus secs.

La moyenne des températures varie entre 8°C et 15°C en hiver et, en moyenne, 25°C en juillet et août (26,5°C à Annaba, 26°C à Bejaia). En été, le sirocco, vent sec et chaud (baptisé le Chehili localement), souffle du Sahara en direction du nord durant la saison estivale, amenant des nuages de poussières et de sable vers les régions côtières.

➤ Le climat dans la région de l'Atlas tellien est aussi tempéré, mais plus froid à cause de l'altitude. Il est caractérisé par des précipitations plus importantes.

➤ Le climat des Hauts Plateaux est semi-aride, la température avoisine les 5°C voire -7°C en hiver et les chutes de neige y sont fréquentes. La température estivale varie de 30°C à 38°C (Constantine 36°C) avec des précipitations faibles et irrégulières, de 200 à 400 mm par an.

➤ Le Désert du Sahara est aride, avec des précipitations annuelles extrêmement faibles (moins de 100 mm par an). Les températures varient de 15 à 28°C en hiver, pour atteindre 40 à 45°C, voire plus en été.

II.3.1 Température :

Le régime thermique sépare les différentes régions climatiques (Littoral, Atlas Tellien, Hauts Plateaux et Steppe, Sahara). En hiver, les Hauts Plateaux et Steppe sont plus froids que l'Atlas Tellien, le Littoral et le Sahara. Le mois de janvier est le plus froid de l'année, la température moyenne est de 5 °C à Djelfa, 8,5 °C à Miliana, 11,3 °C à Alger et 14,5 °C à Ain Salah. En été, la température moyenne est de 25,3 °C à Alger, 25,7 °C à Tiaret et 26,7 °C à Miliana. En été et en hiver, le littoral jouit de l'effet adoucissant de la mer (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 2001).

II.3.2 Précipitations :

La période de novembre à décembre est la plus pluvieuse, notamment sur l'Atlas Tellien qui est plus arrosé que le Littoral et les Hauts plateaux. Au mois de janvier, la quantité des pluies mensuelles est de 3,7 mm à Ain Salah, 33,4 mm à Djelfa, 80,0 mm à Alger et 120,5 mm à Miliana. En été, les pluies sont rares et se produisent plus sur le littoral que partout ailleurs. En Automne, le régime des pluies est quasiment le même sur l'Atlas Tellien et les Hauts Plateaux. La quantité annuelle des pluies est de 15,8 mm à Ain Salah, de 347,4 mm à Djelfa, 686,6 mm à Alger et 827,3 mm à Miliana. (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 2001).

II.4 Evolution climatique :

L'analyse de longues séries permet de déceler d'éventuels changements dans le régime pluviométrique. Dans le cas du Nord-Ouest Algérien des travaux (Meddi et Meddi, 2007) indiquent une rupture durant la décennie 1970 pour la quasi-totalité des stations et postes étudiés. La variabilité interannuelle des pluies augmente en se rapprochant des régions arides. L'augmentation de la variabilité suit l'accroissement de la longitude et la diminution de la latitude. L'altitude atténue cet accroissement. En Algérie, environ 13% seulement des terres ont un climat méditerranéen, le reste étant dominé par un climat semi-aride à désertique.

La variation des deux paramètres fondamentaux que sont la température et les précipitations au cours du siècle dernier constitue un bon indicateur de l'aspect évolutif du climat en Algérie. On observe une tendance à la hausse des températures à travers tout le pays.

Les températures annuelles oscillent entre 21.5°C (1916) et 23.5°C (1985). Les années les plus froides sont respectivement 1904, 1907, 1916, 1917, 1925, 1974 et 1976, et les années les plus chaudes sont 1945, 1954, 1985, 1988 et 1997 (Figure II.2.).

L'évolution récente du climat sur les 30 dernières années montre que les températures moyennes annuelles ont subi une augmentation moyenne de 0.5 °C, avec un maximum durant les saisons chaudes (JJA) de 0.7 °C. L'année la plus chaude a été 2003 pour les zones côtières Est et Centre, 2006 pour les zones côtières Ouest et 2001 pour les hauts plateaux et le Nord Sahara (Source Office national de la Météorologie Alger Dar El Beida).

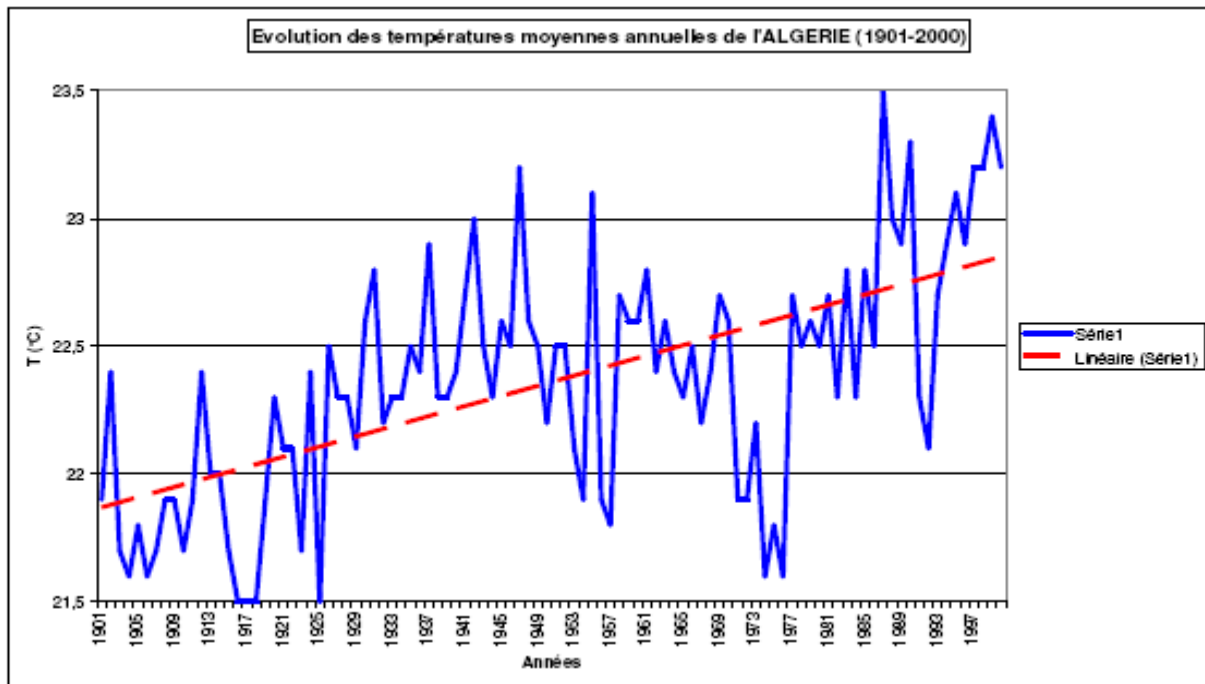


Figure II.2. Evolution des températures moyennes annuelles de l'Algérie (1901-2000) (Djellouli, 2008).

La tendance générale des précipitations, quant à elle, est en baisse. Les précipitations annuelles oscillent entre 59mm (1984) et 128mm (1901). Les années où on a enregistré des hauteurs de précipitations minimum sont : 1914, 1926, 1938 et 1984. Les années où on a enregistré des hauteurs de précipitations maximum : 1901, 1952, 1957 et 1976 (Figure II.3.). Durant cette même période, l'Algérie a connu plusieurs sécheresses, mais celles des dernières décennies sont encore plus remarquables compte tenu du déficit pluviométrique enregistré un peu partout sur le territoire, particulièrement à l'Ouest du pays.

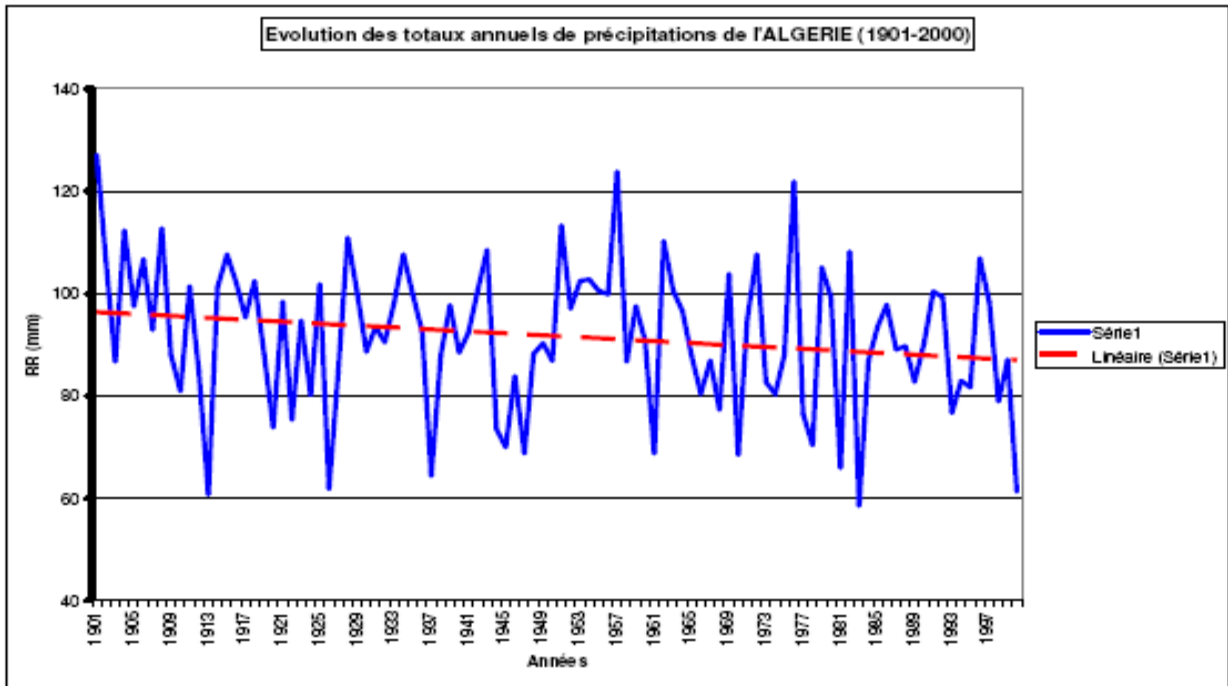


Figure II.3. Evolution des totaux annuels de précipitations de l'Algérie (1901-2000) (Djellouli, 2008).

Les données de la station d'Oran durant la période 1926-2006 indiquent une augmentation de température comprise entre 0,65 et 1,45 °C et une baisse des précipitations comprise entre 5 et 13% (Tabet-Aoul, 2008).

Les régions du Nord-Ouest et du Sud-ouest de l'Algérie seront les plus affectées à la fois par un réchauffement important et une baisse des pluies.

D'une façon générale, les analyses de longues séries sur le Nord de l'Algérie (figure II.4. et figure II.5.) confirment le réchauffement global au cours du 20ème siècle ainsi qu'une réduction sensible du régime pluviométrique à partir des années 70 ce qui correspond au signal du changement climatique global (Meddi et al.2009).

La figure II.2 donne l'évolution de la température de la station d'Oran entre 1926 et 2006. Cette figure est basée sur les données quotidiennes de température, montre que la température a augmenté de plus de 2°C.

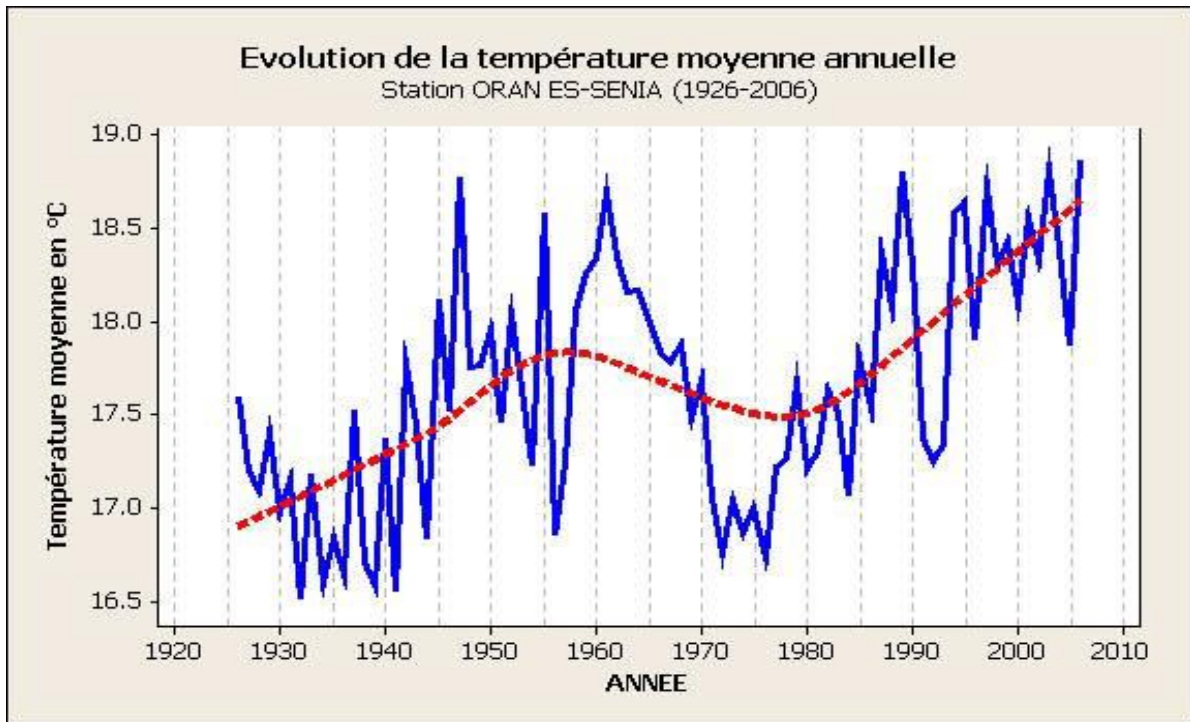


Figure II.4. Evolution de la température moyenne annuelle à Oran en °C (1926-2006) (Tabet-Aoul, 2008).

La figure II.3 montre pour la même station l'évolution des précipitations durant la même période et met en exergue une diminution de l'ordre de 15%.

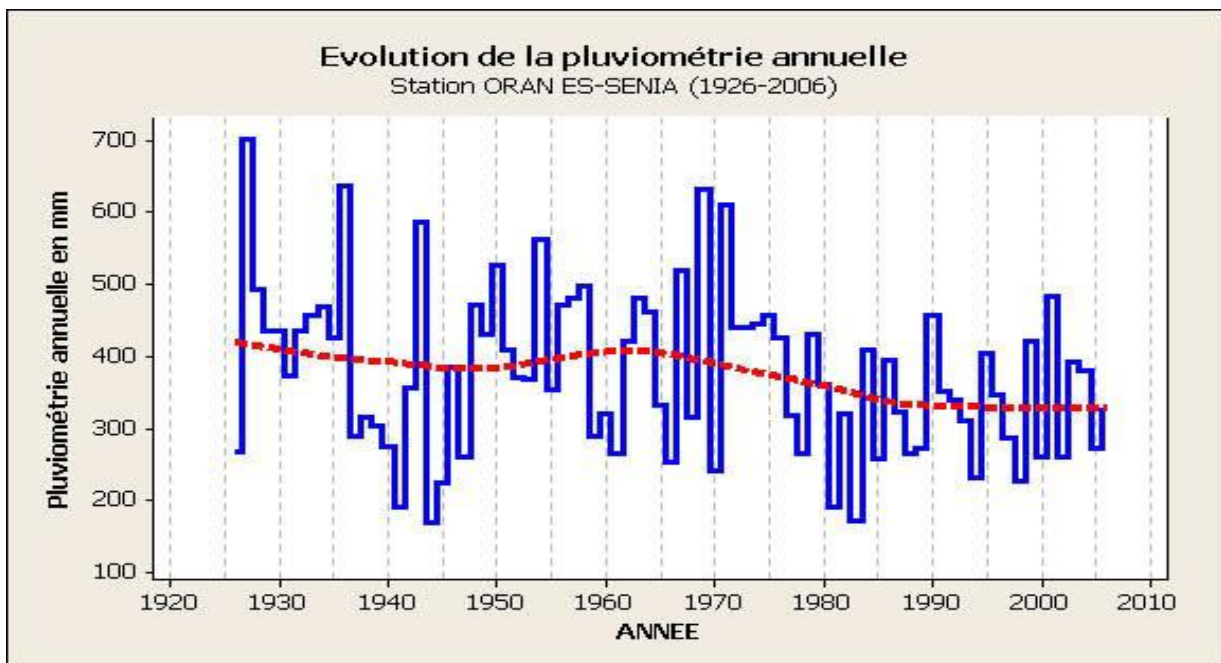


Figure II.5. Evolution des précipitations moyennes annuelles à Oran en mm (1926-2006) (Tabet-Aoul, 2008).

II.5 L'Algérie bioclimatique :

La classification bioclimatique est largement adoptée dans la région méditerranéenne. Cinq étages bioclimatiques sont définis pour l'Algérie : humide, sub-humide, semi-aride, aride et saharien. Ils sont subdivisés en variantes sur la base des seuils thermiques de la température du mois le plus froid (min).

Ces variantes intéressantes pour la production végétale sont les suivantes :

- Hiver froid à gelées durant de longues périodes, $-3 < m < 0^{\circ}\text{C}$.
- Hiver frais à gelées très fréquentes, $0 < m < 3^{\circ}\text{C}$.
- Hiver doux à gelées rares, $3 < m < 7^{\circ}\text{C}$.
- Hiver chaud à gelées absentes, $7 < m < 10^{\circ}\text{C}$.

En outre, les températures basses en hiver, les fortes températures de l'été et la sécheresse estivale sont des facteurs limitant pour la production végétale en Algérie. Les grandes régions écologiques se distinguent relativement bien.

Au nord, se trouvent les zones de cultures (littoral, plaines intérieures, hautes plaines....), au centre, les zones steppiques et de parcours et au sud le Sahara avec ses Oasis.

II.5.1 Les domaines bioclimatiques :

La combinaison des données climatiques fondamentales (température et précipitations), permet de définir des domaines bioclimatiques (voir figure II.4).

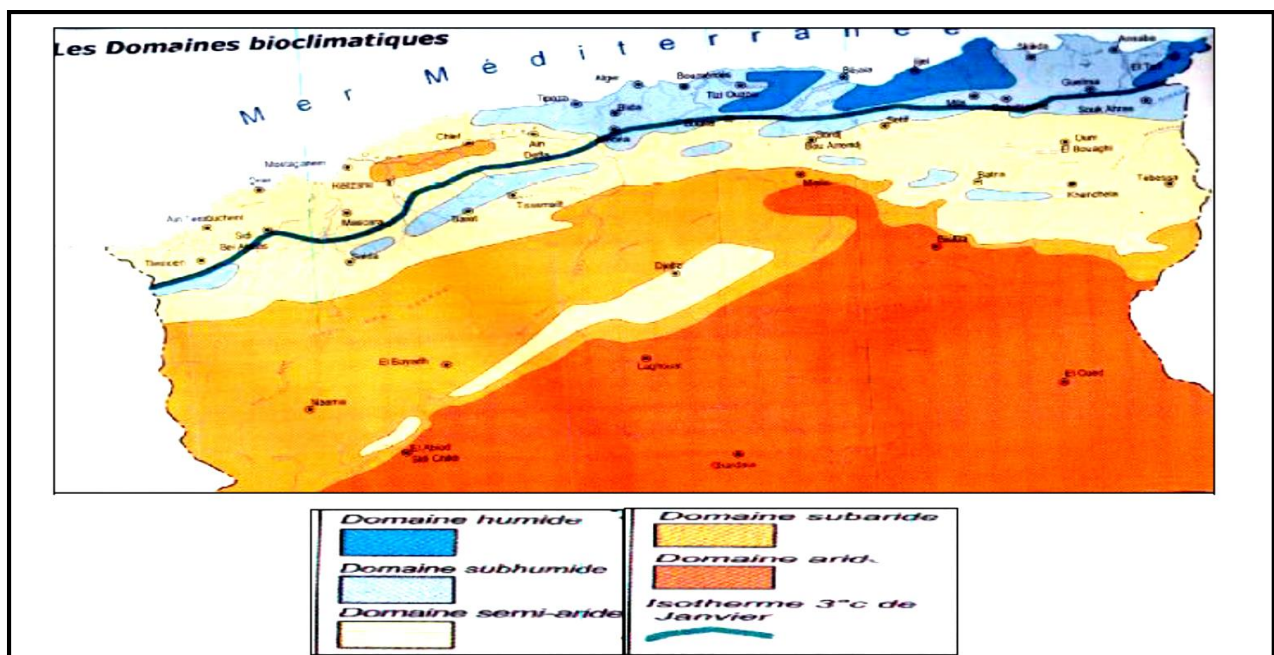


Figure II.6. Les principaux domaines bioclimatiques de l'Algérie.
(Source : organisation mondiale de la météorologie OMM).

II.5.1.1 Le domaine humide et subhumide :

Cette région reçoit, en général, plus de 600 mm de précipitations, le nombre de mois secs ne dépasse pas 3 à 4 mois. Ce domaine comprend toute la zone côtière (surtout celle de l'Est) ainsi que l'ensemble montagneux de l'Algérie septentrionale. Dans cette région, les cultures sont partout possibles. La forêt méditerranéenne y trouve son terrain d'élection avec des arbres toujours verts : les chênes (chêne-liège sur les basses pentes, chêne vert plus haut), les résineux comme le pin d'Alep sur les versants chauds, le pin maritime, le pin pignon, les sapins... Le couvert forestier reste parfois important, mais le plus souvent, il est dégradé en matorral. L'écoulement des oueds se prolonge durant une grande partie de l'année. Le milieu physique, compartimenté et morcelé, est une mosaïque de plaines, de bassins et de versants de montagne.

II.5.1.2 Le domaine semi-aride :

Dans cette région, les précipitations se raréfient et deviennent plus irrégulières : 400 à 600mm (le plus souvent réparties entre 50 et 70 jours/an). La saison sèche peut se prolonger jusqu'à 5 et 6 mois. Cette région est très largement, représentée par les hautes plaines et les hauts plateaux de l'Algérie septentrionale. Partout dominant les glacis façonnés au cours des épisodes du Quaternaire et les encroûtements calcaires sont une contrainte à la mise en valeur agricole.

La végétation naturelle est en dégradation continue. Il subsiste quelques thuyas, pins d'Alep, pistachiers, amandiers... Mais, à ce niveau, les formes buissonnantes l'emportent, où se mêle le chêne kermès, l'olivier sauvage, le lentisque, le genévrier, le palmier nain...

II.5.1.3 Le domaine aride ou steppique :

Cette région reçoit moins de 400 millimètres de précipitations par an. Le nombre de jours de pluies est compris entre 20 et 40. En réalité, les données moyennes, dans cette région, n'ont guère de significations, car le caractère marquant est la succession d'irrégularités saisonnières et interannuelles, jalonnée par de sévères sécheresses cycliques.

Le caractère continental entraîne des écarts de température considérables. La steppe occupe de vastes étendues des Hautes Plaines algériennes. Au-dessus de 200 mm, elle peut être une formation secondaire qui résulte de la dégradation d'une couverture végétale plus abondante. Au-dessous de 200 mm, c'est une formation de base qui est composée de graminées (alfa) et de buissons ligneux xérophiiles (armoise).

Dans les fonds d'oueds plus humides ou dans les zones d'épandage des crues, apparaissent les buissons de tamarix, de jujubier et de laurier rose. L'élevage est la vocation naturelle du milieu steppique sous la forme traditionnelle du nomadisme ou du semi-nomadisme.

II.5.1.4 Le domaine désertique :

Cette région reçoit moins de 100 mm de pluies par an, il arrive qu'il ne pleuve pas pendant 12 mois consécutifs, les conditions climatiques y sont extrêmes.

Les températures sont de plus en plus marquées par la continentalité et l'amplitude très forte. Dans la partie nord des déserts, les précipitations sont souvent des précipitations d'hiver ou de printemps, mais l'irrégularité saisonnière y domine.

Près des basses latitudes (22° et en altitude), les pluies peuvent être d'été, traduisant ainsi la proximité avec la zone tropicale.

Le désert n'est pas, complètement, dépourvu de végétation. Les lits d'oued et les zones d'épandage de piémont peuvent receler une nappe phréatique. Ils peuvent porter une steppe très ouverte et des fourrés discontinus de buissons ou d'arbustes comme : les acacias et les jujubiers, les tamarix jalonnent les fonds d'oued les plus humides.

CHAPITRE III

LE SYSTEME CLIMATIQUE

Chapitre III : Le système climatique	37
III.1 Définition du système climatique	38
III.1.1 Les propriétés du système climatiques	40
III.1.2 Les éléments du système climatique	40
III.1.2.1 L'atmosphère	40
III.1.2.2 L'océan	41
III.1.2.3 La biosphère	42
III.1.2.4 La cryosphère	43
III.2 Quelques mécanismes physiques du système climatique	44
III.2.1 Effet de serre	44
III.2.1.1 L'effet de serre	44
III.2.1.2 Principe	44
III.2.1.3 Effet de serre additionnel	45
III.2.2 La sensibilité climatique	47
III.2.3 Rétroaction	47
III.2.4 Forçage radiatif	49
III.2.5 Aérosols	50
III.2.6 Le cycle de carbone	51
III.2.7 Nuages	52
III.3 Changements observés dans le système climatique	53
III.3.1 L'atmosphère	53
III.3.2 L'océan	56
III.3.3 La cryosphère	57
III.3.4 Le niveau des mers	60
III.3.5 Le cycle du carbone et autres cycles biogéochimiques	61

III.1 Définition du système climatique :

Le climat est habituellement défini comme le «temps moyen» ou, de manière plus rigoureuse, comme la description statistique du temps à partir de moyennes et de la variabilité temporelle de certaines valeurs, relevées sur plusieurs décennies (généralement trois selon la définition de l'OMM). Ces valeurs sont le plus souvent des variables de surface comme la température, les précipitations et le vent. Enfin, plus généralement, le climat est la description de l'état du système climatique.

Le système climatique est généralement défini comme constitué de cinq éléments physiques principaux : atmosphère, océans, cryosphère, surface de la terre émergée et biomasse.

Ces variables sont interconnectées par les lois dynamiques et différents processus physiques dans le système, par exemple, précipitation, évaporation, rayonnement, advection, convection et diffusion turbulente.

C'est aussi un système dynamique où les variables internes interagissent entre elles pour produire de la variabilité, à différentes échelles spatio-temporelles. La connaissance approfondie de ces variations complexes constitue une base de départ pour d'abord comprendre le comportement du climat et ensuite de prévoir son évolution.

Ce système fait intervenir pas mal de disciplines incluant divers variables et paramètres que nous définirons par la suite.

Il comprend les éléments suivants :

a) l'atmosphère, b) les océans, c) les biosphères terrestre et marine, d) la cryosphère (glace de mer, couverture neigeuse saisonnière, glaciers de montagne et inlandsis) et e) la surface terrestre. Par leurs interactions, ces différentes composantes façonnent le climat à la surface du globe. Les interactions se produisent par l'intermédiaire de flux d'énergie de formes diverses et d'échanges d'eau, par la circulation de gaz en trace à effet radiatif important, tels le dioxyde de carbone (CO_2) et le méthane (CH_4), et par le cycle des substances nutritives. L'énergie solaire, qui alimente le système climatique, est contrebalancée par l'émission d'énergie infrarouge (thermique) vers l'espace. Elle est à l'origine des mouvements de l'atmosphère et des océans, des flux de chaleur et d'eau, et de l'activité biologique.

La figure III.1 présente un schéma du système climatique, avec les principales interactions entre les diverses composantes et les composantes du système climatique façonnent le climat

mondial et régional de diverses façons : a) en modifiant la composition de l'atmosphère terrestre, modulant ainsi l'absorption et le transfert de l'énergie solaire ainsi que le rayonnement de l'énergie infrarouge vers l'espace, b) en altérant les propriétés en surface de même que la nébulosité et la nature de la couverture nuageuse, ce qui a des effets sur le climat à l'échelle régionale et mondiale et c) en redistribuant horizontalement et verticalement la chaleur d'une région à l'autre par les mouvements de l'atmosphère et des océans.

Dans les conditions naturelles, les différents flux entre les composantes sont généralement très proches de l'état d'équilibre, lorsque l'on considère les moyennes établies sur une à plusieurs décennies.

Par exemple, avant la révolution industrielle, l'absorption de CO₂ par photosynthèse était presque exactement compensée par la libération due à la décomposition des végétaux et des matières au sol, comme en témoigne la concentration quasi constante du dioxyde de carbone atmosphérique pendant des millénaires, jusqu'au début du XIXe siècle.

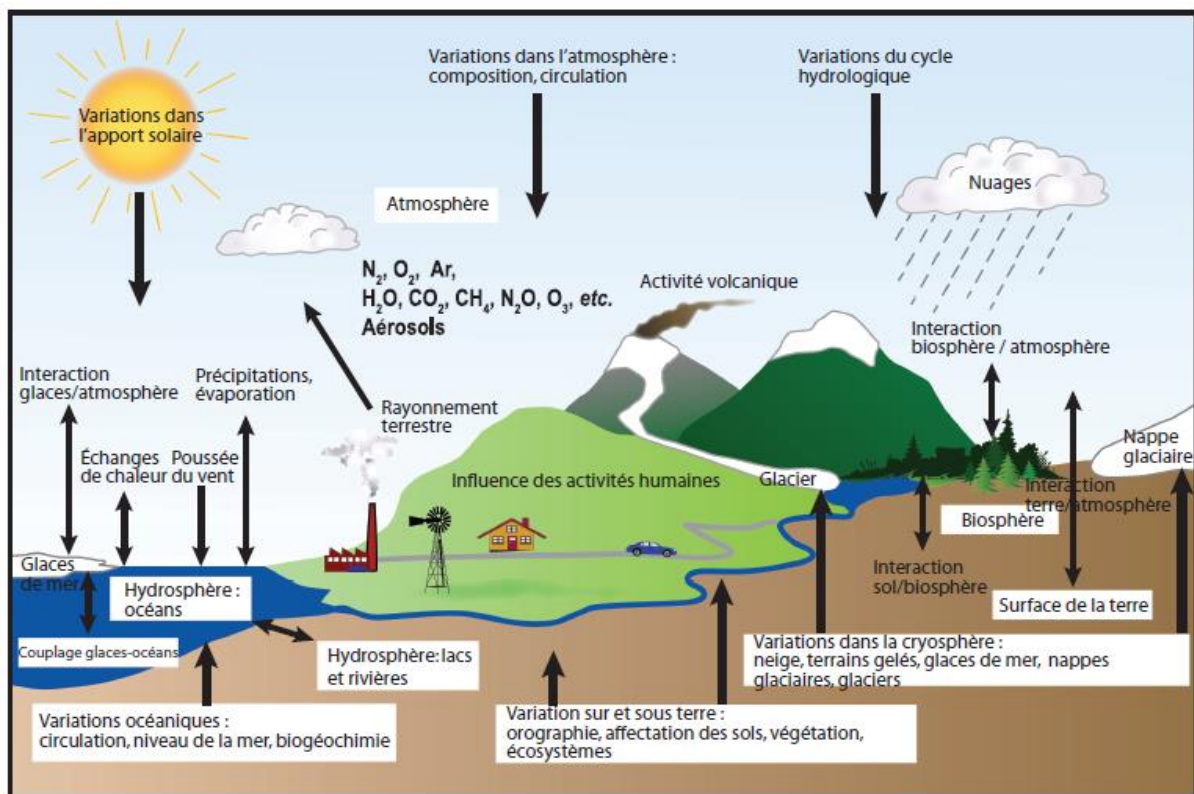


Figure III.1. Les différents échanges entre éléments du système climatiques.

Le système climatique est un système ouvert, qui échange de l'énergie avec l'espace sous forme radiative (rayonnements solaire et terrestre). Il est en quasi-équilibre pour une période

assez longue. Par conséquent, une perturbation introduite par une variation des paramètres externes (forçages orbital ou solaire) ou des paramètres radiatifs internes (gaz à effet de serre) peut entraîner un changement climatique.

III.1.1 Les propriétés du système climatiques :

Le système climatique a en effet plusieurs propriétés qui sont les suivantes :

- ✓ Propriété thermique (La température de l'air, de l'eau, de la glace et de la surface).
- ✓ Propriétés cinétiques (Les vents, les courants océaniques, les mouvements verticaux et le déplacement de la masse glaciaire).
- ✓ Propriétés aqueuses : (L'humidité atmosphérique, la nébulosité, le contenu en eau liquide ou glace des nuages, les niveaux des lacs, le contenu en eau du sol, de la neige et de la glace de mer).
- ✓ Propriétés statiques (La densité et la pression de l'atmosphère et de l'océan, la composition de l'air (sec), la salinité océanique, les conditions géométriques et les constances physiques du système).

III.1.2 Les éléments du système climatique :

III.1.2.1 L'atmosphère :

C'est un mélange de couche de mélange gazeuse (vapeur d'eau, azote, hydrogène, carbone ...) qui enveloppe la planète Terre et conditionne la vie en régulant la température moyenne du globe.

Les mouvements atmosphériques (vents) assurent le transport de la chaleur et de l'humidité et modèrent les températures dans les régions polaires et équatoriales (*figure III.2.*). Ils jouent un rôle important dans la formation, la nature et la durée de vie des nuages, en assurant par un couplage direct avec les bilans du rayonnement solaire et du rayonnement infrarouge. Le transport de chaleur atmosphérique et sa modification influenceront par ailleurs la réponse de la glace de mer et de la couverture neigeuse terrestre aux variations de la température moyenne mondiale, créant un autre lien avec le bilan radiatif global de la Terre. Les changements dans les vents atmosphériques, ou les fluctuations de l'évaporation et des précipitations dues en partie à ces changements, pourraient modifier sensiblement et de manière sans doute rapide la circulation océanique.

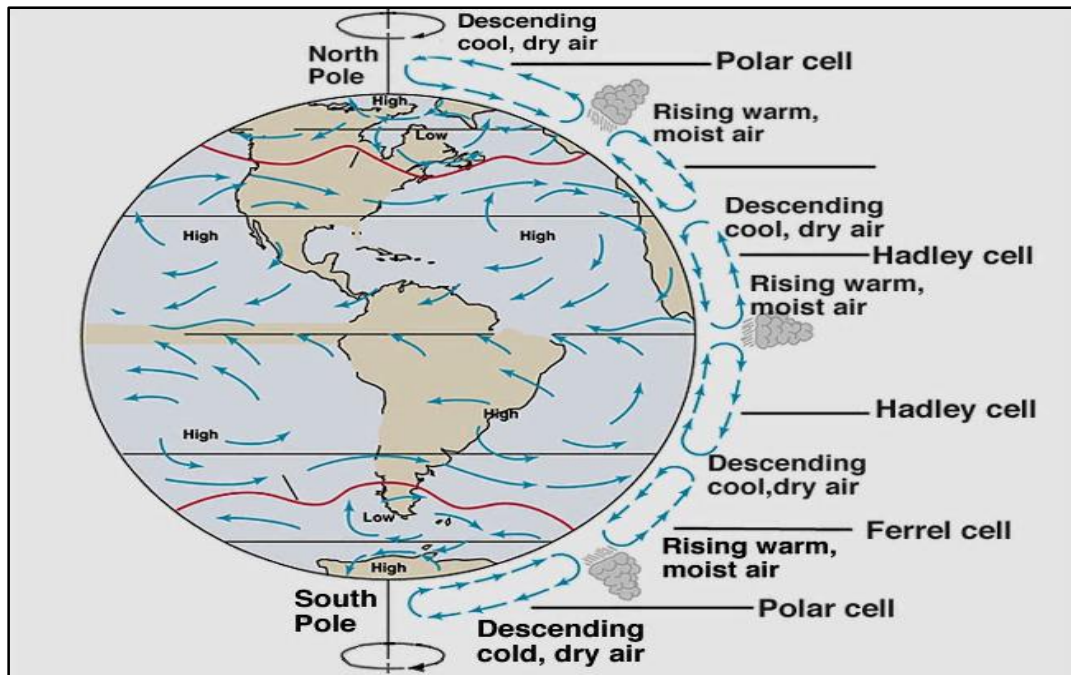


Figure III.2. La circulation générale atmosphérique.

III.1.2.2 L'océan :

C'est une vaste étendue d'eau salée qui occupe un bassin profond entre deux ou plusieurs continents. C'est un grand réservoir de chaleur, et il occupe une grande partie de la surface Terrestre (plus de 70% de la surface terrestre).

Les océans jouent un rôle important et multiple dans le système climatique. Ils constituent d'abord un vaste réservoir de carbone, ayant déjà absorbé une partie du CO₂ anthropique émis jusqu'à présent. Ils continueront jusqu'à un certain point d'assurer cette fonction dans l'avenir. Deuxièmement, les courants océaniques transportent des quantités appréciables de chaleur, ce qui a des conséquences marquées sur les climats régionaux (figure III.3.). Des changements dans le transport de chaleur océanique pourraient avoir un effet significatif sur les modifications climatiques régionales et refroidir provisoirement certaines zones ou en réchauffer d'autres bien davantage certaines zones. Les courants océaniques et le taux d'absorption de la chaleur par les océans sont fonction des configurations des vents et de l'échange de chaleur et d'eau douce (par les précipitations et l'évaporation) entre les océans et l'atmosphère. Aux latitudes élevées, la présence de glace de mer agit très fortement sur ces échanges, ce qui rend d'autant plus essentielle une simulation.

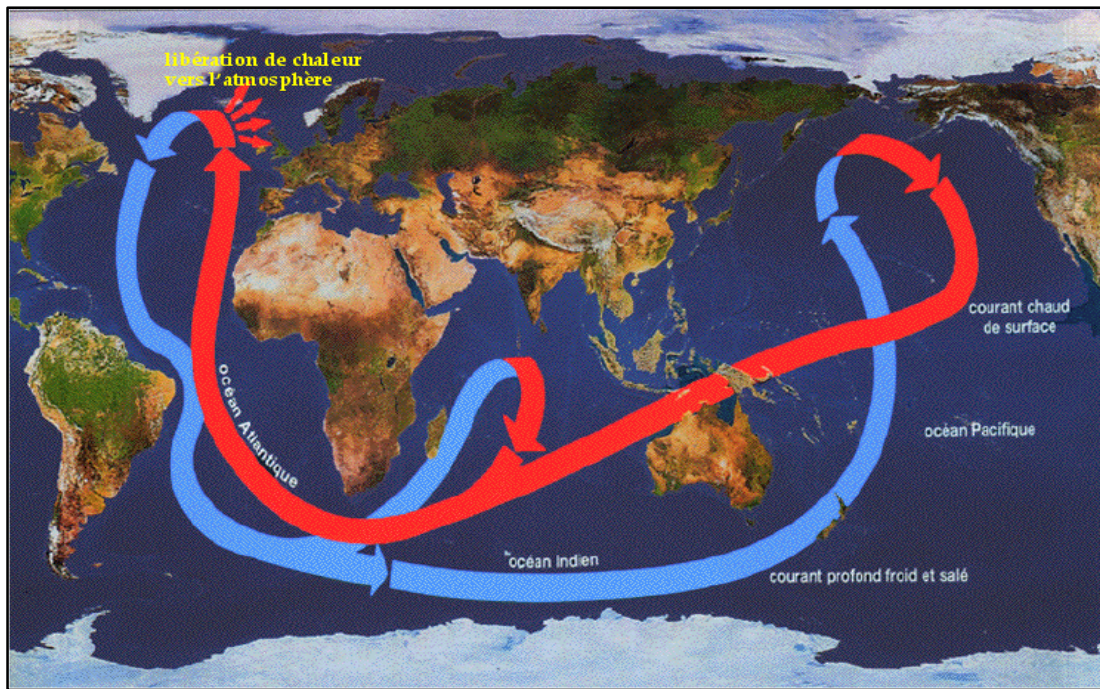


Figure III.3. Circulation thermohaline plusieurs centaines à un millier d'années.

III.1.2.3 La biosphère :

C'est l'ensemble des continents et végétations. La vie (*biodiversité*) ne peut se maintenir dans la biosphère que grâce à l'énergie solaire et à la circulation d'éléments indispensables comme le carbone ou l'azote, qui sont constamment recyclés (cycle de Carbone, cycle de l'Azote, cycle de l'eau). La biosphère est constituée d'éléments relativement indépendants les uns des autres et plus ou moins stables, les écosystèmes. Elle englobe l'atmosphère, l'hydrosphère (océans, fleuves, rivières, etc.), et la lithosphère (le sol et la partie superficielle des roches). Il a subi pas mal de transformation depuis l'ère géologique jusqu'à notre époque.

Les caractéristiques physiques de la surface terrestre, notamment la couverture végétale, influent fortement sur l'absorption de l'énergie solaire et sur les flux de chaleur, de vapeur d'eau et de quantité de mouvement entre le sol et l'atmosphère. En un endroit donné, ces flux déterminent en grande partie le climat de surface local et ont sur l'atmosphère des effets qui s'étendent parfois à toute la planète (figure III.4.).

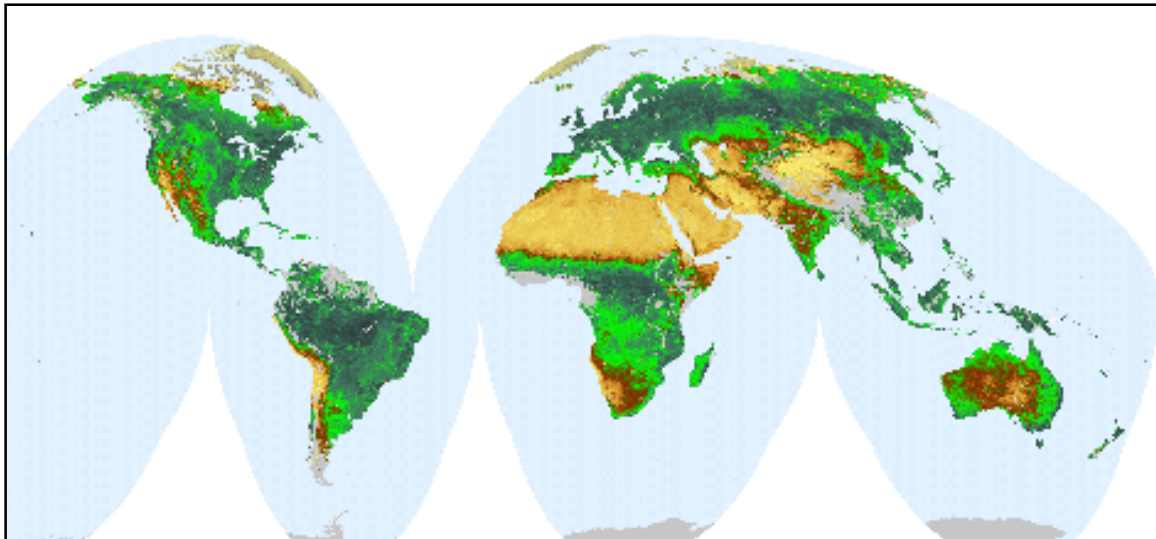


Figure III.4. La couverture végétale de la Terre.

III.1.2.4 La cryosphère :

C'est l'ensemble des glaces de mer, de couvertures neigeuses saisonnières, de glaciers de montagnes et inlandsis de la planète. On trouve de 1 à 30°/°de neige sur les continents et 11% de calotte/ glacier. Ils ont pour première effet *l'albédo* qui conditionne la réflexion du rayonnement solaire : et pour deuxième effet *les rétroactions* qui sont des causes à effets des fontes de neiges et glaces provoqués par une augmentation de température et qui en passant réduit l'albédo.

NB : Un réchauffement du climat modifiera la couverture des glaces et de neige qui sont très réfléchive. L'étendu de ces couvertures diminuera et provoquera ainsi une absorption accrue de l'énergie solaire et par conséquent un réchauffement supplémentaire. Cette évolution aura des répercussions sur la nébulosité qui compliqueront énormément les efforts de prévision. Pour bien simuler les modifications des terres émergées et leur effet net, il faut employer des modèles à résolution spatiotemporelle élevée afin de tenir compte des interactions potentielles avec les nuages et de l'hétérogénéité spatiale de la surface

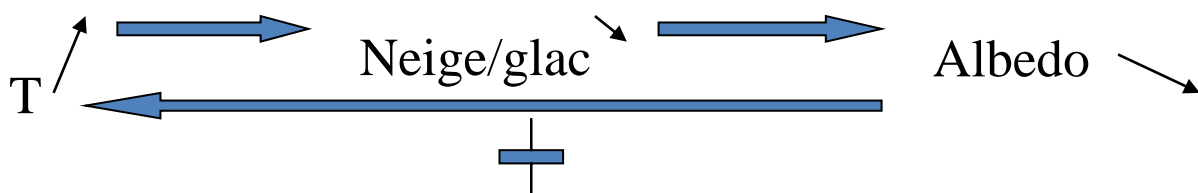


Figure III.5. Action de température sur la neige/glacé et albédo.

En résumé, Les composantes du système climatique façonnent le climat mondial et régional de diverses façons :

- ✚ En modifiant la composition de l'atmosphère terrestre, modulant ainsi l'absorption et le transfert de l'énergie solaire ainsi que le rayonnement de l'énergie infrarouge vers l'espace.
- ✚ En altérant les propriétés en surface de même que la nébulosité et la nature de la couverture nuageuse, ce qui a des effets sur le climat à l'échelle régionale et mondiale.
- ✚ En redistribuant horizontalement et verticalement la chaleur d'une région à l'autre par les mouvements de l'atmosphère et des océans.

III.2 Quelques mécanismes physiques du système climatique :

III.2.1 Effet de serre :

III.2.1.1 L'effet de serre naturel :

L'effet de serre naturel est un phénomène qui consiste à retenir de la chaleur solaire à la surface de la terre. Sans lui, la température moyenne sur la terre serait de -18°C au lieu de $+15^{\circ}\text{C}$. C'est donc un phénomène naturel et indispensable à la vie sur Terre. Comme il est dû à la propriété différentielle de l'atmosphère dans les différentes longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique, il dépend donc de la structure moléculaire précise des gaz qui constituent l'atmosphère. Les principaux gaz à effet de serre sont : la vapeur d'eau, le CO_2 , le CH_4 , les CFC (Chloro-Fluoro Carbone).

III.2.1.2 Principe :

L'absorption de la partie non réfléchi du rayonnement solaire par l'atmosphère et la surface terrestre réchauffe le système climatique. Pour se refroidir, ce dernier doit émettre de l'énergie vers l'espace sous forme de rayonnement (infrarouge). Cette émission provient de la surface elle-même, mais aussi des nuages et des différentes molécules atmosphériques. Une partie de rayonnement infrarouge est donc renvoyée en direction de la surface terrestre par certains gaz de l'atmosphère (gaz à effet de serre). L'atmosphère se comporte donc comme une vitre qui piège le rayonnement solaire d'où le terme effet de serre.

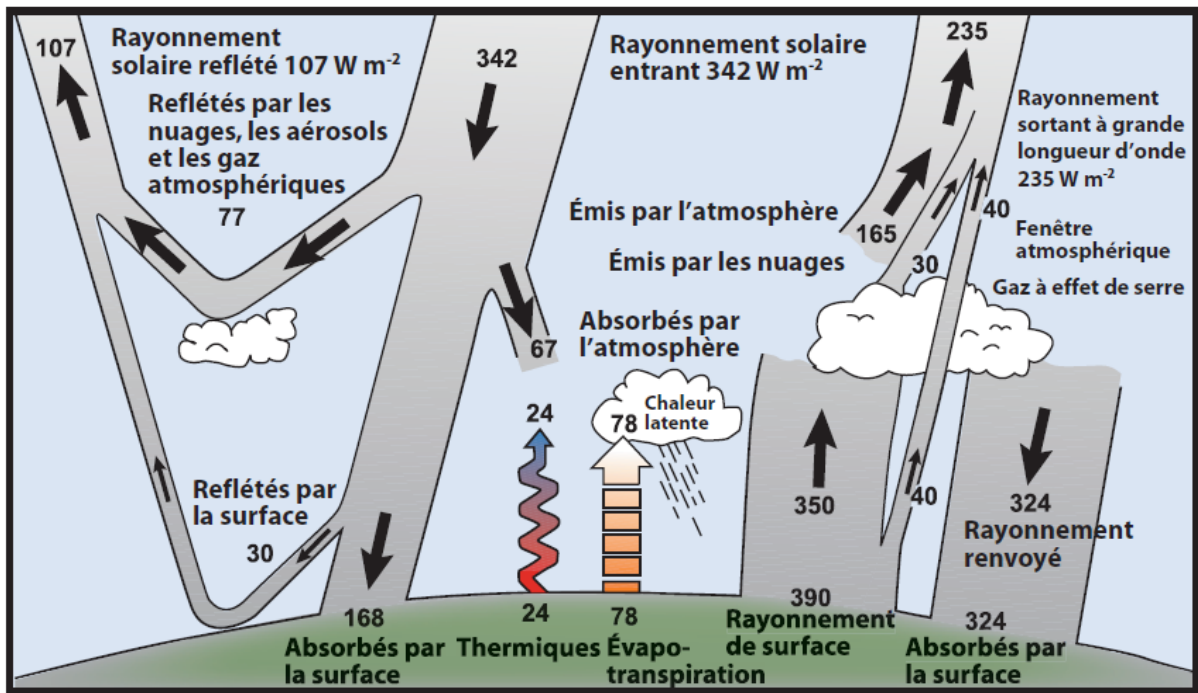


Figure III.6. La distribution de l'énergie solaire.

III.2.1.3 Effet de serre additionnel :

Il est dû à une augmentation dans l'atmosphère de la concentration des gaz à effet de serre. Ces gaz, principalement le CO_2 , la vapeur d'eau et les CFC sont émis par certaines activités humaines, à savoir les usines, la déforestation, les véhicules...Et ce faisant cet effet de serre additionnel modifie le climat de la terre.

Les activités humaines font varier la concentration des gaz à effet de serre et des aérosols, lesquels influencent et sont influencés par le climat. Les gaz à effet de serre réduisent la perte nette de rayonnement infrarouge en direction de l'espace tout en ayant peu d'impact sur l'absorption du rayonnement solaire, ce qui élève la température en surface et produit l'effet dit de serre.

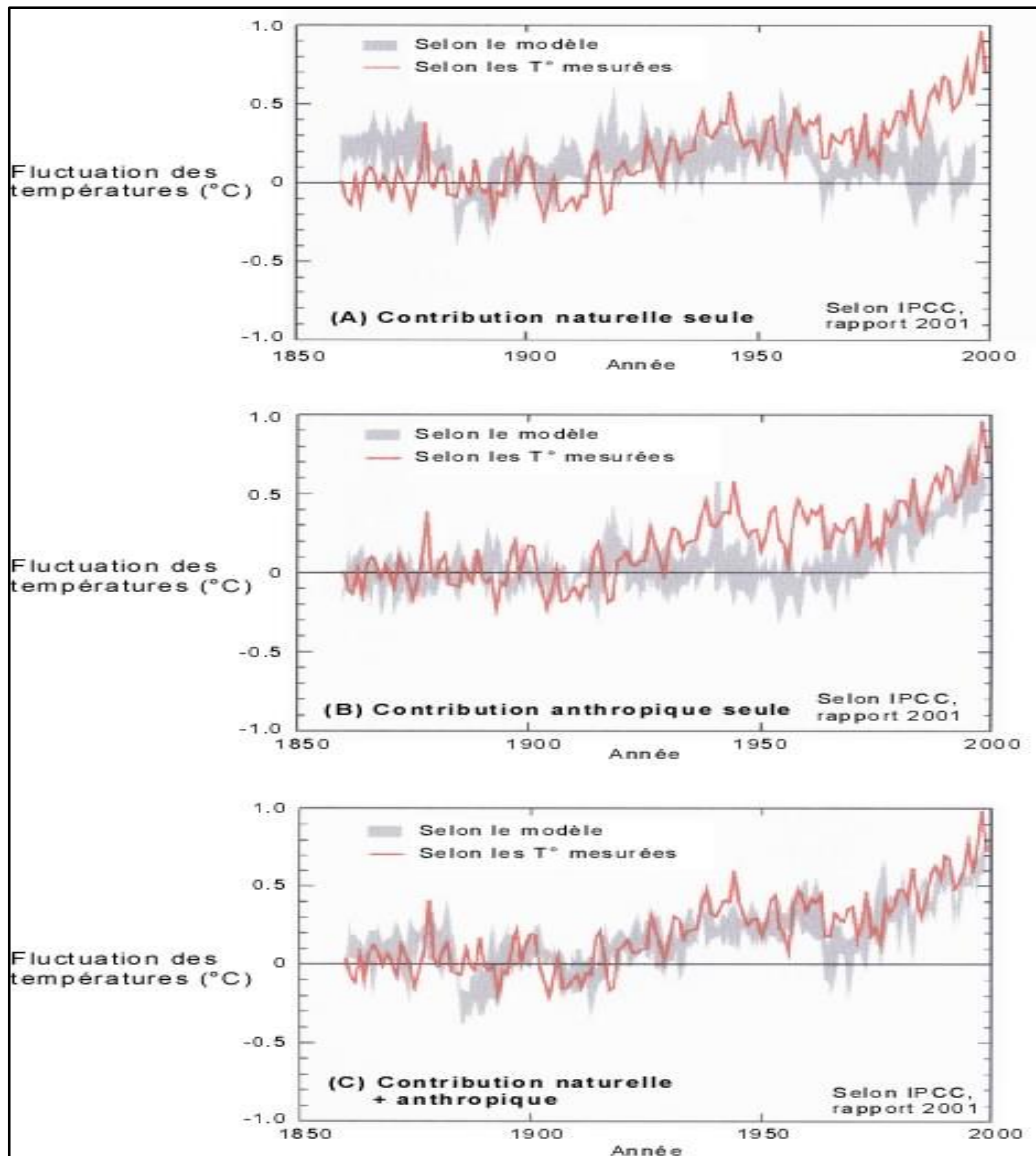


Figure III.7. Influence de la contribution humaine sur l'élévation de la température.

Nous pouvons bien remarquer sur ces figures combien les activités humaines influencent l'évolution de la température. Dans le premier cas, en ne considérant que la contribution naturelle seule, les deux résultats (selon le modèle et la température mesurée), montre des divergences de 1850 à 1875 et de 1960 à 2000. Dans le second cas, si on ne considère que la contribution anthropique seule, on a constaté une assez bonne corrélation de 1850 jusqu'à partir de 1920, date qui correspond au début de l'ère industrielle où on note une sous-estimation de la température du modèle par la température mesurée. Dans le troisième cas, on a couplé les deux contributions (anthropiques et naturelles), on a eu un bon ajustement du modèle avec la température mesurée. On peut alors conclure que les activités humaines influent considérablement sur le climat.

III.2.2 La sensibilité climatique :

Une modification de la concentration des gaz à effet de serre modifie le bilan énergétique de la Terre. Cette modification, appelée forçage radiatif, entraîne une modification de la température moyenne de la Terre dont l'amplitude dépend non seulement du forçage lui-même mais aussi de la façon dont le système climatique dans son ensemble répond à ce forçage. La vapeur d'eau, la cryosphère et les nuages par exemple, sont modifiés par un changement de température et ces modifications influencent le changement initial de température. Nous montrerons tout d'abord que ces phénomènes, dits de rétroaction, jouent un rôle clé dans l'estimation de l'amplitude du réchauffement climatique en réponse à un doublement de la concentration de l'atmosphère en CO₂.

La sensibilité climatique est un indicateur global qui quantifie la variation de température de surface de la Terre en réponse à une perturbation, telle un doublement de la concentration de l'atmosphère en CO₂. Cet indicateur est souvent utilisé pour comparer très simplement la réponse des différents modèles, ou pour normaliser les variations du climat, lorsque l'on veut par exemple comparer la distribution géographique des variations de température, de précipitations ou autres. Cet indicateur est un diagnostic simple et n'est en aucune façon une grandeur physique en soi.

En d'autres termes, elle désigne l'augmentation constante de la température moyenne annuelle de l'air en surface, à l'échelle du globe, associée à un forçage radiatif moyen mondial donné. Il est courant de n'inclure que les processus de rétroaction rapide, notamment les variations de la vapeur d'eau, dans le calcul de la sensibilité du climat et d'ignorer les modifications induites dans la concentration des autres gaz à effet de serre (ainsi que d'autres processus de rétroaction lente).

Le rapport entre la réponse du climat et un facteur de forçage :

La sensibilité du climat = La réponse du climat / un facteur de forçage

III.2.3 Rétroaction :

Il y a rétroaction lorsqu'une variable « X » d'un système (climatique) modifie une deuxième variable « Y » qui à son tour influe sur la première. Une rétroaction positive intensifie l'effet considéré alors qu'une rétroaction négative le réduit.

En d'autres termes une rétroaction est positive quand le changement en « Y » renforce le changement en « X », elle est négative quand elle réduit l'effet initial c'est-à-dire que le changement en « Y » affaiblit le changement en « X ».

Dans la réalité, dès que l'on change la température de surface, toutes les variables climatiques (vent, humidité, nuages, pluie, couverture neigeuse...) sont modifiées. Certaines de ces variations vont entraîner un changement du bilan énergétique au sommet de l'atmosphère, qui va à son tour entraîner un changement de la température d'équilibre de la surface. On appelle cela une boucle de rétroaction. Celle-ci peut être, soit positive (*la boucle amplifie l'accroissement initial de température*), soit négative (*la boucle atténue l'accroissement initial*).

Les principales boucles de rétroactions du climat sont les suivantes :

- ✓ **La rétroaction vapeur d'eau** : l'augmentation de la température tend à augmenter le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère, ce qui augmente l'effet de serre et donc la température de surface ; il s'agit d'une *rétroaction positive*.
- ✓ **La rétroaction des nuages** : les changements de vapeur d'eau et de circulation atmosphérique modifient la couverture nuageuse et ses propriétés radiatives, et donc la fraction de rayonnement solaire qu'ils réfléchissent et leur contribution à l'effet de serre ; de *la rétroaction est incertain*.
- ✓ **La rétroaction due à l'albédo de surface** : l'augmentation de la température de surface peut changer les propriétés radiatives de la surface (car la neige ou la glace de mer fondent plus vite), qui absorbera alors plus de rayonnement solaire et réchauffera davantage son environnement. (*Rétroaction positive*)
- ✓ Une forte éruption volcaniques par exemple rejette d'énormes quantités d'aérosols dans l'atmosphère ; ces aérosols à leur tour vont réfléchir le rayonnement solaire incident et cela va entraîner une diminution de la température : on peut alors parler d'une *rétroaction négative*.

Ces rétroactions peuvent être rapides ou lentes selon leur temps de réactions. Par exemple la rétroaction des vapeurs d'eau et des nuages répondent de manière quasi instantanée au changement climatiques, on peut ainsi parler des *rétroactions rapides* par contre ceux liés à la végétation et au cycle de carbone, glace de mer et neige ont un temps de réponse de quelques années voir plusieurs décennies ; ce sont alors des *rétroactions lentes*.

III.2.4 Forçage radiatif :

Le forçage radiatif est la perturbation du bilan énergétique du système Terre-atmosphère (en W m^{-2}) à la suite, par exemple, d'une modification de la concentration de dioxyde de carbone ou d'une variation du débit solaire. Le système climatique réagit au forçage radiatif de façon à rétablir l'équilibre énergétique. Un forçage radiatif *positif* a tendance à réchauffer la surface du globe tandis qu'un forçage radiatif *négalif* a tendance à la refroidir. Le forçage radiatif est généralement exprimé à l'aide d'une valeur annuelle moyennée à l'échelle du globe. Dans les rapports du GIEC, le forçage radiatif est défini de façon plus précise : il s'agit de la perturbation subie par le bilan énergétique du système surface-troposphère une fois que la stratosphère a retrouvé un état d'équilibre radiatif moyen mondial. On parle parfois de "forçage climatique".

Les aérosols et les gaz à effet de serre anthropiques influent sur le système climatique en modifiant l'équilibre entre le rayonnement solaire absorbé et le rayonnement infrarouge émis. Le climat de surface réagit à l'évolution initiale du rayonnement net dans la tropopause plutôt qu'en surface ou dans la haute atmosphère, car la surface et la troposphère sont fortement couplées par les échanges de chaleur et répondent comme un tout à la perturbation thermique combinée. L'ajustement de stratosphère réagit rapidement et indépendamment du système surface-troposphère.

Les forçages radiatifs naturels, à une échelle allant de la décennie au siècle, comprennent les variations de la luminosité solaire et les éruptions volcaniques, ces dernières produisant des aérosols sulfatés réfléchissants, dont la durée de vie est de plusieurs années s'ils sont injectés dans la stratosphère. Le forçage radiatif pour un doublement de la concentration de CO_2 est de $4,0\text{-}4,5 \text{ Wm}^{-2}$ avant l'ajustement des températures stratosphériques (Cesset *al.* 1993); cet ajustement réduit le forçage d'environ $0,5 \text{ Wm}^{-2}$, ce qui donne $3,5\text{-}4,0 \text{ Wm}^{-2}$. Si la température était la seule variable climatique touchée par ce phénomène, le climat se réchaufferait de $1,2 \text{ }^\circ\text{C}$ afin de rétablir l'équilibre radiatif.

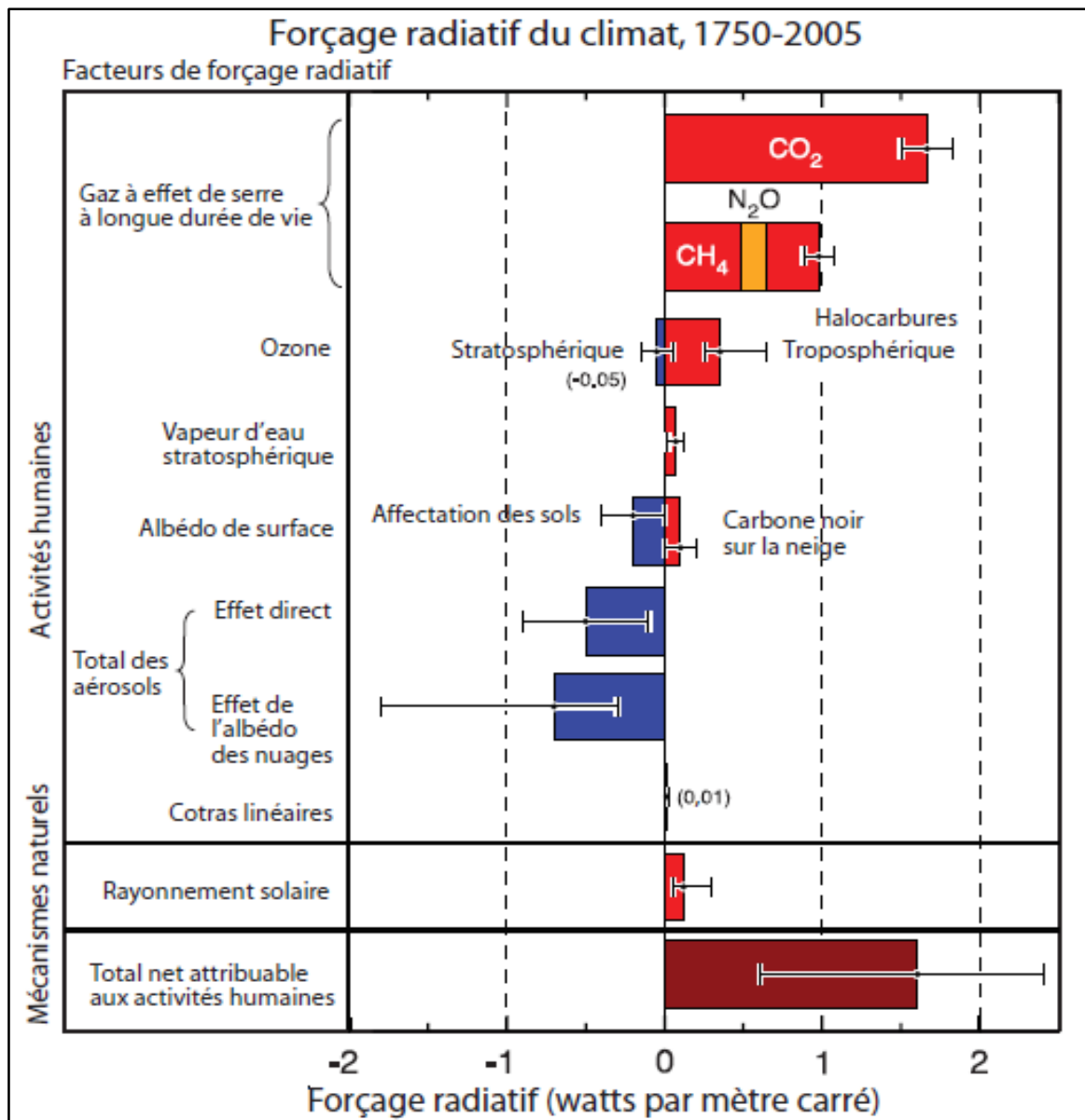


Figure III.8. Résumé des principaux éléments du forçage radiatif du changement climatique.

III.2.5 Aérosols :

Les aérosols sont de petites particules en suspension dans l'air qui interviennent principalement dans le climat en réfléchissant une partie de l'énergie solaire en direction de l'espace (effet direct) et en régulant dans une certaine mesure la nébulosité et les propriétés optiques des nuages (effet indirect). Ils absorbent également une fraction du rayonnement infrarouge.

Ils sont donc importants par leur incidence sur le rayonnement solaire et par leur effet essentiellement refroidisseur.

La concentration moyenne mondiale de trois types d'aérosols a augmenté suffisamment, en raison des activités humaines, pour avoir des effets importants sur le climat : les aérosols sulfatés (SO₄), qui sont le produit de l'oxydation des précurseurs renfermant du soufre et qui sont émis lors de la combustion du charbon et du pétrole et de la fusion de certains métaux; les aérosols de suie (carbone noir), qui proviennent directement de la combustion du charbon, du pétrole et de la biomasse; et les aérosols organiques (sans les aérosols de suie), issus de la combustion de la biomasse et de la transformation chimique des COV (Composé Organique volatile). Les aérosols de poussières provenant des modifications de la surface terrestre peuvent également avoir des incidences climatiques notables.

III.2.6 Le cycle de carbone :

C'est une expression qui est employée pour désigner l'échange de carbone (sous diverses formes, par exemple sous forme de dioxyde de carbone) entre l'atmosphère, les océans, la biosphère terrestre et les dépôts géologiques.

Le système climatique de la Terre est un système ouvert et il possède une grande capacité d'auto régulation. Pour comprendre la modification anthropique de l'effet de serre, nous devons d'abord examiner les différents réservoirs du carbone et les flux de transfert.

L'atmosphère contient environ 750 Gt de Carbone, essentiellement sous forme de CO₂, la biomasse continentale en contient environ 1000 Gt et la couche superficielle de l'océan environ 1500 Gt. La croûte terrestre ainsi que l'océan profond en contiennent certainement une quantité beaucoup plus grande. Mais ils sont négligés pour l'instant, car le temps caractéristique de recyclage de ces 2 milieux est très lent.

Chaque année, de 90 à 100 Gt d carbone sont échangés entre l'atmosphère et l'océan ; une quantité un peu plus faible (de 50 à 60 Gt) entre l'atmosphère et la biomasse continentale. On peut dire que les activités humaines libèrent chaque année environ 6 Gt de carbone dans l'atmosphère, principalement par la combustion fossile (charbon, pétrole et gaz). La moitié de ce rejet anthropique est pour l'instant reprise par l'océan et la biomasse continentale, tandis que l'autre moitié (3 Gt) s'accumule dans l'atmosphère.

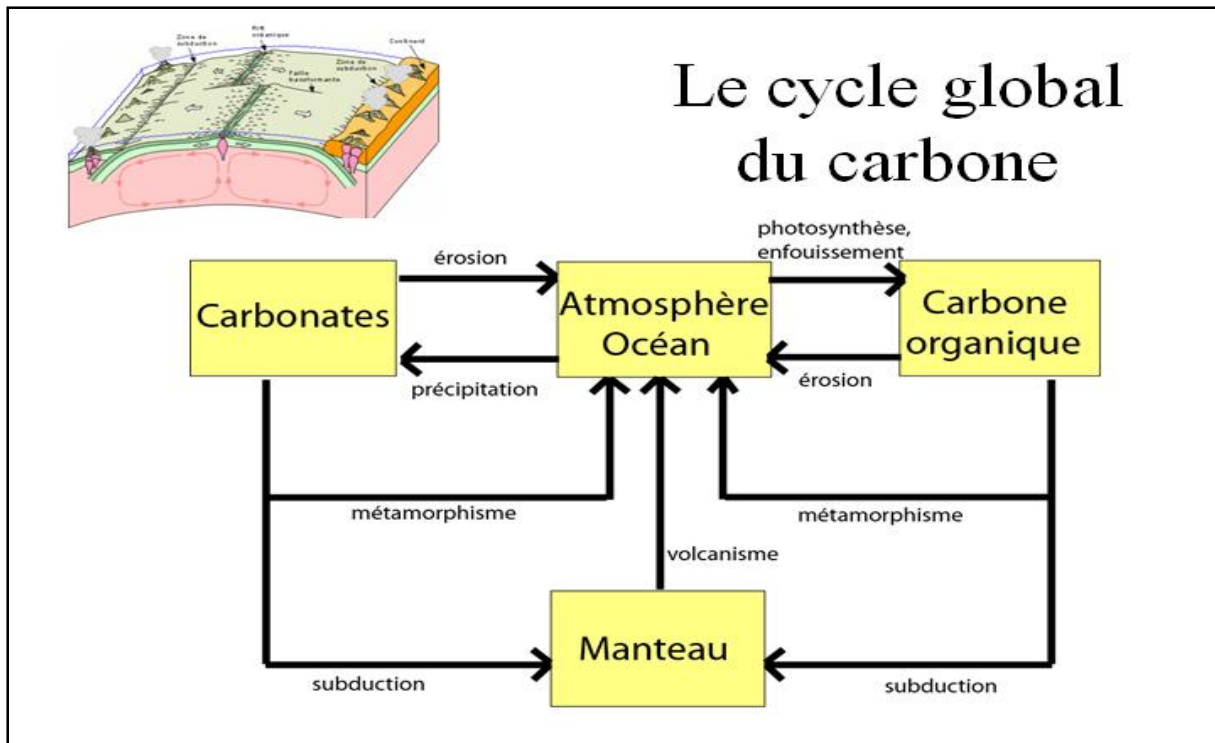


Figure III.9. Le cycle global du carbone.

III.2.7 Nuages :

Les nuages sont le principal phénomène visible de l'atmosphère. Ils représentent une étape du *cycle de l'eau*, qui comprend l'évaporation d'humidité de la surface de la Terre, le transport de cette humidité dans les niveaux élevés de l'atmosphère, la condensation de cette vapeur d'eau en masses nuageuses et le retour final de l'eau à la surface de la Terre sous forme de précipitations de pluie, de neige ou de grêle. Ce sont des petites gouttelettes d'eau ou de minuscules cristaux de glace.

La quantité, l'emplacement, la hauteur, la durée de vie et les propriétés optiques des nuages jouent un rôle important dans le climat de la Terre ; les modifications de ces caractéristiques pourraient fortement contribuer aux changements climatiques. L'effet radiatif d'une fluctuation donnée des propriétés, de la quantité ou de la hauteur des nuages dépend du lieu, de la période de l'année et du moment de la journée où elle se produit. Ces variations sont liées aux champs de température et d'humidité tridimensionnels et aux processus dynamiques de l'atmosphère (associés aux vents). C'est pourquoi seuls les modèles en trois dimensions présentant une résolution spatiale élevée et un cycle diurne sont en mesure de simuler correctement l'effet net des modifications des nuages sur le climat. Toutefois, comme la plupart des processus importants touchant les nuages se situent bien en deçà de la résolution des modèles mondiaux, on est contraint de recourir à des représentations simples fondées sur

des moyennes par zone (paramétrisations), ce qui introduit un risque d'erreur significative dans la simulation des changements.

III.3 Changements observés dans le système climatique :

Les observations du système climatique s'appuient sur des mesures directes et sur la télédétection à partir de satellites ou d'autres plates-formes. À l'échelle mondiale, les observations de l'ère instrumentale ont débuté vers le milieu du XIX^e siècle pour certaines variables telles que la température, les jeux de données d'observation étant plus complets et diversifiés à partir des années 1950. Des reconstructions effectuées à partir d'archives paléoclimatiques permettent d'étendre certains enregistrements sur plusieurs centaines voire plusieurs millions d'années vers le passé. L'ensemble de ces données fournit une vision globale de la variabilité et des changements à long terme de l'atmosphère, de l'océan, de la cryosphère et de la surface des terres émergées.

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.

III.3.1 L'atmosphère :

Chacune des trois dernières décennies a été successivement plus chaude à la surface de la Terre que toutes les décennies précédentes depuis 1850. Les années 1983 à 2012 constituent *probablement* la période de 30 ans la plus chaude qu'ait connue l'hémisphère Nord depuis 1 400 ans (*degré de confiance moyen*).

- La tendance linéaire de la moyenne globale des données de température de surface combinant les terres émergées et les océans indique un réchauffement de 0,85 [0,65 à 1,06] °C au cours de la période 1880–2012, pour laquelle il existe plusieurs jeux de données indépendants. L'augmentation totale de la moyenne entre la période 1850–1900 et la période 2003–2012 est de 0,78 [0,72 à 0,85] °C, en s'appuyant sur l'ensemble de données le plus long disponible.

- Sur la plus longue période pour laquelle le calcul relatif aux tendances régionales est suffisamment exhaustif (1901–2012), la quasi-totalité de la surface du globe a connu un réchauffement.
- La température moyenne à la surface du globe présente une grande variabilité aux échelles décennale et interannuelle (voir figure RID.1), qui se superpose à un réchauffement multidécennal considérable. En raison de la variabilité naturelle, les tendances calculées sur des séries courtes sont très sensibles à la date de début et de fin de la période considérée, et ne reflètent généralement pas les tendances climatiques de long terme. Par exemple, le rythme du réchauffement sur les 15 dernières années (1998–2012; 0,05 [–0,05 à +0,15] °C par décennie), qui débutent par un fort épisode El Niño, est inférieur à la tendance calculée depuis 1951 (1951–2012; 0,12 [0,08 à 0,14] °C par décennie).
- Les reconstructions de la température en surface à l'échelle continentale font apparaître, avec un *degré de confiance élevé*, des intervalles de plusieurs décennies pendant la période d'anomalie climatique médiévale (années 950 à 1250) au cours desquels la température était, dans certaines régions, aussi élevée qu'à la fin du XXe siècle. Ces intervalles chauds à l'échelle régionale ne se sont pas produits de manière aussi cohérente dans les différentes régions que le réchauffement constaté à la fin du XXe siècle (*degré de confiance élevé*).
- Il est *quasiment certain* qu'à l'échelle mondiale, la troposphère s'est réchauffée depuis le milieu du XXe siècle. Des observations plus complètes permettent d'associer un degré de confiance plus élevé aux estimations des changements de température troposphérique dans la partie extratropicale de l'hémisphère Nord qu'ailleurs. Le *degré de confiance* concernant la rapidité du réchauffement et sa structure verticale dans la troposphère extratropicale de l'hémisphère Nord est *moyen*, et *faible* ailleurs.
- Le *degré de confiance* concernant la variation de la moyenne mondiale des précipitations sur les régions continentales depuis 1901 est *faible* avant 1951 et *moyen* après cette date. En moyenne sur les régions continentales des moyennes latitudes de l'hémisphère Nord, les précipitations ont augmenté depuis 1901 (*degré de confiance moyen* avant 1951 et *élevé* ensuite). Pour les autres latitudes, le *degré de confiance* relatif aux tendances régionales de long terme positives ou négatives est *faible*.
- Des changements concernant de nombreux phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes ont été observés depuis environ 1950. Il est *très probable* que le

nombre de journées et de nuits froides a diminué et que le nombre de journées et de nuits chaudes a augmenté à l'échelle du globe⁶. Il est *probable* que la fréquence des vagues de chaleur a augmenté sur une grande partie de l'Europe, de l'Asie et de l'Australie. Il est *probable* qu'il y a davantage de régions continentales où le nombre d'épisodes de précipitations abondantes a augmenté plutôt que diminué. La fréquence ou l'intensité des épisodes de fortes précipitations a *probablement* augmenté en Amérique du Nord et en Europe. Sur les autres continents, le *degré de confiance* associé à la transformation des fortes précipitations est au mieux *moyen*.

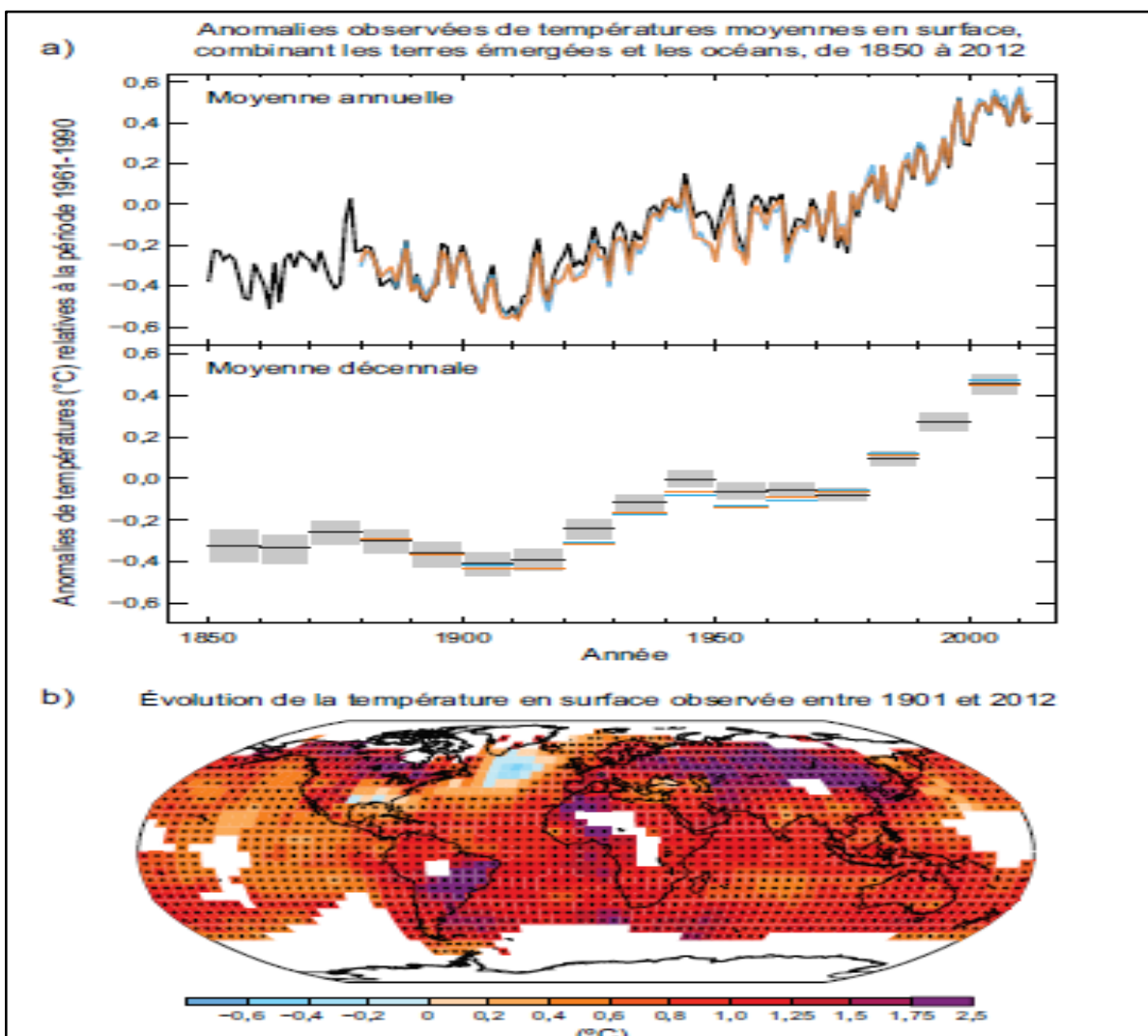


Figure III.10. Anomalies observées de températures moyennes en surface, combinant les terres émergées et les océans, de 1850 à 2012, ainsi que la carte de l'évolution des températures en surface observée entre 1901 et 2012, dérivée des tendances de températures déterminées par régression linéaire d'un ensemble de données (courbe orange dans la partie a).

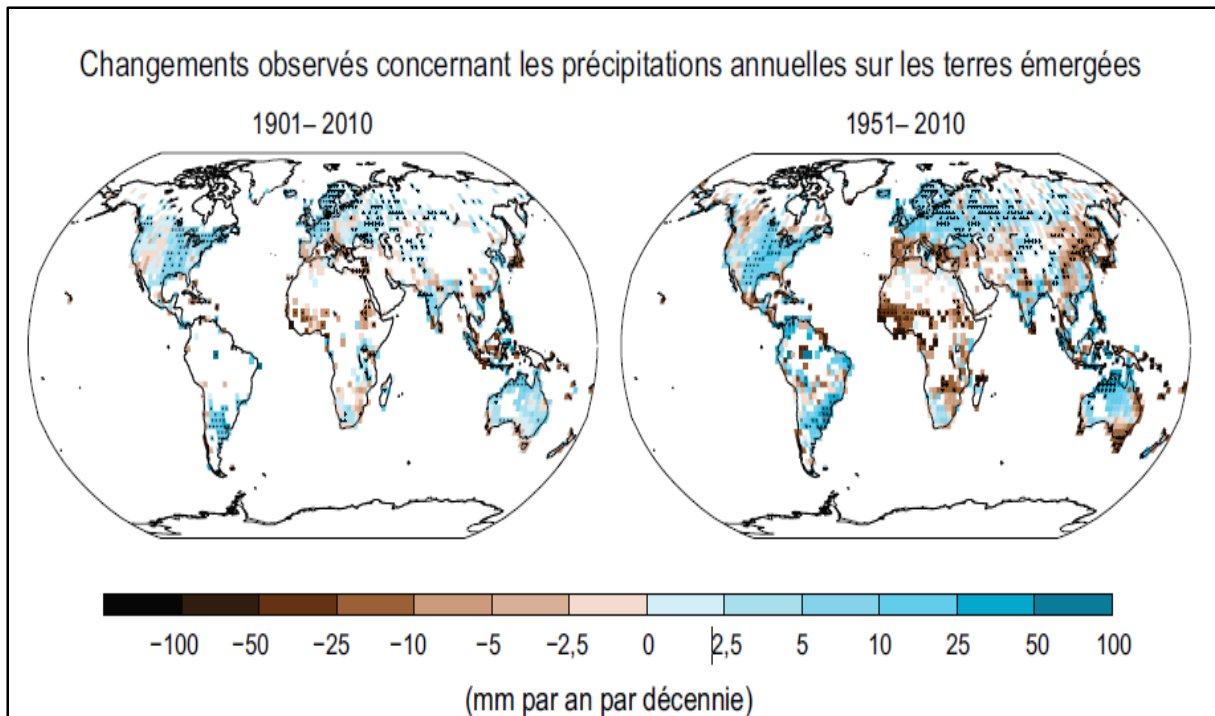


Figure III.11. Cartes des changements observés de précipitations entre 1901 et 2010, et entre 1951 et 2010.

III.3.2 L'océan :

Le réchauffement océanique constitue l'essentiel de la hausse de la quantité d'énergie emmagasinée au sein du système climatique et représente plus de 90 % de l'énergie accumulée entre 1971 et 2010 (*degré de confiance élevé*). Il est *quasiment certain* que l'océan superficiel (jusqu'à 700 m de profondeur) s'est réchauffé entre 1971 et 2010, et ce dernier s'est *probablement* réchauffé entre les années 1870 et 1971.

- À l'échelle mondiale, le réchauffement de l'océan est plus prononcé près de la surface et les 75 premiers mètres de profondeur se sont réchauffés de 0,11 [0,09 à 0,13] °C par décennie sur la période 1971–2010. Depuis le RE4, des erreurs systématiques d'origine instrumentale dans les mesures de température de l'océan superficiel ont été identifiées et rectifiées, ce qui augmente le degré de confiance du changement évalué ;
- Il est *probable* que l'océan s'est réchauffé entre 700 et 2 000 m de profondeur entre 1957 et 2009. On dispose de suffisamment d'observations pour la période de 1992 à 2005 pour effectuer une évaluation globale du changement de température en dessous de 2 000 m. Il n'y a *probablement* pas de tendance significative entre 2 000 et 3 000 m sur cette période. Il est

probable que l'océan profond en dessous de 3 000 m s'est réchauffé sur cette période, le réchauffement le plus important étant observé dans l'océan Austral ;

- Pendant la période de 40 ans relativement bien documentée allant de 1971 à 2010, plus de 60 % de l'augmentation nette d'énergie absorbée par le système climatique a été emmagasinée dans l'océan superficiel (0-700 m) et environ 30 %, dans l'océan en dessous de 700 m. L'augmentation du contenu thermique de l'océan superficiel pendant cette période, estimée par une tendance linéaire, est de 17 [15 à 19];
- Il est *à peu près aussi probable qu'improbable* que le contenu thermique océanique de 0 à 700 m a augmenté plus lentement pendant la période 2003–2010 que pendant la période 1993–2002. L'absorption de chaleur entre 700 et 2 000 m, où la variabilité interannuelle est plus faible, s'est *probablement* poursuivie avec la même intensité entre 1993 et 2009 ;
- Il est *très probable* que les régions à salinité élevée (où l'évaporation domine le bilan d'eau en surface) sont devenues plus salées, tandis que les régions à faible salinité (où les précipitations dominent) sont devenues moins salées depuis les années 1950. Ces tendances régionales de la salinité océanique suggèrent des changements d'évaporation et de précipitations sur les océans (*degré de confiance moyen*) ;
- Il n'existe pas d'élément observationnel montrant une tendance de la circulation méridienne océanique de retournement de l'Atlantique (AMOC) sur la base de 10 ans d'observations de l'AMOC, ni sur la base de séries d'observations plus longues des composantes individuelles de l'AMOC.

III.3.3 La cryosphère :

Au cours des deux dernières décennies, la masse des nappes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique a diminué, les glaciers de presque toutes les régions du globe ont continué à se réduire et l'étendue de la banquise arctique et celle du manteau neigeux de l'hémisphère Nord au printemps ont continué à diminuer (*degré de confiance élevé*).

- La perte de glace moyenne des glaciers des diverses régions du monde, en excluant les glaciers situés à la périphérie des nappes glaciaires, était *très probablement* de 226 [91 à 361] Gt an⁻¹ pour la période 1971–2009, et très probablement de 275 [140 à 410] Gt an⁻¹ pour la période 1993–2009 ;

- La perte de glace moyenne de la nappe du Groenland a *très probablement* fortement augmenté, passant de 34 [-6 à 74] Gt an-1 au cours de la période 1992–2001 à 215 [157 à 274] Gt an-1 au cours de la période 2002–2011;
- La perte de glace moyenne de la nappe glaciaire de l’Antarctique a *probablement* augmenté, passant de 30 [-37 à 97] Gt an-1 au cours de la période 1992–2001 à 147 [72 à 221] Gt an-1 au cours de la période 2002–2011. On peut affirmer, avec un *degré de confiance très élevé* que ces pertes concernent principalement le nord de la péninsule Antarctique et le secteur de la mer d’Amundsen en Antarctique de l’Ouest ;
- L’étendue moyenne annuelle de la banquise arctique a diminué au cours de la période 1979–2012 à une vitesse qui se situait *très probablement* entre 3,5 et 4,1 % par décennie (entre 0,45 et 0,51 million de km² par décennie), et *très probablement* entre 9,4 et 13,6 % par décennie (entre 0,73 et 1,07 million de km² par décennie) pour le minimum d’été (glace pluriannuelle). La diminution moyenne de l’étendue moyenne décennale de la banquise arctique a été plus rapide en été que pour les autres saisons (*degré de confiance élevé*) ; l’étendue spatiale a diminué en toutes saisons et à chaque décennie successive depuis 1979 (*degré de confiance élevé*) (voir figure RID.3). À partir des reconstructions, on peut affirmer, avec un *degré de confiance moyen*, que, sur les trois dernières décennies, le recul de la banquise arctique en été était sans précédent et que les températures de surface de la mer en Arctique étaient anormalement élevées, au moins dans le contexte des 1 450 dernières années ;
- Il est *très probable* que l’étendue moyenne annuelle de la banquise en Antarctique a augmenté de 1,2 à 1,8 % par décennie (de 0,13 à 0,20 million de km² par décennie) entre 1979 et 2012. On estime, avec un *degré de confiance élevé*, que cette vitesse annuelle présente de fortes disparités régionales, avec des augmentations dans certains secteurs et des diminutions dans d’autres secteurs ;
- On peut affirmer, avec un *degré de confiance très élevé*, que l’étendue du manteau neigeux de l’hémisphère Nord a diminué depuis le milieu du XXe siècle. L’étendue du manteau neigeux de l’hémisphère Nord a diminué de 1,6 [0,8 à 2,4] % par décennie pour mars et avril, et 11,7 [8,8 à 14,6] % par décennie pour juin au cours de la période 1967–2012. Au cours de cette période, l’étendue du manteau neigeux dans l’hémisphère Nord n’a pas montré d’augmentation statistiquement significative, quel que soit le mois ;
- On peut affirmer, avec un *degré de confiance élevé*, que les températures du pergélisol ont augmenté dans la plupart des régions depuis le début des années 1980. Le

réchauffement observé atteignait 3 °C dans certaines régions du nord de l'Alaska (entre le début des années 1980 et le milieu des années 2000) et 2 °C dans certaines régions du nord de la partie européenne de la Russie (entre 1971 et 2010). Dans cette dernière région, une réduction considérable de l'épaisseur et de l'étendue spatiale du pergélisol a été observée au cours de la période 1975–2005 (*degré de confiance moyen*) ;

- De multiples éléments indiquent que l'Arctique connaît un réchauffement très important depuis le milieu du XXe siècle.

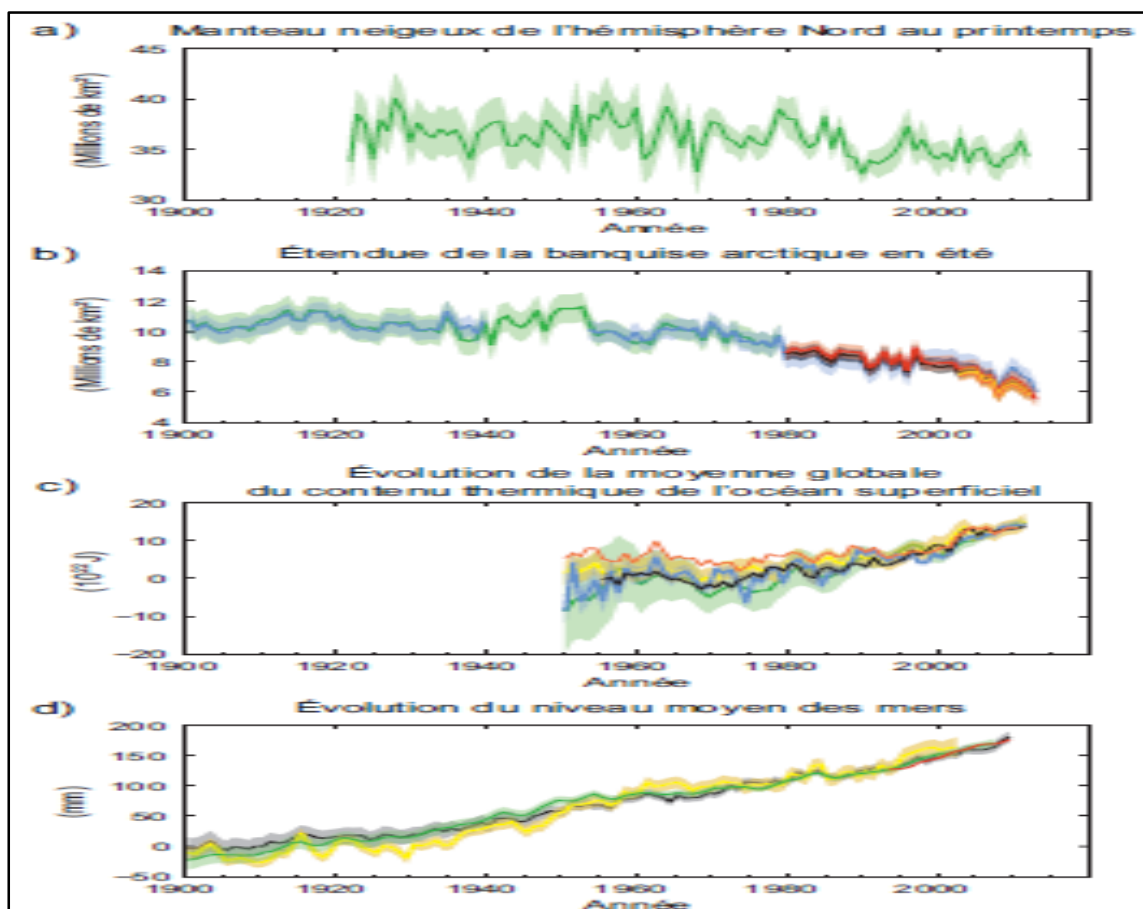


Figure III.12. Différents indicateurs observés des évolutions du climat du globe.

- a) Etendue moyenne du manteau neigeux de l'hémisphère Nord en mars et avril (printemps) ;
- b) Etendue moyenne de la banquise arctique en juillet-août-septembre (été) ;
- c) Evolution de la moyenne globale du contenu thermique de l'océan superficiel (0-700 m) aligné par rapport à 2006-2010, et par rapport à la moyenne de tous les ensembles de données pour 1970; d) niveau moyen des mers par rapport à la moyenne 1900-1905 de l'ensemble de données le plus long, avec tous les ensembles de données alignés par rapport à 1993 (la première année de données d'altimétrie par satellites).

III.3.4 Le niveau des mers :

Depuis le milieu du XIXe siècle, le rythme d'élévation du niveau moyen des mers est supérieur au rythme moyen des deux derniers millénaires (*degré de confiance élevé*). Entre 1901 et 2010, le niveau moyen des mers à l'échelle du globe s'est élevé de 0,19 m [de 0,17 à 0,21 m].

- Les données relatives au niveau des mers issues de mesures indirectes et instrumentales indiquent qu'une transition a eu lieu entre la fin du XIXe et le début du XXe siècle, où l'on est passé de vitesses d'élévation relativement faibles au cours des deux millénaires précédents à des vitesses plus importantes (*degré de confiance élevé*). Il est *probable* que la vitesse d'élévation du niveau des mers continue à augmenter depuis le début du XXe siècle ;
- Il est *très probable* que la vitesse moyenne d'élévation du niveau des mers a été de 1,7 [1,5 à 1,9] mm an-entre 1901 et 2010, de 2,0 [1,7 à 2,3] mm an-1 entre 1971 et 2010, et de 3,2 [2,8 à 3,6] mm an-1 entre 1993 et 2010. Les données fournies par les marégraphes et les satellites altimétriques sont cohérentes en ce qui concerne la vitesse plus élevée caractérisant la dernière période. Il est *probable* que des vitesses aussi élevées se sont produites entre 1920 et 1950 ;
- Depuis le début des années 1970, la somme de la perte de masse des glaciers et de l'expansion thermique des océans due au réchauffement expliquent environ 75 % de l'élévation du niveau moyen des mers (*degré de confiance élevé*). Sur la période 1993-2010, l'élévation du niveau moyen des mers est, avec un *degré de confiance élevé*, en accord avec la somme des contributions observées de l'expansion thermique océanique due au réchauffement (1,1 [0,8 à 1,4] mm an-1) et des changements affectant les glaciers (0,76 [0,39 à 1,13] mm an-1), la nappe du Groenland (0,33 [0,25 à 0,41] mm an-1), la nappe de l'Antarctique (0,27 [0,16 à 0,38] mm an-1) et le stockage d'eaux continentales (0,38 [0,26 à 0,49] mm an-1). La somme de ces contributions est de 2,8 [2,3 à 3,4] mm an-1 ;
- On peut affirmer, avec un *degré de confiance très élevé*, que le niveau moyen maximal des mers pendant la dernière période interglaciaire (il y a 129 000 à 116 000 ans) a été supérieur au niveau actuel d'au moins 5 m durant plusieurs milliers d'années et, avec un *degré de confiance élevé*, que celui-ci ne dépassait pas le niveau actuel de plus de 10 m. Au cours de la dernière période interglaciaire, la calotte glaciaire du Groenland a *très probablement* contribué à élever le niveau moyen des mers de 1,4 à 4,3 m, ce

qui implique une contribution additionnelle de la calotte glaciaire de l'Antarctique (*degré de confiance moyen*). Ce changement de niveau des mers s'est produit dans le contexte d'un forçage orbital différent des conditions actuelles et de températures de surface dans les hautes latitudes supérieures d'au moins 2 °C aux températures actuelles, cela en moyenne sur plusieurs millénaires (*degré de confiance élevé*).

III.3.5 Le cycle du carbone et autres cycles biogéochimiques :

Les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone, de méthane et de protoxyde d'azote ont augmenté pour atteindre des niveaux sans précédent depuis au moins 800 000 ans.

La concentration du dioxyde de carbone a augmenté de 40 % depuis l'époque préindustrielle.

Cette augmentation s'explique en premier lieu par l'utilisation de combustibles fossiles et en second lieu par le bilan des émissions dues aux changements d'utilisation des sols. L'océan a absorbé environ 30 % des émissions anthropiques de dioxyde de carbone, ce qui a entraîné une acidification de ses eaux :

- Les concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre que sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O) ont toutes augmenté depuis 1750 en raison des activités humaines. En 2011, les concentrations respectives de ces gaz à effet de serre étaient de 391 ppm¹¹, 1 803 ppb et 324 ppb, et dépassaient les niveaux préindustriels d'environ 40 %, 150 % et 20 % ;
- Les concentrations de CO₂, CH₄ et N₂O dépassent désormais fortement les plus hautes valeurs de concentrations enregistrées dans les carottes de glace pour les 800 000 dernières années. Les taux moyens d'augmentation des concentrations atmosphériques au siècle dernier sont, avec un *très haut degré de confiance*, sans précédent depuis les 22 000 dernières années ;
- Les émissions annuelles de CO₂ dues à l'utilisation de combustibles fossiles et à la production de ciment étaient de 8,3 [7,6 à 9,0] GtC₁₂ an⁻¹ en moyenne sur 2002-2011 (*degré de confiance élevé*) et étaient de 9,5 [8,7 à 10,3] GtC an⁻¹ en 2011, soit 54 % au-dessus du niveau de 1990. Les émissions annuelles nettes de CO₂ anthropiques dues à des changements d'utilisation des sols étaient de 0,9 [0,1 à 1,7] GtC an⁻¹ en moyenne sur la période 2002-2011 (*degré de confiance moyen*) ;
- Entre 1750 et 2011, les émissions de CO₂ dues à l'utilisation de combustibles fossiles et à la production de ciment ont libéré 375 [345 à 405] GtC dans l'atmosphère et l'on

estime que la déforestation et d'autres changements d'utilisation des sols ont relâché 180 [100 à 260] GtC. Cela se traduit par des émissions cumulées de 555 [470 à 640] GtC ;

- Parmi ces émissions anthropiques cumulées de CO₂, 240 [230 à 250] GtC se sont accumulées dans l'atmosphère, 155 [125 à 185] GtC ont été absorbées par les océans et 160 [70 à 240] GtC se sont accumulées dans les écosystèmes terrestres naturels (c'est-à-dire le puits continental résiduel, hors usage de sols, intégré dans le temps) ;
- L'acidification de l'océan est quantifiée par la diminution du pH₁₃. Le pH de l'eau de mer a diminué de 0,1 depuis le début de l'ère industrielle (*degré de confiance élevé*), soit une augmentation de 26 % de la concentration en ions hydrogène.

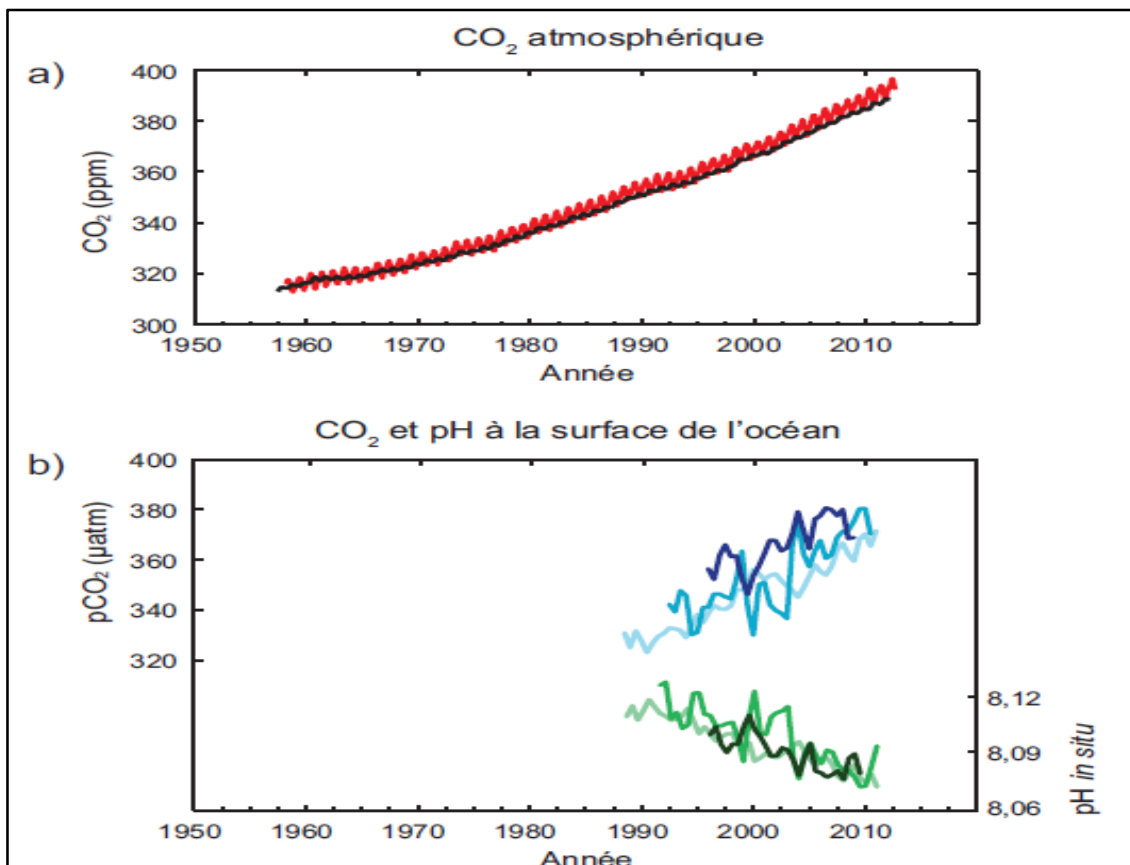


Figure III.13. Différents indicateurs observés décrivant les changements affectant le cycle du carbone global :

a) mesures des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone (CO₂) effectuées à Mauna Loa (19° 32 'N, 155° 34' O – en rouge) et au pôle Sud (89° 59' S, 24° 48' O – en noir) depuis 1958 ;

b) mesures de la pression partielle du CO₂ dissous à la surface de l'océan (courbes en bleu) et mesures in situ du pH (courbes en vert), une mesure de l'acidité de l'eau de mer.

CHAPITRE IV

LES MODELES CLIMATIQUES

Chapitre IV : Les modèles climatiques	63
IV.1 Les modèles climatiques	64
IV.1.1 Définition	64
IV.1.2 Types de modèles climatiques	65
IV.2 Principe des modèles climatiques	65
IV.3 Evolution (maillage) des modèles climatiques globaux au cours du temps	66
IV.4 Hiérarchie des modèles climatiques	67
IV.5 Evolution du degré de complexité des modèles depuis leurs débuts	69
IV.6 Caractéristiques des modèles	70
IV.7 Les différents scénarios utilisés par les modèles climatiques	71
IV.7.1 Les scénarios « SRES » (Special Report on Emissions Scenarios)	72
IV.7.2 Les scénarios « RCP » (Representative Concentration Pathway)	75
IV.8 Les incertitudes liées aux modèles climatiques	77

IV.1 Les modèles climatiques :

Dans le but de connaître l'évolution spatio-temporelle du climat de la planète ou de savoir ce qui pourrait se passer dans l'avenir, le seul moyen dont dispose la communauté scientifique pour répondre à cette question, sont les modèles climatiques. Mais ces modèles se heurtent à de sérieuses difficultés, à savoir la complexité du système climatique et l'imprévisibilité du futur comportement humaine qui influence considérablement le climat de la terre au point même de le changer. A cet effet, la communauté scientifique du climat a donc élaboré un certain nombre de modèles climatiques qui sont utilisés pour étudier le changement et la variabilité du climat, et pour comprendre les divers processus qui gouvernent celui-ci. Ils sont également utilisés pour faire des projections quantitatives concernant le changement climatique futur à long terme (à partir de divers scénarios de forçage de gaz à effet de serre et d'aérosols) et, de plus en plus, pour faire des prédictions climatiques initiales sur des échelles de temps allant d'une saison à plusieurs décennies. On trouvera une brève description de ces modèles dans les prochains paragraphes.

IV.1.1 Définition :

Un modèle climatique est un logiciel très complexe, dont le but est de reproduire aussi fidèlement que possible le comportement du climat terrestre. Ce sont des programmes informatiques complexes qui calculent l'état du système (climatique) à chaque instant en se basant sur les lois de la physique, telles que la conservation de la masse, de l'énergie, et de la quantité de mouvement. La théorie de la mécanique des fluides qui représente de manière réaliste les écoulements complexes s'applique aussi bien à cette modélisation.

Les lois régissant l'écoulement atmosphérique sont très complexes et nécessitent beaucoup de temps de calculs pour leur résolution. Car il faut bien choisir les conditions aux limites, les schémas d'intégration, les coordonnées, la discrétisation des équations et faire des simplifications et d'hypothèses afin de les faciliter.

Lois physiques régissant l'écoulement

- Conservation de la masse

$$D\rho/Dt + \rho \operatorname{div}\underline{U} = 0$$

- Bilan d'énergie interne

$$De/Dt - (p/\rho^2) D\rho/Dt = Q$$

- Bilan de quantité de mouvement

$$D\underline{U}/Dt + (1/\rho) \operatorname{grad}p - \underline{g} + 2 \underline{\Omega} \wedge \underline{U} = \underline{F}$$

- Equation d'état thermodynamique

$$f(p, \rho, e) = 0 \quad (p/\rho = rT, e = C_v T \text{ pour un gaz parfait})$$

- Bilan de masse pour les composants secondaires (eau pour l'atmosphère, sel pour l'océan, ...)

$$Dq/Dt + q \operatorname{div}\underline{U} = S$$

Où ρ représente la masse volumique du fluide, e représente l'énergie interne, p la pression atmosphérique et q , la chaleur échangé.

IV.1.2 Types de modèles climatiques :

Il existe deux types de modèles climatiques ; le premier est les MCG (Modèle Climatiques Globaux) avec une résolution spatiale et horizontale de 300 Km qui simulent la dynamique des climats de la planète. Le deuxième est le MCR (Modèle Climatique Régionale) avec une résolution horizontale beaucoup plus fine que les MCG de 50 Km. Ces modèles sont basés sur les mêmes équations physiques, mais ils diffèrent peu dans les contenus. Ils ont été élaborés par des équipes pluridisciplinaires.

IV.2 Principe des modèles climatiques :

Le principe consiste à faire un maillage de la planète, c'est à dire recouvrir le globe terrestre d'un filet imaginaire dont la maille mesure de l'ordre de quelques centaines de km de côté (cela dépend des modèles et de l'époque), car on ne peut pas décrire ce qui se passe absolument partout, pour enfin étudier ou modéliser chaque maile et comprendre son fonctionnement et si possible, son évolution future.

- À chaque "nœud" de ce maillage en trois dimensions, on fixe les conditions de départ en indiquant les valeurs initiales des différents paramètres avec lesquels l'ordinateur va travailler puis on fait "tourner le modèle", c'est à dire que l'ordinateur se lance et calcule, sur la base des règles qui lui ont été fournies et des valeurs initiales.

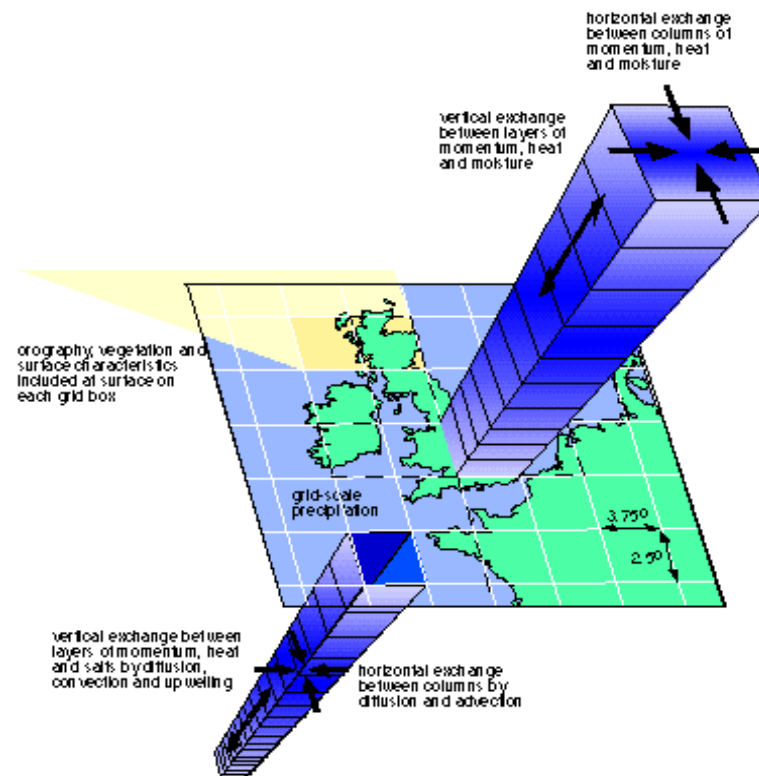


Figure IV.1. Principe d'un modèle climatique.

IV.3 Evolution (maillage) des modèles climatiques globaux au cours du temps :

Avant le premier rapport d'évaluation du GIEC (FAR pour First Assessment Report), c'est-à-dire dans la décennie 1980, la taille de la maille était typiquement de 500 km de côté. A cette époque, la France par exemple ne comptait que pour 4 mailles dans un modèle ! C'était l'ordre de grandeur dans tous les modèles globaux. Les modèles régionaux quant à eux 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 pour Second Assessment Report ; 1995) la taille de la maille avait été divisée par 2, et 10 ans plus tard (au moment de l'AR4, pour 4th

Assessment Report, publié en 2007) elle a encore été divisée par 2 par rapport à la décennie 1980.

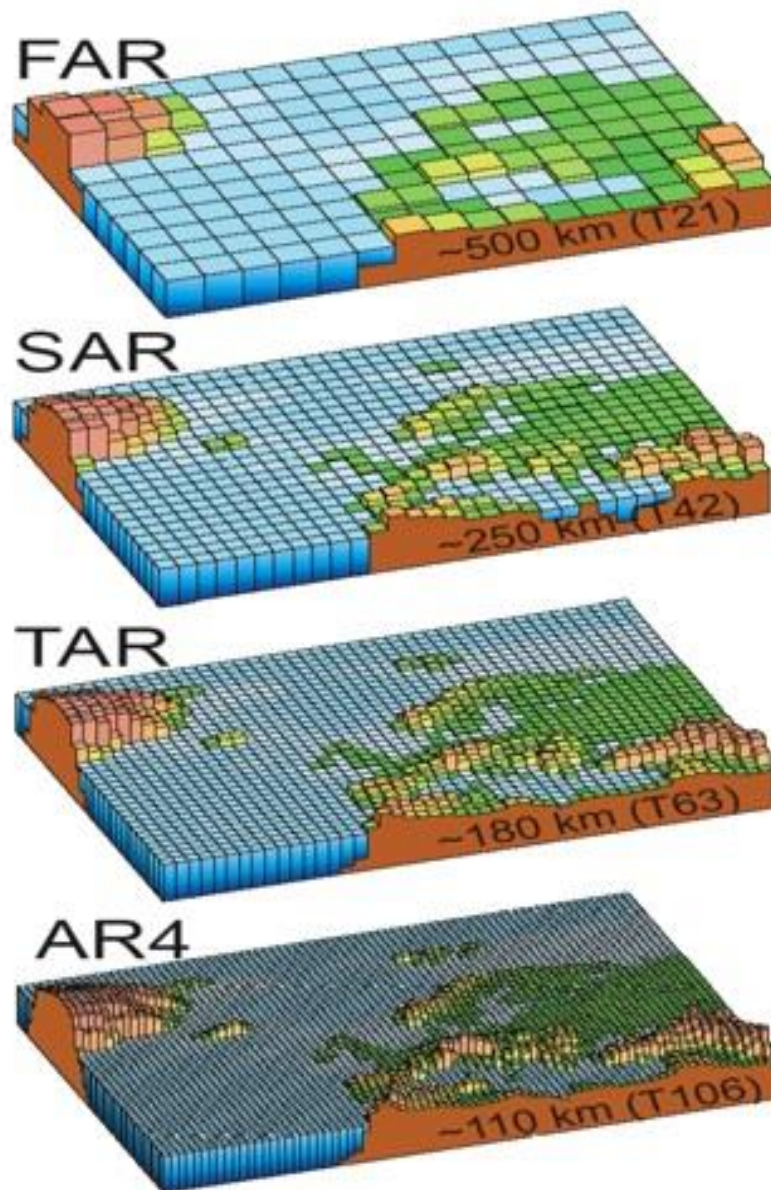


Figure IV.2. L'évolution des modèles climatiques globaux dans le temps.

IV.4 Hiérarchie des modèles climatiques :

Il existe deux grandes familles de modèles climatiques :

- *Les modèles climatiques simples* qui produisent généralement des données moyennées à l'échelle des zones ou du globe, concernant uniquement les températures et les variations de température, et non d'autres variables comme les précipitations. Ils ne

peuvent simuler les modifications possibles de la variabilité climatique car les résultats ne comprennent que le signal du changement climatique.

- *Modèles climatiques complexes* simulent les variations géographiques passées et présentes de la température ainsi que d'autres variables climatiques comme les précipitations, l'évaporation, l'humidité du sol, la nébulosité et les vents; fournissent des données crédibles à l'échelle continentale sur l'évolution d'au moins quelques-unes de ces variables. Peuvent simuler les changements dans d'importants modes de la variabilité interannuelle (p. ex. *El Niño*) et dans les Moyennes.

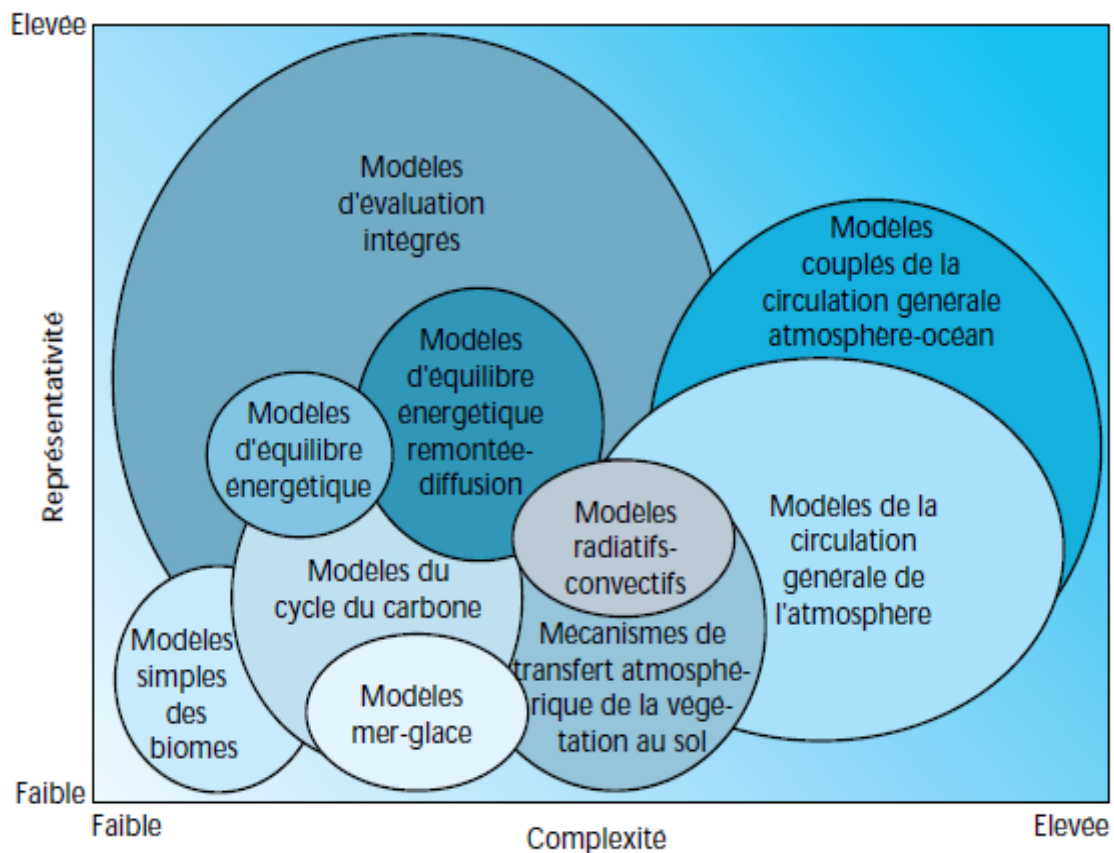


Figure IV.3. Comparaison de différents modèles climatiques et de leurs composantes du point de vue de la représentativité (axe vertical) et de la complexité (axe horizontal).

IV.5 Evolution du degré de complexité des modèles depuis leurs débuts :

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.

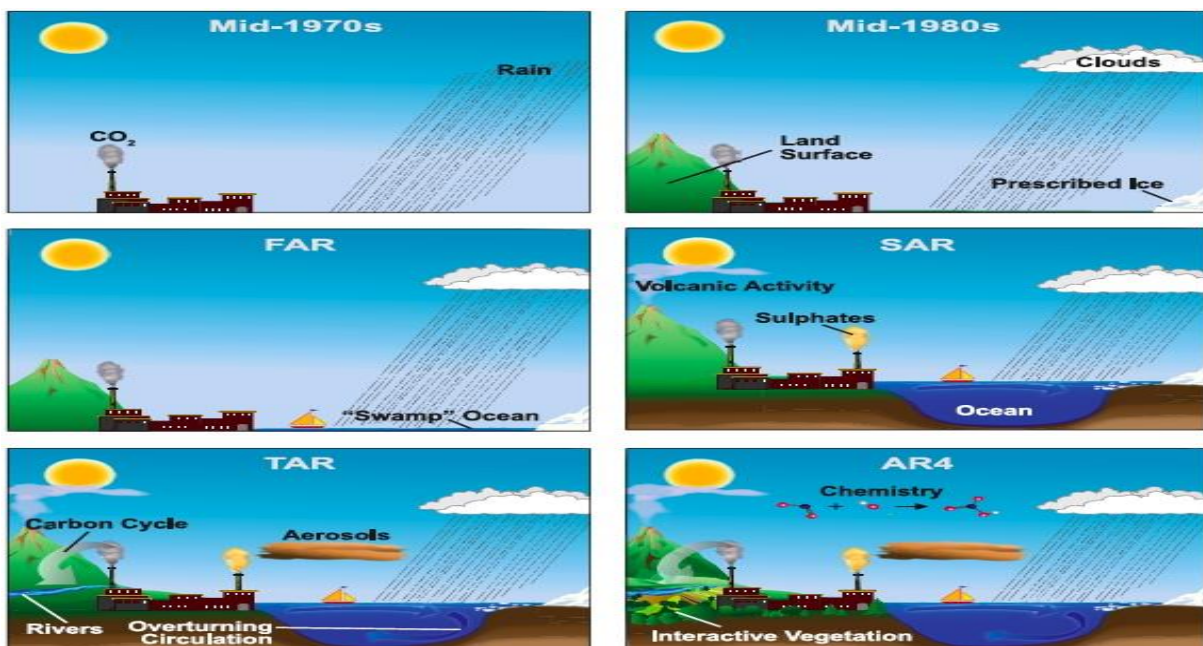


Figure IV.4. Évolution du degré de complexité des modèles climatiques depuis 1970.

IV.6 Caractéristiques des modèles :

Ce qui distingue principalement les modèles simples des modèles complexes est le degré de simplification, ou niveau d'introduction de la paramétrisation.

On s'est servi de modèles simples reliés pour obtenir des projections des concentrations, des changements climatiques et de l'élévation du niveau de la mer, à partir des émissions de groupes de gaz.

Les caractéristiques communes essentielles des modèles utilisés pour la prévision climatique sont l'aptitude à calculer la réponse de la température en surface au forçage radiatif et la capacité de rendre compte de l'effet déterminant des océans sur la vitesse du changement climatique.

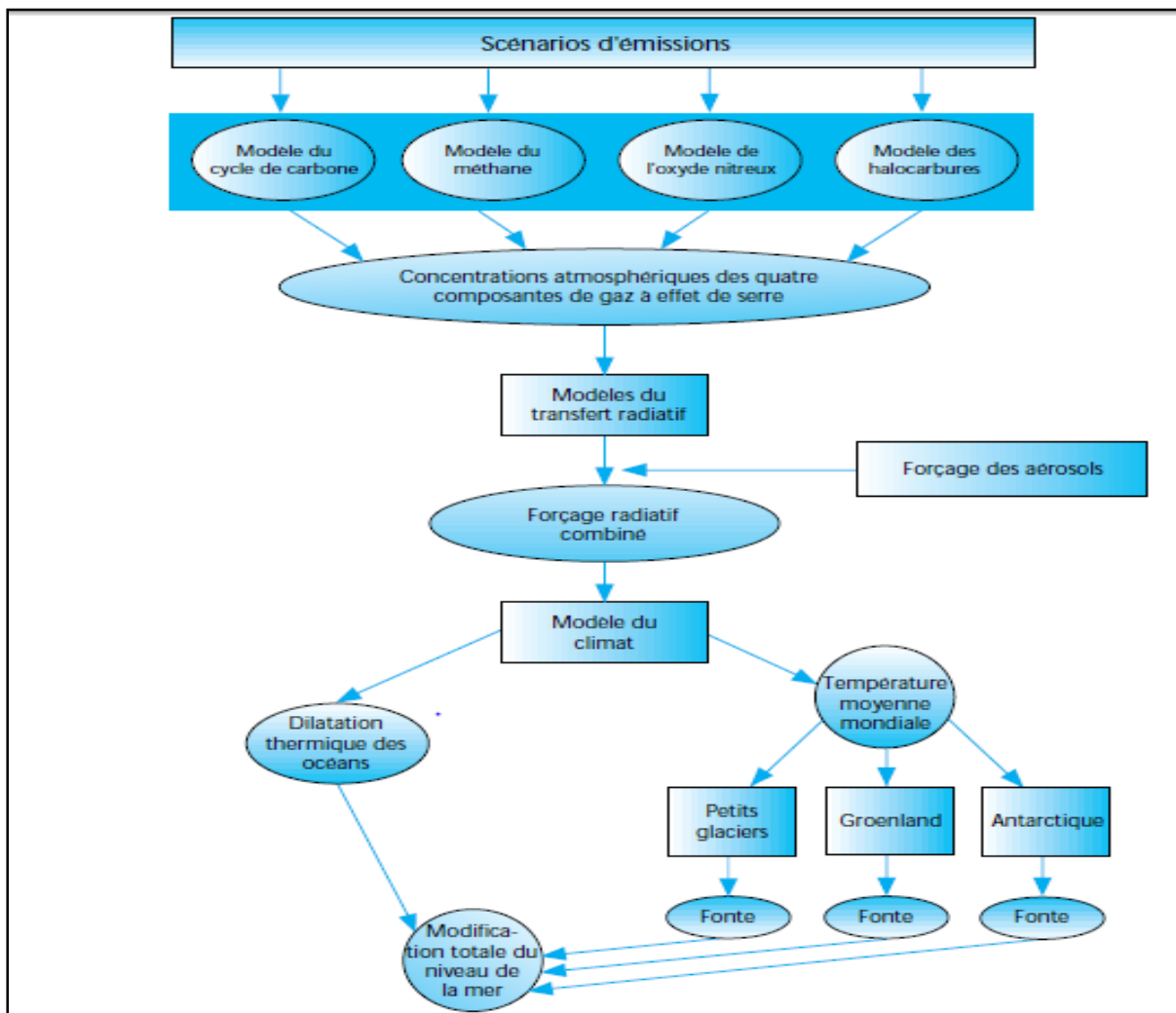


Figure IV.5. Etapes de l'évaluation intégrée des modifications des concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols, du changement climatique et de l'élévation du niveau de la mer, à l'aide de modèles climat simples.

IV.7 Les différents scénarios utilisés par les modèles climatiques :

Généralement, les scénarios sont obtenus à partir de projections qui sont souvent fondés sur des informations complémentaires provenant d'autres sources ; quatre genres de scénarios sont communément utilisés dans l'étude du changement climatique : le scénario climatique, le scénario d'émissions, le scénario de forçage radiatif et le scénario du RSSE.

Pour répondre aux questions posées par le changement climatique et ses impacts, le GIEC utilise les modèles du système climatique et des études économiques et démographiques, qui composent un large éventail d'évolutions possibles du climat. Les simulations climatiques sont réalisées à partir de modèles numériques appelés Modèles de Circulations Générale (MCG). Pour simuler au mieux l'évolution du climat, de nombreux forçages doivent être pris en compte, qu'ils soient naturels (éruptions volcaniques, activité solaire, ...) ou anthropiques (émissions de gaz à effet de serre, aérosols,...). Si pour le climat passé récent l'ensemble des forçages peuvent être déterminés à partir d'observations, pour les simulations du climat futur, seul les forçages anthropiques sont déterminés au travers de scénarios d'émissions.

Jusqu'au 4e rapport d'évaluation du GIEC, les projections climatiques étaient fondées sur les scénarios **SRES**, proposant plusieurs évolutions socio-économiques (A1, A2, B1, B2, A1B, ...).

Ces scénarios socio-économiques consistent à faire diverses hypothèses sur le développement économique futur et ses conséquences sur l'environnement. Ils sont fournis par des modèles d'évaluation intégrée qui prennent en compte l'évolution de la population, l'économie, le développement industriel et agricole, ainsi que la chimie atmosphérique et le changement climatique. Ces modèles d'évaluation intégrée fournissent des scénarios d'évolution des gaz à effet de serre et des aérosols, qui sont introduits comme forçage dans les simulations climatiques.

Cependant, ces scénarios ne prennent pas en compte l'effet des nouvelles politiques climatiques sur la réduction d'émission de gaz, et le contexte socio-économique mondial a évolué depuis la mise en place des scénarios SRES à la fin des années 1990.

Pour le 5e rapport d'évaluation, la communauté scientifique a défini un ensemble de quatre nouveaux scénarios appelés profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP). A la différence des scénarios SRES utilisés dans le précédent rapport, et qui ont été élaborés via une démarche « séquentielle », les nouveaux **scénarios RCP** ont été créés avec une démarche

parallèle qui débute par la détermination *a priori* de profils représentatifs d'évolution de concentration de gaz à effet de serre et de niveaux de **forçage radiatif**.

IV.7.1 Les scénarios « SRES » (*Special Report on Emissions Scenarios*) :

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été créé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) pour évaluer les fondements scientifiques du changement climatique. Le GIEC est aussi chargé d'estimer les risques et les conséquences du changement climatique, d'envisager des stratégies d'adaptation aux impacts et d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre.

L'une des principales activités du GIEC consiste à procéder, à intervalles réguliers (1990, 1995, 2001, 2007, 2014) à une évaluation de l'état des connaissances.

Lors du 4^e rapport d'évaluation publié en 2007, la stratégie suivie était séquentielle. Le point de départ était une synthèse des travaux de modélisation économique qui conduisit à définir un ensemble de scénarios d'évolution possible de nos sociétés et modes de vie, prenant en compte des choix en matière d'énergie et de rapports à la mondialisation. Ces scénarios, appelés SRES (du nom du rapport spécial publié en 2000 pour les présenter, *Special Report on Emissions Scenarios*) proposaient plusieurs évolutions (A1, A2, B1, B2, A1B, etc.) se traduisant ensuite en termes d'émission de gaz à effet de serre. Ces évolutions d'émissions de GES étaient alors utilisées par les climatologues comme **données d'entrée** des modèles de projections climatiques. Enfin, les projections climatiques alimentent les modèles d'impact.

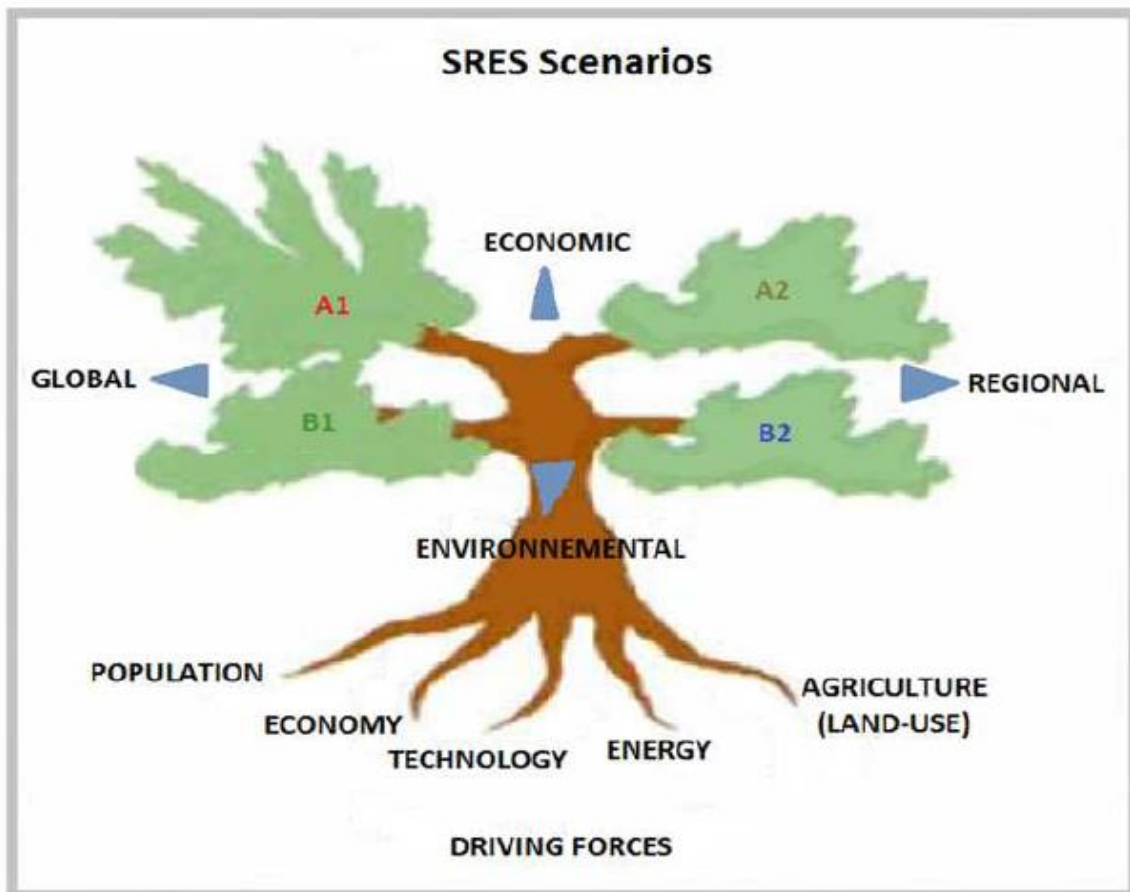


Figure IV.6. Scénarios d'émissions utilisés pour les projections climatiques La première série de scénarios sont regroupés sous l'appellation "scénarios A1". Ces scénarios reposent sur l'hypothèse d'une croissance économique rapide de l'économie mondiale associée à une croissance de la population mondiale jusqu'au milieu du 21^e siècle, suivie d'une légère baisse de celle-ci et de l'introduction rapide de nouvelles technologies énergétiques efficaces. Les économies régionales se développent fortement et la prospérité est répartie équitablement.

A1. Le canevas et la famille de scénarios A1 décrivent 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 principaux thèmes sous-jacents sont la convergence entre régions, le renforcement des capacités et des interactions culturelles et sociales accrues, avec une réduction substantielle des différences régionales dans le revenu par habitant. La famille de scénarios A1 se scinde en trois groupes qui décrivent des directions possibles de l'évolution technologique dans le système énergétique.

Les scénarios **A1** se subdivisent en trois groupes :

- en **A1F1**, le monde continue principalement de fonctionner avec les combustibles fossiles,
- en **A1T** avec des combustibles non fossiles,
- en **A1B** avec un mélange des deux.

A2. Le canevas et la famille de scénarios A2 décrivent un monde très hétérogène. Le thème sous-jacent est l'autosuffisance et la préservation des identités locales. Les schémas de fécondité entre régions convergent très lentement, avec pour résultat un accroissement continu de la population mondiale. Le développement économique a une orientation principalement régionale, et la croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont plus fragmentées et plus lentes que dans les autres canevas.

B1. Le canevas et la famille de scénarios B1 décrivent un monde convergent avec la même population mondiale culminant au milieu du siècle et déclinant ensuite, comme dans le canevas A1, mais avec des changements rapides dans les structures économiques vers une économie de services et d'information, avec des réductions dans l'intensité des matériaux et l'introduction de technologies propres et utilisant les ressources de manière efficiente. L'accent est placé sur des solutions mondiales orientées vers une viabilité économique, sociale et environnementale, y compris une meilleure équité, mais sans initiatives supplémentaires pour gérer le climat.

B2. Le canevas et la famille de scénarios B2 décrivent un monde où l'accent est placé 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 canevas et les familles de 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.

Un scénario d'illustration a été choisi pour chacun des six groupes de scénarios A1B, A1FI, A1T, A2, B1 et B2. Tous sont également fiables.

Scénarios	A1	A2	B1	B2
Croissance démographique	Lente avec maximum au milieu du XXI ^e siècle	Lente et continue	Lente avec maximum au milieu du XXI ^e	Plus lente que les scénarios A2 mais continue
Croissance économique	Très rapide	La plus hétérogène et plus faible de tous les scénarios	Rapide	Modérée
Evolution technologique	Introduction rapide de nouvelles technologies avec solutions alternatives	La plus hétérogène et plus faible de tous les scénarios	Rapide avec introduction de technologies « propres »	Modérée, solutions locales ou régionales

Tableau VI.1. Principales caractéristiques des quatre grandes familles de scénarios SRES.

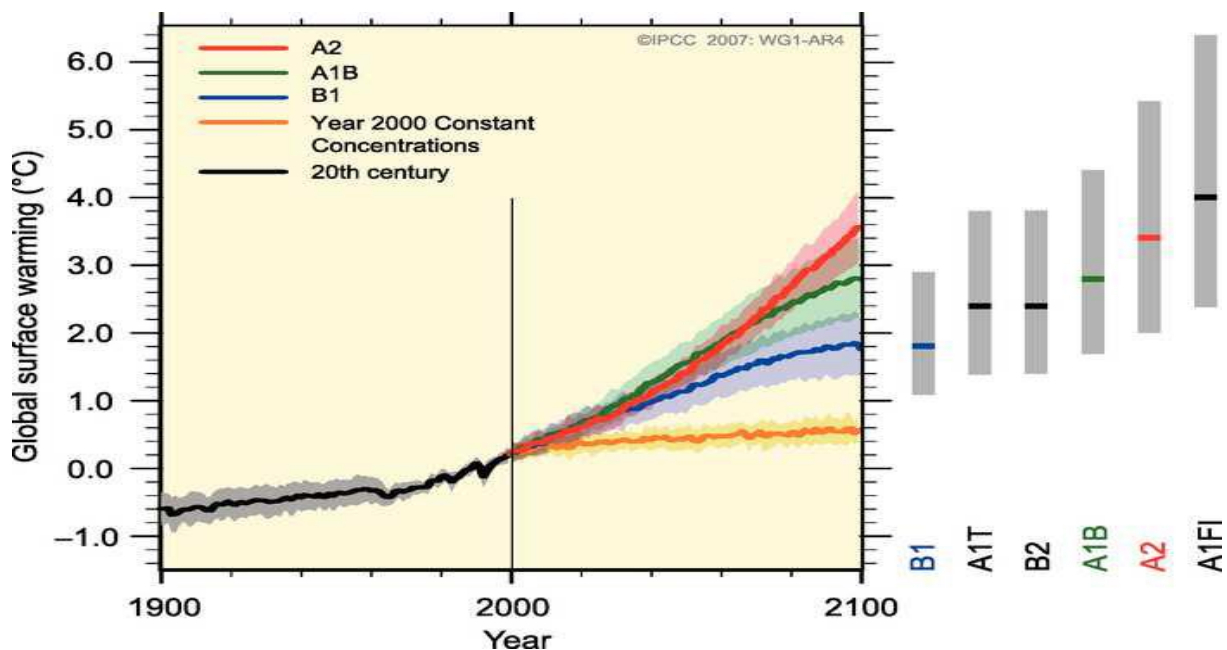


Figure IV.7. Projections des émissions des gaz à effet de serre et de la température de la Terre jusqu'en 2100.

IV.7.2 Les scénarios « RCP » (Representative Concentration Pathway) :

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.

Les profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP : Representative concentration Pathway) sont des scénarios de référence de l'évolution du forçage radiatif sur la période 2006-2300.

Scénario	Forçage radiatif vers 2100 (W/m ²)	Concentration en CO ₂ éq-CO ₂ ⁵ vers 2100 (ppm)	Profil d'évolution
RCP 8.5	2,6	475	Pic puis déclin
RCP 6.0	4,5	630	Stabilisation avant 2100
RCP 4.5	6	800	Stabilisation après 2100
RCP 2.6	8,5	1313	Croissant (sans politique climatique)

Tableau IV.2. Caractéristiques principales des RCP (Moss et al, Nature 2010).

Le forçage radiatif, exprimé en W/m², est le changement du bilan radiatif (rayonnement descendant moins rayonnement montant) au sommet de la troposphère (10 à 16 km d'altitude), dû à un changement d'un des facteurs d'évolution du climat comme la concentration des gaz à effet de serre. La valeur pour 2011 est de 2,84 W/m².

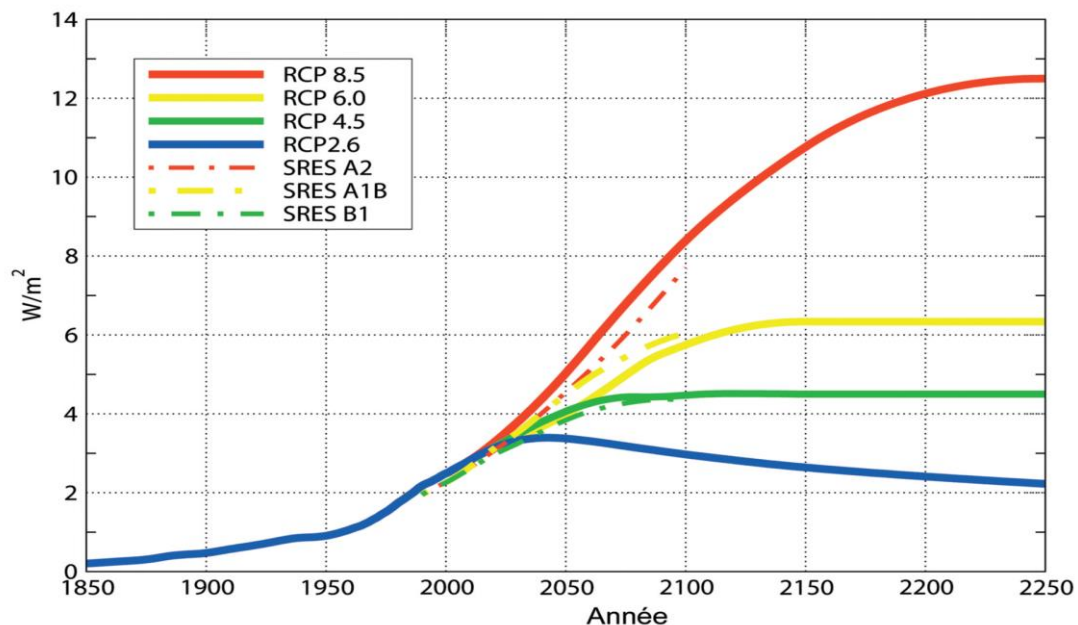


Figure IV.8. Les quatre RCP, évolution du forçage radiatif et comparaison avec les SRES (d'après S. Planton).

Une comparaison avec les anciens scénarios SRES (*Figure IV.8.*), montre que le RCP 8.5, scénario extrême, est un peu plus fort que l'ancien scénario SRES dénommé A2. Le RCP 6.0 est proche du scénario SRES A1B, tandis que le RCP 4.5 est proche du SRES B1. Le seul profil d'évolution sans équivalent avec les anciennes propositions du GIEC est le RCP 2.6 qui intègre les effets de politiques de réduction des émissions susceptibles de limiter le réchauffement planétaire à 2°C.

IV.8 Les incertitudes liées aux modèles climatiques :

Il existe quelques sources d'incertitudes des modèles climatiques qui sont les suivantes :

- Premièrement notre système atmosphérique n'est pas entièrement prévisible, du fait de la complexité et de l'instabilité de ces paramètres. C'est bien pour cela qu'il arrive que la météo, qui travaille avec les mêmes équations de la physique, même si leurs modèles sont essentiellement atmosphériques, se trompe, même si, statistiquement, elle a souvent raison.
- Deuxièmement, il y a d'inévitables simplifications à faire lorsque l'on construit un modèle climatique. Elles ne représenteront toujours qu'une partie du système (mais heureusement cela suffit à souligner l'existence de *risques importants*).

Parmi les éléments qui doivent être mieux pris en compte, on peut citer :

- *Les nuages* (car il s'agit d'éléments de petite taille relativement à la taille de la maille, et que l'on est obligé de paramétrer car leur échelle est trop petite).
- *Les puits et sources du carbone* océanique et continental, et notamment influence de la biosphère, avec une limite qui fait que la biosphère est toujours dépendante de conditions locales et que la modification de ces dernières est plus incertaine que la modification des conditions "globales".
- *L'évaporation continentale*, qui fait aussi intervenir des processus de petite échelle (c'est à dire de "petite taille" par rapport à la taille de la maille),
- *La circulation océanique* profonde (qu'il est difficile de mesurer, donc pour laquelle il est difficile de comparer les résultats du modèle avec la réalité),
- Le cycle du méthane (le gaz du "pourrissement"), et du protoxyde d'azote, où les sources naturelles ne sont pas quantifiées avec précision,

- La prise en compte de l'augmentation de *l'ozone troposphérique* (celui qui est près du sol), car cela dépend d'une chimie atmosphérique complexe,
- Le rôle des *aérosols* organiques ou minéraux (les poussières).

Mais il ne faudrait pas déduire du fait qu'il reste des zones d'ombres dont on peut ignorer les résultats, car ces modèles sont en perpétuelle évolution, et donc en perpétuelle amélioration.

En somme, on peut dire que les modèles climatiques restent incontestablement les meilleurs moyens pour la communauté scientifique du climat, de pouvoir modéliser et paramétrer le climat global et de prévoir son évolution à l'aide des scénarios climatiques que nous verrons dans le prochain chapitre. En plus, ils peuvent facilement permettre une comparaison "virtuelle" de deux évolutions du monde. Il est ainsi possible de spéculer sur ce qui se passe "si" les hommes émettent des gaz à effet de serre. Donc notre capacité à prévoir l'évolution du climat dans l'avenir dépend de la fiabilité des modèles climatiques. Leur validation ne peut guère se faire qu'en éprouvant leurs résultats à ce que l'on sait de l'évolution des climats dans le passé dont la bonne connaissance est essentielle. Même si l'on fait encore face à quelques incertitudes, les scientifiques du climat ne cessent d'améliorer ces instruments.

CHAPITRE V

PROJECTION CLIMATIQUE DES TEMPERATURES ET DES PRECIPITATIONS ANNUELLES EN ALGERIE, SELON AR4, EN UTILISANT LE LOGICIEL « MAGICC »

Chapitre V : Projection climatique des températures et précipitations en Algérie selon AR4	80
V.1 Définition du logiciel MAGICC	80
V.2 Description du logiciel MAGICC	83
V.3 Description de SCENGEN (SCENarioGENerator)	85
V.4 Comparaisons des modèles	86
V.5 Approche du travail et analyse des projections climatiques	86
V.5.1 Application	87
V.5.2 Utilisation du logiciel SCENGEN	93
V.6. Résultats et Commentaires	80

V.1 Définition du logiciel MAGICC (Modele for the Assesment of Greenhouse Gaz Induced Climate Change):

C'est un logiciel qui permet des estimations ou évaluations logiques des changements dans la température moyenne globale et le niveau moyen de la mer entre 1990 et 2100 résultants des scénarios des émissions anthropiques des GES(CO₂,CH₄,N₂O, les halocarbones et SO₂). Les projections de la température moyenne globale doivent être utilisées pour échelonner les résultats des MCGs afin de produire des scénarios régionaux ou globaux générés par un autre logiciel SCENGEN.

C'est un modèle intégré, construit à partir des modèles individuels dont les composantes sont paramétrées sous de simples modèles, cependant il reprend la physionomie des modèles plus complexes dans différents champs de recherche (modèles de formes réduits). Le modèle intégré est pour cette raison statistiquement très efficace et ne prend que quelques secondes pour tourner sur un PC.

V.2 Description du logiciel MAGICC :

MAGICC utilise un modèle qui est appelé « upwelling-diffusion » (Wigley et Raper, 1987) comme celui utilisé par l'IPCC90. Les modèles de l'élévation du niveau de la mer sont aussi mis à jour avec des versions des modèles utilisés par l'IPCC90. Les projections faites par l'IPCC90 ont été mis à jour par Wigley et Rapper(1992) incorporant de nouveaux résultats et de nouveaux scénarios d'émissions des GES produit par l'IPCC en 1992(Legget et All, 1992). Dans le but de réaliser ceci, il était nécessaire de développer des modèles de cycles de gaz qui ont été introduits dans MAGICC.

Le modèle du cycle de carbone (Wigley, 1993) est basé sur la circonvolution du modèle de l'océan (Maier, Reiner et Hasselmann, 1987) qui permet le bon fonctionnement de l'échange gazeux de l'atmosphère vers l'océan. La composante terrestre du modèle du cycle de carbone fait introduire la capacité de fixation de CO₂ par la végétation (les émissions passées dues à la déforestation sont particulièrement incertaines).

Le modèle de méthane (Osborne et Wigley, 1994) exprime la durée de vie atmosphérique de CH₄ comme fonction de sa concentration atmosphérique de ces gaz. Les effets des incertitudes des changements dans la durée de vie passée et/ou future du méthane, ainsi que la

contribution au forçage radiatif dû à l'oxydation du CH₄ par la vapeur d'eau stratosphérique ont été aussi introduits.

Le modèle de l'oxyde nitreux qui est un modèle de l'équilibre massique utilisant un facteur de conversion : concentration-masse, et une durée de vie constante.

Le modèle des halocarbones utilise 4 groupes : CFC11, HFC134a, les émissions sont fixes dans MAGICC.

Une gamme de valeurs de la contribution négative du forçage radiatif dû aux sulfates et aux aérosols doit être utilisée compte tenu des incertitudes dans ces facteurs. A cause de la courte durée de vie des aérosols, leur forçage radiatif est exprimé comme fonction d'émission de SO₂.

Pour tous les gaz, excepté le SO₂, les concentrations atmosphériques résultantes du modèle de cycle de gaz sont converties en forçage radiatif utilisant les résultats du modèle de transferts radiatif (Shine et All 1990).

Le forçage radiatif total commande le modèle énergétique de la balance climatique du phénomène upwelling. Ce modèle calcule la moyenne du profil vertical de l'échange thermique océanique pour chaque hémisphère (40 niveaux de la surface à 400 m de profondeur) entre 1765 et 2100. Il ya 4 paramètres qui déterminent la vitesse à laquelle la chaleur est transférée depuis le fond de l'océan jusqu'à la surface.

Cependant l'unique paramètre important qui détermine la température et le niveau de la mer à venir est la sensibilité climatique. Elle peut être définie comme étant l'équilibre thermique en surface résultant d'un doublement de CO₂ atmosphérique (ΔT_{2x}). Le rapport de l'IPCC donne une meilleure estimation de (ΔT_{2x} de 2,5 avec une marge de 1,5 à 4,5°C).

Un des facteurs qui contribue à l'élévation future du niveau de la mer est l'expansion thermique de l'océan. Cette expansion est calculée à partir du changement du profil vertical de la température océanique obtenue à partir des modèles climatiques. Comme avec la température de surface, les résultats dépendent des paramètres utilisés dans le modèle climatiques.

La contribution à l'élévation du niveau de la mer par la fonte des glaciers est aussi considérée. La Groenland, l'antarctique et autre petit glacier sont traités séparément. Les modèles de la

fonte du Groenland et de l'antarctique sont exprimés simplement comme la sensibilité du changement de la température. Dans le cas de ce modèle, la proportion fondue est déterminée à la fois par le paramètre de la sensibilité de la température et par le temps de réponse des glaciers.

Pour exprimer la grande gamme d'incertitudes en ce qui concerne la projection du niveau de la mer due à la grande, moyenne et petite fusion de la glace, les paramètres mis en jeux sont tournés dans le modèle avec les différentes projections de température (ΔT_{2v}) respectivement.

MAGICC est continuellement mis à jour. Les changements dans les modèles du cycle de carbone sont ajoutés petit à petit. Ce qui pourrait affecter les projections relatives à la température et au niveau de la mer. Par exemple pour le scénario de référence IS92a, la meilleure estimation des concentrations atmosphériques en CO₂ pour l'an 2100 est révisée entre 740 et 680 ppmv. Les résultats primaires indiquent qu'il y aura une baisse pour une meilleure estimation correspondante à la projection de la température à partir de 2,5 à 2,1°C.

MAGICC exécute 4 modèles complets simulés entre 1765 et 2100. Pour expliquer ceci, on considère deux types de questions ; la première, si on veut évaluer les effets d'un scénario de politique particulier sur le climat, on doit comparer le scénario de politique avec le fond d'un scénario de référence. Pour les paramètres du modèles du climat et ceux du niveau de la mer, il est suffisant d'utiliser seulement la série des valeurs de la meilleur estimation(best-guess) en choisissant les options de paramètres du modèle par défaut (default).les deux séries de résultats sont indiquées par les extensions : PD et RD.

Alternativement, un scientifique s'intéresse à l'examen de la sensibilité des différents modèles utilisés par MAGICC et la superposition des paramètres d'autres modèles. Dans ce cas il doit choisir le même scénario d'émission pour celui de politique et celui de référence, et après, il choisit la séries des paramètres spécifiés (user-values) qui différent des valeurs par défaut (default values).Si R est utilisé pour le seul scénario, alors les résultats sont indiqués par RU et RD, où RD est le même comme dans le premier exemple. En général, on peut combiner les deux types de résultats et produire 4 séries de données de sortie (output) : PD, RD, PU et RU.

En plus de la possibilité de faire tourner ces 4 cas, MAGICC estime une gamme d'incertitudes due à celles des paramètres du modèle. Pour faire ceci, on calcule 4 séries d'opération pour chaque concentration de CO₂, et 4 pour le CH₄ (entre 1990 et 2100) correspondant aux séries

de paramètres « low », « default ou best-guess), « user » et « high ». pour les concentrations des gaz, il ya par conséquent deux séries primaires de données de modèles produites pour chaque scénario d'émission, correspondant aux paramètres « user »(RU et PU), et au paramètres « default » (RD et PD).

V.3 Description de SCENGEN (SCENarioGENerator) :

C'est un logiciel climatique couplé avec le logiciel MAGICC afin de visualiser géographiquement les résultats des scénarios simulés par ce dernier.

Il a pour objectif de construire un ensemble de scénarios futurs de changement climatiques géographiquement explicite à partir d'expérience de MCG et de modèles climatiques simples combinés avec des climatologies régionales et globales. On utilise des hypothèses de base en choisissant des paramètres du système climatiques et des scénarios d'émissions.

C'est aussi un couplage de plusieurs modèles climatiques globaux de différents pays (voir tableau suivant). Mais pour notre application on ne choisira que les deux modèles climatiques française (ISPL-CM4 et CNRM-CM3) que nous allons exécuter pour simuler.

CMIP3 designator	Country	SCENGEN name
BCCR-BCM2.0	Norway	BCCRBCM2
CCSM3	USA	CCSM—30
CGCM3.1(T47)	Canada	CCCMA-31
CNRM-CM3	France	CNRM-CM3
CSIRO-Mk3.0	Australia	CSIRO-30
ECHAM5/MPI-OM	Germany	MPIECH-5
ECHO-G	Germany/Korea	ECHO---G
FGOALS-g1.0	China	FGOALS1G
GFDL-CM2.0	USA	GFDLCM20
GFDL-CM2.1	USA	GFDLCM21
GISS-EH	USA	GISS—EH
GISS-ER	USA	GISS—ER
INM-CM3.0	Russia	INMCM-30
IPSL-CM4	France	IPSL CM4
MIROC3.2(hires)	Japan	MIROC-HI
MIROC3.2(medres)	Japan	MIROC-MED
MRI-CGCM2.3.2	Japan	MRI-232A
PCM	USA	NCARPCM1
UKMO-HadCM3	UK	UKHADCM3
UKMO-HadGEM1	UK	UKHADGEM
BCC-CM1	China	
CGCM3.1(T63)	Canada	
GISS-AOM	USA	
INGV-SXG	Italy	

Tableau V.1. Les modèles climatiques de SCENGEN

La structure du logiciel MAGICC/SCENGEN est représentée sur l'organigramme ci-dessous (fig.5.1). Pour MAGICC, on a d'abord la bibliothèque des scénarios d'émissions, ensuite le choix des paramètres du modèle qui seront utilisés dans le modèle du cycle de gaz. Après on vérifie la composition atmosphérique (sensibilité climatique, diffusion vertical,...). Enfin on visualise le résultat de la variable choisie (température moyenne ou niveau de mer).

Pour le logiciel SCENGEN, on régionalise l'algorithme en choisissant la zone d'étude (globe, continent, région,...). Ensuite on introduit les banques de données de modèle couplé AOGCM (modèle de circulation générale couplé de l'atmosphère et de l'océan) ainsi que la banque des données d'observation. On fait alors le choix des paramètres, variables et régions considérées. Enfin on visualise les sorties modèles des variables et paramètres choisis.

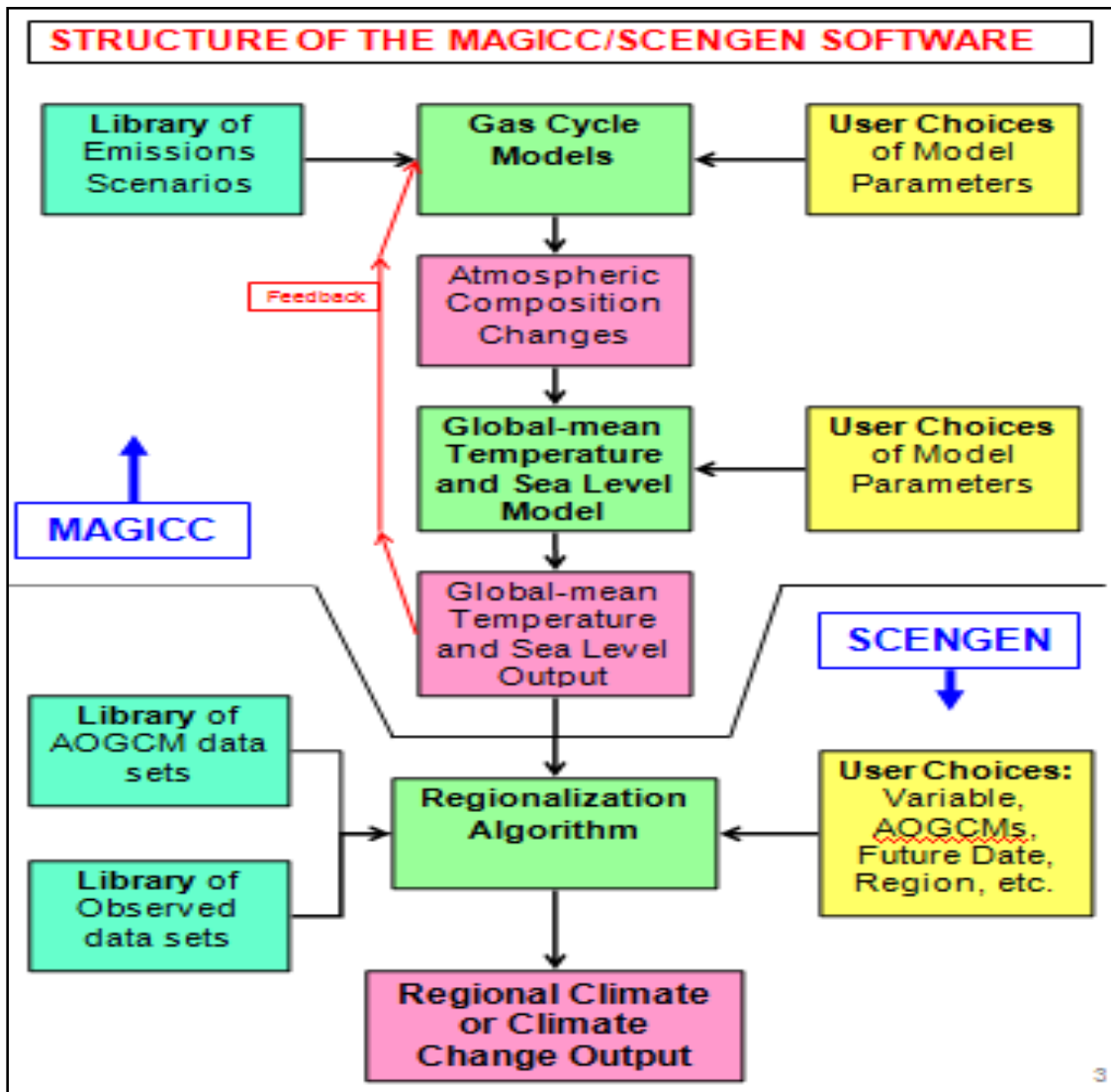


Figure V.1. Organigramme du logiciel MAGICC et SCENGEN.

V.4 Comparaisons des modèles :

Dans cette partie, nous ne choisisons que deux de ces modèles, le plus proche possible pour vérifier leur résultat. En ce qui concerne les modèles français, CNRM-CM3 et IPSL-CM4, plusieurs études ont permis d'évaluer, par comparaison avec des observations, leur fiabilité pour simuler l'évolution climatique récente. Ainsi, pour le XXe siècle, les deux simulent des tendances de températures cohérentes avec les observations, aussi bien à l'échelle globale qu'à l'échelle de la France. Pour le climat futur, les deux modèles simulent une évolution des températures assez semblable. Pour les précipitations, en revanche, les divergences sont plus importantes, notamment sur leur intensité au-dessus des continents et sur la distribution géographique de leur évolution. Les caractéristiques générales de ces deux modèles sont représentées sur le Tableau V.2..

	CNRM-CM3	IPSL-CM4
Atmosphère	Arpège-Climat V4	LMZ-4
Référence	(Déqué et al., 1994)	(Hourdin et al., 2006)
Résolution horizontale (en degrés de latitude et longitude)	1,9°x1,9° (T63)	2,5°x3,75°
Nombre de niveaux verticaux	45	19
Surface-végétation	Isba	Orchidee
Référence	(Mahfouf et al., 1995)	(Krinner et al., 2005)
Résolution horizontale identique à celle de l'atmosphère		
Océan	OPA	Orca
Référence	(Madec et al., 1998)	(Madec et al., 1998)
Résolution horizontale (en degrés de latitude et longitude)	2°x2° (avec raffinement près de l'équateur)	2°x2° (avec raffinement près de l'équateur)
Nombre de niveaux verticaux	31	31
Glace de mer	Gelato	LIM
Référence	(Salas y Mélia, 2002)	(Fichefet et Maqueda, 1997)
Résolution horizontale identique à celle de l'océan		

Tableau V.2. *Caractéristiques générales des modèles climatiques CNRM-CM3 et IPSL-CM4.*

V.5 Approche du travail et analyse des projections climatiques :

V.5.1 Application :

- ✓ **Période de référence :** La période de référence **1961-1990** (climat « relativement » stable) a été privilégiée conformément aux recommandations de l'OMM.
- ✓ **Période future :** Les simulations AR4 couvrent **2050**. C'est donc cette période qui sera proposée pour les résultats.
- ✓ **Les simulations** fournies mobilisent un scénario d'émission de gaz à effet de serre moyen, c'est le scénario A1B.
- ✓ **Deux modèles climatiques Français :** - CNRM - CM3
- IPSL - CM4
- ✓ **Le logiciel utilisé :** Logiciel MAGICC (Modele for the Assesment of Greenhouse Gaz Induced Climate Change).

Dans cette partie, nous expliquerons d'abord les différentes étapes d'exécution de ce logiciel. Dans un premier temps, on va visualiser à l'aide de MAGICC les 4 scénarios principaux. Pour cela on a choisi comme scénario de référence le scénario B2 ; on va alors simuler les autres scénarios (dit de politique) en fonction de celui de référence. Les variables et paramètres choisis sont récapitulés sur le tableau suivant :

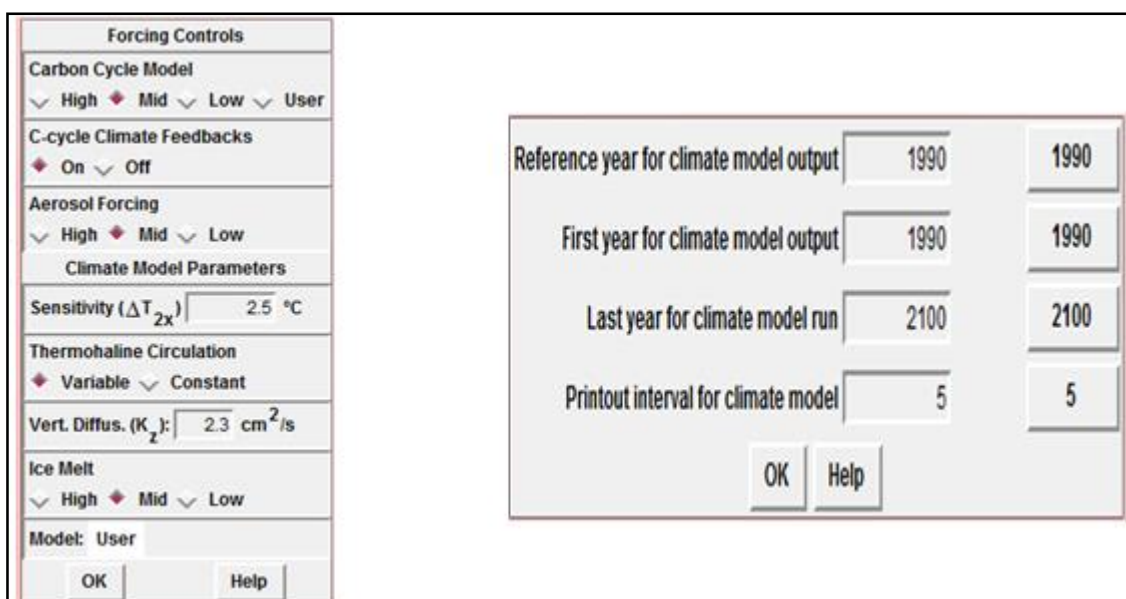


Tableau V.3. Variables et paramètres utilisés dans MAGICC

V.5.2 Utilisation du logiciel SCENGEN :

On a d'abord défini notre zone d'étude qui est la région méditerranéenne comprise entre le 25° Nord et 45 ° nord de latitude ; et de -10°Ouest à 32°Est de longitude.

Les zones sont divisées en 3 régions en fonction des types d'aérosols (figure V.2.)

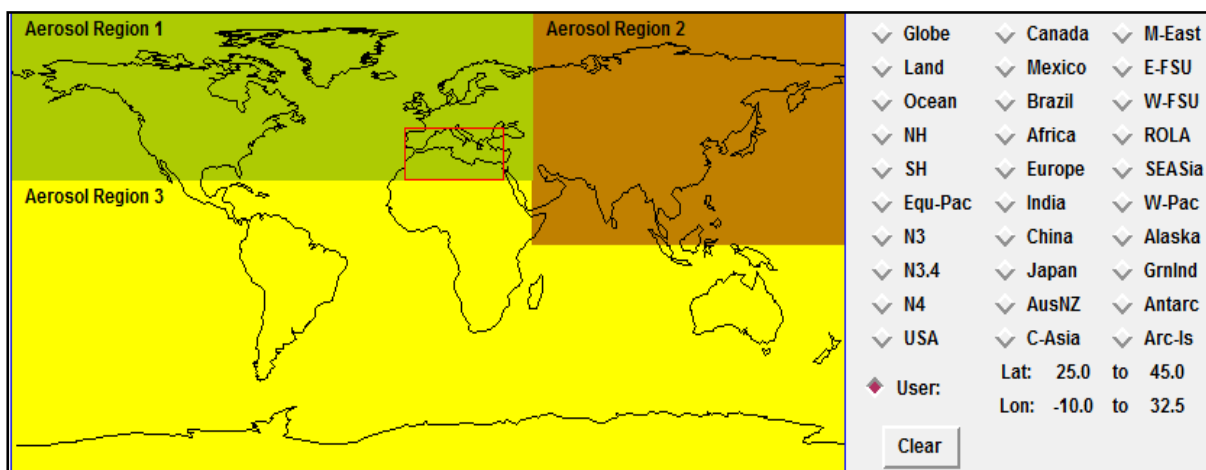


Figure V.2. Répartition des régions géographique par SCENGEN

On choisit alors les variables à visualiser (température moyenne annuelle, précipitation ou pression comme dans le prochain tableau. l'échelle est linéaire pour la température et exponentielle pour la précipitation (Tableau V.4.).

Observable	Contours
<input checked="" type="checkbox"/> Mean Temp	<input checked="" type="checkbox"/> Default
<input type="checkbox"/> Precipitation	<input type="checkbox"/> Min/Max
<input type="checkbox"/> Pressure	Palette
Scaling	<input type="button" value="rainbow"/>
<input checked="" type="checkbox"/> linear	<input type="checkbox"/> Reverse
<input type="checkbox"/> exponential	Season: Ann
<input type="checkbox"/> Smoothing	

Tableau V.4. Variables et échelle de SCENGEN.

Ensuite on rentre dans warning pour voir la variation de température ou de la variable choisie en fonction de l'année voulue et du scénario considéré.

Global-mean $\Delta T = 1.56$ deg C	
Scenario Year	
2050	
<input type="range" value="2050"/>	
2000	2050
2100	
Scenario	MAGICC Setup
<input checked="" type="checkbox"/> B2IMA (Ref.)	<input checked="" type="checkbox"/> Default
<input type="checkbox"/> A1IMA (Pol.)	<input type="checkbox"/> User

Tableau V.5. Variation de la température globale en fonction de l'année choisi et du scénario considéré.

Chapitre V : Projection climatique des températures et précipitations en Algérie, selon AR4, en utilisant le logiciel « MAGICC »

On a récapitulé les résultats de simulations pour tous les scénarios dans le tableau ci-dessous

période	modèle		Scénario A1		Scénario A2		Scénario B1		Scénario B2		Variable
			T°C	RR(%)	T°C	RR(%)	T°C	RR(%)	T°C	RR(%)	
1990-2050	CNRM	Avec aérosol	1.22	1.22	1.01	1.01	1.02	1.02	1.37	1.37	$\Delta T^{\circ}C$
			(-0.68 à 4.81)	(-48.1 à 49.4)	(-0.69 à 4.41)	(-53.1 à 43.5)	(-0.52 à 3.37)	(-35.8 à 29.7)	(-0.34 à 4.31)	(-54.0 à 40.4)	marge
		Sans aérosol	1.22	1.22	1.01	1.01	1.02	1.02	1.37	1.37	$\Delta T^{\circ}C$
			(-0.63 à 3.98)	(-40.2 à 35.5)	(-0.53 à 3.30)	(-34.7 à 28.7)	(-0.53 à 3.34)	(-35.0 à 29.1)	(-0.71 à 4.48)	(-47.2 à 38.9)	marge
	IPSL	Avec aérosol	1.22	1.22	1.01	1.01	1.02	1.02	1.37	1.37	$\Delta T^{\circ}C$
			(-0.94 à 7.56)	(-100 à 239.4)	(-0.93 à 6.92)	(-100 à 204.1)	(-0.39 à 5.34)	(-100 à 136.3)	(-0.64 à 6.42)	(-100 à 184.9)	marge
		Sans aérosol	1.22	1.22	1.01	1.01	1.02	1.02	1.37	1.37	$\Delta T^{\circ}C$
			(-0.44 à 7.56)	(-100 à 176.2)	(-0.36 à 5.24)	(-100 à 132.3)	(-0.37 à 5.30)	(-100 à 134.7)	(-0.49 à 7.12)	(-100 à 214.4)	marge

Tableau V.6. Évolution de la température moyenne annuelle et de la précipitation moyenne annuelle simulée entre 1990 à 2050 par les modèles CNRM et IPSL suivant les différents scénarios.

Ce tableau montre les différentes simulations effectuées sur notre zone d'études entre 1990 et 2050. Les résultats obtenus par les deux modèles français (CNRM et IPSL) sont quasiment les mêmes en ce qui concerne la variation de la température global (ΔT) pour un même scénario, avec ou sans prise en compte des aérosols et avec une même région (def1). Cependant on note un certain nombre de différences entre les plages d'évolution (intervalles globale) de la température moyenne annuelle. La précipitation moyenne annuelle montre des différences assez considérables entre le résultat des deux modèles.

Comme le scénario le plus adaptable à notre région est le scénario A1, on va faire un grand plan sur les résultats de ce scénario représentés sur le tableau récapitulatif suivant :

Région d'étude	longitude	latitude	période	modèle	Scénario A1			
					T°C	RR(%)	variable	
méditerranéenne	-10° W à 32° E	25° N et 45 °N	1990- 2050	CNRM	Avec aérosols	1.22	1.22	ΔT
						(-0.68 à 4.81)	(-48.1 à 49.4)	Interval global
					Sans aérosols	1.22	1.22	ΔT
						(-0.63 à 3.98)	(-40.2 à 35.5)	Interval global
				IPSL	Avec aérosols	1.22	1.22	ΔT
						(-0.94 à 7.56)	(-100 à 239.4)	Interval global
					Sans aérosols	1.22	1.22	ΔT
						(-0.44 à 7.56)	(-100 à 176.2)	interval

Tableau V.7. Récapitulatif des résultats du scénario A1 simulé sur la région d'étude considéré.

La visualisation de ces projections sur les cartes géographiques donne les résultats suivants :

➤ Températures :

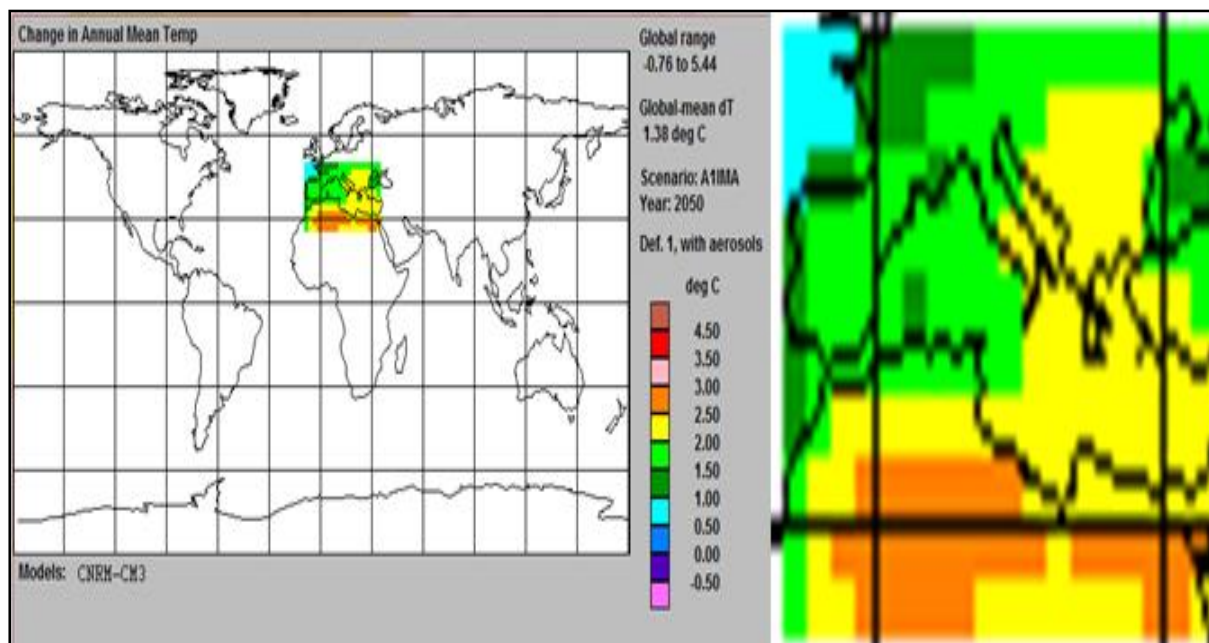


Figure V.3. Evolution de la température moyenne annuelle de surface de 1990 à 2050 simulé par le modèle CNRM-CM3 avec prise en compte des aérosols, en Algérie.

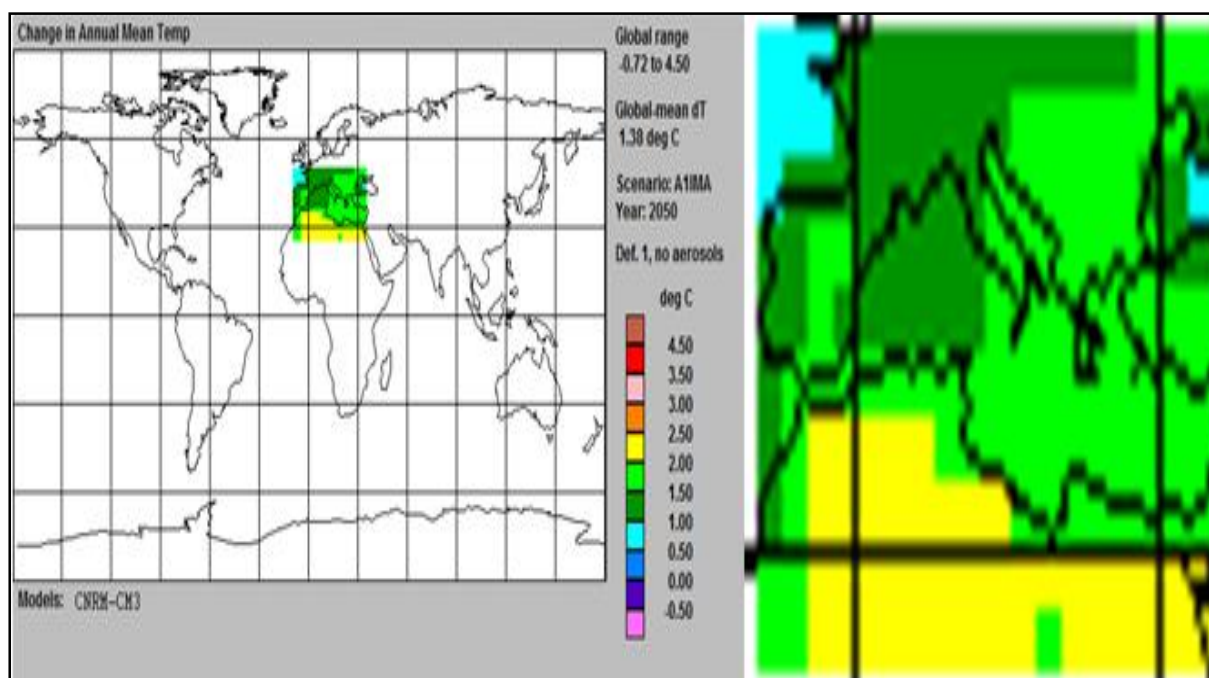


Figure V.4. Evolution de la température moyenne annuelle de surface de 1990 à 2050 simulé par le modèle CNRM-CM3 sans prise en compte des aérosols, en Algérie.

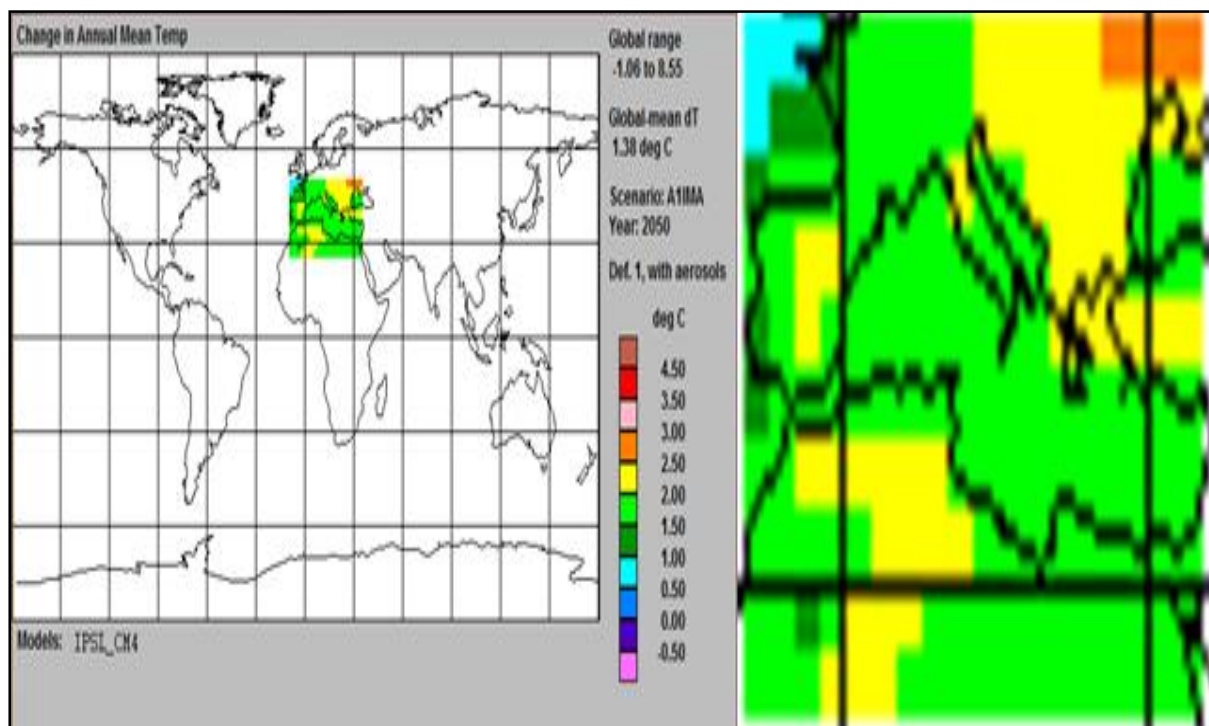


Figure V.5. Evolution de la température moyenne annuelle de 1990 à 2050 simulé par le modèle IPSL-CM4 avec prise en compte des aérosols, en Algérie.

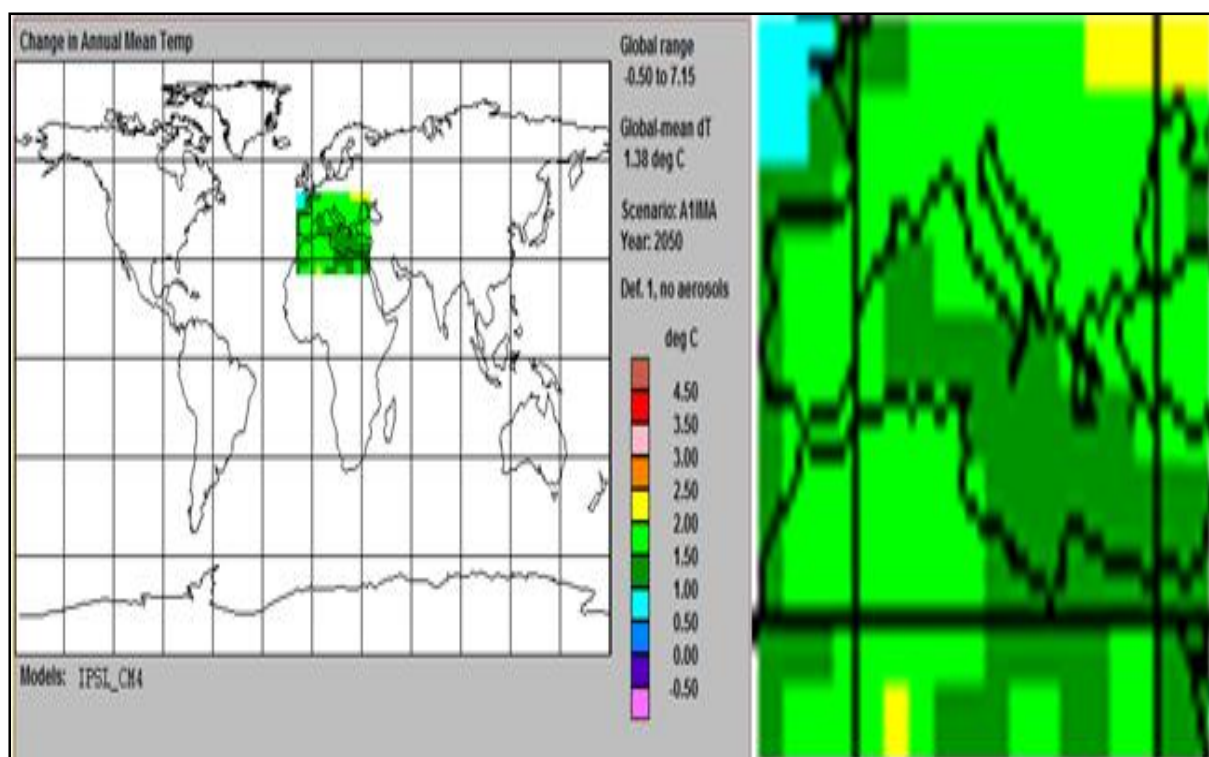


Figure V.6. Evolution de la température moyenne annuelle de 1990 à 2050 simulé par le modèle IPSL-CM4 sans prise en compte des aérosols, en Algérie.

➤ Précipitation :

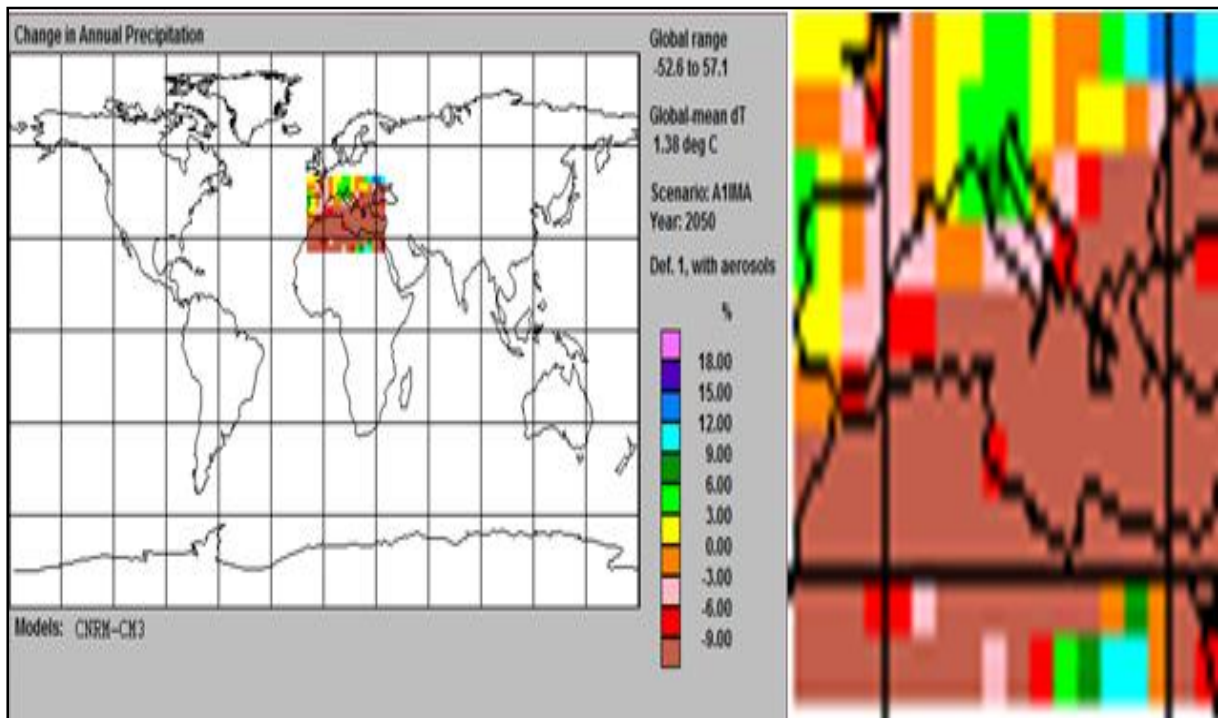


Figure V.7. Evolution de la précipitation moyenne annuelle de 1990 à 2050 simulé par le modèle CNRM-CM3 avec prise en compte des aérosols, en Algérie.

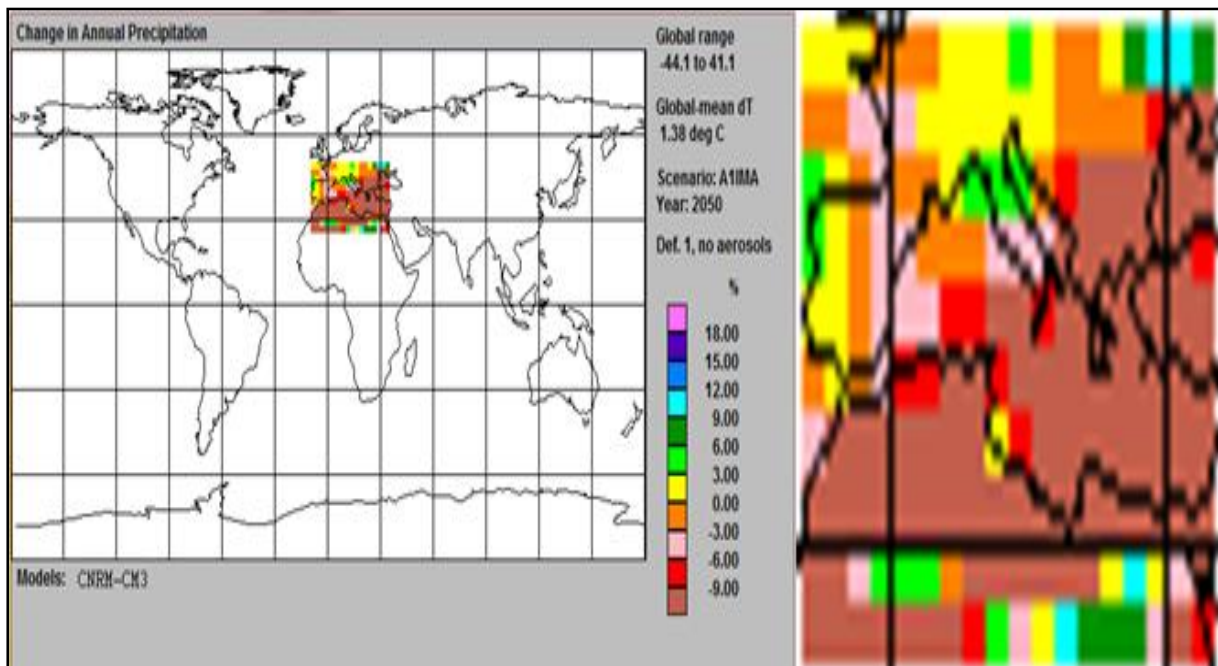


Figure V.8. Evolution de la précipitation moyenne annuelle de 1990 à 2050 simulé par le modèle CNRM-CM3 sans prise en compte des aérosols, en Algérie.

V.6. Résultats et Commentaires :

1. La température moyenne annuelle :

La température moyenne annuelle est calculé à partir la moyenne arithmétiques de température moyenne mensuelles, et celle-là était calculé à partir la moyenne des températures journalières.

- Evolution de la température moyenne annuelle de surface simulée par le modèle **CNRM - CM3** à l'horizon de **2050**, en Algérie :
 - Avec prise en compte des aérosols (voir la figure V.3.) montre que la température varie entre **1 à 3° C** avec une prédominance aux alentours de **2 à 2.5° C**.
 - Sans prise en compte des aérosols (voir la figure V.4.), la température varie entre **1 à 2°C** avec une prédominance de **1 à 1.5 C**.
- Evolution de la température moyenne annuelle de surface simulée par le modèle **IPSL - CM4** à l'horizon de **2050**, en Algérie :
 - Avec prise en compte des aérosols. La température varie entre **1 à 3°C**, avec des valeurs plus élevé sur les continents que sur la méditerranée.
 - Sans prise en compte des aérosols. La température varie entre **1 et 1.5°C** avec des températures plus basse sur la méditerranée que sur les continents.

2. Les précipitations :

La formation des précipitations fait intervenir de très nombreux processus, la plupart étant de toutes petites échelles. Leur modélisation dans les modèles climatiques planétaires nécessite de nombreuses approximations, et les précipitations demeures une des grandeurs que les modèles ont le plus de difficulté à simuler correctement. De façon très générale les pluies sont les plus abondantes dans les régions Sahariennes, le maximum des précipitions se trouve dans la région Nord du pays, notamment la partie Nord-Est.

- Evolution de la précipitation moyenne annuelle simulée par le modèle **CNRM - CM3** à l'horizon de **2050**, en Algérie, soit sans prise en compte des aérosols ou avec la prise en compte des aérosols diminuent entre **6 à 9 %** au Nord de l'Algérie, et entre **3 et 6 %** vers les hautes plateaux.

CHAPITRE VI

PROJECTION CLIMATIQUE DES TEMPERATURES ET DES PRECIPITATIONS ANNUELLES EN ALGERIE, SELON AR5, EN UTILISANT LE LOGICIEL « SimCLIM2013 »

Chapitre IV : Projection climatique des températures et des précipitations en Algérie, selon AR5, en utilisant le logiciel « SimCLIM2013».	94
VI.1 Définition du logiciel SimCLIM	95
VI.2 Principales caractéristiques de SimCLIM	96
VI.2.1 Unicité	96
VI.2.2 L'intégration	96
VI.2.3 Pistes multiples et les analyses de sensibilité	96
VI.2.4 Facilement de mis à jour	97
VI.2.5 Une partie du processus de prise de décision	97
VI.3 Comparaisons des modèles	99
VI.4 Approche du travail et analyse des projections climatiques	100
VI.4.1 Application	100
VI.4.2 Utilisation du logiciel SimCLIM2013	100
VI.5 Résultats et commentaires	133

VI.1 Définition du logiciel SimCLIM : C'est un système de modèle informatique pour examiner les effets de la variabilité et des changements climatiques dans le temps et l'espace. Sa caractéristique "open-cadre (open-framework)" permet aux utilisateurs de personnaliser le modèle pour leur propre zone géographique et la résolution spatiale et pour fixer les modèles d'impact.

Il est conçu pour soutenir la prise de décision et l'épreuve du climat dans un large éventail de situations où le climat et les changements climatiques posent un risque et d'incertitude. Un utilisateur personnalisée logiciel SimCLIM Open System-cadre a la capacité d'évaluer les climats de base et de la variabilité actuelle et extrême. Les risques peuvent être évalués à la fois actuellement et dans l'avenir. Les mesures d'adaptation peuvent être testées pour les conditions actuelles et selon des scénarios futurs de changement climatique et de la variabilité. Avec le programme, les utilisateurs peuvent effectuer des analyses de sensibilité et d'examiner les impacts sectoriels du changement climatique. SimCLIM appuie l'analyse d'impact intégrée à différentes échelles.

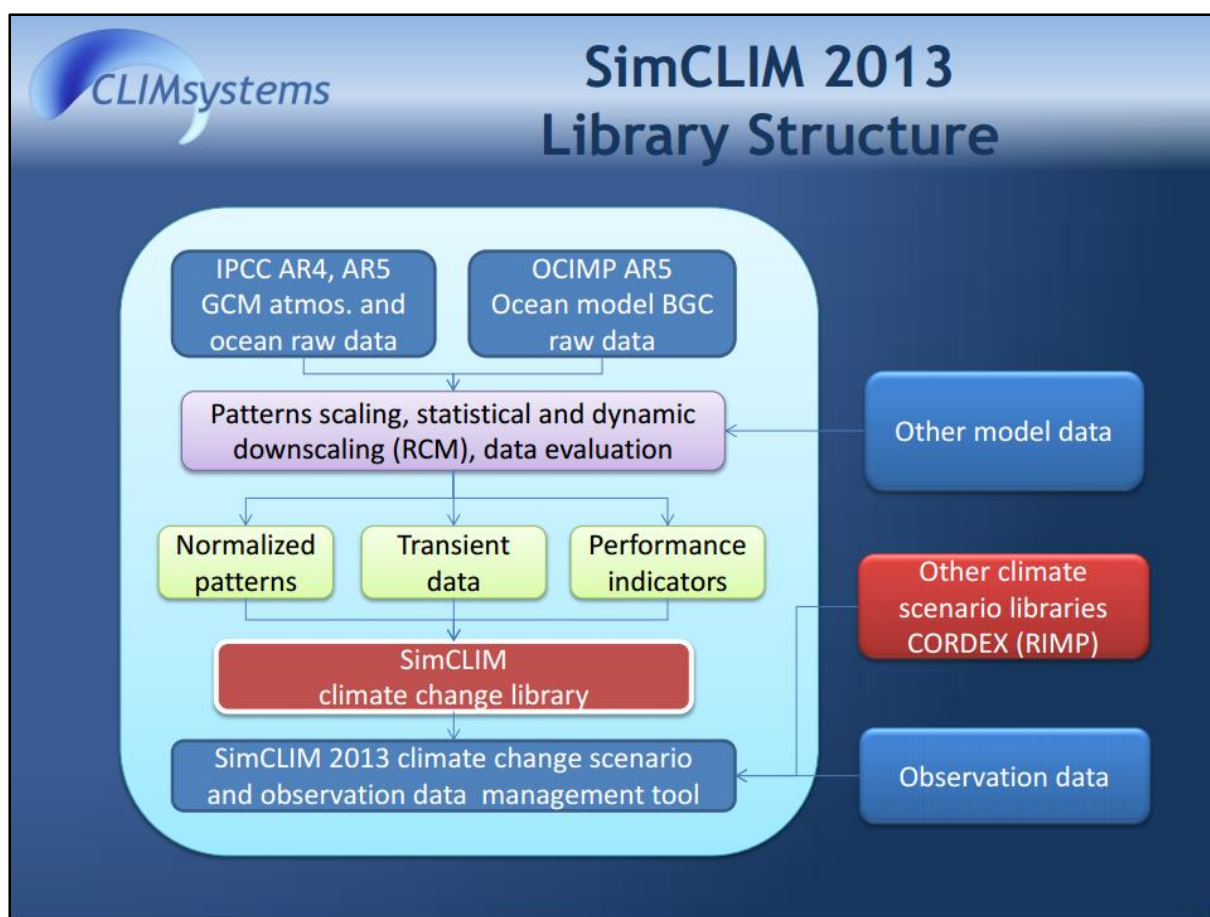


Figure VI.1. Organigramme du logiciel SIMCLIM 2013

VI.2 Principales caractéristiques de SimCLIM :

VI.2.1 Unicité : Jusqu'à présent, il n'y a pas de système dans le monde comparable à SimCLIM. Il y a quelques systèmes logiciels spécialisés qui peuvent effectuer des parties de ce que SimCLIM peut faire, mais pas de la façon complète et conviviale de SimCLIM. Par exemple, le système MAGICC / de SCENGEN génère des scénarios de changement climatique à l'échelle mondiale et régionale, mais n'ont pas la capacité de créer un lien vers les données et les modèles d'impact à l'échelle nationale à l'échelle locale, où les études d'impact et d'adaptation sont nécessaires. Il existe également une gamme de modèles d'évaluation intégrée (MEI, dont SimCLIM en a un), mais ceux-ci ont tendance à se concentrer sur les questions d'atténuation (à savoir la réduction des émissions de gaz à effet de serre, par opposition aux impacts et adaptation) à l'échelle mondiale-régionale. Une évaluation externe du système SimCLIM (par une grande firme d'ingénierie) a conclu que SimCLIM était unique et puissant et était environ deux ans d'avance sur tout concurrent.

VI.2.2 L'intégration : La principale caractéristique de chacun des produits de CLIMsystems est l'intégration unique de données et des modèles qui permettent des simulations des effets de la variabilité et du changement climatique (du global au local) qui peuvent être effectuées les simulations d'une manière transparente rapide. La facilité et la rapidité de l'opération sont les principaux avantages de ces simulations du système, qui, autrement, devraient être effectués séparément dans un mode de temps fastidieux. De plus en plus, les utilisateurs ont découvert que SimCLIM peut leur fournir la capacité d'ajouter une «couche de changement climatique" à leurs évaluations existantes à travers une gamme de domaines - l'aménagement du territoire, de l'aménagement des ressources en eau, la réduction des risques d'inondation, risque pour la santé, l'évaluation des rendements des cultures, etc. Dans un monde qui est récemment éveillé aux menaces potentielles posées par le changement climatique, la demande pour ce genre de capacités est élevé et croissant.

VI.2.3 Pistes multiples et les analyses de sensibilité : Dans l'absence d'un système comme SimCLIM, les impacts du changement climatique et les analyses d'adaptation impliquent généralement un mode de fonctionnement "entrée / sortie" d'une analyse. Dans ce mode, les sorties des modèles climatiques sont façonnées dans des scénarios qui, à leur tour, fournissent l'entrée à l'impact des modèles, dont la sortie est entrée à l'évaluation des options d'adaptation, une façon très linéaire, lourd et fastidieux processus.

Pour les grands projets ou des évaluations, ces tâches sont souvent attribuées pour séparer les équipes ou groupes de travail. Il est très difficile de «revenir en arrière» et re-exécuter l'analyse avec différents scénarios ou de mener des analyses de sensibilité.

Au contraire, avec le système SimCLIM ces mesures sont intégrées. Il y a une flexibilité de construire une multitude de scénarios de diverses hypothèses et des incertitudes concernant les scénarios d'émissions de GES, les résultats du modèle AOGCM et sensibilité climatique émanant de rétroactions climatiques. Les outils de génération de scénario sont liés à l'impact des modèles, de sorte que les analyses d'impact peuvent être menées de manière transparente. Cela signifie que les analyses peuvent être exécutées rapidement et efficacement de façon

interne cohérente. Surtout, il est possible de re-exécuter le système selon différentes hypothèses et d'explorer des scénarios alternatifs. Enfin, parce que le système fournit une plate-forme pour le modèle et l'intégration de données, il encourage le type d'intégration interdisciplinaire de l'expertise nécessaire pour comprendre la «grande image», à la place des «silos» d'équipes de travail.

VI.2.4 Facilement de mis à jour : En l'absence d'un système comme SimCLIM, les résultats de l'impact et l'étude de l'adaptation sont généralement des rapports sur papier avec «durée de vie» limitée. «L'utilisation par" date de ces rapports est souvent relativement courte, en raison des améliorations rapides des connaissances scientifiques, la disponibilité du nouveau modèle climatique mondial exécute, étendu et amélioré les bases de données, et ainsi de suite. Il n'y a pas longtemps avant que les résultats et les conclusions de l'étude doivent être re-visités. Mais il devient prohibitif et exigeant de le faire dans le mode classique de l'analyse. En revanche, il est relativement simple de mettre à jour SimCLIM par l'importation de nouvelles données spatiales et chronologiques et en modifiant les modèles d'impact de composant. Les implications de ces changements peuvent ensuite être facilement examinées en exécutant à nouveau le système. En effet, SimCLIM devient un outil évolutif, changeant que les changements scientifiques.

VI.2.5 Une partie du processus de prise de décision : Plutôt que de « la science à part», SimCLIM est spécialement conçu pour combler le fossé entre la science et la politique / planification. Tout en restant un outil qui est scientifiquement rigoureux, mais elle est suffisamment transparent et intuitif visuel à comprendre, et même utilisé conviviale, par des non-scientifiques dans la planification et l'élaboration des politiques situations. En raison de cette flexibilité, SimCLIM peut être intégrée dans le cadre du processus de planification lui-même. Par exemple, dans ateliers des conseils régionaux en Australie, SimCLIM est géré «en direct» lors des ateliers sessions afin de faire "sur le terrain «analyses qui peuvent aider à éclairer le implications de, par exemple, différents scénarios de GES, les modèles climatiques globaux, ou les impacts sur les paramètres du modèle. Fait important, ceci encourage les planificateurs et les décideurs a s'engagée dans la scienceeux-mêmes, et non pas simplement pour être le destinataire d'un rapport scientifique.

	Model	Country	Spatial resolution for atmospheric variable (longitude*latitude)	Spatial resolution for ocean variable (longitude*latitude)
1	ACCESS1.3	Australia	192*145	360*300
2	ACCESS1.0	Australia	192*145	360*300
3	BCC-CSM1-1	China	128*64	360*232
4	BCC-CSM1-1-m	China	320*160	360*232
5	BNU-ESM	China	128*64	
6	CanESM2	Canada	128*64	256*192
7	CCSM4	USA	288*192	320*384
8	CESM1-BGC	USA	288*192	320*384
9	CESM1-CAM5	USA	288*192	320*384
10	CMCC-CM	Italy	480*240	182*149
11	CMCC-CMS	Italy	192*96	182*149
12	CNRM-CM5	France	256*128	362*292
13	CSIRO-Mk3-6-0	Australia	192*96	192*189
14	EC-EARTH	Netherlands	320*160	362*292
15	FGOALS-g2	China	128*60	360*196
16	FGOALS-s2	China	128*108	360*196
17	GFDL-CM3	USA	144*90	360*200
18	GFDL-ESM2G	USA	144*90	360*210
19	GFDL-ESM2M	USA	144*90	360*200
20	GISS-E2-H	USA	144*90	144*90
21	GISS-E2-H-CC	USA	144*90	144*90
22	GISS-E2-R	USA	144*90	288*180
23	GISS-E2-R-CC	USA	144*90	288*180
24	HADCM3	UK	96*73	96*73
25	HadGEM2-AO	UK	192*145	360*216
26	HadGEM2-CC	UK	192*145	360*216
27	HadGEM2-ES	UK	192*145	360*216
28	INMCM4	Russia	180*120	360*340
29	IPSL-CM5A-LR	France	96*96	182*149
30	IPSL-CM5A-MR	France	144*142	182*149
31	IPSL-CM5B-LR	France	96*96	182*149
32	MIROC4H	Japan	640*320	1280*912
33	MIROC5	Japan	256*128	256*224
34	MIROC-ESM	Japan	128*64	256*192
35	MIROC-ESM-	Japan	128*64	256*192
36	MPI-ESM-LR	Germany	192*96	256*220
37	MPI-ESM-MR	Norway	192*96	802*404
38	MRI-CGCM3	Japan	320*160	360*368
39	NorESM1-M	Norway	144*96	320*384
40	NorESM1-ME	Norway	144*96	320*384

Tableau VI.1. Les modèles climatiques de SimCLIM2013.

VI.3 Comparaisons des modèles :

Dans cette partie, nous ne choisirons que deux de ces modèles, le plus proche possible pour vérifier leur résultat, le modèle Français CNRM-CM5, et le modèle Allemand MPI-ESM-LR. Les caractéristiques générales de ces deux modèles sont représentées sur le Tableau VI.2.

	CNRM-CM5	MPI-ESM-LR
Atmosphère	ARPEGE-Climat (v5.2)	ECHAM6
Référence	(Holtslag, 2004)	(Stevens et al.,2013)
Résolution verticale (en degrés de latitude et longitude)	(1.4°x1.4°) T127	(1.9°x1.9°)T63
Nombre de niveaux verticaux	91	47
Surface-végétation	SURFEX	DYNVEG
Référence	(Best et al. 2004)	(Scheffer et al. 2001)
Résolution verticale identique à celle de l'atmosphère		
Océans	NEMO (v3.2)	MPIOM
Référence	(Madec ,2008)	(Jungclaus et al. 2006)
Résolution verticale (en degrés de latitude et longitude)	1°x1°	1.5°x1.5°
Nombre de niveaux verticaux	31	40
Glace mer	GELATO v5	HAMOCC
Référence	(Hunke , Dukowicz 1997)	(Ilyina et al., 2013)
Résolution verticale identique à celle de l'océan		

Tableau VI.2. Caractéristiques générales des modèles climatiques CNRM-CM5 et MPI-ESM-LR.

VI.4 Approche du travail et analyse des projections climatiques :

VI.4.1 Application :

- ✓ **Période de référence** : La période de référence **1980–2010** (climat « relativement » stable) a été privilégiée conformément aux recommandations de l'OMM.
- ✓ **Période future** : Les simulations AR5 couvrent l'horizon **2050-2100**. C'est donc cette période qui sera proposée pour les résultats.
- ✓ **Les simulations** fournies mobilisent les scénarios RCP (Pour *Representative Concentration Pathway*), c'est-à-dire, on basé sur les deux scénarios : **RCP 2.6** et **RCP 6.0**, avec une **sensibilité climatique moyenne**.
- ✓ **Deux modèles climatiques** :
 - Le modèle Français **CNRM-CM5**.
 - Le modèle Allemand **MPI-ESM-LR**.
- ✓ **On s'intéresse aux paramètres métrologiques annuels** : Température moyenne (**Tmean**), température maximale (**Tmax**), température minimale (**Tmin**) et précipitations (**RR**).

VI.4.2 Utilisation du logiciel SimCLIM2013 :

La visualisation de ces projections sur les cartes géographiques donne les résultats suivants :

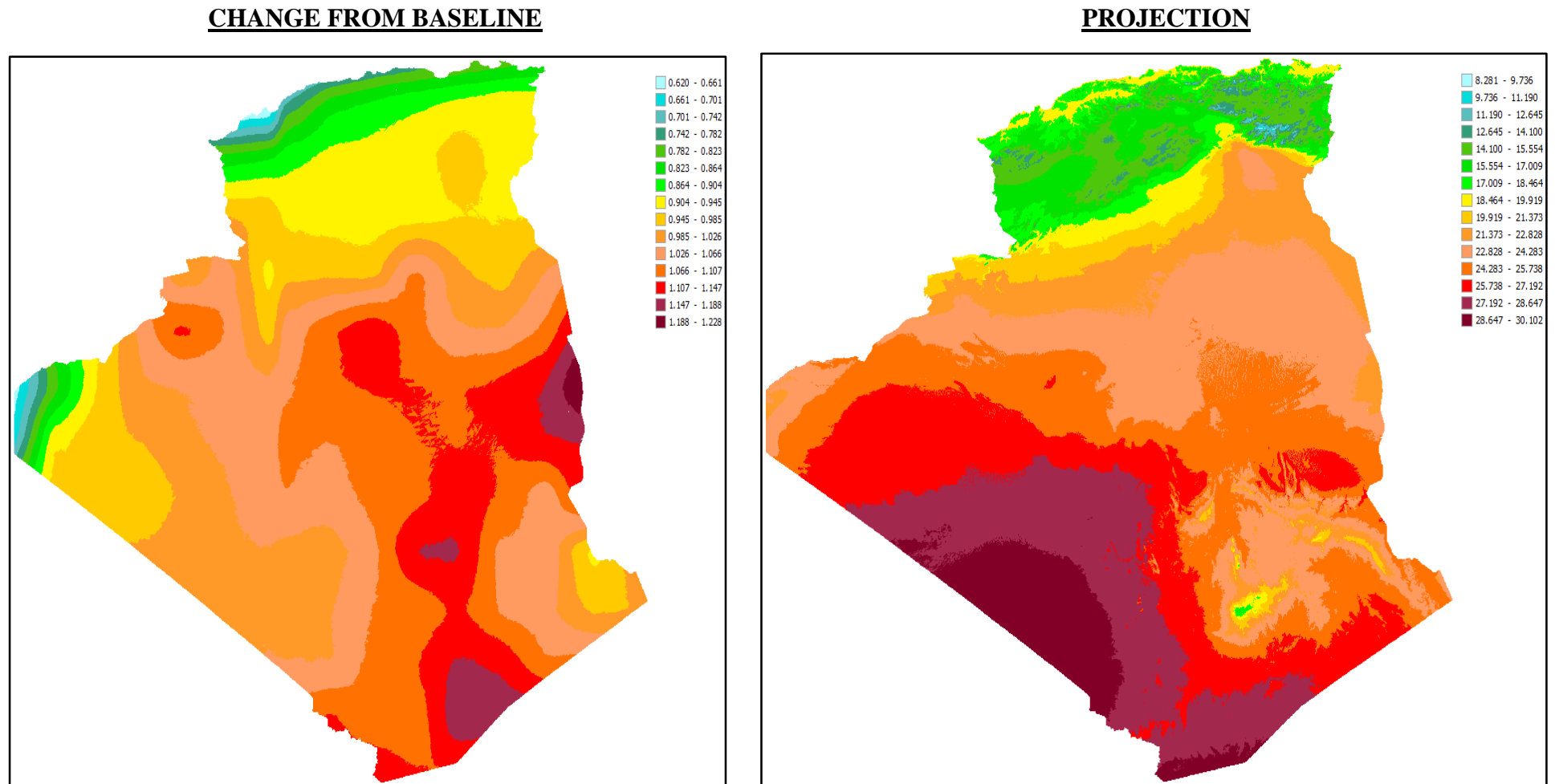


Figure VI.2. Projections climatiques de Tmean annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

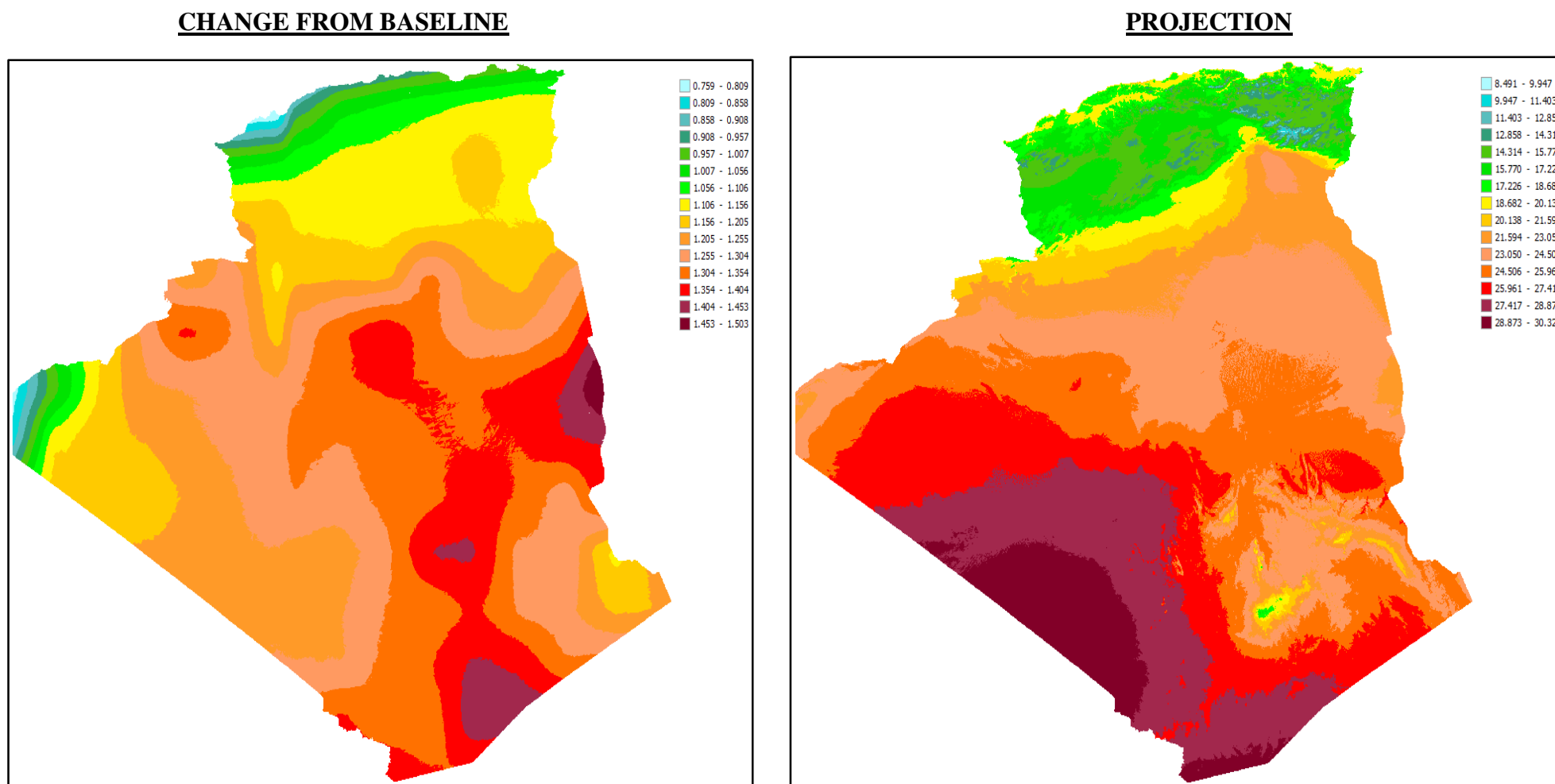


Figure VI.3. Projections climatiques de T_{mean} annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

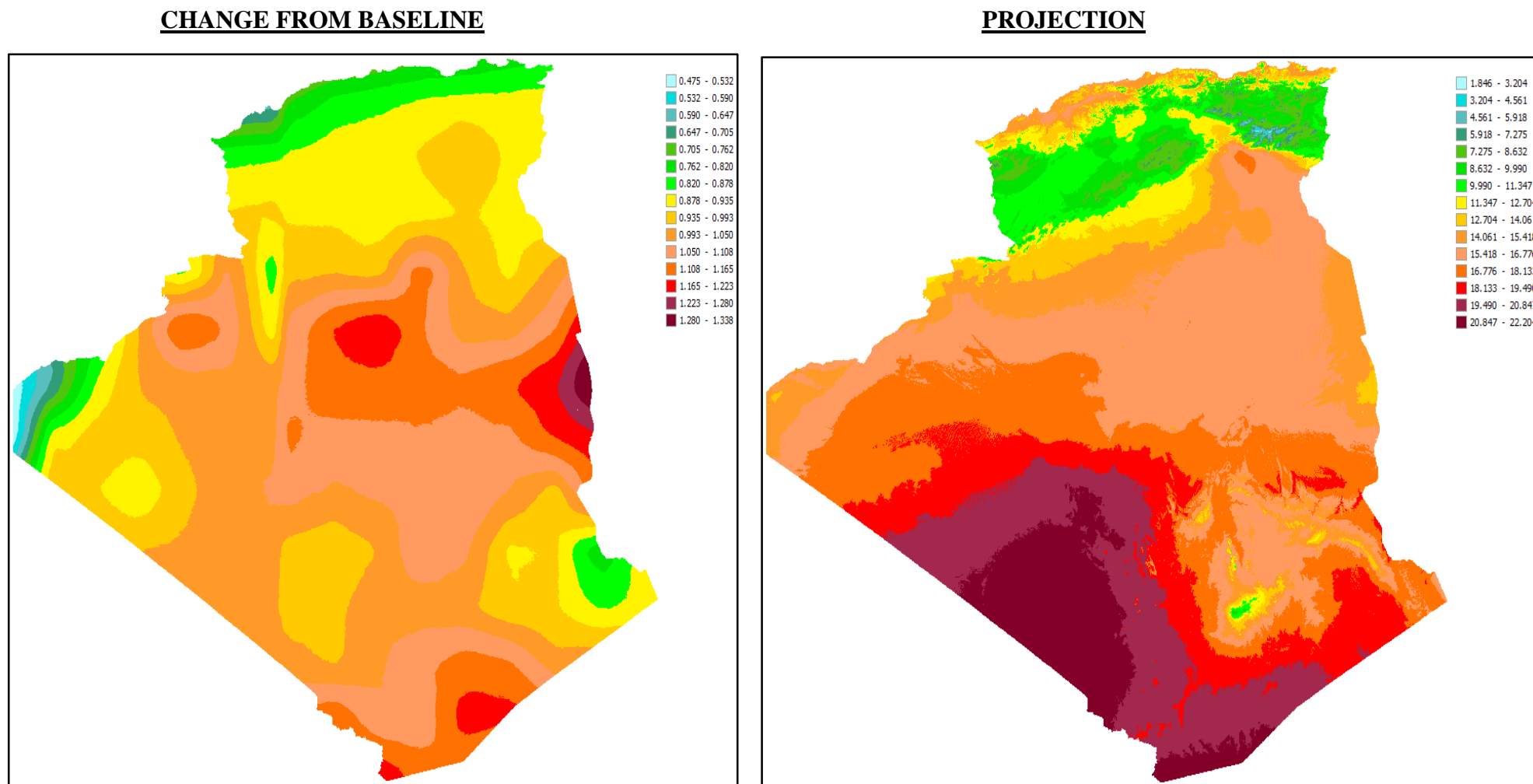
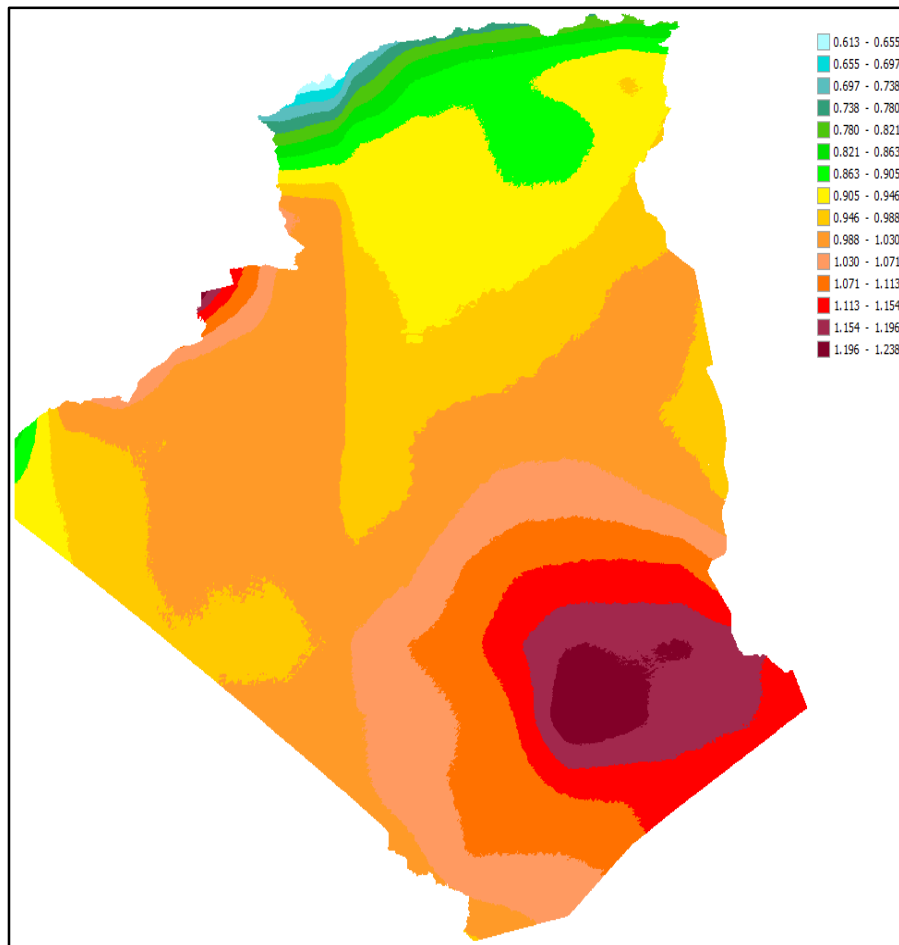


Figure VI.4. Projections climatiques de Tmin annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

HANGE FROM BASELINE



PROJECTION

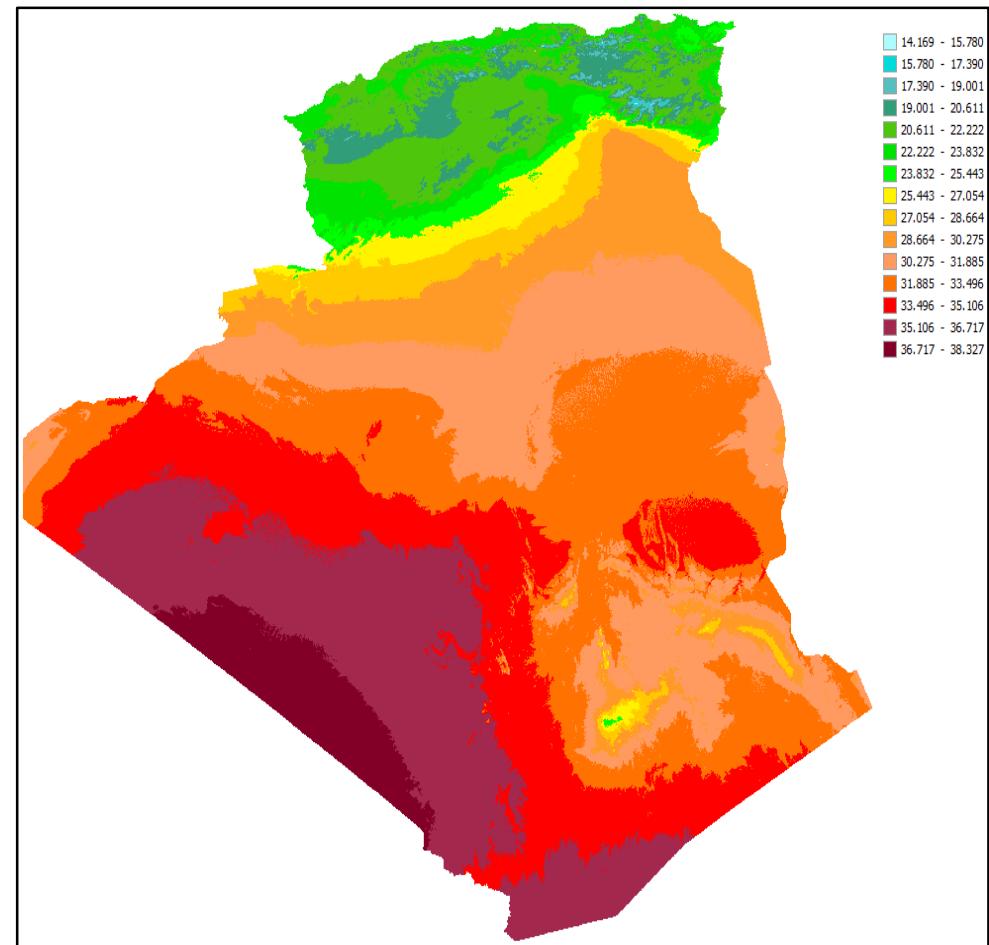


Figure VI.6. Projections climatiques de Tmax annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

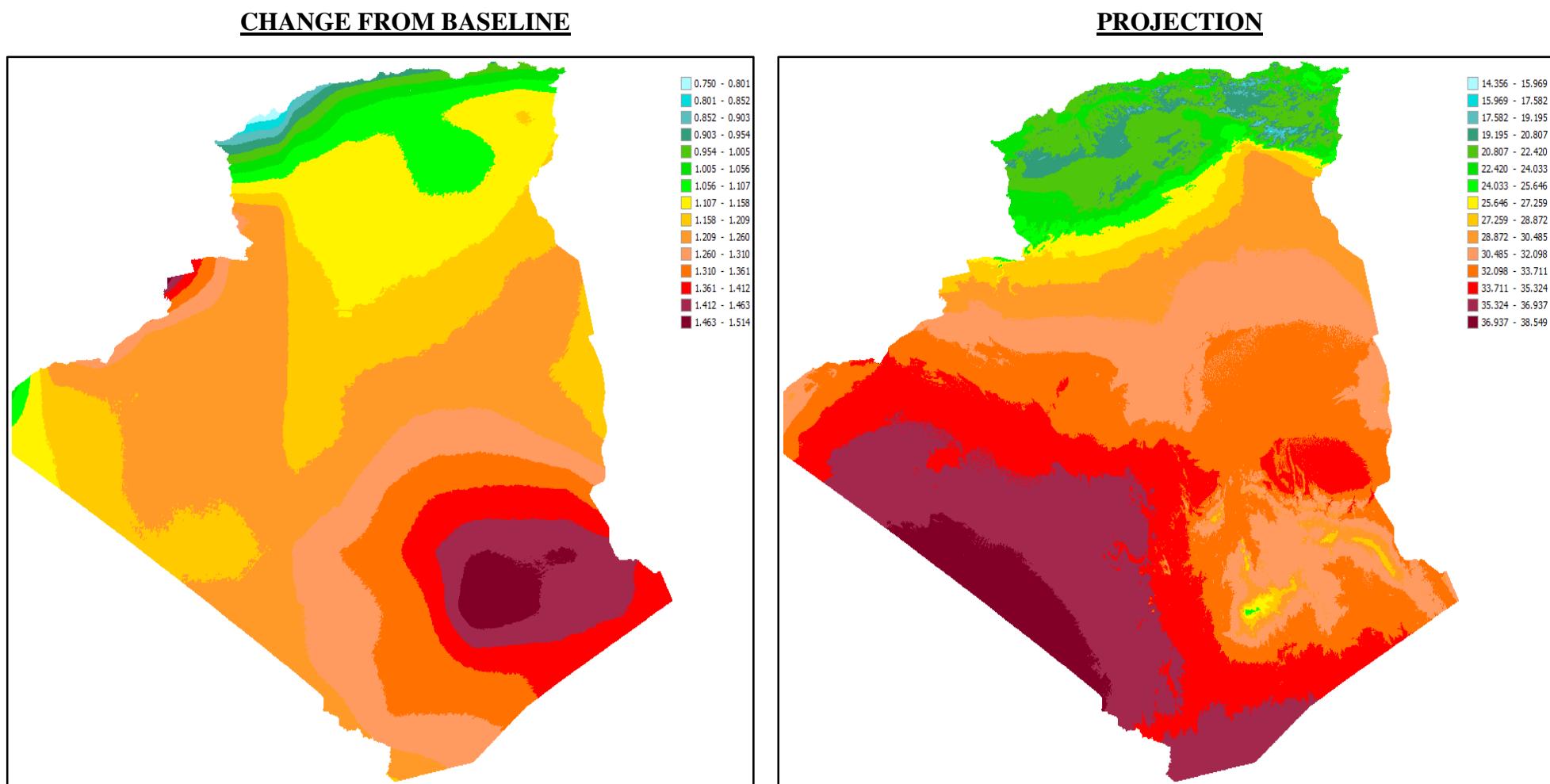
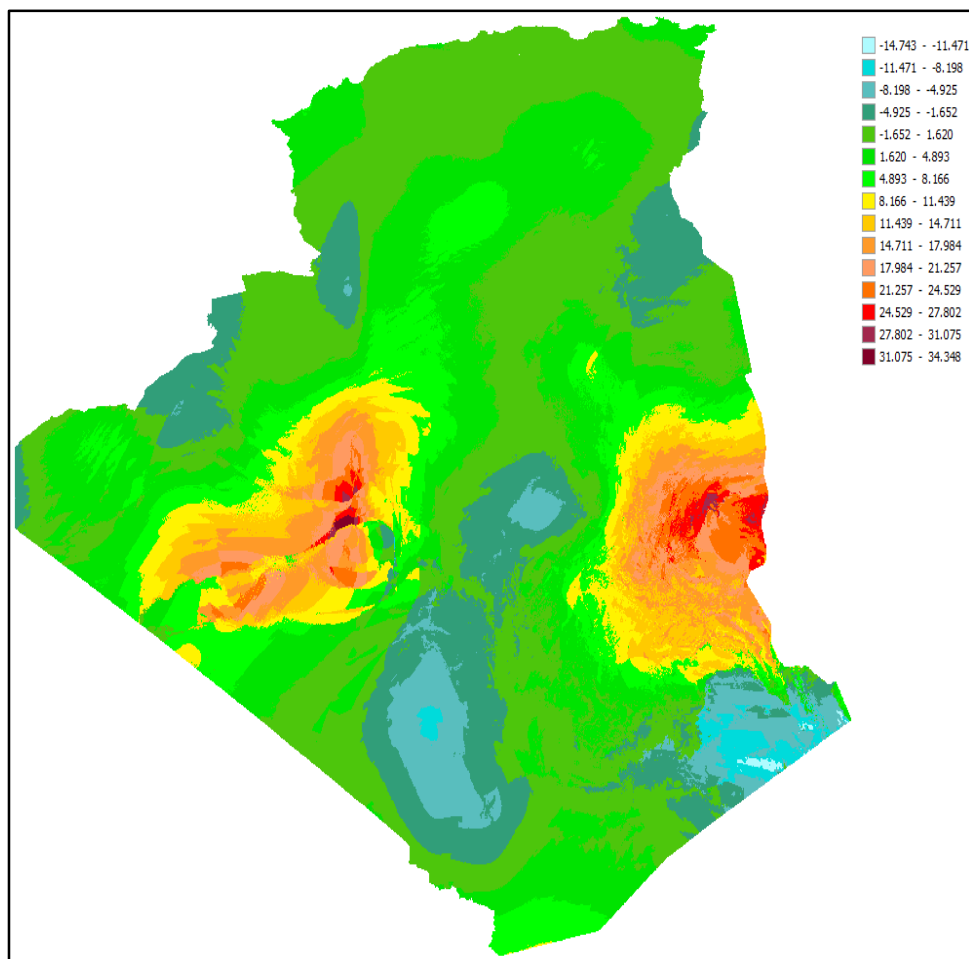


Figure VI.7. Projections climatiques de Tmax annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

CHANGE FROM BASELINE



PROJECTION

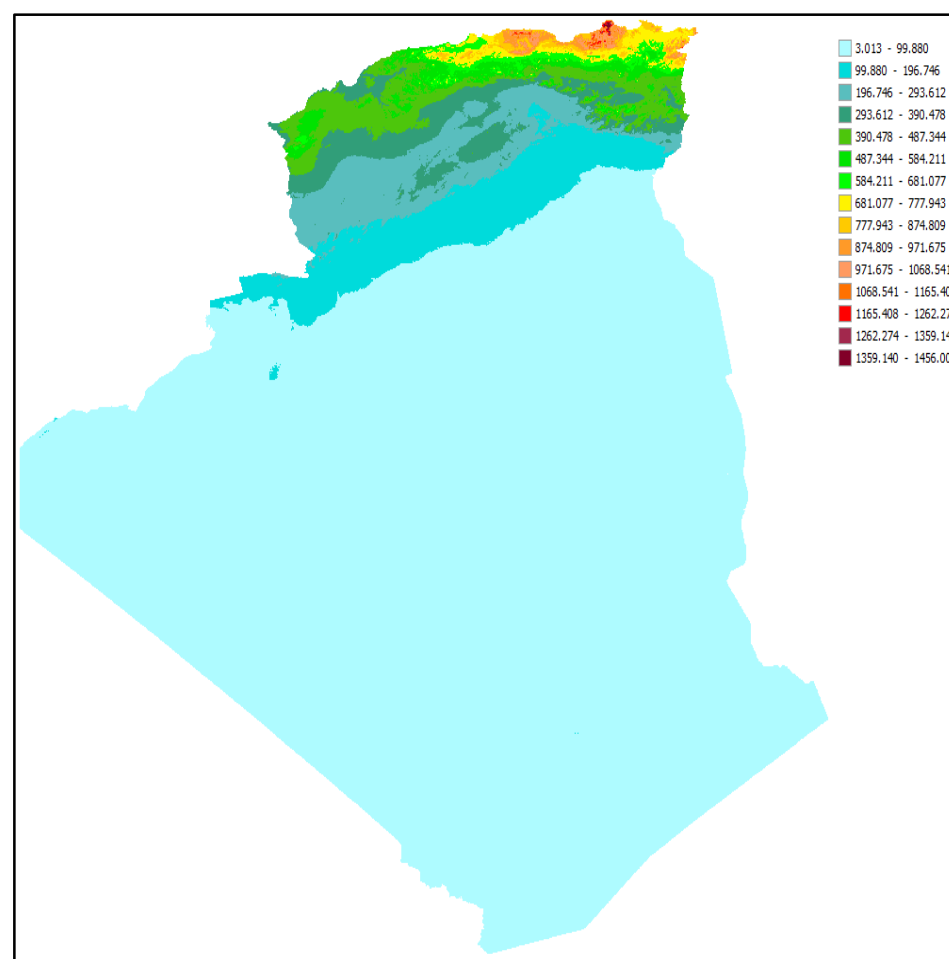


Figure VI.8. Projections climatiques de RR annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

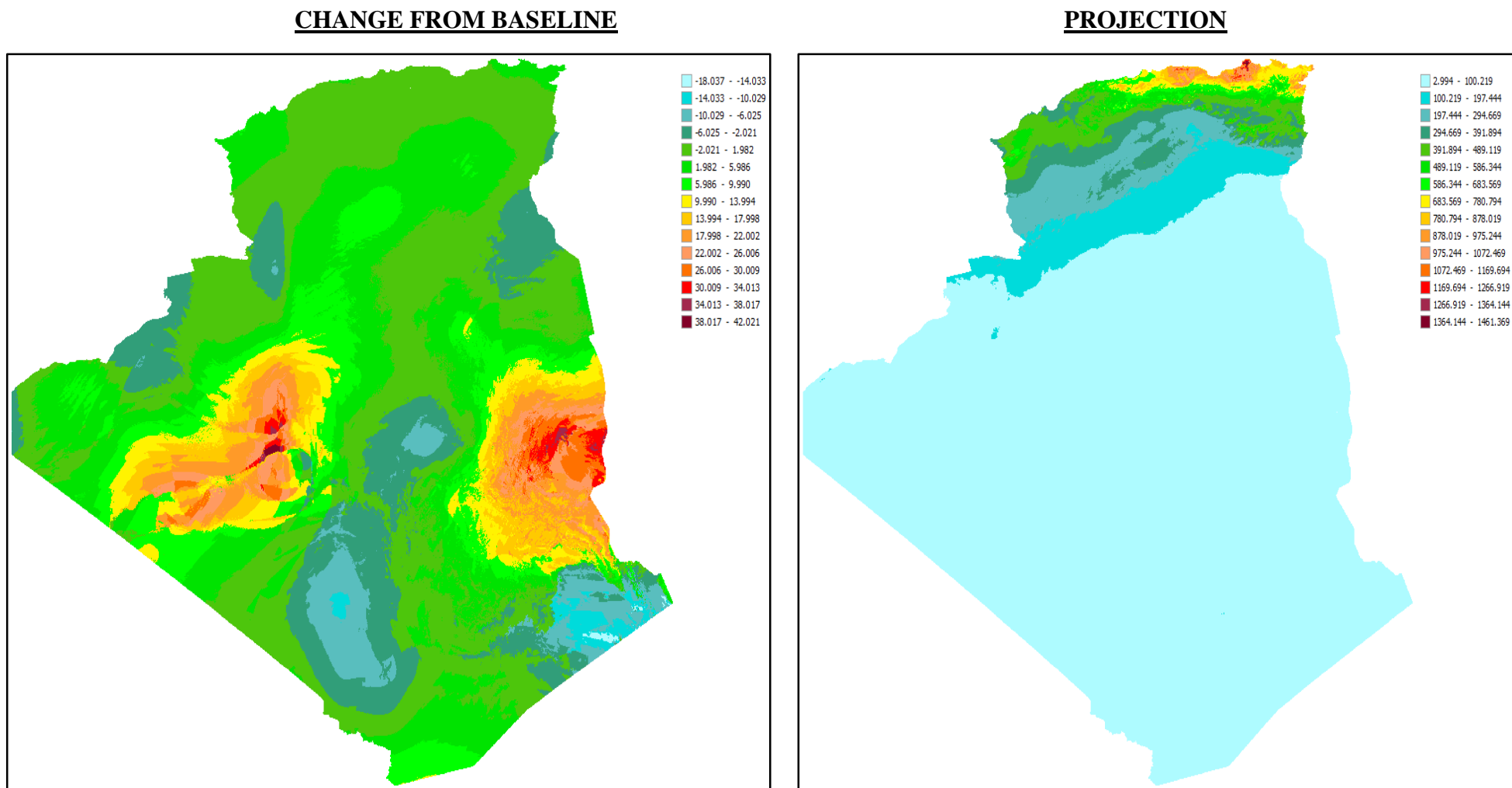


Figure VI.9. Projections climatiques de RR annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

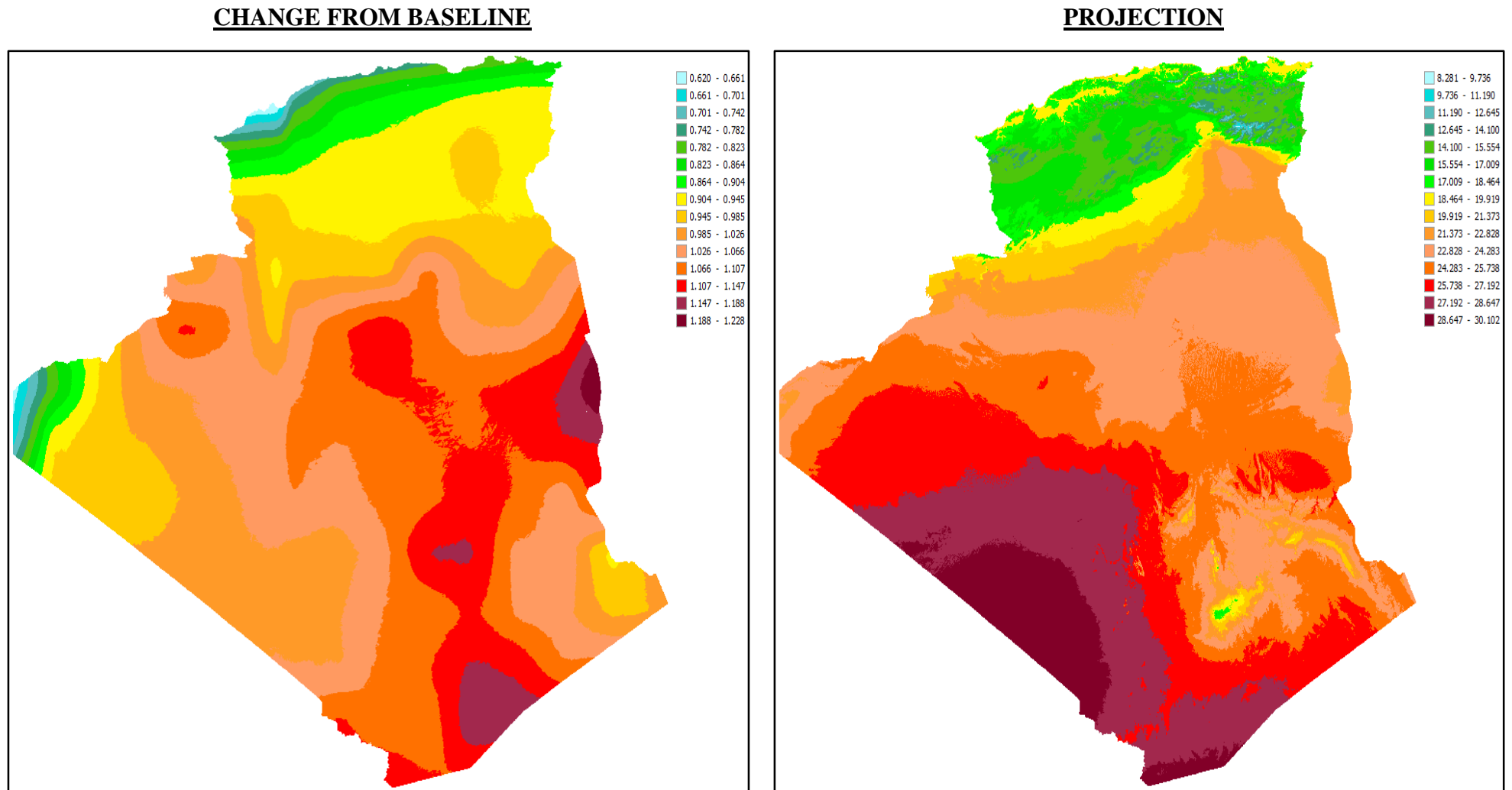


Figure VI.10. Projections climatiques de Tmean annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

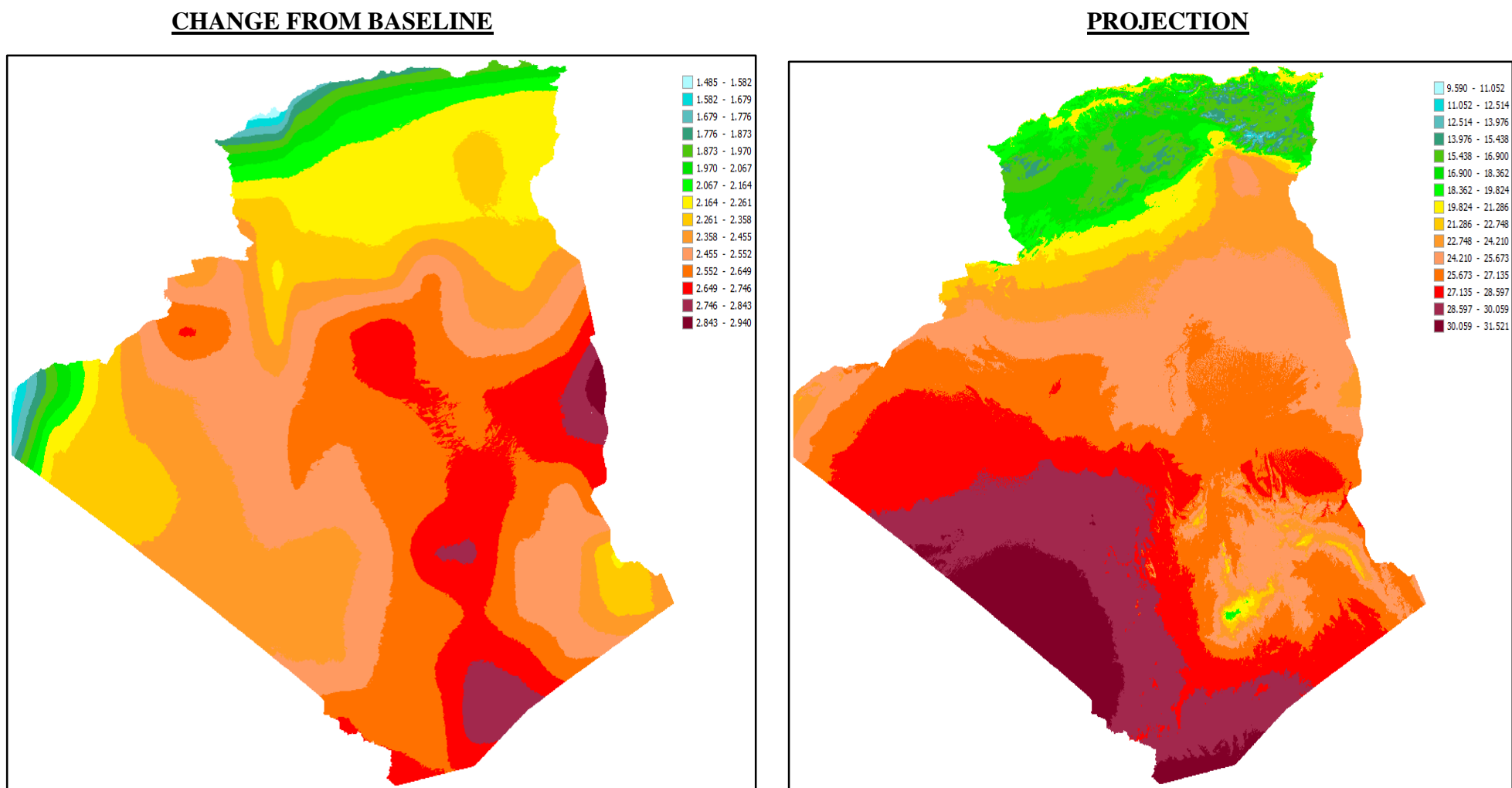


Figure VI.11. Projections climatiques de Tmean annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

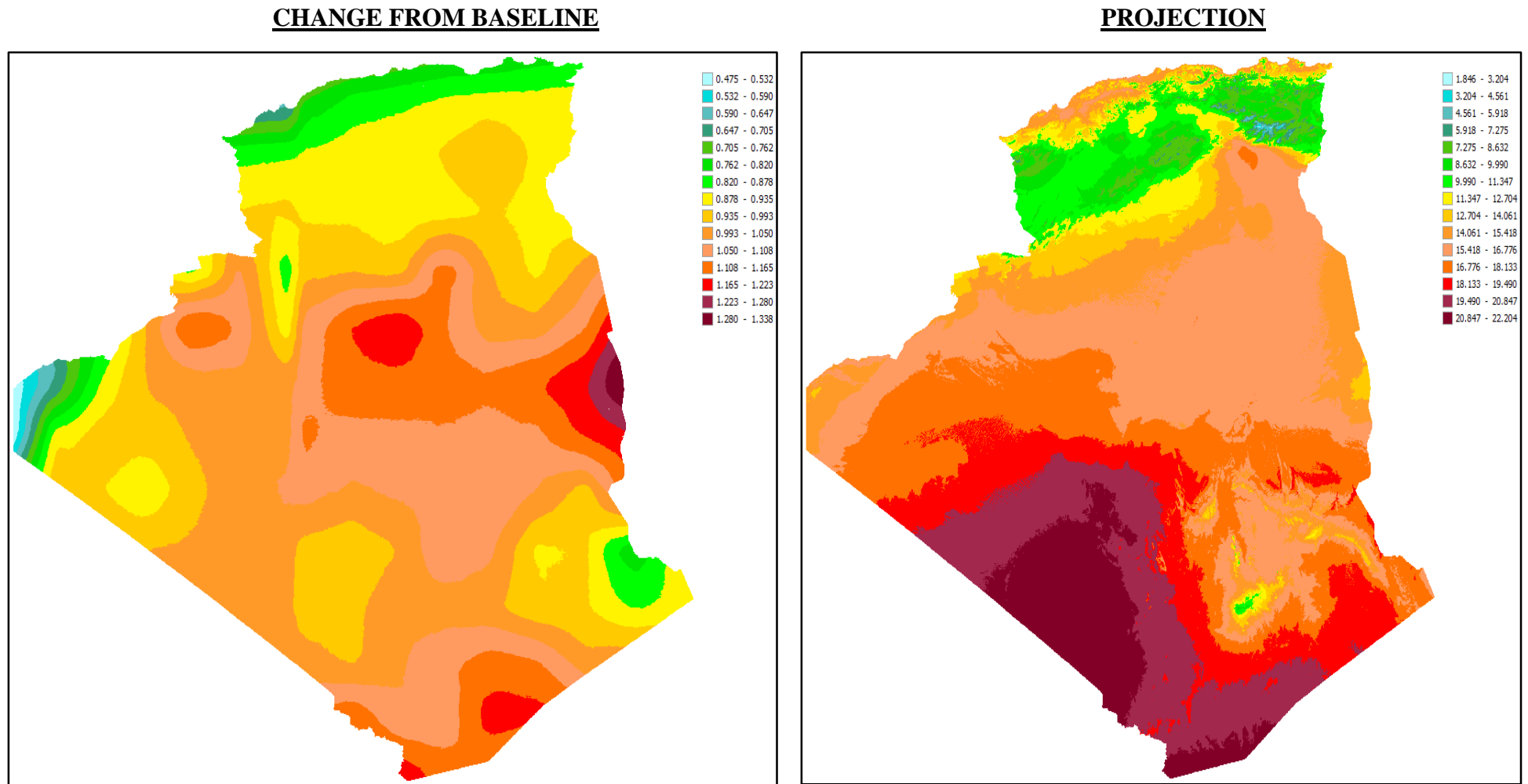


Figure VI.12. Projections climatiques de Tmin annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

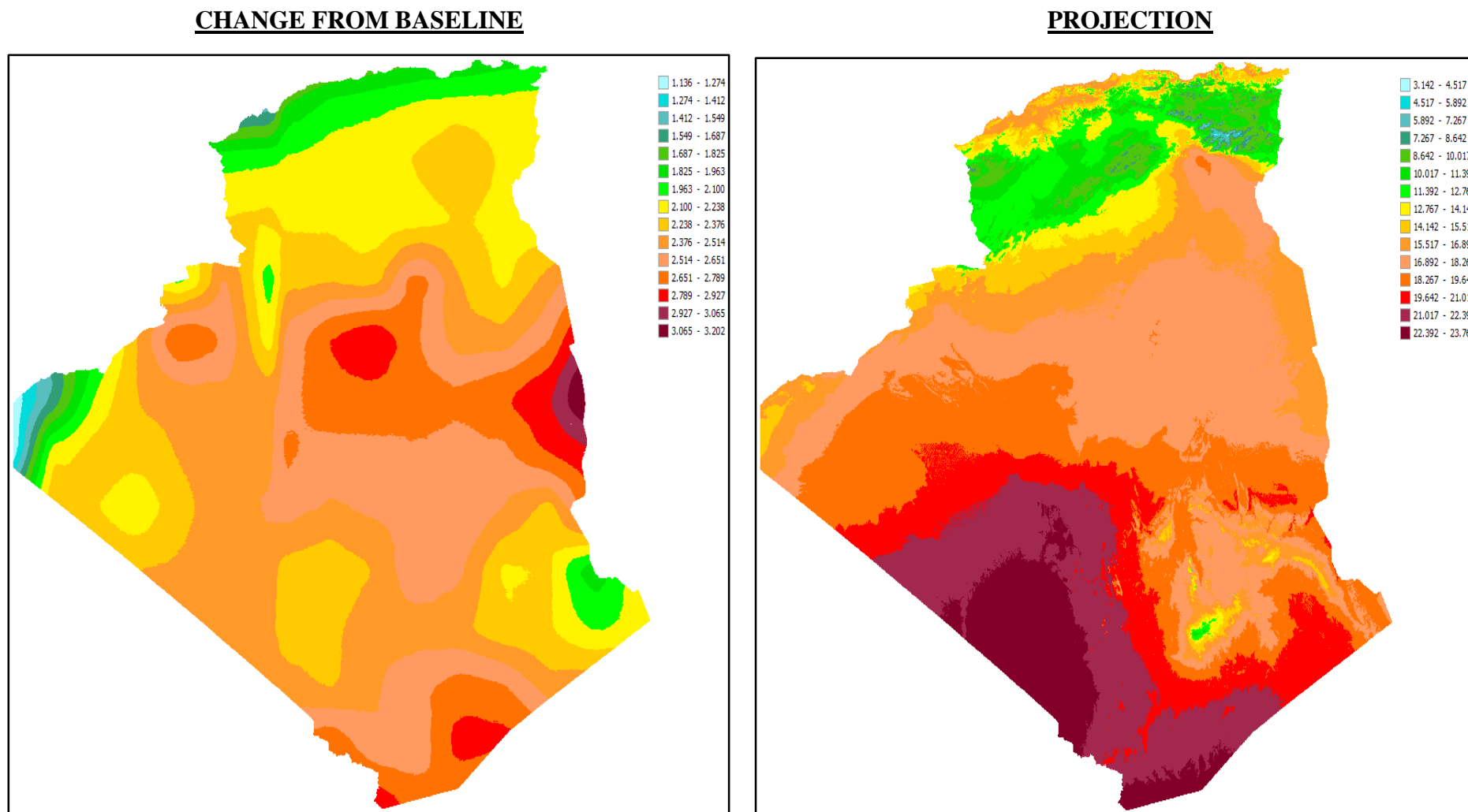


Figure VI.13. Projections climatiques de T_{min} annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

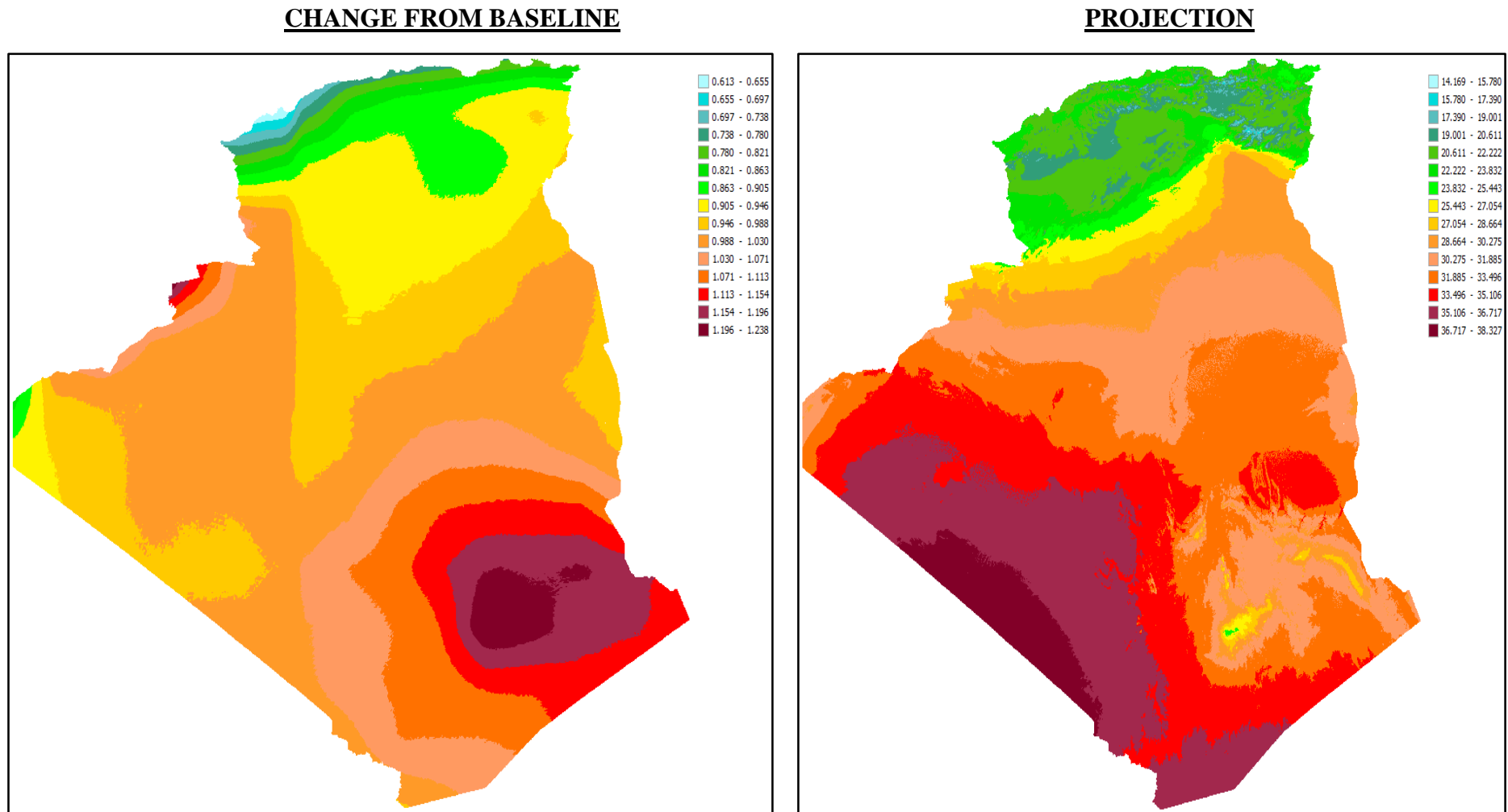


Figure VI.14. Projections climatiques de Tmax annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

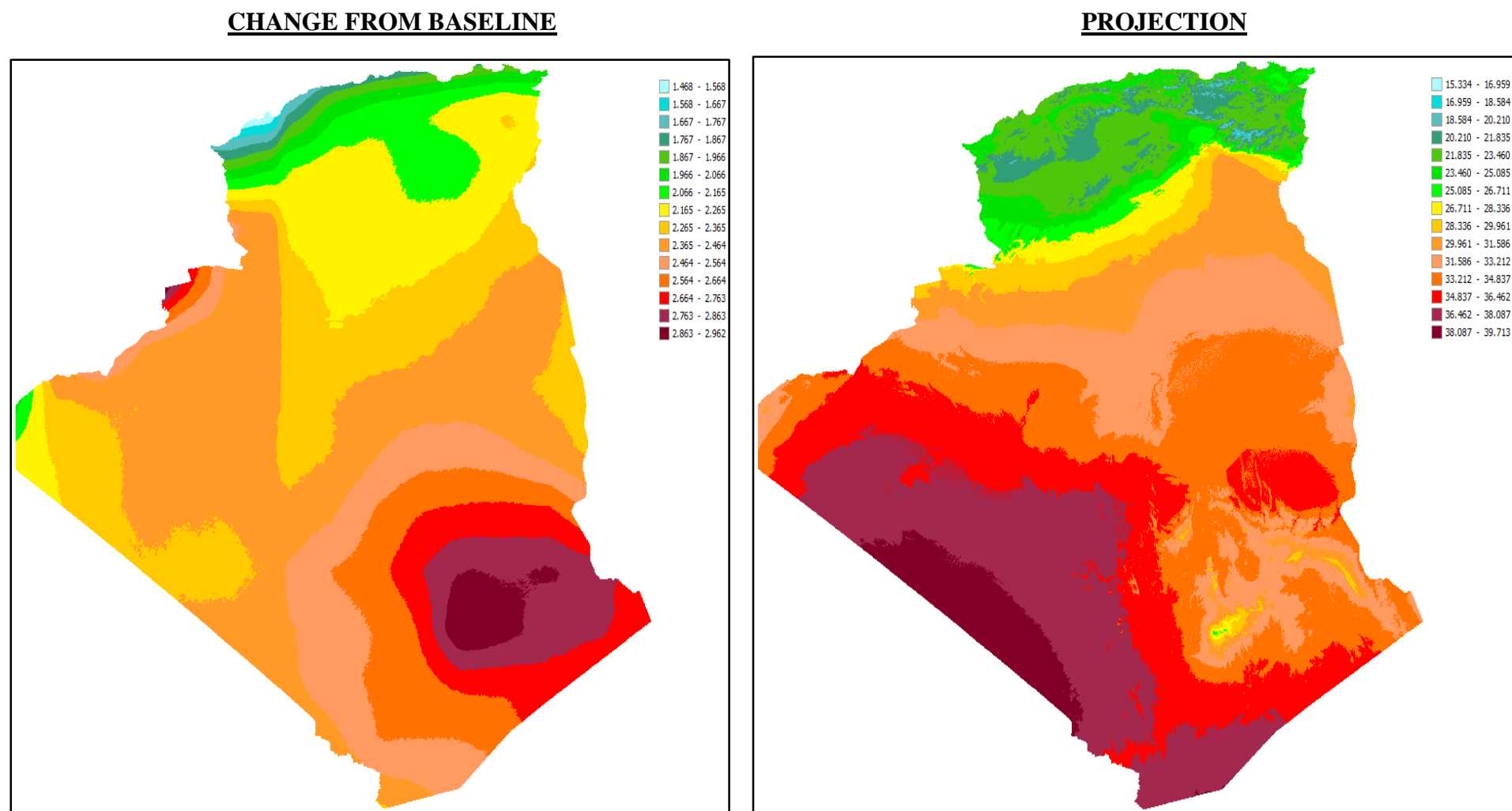
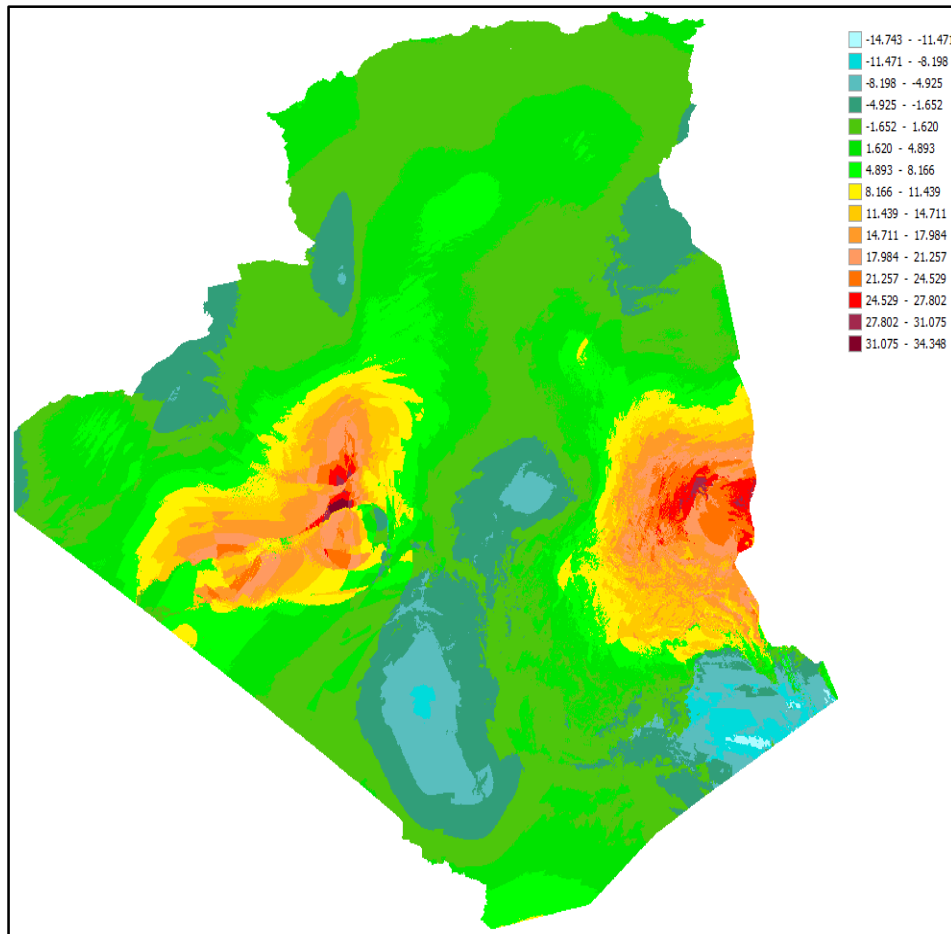


Figure VI.15. Projections climatiques de Tmax annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

CHANGE FROM BASELINE



PROJECTION

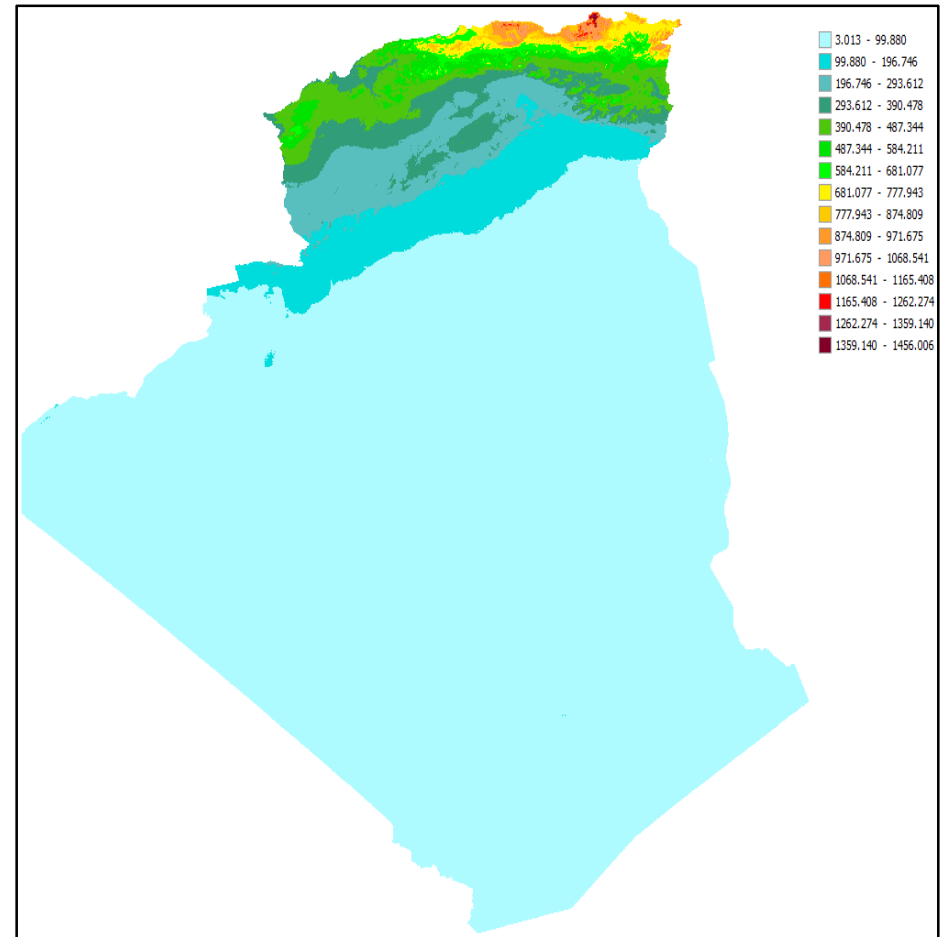


Figure VI.16. Projections climatiques de RR annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

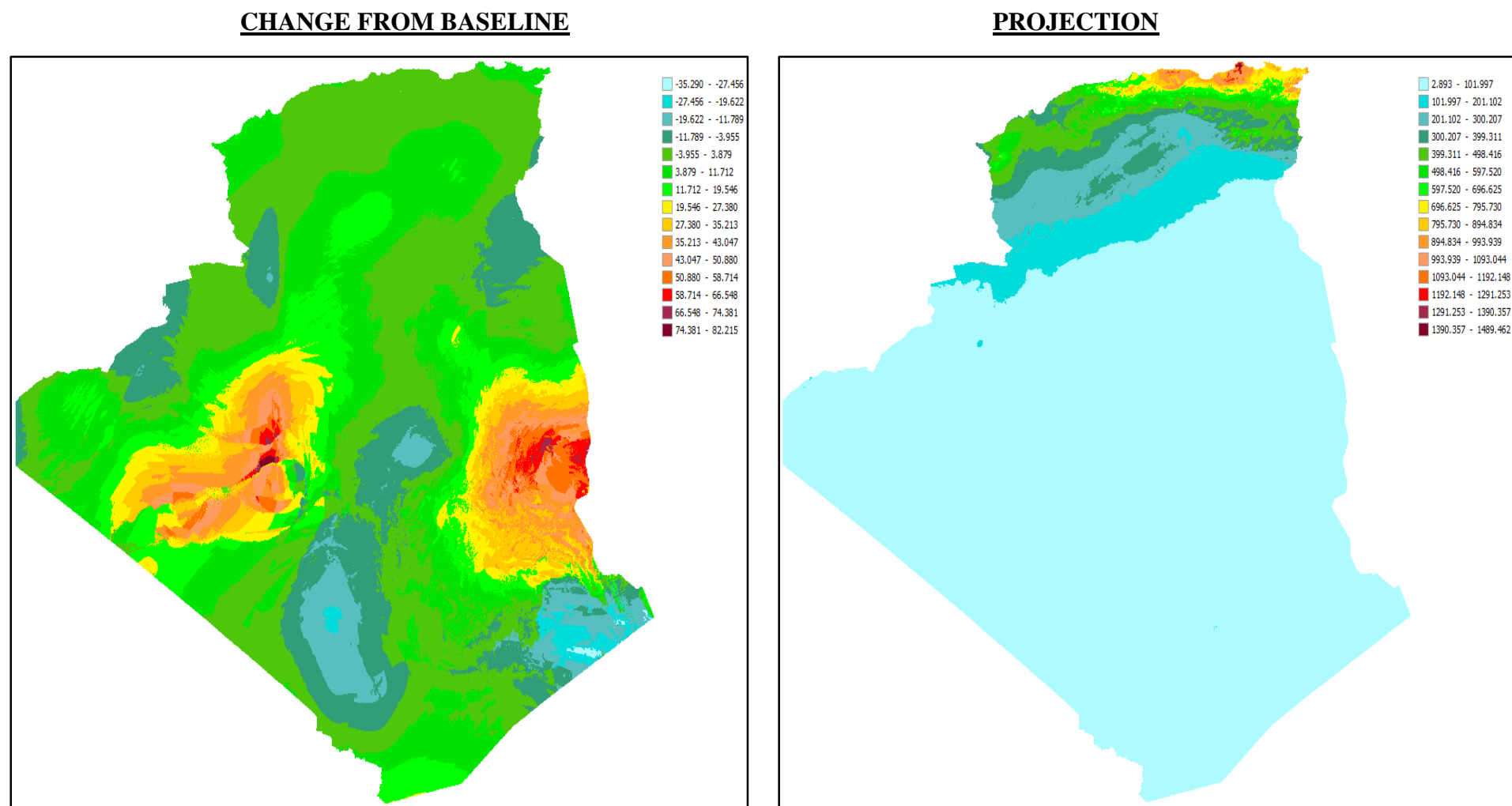


Figure VI.17. Projections climatiques de RR annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

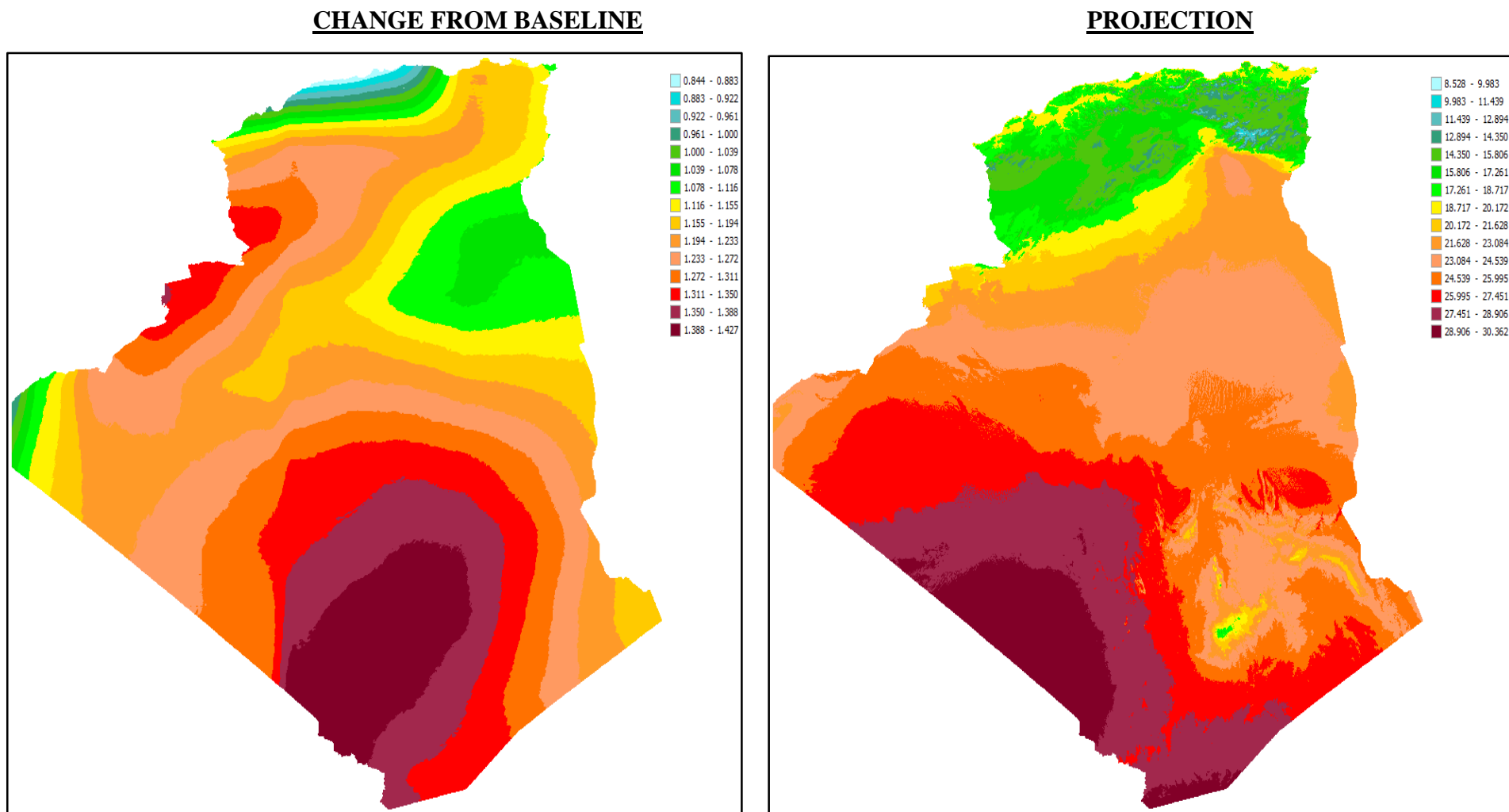


Figure VI.18. Projections climatiques de Tmean annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

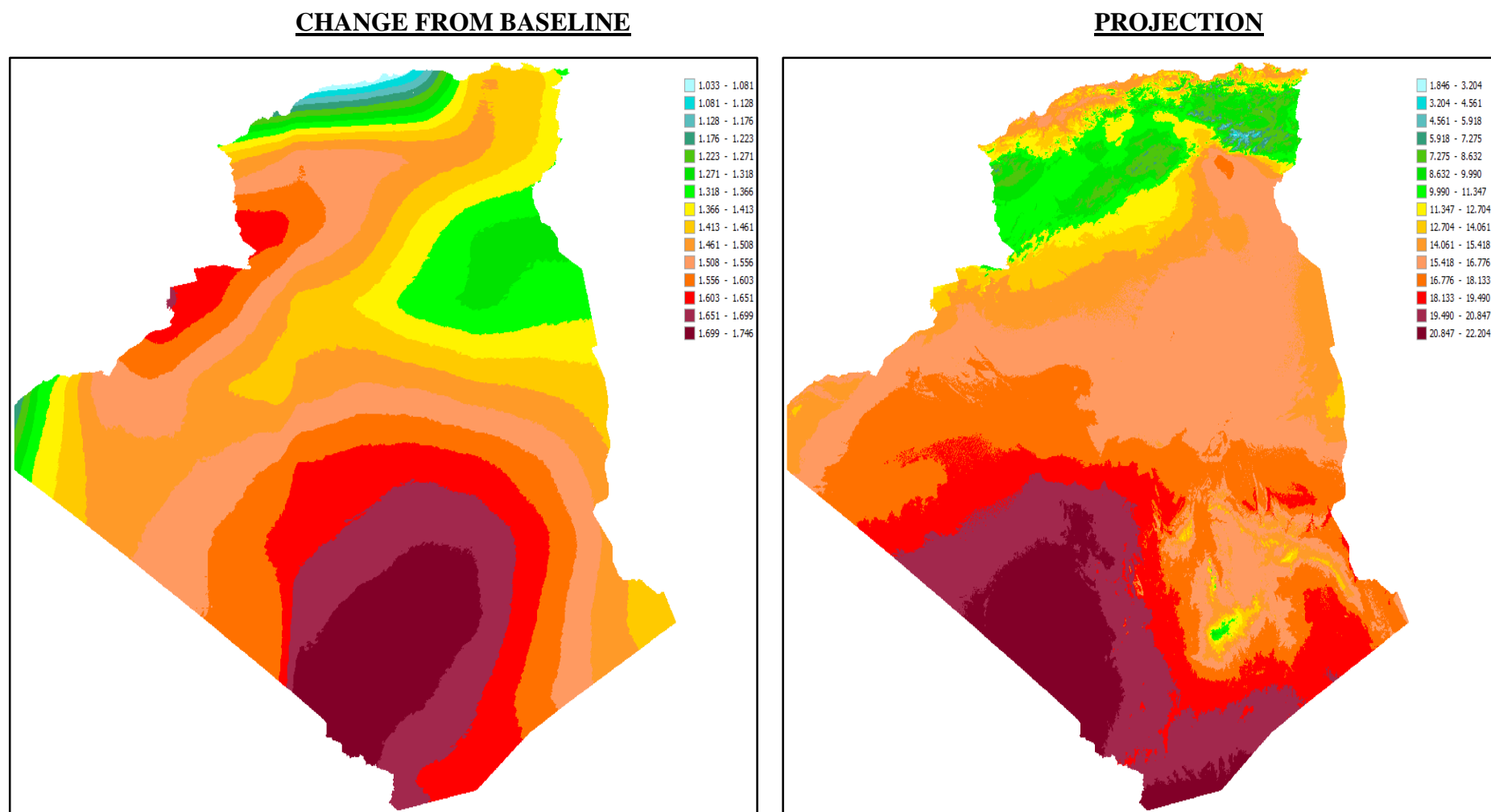


Figure VI.19. Projections climatiques de Tmean annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

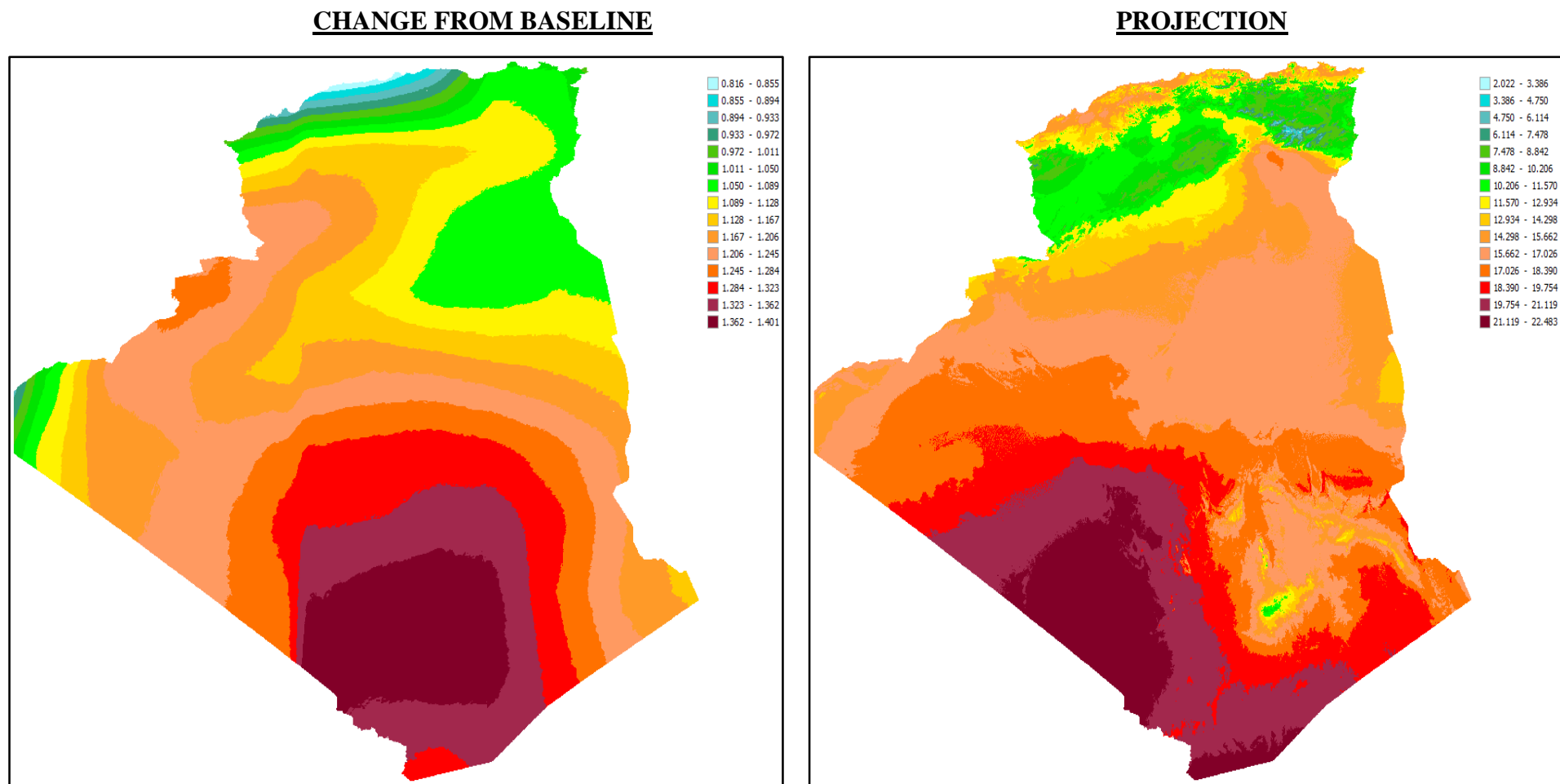


Figure VI.20. Projections climatiques de Tmin annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

CHANGE FROM BASELINE

PROJECTION

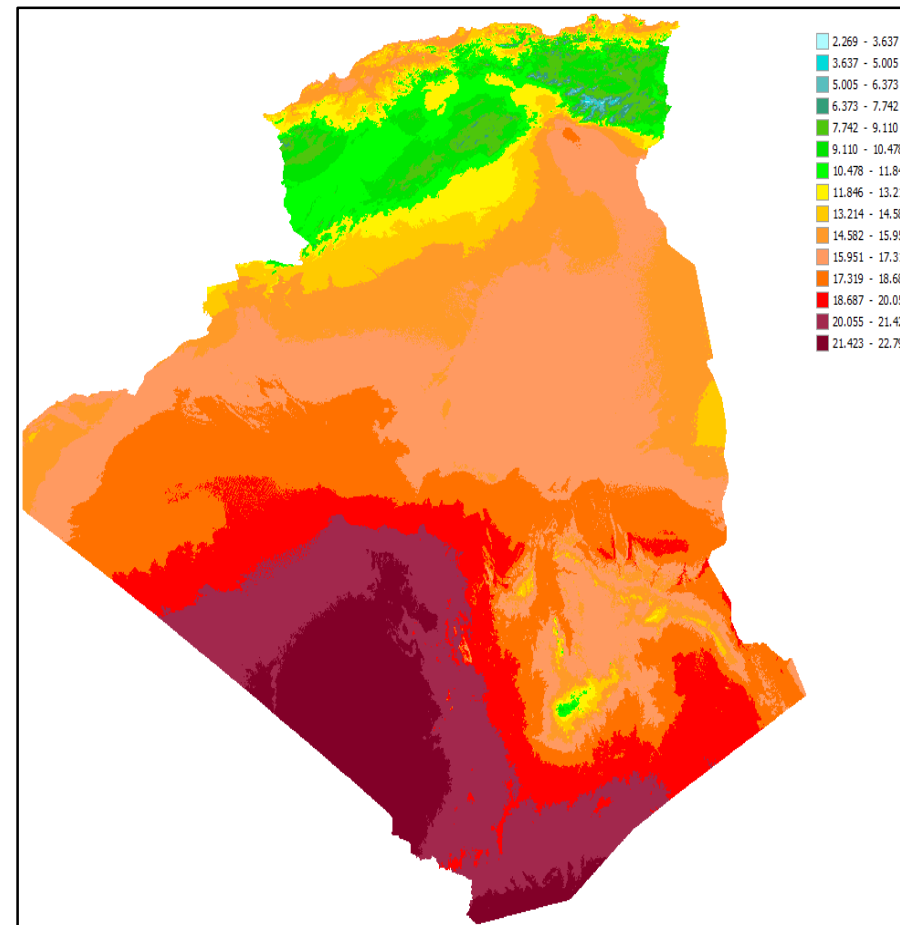
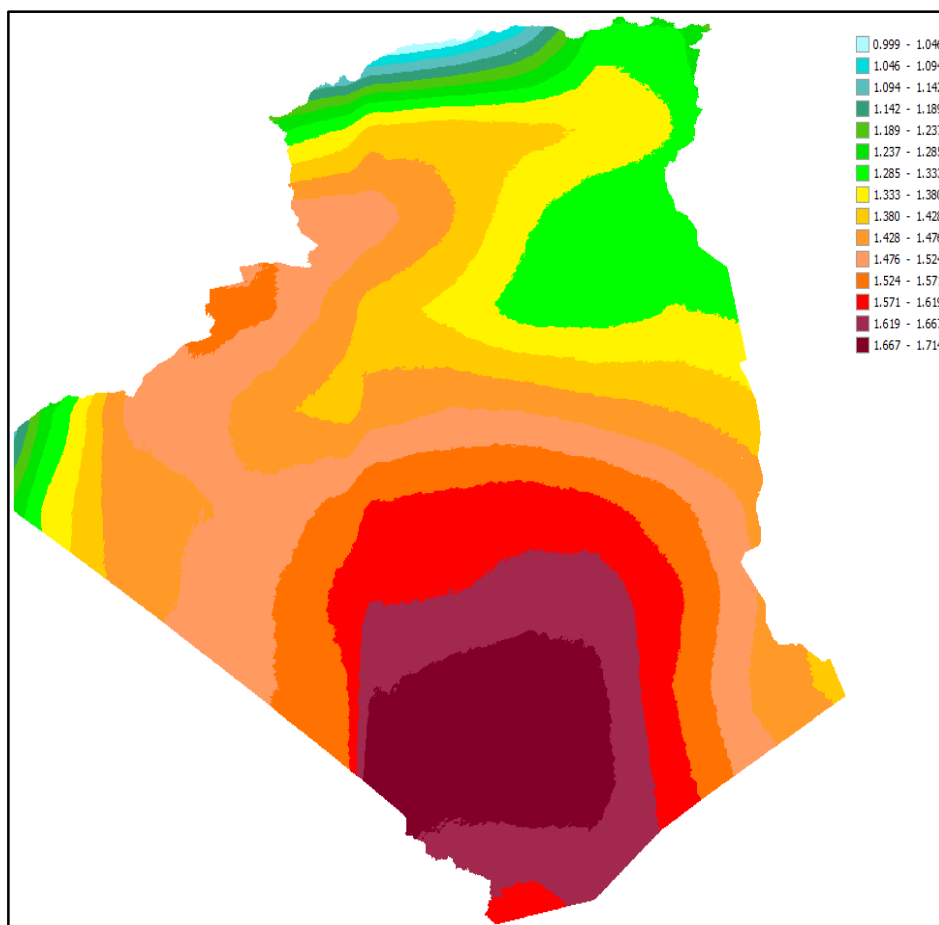
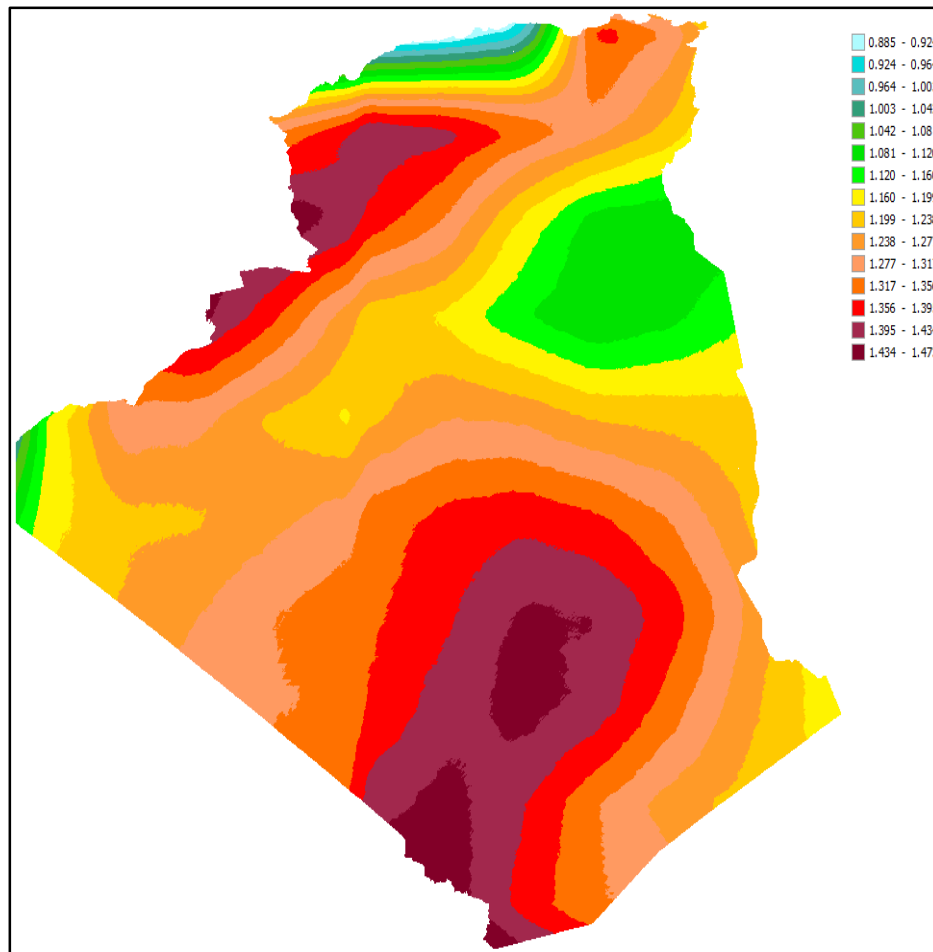


Figure VI.21. Projections climatiques de Tmin annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

CHANGE FROM BASELINE



PROJECTION

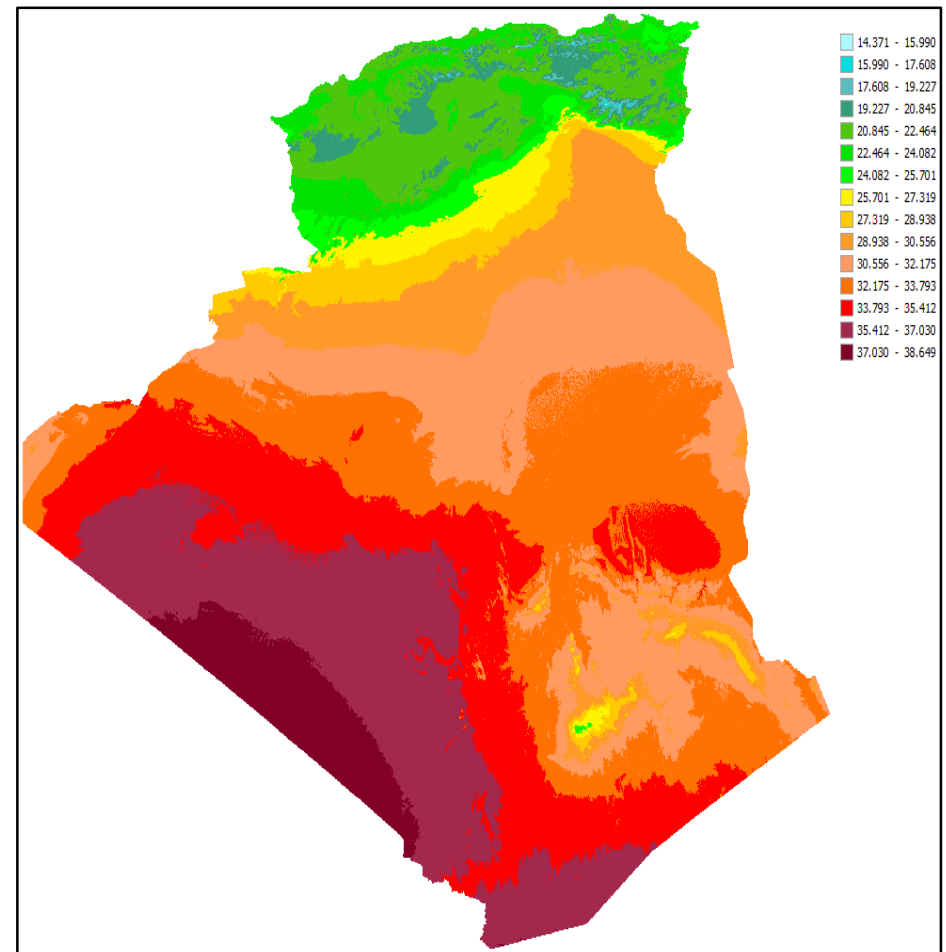


Figure VI.22. Projections climatiques de Tmax annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

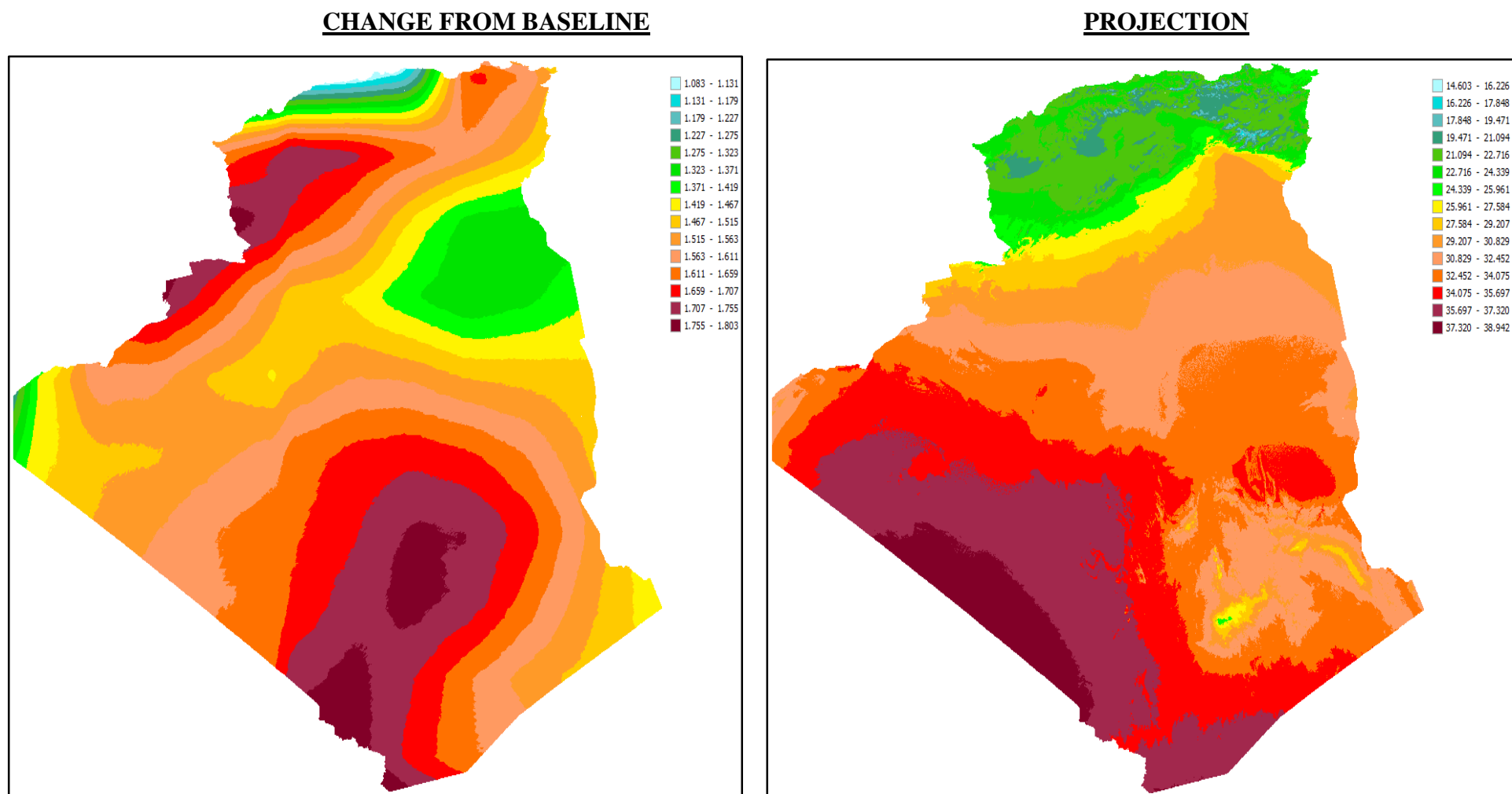


Figure VI.23. Projections climatiques de Tmax annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

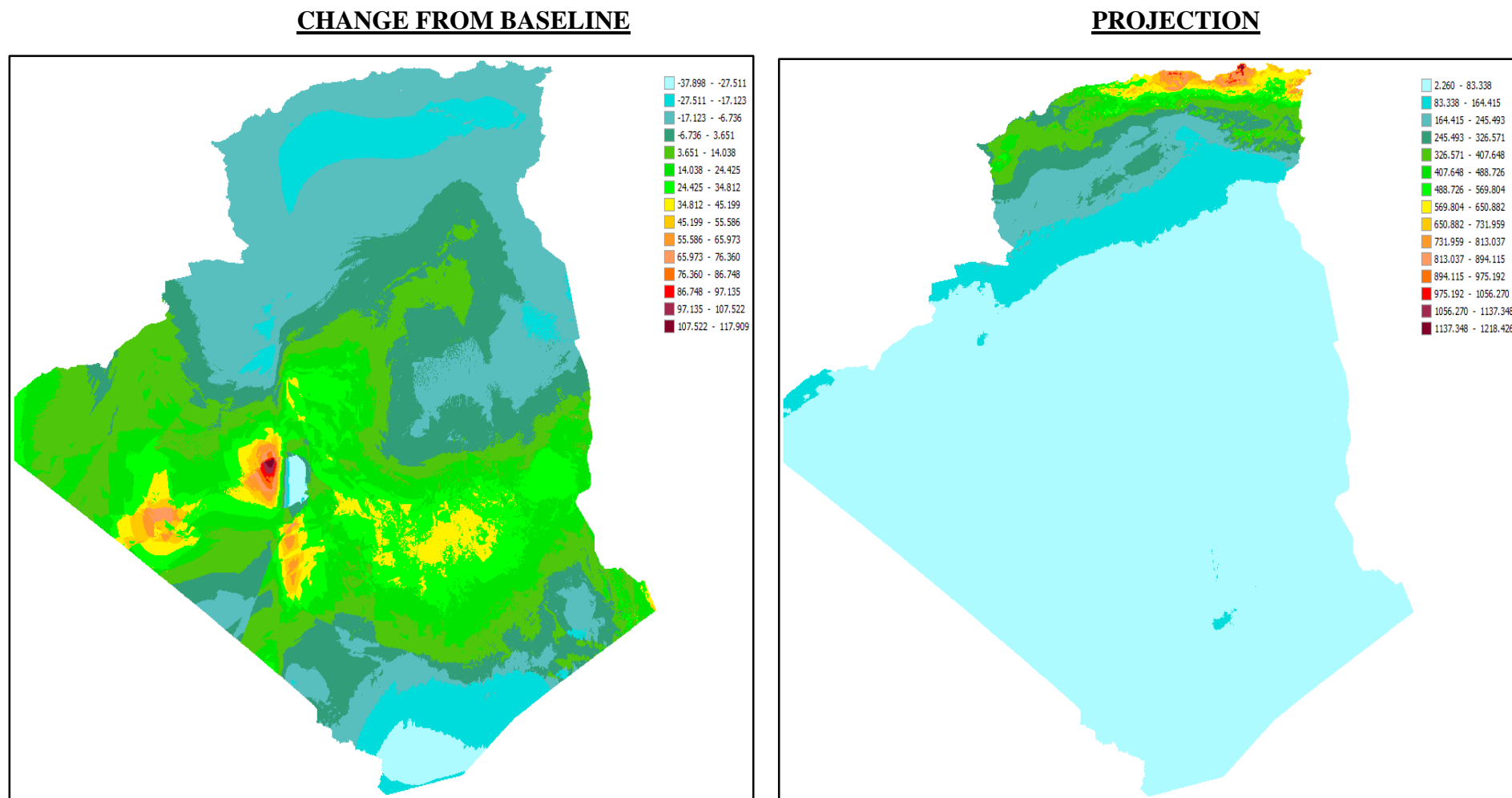


Figure VI.24. Projections climatiques de RR annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

CHANGE FROM BASELINE

PROJECTION

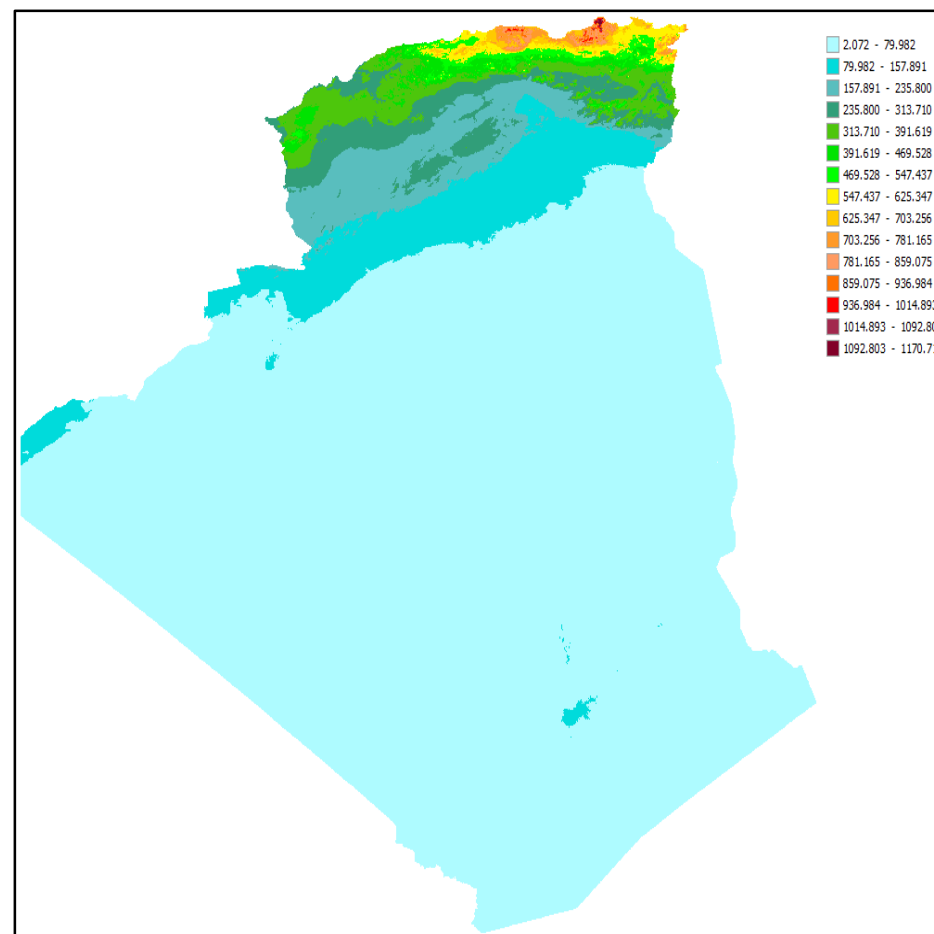
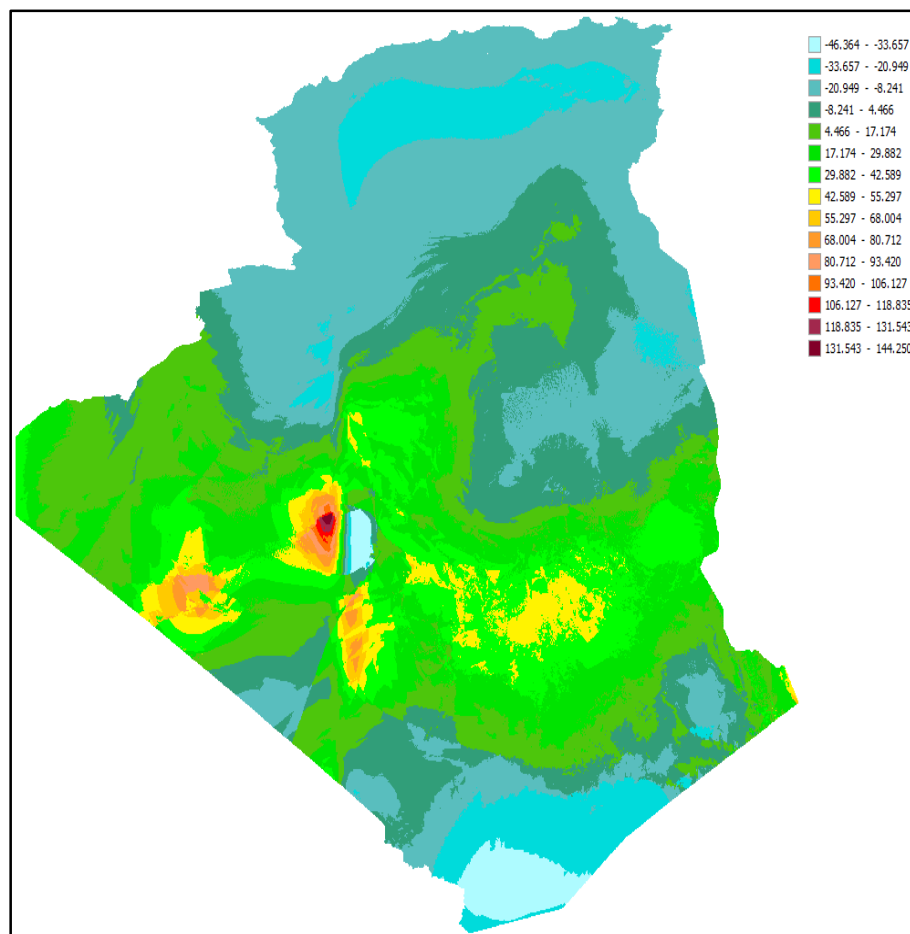


Figure VI.25. Projections climatiques de RR annuelle à l'horizon 2050 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

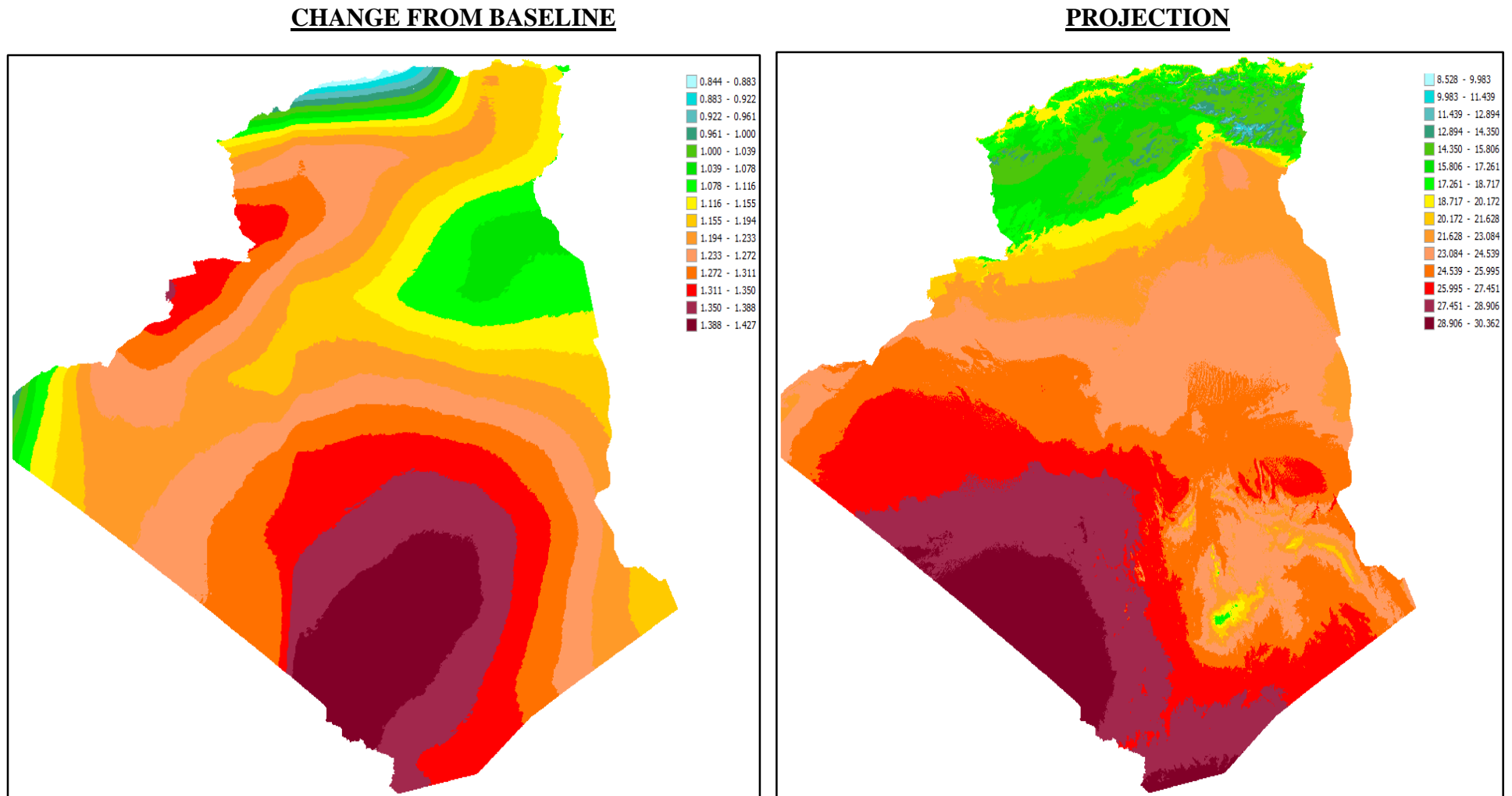


Figure VI.26. Projections climatiques de Tmean annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

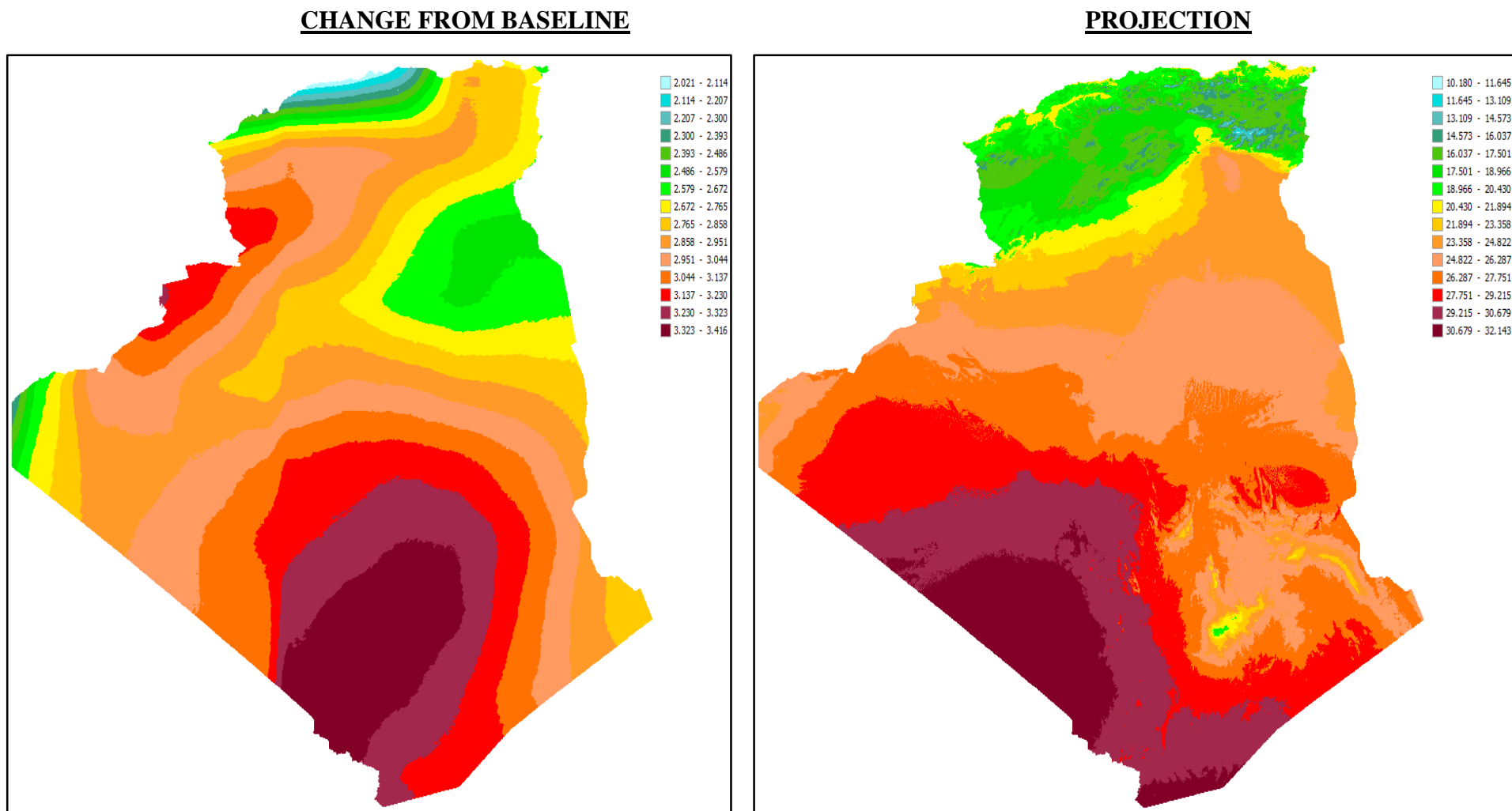


Figure VI.27. Projections climatiques de Tmean annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

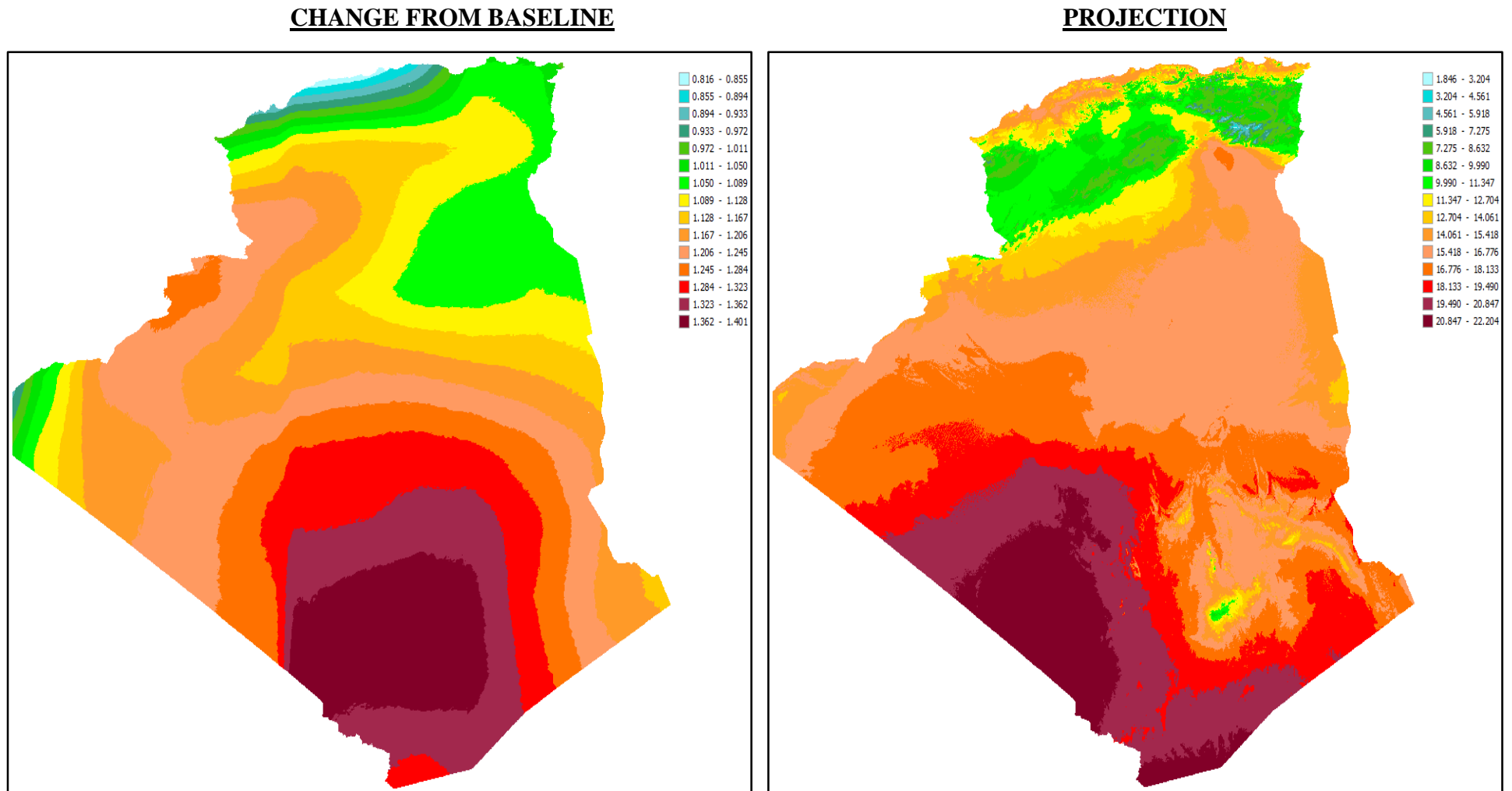


Figure VI.28. Projections climatiques de Tmin annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

CHANGE FROM BASELINE

PROJECTION

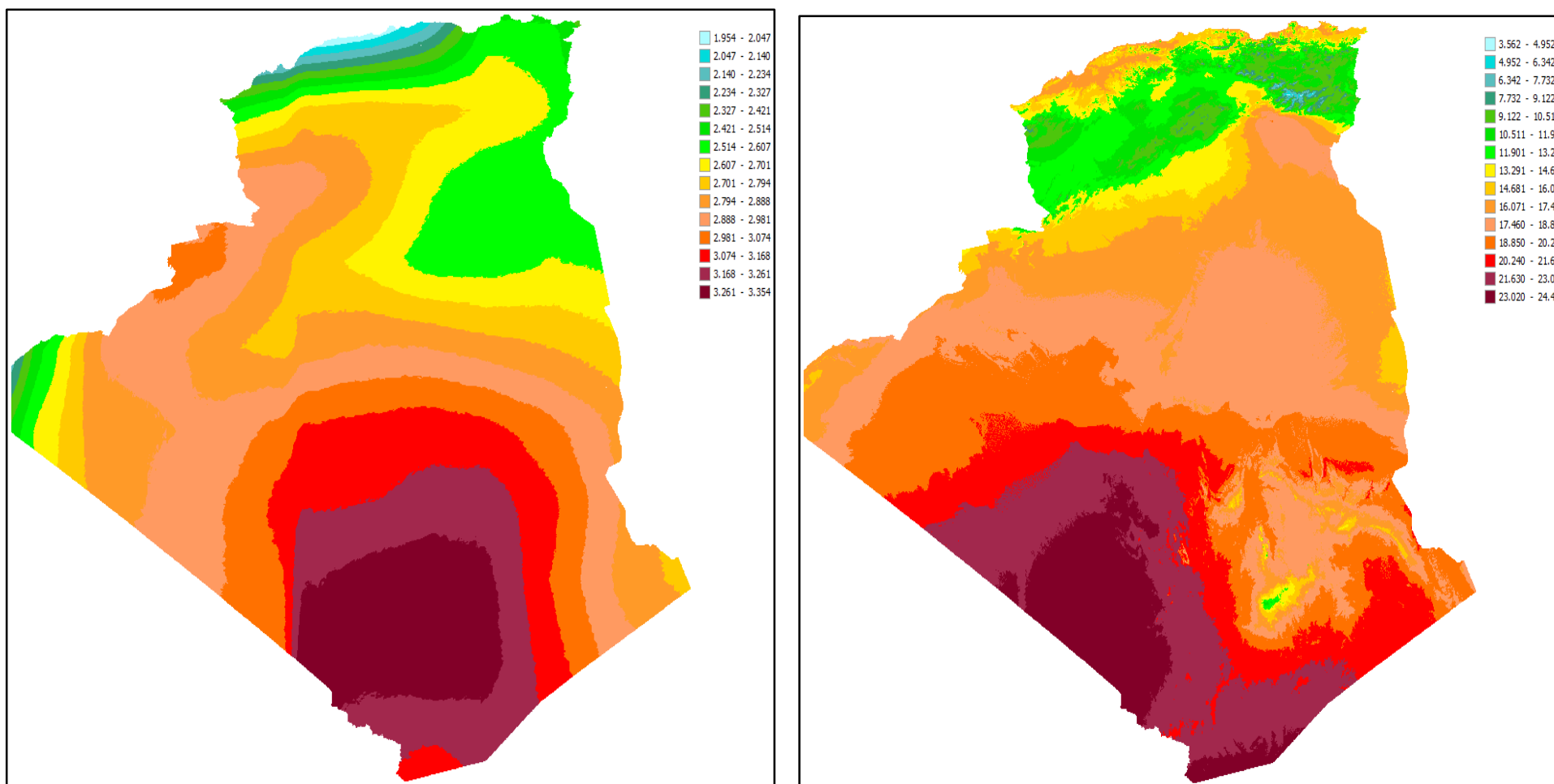
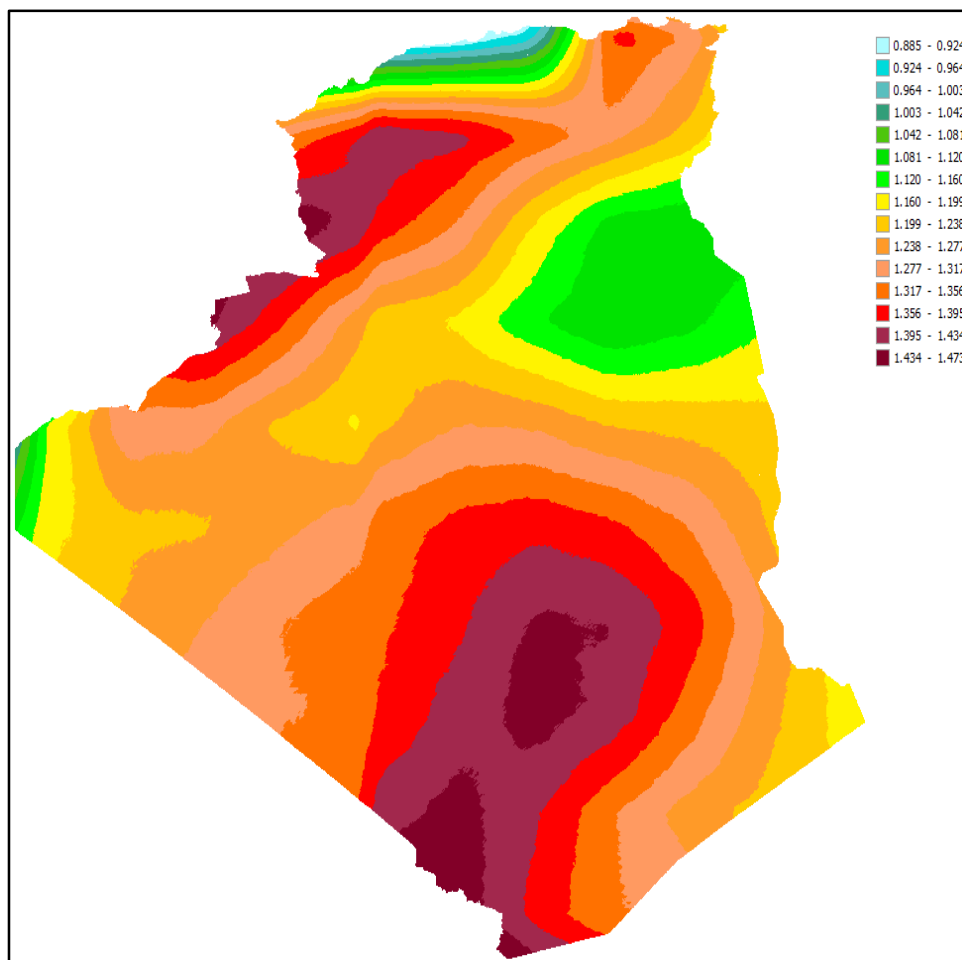


Figure VI.29. Projections climatiques de Tmin annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

CHANGE FROM BASELINE



PROJECTION

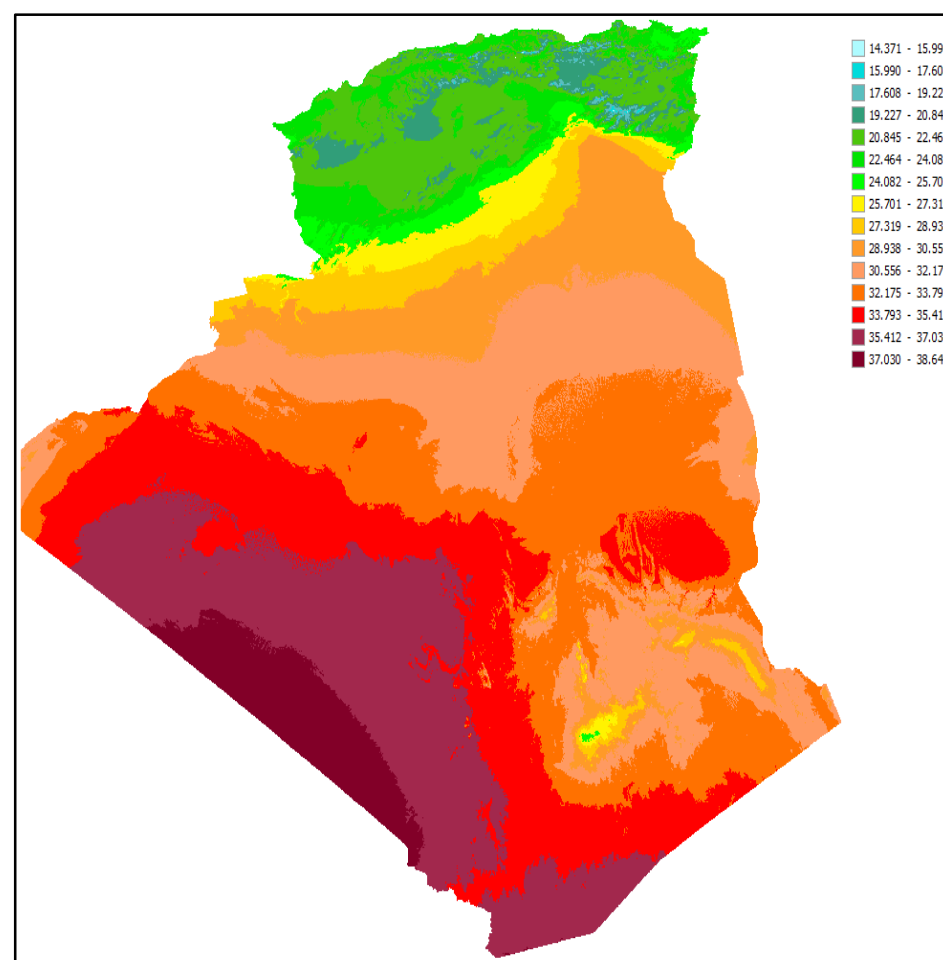


Figure VI.30. Projections climatiques de Tmax annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

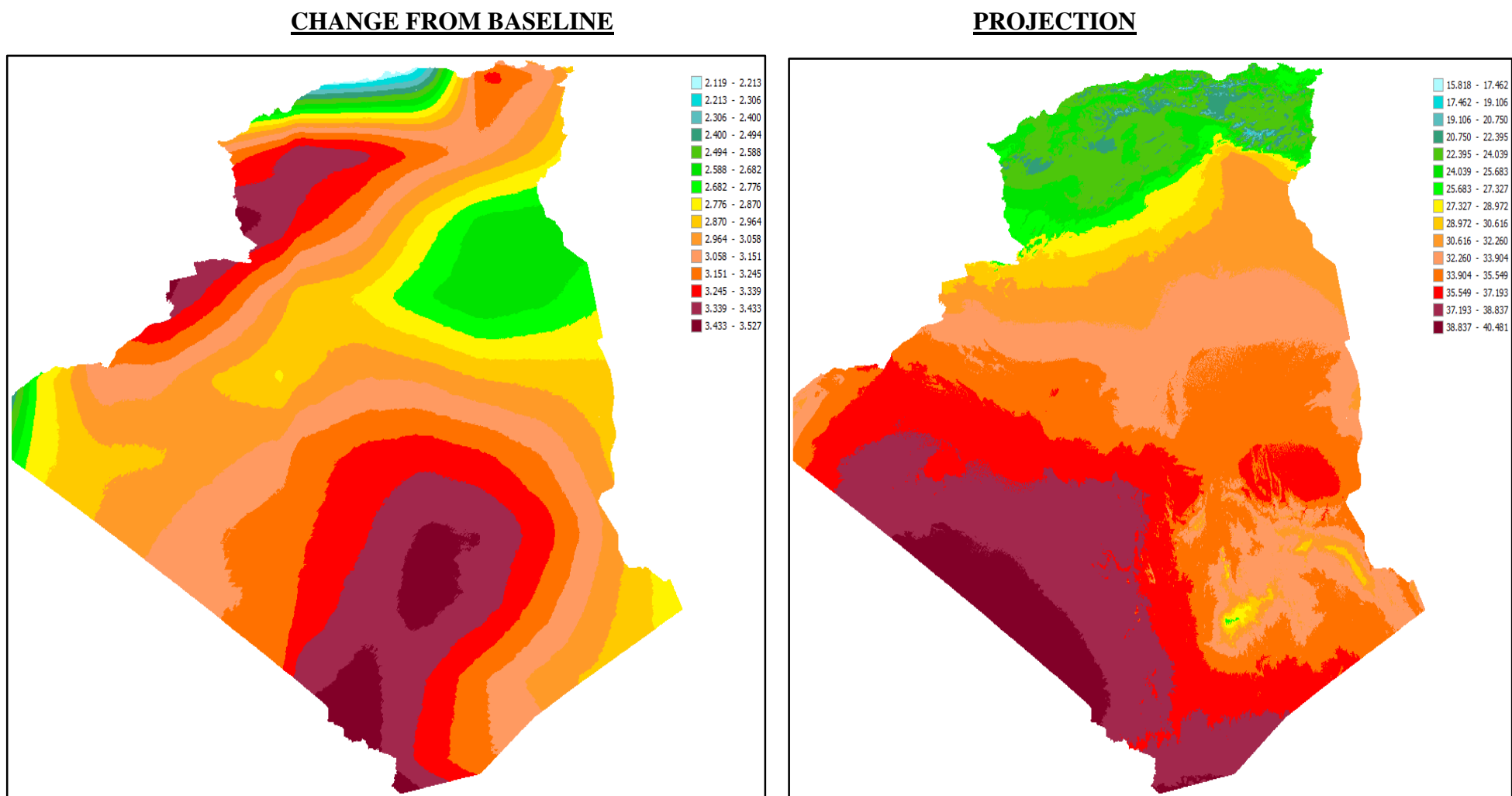
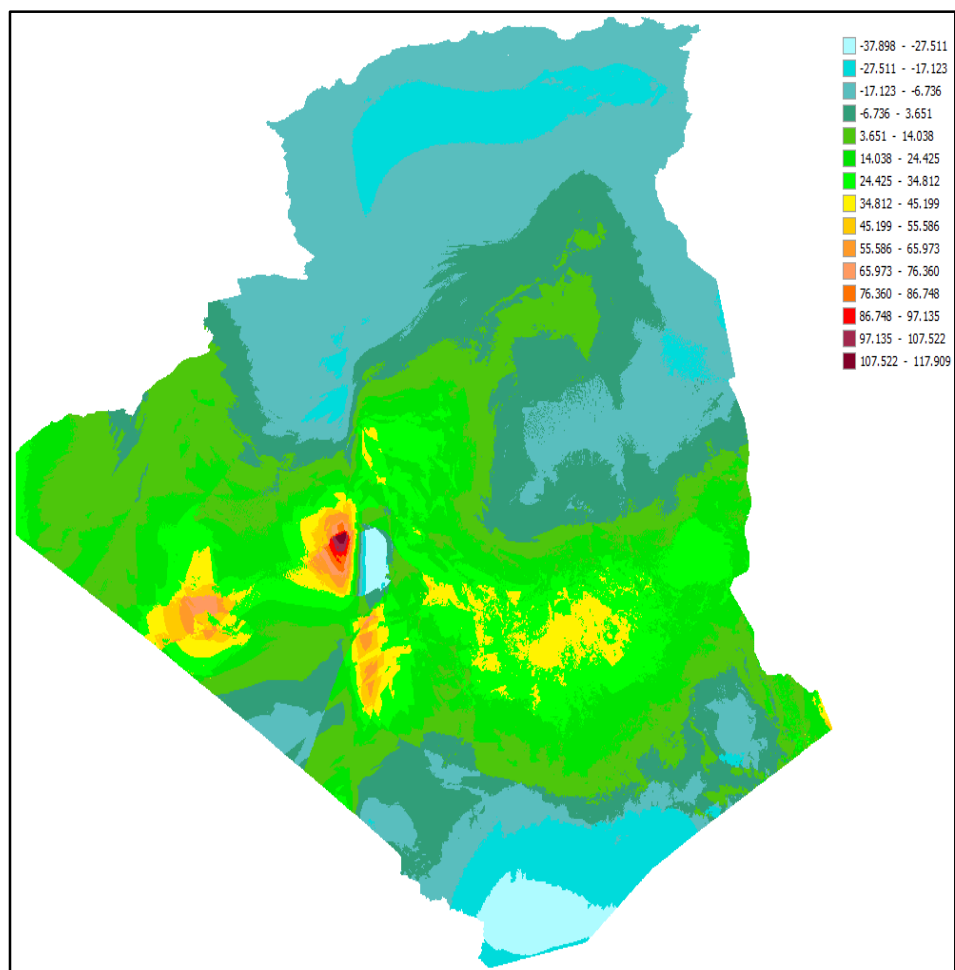


Figure VI.31. Projections climatiques de Tmax annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

CHANGE FROM BASELINE



PROJECTION

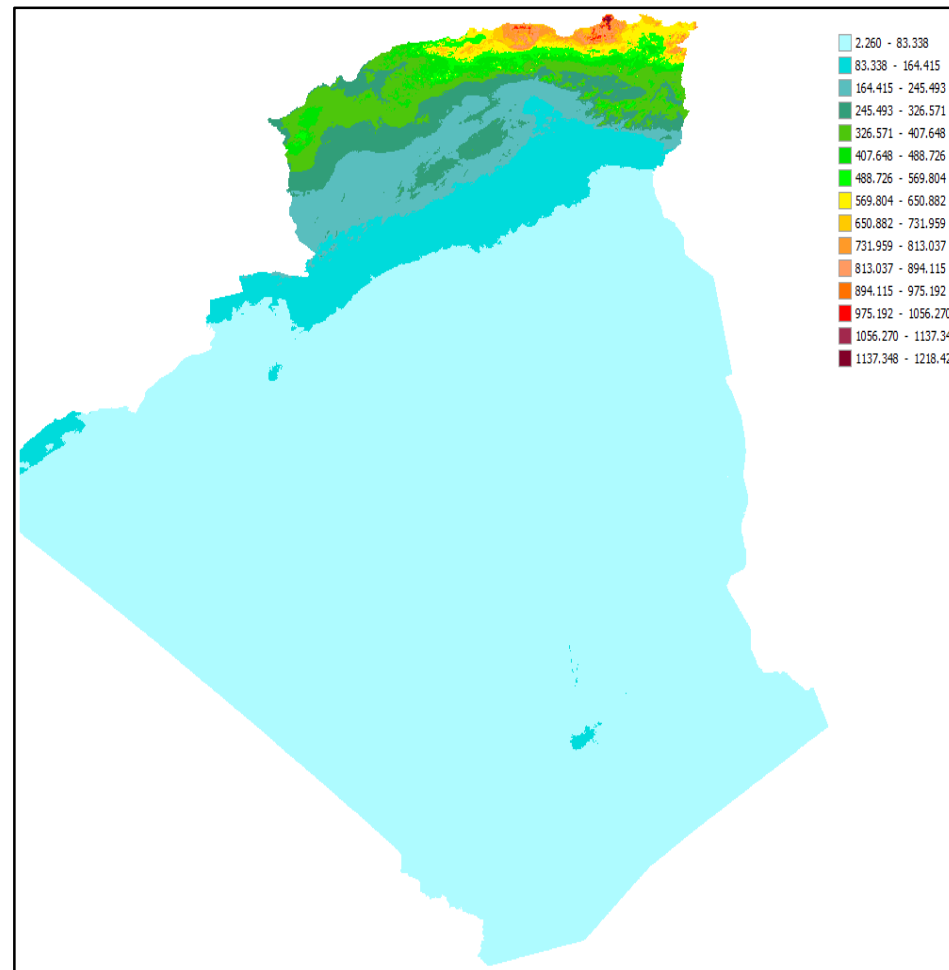


Figure VI.32. Projections climatiques de RR annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6 avec une sensibilité climatique moyenne.

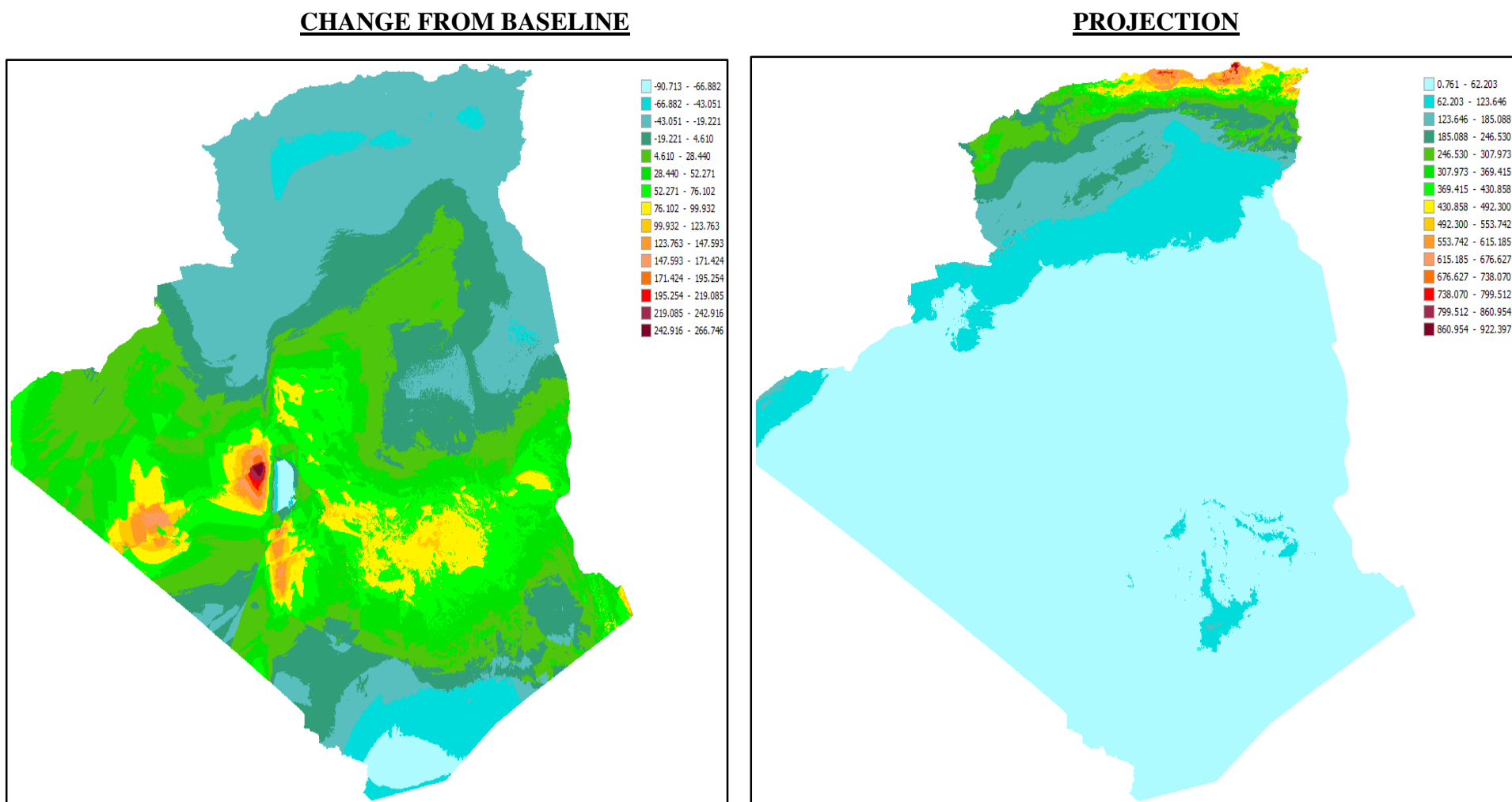


Figure VI.33. Projections climatiques de RR annuelle à l'horizon 2100 sur l'Algérie, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0 avec une sensibilité climatique moyenne.

Résultats et commentaires :

1- L'année 2050 :

a. La température moyenne :

La température moyenne annuelle est calculé à partir de la moyenne arithmétiques de température moyenne mensuelles, et celle-là était calculé à partir la moyenne des températures journalières.

Le modèle français CNRM-CM5 et selon le scénario RCP 2.6 (voir la figure VI.2.), illustre une augmentation de température moyenne à l'horizon de 2050, sur tout le territoire national, et qui variée de 0.6°C sur l'Oranie, et de 0.9°C au Nord de l'Algérie, jusqu'à 1.1°C au Sahara. Tandis que le modèle MPI-ESM-LR (voir la figure VI.18.), montre que cette augmentation de température moyenne variée de 0.8°C dans les littoraux de Mostaganem à Bejaia, et à 1°C au Nord-ouest et Centre , les oasis et Tindouf, et plus de 1.2°C au Sahara.

Le modèle allemand MPI-ESM-LR selon le scenario RCP 6.0 (voir la figure VI.3.), la température moyenne annuelle augmente de 1°C aux littoraux, 1.2°C allant jusqu'à 1.7°C au Sahara, et variée de 0.8°C à l'Oranie, de 0.9 à 1°C au Nord et plus de 1.2°C au Sahara selon le modèle CNRM-CM5 (voir la figure VI.3.).

b. La température maximale :

La moyenne annuelle de la température maximale est la moyenne arithmétique des températures maximales mensuelles, cette dernière est la moyenne arithmétique des températures maximales journalières.

La tendance de cette température à l'horizon de 2050 et pour le scenario RCP 2.6 (voir la figure VI.6.), augmente de 0.6°C sur le Nord de l'Algérie et de 0.9 à 1.2 °C sur le Sahara le maximum au tassili et Hoggar qui dépasse 1.3°C, selon le modèle CNRM-CM5, et de 0.8 à 1°C au Nord et plus de 1.5°C au Sahara selon le modèle MPI-ESM-LR (voir la figure VI.22.), et pour le scenario RCP 6.0, ainsi le modèle CNRM-CM5, montre une augmentation de 0.7 à 0.9°C au Nord, de 1 à 1.1°C aux hautes plateaux , et plus de 1.4°C au Sud (voir la figure VI.7.), le modèle MPI-ESM-LR illustre une augmentation plus aggravé que le modèle CNRM-CM5 (voir la figure VI.23.). Cette augmentation de passe 1°C au Nord du pays. Entre 1.4 et 1.6°C au Nord-Est et même au Sahara.

c. La température minimale :

La moyenne annuelle de la température minimale est la moyenne arithmétique des températures minimales mensuelles, cette dernière est la moyenne arithmétique des températures minimales journalières.

La tendance de température minimale à l'horizon de 2050 par apport celle de l'année de référence 1996 et pour le scenario de RCP 2.6, augmente de 0.5°C sur le Nord de l'Algérie et de 0.9 à 1.3°C sur le Sahara, selon le modèle

CNRM-CM5 (voir la figure VI.4.), et de 0.8 à 1°C au Nord et plus de 1.2°C au Sahara selon le modèle MPI-ESM-LR(voir la figure VI.20.), et pour le scénario RCP 6.0 (voir la figure VI.21.), ainsi le modèle CNRM-CM5 montre une augmentation de 0.5 à 0.6°C au Nord, de 1 à 1.1°C aux hautes plateaux , et plus de 1.2°C au Sud , le modèle MPI-ESM-LR illustre une augmentation plus aggravé que le modèle français. Cette augmentation de passe 0.9°C au Nord du pays. Entre 1 et 1.2°C au Nord-Est les oasis et Tindouf, et atteint 1.7°C au Hoggar et extrême sud de pays.

d. Les précipitations :

La formation des précipitations fait intervenir de très nombreux processus, la plupart étant de toutes petites échelles. Leur modélisation dans les modèles climatiques planétaires nécessite de nombreuses approximations, et les précipitations demeures une des grandeurs que les modèles ont le plus de difficulté à simuler correctement. De façon très générale les pluies sont les plus abondantes dans les régions Sahariennes, le maximum des précipitions se trouve dans la région Nord du pays, notamment la partie Nord-Est.

Selon le modelé CNRM-CM5 et selon le scénario RCP 2.6, et en 2050 (voir la figure VI.16.), la pluie dépassent 600 mm aux régions Nord-Est du pays, de 300 à 500 mm sur la région Ouest, ces hauteurs de pluie et en comparant avec celles de l'année de référence 1996 sont quasiment- stationnaires, une petite diminution de quelques millimètres touche toute la partie nord de l'Algérie, Les quantités de pluie ne dépassent pas les 100 mm sur toute la région Sud, avec une augmentation de 30 mm à la moyenne au Nord de Djanet sud d'Ouargla et à Adrar.

Par contre le modèle MPI-ESM-LR, et selon le même scénario RCP 2.6 (voir la figure VI.24.), le taux annuel de pluie dépasse 600 mm seulement aux régions de Djurjura Jijel et Skikda, inférieur à 300 mm au l'Oranie et Mostaganem, avec une diminution de 30 mm à la moyenne sur tout le nord de l'Algérie.

Au Sahara, la quantité de pluie ne dépasse pas 80 mm avec une augmentation de 30 à 80 mm au centre de Sahara.

Le scénario RCP 6.0, et selon le modèle français CNRM-CM5 (voir la figure VI.17.), donne pratiquement des mêmes quantités de précipitations que selon le 1^{er} scénario, sur tous les territoires nationaux, et comparants avec les normales climatiques, le modèle confirme que les précipitations seront augmentées de plus de 40 mm au centre de Sahara. Le modèle MPI-ESM-LR, par cette projection (voir la figure VI.25.) donne les mêmes quantités de pluies que celles de 1^{er} scénario.

2- L'année 2100 :

a. La température moyenne :

Le modèle français CNRM-CM5 et selon le scénario RCP 2.6 (voir la figure VI.10.) illustre une augmentation de température moyenne à l'horizon de 2100 sur tout le territoire national, et qui variée de 0.6°C sur l'Oranie, et de 0.8°C au Nord de l'Algérie jusqu'à 1.2°C au Sahara. Tandis que le modèle MPI-ESM-LR (voir la figure VI.18.) montre que cette augmentation de température moyenne variée de 0.8 dans les littoraux de Mostaganem à Bejaia, et à 1.1°C au Nord-ouest et centre , les oasis et Tindouf, et plus de 1.3°C au Sahara.

Le scénario RCP 6.0, la température moyenne annuelle augmente de 1.4°C aux littoraux, 2°C allant jusqu'à 2.9°C au Sahara, selon le modèle MPI-ESM-LR (voir la figure VI.27), et variée de de 2 à 2.5°C au Nord et plus de 3.4°C au Sahara selon le modèle CNRM-CM5 (voir la figure VI.11.).

b. La température maximale :

La tendance de cette température à l'horizon de 2100 et pour le scenario de RCP 2.6, augmente de 0.8°C sur le nord de l'Algérie et de 0.9 à 1.2 °C sur le Sahara, selon le modèle CNRM-CM5(voir la figure VI.14.), et de 0.8 à 1°C au Nord et plus de 1.4°C au Sahara selon le modèle MPI-ESM-LR(voir la figure VI.26.), et pour le scenario RCP 6.0, ainsi le modèle CNRM-CM5 (voir la figure VI.11.), montre une augmentation de 1.4 à 2°C au Nord, de 2 à 2.6°C au Sahara et plus de 2.7°C au Tassili et Hoggar, le modèle MPI-ESM-LR (voir la figure VI.27.) illustre une augmentation plus aggravé que le modèle CNRM-CM5. Cette augmentation de passe 2°C au Nord –centre du pays. Entre 2.4 et 2.6°C aux oasis l'intérieur centre et Ouest, et de 2 à 2.5°C à l'Est les hautes plateaux le Sahara et atteint 3°C au Hoggar et Tassili et même au l'atlas Saharien Ouest.

c. La température minimale :

La tendance de température minimale à l'horizon de 2100 par apport celle de l'année de référence 1996 et pour le scenario de RCP 2.6, augmente de 0.4 à 0.8°C sur le nord de l'Algérie et de 0.8 à 1.2°C sur le Sahara, selon le modèle CNRM-CM5 (voir la figure VI.12.) , et de 0.8 à 1°C au Nord et plus de 1.1°C à 1.4°C au Sahara selon le modèle MPI-ESM-LR (voir la figure VI.28.), et pour le scenario RCP 6.0, ainsi le modèle CNRM-CM5 (voir la figure VI.13.), montre une augmentation de 1 à 1.9°C au Nord, de 2 à 2.3°C aux hauts plateaux, et plus de 3°C au Sud, le modèle MPI-ESM-LR (voir la figure VI.29.) illustre une augmentation plus aggravé que le modèle français. Cette augmentation de passe 1.9°C au Nord du pays. Entre 2 et 2.5°C au Nord-Est les oasis et Tindouf, et atteint 3.2°C au Hoggar et extrême sud de pays.

d. Les précipitations :

Selon le modèle CNRM-CM5 et à l'horizon 2100, le scénario RCP 2.6 indique que la pluie dépassant 750 mm aux régions Nord-Est du pays, et de 250 à 450 mm sur la région de Nord-Ouest (voir la figure VI.16.), ces hauteurs de pluie et en comparant avec celles de l'année de référence 1996 sont augmentées avec un taux de cumul de 3 à 5 mm. Les quantités de pluie ne dépassent pas les 100 mm sur toute la région Sud, avec une augmentation de 25 mm à la moyenne au Sud de Illizi (Nord de Djanet) Sud d'Ouargla et à Adrar par contre il y'a une diminution de 10 mm bien remarquable sur le Sud de Djanet et l'Ouest de Tamanrasset. Et par le modèle MPI-ESM-LR, et selon le même scénario, de 2.6(voir la figure VI.32.), le taux annuel de pluie dépasse 650 mm seulement aux régions de Djurdjura Jijel et Skikda, inférieur à 250 mm au l'Oranie et Mostaganem et une partie de l'Ouest de Ghilizane, avec une diminution de 20 mm à la moyenne sur tout le Nord de l'Algérie et une diminution très remarquable sur les régions hautes plateaux. Au Sahara, la quantité de pluie ne dépasse pas 100 mm avec une augmentation de 30 à 80 mm au centre de Sahara (Adrar et nord de Tamanrasset). Le scénario RCP 6.0, et selon le modèle CNRM-CM5 (voir la figure VI.17.), donne pratiquement des mêmes quantités de précipitations que selon le 1er scénario, sur tous les territoires nationaux, et comparant avec les normales climatiques, le modèle confirme que les participations seront augmentées de plus de 40 mm au centre de Sahara. Le modèle MPI-ESM-LR, par cette projection (voir la figure VI.33) donne les mêmes quantités de pluies que celles de 1^{ère} scénario.

❖ **Evolution climatique des températures et précipitations annuelles (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par les modèles climatiques CNRM-CM5 et MPI-ESM-LR, sous les scénarios RCP 2.6 et RCP 6.0 :**

Dans cette partie, on a étudié l'évolution temporelle de différentes variables climatiques (les températures moyennes (Tmean), maximales (Tmax), minimales (Tmin), et les précipitations annuelles (RR)), à la ville de Mostaganem de 1995 à 2100.

Deux scénarios ont été choisis pour cette étude, le scénario le plus optimiste RCP 2.6, et le scénario le plus réaliste selon le GIEC : RCP 6.0.

Les coordonnées géographiques de la ville de Mostaganem sont :

Latitude : 35° 55' 52'' Nord.

Longitude : 0°05'21" Est.

La visualisation de ces projections sur les cartes géographiques, par l'utilisation du logiciel SimCLIM2013 donne les résultats suivants :

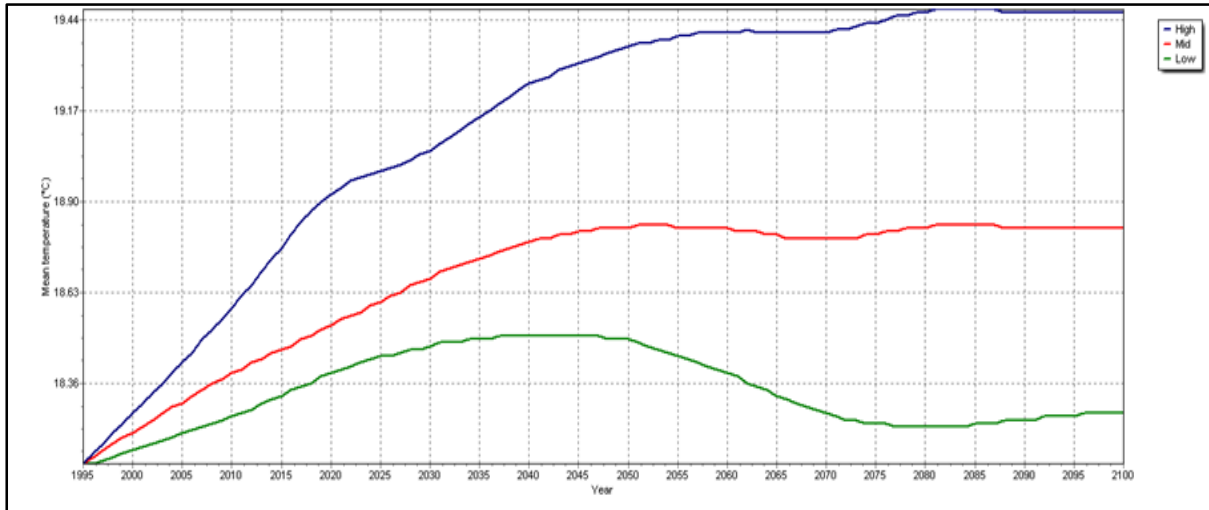


Figure VI.34. Evolution climatique de Tmean annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6.

Les graphes (figure VI.34.) du modèles CNRM-CM5 (figure 1) montre une augmentation de la moyenne de la température de l'environ de 1° à l'horizon des années 2050.

L'augmentation la plus remarquable était le cas où l'atmosphère à une hausse sensibilité au forçage radiatif selon ce scénario, et qui continué à augmenter jusqu'à 2010 de plus de 1.5°. Tandis que la température reste stable après les années 2050 jusqu'à 2010 le cas où l'atmosphère à une sensibilité moyenne, et commence à diminuer si l'atmosphère à une sensibilité basse.

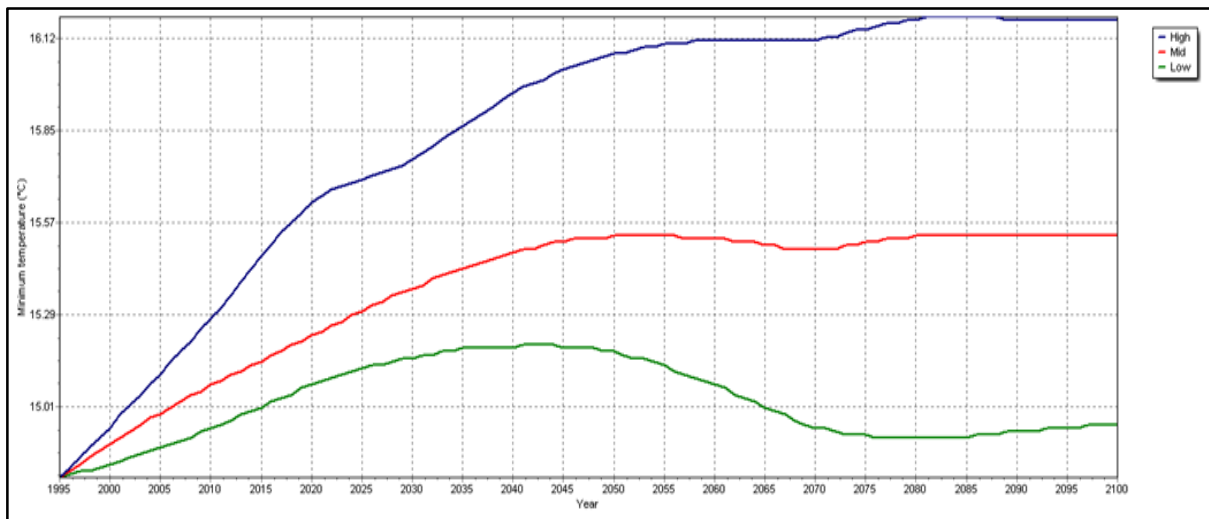


Figure VI.35. Evolution climatique de Tmin annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6.

D'après le graphe ci-dessus, on remarque une augmentation de la température min jusqu'à l'année 2050, où l'évolution change selon la sensibilité de l'atmosphère, tel que, quand ce dernier a une forte sensibilité, la température minimale augmente, avec une sensibilité moyenne, elle reste stationnaire, et enfin, à faible sensibilité, elle diminue clairement, jusqu'à environ 2070, où elle reprend un chemin stationnaire.

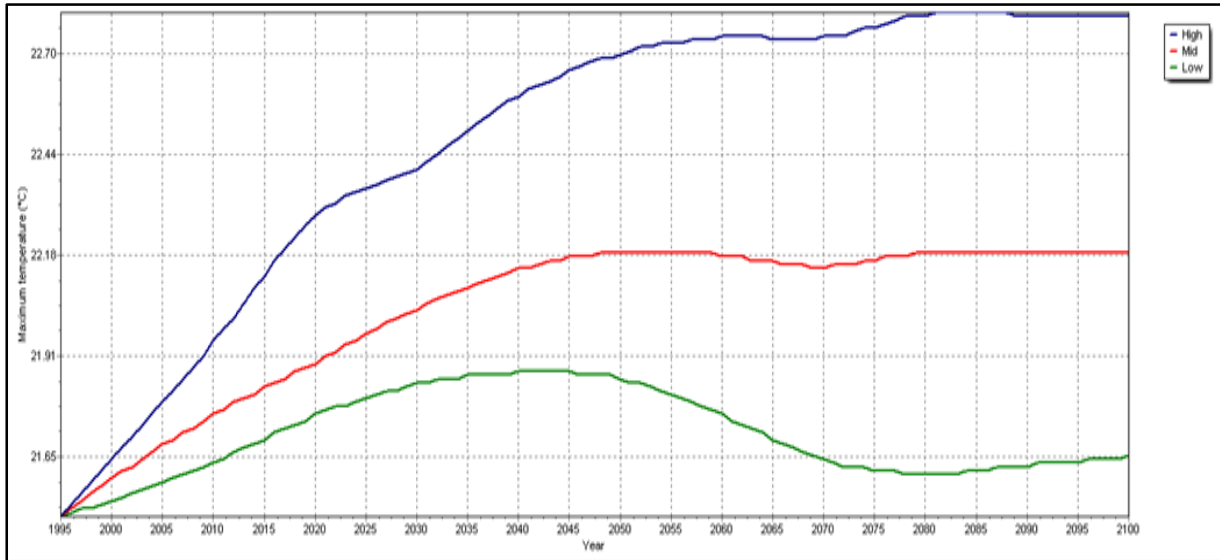


Figure VI.36. Evolution climatique de Tmax annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6.

D'après le graphe ci-dessus, on remarque une augmentation de la température max jusqu'à l'année 2050, où l'évolution change selon la sensibilité de l'atmosphère, tel que, quand ce dernier a une forte sensibilité, la température maximale augmente, avec une sensibilité moyenne, elle reste stationnaire, et enfin, à faible sensibilité, elle diminue clairement, jusqu'à environ 2070, où elle reprend un chemin stationnaire.

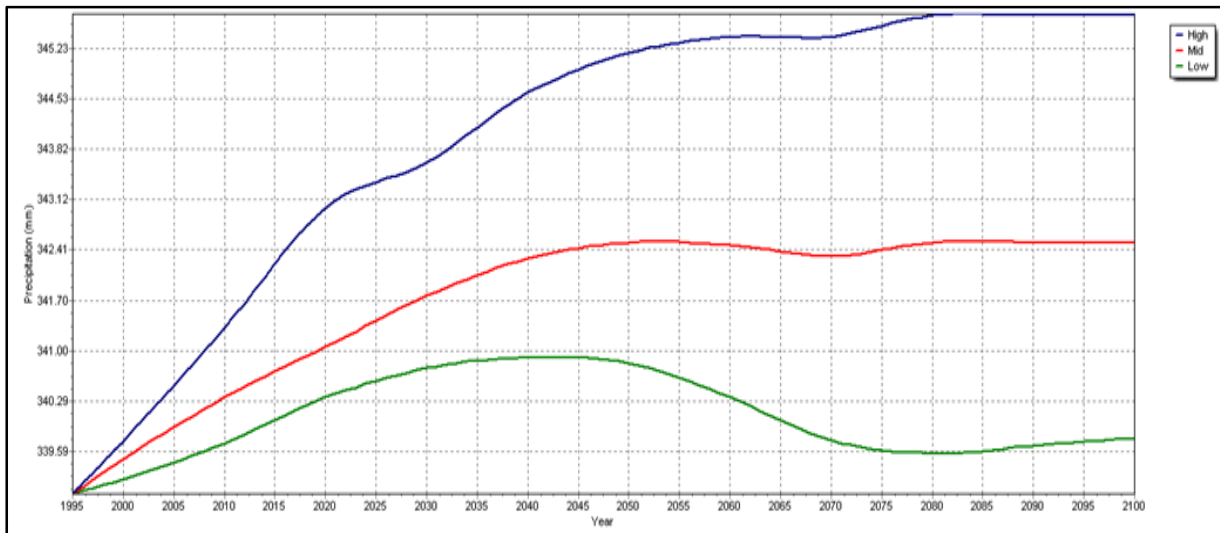


Figure VI.37. Evolution climatique de RR annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 2.6.

D'après le graphe au-dessus, on constate que le taux de précipitation augmente de façon exponentielle jusqu'à 2050 où elle augmente lentement quand la sensibilité de l'atmosphère est grande, puis quand cette dernière est moyenne, elle devient stationnaire, puis diminue quand la sensibilité est basse.

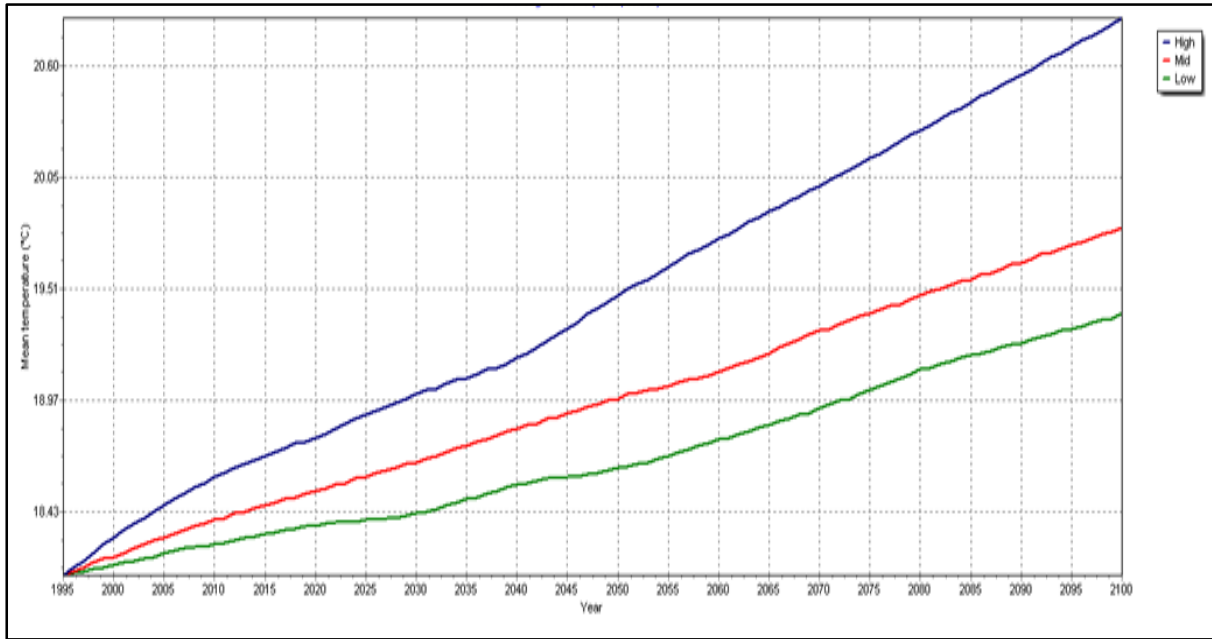


Figure VI.38. Evolution climatique de T_{mean} annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0.

Les graphes (Figure VI.38.) montrent que La température augmente d'une façon linéaire de 1996 à 2100, pour les trois sensibilités de l'atmosphère.

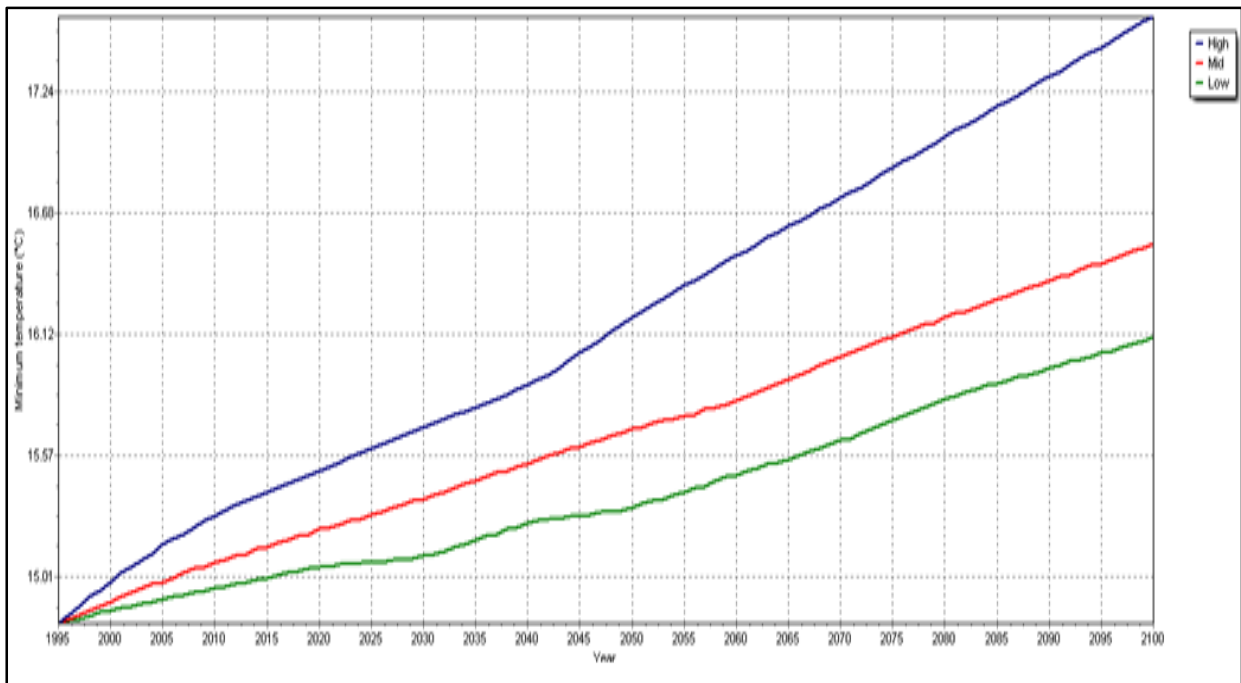


Figure VI.39. Evolution climatique de T_{min} annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0.

D'après le scénario RCP6.0 ; la température minimale augmente de façon quasi-linéaire au fil des années, quel que soit la sensibilité climatique.

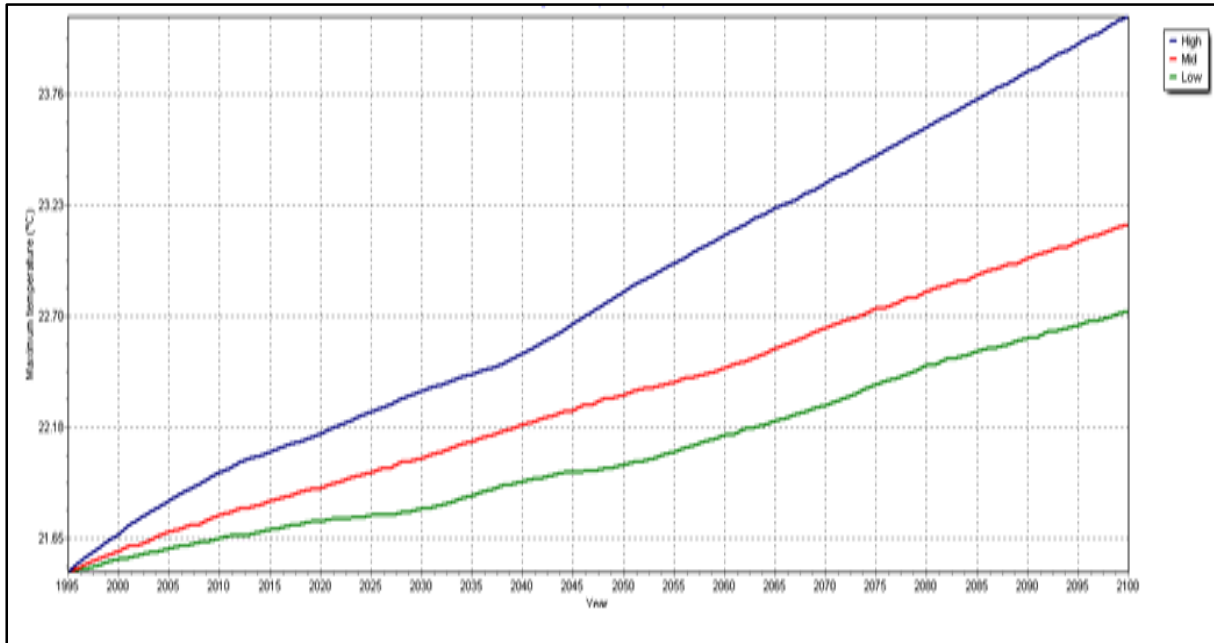


Figure VI.40. Evolution climatique de Tmax annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0.

D'après le scénario RCP6.0 ; la température maximale augmente de façon quasi-linéaire au fil des années, quelque soit la sensibilité climatique.

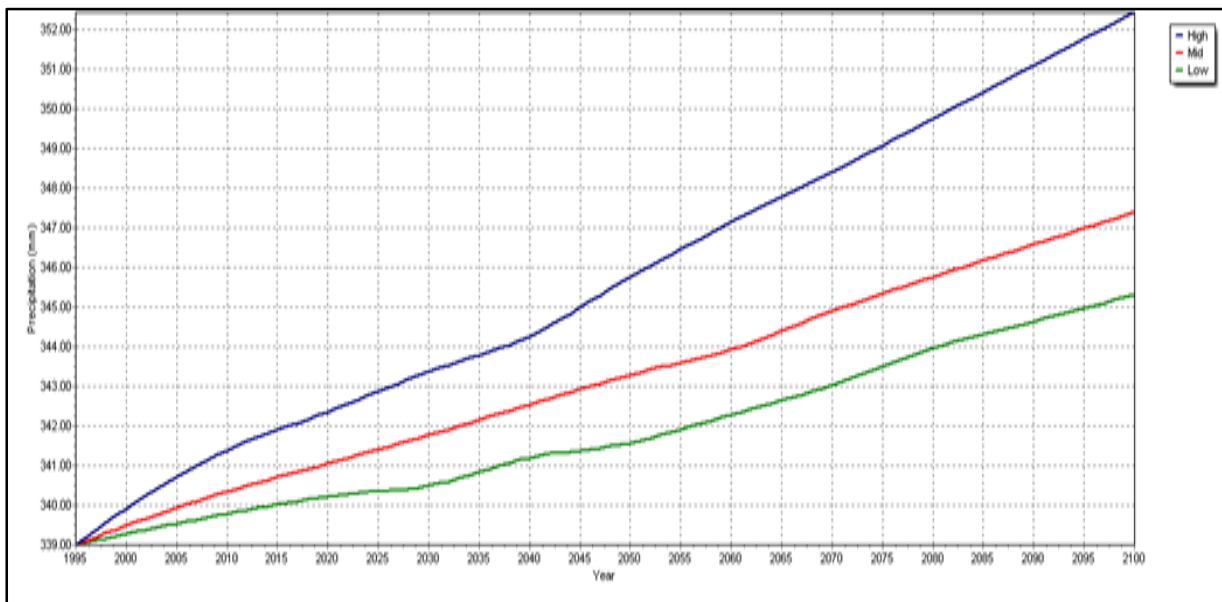


Figure VI.41. Evolution climatique de RR annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle CNRM-CM5, sous le scénario RCP 6.0.

D'après le graphe au-dessus, on remarque que, les précipitations augmentent linéairement quel que soit la sensibilité climatique.

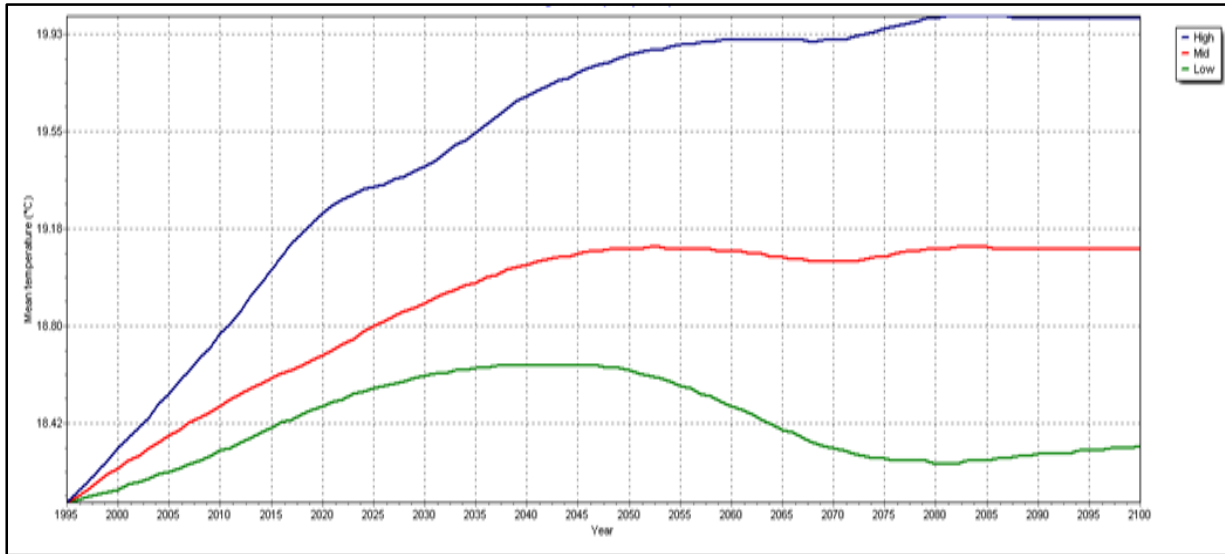


Figure VI.42. Evolution climatique de Tmean annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6.

Les graphes du modèle MPI-ESM-LR (Figure VI.42.) montre une augmentation de la moyenne de la température de l'environ de 1° à l'horizon des années 2050 a la même allure que modèle CNRM-CM5.

L'augmentation la plus remarquable était le cas où l'atmosphère à une hausse sensibilité au forçage radiatif selon ce scénario, et qui continué à augmenter jusqu'à 2010 de plus de 1.5°. Tandis que la température reste stable après les années 2050 jusqu'à 2010 le cas où l'atmosphère à une sensibilité moyenne, et commence à diminuer si l'atmosphère à une sensibilité basse.

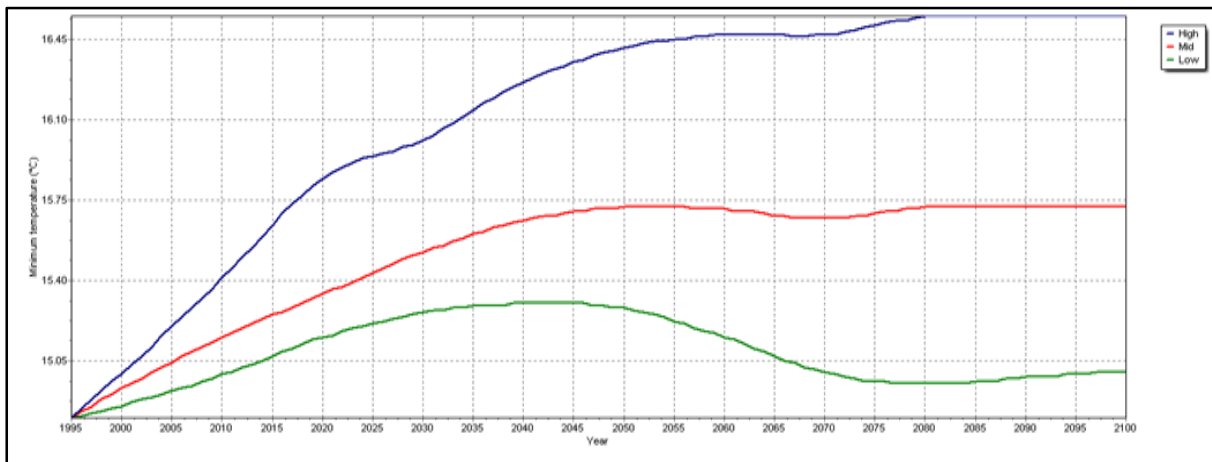


Figure VI.43. Evolution climatique de Tmin annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6.

D'après la figure VI.43., on remarque une augmentation exponentielle apparente dans la température minimale, elle continue jusqu'à 2045, où elle continue à augmenter quand la sensibilité de l'atmosphère est grande, quand elle est moyenne elle reste stationnaire, avec une légère baisse pendant la décade 2065-2075, puis reste stationnaire, et en dernier, lorsque la sensibilité est légère, il ya une baisse claire jusqu'à 2085 où elle devient stationnaire.

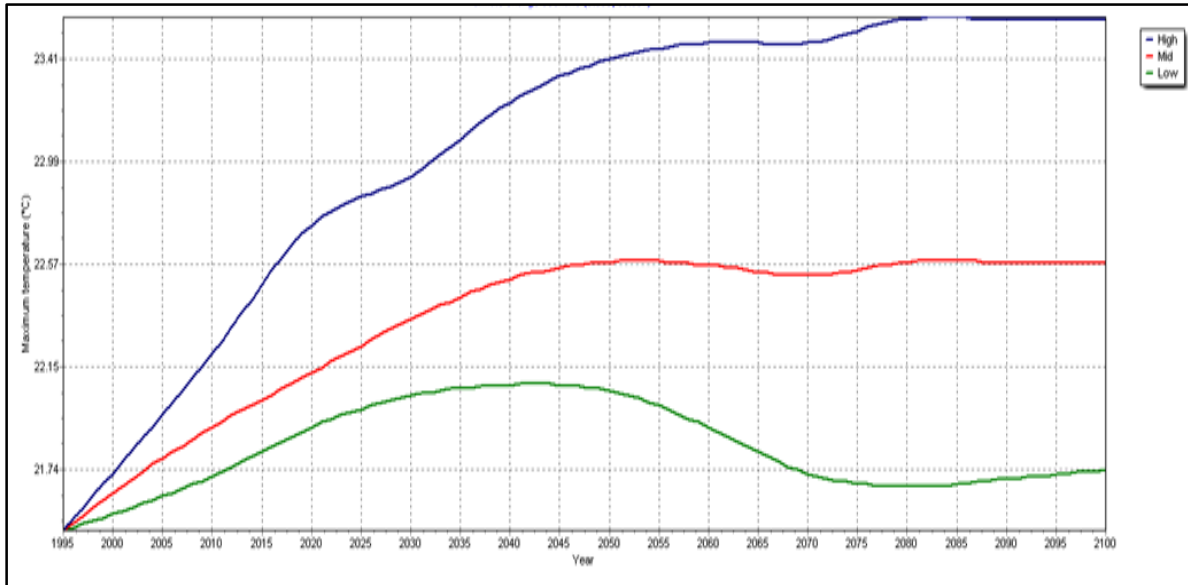


Figure VI.44. Evolution climatique de Tmax annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6.

D'après la figure VI.44., on remarque une augmentation exponentielle apparente dans la température minimale, elle continue jusqu'à 2045, où elle continue à augmenter quand la sensibilité de l'atmosphère est grande, quand elle est moyenne elle reste stationnaire, avec une légère baisse pendant la décade 2065-2075, puis reste stationnaire, et en dernier, lorsque la sensibilité est légère, il ya une baisse claire jusqu'à 2085 où elle devient stationnaire.

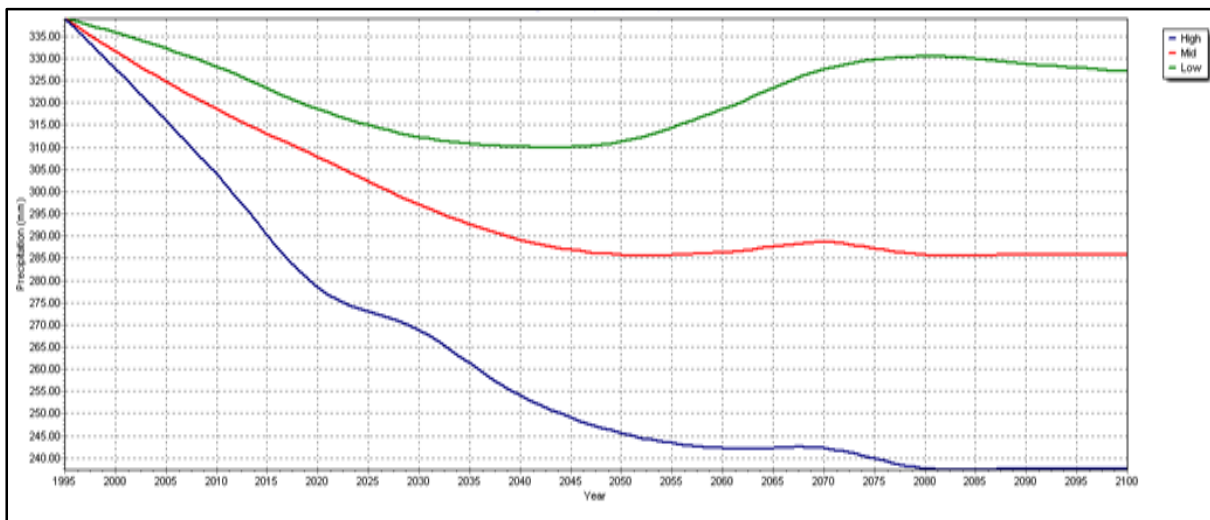


Figure VI.45. Evolution climatique de RR annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 2.6.

D'après la figure VI.45., on constate que le taux de précipitations normalisées diminuent au fil des années, et plus l'atmosphère est sensible, plus le taux de diminution augmente, une diminution décrite comme étant quasi-logarithmique. Jusqu'à un seuil où elle devient stationnaire vers les 2080. Moins l'atmosphère est sensible, moins la diminution est importante.

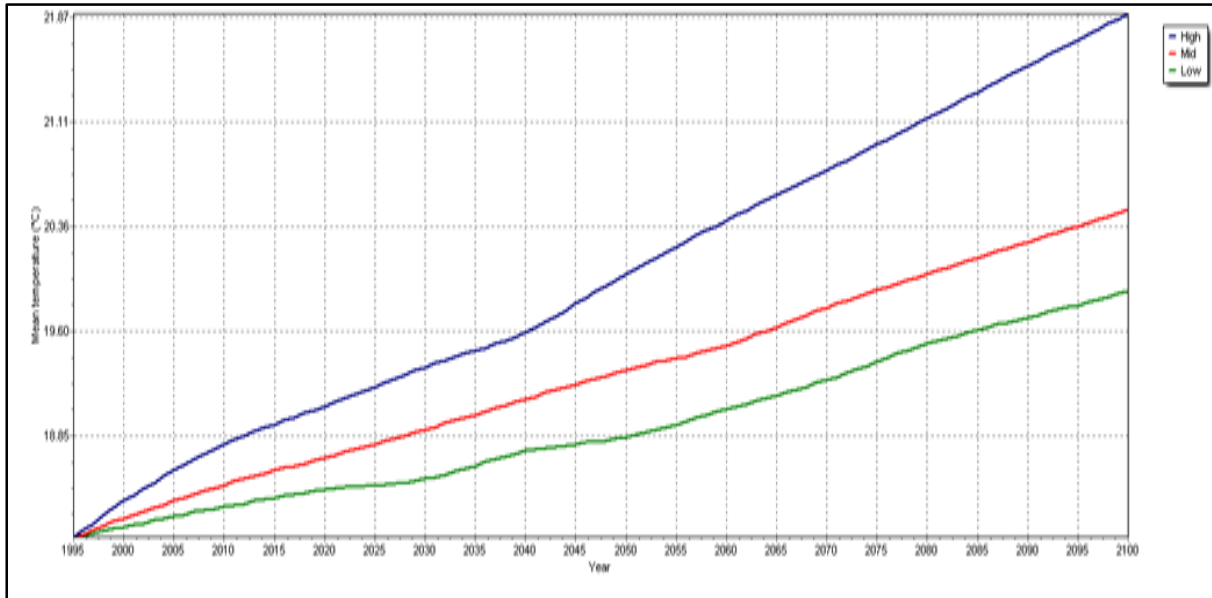


Figure VI.46. Evolution climatique de Tmean annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0.

Les graphes (Figure VI.46.) montrent que La température augmente d'une façon linéaire de 1996 à 2100, pour les trois sensibilités climatiques.

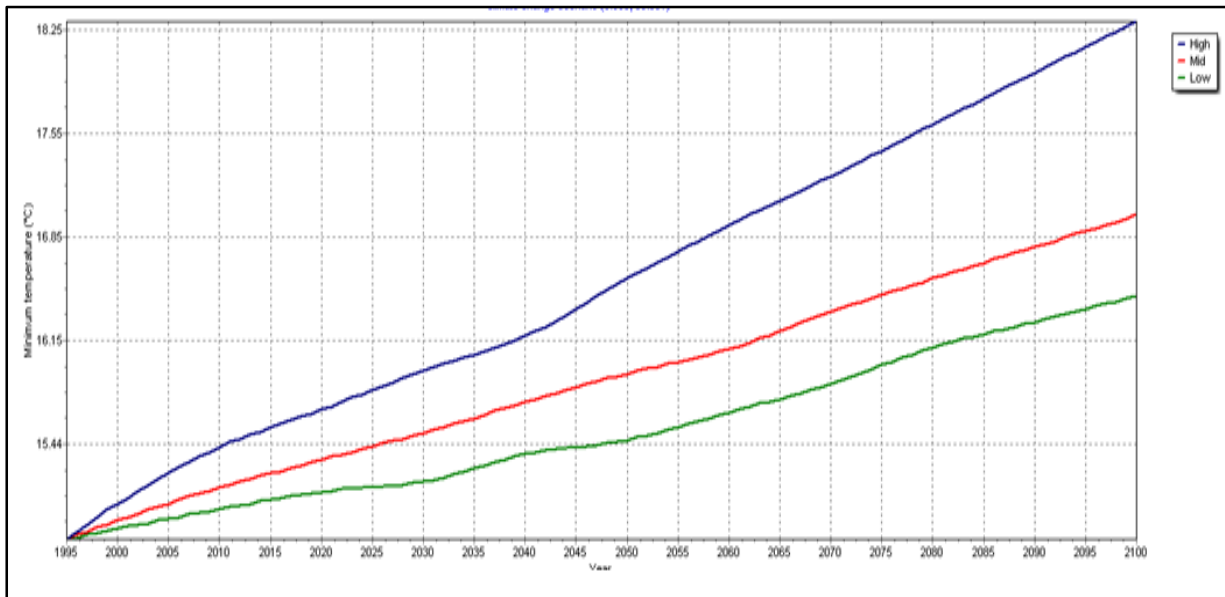


Figure VI.47. Evolution climatique de Tmin annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0.

Le graphe ci-dessus montre une augmentation linéaire de la température min au cours des années.

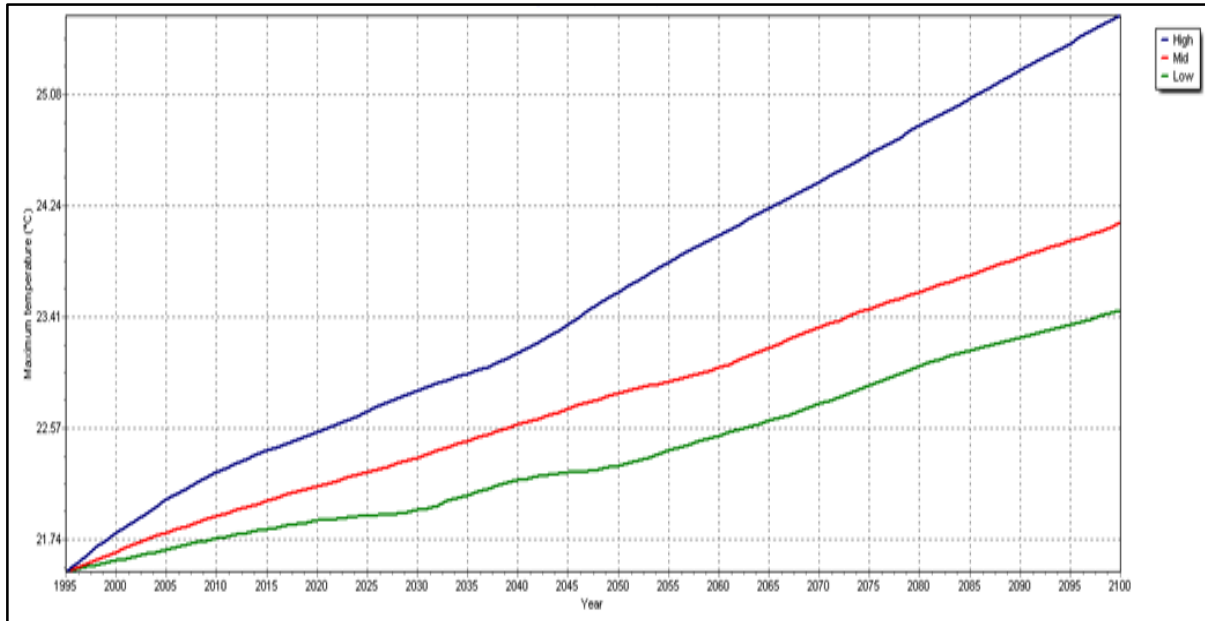


Figure VI.48. Evolution climatique de Tmax annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0.

Le graphe du modèle MPI-ESM-LR, ci-dessus, montre une augmentation linéaire de la température min au cours des années.

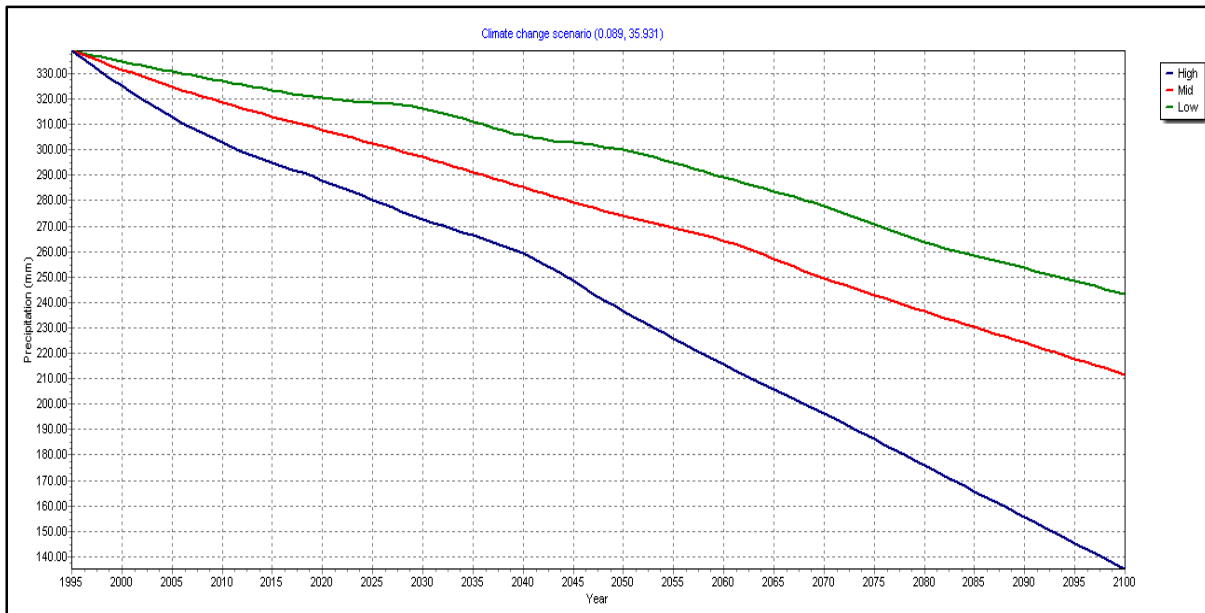


Figure VI.49. Evolution climatique de RR annuelle (1995-2100) sur la ville de Mostaganem, par le modèle MPI-ESM-LR, sous le scénario RCP 6.0.

La figure VI.49. montre que les précipitations diminuent linéairement jusqu'au 2100, plus la sensibilité de l'atmosphère est élevée, plus le taux de précipitations diminue.

Conclusion générale et perspectives :

L'objectif de ce présent mémoire est de simuler le climat futur et voir si l'amplitude du forçage climatique se traduisait par des tendances plus ou moins marquées sur les variables climatiques analysées en l'Algérie, à travers les paramètres de surface à savoir la température moyenne (**Tmean**), maximale (**Tmax**), minimale (**Tmin**), et les précipitations annuelles (**RR**).

Ces indicateurs sont calculés à partir des simulations globales qui ont été produites par l'utilisation des deux logiciels : **MAGICC** (Les simulations **AR4** couvrent 2050, avec un scénario AIB, par le biais de deux modèles climatiques **CNRM-CM3** et **IPSL-CM4**) et **SimCLIM2013** (Les simulations **AR5** couvrent 2050-2100, avec deux scénarios **RCP 2.6** et **RCP 6.0**, par le biais de deux modèles climatiques **CNRM-CM5** et **MPI-ESM-LR**, à une sensibilité climatique moyenne).

Les résultats obtenus par l'utilisation du simulateur MAGICC sont :

- Evolution de la température moyenne annuelle de surface simulée par le modèle **CNRM - CM3** à l'horizon de **2050**, en Algérie :
 - Avec prise en compte des aérosols, la température varie entre **1 à 3° C** avec une prédominance aux alentours de **2 à 2.5° C**, et sans prise en compte des aérosols, elle varie entre **1 à 2°C** avec une prédominance de **1 à 1.5 C**.
- Evolution de la température moyenne annuelle de surface simulée par le modèle **IPSL - CM4** à l'horizon de **2050**, en Algérie :
 - Avec prise en compte des aérosols, la température varie entre **1 à 3°C**, avec des valeurs plus élevées sur les continents que sur la méditerranée, et sans prise en compte des aérosols, elle varie entre **1 et 1.5°C** avec des températures plus basses sur la méditerranée que sur les continents.
- Evolution de la précipitation moyenne annuelle simulée par le modèle **CNRM - CM3** à l'horizon de **2050**, en Algérie, soit sans prise en compte des aérosols ou avec la prise en compte des aérosols diminuent entre **6 à 9 %** au Nord de l'Algérie, et entre **3 et 6 %** vers les hautes plateaux.

Les résultats obtenus par l'utilisation du simulateur SimCLIM2013 sont :

- Evolution de la température moyenne annuelle de surface simulée par le modèle **CNRM-CM5** à l'horizon de **2050**, en Algérie :

Selon le scénario RCP 2.6, la température varie entre **0.6 à 1.2° C** avec une prédominance de **0.9°C**, et elle varie de **0.8 à 1.5° C** avec une prédominance de **1.2°C** selon le scénario RCP 6.0

- Evolution de moyenne annuelle de la température minimale simulée par le modèle **CNRM-CM5** à l'horizon de **2050**, en Algérie :

Selon le scénario RCP 2.6, la température varie entre **0.4 à 1.3° C** avec une prédominance de **0.8°C**, et elle varie de **0.5 à 1.6° C** avec une prédominance de **1.1°C** selon le scénario RCP 6.0

- Evolution de moyenne annuelle de la température maximale simulée par le modèle **CNRM-CM5** à l'horizon de **2050**, en Algérie :

Selon le scénario RCP 2.6, la température varie entre **0.6 à 1.2° C** avec une prédominance de **1°C**, et elle varie de **0.7 à 1.5° C** avec une prédominance de **1.3°C** selon le scénario RCP 6.0

- Evolution de précipitations moyenne annuelle simulée par le modèle **CNRM-CM5** à l'horizon de **2050**, en Algérie :

Selon le scénario RCP 2.6, les précipitations varient entre **-14 à 34 mm** avec une prédominance de **4 mm**, et elles varient de **-18 à 42 mm** avec une prédominance de **-2 mm** selon le scénario RCP 6.0.

- Evolution de la température moyenne annuelle de surface simulée par le modèle **MPI-ESM-LR** à l'horizon de **2050**, en Algérie :

Selon le scénario RCP 2.6, la température varie entre **0.8 à 1.4° C** avec une prédominance de **1.1°C**, et elle varie de **1 à 1.8° C** avec une prédominance de **1.4°C** selon le scénario RCP 6.0

- Evolution de moyenne annuelle de la température minimale simulée par le modèle **MPI-ESM-LR** à l'horizon de **2050**, en Algérie :

Selon le scénario RCP 2.6, la température varie entre **0.8 à 1.4° C** avec une prédominance de **1.1°C**, et elle varie de **0.5 à 1.6° C** avec une prédominance de **1.1°C** selon le scénario RCP 6.0

- Evolution de moyenne annuelle de la température maximale simulée par le modèle **MPI-ESM-LR** à l'horizon de **2050**, en Algérie :

Selon le scénario RCP 2.6, la température varie entre **1 à 1.7° C** avec une prédominance de **1.3°C**, et elle varie de **1 à 1.8° C** avec une prédominance de **1.5°C** selon le scénario RCP 6.0

- Evolution de précipitations moyenne annuelle simulée par le modèle **MPI-ESM-LR** à l'horizon de **2050**, en Algérie :
Selon le scénario RCP 2.6, les précipitations varient entre **-38 à 118 mm** avec une prédominance de **-15 mm**, et elles varient de **-45 à 145 mm** avec une prédominance de **-20 mm** selon le scénario RCP 6.0
- Evolution de la température moyenne annuelle de surface simulée par le modèle **CNRM-CM5** à l'horizon de **2100**, en Algérie :
Selon le scénario RCP 2.6, la température varie entre **0.6 à 1.3° C** avec une prédominance de **0.8°C**, et elle varie de **1.4 à 2.9° C** avec une prédominance de **2.2°C** selon le scénario RCP 6.0
- Evolution de moyenne annuelle de la température minimale simulée par le modèle **CNRM-CM5** à l'horizon de **2100**, en Algérie :
Selon le scénario RCP 2.6, la température varie entre **0.4 à 1.3° C** avec une prédominance de **0.9°C**, et elle varie de **1.1 à 3.2° C** avec une prédominance de **2.4°C** selon le scénario RCP 6.0
- Evolution de moyenne annuelle de la température maximale simulée par le modèle **CNRM-CM5** à l'horizon de **2100**, en Algérie :
Selon le scénario RCP 2.6, la température varie entre **0.6 à 1.2° C** avec une prédominance de **0.9°C**, et elle varie de **1.4 à 2.9° C** avec une prédominance de **2.4°C** selon le scénario RCP 6.0
- Evolution de précipitations moyenne annuelle simulée par le modèle **CNRM-CM5** à l'horizon de **2100**, en Algérie :
Selon le scénario RCP 2.6, les précipitations varient entre **-14 à 34 mm** avec une prédominance de **0 mm**, et elles varient de **-35 à 82 mm** avec une prédominance de **-3 mm** selon le scénario RCP 6.0
- Evolution de la température moyenne annuelle de surface simulée par le modèle **MPI-ESM-LR** à l'horizon de **2100**, en Algérie :
Selon le scénario RCP 2.6, la température varie entre **0.8 à 1.4° C** avec une prédominance de **1.2°C**, et elle varie de **2 à 3.4° C** avec une prédominance de **2.7°C** selon le scénario RCP 6.0
- Evolution de moyenne annuelle de la température minimale simulée par le modèle **MPI-ESM-LR** à l'horizon de **2100**, en Algérie :

Selon le scénario RCP 2.6, la température varie entre **0.8 à 1.4° C** avec une prédominance de **1.1°C**, et elle varie de **1.9 à 3.4° C** avec une prédominance de **2.8°C** selon le scénario RCP 6.0

- Evolution de moyenne annuelle de la température maximale simulée par le modèle **MPI-ESM-LR** à l'horizon de **2050**, en Algérie :

Selon le scénario RCP 2.6, la température varie entre **0.8 à 1.5° C** avec une prédominance de **1.2°C**, et elle varie de **2.1 à 3.5° C** avec une prédominance de **2.9°C** selon le scénario RCP 6.0

- Evolution de précipitations moyenne annuelle simulée par le modèle **MPI-ESM-LR** à l'horizon de **2050**, en Algérie :

Selon le scénario RCP 2.6, les précipitations varient entre **-37 à 117 mm** avec une prédominance de **-16 mm**, et elles varient de **-90 à 266 mm** avec une prédominance de **-21 mm** selon le scénario RCP 6.0

Il est par conséquent impératif de procéder dès à présent aux études d'impacts sur les différents secteurs (agriculture, santé,.....)

Allen et Frame (2007) soulignent à cet effet l'importance de voir que les projections climatiques elles-mêmes sont appelées à évoluer et, considérant le lien entre changement climatique et émissions de GES, il est vraisemblable que notre appréciation future de leurs impacts (par exemple à travers l'évolution future des températures globales) ait une influence déterminante sur les émissions de GES et, par ricochet, sur l'évaluation des incertitudes ultérieures. Ce type de considération met en évidence l'importance de considérer des mesures d'adaptation souples, « adaptables » à un contexte de projection climatique évolutif et où les incertitudes sur les projections climatiques elles-mêmes évolueront au fil du temps.

Le scénario A1B (RCP 6.0) a été utilisé ici, en premier lieu car des données désagrégées le concernant étaient disponibles. Mais notons que c'est le scénario qui a été le plus étudié par la communauté scientifique et qui est le mieux documenté. Il s'agit d'un scénario « médian », ce qui ne signifie pas qu'il est le plus probable. L'incertitude liée au scénario est en général masquée par les autres incertitudes jusqu'au milieu du siècle. Elle devient importante à la fin du siècle.

Enfin, il serait nécessaire d'approfondir les recherches sur d'éventuelles tendances simulées afin de prendre les dispositions nécessaires en termes d'adaptation, ce qui aura sans doute des conséquences sur la planification des actions stratégiques du pays entre autres, les ressources en eau, la santé, l'agriculture...etc.

Bibliographie

- 📖 Abderrahmani Belaid, mémoire fin étude pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences Génie des Procédés Génie de l'environnement (Thème : Les risques climatiques et leurs impacts sur l'environnement), 2015.
- 📖 ARRHENIUS, S., 1866, "on the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground", *the London Edimburgh and Dublin Philosophical magazine and journal of science*.
- 📖 A.L...Berger and C. Nicolis (Editor), *New perspectives in climate Modeling* 1984.
- 📖 Alain Foucault et Dunod, *Climatologie et paléoclimatologie*, Paris, 2009.
- 📖 Docteur Sandrine Segovia-Kueny, *100 QUESTIONS pour comprendre et agir, Enjeux du changement climatique* (Préface du professeur Jean Jouzel, vice-président du GIEC (groupe lauréat du Prix Nobel de la paix 2007), médaille d'or du CNRS, 2009).
- 📖 E. Mustapha, *Changements climatiques et modélisation*, 1999.
- 📖 Farah Abdelhafid Karim, mémoire fin étude pour l'obtention du diplôme de Magistère en Ecologie et Environnement : Option : Pathologie des écosystèmes forestiers (Thème : Changement climatique ou variabilité climatique dans l'Est Algérien), 2014.
- 📖 GIEC, *Changements Climatiques 2013, Les éléments scientifiques, Résumé à l'intention des décideurs, Résumé technique et Foire aux questions* (Extraits de la contribution du Groupe de travail I au Cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat), 2013.
- 📖 HOUGHTON J.T. Y. DING, D. J. GRIGGS, M. NOGUER, J. P. VAN DER LINDEN, X. DAI, K. MASKELL, C. A JOHNSON (ed.), 2001a, *Climate Change 2001: the Science Basis*, Cambridge University Press. (The IPCC Third Assessment Report, ou TAR).
- 📖 IPCC , 1990, *climate change :the IPCC scientific assessment*, J.T. Houghton, G.J Jenkins et J.J. Ephraums (ed.), Cambridge University Press (The IPCC First Assessment Report, ou FAR.).
- 📖 IPCC , 1996, *climate change 1995, The science of climate Change*, J.T. Houghton et al (ed.), Cambridge University Press (The IPCC Second Assessment Report, ou SAR.).
- 📖 IPCC, 2001b, *climate change 2001: synthesis report*, R.T. Watson et al (ed.), a contribution of working Groups I, II and III to the third Assessment Report of the

IPCC, Cambridge University Press, New York (the TAR Synthesis report, incluant the summary for policymakers et the working group summaries).

- 📖 IPCC, *the Forth Assessment Report (FAR)*, 2007.
- 📖 Jean Louis FELLOUS et Catherine GAUTIER, Comprendre le changement climatique, (Odile Jacob, aout 2007).
- 📖 John Houghton (GIEC, Centre Hadley), Traduction de la 4^{eme} édition anglaise par Olivier Evrard, Le réchauffement climatique (un état des lieux complet) mars 2011.
- 📖 Jérôme Chappellaz, Olivier Godard, SylvestreHuet et Hervé Le Treut, Changementclimatique: les saviors et les possibles, 2010.
- 📖 GIEC, Le changement climatique et l'eau, Document technique VI du GIEC, 2008.
- 📖 GIEC, Introduction aux modèles climatiques simples employés dans le Deuxième RapportD'évaluation du GIEC, Février 1997.
- 📖 MatinBeniston, Changementsclimatiqueset impacts, de l'échelleglobale à l'échelle locale, 2^{eme} edition revue et mise à jour, 2012.
- 📖 Mahi Tabet Aoul, Développement et environnement au Maghreb, Contraintes et enjeux, Juillet 2010.
- 📖 Mahi Tabet Aoul, Impact s du changement climatique sur les agricultures et les ressources hydriques au Maghreb, Les notes d'alerte du CIHEAM, N° 4 8 – 4 juin 2008.
- 📖 Projet national ALG/98/G31, élaboration de la stratégie et du plan d'action national des changements climatiques, communication nationale initiale, Mars 2001.
- 📖 Projet GEF/PNUD 00039149, Seconde Communication Nationale de l'Algérie sur Les Changements Climatiques à la CCNUCC, Alger 2010.
- 📖 Sylvie Malardel, Fondamentaux de Météorologie à l'ecole du temps (2^{eme} Edition), janvier 2009.
- 📖 S. Kivouila et G. Issengue, première simulation climatiques à haute résolution à partir d'un modèle climatique régional en méditerranée, 2011

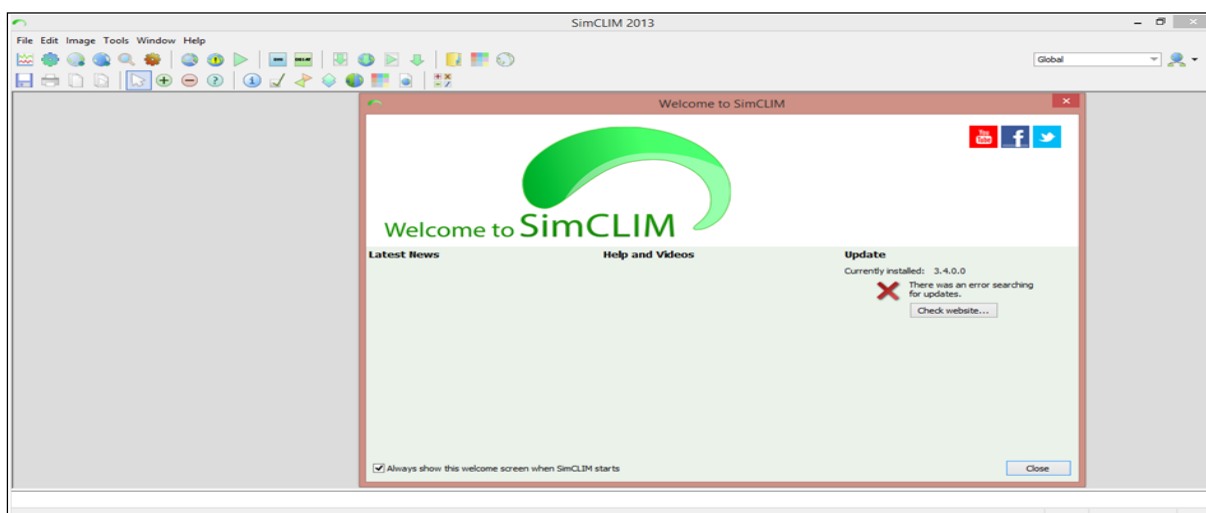
Sites internet :

- ✚ ASTR-UCL: www.climate.be.
- ✚ Convention & Protocole : www.unfccc.int.
- ✚ Conseil fédéral développement durable : www.cfdd.be.
- ✚ Campagne climat du Gvt : www.climat.be.
- ✚ CNRM (centre nationale de recherche en météorologie) : <http://www.cnrm.com>.
- ✚ Météo France : <http://www.meteoFrance.com>
- ✚ Met Office (Royaume-Uni) : <http://www.metoffice.gov.uk>.
- ✚ Site officiel de l'IPCC (GIEC) : www.ipcc.ch/.
- ✚ University Corporation for Atmospheric research (UCAR) : <http://www.ucar.edu/>.
- ✚ Site officiel de CIHEAM (Centre International des Hautes Eudes Agronomiques Méditerranéennes) : www.CIHEAM.org.

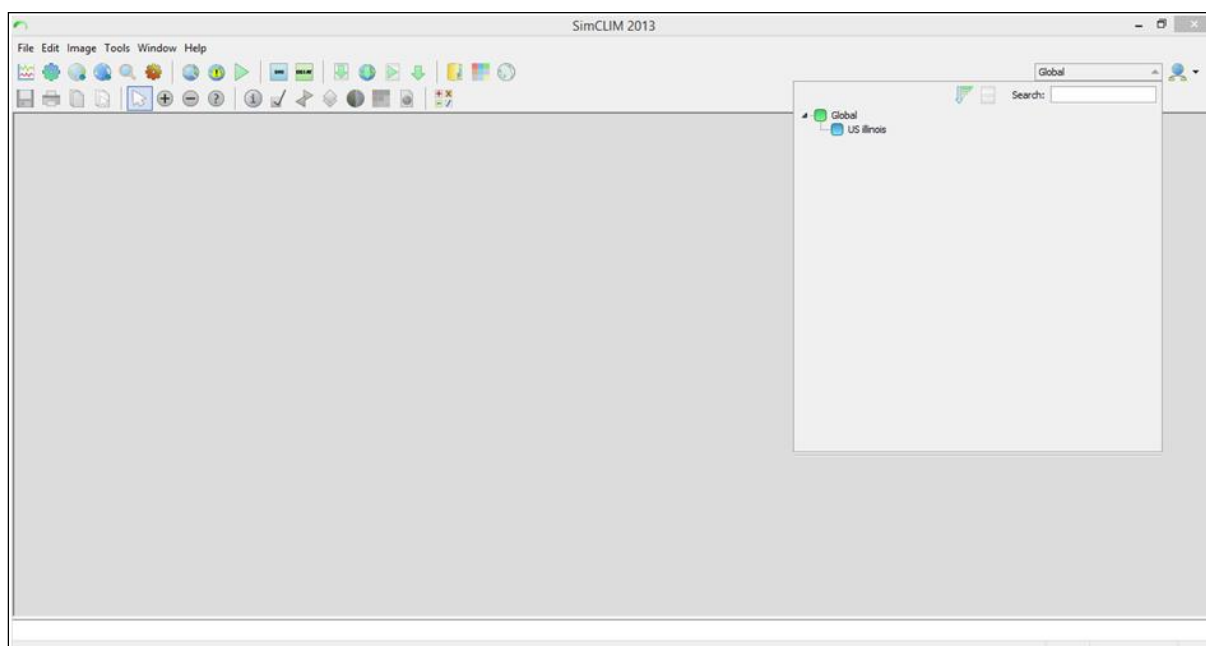
Annexe A

Les étapes de réalisation des cartes de projection des températures et des précipitations, par le biais du logiciel « SimCLIM2013 » :

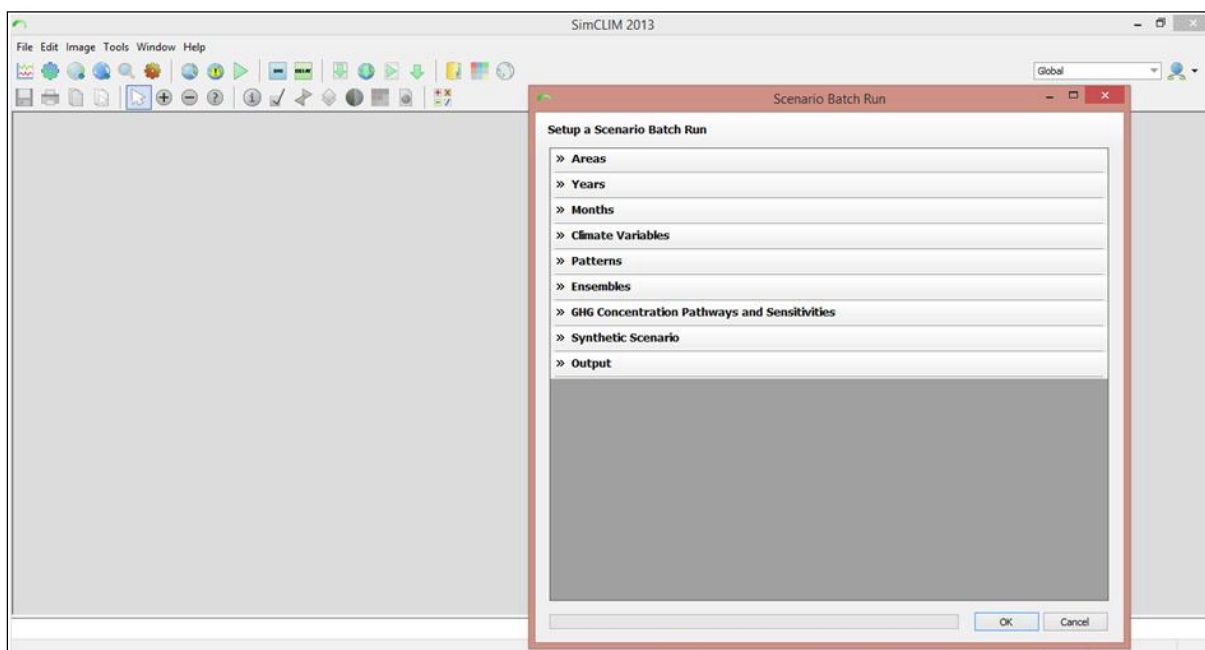
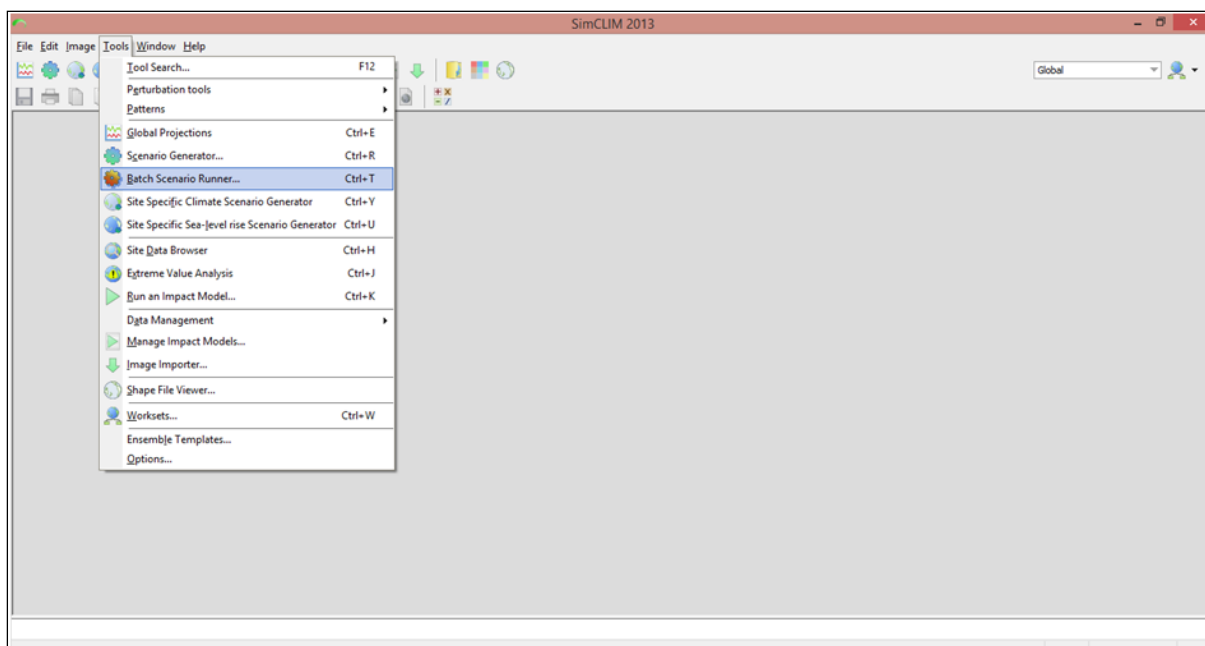
1. Ouvrir le logiciel SimCLIM2013



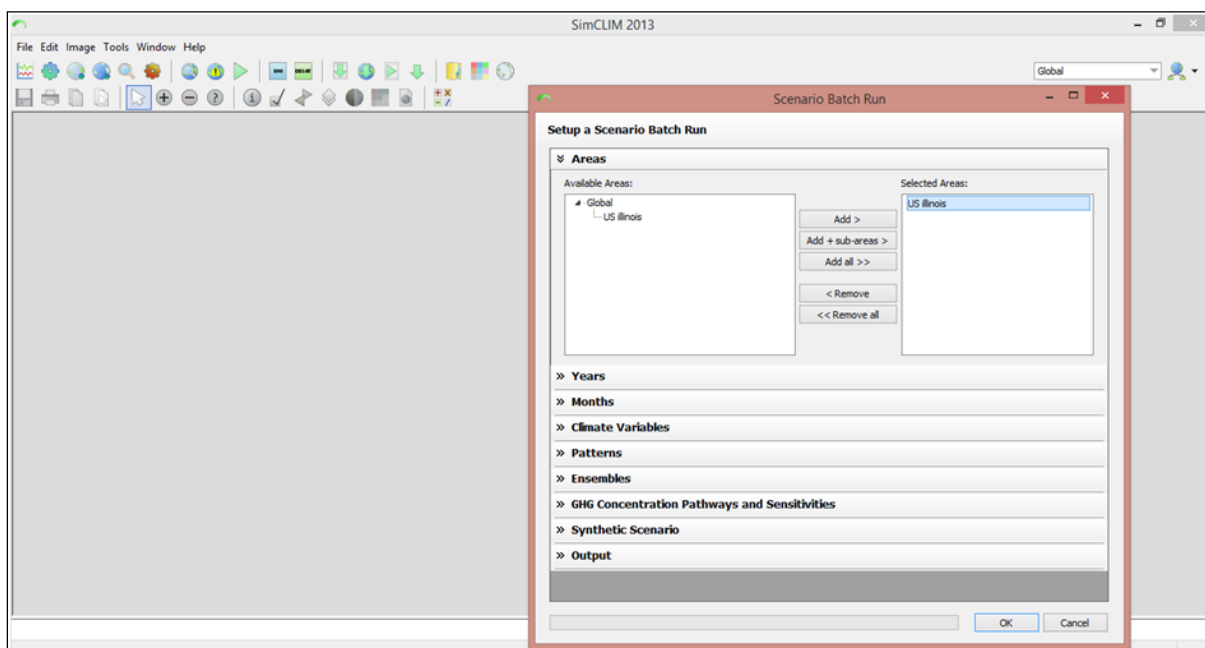
2. Pour générer un scénario, vous devez d'abord désigner une zone d'étude de l'icône en haut à droite « Global ». dans notre cas la zone étude est l'Algérie



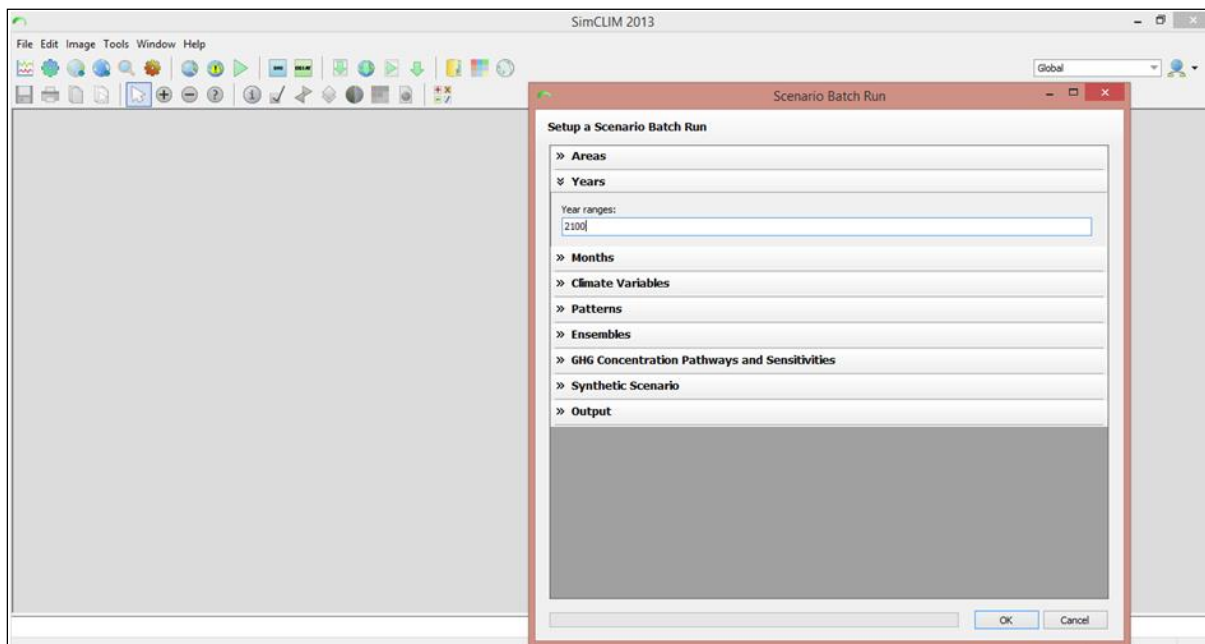
3. Ouvrir la boîte de dialogue « Batch Scenario Runner » :



4. Définir la zone d'étude « Areas » Dans notre cas « l'Algérie »

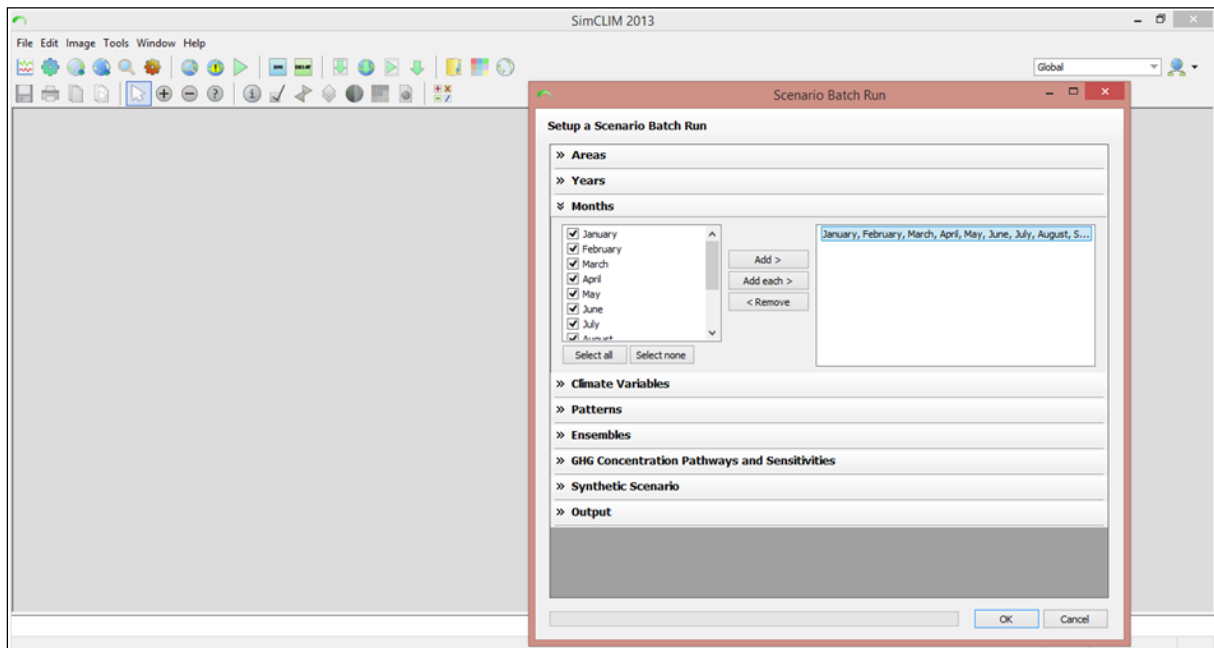


5. Choisir l'année de projection « Years » Dans notre cas « 2100 »



6. Choisir les mois « Months »

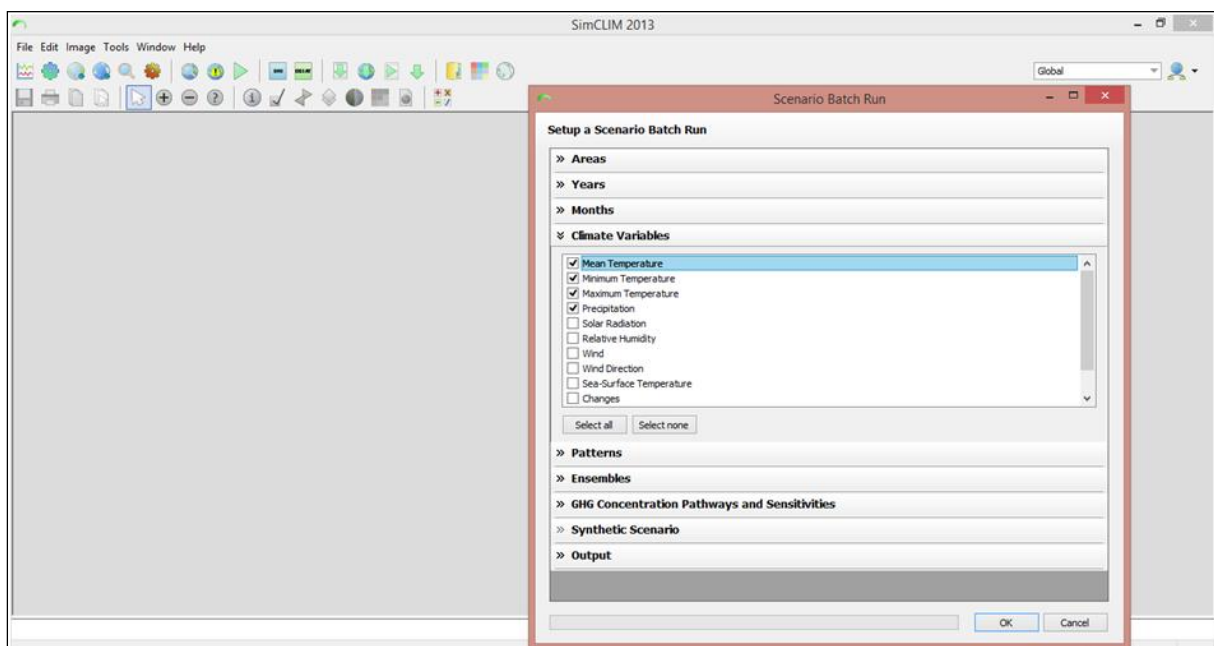
Dans notre cas une année : « Jan,Fev,.....Déc »



7. Définir les variables climatiques « Climates Variables »

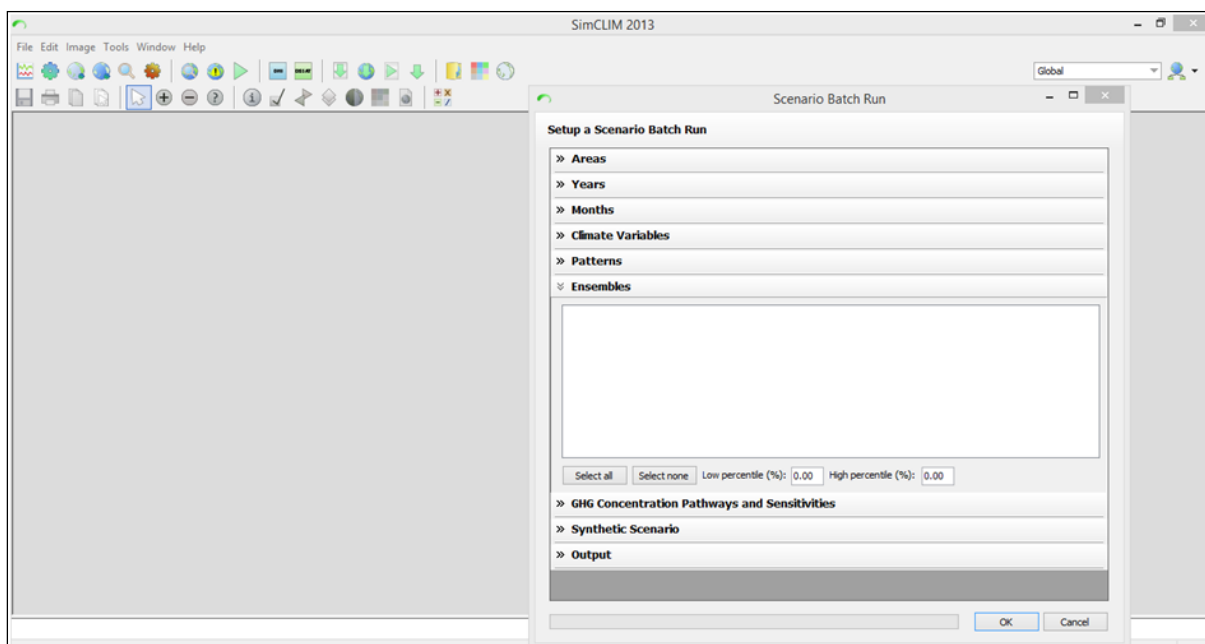
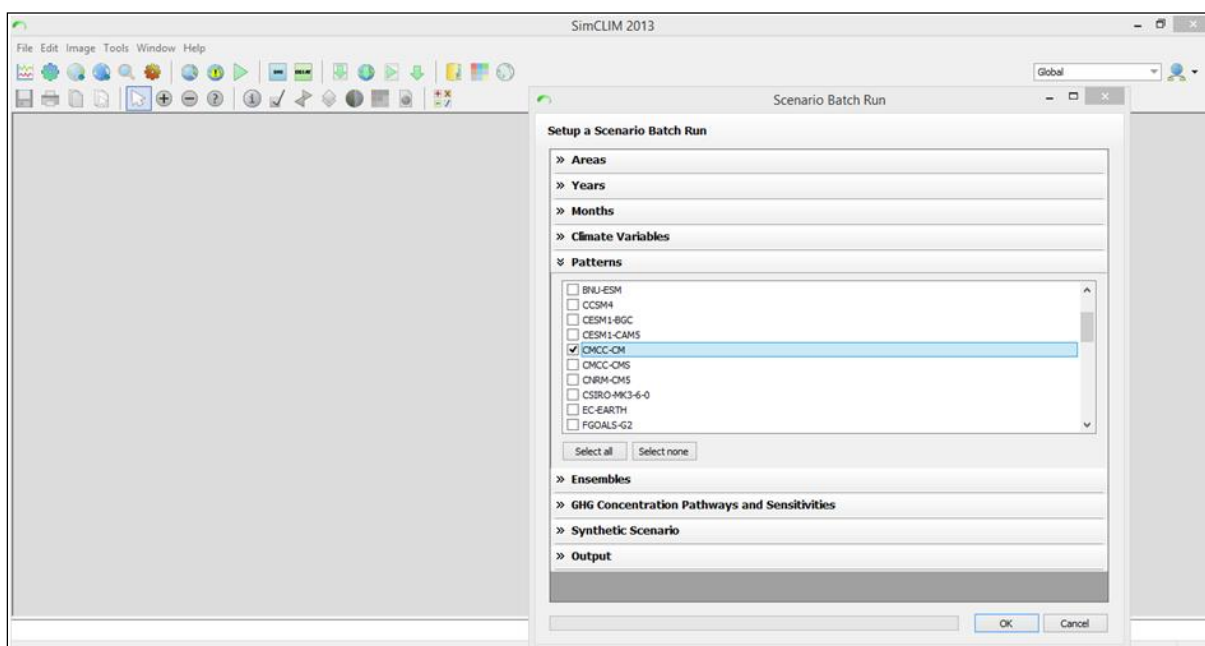
Dans notre cas :- Température Moyenne « Mean Temperature »

- Température Minimum « Minimum Temperature »
- Température Maximum « Maximum Temperature »
- Précipitation « Precipitation »



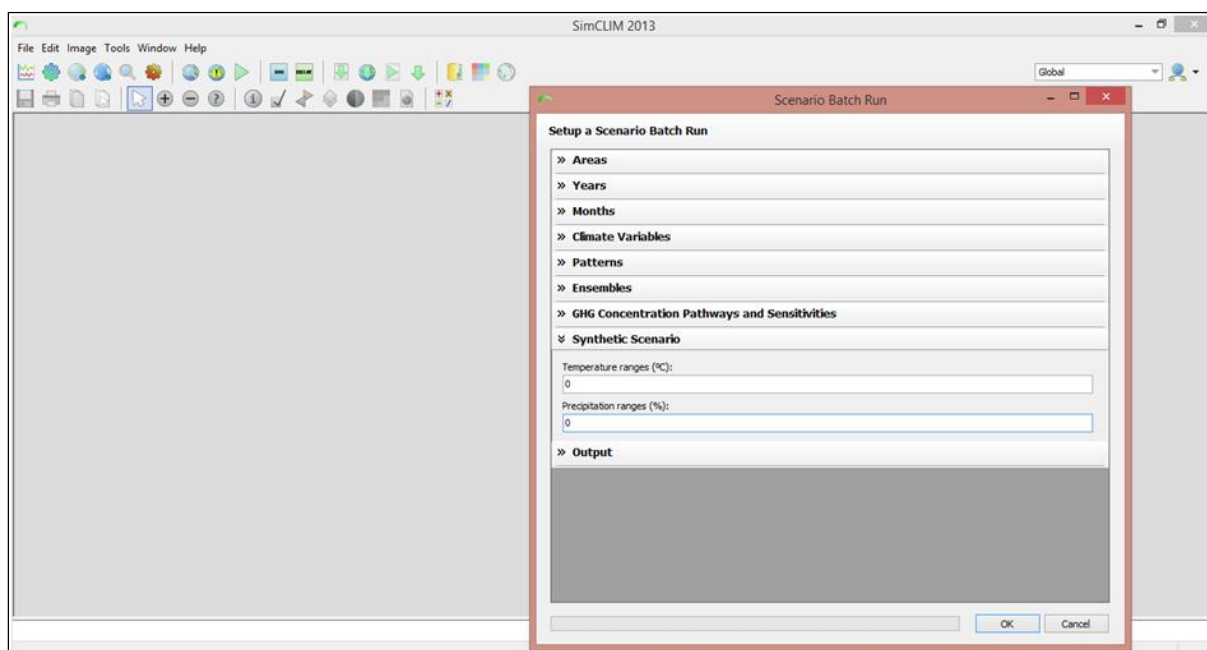
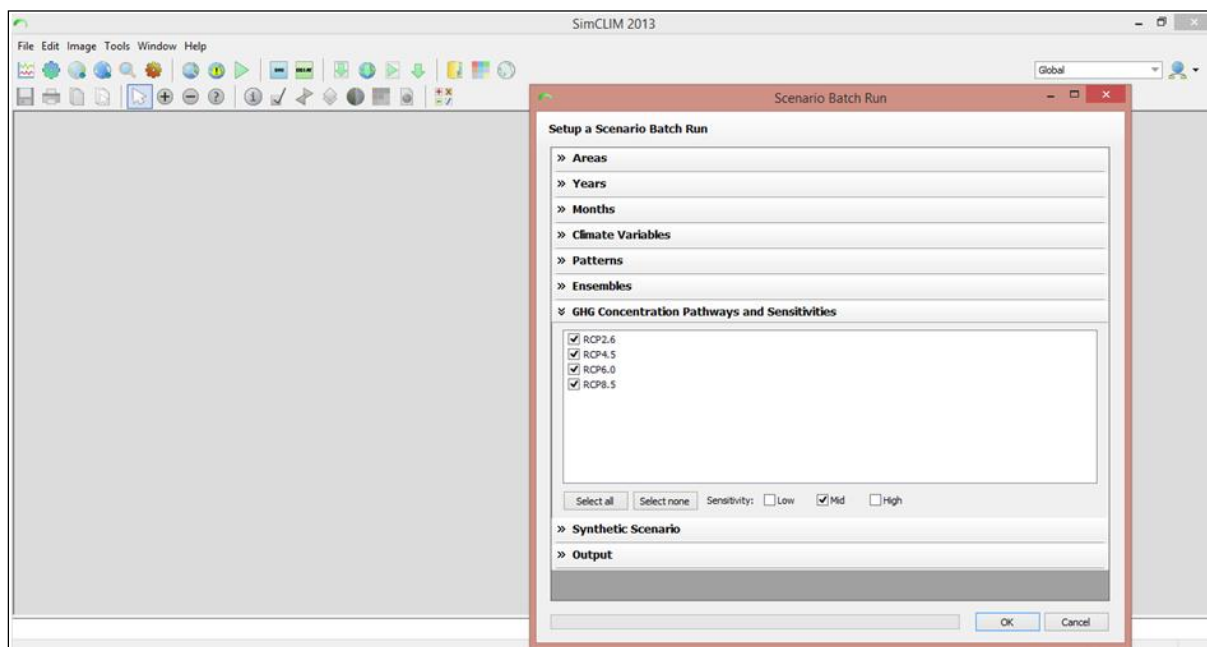
8. Choisir le modèle climatique

Dans notre cas on utilise le modèle français « CMCC-CM »



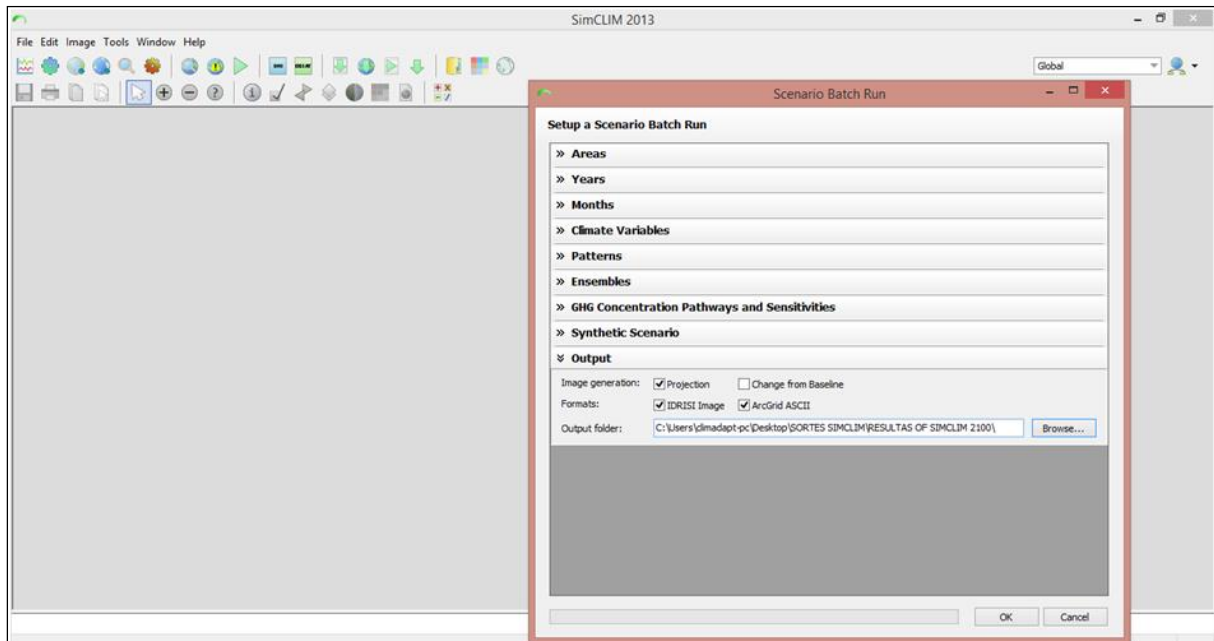
9. Choisir les différents scénarios RCP « GHG Concentration Pathways » et la sensibilité climatique « Sensitivities »

Dans notre cas on utilise les 4 scénarios ensemble (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.0), et la valeur de la sensibilité climatique est médiocre (Mid).



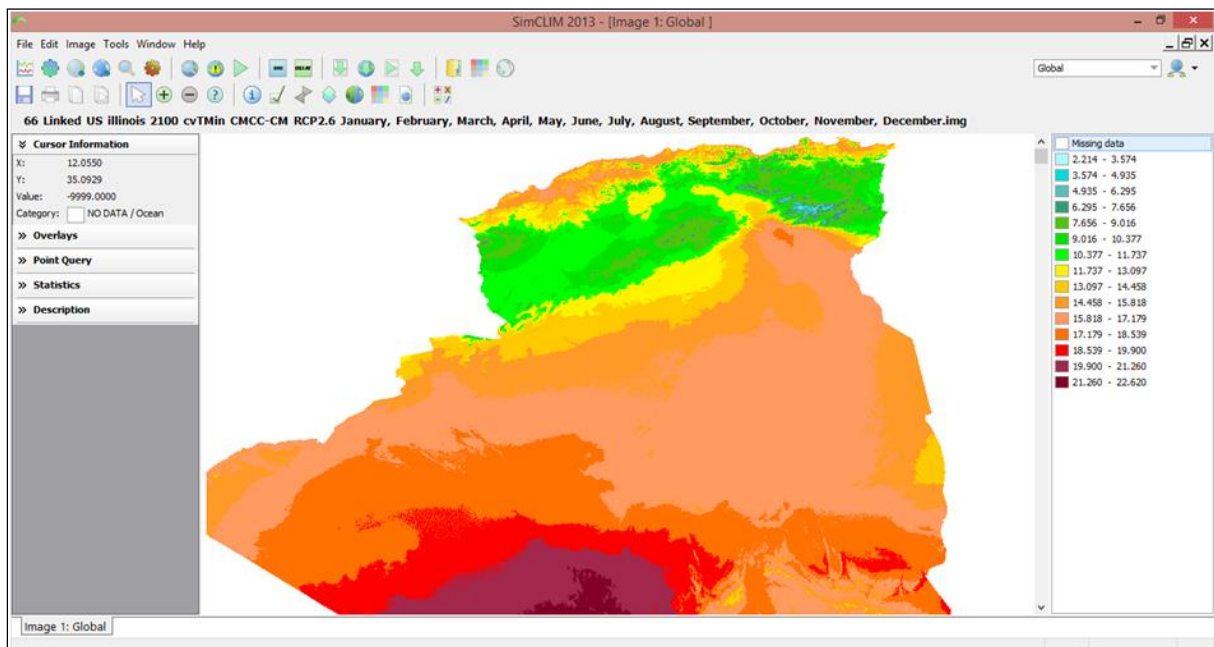
10. Destiner un dossier « Output Folder » pour les sorties (Résultats) du modèle

avec les choix suivants : -Projection -IDRISI image -ArcGrid ASCII

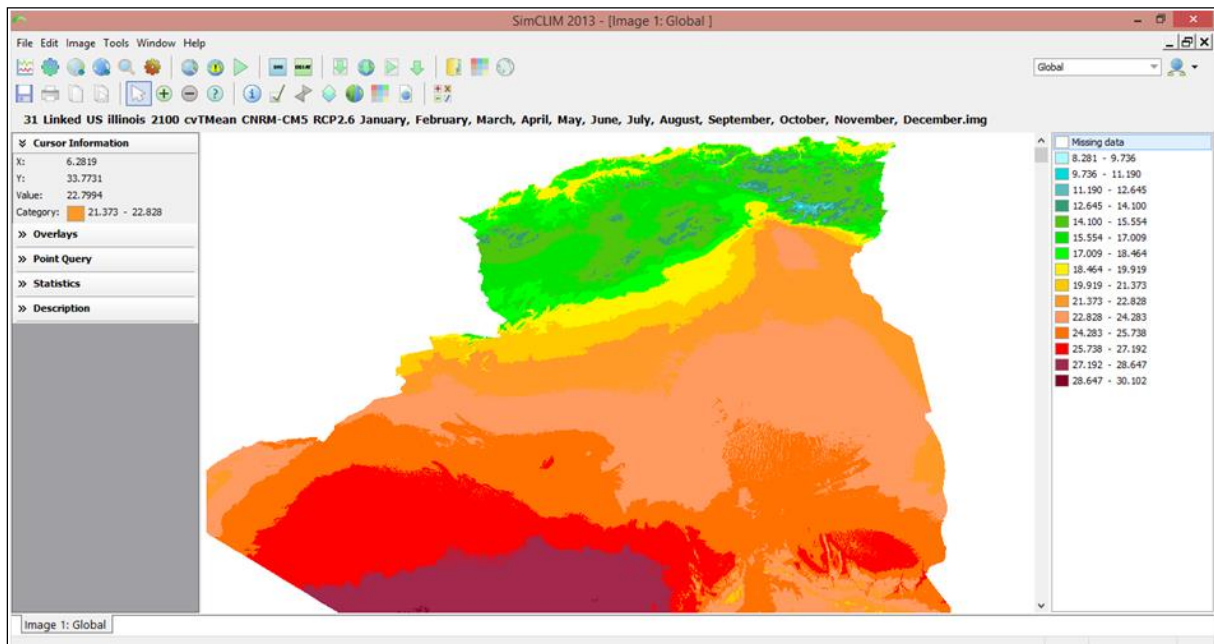


11. Les résultats de validation du modèle :

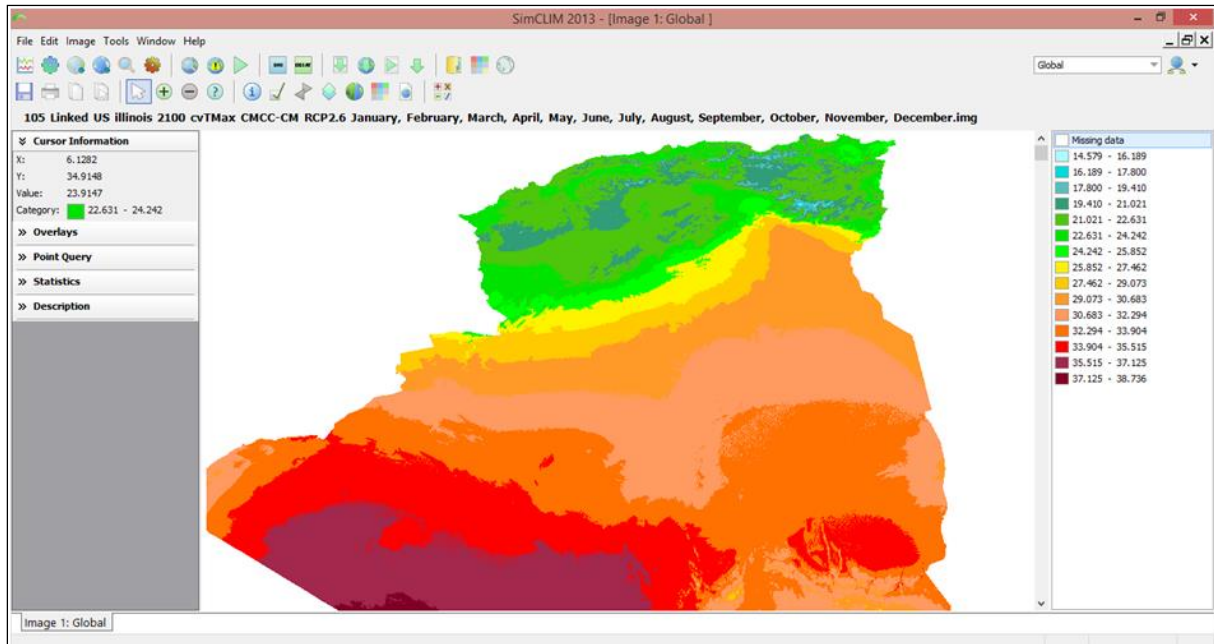
A. Carte d'évolution de la température minimale annuelle, selon le scénario RCP 2.6, durant l'année 2100 et par le modèle CMCC-CM.



B. Carte d'évolution de la température moyenne annuelle, selon le scenario RCP 2.6, durant l'année 2100 et par le modèle CMCC-CM.



C. Carte d'évolution de la température maximale annuelle, selon le scenario RCP 2.6, durant l'année 2100 et par le modèle CMCC-CM.



D. Carte d'évolution des précipitations maximales annuelles, selon le scénario RCP 2.6, durant l'année 2100 et par le modèle CMCC-CM.

